instalações elétricas

5ª edição



Ademaro A. M. B. Cotrim

PEARSON Prentice Hall

revisada e atualizada conforme a NBR 5410:2004

www.prenhall.com/cotrim_br

Site com material de apoio para professores e estudantes

instalações elétricas

5ª edição

Pearson Education

EMPRESA CIDADÃ

instalações elétricas

5ª edição

Ademaro A. M. B. Cotrim

Revisão e atualização técnicas

Hilton Moreno

Engenheiro eletricista pela Escola Politécnica da USP
Professor universitário, consultor, membro de comissões técnicas da ABNT

José Aquiles Baesso Grimoni

Professor associado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo — EPUSP
Diretor do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo — IEEUSP

PEARSON Prentice Hall

São Paulo

Brasil Argentina Colômbia Costa Rica Chile Espanha Guatemala México Peru Porto Rico Venezuela

ABDR EDITORA AFILIADA

© 2009 by Pearson Education do Brasil
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Pearson Education do Brasil.

Diretor editorial: Roger Trimer
Gerente editorial: Sabrina Cairo
Supervisor de produção editorial: Marcelo Françozo
Editora sênior: Tatiana Pavanelli Valsi
Editores: Henrique Zanardi de Sá e Renata de Paula Truyts
Preparação: Esther Alcântara
Revisão: Maria Alice da Costa, Renata G. V. de Assunção e Sandra Scapin
Capa: Alexandre Mieda
Editoração eletrônica e diagramação: ERJ Composição Editorial

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Cotrim, Ademaro A.M.B., 1939- .
Instalações elétricas / Ademaro A.M.B. Cotrim ; revisão e adaptação técnica José Aquiles Baesso Gromoni e Hilton Moreno. -- 5. ed. -- São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2009.

Bibliografia
ISBN 978-85-7605-208-1

1. Instalações elétricas I. Título.

08-10784 CDD-621.3192

Índice para catálogo sistemático:
1. Instalações elétricas : Engenharia 621.3192

2008
Direitos exclusivos para a língua portuguesa cedidos à
Pearson Education do Brasil Ltda.,
uma empresa do grupo Pearson Education
Av. Ermano Marchetti, 1435
CEP: 05038-001 – São Paulo – SP
Tel.: (11) 2178-8686 Fax: (11) 2178-8688
e-mail: vendas@pearsoned.com



Sumário

Capítulo 1 Fundamentos

1.1 Sistemas e instalações elétricas 1
1.2 Norma NBR 5410 1
1.3 Componentes das instalações 3
1.4 Tensões elétricas 5
1.5 Choque elétrico 7
1.6 Instalação de baixa tensão 8
1.7 Equipamentos de utilização 11
1.8 Circuitos 14
1.9 Influências externas 17
Exercícios 28

Capítulo 2 Conceitos fundamentais

2.1 Potência em corrente alternada 29
2.2 Cálculos práticos de circuitos 36
2.3 Princípio da compensação da energia reativa 41
2.4 Componentes simétricos 43
2.5 Valores por unidade 53
2.6 Análise de um circuito RL 59
2.7 Transformadores de potência 60
Exercícios 65

Capítulo 3 Proteção contra choques elétricos — fundamentos

3.1 A corrente elétrica no corpo humano 67
3.2 Fundamentos da proteção contra choques elétricos 75
3.3 Aterramento e eqüipotencialização 78
3.4 As isolações e os graus de proteção 93
3.5 Proteção básica (contra contatos diretos) 97
Exercícios 102

Capítulo 4 Planejamento da instalação

4.1 Demanda e curva de carga 103
4.2 Fatores de projeto 104
4.3 Potência de alimentação e corrente de projeto 108
4.4 Corrente de projeto em circuitos terminais 122
4.5 Conservação e uso racional de energia elétrica 123
4.6 O projeto de instalações elétricas 125
4.7 Simbologia gráfica 131
Exercícios 132

Capítulo 5 Linhas elétricas

5.1 Aspectos gerais 133
5.2 Materiais condutores, condutores e suas características 139
5.3 Isolações 151
5.4 Blindagens 154
5.5 Proteção 155
5.6 Níveis de isolamento dos cabos de potência 156
5.7 Perdas dielétricas 160
5.8 Comportamento dos cabos em condições de fogo e incêndio 161
5.9 Designação dos condutores e dos cabos isolados (de acordo com a NBR 9311) 162
5.10 Normas brasileiras de cabos de potência 167
5.11 Tipos de linhas elétricas 168
Exercícios 188

Capítulo 6 Dispositivos de manobra, proteção, comando e seccionamento não automático

6.1 Generalidades 189
6.2 Grandezas características dos dispositivos de proteção e de manobra 193
6.3 Dispositivos fusíveis de baixa tensão 195
6.4 Disjuntores de baixa tensão 204
6.5 Dispositivos a corrente diferencial-residual 214
6.6 Seccionamento não automático e comando 222
Exercícios 225

Capítulo 7 Medidas de proteção contra choques elétricos (I) — básica e supletiva

7.1 Introdução 227
7.2 Medida de proteção por limitação da tensão de alimentação — uso de extrabaixa tensão de segurança 227
7.3 Extrabaixa tensão funcional 229
7.4 Proteção pelo emprego de equipamentos classe II ou por isolação equivalente 230
7.5 Proteção em locais não condutores 231
7.6 Proteção por ligações eqüipotenciais locais não aterradas 232
7.7 Proteção por separação elétrica 232
Exercícios 234

Capítulo 8 Medidas de proteção contra choques elétricos (II) — seccionamento automático

8.1 Fundamentos da proteção por seccionamento automático da alimentação 235

8.2 Esquema TN 237
8.3 Esquema TT 249
8.4 Esquema IT 252
8.5 Aplicação dos esquemas de aterramento 258
8.6 Aplicação dos dispositivos DR 261
8.7 Condutores de proteção 268
8.8 Locais especiais 271
Exercícios 278

Capítulo 9 O aquecimento dos condutores e a queda de tensão

9.1 Introdução 281
9.2 Equilíbrio térmico e corrente em regime permanente nos condutores e cabos isolados 281
9.3 Capacidades de condução de corrente 286
9.4 Critério da capacidade de condução de corrente 296
9.5 Condutores em paralelo 297
9.6 Transitório térmico e tempo de sobrecarga admissível 298
9.7 Transitório térmico rápido 304
9.8 Queda de tensão nos circuitos 305
9.9 Seção do condutor neutro 311
Exercícios 314

Capítulo10 Cálculo de correntes de falta

10.1 Introdução 315
10.2 As fontes de correntes de falta 315
10.3 Análise da corrente de curto-circuito 316
10.4 Fundamentos dos cálculos de corrente de falta 318
10.5 Impedância de curto-circuito 322
10.6 Cálculo das correntes de falta presumidas 324
Exercícios 334

Capítulo 11 Proteção contra sobrecorrentes

11.1 Caracterização das sobrecorrentes 335
11.2 Limitação da duração de uma corrente de sobrecarga 336
11.3 A integral de Joule 337
11.4 Critérios gerais da proteção contra sobrecorrentes 346
11.5 Proteção contra correntes de sobrecarga 349
11.6 Localização dos dispositivos de proteção contra correntes de sobrecargas 356
11.7 Omissão da proteção contra sobrecargas 356
11.8 Proteção contra correntes de curto-circuito 358
11.9 Localização dos dispositivos de proteção contra correntes de curto-circuito 360
11.10 Omissão da proteção contra curtos-circuitos 361
11.11 Proteção dos condutores de fase 361
11.12 Proteção do condutor neutro 362
11.13 Coordenação seletiva da proteção contra sobrecorrentes 363
Exercícios 368

Capítulo 12 Proteções contra sobretensões
12.1 Aspectos gerais 371
12.2 Sobretensões devidas às descargas atmosféricas (surtos de tensão) 371
12.3 Sobretensões causadas por falhas da isolação para outra instalação de tensão mais elevada 383
Exercícios 386

Capítulo 13 Dimensionamentos
13.1 Circuitos de motores 387
13.2 Circuitos que não contêm motores 394
13.3 Critério econômico para dimensionamento das linhas elétricas 411
Exercícios 418

Capítulo 14 Compensação da energia reativa
14.1 Introdução 419
14.2 Aspectos conceituais 420
14.3 Razões do baixo fator de potência e comportamento das instalações 422
14.4 Compensação da energia reativa 422
14.5 Métodos de compensação 424
14.6 Aspectos da carga — presença de harmônicas e regime de operação 429
Exercícios 433

Capítulo 15 Instalações de segurança e de reserva
15.1 Introdução 435
15.2 Conceitos básicos 436
15.3 Fontes de segurança e de reserva 436
15.4 Classificação das alimentações de segurança 437
15.5 Circuitos de segurança 437
Exercícios 438

Capítulo 16 Luminotécnica
16.1 Fundamentos 439
16.2 Tipos de lâmpadas 441
16.3 Cálculos práticos de iluminação interior 450
Exercícios 464

Apêndice A Influências externas
A.1 Seleção dos componentes em função das influências externas 465
A.2 Seleção das linhas elétricas em função das influências externas 465

Apêndice B Os eletrodos de fundação e a equalização de potencial
B.1 Os eletrodos de fundação e a prática alemã 478
B.2 Aterramento do SPDA 480
B.3 Compatibilidade eletromagnética 481
B.4 Resistência de aterramento 481
B.5 Barramento de eqüipotencialização principal (BEP) 481
B.6 Aterramento de antenas externas 483
B.7 Conclusão 484

Índice remissivo 485



Prefácio

A presente edição do livro *Instalações Elétricas*, mais do que atualizar seu conteúdo, adequando-o aos últimos requisitos da norma NBR 5410 e incluindo novos assuntos, mantém vivo o ideal do saudoso professor e engenheiro Ademaro Cotrim.

Incansável estudioso e divulgador dos temas ligados às instalações elétricas, o professor Cotrim foi, sem dúvida, referência para a engenharia elétrica nacional. Seu legado como professor, por meio deste livro, extrapolou as paredes das salas de aula nas quais alguns tiveram a felicidade de poder ouvi-lo. Além disso, provocou mudança estrutural na área de instalações elétricas — tão carente de modernização. Deixou, desde 2000, uma lacuna no meio profissional difícil de ser preenchida.

A obra magistral do professor Cotrim não poderia cair na obsolescência. É neste sentido que, desde a última publicação da norma NBR 5410, em 2004, e tendo em vista o surgimento de novos temas e tecnologias, crescia a demanda por uma adequada revisão e atualização do conteúdo do livro original.

Tendo o extremo cuidado de não alterar a essência e o estilo do texto do professor Cotrim, os professores e engenheiros eletricistas Hilton Moreno e José Aquiles Baesso Grimoni, com a colaboração de outros profissionais em alguns temas específicos, conseguiram revisar e atualizar o texto de forma bastante adequada. Além disso, ao apresentar no final de cada capítulo uma lista de exercícios, que não existiam nas edições anteriores, a presente edição se coloca como referência essencial e moderna no ensino de instalações elétricas no Brasil. Aos profissionais, entrega-se, com esta edição, um verdadeiro guia de entendimento da complexa norma NBR 5410, além de farta informação atualizada sobre conceitos, dimensionamentos, normalização, produtos e tecnologias ligadas ao setor.

O esforço de todos que, direta e indiretamente, colaboraram com a publicação desta obra é incentivo aos leitores no sentido de aproveitarem ao máximo o conteúdo deste livro. Dessa forma, estarão em contato com os ensinamentos eternos do professor Cotrim, um grande professor, profissional da engenharia e homem.

Aderbal de Arruda Penteado Jr.
Diretor da ARCESP
Professor doutor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



Apresentação

Hilton Moreno[1]
José Aquiles Baesso Grimoni[2]

Foi com indescritível honra e prazer que aceitamos o convite, e o desafio, de revisar e atualizar esta magnífica obra do saudoso professor Ademaro Cotrim. Apesar de não estar mais entre nós desde agosto de 2000, seu livro continua sendo um clássico e uma das principais referências bibliográficas do setor elétrico nacional.

Esta quinta edição foi totalmente baseada na norma "ABNT NBR 5410 — Instalações elétricas de baixa tensão", publicada em 2004 e em vigor no momento desta publicação.

Assim, esta obra tem como objetivo atualizar e adequar o texto de acordo com essa última edição da norma, além de acrescentar alguns temas, como iluminação, correção do fator de potência, harmônicas e proteção contra sobretensões.

Diferentemente das anteriores, esta edição inclui, ao final de cada capítulo, uma seção de perguntas que visam a aferir o grau de aprendizado do leitor. Destaque também para a nova diagramação e estilo de redação do livro, que torna sua leitura mais agradável e fácil, e para a atualização de alguns exemplos e para a inclusão de novos.



O livro conta, ainda, com um site de apoio exclusivo, para o qual desenvolvemos um interessante material. Nesse site, os alunos encontrarão uma planta-modelo de instalações elétricas e os professores têm acesso a apresentações em PowerPoint que auxiliam a utilização do livro em sala de aula. (Os editores alertam que, para ter acesso a esse conteúdo, os professores que adotam o livro devem entrar em contato com seu representante Pearson ou enviar um e-mail para universitarios@pearsoned.com.)

Sinceramente, esperamos que com esta contribuição possamos ajudar a manter este livro como referência no ensino/aprendizagem de instalações elétricas e como guia de utilização da norma ABNT NBR 5410 pelos profissionais do setor.

Por sua qualidade, esta nova edição — revisada e atualizada —, é livro-texto fundamental para diversas escolas de engenharia, nas disciplinas que tratam de instalações elétricas.

---

1. Hilton Moreno
   Engenheiro eletricista pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1980); consultor; professor titular de Instalações Elétricas da Escola de Engenharia Mauá (1987-2004); membro do Comitê Brasileiro de Eletricidade da ABNT, atuando, entre outras, na Comissão da norma ABNT NBR 5410. Membro do National Fire Protection Association (NFPA) dos Estados Unidos; autor e co-autor de vários livros na área elétrica, de diversos artigos técnicos sobre instalações elétricas e qualidade de energia; articulista da Revista de Eletricidade Moderna e colaborador de outras revistas técnicas especializadas; palestrante atuante com centenas de apresentações realizadas no Brasil e no exterior. Conselheiro da UL do Brasil Certificações e da Associação Brasileira de Engenheiros Eletricistas (ABEE-SP).
2. José Aquiles Baesso Grimoni
   Engenheiro eletricista (1980), mestre (1989) e doutor (1994) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Entre 1981 e 1988,trabalhou na ASEA, CESP , Brown-Boveri e FDTE e, a partir de 1989, tornou-se professor de graduação e, a partir de 1994, de pós-graduação da Escola Politécnica da USP. Entre 2003 e 2007, foi vice-diretor do Instituto de Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo (IEEUSP), do qual é diretor desde esse ano. Consultor de empresas de energia em projetos de pesquisa e desenvolvimento e professor da disciplina de Instalações Elétricas I da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desde 1993; autor de diversos artigos técnicos em revistas e congressos na área de energia elétrica e membro do IEEE e da ABEE-SP.



1 Fundamentos

1.1 Sistemas e instalações elétricas

Circuito elétrico é um conjunto de corpos, componentes ou meios, no qual é possível que haja corrente elétrica.

Um *sistema elétrico* é um circuito ou conjunto de circuitos elétricos inter-relacionados, constituído para determinada finalidade (Quadro 1.1). É formado, essencialmente, por componentes elétricos que conduzem (ou podem conduzir) corrente.

Já uma *instalação elétrica* inclui componentes elétricos que não conduzem corrente, mas que são essenciais ao seu funcionamento, tais como condutos, caixas e estrutura de suporte. Enfim, uma *instalação elétrica* é o sistema elétrico físico, ou seja, é o conjunto de componentes elétricos associados e coordenados entre si, composto para um fim específico.

Dessa forma, a cada instalação elétrica corresponderá um sistema elétrico.

Em um projeto elétrico, as plantas e os detalhes (por exemplo, cortes, esquemas unifilares e trifilares) representam a instalação, enquanto os circuitos elétricos envolventes representam o sistema.

Porém, observe que os termos "sistema elétrico" e "instalações elétricas" são utilizados como sinônimos por muitos autores e projetistas.

1.2 Norma NBR 5410

A NBR 5410 — Instalações Elétricas de Baixa Tensão (última edição da norma, de 2004), baseada na norma internacional IEC 60364 — Electrical Installations of Buildings, é a norma aplicada a todas as instalações elétricas cuja tensão nominal é igual ou inferior a 1.000 V em corrente alternada (CA) ou a 1.500 V em corrente contínua (CC).

As instalações que possuem tensão nominal superior a 1.000 V em CA e inferior a 36.200 V em CA são genericamente chamadas de *instalações elétricas de média tensão*. E as instalações com tensão nominal superior a 36.200 V em CA são genericamente chamadas *instalações elétricas de alta tensão*.

Por sua vez, as instalações com tensão nominal igual ou inferior a 50 V em CA ou a 120 V em CC são *instalações elétricas de extra baixa tensão*.

A NBR 5410 fixa as condições a que as instalações de baixa tensão devem atender, a fim de garantir seu funcionamento adequado, a segurança de pessoas e animais domésticos e a conservação de bens. Aplica-se a instalações novas e a reformas em instalações existentes, entendendo-se como "reforma", em princípio, qualquer ampliação de instalação existente (como criação de novos circuitos e alimentação de novos equipamentos), bem como qualquer substituição de componentes que implique alteração de circuito.

A norma abrange praticamente todos os tipos de instalação de baixa tensão, tais como:

- Edificações residenciais e comerciais, em geral.
- Estabelecimentos institucionais e de uso público.
- Estabelecimentos industriais.
- Estabelecimentos agropecuários e hortigranjeiros.
- Edificações pré-fabricadas.
- Reboques de acampamento (*trailers*), locais de acampamento (*campings*), marinas e locais análogos.
- Canteiros de obras, feiras, exposições e outras instalações temporárias.

Quadro 1.1 ■ Algumas definições contidas na norma NBR 5456

- *Fonte monofásica*: fonte que fornece uma única tensão elétrica (ou corrente) alternada.
- *Fonte polifásica*: fonte que fornece um conjunto de duas ou mais tensões elétricas (ou correntes) alternadas, inter-relacionadas, de mesma freqüência. Pode ser classificada de acordo com o número de fases. Por exemplo, fontes "bifásica", "trifásica", "hexafásica".
- *Fonte polifásica simétrica*: fonte polifásica cujas *m* tensões elétricas (ou correntes) têm a mesma forma de onda e a mesma amplitude, e cujas defasagens sucessivas são iguais a 360°/m.
- *Dispositivo monofásico*: fonte monofásica ou um dispositivo previsto para ser alimentado por uma fonte monofásica.
- *Dispositivo polifásico*: fonte polifásica ou um dispositivo previsto para ser alimentado por uma fonte polifásica.
- *Circuito monofásico*: circuito elétrico que compreende um conjunto de dispositivos monofásicos interligados.
- *Circuito polifásico*: circuito elétrico que compreende um conjunto de dispositivos polifásicos interligados.
- *Sistema monofásico*: caso particular de sistema polifásico, reduzido a uma única tensão de fase.
- *Sistema polifásico*: sistema elétrico constituído por um ou mais circuitos polifásicos.
- *Sistema polifásico simétrico*: sistema polifásico tal que, em representação gráfica, os fasores das tensões de fase podem ser dispostos segundo um polígono funicular regular fechado, de *m* lados.
- *Polígono funicular*: representação gráfica de um conjunto de vetores, deslocados paralelamente a si mesmos até que o ponto de aplicação de cada vetor coincida com a extremidade do vetor precedente e sua extremidade coincida com o ponto de aplicação do vetor subseqüente. *Nota*: Esse conceito é válido para a representação gráfica de fasores.
- *Tensão de fase*: cada uma das tensões de mesma freqüência e defasadas entre si que constituem um sistema ou circuito polifásico. Sinônimo: *tensão fase-neutro*.
- *Tensão de linha*: tensão entre duas fases de um circuito ou equipamentos polifásicos.

A norma aplica-se, também, a:

- Circuitos elétricos alimentados sob tensão nominal igual ou inferior a 1.000 V em CA, com freqüências inferiores a 400 Hz, ou a 1.500 V em CC.
- Circuitos elétricos que não os internos aos equipamentos, os quais, embora alimentados por meio de instalação com tensão igual ou inferior a 1.000 V em CA, funcionam com tensão superior a 1.000 V, como é o caso de circuitos de lâmpadas de descarga, de precipitadores eletrostáticos etc.
- Qualquer linha elétrica (ou fiação) que não seja especificamente coberta pelas normas dos equipamentos de utilização.
- Linhas elétricas fixas de sinal, com exceção dos circuitos internos dos equipamentos, relacionadas exclusivamente à segurança (contra choques elétricos, incêndios e efeitos térmicos em geral) e à compatibilidade eletromagnética.

Por sua vez, a norma não se aplica a:

- Instalações de distribuição de energia elétrica (redes) e de iluminação pública.
- Instalações de tração elétrica, de veículos automotores, embarcações e aeronaves.
- Instalações em minas.
- Instalações de cercas eletrificadas.
- Equipamentos para a supressão de perturbações radioelétricas, uma vez que eles não comprometam a segurança das instalações.
- Instalações específicas para proteção contra descargas atmosféricas diretas.

A NBR 5410 é complementada atualmente por outras duas normas: a NBR 13570 — Instalações Elétricas em Locais de Afluência de Público: Requisitos Específicos e a NBR 13534 — Instalações Elétricas de Baixa Tensão — Requisitos Específicos para Instalação em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde. Ambas complementam, quando necessário, prescrições de caráter geral contidas na NBR 5410, relativas a seus respectivos campos de aplicação.

A NBR 13570 aplica-se às instalações elétricas de locais como cinemas, teatros, danceterias, escolas, lojas, restaurantes, estádios, ginásios, circos e outros locais indicados, com capacidades mínimas de ocupação (nº de pessoas) especificadas.

A NBR 13534, por sua vez, aplica-se a determinados locais como hospitais, ambulatórios, unidades sanitárias; clínicas médicas, veterinárias e odontológicas; entre outros, tendo em vista a segurança dos pacientes.

Define-se **estabelecimento assistencial de saúde** (ou, simplesmente, **estabelecimento de saúde**) como o estabelecimento destinado ao atendimento médico, de enfermagem e paramédico (exame, tratamento, monitoramento, transporte etc.) de pessoas. Corresponde ao termo *health care facility* utilizado na língua inglesa.

Instalação elétrica em estabelecimento assistencial de saúde é definida como o conjunto de componentes e equipamentos (exceto os aparelhos eletromédicos) devidamente interligados e dispostos de maneira apropriada em áreas e locais de um estabelecimento assistencial de saúde, tendo em vista o suprimento, a transformação, o armazenamento, a distribuição e a utilização de energia elétrica de modo compatível com as necessidades e a segurança específicas de cada recinto para fins médicos (diagnósticos ou terapêuticos).

A terminologia de instalações elétricas de baixa tensão é tratada na norma NBR IEC 60050 (Vocabulário Eletrotécnico Internacional, em seu Capítulo 826 — Instalações Elétricas em Edificações).

1.3 Componentes das instalações

Nesta seção, abordaremos os principais componentes de uma instalação elétrica, a saber: componente, equipamento elétrico, aparelho elétrico, linha elétrica, dispositivo elétrico, carga elétrica, potência instalada, falta elétrica, sobrecarga, sobrecorrente e curto-circuito, corrente de fuga e corrente diferencial residual.

Componente

Componente de uma instalação elétrica é um termo empregado para designar itens da instalação que, dependendo do contexto, podem ser materiais, acessórios, dispositivos, instrumentos, equipamentos (de geração, conversão, transformação, transmissão, armazenamento, distribuição ou utilização de eletricidade), máquinas, conjuntos, ou mesmo segmentos ou partes da instalação (como linhas elétricas). Assim, um eletroduto e um conjunto de condutores isolados, por exemplo, são componentes de uma linha elétrica, visto ser ela constituída por condutores isolados contidos em eletroduto.

Equipamento elétrico

Um *equipamento elétrico* é uma unidade funcional, completa e distinta, que exerce uma ou mais funções elétricas relacionadas com geração, transmissão, distribuição ou utilização de energia elétrica, tal como máquinas, transformadores, dispositivos elétricos, aparelhos de medição, proteção e controle. Em particular, um *equipamento de utilização* é o equipamento elétrico destinado a converter energia elétrica em outra forma de energia diretamente utilizável (mecânica, térmica, luminosa, sonora etc.).

Em uma instalação elétrica, é possível ter os seguintes tipos de *equipamentos*:

- Equipamentos relacionados à fonte de energia elétrica da instalação, que são os transformadores, os geradores e as baterias.
- Dispositivos de comando (manobra) e proteção, tais como chaves, seccionadores, disjuntores, fusíveis e relés.
- Equipamentos de utilização, que podem ser classificados em equipamentos não-industriais (aparelhos eletrodomésticos e eletroprofissionais), equipamentos industriais (tornos, compressores, prensas, fornos) e aparelhos de iluminação.

Quanto à instalação, os equipamentos em geral podem ser classificados em:

- *Fixos*: são projetados para serem instalados permanentemente em um lugar determinado, por exemplo, um transformador (em um poste), um disjuntor (em um quadro), um aparelho de ar-condicionado (em parede ou janela).
- *Estacionários*: não são movimentados quando em funcionamento, não possuem alça para transporte ou possuem massa tal que não podem ser movimentados facilmente, como geladeira ou freezer doméstico, lavadora de roupa, microcomputador, disjuntor extraível (de um cubículo de subestação).
- *Portáteis*: são equipamentos movimentados quando em funcionamento ou que podem ser facilmente deslocados de um lugar para outro, mesmo quando ligados à fonte de alimentação, como é o caso de certos eletrodomésticos (por exemplo, enceradeira e aspirador de pó) ou aparelhos de medição (como multímetros).
- *Manuais*: são os portáteis, projetados para serem suportados pelas mãos durante utilização normal, como é o caso das ferramentas portáteis (por exemplo, furadeira, ferro de passar roupas e amperímetro tipo alicate).

Aparelho elétrico

O termo *aparelho elétrico* é usado para designar equipamentos de medição e certos equipamentos de utilização, tais como:

- *Aparelho eletrodoméstico*: destinado à utilização residencial ou análoga (por exemplo, aspirador de pó, liquidificador, lavadora de roupa e chuveiro elétrico).
- *Aparelho eletroprofissional*: destinado à utilização em estabelecimentos comerciais ou análogos (como máquina de escrever, copiadora e microcomputador), incluindo os equipamentos eletromédicos.
- *Aparelho de iluminação*: é o conjunto constituído, no caso mais geral, por uma ou mais lâmpadas, luminárias e acessórios (como reator e *starter*).

Linha elétrica

Uma *linha elétrica* é o conjunto constituído por um ou mais condutores, com os elementos de fixação ou suporte e, se for o caso, de proteção mecânica, destinado a transportar energia elétrica ou a transmitir sinais elétricos. O termo corresponde ao inglês *wiring system* e ao francês *canalization*.

As linhas elétricas podem ser constituídas apenas por condutores com os elementos de fixação *e/ou* suporte, como é o caso de condutores fixados a paredes ou tetos e de condutores fixados sobre isoladores (em paredes, tetos ou postes). Podem também ser formadas por condutores em condutos (como eletrodutos, eletrocalhas, bandejas). Observe que uma linha elétrica pode conter um ou vários circuitos (por exemplo, vários circuitos em uma bandeja ou em um eletroduto).

Dispositivo elétrico

Dispositivo elétrico é um equipamento integrante de um circuito elétrico cujo objetivo é desempenhar uma ou mais funções de manobra, proteção ou controle. É importante observar que um dispositivo elétrico pode, por sua vez, ser parte integrante de uma unidade maior. Normalmente, o termo é utilizado para designar um componente que consome um mínimo de energia elétrica no exercício de sua função (geralmente comando, manobra ou proteção), correspondendo ao termo *device*, como é definido na norma norte-americana NEC – National Electrical Code.

As principais funções exercidas pelos dispositivos elétricos (*device*) são:

- *Manobra*: mudança na configuração elétrica de um circuito, feita manual ou automaticamente.
- *Comando*: ação destinada a efetuar a manobra, que pode ser de desligamento, ligação ou variação da alimentação de energia elétrica de toda ou parte de uma instalação, sob condições de funcionamento normal.
- *Proteção*: ação automática provocada por dispositivos sensíveis a determinadas condições anormais que ocorrem em um circuito, a fim de evitar danos às pessoas e aos animais e evitar ou limitar danos a um sistema ou equipamento elétrico.
- *Controle*: ação de estabelecer o funcionamento de equipamentos elétricos sob determinadas condições de operação.

Carga elétrica

Carga elétrica, na linguagem usual de eletrotécnica, pode ter vários significados, como:

- Conjunto de valores das grandezas elétricas (e mecânicas, no caso de máquinas) que caracterizam as solicitações impostas a um equipamento elétrico (transformador, máquina etc.) em dado instante, por um circuito elétrico (ou dispositivo mecânico, no caso de máquina).
- Equipamento elétrico que absorve potência ativa.
- Potência (ou corrente) transferida por um equipamento elétrico.
- Potência instalada.

Por sua vez, para um circuito ou equipamento elétrico, fala-se em:

- *Funcionamento em carga*: quando o circuito ou o equipamento está transferindo ou absorvendo energia elétrica.
- *Funcionamento em vazio*: quando o circuito ou o equipamento não está transferindo energia, sendo porém normais as outras condições de funcionamento.

Para o equipamento de utilização, as cargas podem ainda ser caracterizadas como:

- *Cargas lineares*: constituídas pelos equipamentos elétricos cuja forma de onda de tensão e corrente de entrada permanecem senoidais em qualquer ponto de operação. É o caso típico de motores de indução usuais, da iluminação incandescente e de cargas de aquecimento.
- *Cargas não-lineares*: constituídas basicamente pelos equipamentos eletrônicos cujas tensão e corrente elétricas são distorcidas, contendo harmônicas.

O termo **equipamento de tecnologia da informação (ETI)** é usado pela IEC para designar todos os tipos de equipamentos elétricos e eletrônicos utilizados em instalações comerciais, bem como equipamentos de telecomunicação. É o caso de:

- Equipamentos de processamento de dados.
- Equipamentos de telecomunicação e transmissão de dados.
- Fontes CC que alimentam equipamentos de tecnologia da informação no interior de edificações.
- Equipamentos e instalações de CPCT (Centrais Privadas de Comutação Telefônica).
- Redes locais (LAN).
- Sistemas de alarme.
- Sistemas de automação predial.
- Sistemas CAM (*Computer Aided Manufacturing*).

Aparelhos com material ferromagnético e que operam na região de saturação são também cargas não-lineares, porque as harmônicas decorrentes dessa saturação distorcem as ondas de tensão e correntes.

Potência instalada

A *potência instalada* de uma instalação elétrica, de um setor de uma instalação ou de um conjunto de equipamentos de utilização é a soma das potências nominais dos equipamentos de utilização da instalação, do setor da instalação ou do conjunto de equipamentos. Um equipamento que absorve energia elétrica é um equipamento de utilização; dependendo da necessidade, a potência ativa consumida pode variar de zero até sua potência nominal.

Falta elétrica

Uma *falta elétrica* é o contato ou arco acidental entre partes com potenciais diferentes, bem como de uma ou mais dessas partes para a terra, em um sistema ou equipamento energizado. As faltas são geralmente causadas por falha de isolamento entre as partes, e a impedância entre elas pode ser baixa ou desprezível, quando então é denominada *falta direta*. Quando uma das partes envolvidas é a terra, tem-se *falta para terra*.

Um *curto-circuito* é um caminho condutor acidental ou intencional entre dois ou mais pontos de um circuito, por meio de uma impedância baixa ou desprezível. Quando o curto-circuito é acidental e os pontos estão sob potenciais diferentes, tem-se uma *falta direta*.

Sobrecarga, sobrecorrente e curto-circuito

Sobrecarga é a parte da carga existente em um circuito ou equipamento que excede a plena carga. Por sua vez, *sobrecorrente* é uma corrente que excede o valor nominal, que, no caso de condutores elétricos, é a capacidade de condução de corrente. Da mesma maneira, *sobretensão* é uma tensão cujo valor excede o maior valor nominal do sistema ou equipamento elétrico.

Nas instalações elétricas, as sobrecorrentes podem ser de dois tipos:

- *Corrente de falta:* corrente que flui de um condutor para outro ou de um condutor para a terra, no caso de uma falta e no local desta.
- *Corrente de sobrecarga:* sobrecorrente em um circuito ou equipamento elétrico sem que haja falta elétrica.

A chamada *corrente de curto-circuito*, caso particular de corrente de falta, é a sobrecorrente resultante de uma falta direta entre condutores energizados que apresentam uma diferença de potencial em funcionamento normal.

Corrente de fuga

A *corrente de fuga*, como conceito geral, é uma corrente muito pequena que percorre um caminho diferente do previsto. Em particular, a corrente de fuga de uma instalação ou de parte dela é a corrente que, na ausência de falta, flui através do dielétrico do material isolante dos condutores, ou, em caso de rede de distribuição de energia elétrica, flui sobre as saias dos isoladores (ver Tabela 3.9).

Corrente diferencial-residual

A *corrente diferencial-residual* (I_{DR}) de uma instalação ou de um setor de uma instalação é definida como a soma dos valores instantâneos das correntes que percorrem todos os condutores vivos do circuito considerado, em dado ponto.

Seja o circuito trifásico com neutro apresentado na Figura 1.1.

Supondo que o circuito esteja alimentando uma carga elétrica equilibrada ou desequilibrada, mas que não tenha corrente de fuga, pode-se determinar para o ponto P, de acordo com a 1ª Lei de Kirchhoff, que:

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_N = 0 \qquad (1.1)$$

onde i_1, i_2, i_3 e i_N são os fasores ou valores instantâneos das correntes que percorrem os condutores vivos do circuito. No caso da Expressão 1.1, a corrente diferencial-residual é igual a zero.

Caso haja corrente de fuga ou corrente de falta para a terra, a soma dos valores instantâneos das correntes será diferente de zero.

Pode-se, então, determinar, no caso geral, que

$$i_{DR} = i_1 + i_2 + i_3 + i_N \qquad (1.2)$$

ou, em termos fasoriais (ver diagrama fasorial da Figura 1.1), que

$$I_{DR} = I_1 + I_2 + I_3 + I_N \qquad (1.3)$$

onde I_1, I_2, I_3 e I_N são os fasores das correntes nos condutores e I_{DR} é o fasor da corrente diferencial residual.

1.4 Tensões elétricas

De acordo com a IEC 60038, os sistemas elétricos são caracterizados por três valores de tensão eficaz, a *nominal*, a *máxima* e a *mínima*.

A *tensão nominal* de um sistema é aquela que caracteriza a tensão do sistema e à qual são deferidas certas características operacionais.

As *tensões máxima* e *mínima* de um sistema são, respectivamente, o maior e o menor valor de tensão que podem ocorrer em condições normais de operação, em qualquer tempo e em qualquer ponto do sistema, excluídas as condições transitórias e anormais.

Para uma instalação elétrica, a *tensão nominal* (de acordo com a NBR IEC 60050 (Capítulo 826)) é definida como a tensão pela qual a instalação (ou parte dela) é designada.

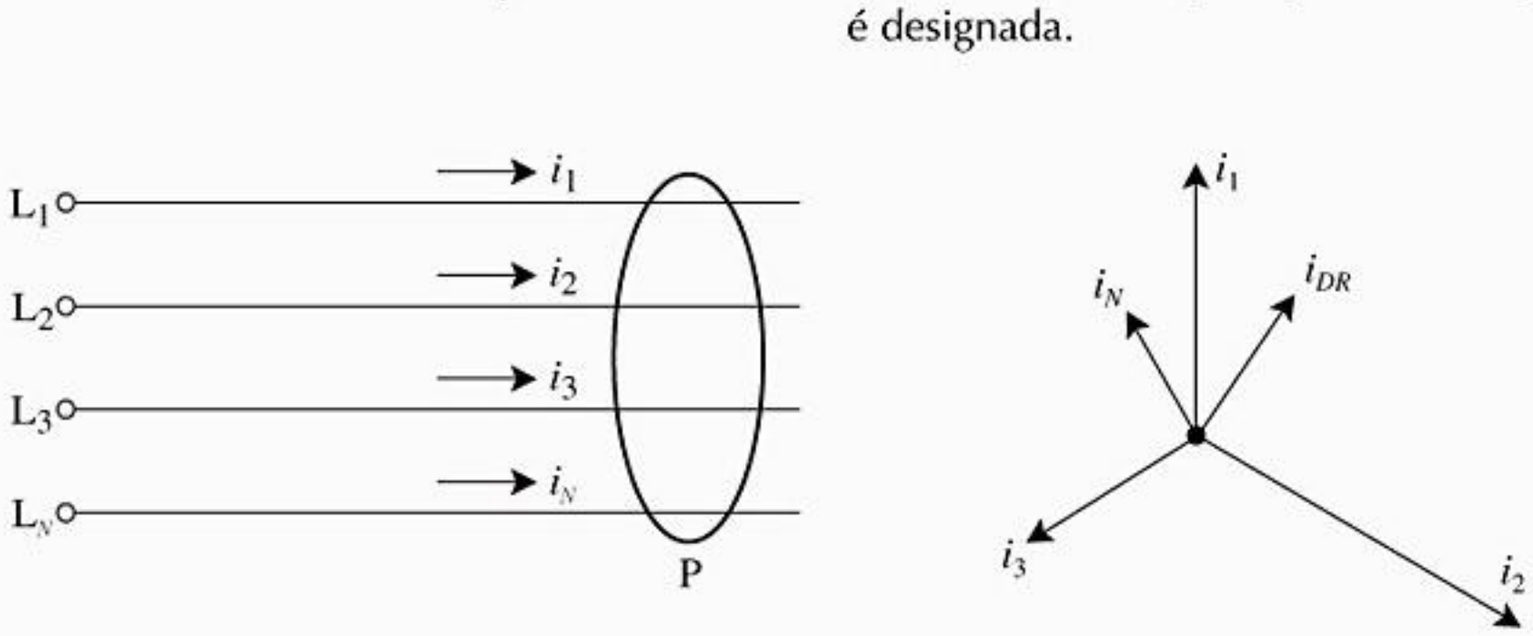


Figura 1.1 ■ Corrente diferencial-residual

Uma tensão igual ou inferior a 1.000 V em CA ou a 1.500 V em CC é considerada *baixa tensão*. Tensões superiores a esses valores são designadas genericamente como *altas tensões*. Já tensões iguais ou inferiores a 50 V em CA ou a 120 V em CC são chamadas *extra baixas tensões* (EBT) ou *extra-low voltage* (ELV).

Para sistemas com tensão nominal superior a 1.000 V, (isto é, de "alta tensão"), a IEC define a *tensão máxima de operação de um equipamento* como a maior tensão para a qual o equipamento é especificado, tendo em vista a isolação e outras características que possam ser referidas a essa tensão nas especificações respectivas.

Os equipamentos ligados a sistemas de baixa tensão (BT) devem ser caracterizados pela tensão nominal do sistema, tanto para isolação como para operação.

A Tabela 1.1 indica as tensões nominais de sistemas de baixa tensão, trifásico a três e quatro condutores, e de sistemas monofásicos a três condutores, freqüência de 60 Hz, incluindo os circuitos ligados a esses sistemas. As tensões são indicadas por U_o ou por U, onde U_o é a tensão entre fase e neutro e U é a tensão entre fases.

A respeito dessa tabela, são válidas as seguintes observações:

- A tabela corresponde à Tabela 1.1 da IEC 60038, de 2002.
- As tensões superiores a 230/400 V destinam-se exclusivamente a instalações industriais e comerciais de porte.
- As tensões nominais de equipamentos de utilização monofásicos não devem exceder 240 V.
- Recomenda-se que a tensão nos terminais de alimentação não difira da tensão nominal de mais de ± 10%.

A Tabela 1.2 mostra as tensões nominais de sistemas de baixa tensão usuais no Brasil, enquanto a Tabela 1.3 mostra as tensões nominais normalmente encontradas em nossos equipamentos de utilização.

A Tabela 1.4 indica as tensões nominais de sistemas de tensões acima de 1 kV e até 35 kV e as correspondentes tensões máximas para equipamentos, de acordo com a IEC. A Série I, para sistemas de 50 ou 60 Hz, corresponde aos padrões europeus, enquanto a Série II,

Tabela 1.1 ▪ Tensões nominais de sistemas de baixa tensão em 60 Hz (IEC)

Sistemas trifásicos a três e quatro condutores (V)	Sistemas monofásicos a três condutores (V)
230/400	120/240
277/480	—
480/690	—
1.000	—

Tabela 1.2 ▪ Tensões nominais de sistemas de baixa tensão usuais no Brasil

Sistemas trifásicos a três ou quatro condutores (V)	Sistemas monofásicos a dois ou três condutores (V)
115/230	110/220
120/208	115/230*
127/220*	127/254*
220/380*	220/440*
254/440*	120/440*

*Usadas em redes elétricas secundárias de distribuição.

Tabela 1.3 ▪ Tensões nominais de equipamentos de utilização usuais no Brasil

Tipo	Tensão nominal (V)
Monofásicos	110
	115
	120
	127
	220
Trifásicos	220
	380
	440

Tabela 1.4 ▪ Tensões nominais de sistemas com 1 kV < U_n ⩽ 35 kV e tensões máximas correspondentes para equipamentos (IEC)

Série I			Série II	
Tensão máxima para equipamentos (kV)	Tensão nominal de sistema (kV)		Tensão máxima para equipamentos (kV)	Tensão nominal de sistema (kV)
3,6	3,3*	3*	4,4	4,16*
7,2	6,6	6*	—	—
12	11	10	—	—
—	—	—	13,2	12,47
—	—	—	13,97	13,2
—	—	—	14,52	13,8*
(17,5)	—	(15)	—	—
24	22	20	—	—
—	—	—	26,4	24,94
36	33	—	—	—
—	—	—	36,5	34,5
40,5	—	35	—	—

para sistemas de 60 Hz, corresponde aos padrões norte-americanos. A IEC recomenda que um país utilize apenas uma das séries e, no caso de a opção ser pela Série I, que apenas uma das listas seja usada. São feitas as seguintes observações:

- Para um sistema normal da Série I, a tensão máxima e a tensão mínima não devem diferir além de ±10% da tensão nominal.
- Em um sistema normal da Série II, a tensão máxima não deve diferir além de +5% e a tensão mínima, além de –10% da tensão nominal.
- As tensões assinaladas com asterisco (*) não devem ser usadas em redes públicas.
- Estuda-se a unificação das tensões 33 e 35 kV.
- Os valores indicados entre parênteses são considerados não preferenciais.

Tabela 1.5 ▪ Tensões nominais na faixa 1 kV < U_n ⩽ 35 kV usuais no Brasil (kV)

2,4
3,8
4,16[1]
6,6[1]
13,2
13,8[1]
23,0[1]
34,5[1]

Nota:
1. Usadas em redes das concessionárias de distribuição de energia elétrica.

No Brasil, as tensões usuais – entre 1 kV e 35 kV – estão indicadas na Tabela 1.5.

1.5 Choque elétrico

Choque elétrico é a perturbação, de natureza e efeitos diversos, que se manifesta no organismo humano ou animal quando este é percorrido por uma corrente elétrica. Dependendo da intensidade e do tempo do choque elétrico, a corrente elétrica provoca maiores danos e efeitos fisiopatológicos no homem. No estudo da prevenção do choque elétrico, devem-se considerar:

- *Contatos diretos*: é quando a pessoa toca diretamente a parte viva (condutores energizados) de uma instalação elétrica. Isso pode ocorrer quando a pessoa toca inadvertidamente os condutores energizados ou outra parte do circuito de um equipamento, ou devido a uma fissura (falha) do material isolante do fio, como mostra a Figura 1.2.
- *Contatos indiretos*: contatos de pessoas ou animais com massas que ficaram sob tensão devido a uma falha de isolamento (Figura 1.2).

Os contatos diretos, que a cada ano provocam milhares de acidentes graves (muitos até fatais), são provocados geralmente por falha de isolamento, por ruptura ou remoção indevida de partes isolantes ou por imprudência de uma pessoa com relação a uma parte viva (energizada). Terminais de equipamentos não isolados, condutores e cabos com isolação danificada ou deteriorada e equipamentos de utilização velhos são as "fontes" mais comuns de choques por contatos diretos. Observe, por exemplo, que o (mau) hábito de desconectar o plugue da tomada

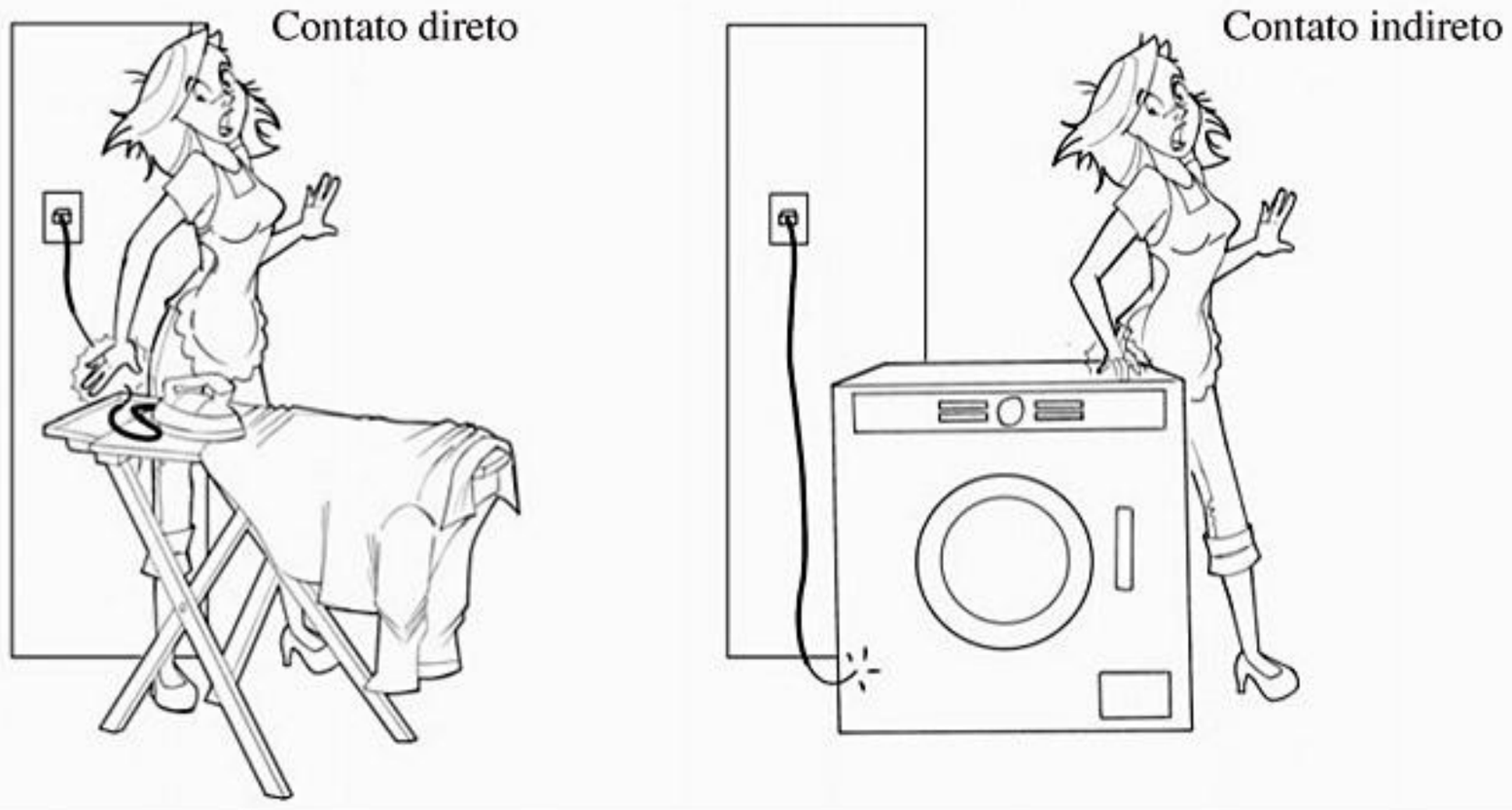


Figura 1.2 ▪ Contatos direto e indireto

de aparelhos portáteis (como ferro de passar roupa e secador de cabelos) ou móveis (como enceradeira e aspirador de pó) puxando o cabo ou o fio aumenta em muito o perigo de acidentes elétricos.

Os contatos indiretos, por sua vez, são particularmente perigosos, pois quando o usuário encosta a mão em uma massa (por exemplo, na carcaça de um equipamento de utilização), ele não suspeita de uma eventual energização acidental, provocada por falta ou por defeito interno no equipamento.

1.6 Instalação de baixa tensão[1]

As *instalações de baixa tensão* (BT) podem ser alimentadas de várias maneiras:

- Diretamente, por uma rede de distribuição de energia elétrica de baixa tensão, por meio de um ramal de ligação; é o caso típico de edificações residenciais, comerciais ou industriais de pequeno porte.
- De uma rede de distribuição de alta tensão (AT), por meio de uma subestação ou de um transformador exclusivo, de propriedade da concessionária; é o caso típico de instalações residenciais de uso coletivo (apartamentos) e comerciais de grande porte.
- De uma rede de distribuição de alta tensão, por meio de uma subestação de propriedade do consumidor; é o caso típico de edificações industriais e comerciais de médio e grande portes.
- Por fonte autônoma, como é o caso de instalações de segurança ou de instalações situadas fora de zonas servidas por concessionárias.

1. As definições apresentadas neste texto estão de acordo com as normas NBR 5460 e NBR IEC 60050 (826) e com a terminologia usual das concessionárias de energia elétrica.

Alimentação diretamente em baixa tensão

A *entrada de serviço* é o conjunto de equipamentos, condutores e acessórios instalados entre o ponto de derivação da rede da concessionária e o quadro de medição ou proteção, estando este incluído.

O *ponto de entrega* é o ponto até onde a concessionária deve fornecer energia elétrica, participando dos investimentos necessários e responsabilizando-se pela execução dos serviços, pela operação e pela manutenção, não sendo necessariamente o ponto de medição. O ponto de entrega é o ponto a partir do qual se aplica a NBR 5410:2004.

A *entrada consumidora* é o conjunto de equipamentos, condutores e acessórios instalados entre o ponto de entrega e o quadro de proteção e medição, estando este incluído.

O *ramal de ligação* é o conjunto de condutores e acessórios instalados entre o ponto de derivação da rede da concessionária e o ponto de entrega.

O *ramal de entrada* é o conjunto de condutores e acessórios instalados entre o ponto de entrega e o quadro de proteção e medição.

A Figura 1.3 mostra esquematicamente os componentes da entrada de serviço.

Alimentação em alta tensão

Uma *subestação* é uma instalação elétrica destinada a manobra, transformação *e/ou* outra forma de conversão de energia elétrica. Quando esse termo é empregado sozinho, subentende-se uma subestação de transformação.

Observe que: na Figura 1.3, a proteção está localizada antes da medição, mas algumas concessionárias do Brasil a utilizam depois da medição.

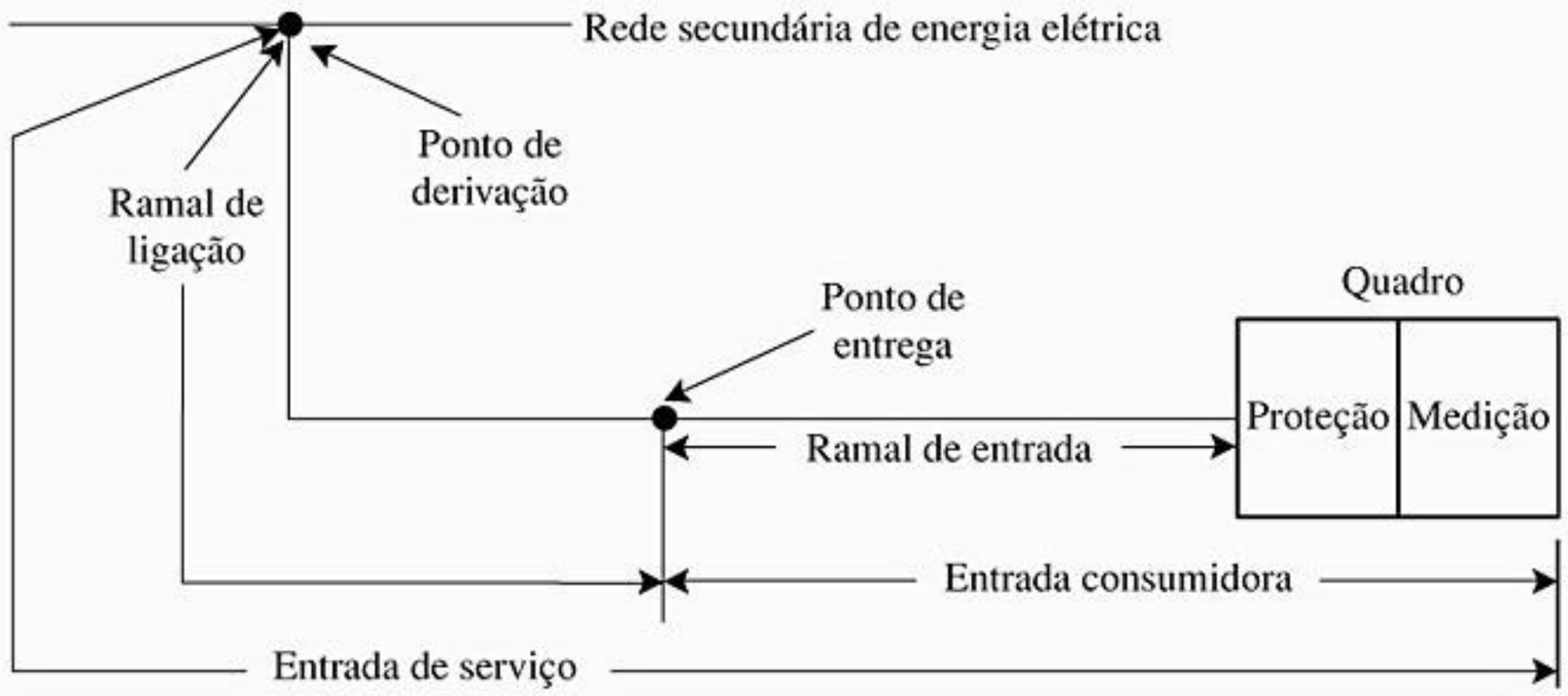


Figura 1.3 ■ Esquema básico de entrada de serviço

Unidade consumidora

Chama-se *unidade consumidora* a instalação elétrica pertencente a um único consumidor, e que recebe energia em um só ponto, com sua respectiva medição.

É importante observar que, no caso de edificações de uso coletivo – residenciais ou comerciais – com vários consumidores, a cada unidade consumidora (apartamento, conjunto de salas, loja, administração etc.) corresponde uma instalação elétrica cuja origem está localizada nos terminais de saída do respectivo dispositivo geral de comando e proteção, ou do medidor, se for o caso.

Tensão nominal e tensão de serviço

A *tensão nominal* de uma instalação de baixa tensão de uma unidade consumidora é a tensão na origem da instalação, ou seja, no ponto de entrega.

A *tensão de serviço* pode, por razões óbvias, ser diferente da tensão nominal; no entanto, em todos os cálculos que envolvem tensão, a nominal é a considerada. A Resolução da ANEEL nº 505, de novembro de 2001, define a tensão nominal na origem da instalação, bem como a variação permitida.

Circuito

Um *circuito de uma instalação elétrica* é o conjunto de componentes da instalação alimentados da mesma origem e protegidos pelo mesmo dispositivo de proteção. Em uma instalação há dois tipos de circuitos: os de distribuição e os terminais.

Um *circuito de distribuição* é o circuito que alimenta um ou mais quadros de distribuição, e um *circuito terminal* é aquele que está ligado diretamente a equipamentos de utilização ou a tomadas de corrente.

Quadro de distribuição

Um *quadro de distribuição* é um equipamento elétrico que recebe energia elétrica de uma alimentação (em alguns casos mais de uma) e a distribui a um ou mais circuitos. Pode, também, desempenhar funções de proteção, seccionamento, controle e medição. Um *quadro* (de distribuição) *terminal* é aquele que alimenta exclusivamente circuitos terminais. A Figura 1.4 traz alguns exemplos, com circuitos e quadros de distribuição e circuitos e quadros terminais.

Verifica-se, então, que o termo "quadro de distribuição" é absolutamente geral e inclui desde os simples "quadros de luz" até os mais complexos CCMs (centros de controle de motores).

Tomada de corrente e ponto de tomada

Uma *tomada de corrente* pode ser definida como um dispositivo elétrico com contatos ligados permanentemente a uma fonte de energia elétrica, que alimenta um equipamento de utilização por meio da conexão de um plugue.

Um ponto de tomada, de acordo com a NBR 5410, é um ponto de utilização em que a conexão do equipamento ou dos equipamentos a serem alimentados é feita por meio de tomada de corrente. E pode conter uma ou mais tomadas de corrente. Além disso, um ponto de tomada pode ser classificado, entre outros critérios, de acordo com a tensão do circuito que o alimenta, o número de tomadas de corrente nele previsto, o tipo de equipamento a ser alimentado e a corrente nominal das tomadas de corrente nele utilizadas. Veja na Figura 1.5 o exemplo de um ponto de tomada com quatro tomadas 2P+T (modelo conforme NBR 14136).

Em uma instalação, podem-se distinguir:

- *Tomadas de uso específico*, nas quais são ligados equipamentos fixos, por exemplo, aparelhos de ar-condicionado e certos equipamentos estacionários de maior porte, como é o caso de máquinas copiadoras.
- *Tomadas de uso geral*, nas quais são ligados equipamentos móveis, portáteis e estacionários.

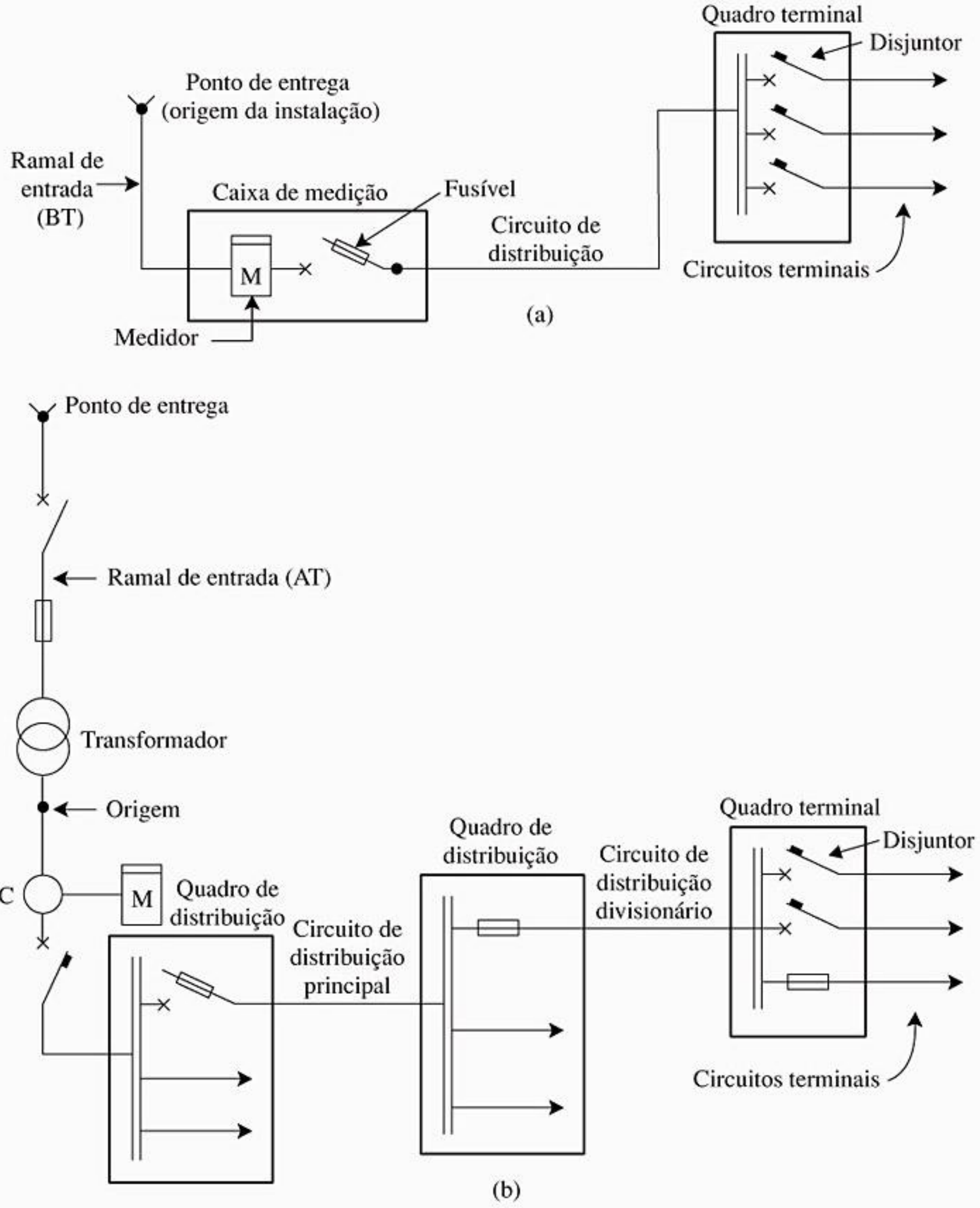


Figura 1.4 ▪ Esquemas típicos de instalações: (a) alimentação por rede pública BT; (b) alimentação por rede pública AT

Pontos de uso específico

Pode-se ainda falar em *pontos de uso específico*, que geralmente são caixas de ligação, nas quais são ligados equipamentos fixos (que não utilizam plugues). É o caso da maior parte dos equipamentos industriais e de certos equipamentos eletrodomésticos e eletroprofissionais.

Instalações temporárias

Instalação temporária é uma instalação elétrica prevista para uma duração limitada às circunstâncias que a motivam. São admitidas durante um período de construção, reparos, manutenção, reformas ou demolições, instalação de estruturas ou equipamentos.



Figura 1.5 ▪ Ponto de tomada com quatro tomadas 2P+T

Podem ser considerados três tipos de instalações temporárias:

- *Instalação de reparos*: substitui uma instalação defeituosa e é necessária sempre que ocorre um acidente que impede o funcionamento de uma instalação existente ou de um de seus setores.
- *Instalação de trabalho*: permite reparos ou modificações em uma instalação existente, sem interromper seu funcionamento.
- *Instalação semipermanente*: destinada a atividades não habituais ou que se repetem periodicamente, como é o caso das "instalações em canteiros de obras", assim consideradas as que se destinam à construção de edificações novas, aos trabalhos de reforma, modificação, ampliação ou demolição de edificações existentes, bem como à construção de obras públicas (como redes de água, gás, telefonia, energia elétrica e obras viárias).

Serviços de segurança

O *Sistema de Alimentação Elétrica para Serviços de Segurança* (SAESS) é o sistema que mantém o funcionamento de equipamentos *e/ou* instalações essenciais à segurança das pessoas e à salubridade, quando exigido pela legislação local, para evitar danos ao meio ambiente ou a outros materiais. O SAESS compreende a fonte, os circuitos até os terminais dos equipamentos de utilização e, eventualmente, os próprios equipamentos de utilização. Como exemplos de aplicação do SAESS, podem-se citar:

- Iluminação de segurança (ou de emergência).
- Sinalização de rotas de fuga para a evacuação de locais.
- Sistemas de detecção de fumaça e fogo.
- Sistemas de exaustão de fumaça e gases tóxicos.
- Bombas de água para incêndio.
- Compressores para sistemas de extinção de incêndio;
- Certos equipamentos eletromédicos.
- Certos processos industriais (como na indústria petroquímica e de cimento) cuja interrupção pode trazer problemas de segurança.
- Certos serviços específicos, como iluminação de pistas de pouso em aeroportos e heliportos, de túneis, entre outros.

1.7 Equipamentos de utilização

Classificação

Os equipamentos de utilização podem ser classificados em três grandes categorias: aparelhos de iluminação, equipamentos industriais ou análogos e equipamentos não-industriais.

Aparelhos de iluminação

Os *aparelhos de iluminação* estão presentes em qualquer local e em todo tipo de instalação. Podem ser classificados, de acordo com o tipo de fonte utilizada, em:

- *Aparelhos incandescentes*: utilizam as lâmpadas incandescentes comuns ou refletoras e as halógenas.
- *Aparelhos de descarga*: utilizam lâmpadas de descarga, que podem ser fluorescentes, de vapor de mercúrio, de vapor de sódio, de multivapores metálicos etc.

Equipamentos industriais ou análogos

Os *equipamentos industriais ou análogos* são os utilizados nas áreas de produção das indústrias e em outras aplicações bem específicas. Podem ser classificados em:

- E*quipamentos de força motriz*: inclui compressores, ventiladores, bombas, equipamentos de levantamento (como elevadores e guindastes) e equipamentos de transporte (como pórticos, pontes rolantes e correias transportadoras).
- *Máquinas-ferramentas*: inclui de tornos e fresas até as máquinas operatrizes mais potentes e sofisticadas.
- *Fornos elétricos*: que são os fornos a arco elétrico, à resistência elétrica e de indução.
- *Caldeiras elétricas*: são as caldeiras à resistência e a eletrodo.
- *Equipamentos de solda elétrica*: de eletrodo ou ponto a ponto.

Equipamentos não-industriais

Os *equipamentos não-industriais* são utilizados em locais comerciais, institucionais, residenciais etc. e até mesmo em indústrias fora das áreas de produção (em escritórios, depósitos e laboratórios). Podem ser classificados em:

- *Aparelhos eletrodomésticos* (ver definição na Seção 1.3).
- *Aparelhos eletroprofissionais* (ver definição na Seção 1.3): inclui desde uma simples máquina de escrever até um sofisticado equipamento de processamento de dados.
- *Equipamentos de ventilação, exaustão, aquecimento e ar-condicionado*: são todos os equipamentos impostos pelos sistemas industriais de ventilação, aquecimento ambiental e ar-condicionado. Observe que os ventiladores e os circuladores de ar portáteis, assim como os aparelhos de ar-condicionado (de parede ou de janela) e os aquecedores de ambiente portáteis, são considerados "aparelhos eletrodomésticos".

- *Equipamentos hidráulicos e sanitários*: inclui todos os equipamentos associados aos sistemas hidráulicos e sanitários das edificações, tais como bombas de recalque, compressores de ar, bombas de vácuo, bombas de esgoto e ejetores de poços.
- *Equipamentos de aquecimento de água*: inclui aquecedores e caldeiras utilizados para aquecimento de água em edificações, excluindo-se os chuveiros e torneiras elétricos e os aquecedores residenciais, classificados como "aparelhos eletrodomésticos".
- *Equipamentos de transporte vertical*: inclui os elevadores, as escadas rolantes e os monta-cargas.
- *Equipamentos de cozinhas e lavanderias*: equipamentos utilizados em cozinhas e lavanderias industriais, comerciais e institucionais, com exceção de "eletro-domésticos" típicos de cozinhas e lavanderias residenciais e de pequenas cozinhas comerciais.
- *Equipamentos especiais*: aqueles que não se enquadram nas categorias anteriores, tais como equipamentos hospitalares e equipamentos de laboratórios.
- *Equipamentos de tecnologia da informação (ETI)*: termo empregado pela NBR 5410 para designar, principalmente, equipamentos concebidos com o objetivo de receber dados de uma fonte externa (por meio de linha de entrada de dados ou pelo teclado) ou de processar os dados recebidos (por exemplo, executar cálculos, transformar ou registrar os dados, arquivá-los, triá-los, memorizá-los, transferi-los), ou, ainda, de fornecer dados de saída (seja a outro equipamento, seja reproduzindo dados ou imagens). São exemplos de ETIs:
  - Equipamentos de telecomunicação e de transmissão de dados.
  - Equipamentos de processamento de dados.
  - Instalações que utilizam transmissão de sinais com retorno pela terra, interna ou externamente ligadas a uma edificação.
  - Equipamentos e instalações de centrais privadas de comutação telefônica (PABX).
  - Redes locais (LAN) de computadores.
  - Sistemas de alarme contra incêndios e contra roubo.
  - Sistemas de automação predial.
  - Sistemas CAM (*Computer Aided Manufacturing*) e outros que utilizam computadores.

Equipamentos a motor

Os equipamentos de utilização acionados por motores constituem a maior parte dos equipamentos de uso industrial ou análogos e boa parte dos equipamentos não-industriais. Neles, são utilizados motores de corrente alternada e motores de corrente contínua.

Tipos de motores elétricos

Os *motores de corrente contínua* (Figura 1.6) necessitam de uma fonte de corrente contínua ou retificada e podem funcionar com velocidade ajustável entre limites amplos. São usados principalmente em aplicações específicas que exigem conjugados elevados e/ou variação de velocidade, como em prensas, tração elétrica e alguns tipos de máquinas-ferramentas.

Os *motores de corrente alternada* são os mais usados, uma vez que a corrente alternada é a mais comum, pois é obtida diretamente das fontes usuais. Eles podem ser síncronos ou de indução.

Os *motores síncronos* com velocidade fixa são utilizados para grandes cargas (em virtude de seu alto custo para aparelhos menores) ou quando se necessita de velocidade constante. Graças a seu fator de potência elevado e variável, são também usados na correção de fator de potência, necessitando de fonte de corrente contínua ou retificada para sua excitação, além de exigirem um complexo equipamento de controle.

Os *motores de indução* funcionam com velocidade praticamente constante abaixo da velocidade síncrona, e variam ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Por sua robustez e pelo baixo custo, são os motores mais utilizados, principalmente os do tipo gaiola (Figura 1.7), e são adequados para a maioria dos equipamentos encontrados na indústria.

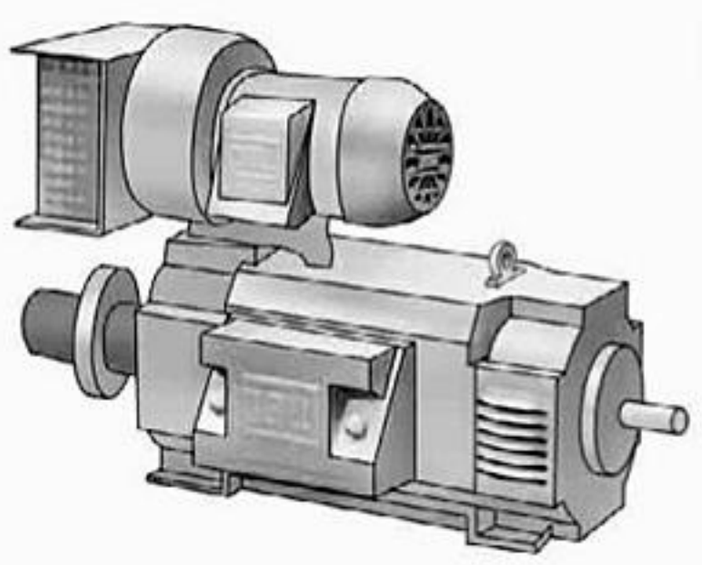


Figura 1.6 ▪ Motor de corrente contínua

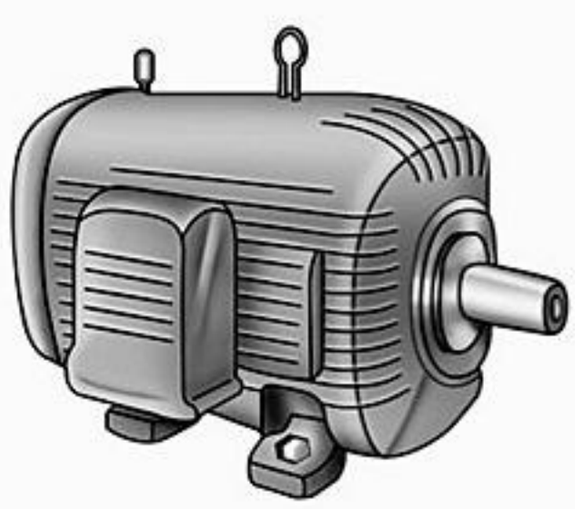


Figura 1.7 ▪ Motor de indução tipo gaiola

No Quadro 1.2, são apresentadas definições sucintas dos tipos de máquinas elétricas, que são equipamentos de utilização.

Corrente de partida de motores

As cargas constituídas por motores elétricos apresentam características peculiares, uma vez que a corrente absorvida durante a partida é bastante superior à de funcionamento normal em carga. Na partida, o rotor do motor de indução está parado, portanto a corrente elétrica inicial é grande. Com o aumento da rotação do rotor, a corrente de alimentação decresce até atingir seu valor em regime permanente. Considerando partida direta do motor de indução trifásico, a corrente de partida pode ser:

- Ip = 4,2 a 9 I_N, para motores de dois pólos.
- Ip = 4,2 a 7 I_N, para motores com mais de dois pólos (valor médio de 6 I_N).

Para motores de indução de anéis ou de corrente contínua, a corrente de partida depende da resistência do circuito da partida do rotor valendo, em média, 2,5 I_N.

Classificação dos equipamentos a motores elétricos

A potência absorvida em funcionamento é determinada pela potência mecânica do eixo, solicitada pela carga acionada. A NBR 5410 classifica os equipamentos a motor utilizados em aplicações normais em dois grupos principais:

- *Cargas industriais e similares*: constituídas por motores de indução trifásicos tipo gaiola, com potências nominais unitárias não superiores a 150 kW (200 CV), acionando cargas em regime S1 (contínuo), e com características conforme a NBR 7094.
- *Cargas residenciais e comerciais*: constituídas por motores com potências nominais não superiores a 1,5 kW (2 CV), integrando aparelhos eletrodomésticos e eletroprofissionais.

Essa classificação cobre a maioria das aplicações práticas.

Características nominais

Os equipamentos de utilização são caracterizados por *valores nominais*, especificados e garantidos pelos fabricantes, para condições de funcionamento estabelecidas. Assim, tem-se:

- *Corrente nominal (I_N):* corrente cujo valor é especificado pelo fabricante do equipamento de utilização, em A.
- *Tensão nominal (U_N):* tensão atribuída a um equipamento por seu fabricante, e que serve de referência para o projeto, funcionamento e realização de ensaios, em V.
- *Potência nominal (P_N ou S_N):* potência (ativa ou aparente) de entrada atribuída pelo fabricante, quando o equipamento funciona sob tensão e freqüência nominais, na temperatura normal e com carga normal ou na condição adequada de dissipação de calor, em W, kW ou VA, kVA.
- *Freqüência nominal (em Hz):* freqüência atribuída pelo fabricante e à qual são referidas as outras grandezas nominais do equipamento, geralmente de 50 ou 60 Hz.

No caso de equipamentos de utilização do tipo motor, a potência nominal indicada na placa é a potência mecânica útil no eixo do rotor (em kW ou CV), isto é, a potência de saída no seu eixo. De maneira semelhante, para certos aparelhos de iluminação, a potência nominal indicada é a potência (total) das lâmpadas. Em ambos os casos deve ser considerado o *rendimento* (h), razão entre a potência de saída (designada por P'_N) e a potência de entrada (designada por P_N).

$$\eta = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} = \frac{P'_N}{P_N}$$

O *fator de potência nominal* (cos Φ_N) é definido como a razão entre a potência nominal ativa (P_N) e a potência nominal aparente (S_N).

$$\cos \Phi = \frac{P_N}{S_N}$$

A Figura 1.8 representa simbolicamente um equipamento genérico de utilização.

Podem-se determinar, para os equipamentos de utilização, as seguintes expressões relacionando os valores nominais:

$$P_N = t \cdot U_N \cdot I_N \cdot cos\ \Phi_N \qquad (1.4)$$

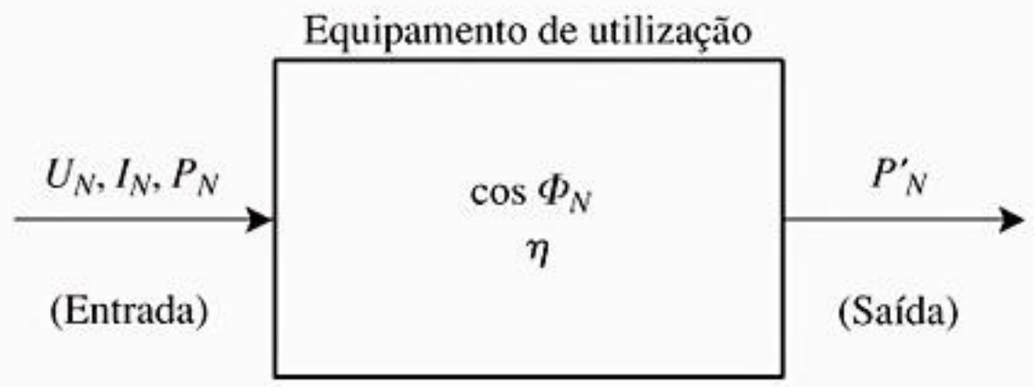


Figura 1.8 ■ Valores nominais de um equipamento de utilização

Quadro 1.2 ▪ Definições contidas na norma NBR 5457

- *Máquina (elétrica) girante*: equipamento elétrico que utiliza a indução eletromagnética para seu funcionamento, constituído por componentes capazes de efetuar um movimento relativo de rotação e destinado à conversão eletromecânica de energia.
- *Máquina assíncrona (ou máquina de indução)*: máquina de corrente alternada na qual a velocidade da carga e a freqüência do sistema ao qual está ligada não estão em uma razão constante.
- *Máquina de corrente contínua (com comutador)*: máquina constituída por uma armadora, um comutador a ela ligado e pólos magnéticos excitados por uma fonte de corrente contínua ou constituídos por ímãs permanentes.
- *Máquina síncrona: máquina de corrente alternada na qual a freqüência da tensão induzida e a velocidade estão em uma razão constante. A velocidade do rotor é constante.*
- *Motor elétrico*: máquina que converte energia elétrica em energia mecânica de rotação no seu eixo.
- *Motor de indução*: máquina de indução que funciona como motor.
- *Motor (de indução) de anéis*: motor de indução de rotor bobinado no qual as extremidades do enrolamento do rotor são ligadas a anéis coletores.
- *Motor (de indução) de gaiola*: motor de indução cujo enrolamento primário, geralmente alojado no estator, é ligado à fonte de alimentação, enquanto o enrolamento secundário, de gaiola e normalmente alojado no rotor, é percorrido pela corrente induzida.
- *Motor universal*: motor que pode funcionar com corrente contínua ou com corrente alternada monofásica, nas freqüências usuais dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

$$S_N = t \cdot U_N \cdot I_N \qquad (1.5)$$

$$I_N = \frac{P_N}{t \cdot U_N \cdot cos\ \Phi_N} = \frac{S_N}{t \cdot U_N} \qquad (1.6)$$

sendo t um fator que vale $\sqrt{3}$ para os equipamentos trifásicos e 1 para os monofásicos.

Note que, nas expressões 1.4, 1.5 e 1.6, as grandezas são assim relacionadas:

- *Equipamento monofásico*: U_N representa a tensão de fase.
- *Equipamento trifásico*: U_N representa a tensão de linha a linha e P_N e S_N são potências totais, isto é, trifásicas.

Introduzindo a potência de saída (P'_N) na Expressão 1.6, obtém-se a Expressão 1.7.

$$I_N = \frac{P'_N}{t\ U_N\ \eta\ cos\ \Phi_N} \qquad (1.7)$$

EXEMPLO

Calcular a corrente nominal do motor de indução trifásico tipo gaiola de 15 CV, 380 V, com $\eta = 0{,}8$ e $\cos \Phi_N = 0{,}85$.

Tem-se:

$$P'_N = 15\ CV, \eta = 0{,}8, cos\ \Phi_N = 0{,}85$$

Da Expressão 1.7 e lembrando que 1 CV = 736 W:

$$I_N = \frac{15 \times 736}{\sqrt{3} \times 380 \times 0{,}8 \times 0{,}85} = 24{,}7\ A$$

EXEMPLO

Dada uma churrasqueira elétrica de 3 kW, com $\eta =$ 60% em 220 volts, calcular a corrente elétrica e a potência ativa de entrada na churrasqueira.

Tem-se:

$$P'_N = 3.000\ W, \eta = 0{,}6, U_N = 220\ V$$

$$\eta = \frac{P'_N}{P_N} \Rightarrow P_N = \frac{P'_N}{\eta} = \frac{3.000}{0{,}60} = 5.000\ W$$

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{5.000}{220} = 22{,}72\ A$$

A Tabela 1.6 apresenta as características nominais típicas de diversos aparelhos eletrodomésticos e eletroprofissionais.

1.8 Circuitos

Um circuito de uma instalação, como definido na Seção 1.6, compreende, além dos condutores elétricos, todos os dispositivos nele ligados, isto é, no caso mais geral, os dispositivos de proteção, os dispositivos de comando, as tomadas de corrente etc., não incluindo os equipamentos de utilização alimentados. Sua característica principal é a proteção dos condutores contra sobrecorrentes, que pode ser assegurada por um único dispositivo (protegendo contra correntes de sobrecarga e de curto-circuito) ou por dois dispositivos (um protegendo contra correntes de sobrecarga e outro, contra correntes de curto-circuito). Os condutores podem não possuir a mesma seção nominal ao longo do circuito, desde que o(s) dispositivo(s) de proteção seja(m) escolhido(s) em função dos condutores de menor seção nominal.

Tabela 1.6 ■ Potências nominais típicas de aparelhos eletrodomésticos e eletroprofissionais

Aparelho	Potências nominais típicas (entrada)
Aquecedor de água central (boiler)	
50 a 100 l	1.000 W
150 a 200 l	1.250 W
250 l	1.500 W
300 a 350 l	2.000 W
400 l	2.500 W
Aquecedor de água de passagem	4.000 a 8.200 W
Aquecedor de ambiente (portátil)	500 a 1.500 W
Ar-condicionado central	8.000 W
Ar-condicionado tipo janela	
7.100 btu/h	900 W
8.500 btu/h	1.300 W
10.000 btu/h	1.400 W
12.000 btu/h	1.600 W
14.000 btu/h	1.900 W
18.000 btu/h	2.600 W
21.000 btu/h	2.800 W
30.000 btu/h	3.600 W
Aspirador de pó (residencial)	500 a 1.000 W
Barbeador	8 a 12 W
Batedeira	100 a 300 W
Cafeteira	1.000 W
Caixa registradora	100 W
Centrífuga	150 a 300 W
Churrasqueira	3.000 W
Chuveiro	4.000 a 6.500 W
Congelador (*freezer*) (residencial)	350 a 500 VA
Cortador de grama	800 a 1.500 W
Distribuidor de ar (*fan coil*)	250 W
Ebulidor	2.000 W
Esterilizador	200 W
Exaustor de ar para cozinha (residencial)	300 a 500 VA
Faca elétrica	135 W
Ferramentas portáteis	500 a 1.800 W
Ferro de passar roupa	800 a 1.650 W
Fogão (residencial) por boca	2.500 W
Forno (residencial)	4.500 W
Forno de microondas (residencial)	1.200 VA

(continua)

(continuação)

Aparelho	Potências nominais típicas (entrada)
Geladeira (residencial)	150 a 500 VA
Grelha elétrica	1.200 W
Impressora	80 a 350 W
Lavadora de pratos (residencial)	1.200 a 2.800 VA
Lavadora de roupa (residencial)	770 VA
Liquidificador	270 VA
Máquina de costura (não-profissional)	60 a 150 W
Máquina de escrever	150 VA
Máquina copiadora	1.500 a 3.500 VA
Microcomputador	150 a 250 W
Monitor	200 a 300 W
Projetor de slides	250 W
Retroprojetor	1.200 W
Scanner	100 a 150 W
Secador de cabelos (não-profissional)	500 a 1.200 W
Secadora de roupas (residencial)	2.500 a 6.000 W
Televisor	75 a 300 W
Torneira	2.800 a 5.200 W
Torradeira (residencial)	500 a 1.200 W
Triturador de lixo (na pia)	300 W
Ventilador (circulador de ar) de pé	300 W
Ventilador (circulador de ar) portátil	60 a 100 W

Divisão da instalação em circuitos

Uma instalação deve ser dividida em vários circuitos, a fim de:

- Limitar as conseqüências de uma falta, que provocará (por meio de dispositivo de proteção) apenas o seccionamento (desligamento) do circuito atingido, deixando apenas essas cargas sem energia.
- Facilitar as inspeções, os ensaios e a manutenção.
- Evitar os perigos que possam resultar da falha de um circuito único (por exemplo, no caso de iluminação).

Normalmente, nas instalações, utilizam-se distribuições radiais, como mostra a Figura 1.9, nas quais podem ser distinguidos os circuitos de distribuição principais, os circuitos divisionários e os circuitos terminais, já apresentados na Figura 1.5. É importante observar que o circuito terminal é o circuito protegido pelo último dispositivo de proteção, contado da origem da instalação, não considerados os eventuais dispositivos específicos de proteção no próprio equipamento de utilização.

A NBR 5410 recomenda que os circuitos terminais sejam individualizados, com base na função dos equipamentos (ou pontos) de utilização alimentados. Assim, devem ser previstos circuitos terminais *distintos* para iluminação, para tomadas de corrente, para equipamentos a motor etc.

Um circuito de distribuição, no caso mais comum, alimenta um único quadro de distribuição, no qual reconsidera a carga concentrada em sua extremidade.

Um circuito terminal pode alimentar um ou mais pontos de utilização. Em princípio, desde que o circuito seja corretamente dimensionado, não existe limitação quanto ao número de pontos servidos; deve-se apenas observar a compatibilidade entre a seção dos condutores e as dimensões dos terminais de ligação dos equipamentos alimentados. No entanto, por razões práticas e até mesmo de segurança, é conveniente que não se tenha um número *excessivo* de pontos de utilização em um circuito terminal, o que é função do tipo e das características da instalação. A título apenas de exemplo, para as unidades residenciais, o guia da norma francesa de instalações elétricas de baixa tensão NFC 15-100 recomenda um máximo de oito pontos para os circuitos terminais de iluminação e de tomadas, e as tomadas duplas (ou triplas) são computadas como um único ponto.

Os circuitos terminais individuais em locais de habitação que a NBR 5410 chama "independentes", isto é, os que alimentam um único ponto de utilização, são geralmente destinados a tomadas de corrente nominal elevada ou a equipamentos fixos de potência nominal elevada. A norma recomenda que sejam previstos circuitos indepen-

dentes para equipamentos de corrente nominal superior a 10 A (por exemplo, chuveiros e torneiras elétricas), em unidades residenciais e em acomodações de hotéis, motéis e similares.

Esquema de condutores vivos

O tipo e o número dos condutores vivos de uma instalação elétrica, ou seja, o *esquema de condutores vivos*, são escolhidos levando-se em conta principalmente a natureza dos equipamentos de utilização alimentados (trifásicos, bifásicos ou monofásicos); no caso de alimentação por rede de baixa tensão, os limites são fixados pela concessionária de energia elétrica. O número de condutores de uma instalação consumidora se enquadra nos dados apresentados na Tabela 1.7.

1.9 Influências externas

A classificação das influências externas apresentada pela NBR 5410 é a classificação internacional da IEC. Trata-se de um inventário, o mais completo possível, de todas as condições exteriores a que podem estar sujeitos os diversos componentes da instalação e que, logicamente, poderão influir nos procedimentos de projeto e de execução.

Os diferentes parâmetros de influências externas são classificados em três grandes categorias:

- *Condições ambientais*: independentes da natureza das instalações e dos locais considerados, relacionadas a fatores exteriores provenientes da atmosfera, do clima, da situação e de outras condições da região onde se encontra a instalação; compreendem 14 parâmetros.
- *Condições de utilização*: relativas aos locais onde se situa a instalação; compreendem cinco parâmetros.
- *Condições relacionadas com a construção das edificações*: sua estrutura e os materiais utilizados; compreendem dois parâmetros.

Para facilitar a classificação dos diferentes parâmetros, foi estabelecido um código alfanumérico constante de duas letras e um algarismo. A primeira letra indica a categoria geral da influência externa, podendo ser A (condições ambientais), B (condições de utilização) e C (construção); a segunda letra indica a natureza da influência externa. O conjunto das duas letras caracteriza o parâmetro, como mostrado a seguir, e o algarismo indica a classe de cada parâmetro. São as seguintes as influências consideradas:

AA – Temperatura ambiente
AB – Condições climáticas do ambiente
AC – Altitude
AD – Presença de água
AE – Presença de corpos sólidos
AF – Presença de substâncias corrosivas ou poluentes
AG/AH – Solicitações mecânicas (impactos/vibrações)
AK – Presença de flora e mofo

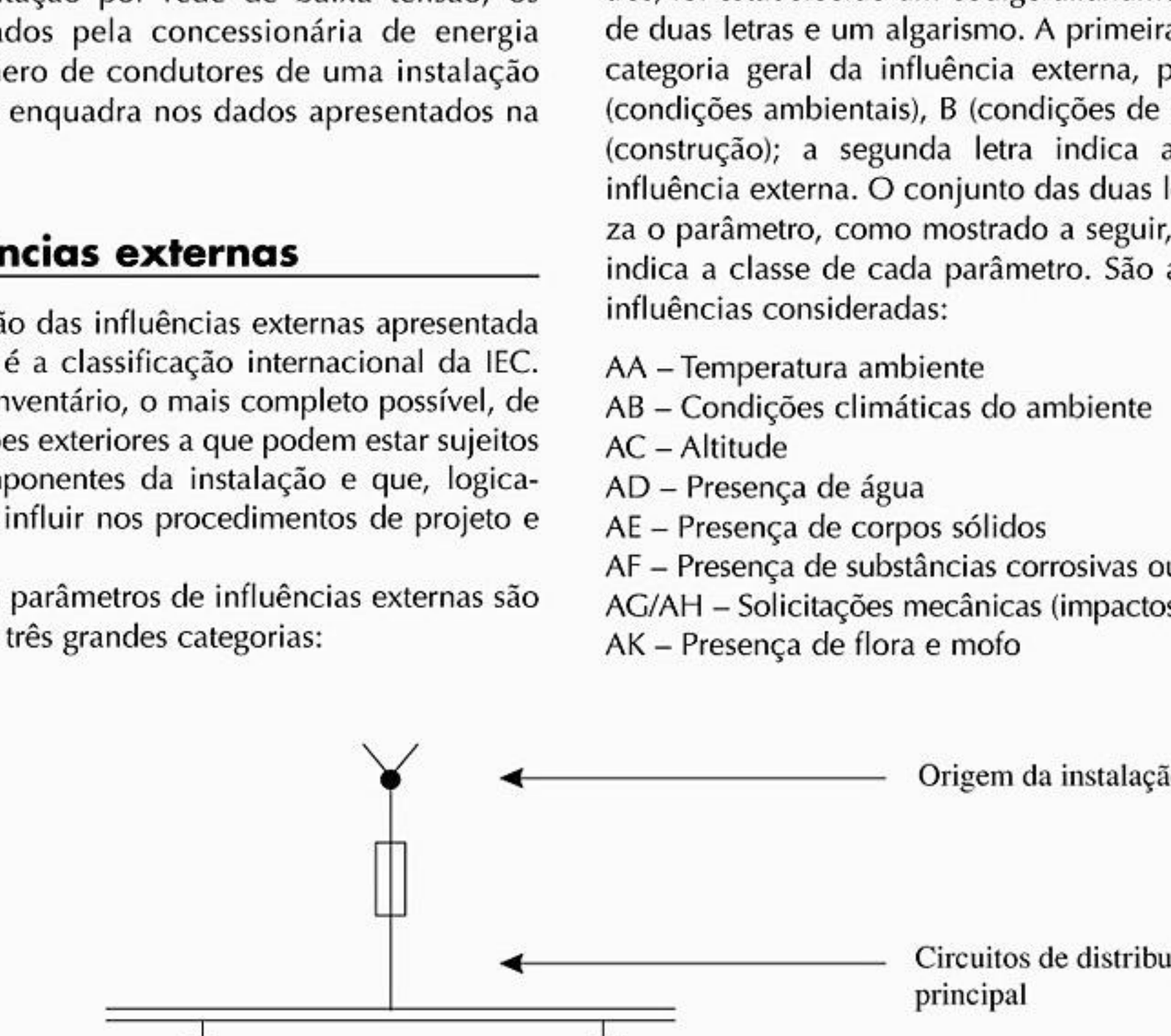


Figura 1.9 ■ Distribuição radial: circuitos de distribuição e terminais (ver simbologia na Seção 4.7)

AL – Presença de fauna
AM – Fenômenos eletromagnéticos de baixa freqüência — conduzidos ou radiados (harmônicas e inter harmônicas, tensões de sinalização, variações de amplitude e tensão, desequilíbrio de tensão, variação de freqüência, componentes contínuos em redes, campos magnéticos radiados, campos elétricos)
AN – Radiação solar
AQ – Descargas atmosféricas
AR – Movimentação do ar
AS – Vento
BA – Competência das pessoas
BB – Resistência elétrica do corpo humano
BC – Contatos das pessoas com o potencial da terra
BD – Condições de fuga das pessoas em emergências
BE – Natureza dos materiais processados ou armazenados
CA – Materiais de construção
CB – Estrutura das edificações

As tabelas 1.8 a 1.30 apresentam a classificação das influências externas, conforme consta da NBR 5410.

No Apêndice A são apresentadas tabelas indicando as características dos componentes elétricos em geral e das linhas elétricas em função das influências externas.

Tabela 1.7 ■ Número de condutores de uma instalação consumidora (esquemas apresentados na Figura 1.10)

Em corrente alternada	monofásico a dois condutores monofásico a três condutores bifásico a três condutores trifásico a três condutores trifásico a quatro condutores
Em corrente contínua	dois condutores três condutores

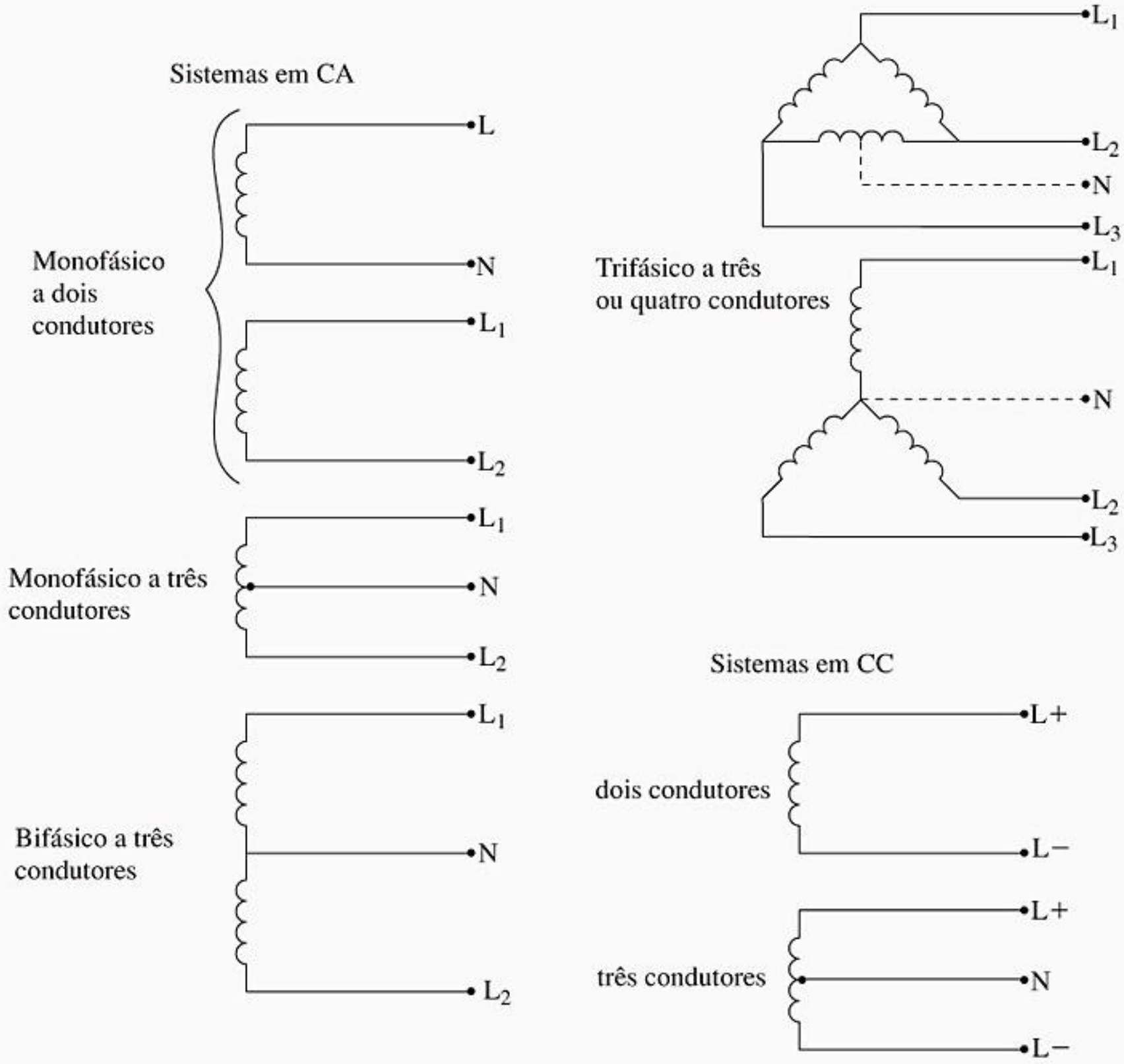


Figura 1.10 ■ Esquemas de condutores vivos segundo a NBR 5410

Tabela 1.8 ■ Temperatura ambiente

Código	Classificação	Faixas de temperatura		Aplicações e exemplos
		Limite inferior °C	Limite superior °C	
AA1	Frigorífico	− 60	+ 5	Câmaras frigoríficas
AA2	Muito frio	− 40	+ 5	
AA3	Frio	− 25	+ 5	—
AA4	Temperado	− 5	+ 40	—
AA5	Quente	+ 5	+ 40	Interior de edificações
AA6	Muito quente	+ 5	+ 60	—
AA7	Extrema	− 25	+ 55	—
AA8		− 50	+ 40	

Notas:
1. As classes de temperatura ambiente são aplicáveis apenas quando não há influência da umidade.
2. O valor médio em um período de 24 horas não deve exceder o limite superior menos 5°C.
3. Para certos ambientes, pode ser necessário combinar duas faixas de temperatura. Por exemplo, instalações ao ar livre podem ser submetidas a temperaturas entre − 5°C e + 50°C, correspondentes a AA4 + AA6.
4. Instalações submetidas a temperaturas diferentes das indicadas devem ser objeto de prescrições particulares.

Tabela 1.9 ■ Condições climáticas do ambiente

Código	Características						Aplicações e exemplos
	Temperatura do ar °C		Umidade relativa %		Umidade absoluta g/m³		
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior	
AB1	− 60	+ 5	3	100	0,003	7	Ambientes internos e externos com temperaturas extremamente baixas
AB2	− 40	+ 5	10	100	0,1	7	Ambientes internos e externos com temperaturas baixas
AB3	− 25	+ 5	10	100	0,5	7	Ambientes internos e externos com temperaturas baixas
AB4	− 5	+ 40	5	95	1	29	Locais abrigados sem controle da temperatura e da umidade. Uso de calefação possível
AB5	+ 5	+ 40	5	85	1	25	Locais abrigados com temperatura ambiente controlada
AB6	+ 5	+ 60	10	100	1	35	Ambientes internos e externos com temperaturas extremamente altas, protegidos contra baixas temperaturas ambientais. Ocorrência de radiação solar e de calor
AB7	− 25	+ 55	10	100	0,5	29	Ambientes internos e abrigados sem controle da temperatura e da umidade. Podem ter aberturas para o exterior e são sujeitos a radiação solar
AB8	− 50	+ 40	15	100	0,04	36	Ambientes externos e sem proteção contra intempéries, sujeitos a altas e baixas temperaturas

Notas:
1. Todos os valores especificados são limites, com baixa probabilidade de serem excedidos.
2. Os valores de umidade relativa, inferiores e superiores, são limitados pelos valores correspondentes de umidade absoluta.
   O Apêndice B da IEC 60364-5-51:2001 traz informações sobre a interdependência da temperatura do ar, umidade relativa e umidade absoluta para as classes de condições climáticas específicas.

Tabela 1.10 ■ Altitude

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
AC1	Baixa	≤ 2.000 m	Para alguns componentes, podem ser necessárias medidas especiais a partir de 1.000 m de altitude
AC2	Alta	> 2.000 m	

Tabela 1.11 ■ Presença de água

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
AD1	Desprezível	A probabilidade de presença de água é remota	Locais em que as paredes geralmente não apresentam umidade, mas podem apresentá-la durante curtos períodos, e secam rapidamente com uma boa aeração
AD2	Gotejamento	Possibilidade de gotejamento de água na vertical	Locais em que a umidade se condensa ocasionalmente sob forma de gotas de água, ou em que há presença ocasional de vapor de água
AD3	Precipitação	Possibilidade de chuva caindo em ângulo máximo de 60° com a vertical	Locais em que a água forma uma película contínua nas paredes e/ou pesos
AD4	Aspersão	Possibilidade de "chuva" de qualquer direção	A aspersão corresponde ao efeito de uma "chuva" vinda de qualquer direção. São exemplos de componentes sujeitos a aspersão certas luminárias de uso externo e painéis elétricos de canteiros de obras ao tempo
AD5	Jatos	Possibilidade de jatos de água sob pressão, em qualquer direção	Locais em que ocorrem lavagens com água sob pressão, como passeios públicos, áreas de lavagem de veículos etc.
AD6	Ondas	Possibilidade de ondas de água	Locais situados à beira-mar, como praias, piers, ancoradouros etc.
AD7	Imersão	Possibilidade de imersão em água, parcial ou total, de modo intermitente	Locais sujeitos a inundação e/ou onde a água possa se elevar pelo menos 15 cm acima do ponto mais alto do componente da instalação elétrica, estando sua parte mais baixa no máximo 1 m abaixo da superfície da água
AD8	Submersão	Submersão total em água, de modo permanente	Locais onde os componentes da instalação elétrica sejam totalmente submersos, sob uma pressão a 10 kPa (0,1 bar ou 1 mca)

Tabela 1.12 ■ Presença de corpos sólidos

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
AE1	Desprezível	Ausência de poeira em quantidade apreciável e de corpos estranhos	—
AE2	Pequenos objetos	Presença de corpos sólidos cuja menor dimensão seja igual ou superior a 2,5 mm[1]	Ferramentas, material granulado etc.
AE3	Objetos muito pequenos	Presença de corpos sólidos cuja menor dimensão seja igual ou superior a 1 mm[1]	Fios metálicos, arames etc.
AE4	Poeira leve	Presença de leve deposição de poeira	Deposição de poeira maior que 10 mg/m² e, no máximo, igual a 35 mg/m² por dia
AE5	Poeira moderada	Presença de média deposição de poeira	Deposição de poeira maior que 35 mg/m² e no máximo igual a 350 mg/m² por dia
AE6	Poeira intensa	Presença de elevada deposição de poeira	Deposição de poeira maior que 350 mg/m² e no máximo igual a 1.000 mg/m² por dia

Nota:
1. Nas condições AE2 e AE3, pode existir poeira, desde que esta não tenha significativa influência sobre os componentes elétricos.

Tabela 1.13 ■ Presença de substâncias corrosivas ou poluentes

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
AF1	Desprezível	A quantidade ou natureza dos agentes corrosivos ou poluentes não é significativa	—
AF2	Atmosférica	Presença significativa de agentes corrosivos ou poluentes de origem atmosférica	Instalações próximas da orla marítima ou de estabelecimentos industriais que produzem poluição atmosférica significativa, tais como indústrias químicas, fábricas de cimento etc. Esse tipo de poluição provém principalmente da emissão de poeiras abrasivas, isolantes ou condutivas
AF3	Intermitente ou acidental	Presença intermitente ou acidente de produtos químicos corrosivos ou poluentes de uso corrente	Locais onde se manipulam produtos químicos em pequenas quantidades e onde o contato desses produtos com os componentes da instalação seja meramente acidental. Tais condições podem ocorrer em laboratórios de fábricas etc., ou em locais onde são utilizados hidrocarbonetos (centrais de calefação, oficinas etc.)
AF4	Permanente	Presença permanente de produtos químicos corrosivos ou poluentes em quantidades significativas	Indústrias químicas etc.

Tabela 1.14 ■ Solicitações mecânicas

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
		Impactos (AG)	
AG1	Fracos	Impactos iguais ou inferiores a 0,225 J	Locais domésticos, escritórios (condições de uso doméstico e análogas)
AG2	Médios	Impactos iguais ou inferiores a 2 J	Condições industriais normais
AG3	Severos	Impactos iguais ou inferiores a 20 J	Condições industriais severas
		Vibrações (AH)	
AH1	Fracas	Nenhuma vibração(ões) eventual(ais) sem influência significativa	Condições domésticas e analógicas em que os efeitos das vibrações podem ser geralmente desprezados
AH2	Médias	Vibrações com freqüências compreendidas entre 10 e 50 Hz e amplitude igual ou inferior a 0,15 mm	Condições industriais normais
AH3	Severas	Vibrações com freqüências compreendidas entra 10 e 150 Hz e amplitude igual ou inferior a 0,35 mm	Condições industriais severas

Tabela 1.15 ■ Presença de flora e mofo

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
AK1	Desprezível	Sem risco de danos devidos à flora ou ao mofo	—
AK2	Prejudicial	Risco de efeitos prejudicais	Os riscos dependem das condições locais e da natureza da flora. Pode-se dividi-los em riscos devidos ao desenvolvimento prejudicial da vegetação e riscos devidos à sua abundância

Tabela 1.16 ■ Presença de fauna

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
AL1	Desprezível	Sem risco de danos devidos à fauna	—
AL2	Prejudicial	Risco de efeitos prejudiciais devidos à fauna (insetos, pássaros, pequenos animais)	Os riscos dependem da natureza da fauna. Pode-se dividi-los em: perigos devidos a insetos em quantidades prejudiciais ou de natureza agressiva; presença de pequenos animais ou de pássaros em quantidades prejudiciais ou de natureza agressiva

Tabela 1.17 ■ Fenômenos eletromagnéticos de baixa freqüência (conduzidos e radiados)

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos	Referências
Harmônicas e inter-harmônicas (AM1)				
AM1-1	Nível controlado	Situação controlada	Aparelhos eletromédicos Instrumentos de medição	Abaixo da tabela 1 da IEC 61000-2-2:2002
AM1-2	Nível normal	Redes de baixa tensão	Habitações Locais comerciais Indústria leve	Dentro do estipulado na tabela 1 da IEC 61000-2-2:2002
AM1-3	Nível alto	Redes poluídas	Indústrias ou grandes prédios comerciais alimentados por transformação AT/BT dedicada	Localmente acima da tabela 1 da IEC 61000-2-2:2002
Tensões de sinalização (tensões sobrepostas para fins de telecomando) (AM2)				
AM2-1	Nível controlado	Somente sinais residuais	Instalações protegidas ou parte protegida de uma instalação	Inferior ao especificado abaixo
AM2-2	Nível médio	Presença de tensões de sinalização na rede	Instalações residenciais, comerciais e industriais	IEC 61000-2-1 e IEC 61000-2-2
AM2-3	Nível alto	Ressonância	Casos especiais	–
Variações de amplitude de tensão (AM3)				
AM3-1	Nível controlado	Uso de UPS	Cargas sensíveis, como equipamentos de tecnologia da informação	–
AM3-2	Nível normal	Flutuações de tensão, afundamentos de tensão e interrupções	Habitações locais, comerciais e indústrias	–
Desequilíbrio de tensão (AM4)				
AM4	Nível normal	–	–	De acordo com a IEC 61000-2-2
Variações de freqüência (AM5)				
AM5	Nível normal	Pequenas variações de freqüência	Caso geral	±1 Hz de acordo com a IEC 61000-2-2
Tensões induzidas de baixa freqüência (AM6)				
AM6	Sem classificação	Geradas permanentemente ou na ocorrência de faltas	Caso geral	ITU-T
Componentes contínuas em redes c.a. (AM7)				
AM7	Sem classificação	Ocorrência de falta a jusante de retificadores	Caso geral	–

(continua)

(continuação)

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos	Referências
Campos magnéticos radiados (AM8)				
AM8-1	Nível médio	Produzidos por linhas de energia, transformadores e outros equipamentos de freqüência industrial e suas harmônicas	Habilitações, locais comerciais e indústrias leves	Nível 2 da IEC 61000-4-8:2001
AM8-2	Nível alto	Grande proximidade dos elementos mencionados anteriormente ou de outros similares	Indústrias pesadas, subestações AT/BT, quadros elétricos e proximidade de linhas ferroviárias	Nível 4 da IEC 61000-4-8:2001
Campos elétricos (AM9)				
AM9-1	Nível desprezível	Caso geral	–	–
AM9-2	Nível médio	De acordo com o valor da tensão e da localização, interna ou externa à edificação	Proximidade de linhas aéreas de AT ou subestações de AT	IEC 61000-2-5
AM9-3	Nível alto			
AM9-4	Nível muito alto			

Tabela 1.18 ■ Fenômenos eletromagnéticos de alta freqüência conduzidos, induzidos ou radiados (contínuos ou transitórios)

Código	Classificação	Características	Aplicação e exemplos	Referências
Tensões ou correntes induzidas oscilantes (AM21)				
AM21	Sem classificação	Principalmente perturbações de modo comum geradas por campos eletromagnéticos modulados em AM ou FM	–	IEC 61000-4-6
Transitórios unidirecionais conduzidos, na faixa do nanossegundo (AM22)				
AM22-1	Desprezível	Ambiente protegido	Salas de computadores, salas de controle	Nível 1 da IEC 61000-4-4:2004
AM22-2	Nível médio	Ambiente protegido	–	Nível 2 da IEC 61000-4-1:2004
AM22-3	Nível alto	Chaveamento de pequenas cargas indutivas, ricochete de contatos de relés Faltas	Redes de baixa tensão	Nível 3 da IEC 61000-4-4:2004
AM22-4	Nível muito alto	Subestações AT/BT Equipamento de manobra a SP6 ou a vácuo	Indústrias pesadas, quadros de distribuição principais ou intermediários	Nível 3 da IEC 61000-4-4:2004
Transitórios unidirecionais conduzidos, na faixa do micro ao milissegundo (AM23)				
AM23-1	Nível controlado	Circuitos ou instalações equipadas com dispositivos de proteção contra sobretensões, transformadores alterados	Situações controladas	–
		Descarga atmosférica distante (mais de 1 km): forma de onda 10 μs/1.000 μs e impedância da fonte 20 Ω-300 Ω	Descargas atmosféricas distantes de redes subterrâneas	4.2.6.1.12,5.4.2 e 6.3.5 da NBR 5410:2004
AM23-2	Nível médio	Transitórios de chaveamento (por exemplo, interrupção da corrente de falta por um fusível): forma de onda 0,1 ms/1 ms e impedância da fonte 50 Ω		
AM23-3	Nível alto	Descarga atmosférica próxima (a menos de 1 km): forma de onda 1,2 μ/50 μs e impedância da fonte 1 Ω-10 Ω	Descargas atmosféricas próximas de uma rede aérea ou de uma edificação	

(continua)

(continuação)

Código	Classificação	Características	Aplicação e exemplos	Referências
Transitórios oscilantes conduzidos (AM24)				
AM24-1	Nível médio	Fenômenos de chaveamento presentes normalmente em instalações de edificações	Locais residenciais, comerciais e industriais	IEC 61000-4-12
AM24-2	Nível alto	Fenômenos associados a chaveamentos/manobras	Subestações AT/MT	IEC 60255-22-1
Fenômenos radiados de alta freqüência (AM25)				
AM25-1	Nível desprezível	Estações de rádio e televisão a mais de 1 km	Residências e locais comerciais	Nível 1 da IEC 61000-4-2:2002
AM25-2	Nível médio	Transceptores portáteis a não menos de 1 m	Indústrias leves	Nível 2 da IEC 61000-4-2:2002
AM25-3	Nível alto	Transceptores de alta potência nas proximidades	Indústrias pesadas e aplicações de alta confiabilidade	Nível 3 da IEC61000-4-2:2002

Tabela 1.19 ■ Descargas eletrostáticas

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos	Referências
AM31-1	Nível baixo	Descargas geradas particularmente por pessoas caminhando sobre carpetes sintéticos Nível dependente do tipo de carpete e da umidade do ar	De acordo com a confiabilidade requerida	Nível 1 da IEC 61000-4-2:2001
AM31-2	Nível médio			Nível 2 da IEC 61000-4-2:2001
AM31-3	Nível alto			Nível 3 da IEC 61000-4-2:2001
AM31-4	Nível muito alto			Nível 4 da IEC 61000-4-2:2001

Tabela 1.20 ■ Radiações ionizantes

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
AM41-1	Sem classificação	Presença de radiações ionizantes perigosas	—

Tabela 1.21 ■ Radiação solar

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
AN1	Desprezível	Intensidade $\leq$ 500 W/m^2	–
AN2	Média	500 $<$ Intensidade $\leq$ 700 W/m^2	–
AN3	Alta	700 $<$ Intensidade $\leq$ 1120 W/m^2	–

Tabela 1.22 ■ Descargas atmosféricas

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
AQ1	Desprezíveis	$\leq$ 25 dias por ano	—
AQ2	Indiretas	$\geq$ 25 dias por ano Riscos provenientes da rede de alimentação	Instalações alimentadas por redes aéreas
AQ3	Diretas	Riscos provenientes da exposição dos componentes da instalação	Partes da instalação situadas no exterior das edificações

Tabela 1.23 ■ Movimentação do ar

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
AR1	Desprezível	Velocidade ≤ 1 m/s	—
AR2	Média	1 m/s < velocidade ≤ 5 m/s	—
AR3	Forte	5 m/s < velocidade ≤ 10 m/s	—

Tabela 1.24 ■ Vento

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
AS1	Desprezível	Velocidade ≤ 20 m/s	—
AS2	Média	20 m/s < velocidade ≤ 30 m/s	—
AS3	Forte	30 m/s < velocidade ≤ 50 m/s	—

Tabela 1.25 ■ Competência das pessoas

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BA1	Comuns	Pessoas inadvertidas	—
BA2	Crianças	Crianças em locais a elas destinados	Creches, escolas
BA3	Incapacitadas	Pessoas que não dispõem de completa capacidade física ou intelectual (idosos, doentes)	Casas de repouso, unidade de saúde
BA4	Advertidas	Pessoas suficientemente informadas ou supervisionadas por pessoas qualificadas, de tal forma que lhes permita evitar os perigos de eletricidade (pessoal de manutenção e/ou operação)	Locais de serviço elétrico
BA5	Qualificadas	Pessoas com conhecimento técnico ou experiência tal que lhes permita evitar os perigos da eletricidade (engenheiros e técnicos)	Locais de serviço elétrico fechados

Nota: esta classificação não se aplica necessariamente a locais de habitação.

Tabela 1.26 ■ Resistência elétrica do corpo humano

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BB1	Alta	Condições secas	Circunstâncias nas quais a pele está seca (nenhuma umidade, inclusive suor)
BB2	Normal	Condições úmidas	Passagem da corrente elétrica de uma mão à outra ou de uma mão a um pé, com a pele úmida de suor, sendo a superfície de contato significativa
BB3	Baixa	Condições molhadas	Passagem da corrente elétrica entre as mãos e os pés, estando as pessoas com os pés molhados a ponto de poder desprezar a resistência da pele e dos pés
BB4	Muito baixa	Condições imersas	Pessoas imersas na água, por exemplo, em banheiras e piscinas

Tabela 1.27 ■ Contato das pessoas com o potencial da terra

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BC1	Nulo	Locais não-condutivos	Locais em que o piso e as paredes sejam isolantes e que não possuam nenhum elemento condutivo
BC2	Raro	Em condições habituais, as pessoas não estão em contato com elementos condutivos ou postadas sobre superfícies condutivas	Locais em que o piso e as paredes sejam isolantes, com elementos condutivos em pequena quantidade ou de pequenas dimensões, e de tal forma que a probabilidade de contato possa ser desprezada
BC3	Freqüente	Pessoas em contato com elementos condutivos ou postadas sobre superfícies condutivas	Locais em que o piso e as paredes sejam condutivos ou que possuam elementos condutivos em quantidade ou de dimensões consideráveis
BC4	Contínuo	Pessoas em contato permanente com paredes metálicas e com pequena possibilidade de interromper o contato	Locais como caldeiras ou vasos metálicos cujas dimensões sejam tais que as pessoas que neles penetrem estejam continuamente em contato com as paredes. A redução da liberdade de movimentos das pessoas pode, de um lado, impedi-las de romper voluntariamente o contato e, de outro, aumentar os riscos de contato involuntário

Tabela 1.28 ■ Condições de fuga das pessoas em emergências

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BD1	Normal	Baixa densidade de ocupação percurso de fuga breve	Edificações residenciais com altura inferior a 50 m e edificações não-residenciais com baixa densidade de ocupação e altura inferior a 28 m
BD2	Longa	Baixa densidade de ocupação percurso de fuga longo	Edificações residenciais com altura superior a 50 m edificações não-residenciais com baixa densidade de ocupação e altura superior 28 m
BD3	Tumultuada	Alta densidade de ocupação percurso de fuga breve	Locais de afluência de público (teatros, cinemas, lojas de departamentos, escolas etc.); edificações não-residenciais com alta densidade de ocupação e altura inferior a 28 m
BD4	Longa e tumultuada	Alta densidade de ocupação percurso de fuga longo	Locais de afluência de público de maior porte (shopping centers, grandes hotéis e hospitais, estabelecimento de ensino que ocupem diversos pavimentos de uma edificação etc.); edificações não-residenciais com alta densidade de ocupação e altura superior a 28 m

Nota: aplicações e exemplos destinam-se apenas a subsidiar a avaliação de situações reais, fornecendo elementos mais qualitativos que quantitativos. Os códigos locais de segurança contra incêndio e pânico podem conter parâmetros mais estritos. Ver também ABNT NBR 13570.

Tabela 1.29 ■ Natureza dos materiais processados ou armazenados

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BE1	Riscos desprezíveis	—	—
BE2	Riscos de incêndio	Presença de substâncias combustíveis, como fibras e líquidos com alto ponto de fulgor	Locais de processamento ou armazenagem de papel, feno, palha, aparas ou gravetos, fibras de algodão ou lã, hidrocarbonetos, plásticos granulados
BE3	Riscos de explosão	Presença de substâncias inflamáveis, como líquidos com baixo ponto de fulgor, gases e vapores, pós-combustíveis sujeitos a explosão e substâncias explosivas	Locais de processamento e armazenagem de pós-combustíveis (amido de milho, açúcar, farinhas, resinas, fenólicas, plásticos, enxofre, alumínio, magnésio etc.); indústrias químicas e petrolíferas; usinas e depósitos de gás; fábricas e depósitos de explosivos
BE4	Riscos de contaminação	Presença de alimentos, produtos farmacêuticos e análogos, sem proteção	Indústrias alimentícias, grandes cozinhas. Certas precauções podem ser necessárias para evitar que os produtos em processamento sejam contaminados, por exemplo, por fragmentos de lâmpadas

Tabela 1.30 ■ Materiais de construção

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
CA1	Não-combustíveis	—	—
CA2	Combustíveis	Edificações construídas predominantemente com materiais combustíveis	Edificações de madeira e similares

Tabela 1.31 ■ Estrutura das edificações

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
CB1	Riscos desprezíveis	—	—
CB2	Sujeitas a propagação de incêndio	Edificações cuja forma e dimensões facilitem a propagação de incêndio (por exemplo, efeito chaminé)	Edificações de grande altura ou edificações com sistemas de ventilação forçada
CB3	Sujeitas a movimentação	Riscos devidos, por exemplo, a deslocamentos entre partes distintas de uma edificação ou entre ela e o solo; acomodação do terreno ou das fundações	Edificações de grande comprimento ou construídas sobre terrenos não estabilizados
CB4	Flexíveis ou instáveis	Estruturas frágeis ou sujeitas a movimentos (por exemplo, oscilação)	Tendas, estruturas infláveis, divisórias removíveis, forros falsos

EXERCÍCIOS

1. Quais são as principais funções exercidas pelos dispositivos elétricos?

2. Qual é a definição da potência instalada de uma instalação elétrica?

3. Quais tipos de sobrecorrente podem ocorrer em uma instalação elétrica?

4. Como se define a baixa tensão?

5. O que é um choque elétrico?

6. Defina ramal de ligação.

7. Quais são os três tipos de instalação temporária considerados pela norma NBR 5410?

8. Calcule a corrente nominal de um motor de indução trifásico tipo gaiola, de 30 CV, 440 V, com rendimento de 0,9 e fator de potência de 0,8.

9. Determine a corrente elétrica de um forno elétrico de potência de 3 kW, monofásico, com rendimento de 70 por cento em 220 V.

10. Quais são as categorias dos parâmetros de influências externas consideradas na norma NBR 5410?



2 Conceitos fundamentais

2.1 Potência em corrente alternada

Fórmula fundamental da potência

A potência é definida como a taxa de variação da energia no tempo, ou seja:

$$p = \frac{dw}{dt} \tag{2.1}$$

Em eletricidade, suma carga elétrica é definida por uma tensão u instantânea aplicada, que gera uma corrente i entrando pelo sinal de +, como representado esquematicamente na Figura 2.1.

A potência instantânea p absorvida pela carga é dada pela Expressão 2.2, a qual é considerada a *fórmula fundamental da potência* e é assim representada:

$$p = ui \tag{2.2}$$

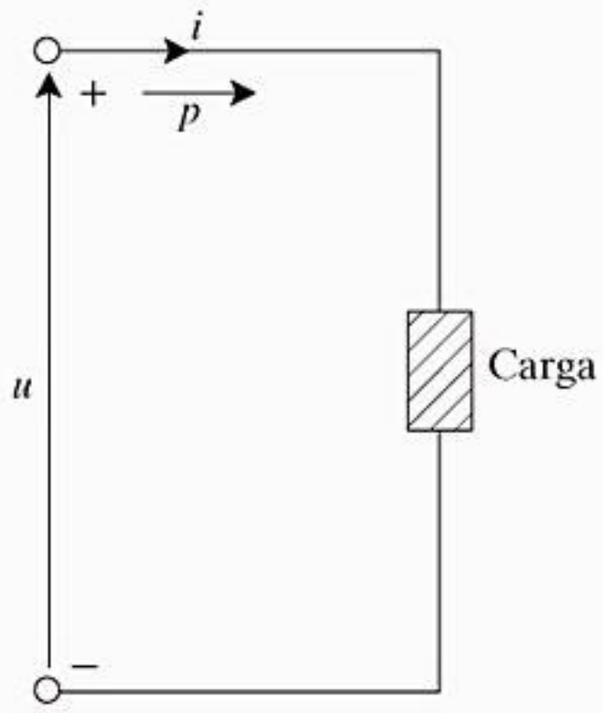


Figura 2.1 ▪ Diagrama de uma carga elétrica

Potência elétrica de uma carga monofásica

Suponha que o circuito da Figura 2.1 seja em corrente alternada, na qual as grandezas u e i sejam a tensão e a corrente senoidais instantâneas. De modo geral, elas são representadas pelas expressões 2.3 e 2.4:

$$u = \sqrt{2}\, U \operatorname{sen} \omega t \tag{2.3}$$

$$i = \sqrt{2}\, I \operatorname{sen} (\omega t - \Phi) \tag{2.4}$$

onde:

- U = valor eficaz da tensão elétrica.
- I = valor eficaz da corrente elétrica.
- Φ = defasagem angular entre a onda senoidal de tensão u e a onda senoidal de corrente i.

Substituindo as expressões 2.3 e 2.4 na Expressão 2.2, tem-se:

$$p = \sqrt{2}\, U \operatorname{sen} \omega t \cdot \sqrt{2}\, I \operatorname{sen} (\omega t - \Phi) = UI \cos \Phi - UI \cos (2\omega t - \Phi) \tag{2.5}$$

Representando graficamente $p \times \omega t$, obtém-se a Figura 2.2(*a*), que mostra a tensão, a corrente e a potência em um circuito com carga monofásica. Note que a potência instantânea transmitida à carga *oscila* em torno de um valor médio $UI \cos \Phi$, com uma freqüência angular 2ω. Em determinados intervalos, a potência torna-se negativa, o que indica que a energia flui para a fonte.

Aplicando algumas relações trigonométricas à Expressão 2.5, obtém-se:

$$p = \underbrace{UI \cos \Phi\, (1 - \cos\, 2\omega t)}_{\text{(I)}} - \underbrace{UI\, \cos \Phi \cos 2\omega t}_{\text{(II)}} \tag{2.6}$$

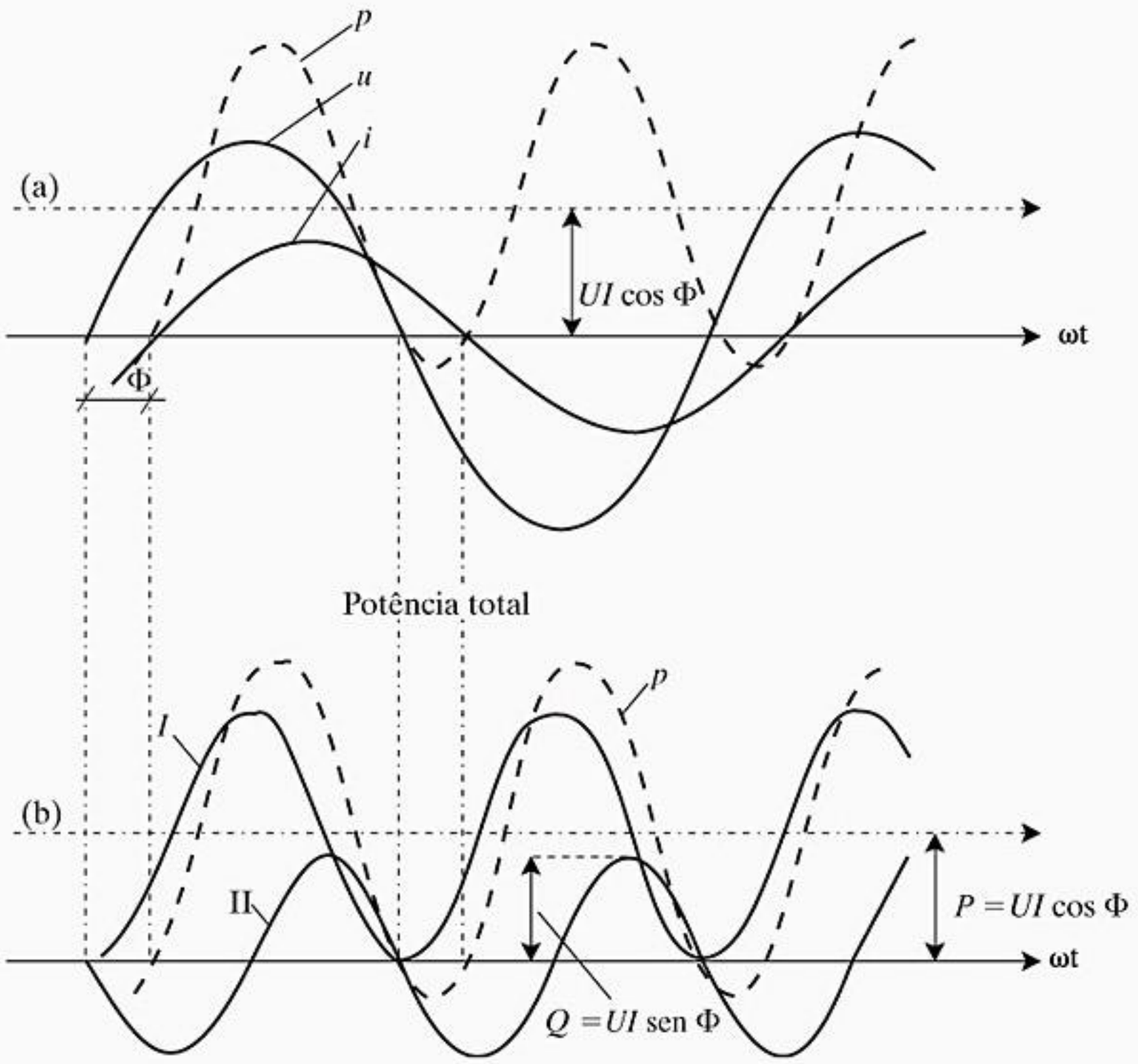


Figura 2.2 ▪ Gráficos da tensão, da corrente e da potência instantâneas em um circuito monofásico

A potência instantânea p da Expressão 2.6 é dividida em duas parcelas, (I) e (II). A primeira oscila em torno do mesmo valor médio, $UI \cos \Phi$, e nunca se torna negativa e a segunda apresenta valor médio nulo. A Figura 2.2(b) mostra o gráfico da Expressão 2.6 dos componentes separados expressos por I e II. Os termos fixos da Expressão 2.6 podem ser representados por:

$$P = UI \cos \Phi \tag{2.7}$$

$$Q = UI \operatorname{sen} \Phi \tag{2.8}$$

Assim, a Expressão 2.6 é igual a

$$p = \underbrace{P\,(1 - \cos 2\omega t)}_{\text{(I)}} - \underbrace{Q \operatorname{sen} 2\omega t}_{\text{(II)}} \tag{2.9}$$

A parcela (I) corresponde à potência instantânea, que é sempre fornecida à carga; seu valor nunca se torna negativo e seu valor médio é a *potência ativa* (P), que também é o valor médio de p. A parcela (II) representa a potência instantânea que é trocada entre a carga e a fonte, o que não é desejável do ponto de vista da transferência de energia; seu valor médio é nulo e seu valor máximo é a *potência reativa* Q. A grandeza P representa a potência ativa absorvida pela carga elétrica da Figura 2.1, e a potência da parcela (II) representa a potência que vai da fonte para a carga e vice-versa, a qual não é consumida, mas trocada entre as reatâncias indutivas e capacitivas do circuito cujo valor médio é nulo, embora seja representada pelo valor máximo Q, conhecido como potência reativa absorvida pela carga. Assim, pode-se representar a carga da Figura 2.1 por aquela da Figura 2.3 para o caso de CA.

A potência em corrente alternada pode ser expressa por

$$\dot{S} = P + jQ = S \angle \Phi \tag{2.10}$$

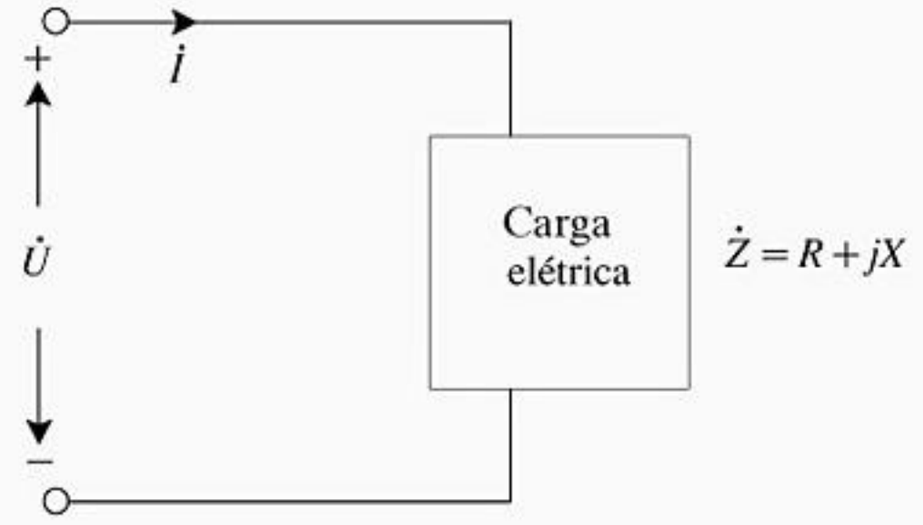


Figura 2.3 ▪ Diagrama de uma carga elétrica em CA

onde:

- S = potência aparente em VA.
- P = potência ativa em W.
- Q = potência reativa em var.

As potências P e Q têm a dimensão de "watt"; porém, para enfatizar o fato de que a potência Q representa uma componente "não-ativa", ela é medida em volt-ampères reativos (var).

A carga da Figura 2.3 pode ser representada por uma impedância equivalente $\dot{Z}$, composta pela resistência R e pela reatância X equivalentes:

$$\dot{Z} = R + jX = Z \angle \Phi = Z \cos \Phi + jZ \operatorname{sen} \Phi \quad (2.11)$$

Pode-se escrever:

$$\dot{U} = \dot{Z}\ \dot{I}$$

A potência aparente ($\dot{S}$) pode ser expressa por:

$$\dot{S} = P + jQ = \dot{U}I^* = \dot{Z}\dot{I}I^* = \dot{Z}I^2$$

$$\dot{S} = (R + jX)I^2 = RI^2 + jXI^2$$

Portanto, tem-se

$$P = RI^2 \quad (2.12)$$

$$Q = XI^2 \quad (2.13)$$

Pode-se representar a carga da Figura 2.3 por aquela da Figura 2.4.

No circuito da Figura 2.4, observe que a resistência elétrica R representa o elemento ativo e consome a potência ativa P, e que a reatância elétrica X representa o elemento reativo (indutivo ou capacitivo) e, quando indutivo, consome a potência reativa Q. Pode-se, de modo geral, dizer que a carga elétrica está consumindo uma potência aparente S, composta pela parcela de potência ativa P e reativa Q.

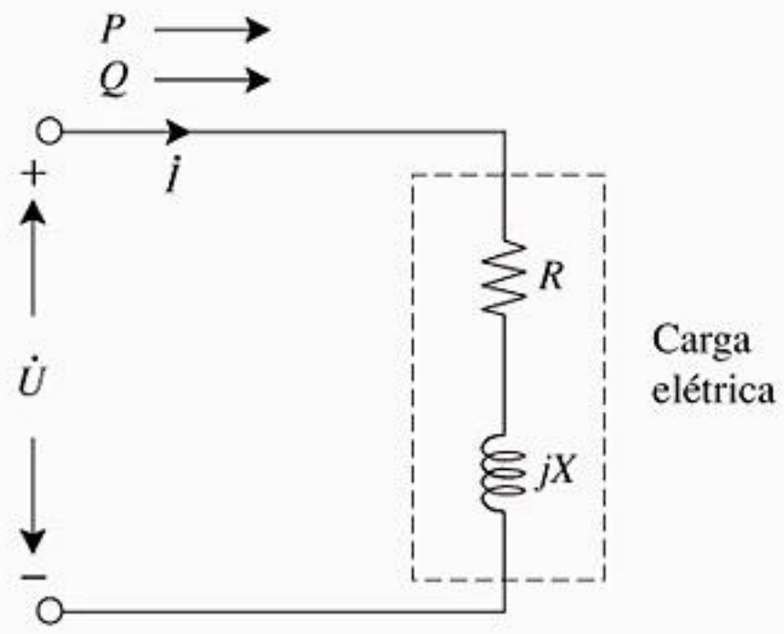


Figura 2.4 ■ Diagrama de carga elétrica em CA representada por um resistor e um indutor

O ângulo Φ, fase da impedância ou ângulo do $\dot{S}$, define o *fator de potência*, cos Φ, expresso por:

$$\cos \Phi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z} \quad (2.14)$$

O fator de potência deverá ser acompanhado das palavras "indutivo" (atrasado) ou "capacitivo" (adiantado), para caracterizar bem a carga elétrica, porque o cos Φ sempre será positivo para qualquer ângulo Φ.

A Tabela 2.1 indica, para os diversos tipos de carga elétrica, o fator de potência e as potências ativa e reativa. Observe que uma carga indutiva absorve Q positiva, isto é, um indutor *consome* potência reativa. Para uma carga capacitiva, temos a absorção de Q negativa, ou seja, um capacitor *gera* potência reativa. É fácil verificar que uma mudança de sinal de Q significa simplesmente uma defasagem de 180° na parcela (II) da Expressão 2.9.

EXEMPLO

Os valores na entrada de um circuito que alimenta uma carga elétrica monofásica são:

$\dot{U} = 200 \angle 30°$ V e $\dot{I} = 10 \angle 60°$ A

Calcular:

A impedância da carga:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{200 \angle 30°}{10 \angle 60°} = 20 \angle -30° \ \Omega$$

A potência ativa:

$$P = UI \cos \Phi$$

$$P = 200 \times 10 \cos (-30°)$$

$$P = 200 \times 10 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 1.732\ W$$

A potência reativa:

$$Q = UI \operatorname{sen} \Phi = 200 \times 10 \times \operatorname{sen} (-30°)$$

$Q = -1.000$ var (a carga é capacitiva)

O fator de potência:

$$\cos \Phi = \cos (-30°) = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}866$$

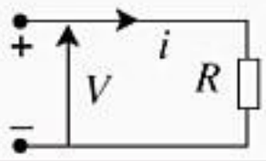
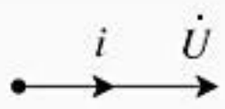
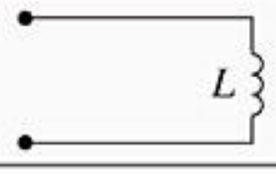
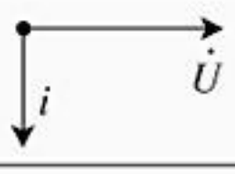
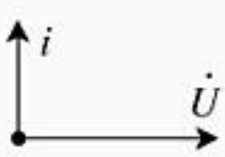
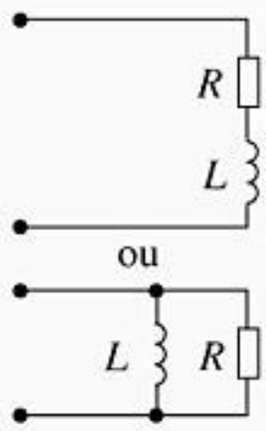
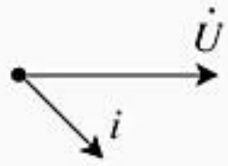
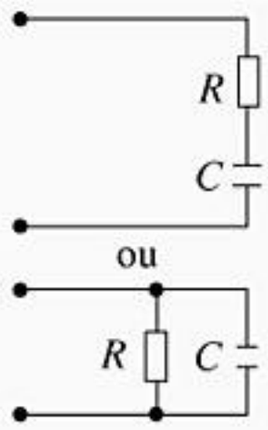
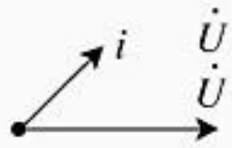
(capacitivo ou adiantado)

Potência em circuito trifásico

Seja o sistema trifásico mostrado na Figura 2.5, considerando-se as tensões instantâneas de fase em relação ao neutro:

$$u_a = \sqrt{2}\, U \operatorname{sen} \omega t$$

Tabela 2.1 ▪ Cargas elétricas genéricas

Tipo de carga	Relação fasorial	Defasagem ângulo de Z	Fator de potência	Potência absorvida pela carga	
				P	Q
		$\Phi = 0°$	$\cos \Phi = 1$	$P > 0$	$Q = 0$
		$\Phi = +90°$	$\cos \Phi = 0$	$P = 0$	$Q > 0$
		$\Phi = -90°$	$\cos \Phi = 0$	$P = 0$	$Q < 0$
		$0° < \Phi < +90°$	$0 < \cos \Phi < 1$	$P > 0$	$Q > 0$
		$-90° < \Phi < 0°$	$0 < \cos \Phi < 1$	$P > 0$	$Q < 0$

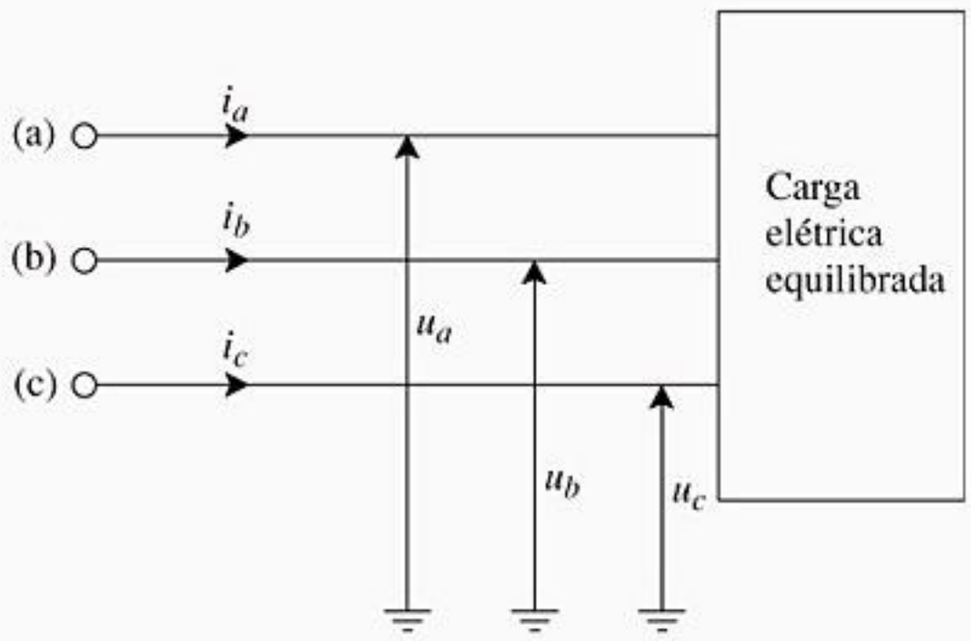


Figura 2.5 ▪ Diagrama de um circuito trifásico equilibrado

$$u_b = \sqrt{2}\, U \operatorname{sen} (\omega t - 120°) \qquad (2.15)$$

$$u_c = \sqrt{2}\, U \operatorname{sen} (\omega t - 240°)$$

Se a carga elétrica for equilibrada, as três correntes instantâneas de fase poderão ser escritas como:

$$i_a = \sqrt{2}\, I \operatorname{sen} (\omega t - \Phi)$$

$$i_b = \sqrt{2}\, I \operatorname{sen} (\omega t - 120° - \Phi) \qquad (2.16)$$

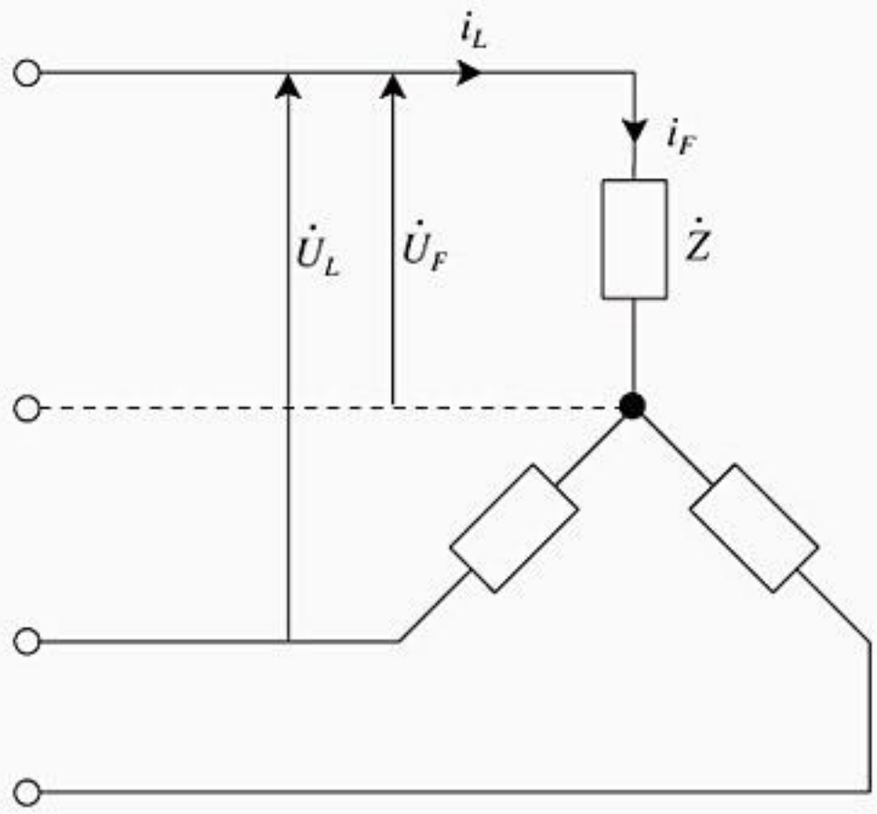
$$i_c = \sqrt{2}\, I \operatorname{sen} (\omega t - 240° - \Phi)$$

A potência instantânea total trifásica transmitida à carga elétrica será igual à soma das potências instantâneas de cada fase, ou seja,

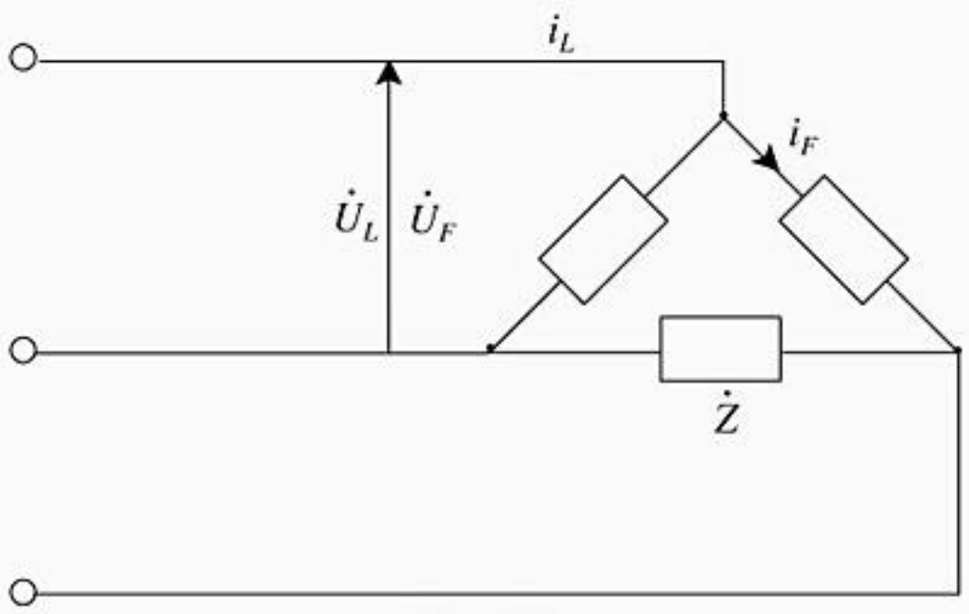
$$p_{\text{trif}} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \qquad (2.17)$$

Substituindo os valores das tensões e correntes das expressões 2.15 e 2.16 e utilizando as devidas relações trigonométricas, obtém-se a potência ativa total entregue à carga equilibrada:

$$P_{\text{trif}} = 3\, UI \cos \Phi = 3P \qquad (2.18)$$



$$\text{Estrela} \begin{cases} U_L = \sqrt{3}\, U_F \\ i_L = i_F \end{cases}$$



$$\text{Triângulo} \begin{cases} U_L = U_F \\ i_L = \sqrt{3}\, i_F \end{cases}$$

Figura 2.6 ■ Diagrama de cargas equilibradas em Y e Δ

Note que a potência ativa consumida pela carga trifásica é igual ao triplo da potência ativa que passa por fase.

Eis algumas observações importantes para sistemas trifásicos equilibrados:

- A soma algébrica das três correntes de fase é igual a zero, não havendo, portanto, necessidade de condutor de retorno.
- A soma algébrica das três tensões de fase também é igual a zero.
- As figuras 2.5 e 2.6 indicam as relações entre tensões e correntes eficazes de linha e de fase (índices L e F, respectivamente) para cargas ligadas em estrela e em triângulo. É fácil verificar que, para ambas as ligações, pode-se escrever:

$$P_{\text{trif}} = 3U_F I_F \cos \Phi = \sqrt{3}\, U_L I_L \cos \Phi \quad (2.19)$$

- Para a potência reativa pode-se chegar a uma expressão análoga, ou seja:

$$Q_{\text{trif}} = 3Q = 3U_F I_F \operatorname{sen} \Phi = \sqrt{3}\, U_L I_L \operatorname{sen} \Phi \quad (2.20)$$

Pode-se observar que, em cada fase, a potência reativa é monofásica, tal como descreve a Expressão 2.9. Portanto, não teria sentido falar em "potência reativa trifásica" assim como significaria falar em uma "corrente trifásica" $3I$. No entanto, é comum empregar Q_{trif}, por analogia com P_{trif}, sempre que se referir à potência reativa em um sistema trifásico,.

Considere cargas trifásicas equilibradas em Y ou Δ apresentadas na Figura 2.6, onde se tem, fasorialmente, para tensão e corrente:

Potência aparente

Seja uma carga qualquer apresentada na Figura 2.7.

De modo geral, as tensões e as correntes elétricas em CA em regime senoidal podem ser representadas por

$$\dot{U} = U \angle \hat{U} \quad (2.21)$$

$$\dot{I} = I \angle \hat{I} \quad (2.22)$$

O fasor *conjugado* da corrente $\dot{I}$ é dado por

$$I^* = I \angle -\hat{I} \quad (2.23)$$

A potência aparente será dada por

$$\dot{S} = \dot{U}\dot{I}^* \quad (2.24)$$

Obtém-se, das expressões 2.21 e 2.23 na Expressão 2.24

$$\dot{S} = U \angle \hat{U} \cdot I \angle -\hat{I} = UI \angle \hat{U} - \hat{I}$$

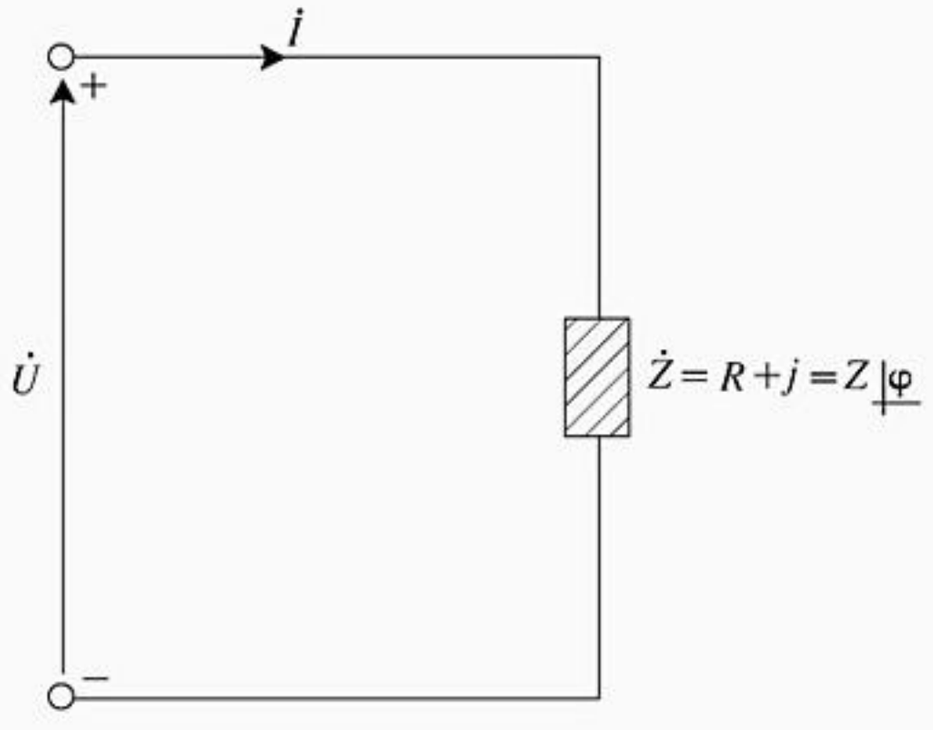


Figura 2.7 ■ Diagrama de uma carga elétrica genérica em CA

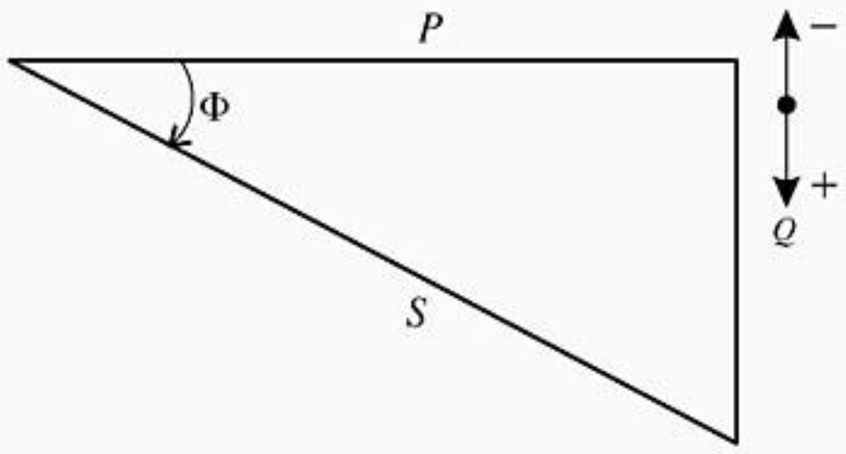


Figura 2.8 ▪ Diagrama do triângulo de potências

Sendo o ângulo de fase $\underline{/\hat{U}} - \underline{/\hat{I}}$ igual a Φ, isso é igual ao ângulo da impedância $\dot{Z}$. Assim,

$$\dot{S} = UI\,\underline{/\Phi} = UI\cos\Phi + jUI\,\text{sen}\,\Phi = P + jQ \tag{2.25}$$

Utilizando

$$\dot{U} = \dot{Z}\dot{I} \quad \text{e} \quad \dot{I} = \dot{Y}\dot{U} \tag{2.26}$$

chega-se às expressões

$$\dot{S} = \dot{Z}\dot{I}\dot{I}^* = \dot{Z}I^2 = RI^2 + jXI^2 = P + jQ \tag{2.27}$$

$$\dot{S} = \dot{U}\dot{Y}^*\dot{U}^* = \dot{Y}^*U^2 \tag{2.28}$$

A grandeza complexa $\dot{S}$ – da qual as potências ativa e reativa são, respectivamente, a parte real e a parte imaginária – recebe o nome de *potência aparente complexa*. Seu módulo dado por

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI \tag{2.29}$$

é chamado *potência aparente*, medido em volt-ampères (VA) e utilizado na caracterização de equipamentos.

Em sistemas trifásicos equilibrados, pode-se definir do mesmo modo em que foi feito para P e Q

$$S_{\text{trif}} = 3S = 3U_F I_F = \sqrt{3}\,U_L I_L \tag{2.30}$$

As relações entre as potências ativa, a reativa e a aparente podem ser representadas pelo *triângulo de potências*, mostrado na Figura 2.8.

O triângulo de potências é invertido para ser coerente com o ângulo da impedância $\dot{Z}$. Portanto, como mostra a Figura 2.8, a potência reativa Q indutiva é direcionada para baixo e a capacitiva, para cima. O ângulo ϕ tem valor positivo no sentido horário.

De acordo com o triângulo, as relações a seguir são evidentes:

$$P = S\cos\Phi \tag{2.31}$$

$$Q = S\,\text{sen}\,\Phi \tag{2.32}$$

$$\text{tg}\,\Phi = \frac{Q}{P} \quad \text{e} \quad \cos\Phi = \frac{P}{S} \tag{2.33}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{2.34}$$

A seguir, será examinada a regra da soma das potências complexas. Para isso, toma-se, inicialmente, o circuito em série mostrado na Figura 2.9(a).

A potência total absorvida será

$$\dot{S}_{\text{tot}} = \dot{U}\dot{I}^* \tag{2.35}$$

Do circuito, tem-se

$$\dot{U} = \dot{I}\dot{Z}_1 + \dot{I}\dot{Z}_2 + \ldots + \dot{I}\dot{Z}_n = (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \ldots + \dot{Z}_n)\dot{I} \tag{2.36}$$

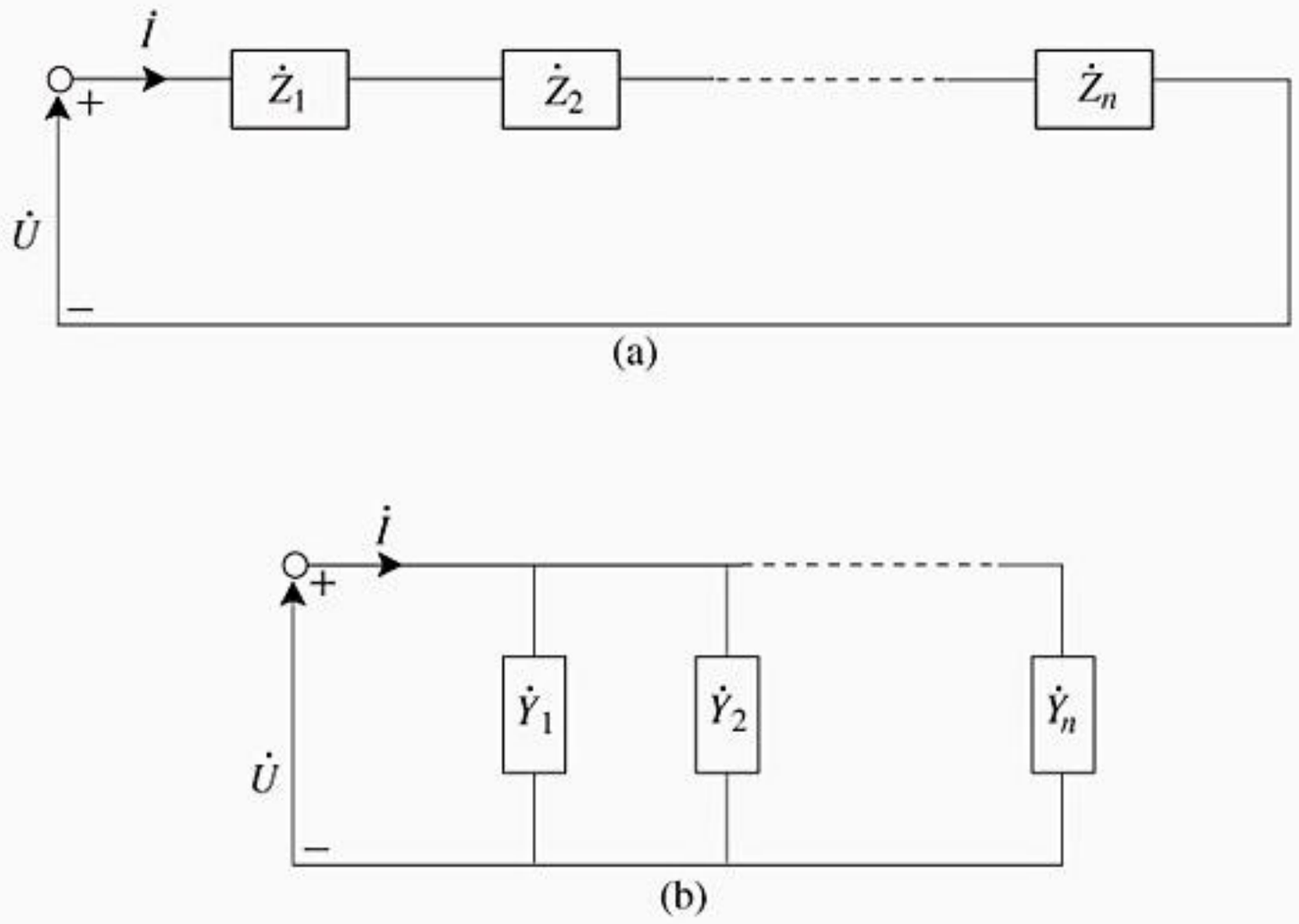


Figura 2.9 ▪ Diagramas de circuitos com impedâncias em série e admitâncias em paralelo

Substituindo a Expressão 2.36 na 2.35, tem-se

$$\dot{S}_{\text{tot}} = (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \ldots + \dot{Z}_n)\dot{I}\dot{I}^* =$$

$$= I^2\dot{Z}_1 + I^2\dot{Z}_2 + \ldots + I^2\dot{Z}_n$$

e considerando a Expressão 2.27, obtém-se

$$\dot{S}_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{n} \dot{S}_i = \sum_{i=1}^{n} (P_i + jQ_i) \qquad (2.37)$$

Para o circuito com admitância em paralelo da Figura 2.9(b), tem-se

$$\dot{I} = \dot{U}\dot{Y}_1 + \dot{U}\dot{Y}_2 + \ldots + \dot{U}\dot{Y}_n \qquad (2.38)$$

Substituindo a Expressão 2.38 na 2.35, obtém-se

$$\dot{S}_{\text{tot}} = \dot{U}(\dot{U}\dot{Y}_1 + \dot{U}\dot{Y}_2 + \ldots + \dot{U}\dot{Y}_n)^*$$

$$\dot{S}_{\text{tot}} = \dot{U}[\dot{U}(\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \ldots + \dot{Y}_n)]^* =$$

$$= \dot{U}\dot{U}^*(\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \ldots + \dot{Y}_n)^*$$

$$\dot{S}_{\text{tot}} = U^2(\dot{Y}_1^* + \dot{Y}_2^* + \ldots + \dot{Y}_n^*)$$

$$\dot{S}_{\text{tot}} = U^2\dot{Y}_1^* + U^2\dot{Y}_2^* + \ldots + U^2\dot{Y}_n^*) \qquad (2.39)$$

Comparando a Expressão 2.39 com a 2.28, chega-se a

$$\dot{S}_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{n} \dot{S}_i = \sum_{i=1}^{n} (P_i + jQ_i) \qquad (2.40)$$

Assim, tanto para cargas em série quanto para cargas em paralelo, a potência aparente total é a soma das potências aparentes absorvidas por carga.

EXEMPLO

Uma carga trifásica ligada em estrela é constituída por impedâncias iguais a $4 + j3\ \Omega$/fase (Figura 2.10). Sendo a tensão de linha igual a 208 V, determine as potências ativa e reativa, por fase e total.

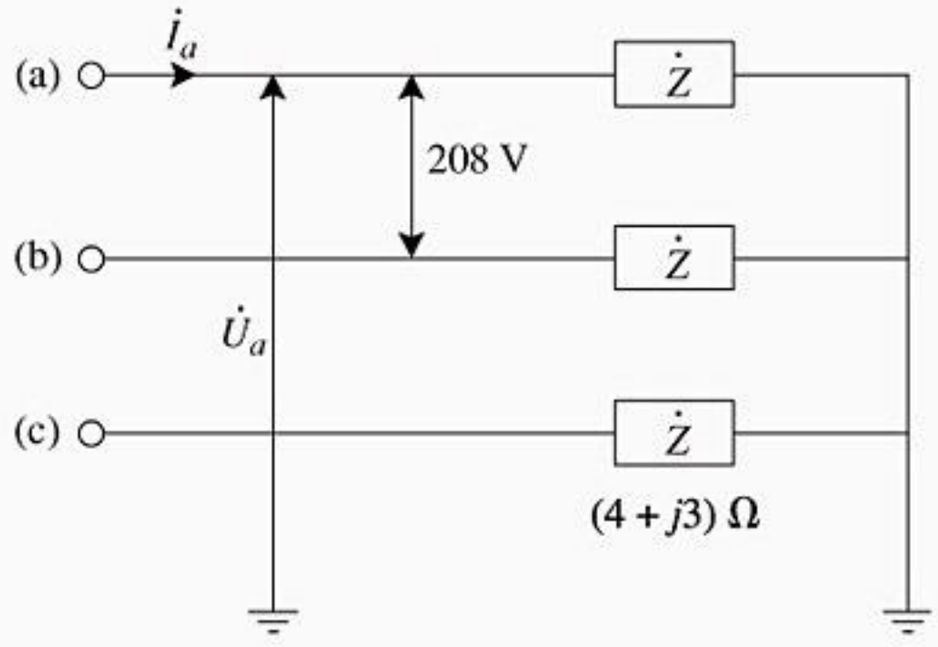


Figura 2.10 ■ Diagrama de carga trifásica balanceada em Y

Como o circuito é equilibrado, pode-se trabalhar apenas com uma das fases (fase (a), por exemplo). Assim, tem-se

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\dot{Z}} = \frac{208/\sqrt{3}}{4 + j3} = \frac{120}{5\ \underline{|36{,}90}} \therefore \dot{I}_a = 24\ \underline{|-36{,}90}\ \text{A}$$

Observe que o ângulo Φ da impedância da carga é 36,90°, portanto

$$\cos \Phi = 0{,}8$$

$$\text{sen } \Phi = 0{,}6$$

A potência ativa total será a da Expressão 2.19

$$P = 3P_F = \sqrt{3}\, U_L I_L \cos \Phi =$$

$$= \sqrt{3} \cdot 208 \cdot 24 \cdot 0{,}8 = 6.917\ \text{W}$$

$$P_F = \frac{6.917}{3} = 2.305{,}7\ \text{W (por fase)}$$

Para a potência reativa, tem-se, da Expressão 2.20

$$Q = 3Q_F = \sqrt{3}\, U_L\, I_L \text{sen } \Phi =$$

$$= \sqrt{3} \cdot 208 \cdot 24 \cdot 0{,}6 = 5.188\ \text{var (total)}$$

$$Q_F = \frac{5.188}{3} = 1.729{,}3\ \text{var (por fase)}$$

Pode-se resolver este mesmo exemplo utilizando o conceito de potência aparente. Como a tensão e a impedância são dadas, pode-se utilizar a Expressão 2.28, ou seja,

$$\dot{S} = \dot{Y}^*\, U^2$$

A admitância por fase na carga será igual a

$$\dot{Y} = \frac{1}{4 + j3} = \frac{4 - j3}{25} = 0{,}16 - j0{,}12$$

ou seja,

$$\dot{Y}^* = 0{,}16 + j0{,}12$$

Ao fazer a substituição, tem-se

$$\dot{S} = (0{,}16 + j0{,}12)\left(\frac{208}{\sqrt{3}}\right)^2 = 2.305{,}7 + j1.729{,}3$$

Portanto, obtém-se, por fase:

$$P_F = 2.305{,}7\ \text{W por fase}$$

$$Q_F = 1.729{,}3\ \text{var por fase}$$

2.2 Cálculos práticos de circuitos

Circuito com carga concentrada na extremidade

A Figura 2.11(a) mostra um circuito monofásico, fase-fase ou fase-neutro, constituído por dois condutores iguais e com uma carga elétrica em sua extremidade, consumindo uma potência ativa P com um fator de potência (indutivo) cos Φ. Sejam U_1 e U_2 as tensões (eficazes), respectivamente, na origem do circuito e na carga, onde I é a corrente (eficaz), r é a resistência CA por condutor, por unidade de comprimento, x a reatância indutiva por condutor, por unidade de comprimento, e l é o comprimento do circuito, isto é, a distância entre a origem do circuito e a carga.

A equação fasorial do circuito pode ser escrita como

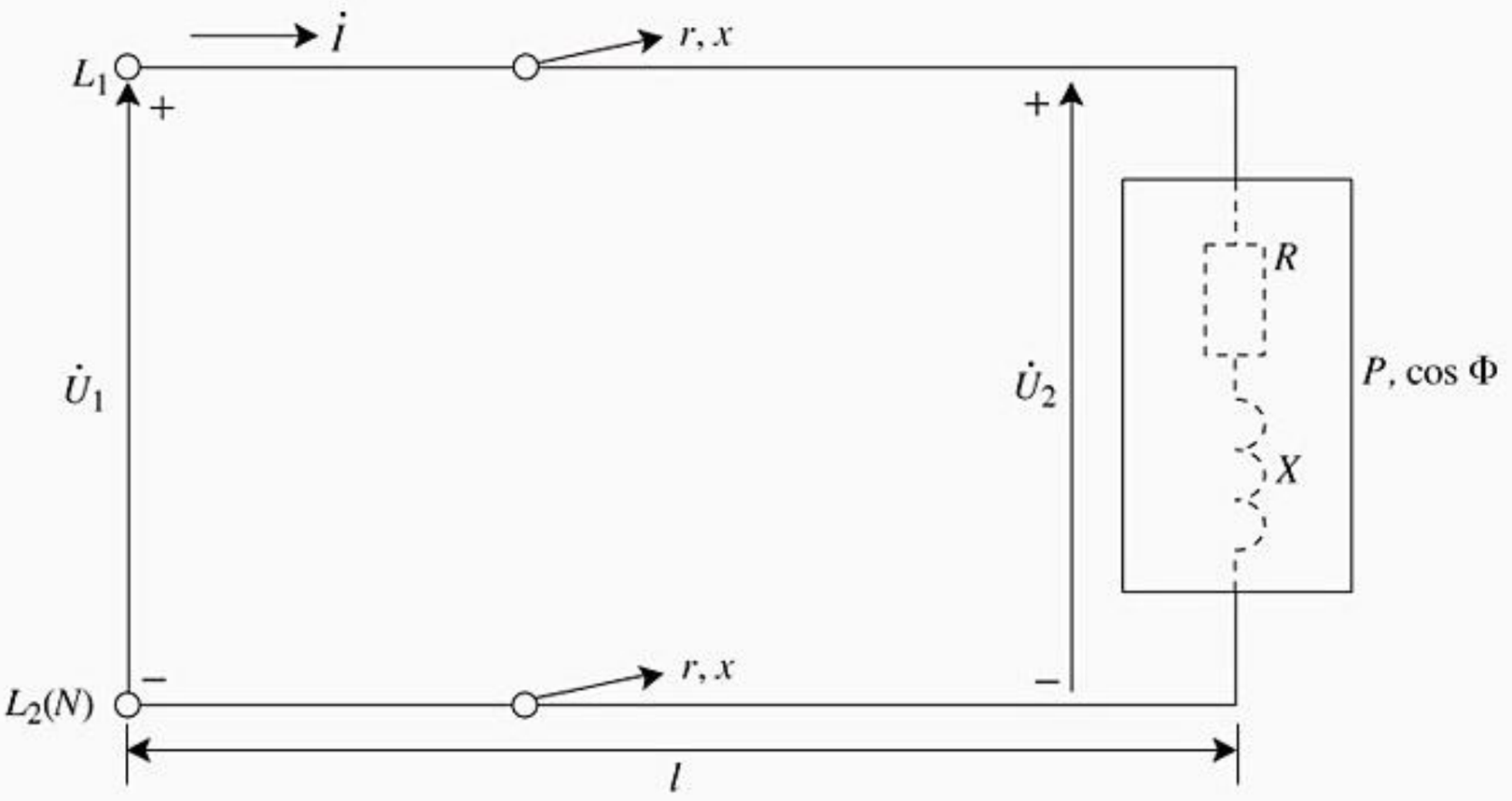
$$\dot{U}_1 = 2l\dot{I}(r + jx) + \dot{U}_2 = \dot{U}_2 + 2rl\dot{I} + j2xl\dot{I}_2 \tag{2.41}$$

Tendo $\dot{U}_2$ como referência, o fasor $\dot{I}$ é dado por

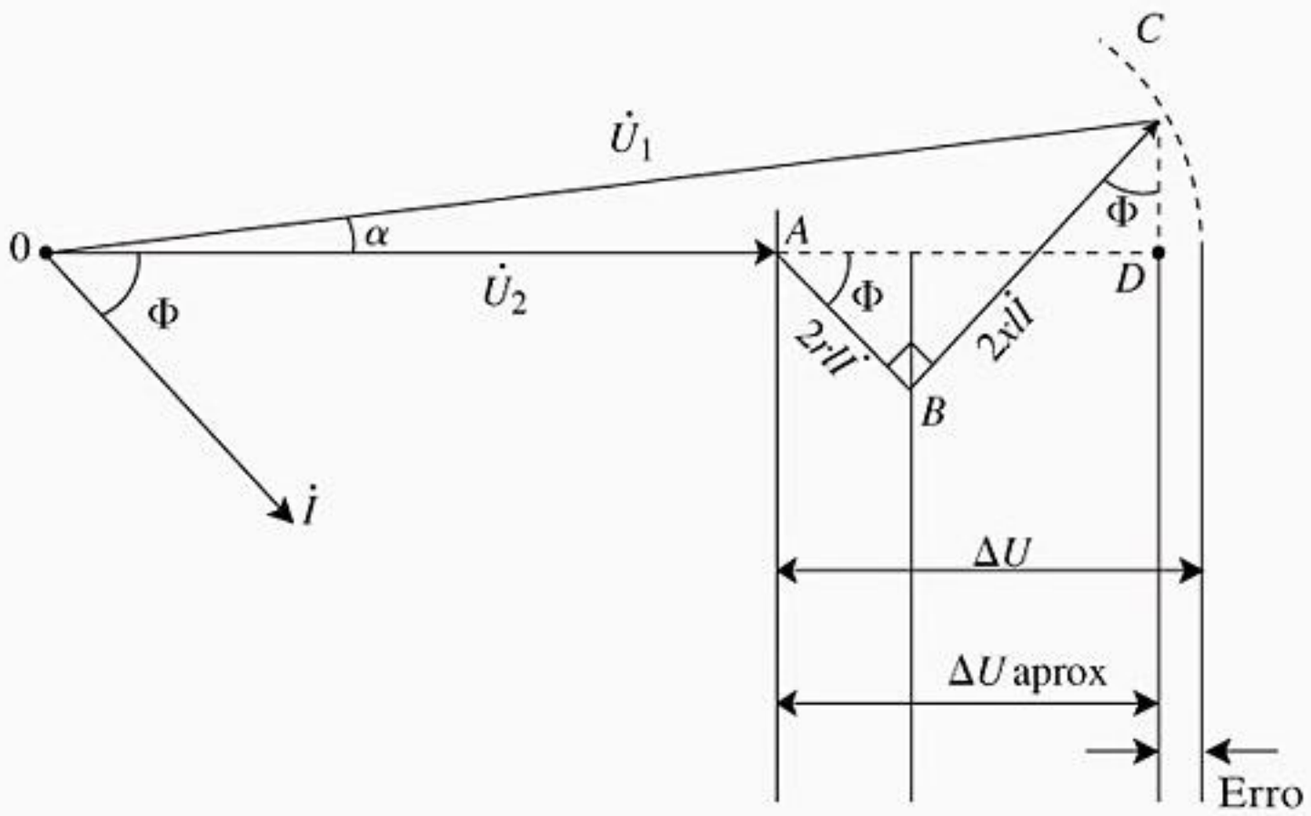
$$\dot{I} = I \underline{|-\Phi} \tag{2.42}$$

onde I pode ser obtido em função de P, U_2 e cos Φ, ou seja,

$$I = \frac{P}{U_2 \cos \Phi} \tag{2.43}$$



(a)



(b)

Figura 2.11 ▪ Diagrama de carga monofásica concentrada na extermidade do circuito e diagrama de fasores

De acordo com a Expressão 2.41, pode-se construir o diagrama fasorial da Figura 2.11(b).

De P, cos Φ e I, é possível definir a *impedância equivalente* da carga como

$$Z = \frac{P}{I^2 \cos \Phi} \tag{2.44}$$

sendo

$$\dot{Z} = Z \underline{|\Phi} = R + jX$$

onde R e X são a *resistência equivalente* e a *reatância indutiva equivalente* da carga, respectivamente.

A *queda de tensão* do circuito é definida como

$$\Delta U = U_1 - U_2 \tag{2.45}$$

onde pode-se obter do diagrama fasorial da Figura 2.11(b).

$$U_2 = 0D - AD \tag{2.46}$$

$$0D = \sqrt{0C^2 - CD^2} = \sqrt{U_1^2 - CD^2} \tag{2.47}$$

$$CD = 2xlI \cos \Phi - 2rlI \operatorname{sen} \Phi \tag{2.48}$$

$$AD = 2rlI \cos \Phi + 2xlI \operatorname{sen} \Phi \tag{2.49}$$

Substituindo a Expressão 2.48 na 2.47, obtém-se

$$0D = \sqrt{U_1^2 - (2xlI \cos \Phi - 2rl \operatorname{sen} \Phi)^2} \tag{2.50}$$

e agora substituindo as expressões 2.49 e 2.50 na Expressão 2.46:

$$U_2 = \sqrt{U_1^2 - (2xlI \cos \Phi - 2rlI \operatorname{sen} \Phi)^2} - (2rlI \cos \Phi + 2xlI \operatorname{sen} \Phi) \tag{2.51}$$

O ângulo α entre os fasores $U\sim_1$ e $U\sim_2$ terá por tangente

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{CD}{0D} \tag{2.52}$$

Pode-se escrever para $0D$

$$0D = U_2 + 2rlI \cos \Phi + 2xlI \operatorname{sen} \Phi \tag{2.53}$$

Substituindo as expressões 2.48 e 2.53 na 2.52, tem-se

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2xlI \cos \Phi - 2rlI \operatorname{sen} \Phi}{U_2 + 2rlI \cos \Phi + 2xlI \operatorname{sen} \Phi} \tag{2.54}$$

Substituindo a 2.51 na 2.45, a queda de tensão será:

$$\Delta U = U_1 + 2rlI \cos \Phi + 2xlI \operatorname{sen} \Phi - \sqrt{U_1^2 - (2xlI \cos \Phi - 2rlI \operatorname{sen} \Phi)^2} \tag{2.55}$$

Na prática, o ângulo α é muito pequeno e podemos considerar, com boa aproximação, que $0C$ é igual à sua projeção $0D$, o que equivale a nulos o ângulo α e sua tangente; ou seja, com a Expressão 2.54 chega-se a

$$2xlI \cos \Phi - 2rlI \operatorname{sen} \Phi = 0 \tag{2.56}$$

Assim, substituindo a Expressão 2.56 na 2.55, tem-se

$$\Delta U = 2lI (r \cos + x \operatorname{sen} \Phi) \tag{2.57}$$

Expressão que representa a queda de tensão no circuito da Figura 2.11, desprezando-se a defasagem entre U_1 e U_2.

Considere agora o circuito trifásico equilibrado (com ou sem neutro), mostrado na Figura 2.12(a), onde U_1 e U_2 são as tensões de linha (fase-fase) na origem do circuito e na carga, respectivamente. Estas estão relacionadas às tensões de fase (fase-neutro), U_1' e U_2' por:

$$U_1' = U_1/\sqrt{3}$$

$$U_2' = U_2/\sqrt{3}$$

Tratando-se de um circuito equilibrado, pode-se trabalhar com um circuito equivalente monofásico (fase-neutro), como indicado na Figura 2.12(b) e cuja equação fasorial pode ser escrita

$$U\sim_1' = lI \sim(r + jx) + U\sim_2'$$

onde a corrente é dada por:

$$I = \frac{P/3}{U_2' \cos \Phi} \tag{2.58}$$

Procedendo como no caso anterior, obtém-se pela Expressão 2.56 a queda de tensão, que pode ser dada por:

$$\Delta U' = U_1' - U_2' = lI (r \cos \Phi + x \operatorname{sen} \Phi) \tag{2.59}$$

A queda de tensão de linha será igual à

$$\Delta U = \sqrt{3}\, lI (r \cos \Phi + x \operatorname{sen} \Phi) \tag{2.60}$$

Por sua vez, da Expressão 2.19, a corrente poderá ser escrita como:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\, U_2 \cos \Phi} \tag{2.61}$$

Circuitos com carga distribuída

Considere o circuito monofásico representado na Figura 2.13, que alimenta duas cargas conectadas em pontos diferentes do circuito, as quais consomem as potências ativas P_3 e P_2 e cujos fatores de potência são, respectivamente, cos Φ_3 e cos Φ_2. Se as tensões nessas cargas forem U_3 e U_2, as correntes serão iguais a:

$$I_3 = \frac{P_3}{U_3 \cos \Phi_3} \tag{2.62}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2 \cos \Phi_2} \tag{2.63}$$

A corrente total do circuito será, fasorialmente,

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 \tag{2.64}$$

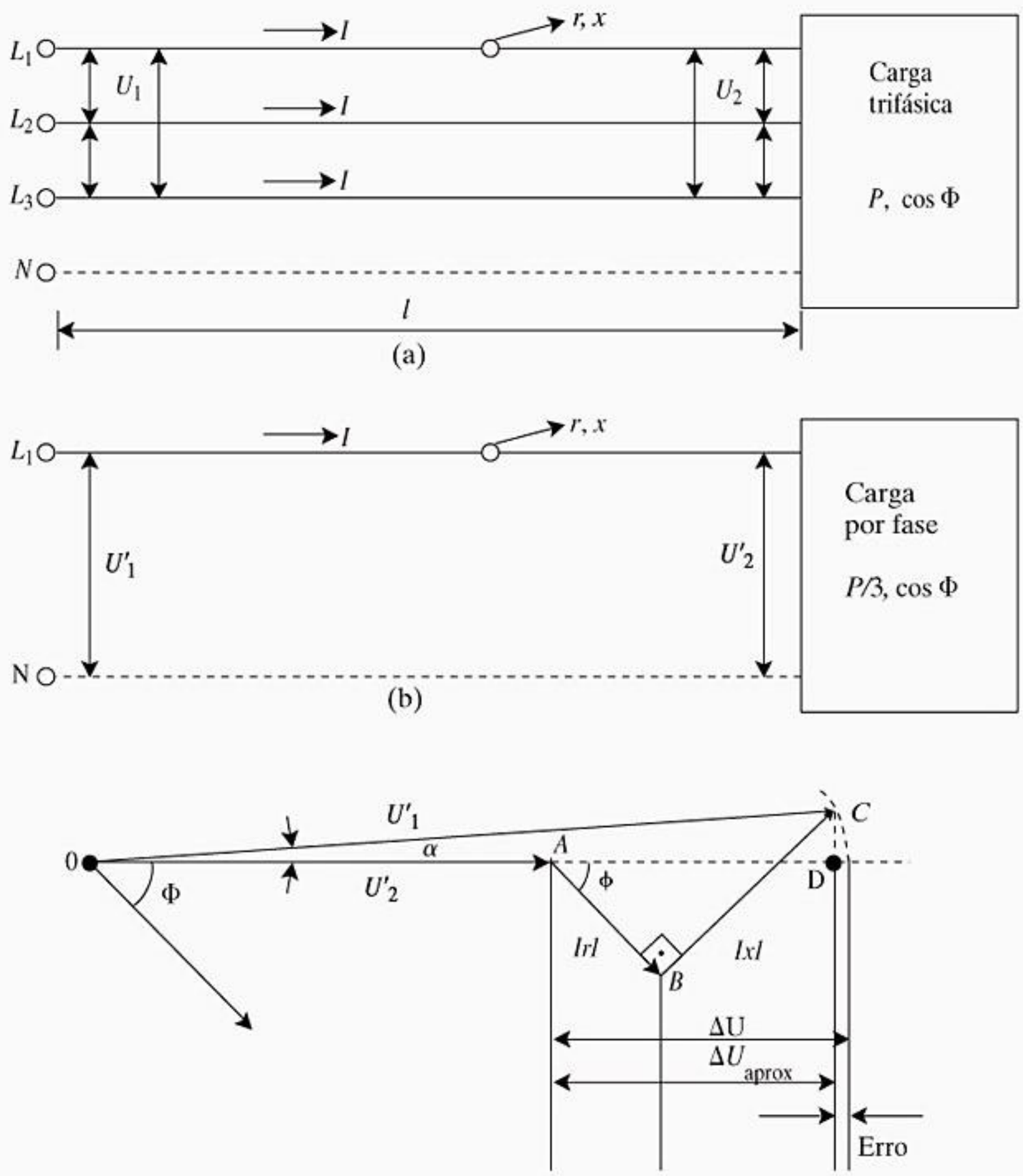


Figura 2.12 ▪ (a) diagrama de circuito trifásico equilibrado com carga na extremidade; (b) diagrama de circuito equivalente por fase; (c) diagrama fasorial do circuito equivalente por fase

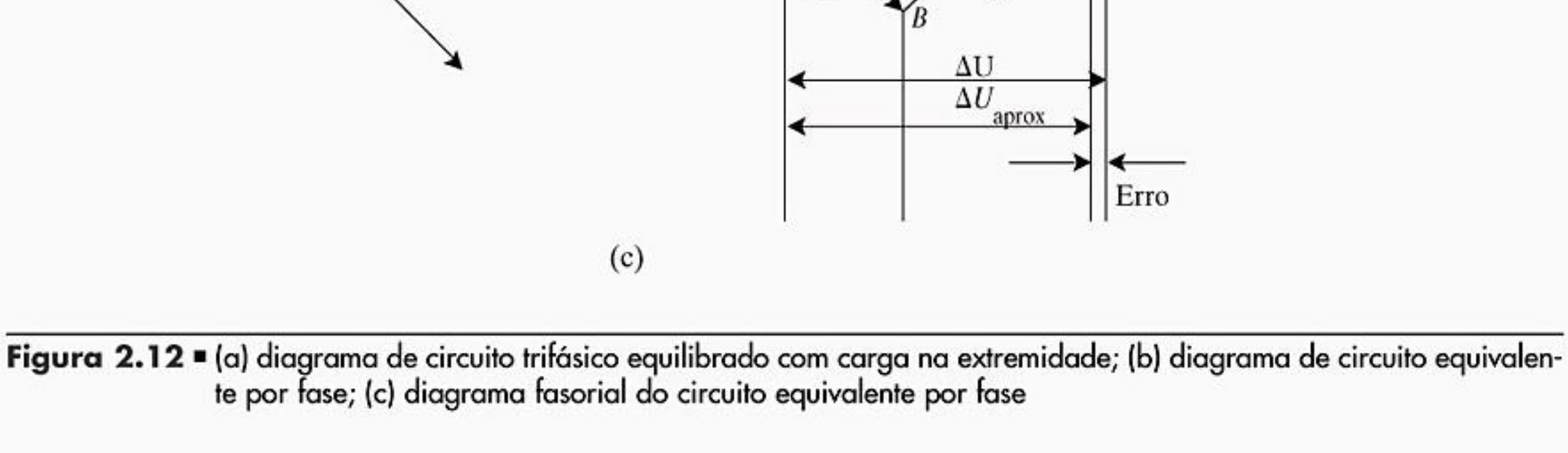


Figura 2.13 ▪ Diagrama de circuito monofásico com duas derivações

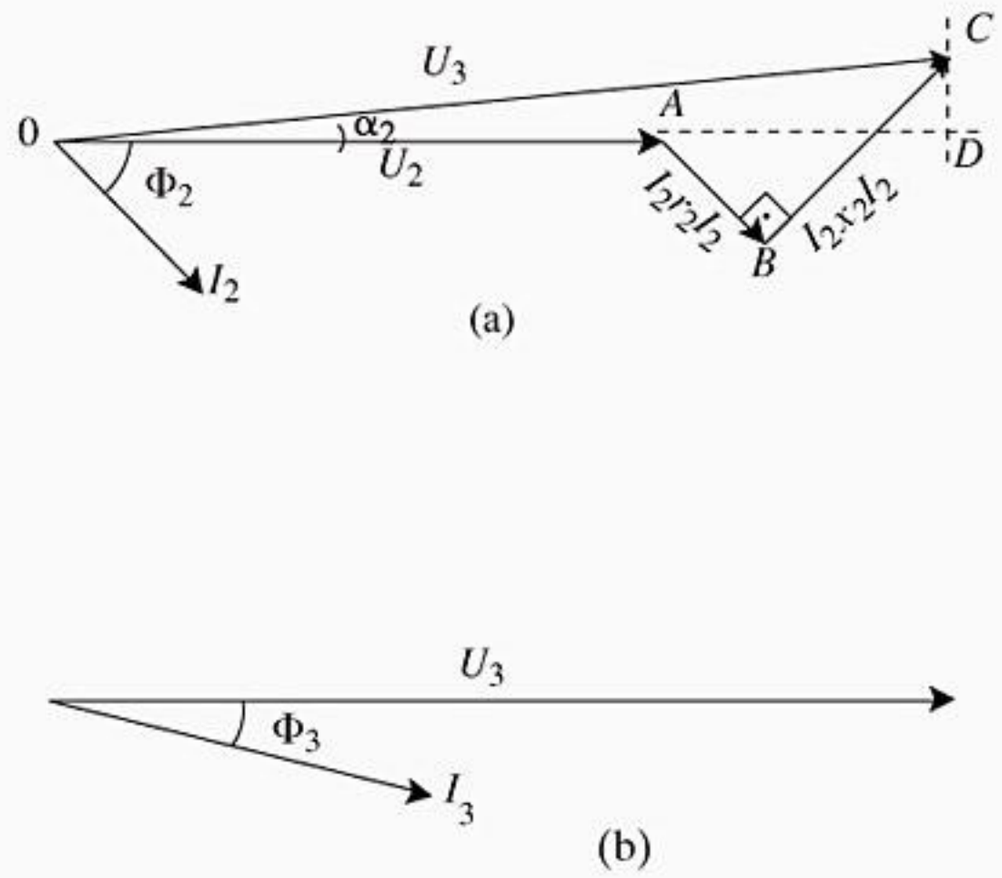


Figura 2.14 ■ Diagramas fasoriais do circuito da Figura 2.13

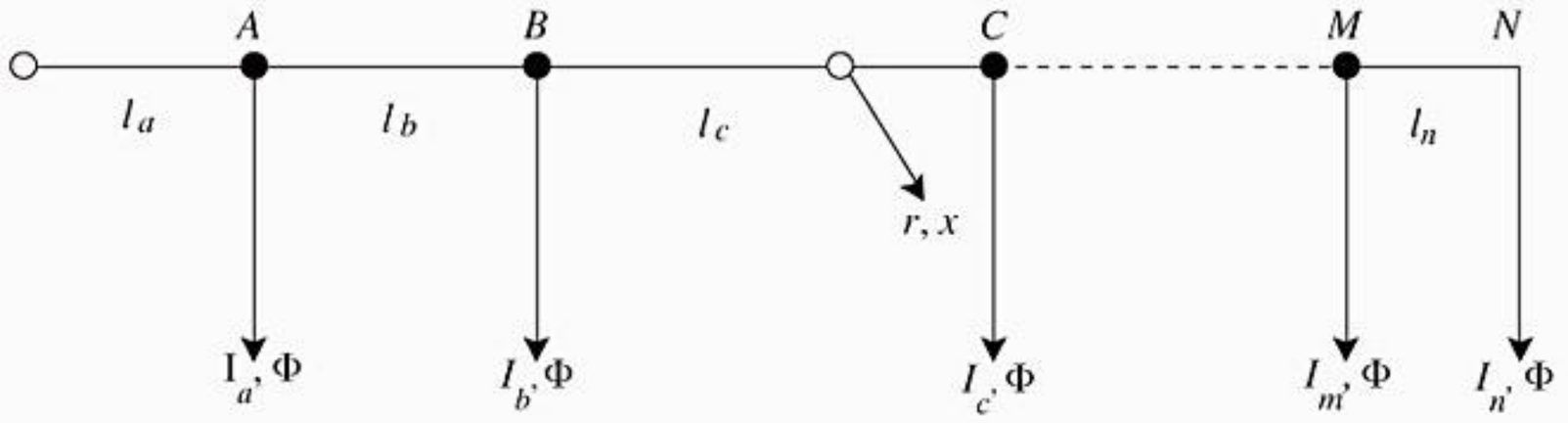


Figura 2.15 ▪ Diagrama de circuito monofásico com cargas distribuídas, de fatores de potência iguais e condutores com características iguais

Sejam U_1 a tensão na origem do circuito e (r_1, x_1) e (r_2, x_2) as características dos condutores nos dois trechos definidos, de comprimento l_1 e l_2, como mostra a Figura 2.13.

Pode-se iniciar o cálculo pelo último trecho, considerado um circuito isolado com uma carga em sua extremidade, onde o respectivo diagrama fasorial pode ser visto na Figura 2.14(a). Sendo conhecidos P_2, U_2 e Φ_2, além das características do circuito r_2, x_2 e l_2, obtém-se da Expressão 2.63 a corrente I_2 e, do triângulo $0CD$ do diagrama, obtém-se U_3 e α_2.

Conhecendo P_3, Φ_3 e U_3, obtém-se da Expressão 2.63 a corrente I_3, que resulta no diagrama fasorial da Figura 2.14(b).

A corrente I_1 que circula pelo primeiro trecho é, como indica a Expressão 2.64, o resultado da soma fasorial de I_2 com I_3, como mostra o diagrama da Figura 2.14(c). Conhecendo-se l_2, l_3, Φ_2, Φ_3 e α_2, o valor de I_1 pode ser obtido por

$$\beta = \Phi_2 + \alpha_2 - \Phi_3 \tag{2.65}$$

$$\lambda = 180° - \beta \tag{2.66}$$

$$I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 - 2I_2 I_3 \cos\beta} \tag{2.67}$$

Tem-se também que

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{I_3 \operatorname{sen}\beta}{I_3 \cos\beta - I_2} \tag{2.68}$$

$$\delta = 180° - (\theta + \lambda) \tag{2.69}$$

Com a corrente I_1, atrasada de $\Phi_1 = \delta + \Phi_3$ em relação a U_3, é possível determinar, a partir do diagrama fasorial da Figura 2.14(d), a tensão U_1 na origem do circuito, bem como o ângulo α_1, considerados conhecidos r_1, x_1 e l_1. A defasagem entre U_1 e I_1 será de $\Phi_1 + \alpha_1$.

A queda de tensão no segundo trecho será igual a $U_3 - U_2$ e no primeiro será igual a $U_1 - U_3$. A queda total no circuito será igual a

$$\Delta U = U_1 - U_2 = (U_1 - U_3) + (U_3 - U_2) \tag{2.70}$$

Se houver mais de duas derivações no circuito, para calcular a queda de tensão total, procede-se da maneira descrita anteriormente, começando pelo último trecho.

Um caso específico importante é um circuito monofásico com várias derivações cujas cargas têm fatores de potências iguais, em que a resistência r e a reatância x são constantes ao longo do circuito, como mostra a Figura 2.15.

Nessas condições, conhecidas as diversas correntes, I_a, I_b, ..., I_n, o comprimento dos diversos trechos, l_a, l_b, ..., l_n, as características do circuito, r e x, e o fator de potência (constante) cos Φ, a queda de tensão total pode ser determinada, com razoável aproximação, por meio da *queda de tensão unitária* (Z_{AP}) definida, da Expressão 2.57, como

$$Z_{AP} = r\cos\Phi + x\operatorname{sen}\Phi \quad (\mathrm{V/A \cdot km}) \tag{2.71}$$

A Z_{AP} representa a queda de tensão que ocorre em 1 km do condutor, quando passa uma corrente elétrica de 1A.

Assim, a queda de tensão nos diversos trechos será:

- Trecho $0A$

$$\Delta U_{0A} = 2l_a(I_a + I_b + I_c + \ \ldots\ + I_m + I_n) \cdot Z_{AP}$$

- Trecho AB

$$\Delta U_{AB} = 2l_b(I_b + I_c + I_d + \ \ldots\ + I_m + I_n) \cdot Z_{AP}$$

- Trecho BC

$$\Delta U_{BC} = 2l_c(I_c + I_d + I_e + \ \ldots\ + I_m + I_n) \cdot Z_{AP}$$

$$\vdots$$

- Trecho MN

$$\Delta U_{MN} = 2l_n I_n Z_{AP}$$

A queda de tensão total será igual a

$$\Delta U = \Delta U_{0A} + \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \ \ldots\ + \Delta U_{MN} \tag{2.72}$$

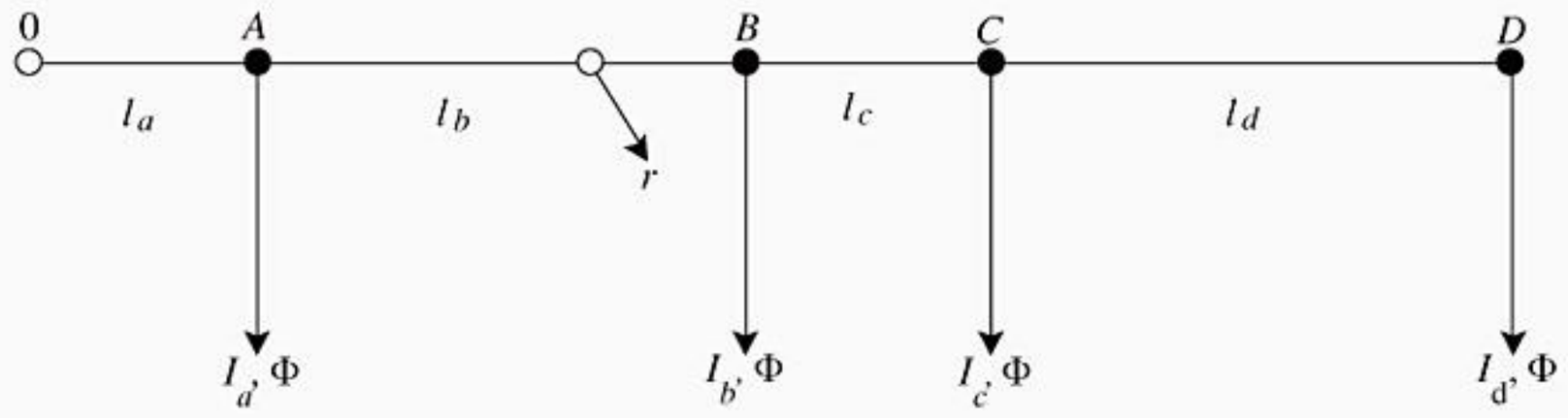


Figura 2.16 ■ Diagrama de circuito monofásico com cargas distribuídas e com fator de potência constante

EXEMPLO

Considere o circuito monofásico, mostrado na Figura 2.16, onde:

- $I_a = 2$ A; $l_a = 10$ m
- $I_b = 5$ A; $l_b = 25$ m
- $I_c = 7$ A; $l_c = 12$ m
- $I_d = 10$ A; $l_d = 32$ m
- $r = 4{,}5\ \Omega$ / km; $x = 0$

cos $\Phi = 0{,}8$ para todas as cargas elétricas.

A queda de tensão unitária será dada pela Expressão 2.71, assim

$$Z_{AP} = 4{,}5 \times 0{,}8 = 3{,}6\ \text{V/A} \cdot \text{km}$$

As quedas de tensão serão:

- Trecho 0*A*

$$\Delta U_{0A} = 2 \times 10 \times 10^{-3} \times (2 + 5 + 7 + 10) \times 3{,}6 = 1{,}73\ \text{V}$$

- Trecho *AB*

$$\Delta U_{AB} = 2 \times 25 \times 10^{-3} \times (5 + 7 + 10) \times 3{,}6 = 3{,}96\ \text{V}$$

- Trecho *BC*

$$\Delta U_{BC} = 2 \times 12 \times 10^{-3} \times (7 + 10) \times 3{,}6 = 1{,}47\ \text{V}$$

- Trecho *CD*

$$\Delta U_{CD} = 2 \times 32 \times 10^{-3} \times\ 10 \times 3{,}6 = 2{,}30\ \text{V}$$

- Total (0*D*) 5 9,46 V

2.3 Princípio da compensação da energia reativa

Considere o circuito trifásico mostrado na Figura 2.17, com duas cargas e supostamente equilibrado. São dados:

- A tensão de linha: $U = 220$ V
- As potências consumidas pelas cargas:
  $P_1 = 60$ kW
  $P_2 = 168$ kW
- Os fatores de potência das cargas:
  cos $\Phi_1 = 0{,}75$ (indutivo)
  cos $\Phi_2 = 0{,}80$ (indutivo)

Sendo um circuito equilibrado, pode-se trabalhar com o circuito monofásico equivalente, mostrado na Figura 2.18(a). Têm-se os seguintes valores:

(a) Carga 1

- Potência ativa:

$$P_{1f} = \frac{P_1}{3} = \frac{60}{3} = 20\ \text{kW}$$

- Potência reativa da Expressão 2.33:

$$Q_{1f} = P_{1f}\ \text{tg}\ \Phi_1 = 20 \times 0{,}87 = 17{,}4\ \text{kvar}$$

(b) Carga 2

- Potência ativa:

$$P_{2f} = \frac{P_2}{3} = \frac{168}{3} = 56\ \text{kW}$$

- Potência reativa:

$$Q_{2f} = P_{2f}\ \text{tg}\ \Phi_2 = 56 \times 0{,}75 = 42\ \text{kvar}$$

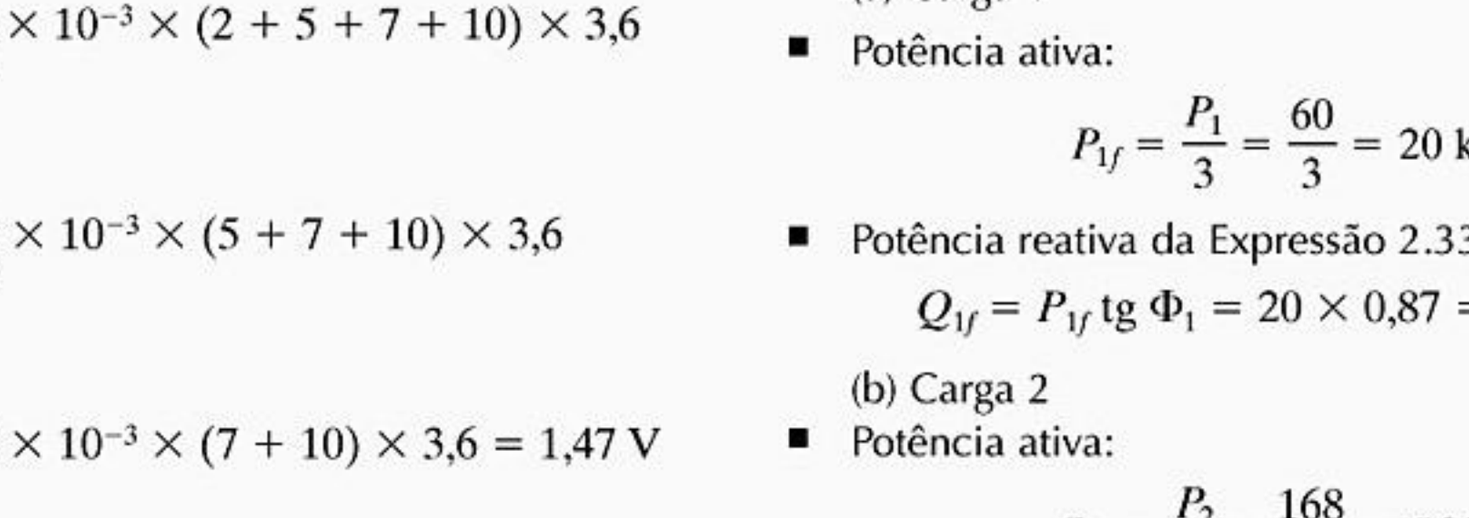


Figura 2.17 ■ Diagrama de circuito trifásico alimentando duas cargas equilibradas

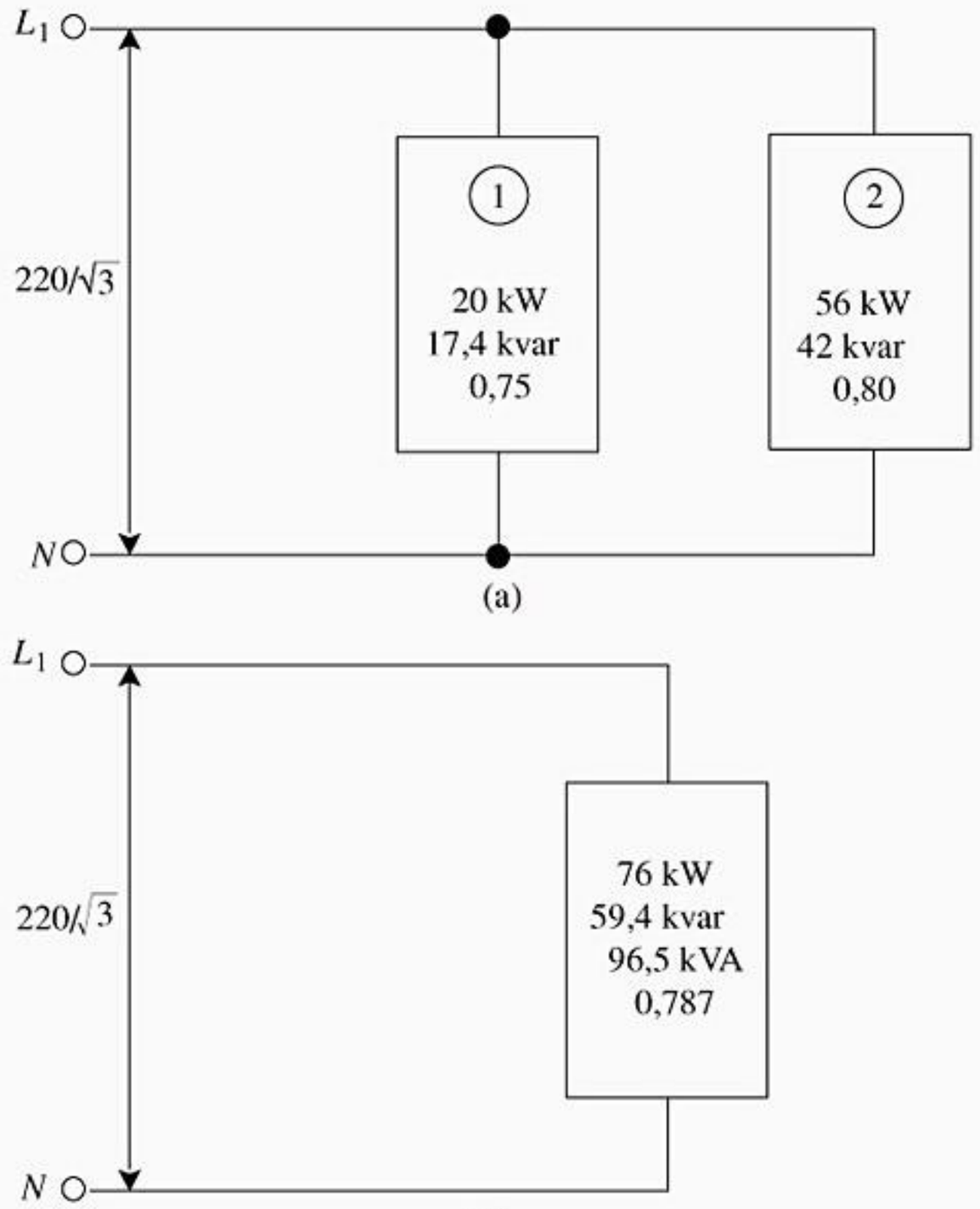


Figura 2.18 ■ Diagrama de circuitos monofásicos equivalentes ao da Figura 2.17

Os valores totais por fase (Figura 2.18(b)) serão:

- Potência ativa:

$$P = P_{1f} + P_{2f} = 20 + 56 = 76 \text{ kW}$$

- Potência reativa:

$$Q = Q_{1f} + Q_{2f} = 17{,}4 + 42 = 59{,}4 \text{ kvar}$$

- Potência aparente da Expressão 2.34:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{76^2 + 59{,}4^2} = 96{,}5 \text{ kVA}$$

- Fator de potência da Expressão 2.33:

$$\cos \Phi = \frac{P}{S} = \frac{76}{96{,}5} = 0{,}787 \text{ indutivo}$$

Considere agora que, em paralelo com fase da carga, seja instalado um equipamento que (praticamente) não consome potência ativa e aumenta o fator de potência global para 0,90. Nessas condições, tem-se uma carga total (por fase) com as seguintes características:

- Potência ativa: $P' = P = 76 \text{ kW}$
- Fator de potência: $\cos \Phi' = 0{,}90$
- Potência reativa:

$$Q' = P' \text{tg } \Phi' = 76 \times 0{,}484 = 36{,}8 \text{ kvar}$$

- Potência aparente:

$$S' = \sqrt{P'^2 + Q'^2} = \sqrt{76^2 + 36{,}8^2} = 84{,}4 \text{ kVA}$$

A carga original necessitava, para seu funcionamento, de uma potência reativa (por fase) de 59,4 kvar, que inicialmente era fornecida pela fonte. Com a colocação do equipamento anteriormente referido, em paralelo, a fonte passou a fornecer apenas 36,8 kvar, como ilustra a Figura 2.19. Assim, o equipamento considerado será uma "fonte de potência reativa", que fornecerá:

$$Q'' = 59{,}4 - 36{,}8 = 22{,}6 \text{ kvar (por fase)}$$

O equipamento com essas características é o capacitor ou banco de capacitores cujo consumo de potência ativa é desprezível diante da potência reativa que ele "fornecerá". Verifica-se que, com a *correção* do fator de potência de 0,78 para 0,90,

- Houve *redução* da potência aparente pela carga, que passou de

$$3 \times 96{,}5 = 289{,}5 \text{ kVA}$$

para

$$3 \times 84{,}4 = 253{,}2 \text{ kVA}$$

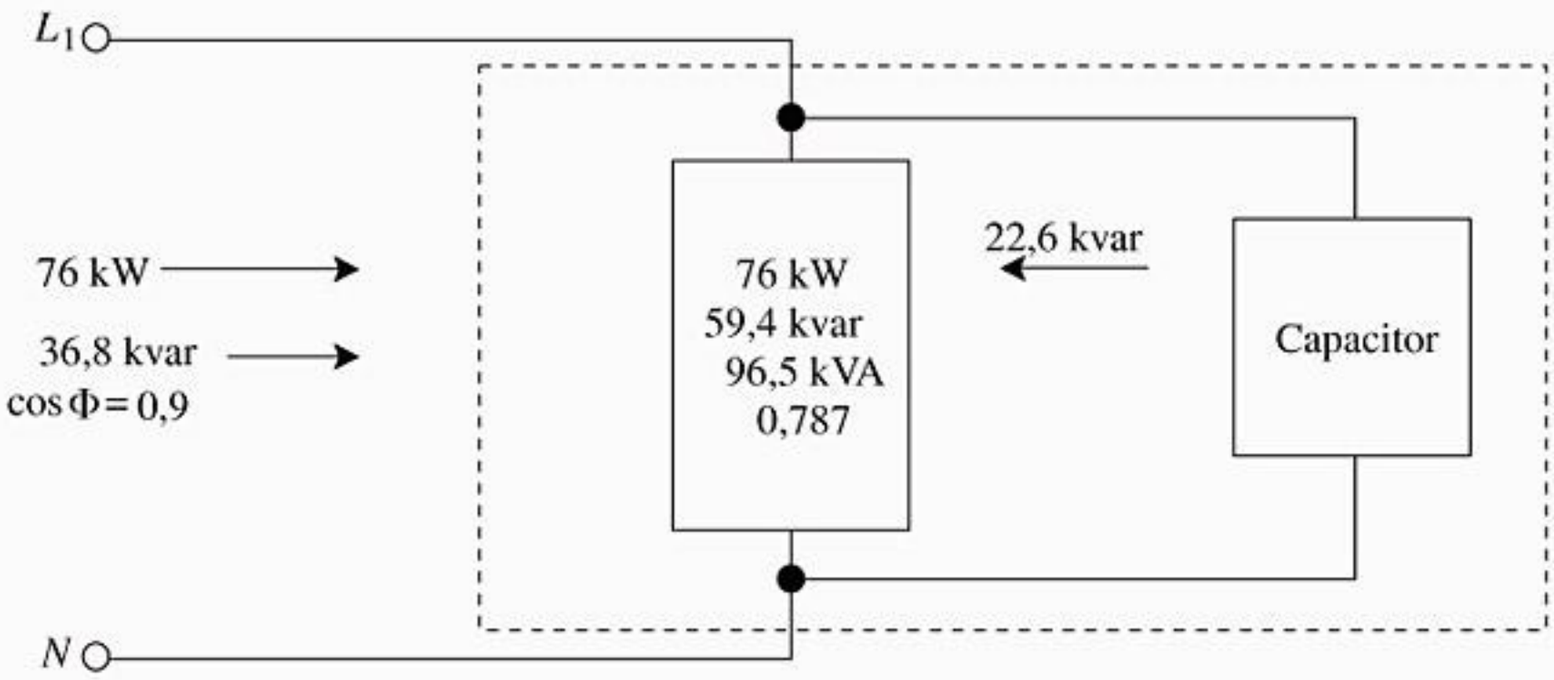


Figura 2.19 ■ Diagrama da ação de carga capacitiva em paralelo

o que significa uma "liberação" no circuito de 36,3 kVA.

- Houve *redução* da corrente consumida pela carga, que passou de

$$\frac{289{,}5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 220} = 762 \text{ A}$$

para

$$\frac{253{,}2 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 220} = 666 \text{ A}$$

com a conseqüente redução de perdas e de queda de tensão no circuito.

2.4 Componentes simétricos

Introdução

O método dos componentes simétricos consiste em uma ferramenta de grande utilidade para o engenheiro eletricista, muito usada no cálculo de circuitos elétricos trifásicos equilibrados e desequilibrados.

Foi apresentado pela primeira vez por Charles L. Fortescue, no trabalho *Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks* (Transactions AIEE, 37, de 1918), e desde essa época tem sido objeto de inúmeros artigos, publicações, investigações experimentais e aplicações reais.

Ele estabelece que qualquer sistema trifásico desequilibrado de fasores (tensões ou correntes) pode ser decomposto em três sistemas trifásicos equilibrados, com as seguintes características:

- Um sistema de fasores em que as tensões ou correntes alcançam os máximos na mesma seqüência do sistema original, chamado sistema de *seqüência positiva*.
- Um sistema de fasores no qual os máximos são alcançados em uma seqüência inversa da seqüência do sistema original, denominado sistema de *seqüência negativa*.
- Um sistema de fasores cujos máximos são alcançados no mesmo instante, isto é, um sistema de fasores em fase designado por sistema de *seqüência zero*.

Sistemas de seqüência

A Figura 2.20 mostra três sistemas de tensões equilibradas: um de seqüência positiva ($\dot{E}_{a1}$, $\dot{E}_{b1}$, $\dot{E}_{c1}$), um de seqüência negativa ($\dot{E}_{a2}$, $\dot{E}_{b2}$, $\dot{E}_{c2}$) e um de seqüência zero ($\dot{E}_{a0}$, $\dot{E}_{b0}$, $\dot{E}_{c0}$).

Os três sistemas podem coexistir em um mesmo circuito e sua composição dá origem a um sistema desequilibrado de fasores. No caso dessas tensões, tem-se:

$$\text{fase a} \rightarrow \dot{E}_a = \dot{E}_{a1} + \dot{E}_{a2} + \dot{E}_{a0} \qquad (2.73)$$

$$\text{fase b} \rightarrow \dot{E}_b = \dot{E}_{b1} + \dot{E}_{b2} + \dot{E}_{b0} \qquad (2.74)$$

$$\text{fase c} \rightarrow \dot{E}_c = \dot{E}_{c1} + \dot{E}_{c2} + \dot{E}_{c0} \qquad (2.75)$$

onde ($\dot{E}_a$, $\dot{E}_b$, $\dot{E}_c$) é o sistema trifásico desequilibrado de fasores, do qual os sistemas ($\dot{E}_{a1}$, $\dot{E}_{b1}$, $\dot{E}_{c1}$), ($\dot{E}_{a2}$, $\dot{E}_{b2}$, $\dot{E}_{c2}$) e ($\dot{E}_{a0}$, $\dot{E}_{b0}$, $\dot{E}_{c0}$) são os componentes simétricos.

Operador *a*

No que diz respeito a fasores, utiliza-se o operador *j*, que produz uma rotação de 90° no sentido anti-horário, quando aplicado a um fasor, ou seja,

$$j = e^{j90^\circ} = 1 \angle 90^\circ = 0 + j\,1$$

Duas aplicações sucessivas desse operador produzem uma rotação de 180°, isto é,

$$j^2 = j \times j = 1 \angle 180^\circ = -1$$

Outras potências de *j* podem ser obtidas por uma análise semelhante. A seguir, são indicadas as principais funções desse operador.

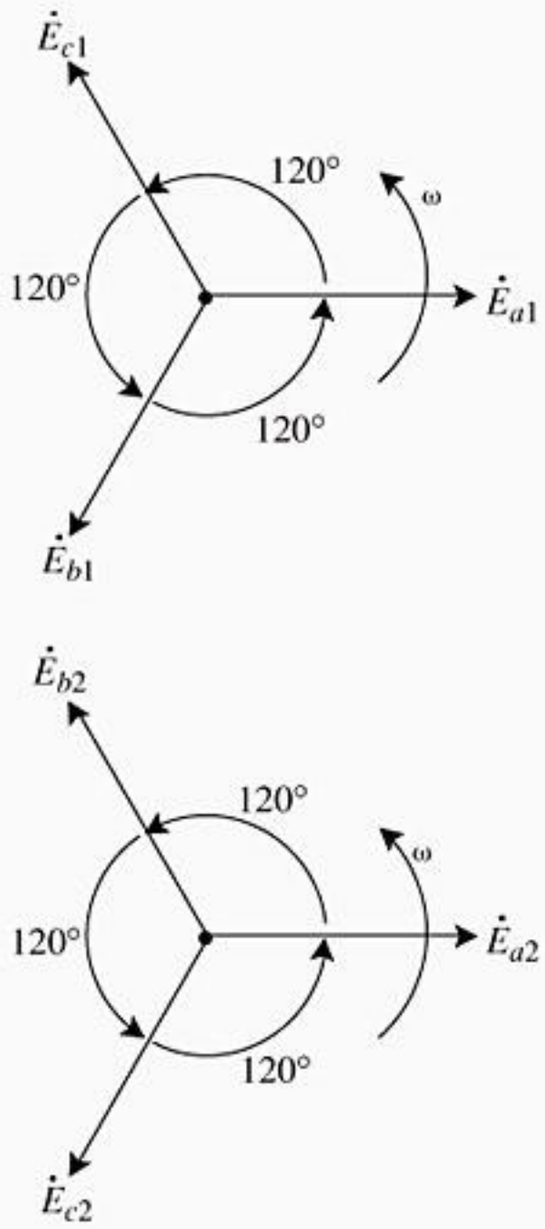


Figura 2.20 ■ Representação fasorial dos sistemas de seqüência positiva, negativa e zero

$$j = 1\ \underline{|90^\circ} = 0 + j$$

$$j^2 = 1\ \underline{|180^\circ} = -1 + j0 = -1$$

$$j^3 = 1\ \underline{|270^\circ} = -0 - j = -j$$

$$j^4 = 1\ \underline{|360^\circ} = -1 + j0 = 1$$

$$j^5 = 1\ \underline{|450^\circ} = 1\ \underline{|90^\circ} = j$$

$$j + j^2 = \sqrt{2}\ \underline{|135^\circ} = -1 + j$$

$$j - j^2 = \sqrt{2}\ \underline{|45^\circ} = 1 + j$$

$$j + j^3 = 0 + j\ 0 = 0$$

$$j - j^3 = 2\ \underline{|90^\circ} = 0 + 2j$$

Utiliza-se agora o operador a, definido como:

$$a = e^{j120^\circ} = 1\ \underline{|120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \qquad (2.76)$$

que produz uma rotação de 120° no sentido anti-horário e cujas principais funções são indicadas a seguir.

$$a = 1\ \underline{|120^\circ} = -0{,}5 + j0{,}866$$

$$a^2 = 1\ \underline{|240^\circ} = -0{,}5 - j0{,}866$$

$$a^3 = 1\ \underline{|360^\circ} = 1 + j0 = 1$$

$$a^4 = 1\ \underline{|480^\circ} = 1\ \underline{|120^\circ} = a$$

$$a^5 = 1\ \underline{|600^\circ} = 1\ \underline{|240^\circ} = a^2$$

$$1 + a^2 + a = 0 \qquad (2.77)$$

$$a - a^2 = \sqrt{3}\ \underline{|90^\circ} = j\sqrt{3}$$

$$a^2 - a = \sqrt{3}\ \underline{|-90^\circ} = -j\sqrt{3}$$

$$1 - a = \sqrt{3}\ \underline{|-30^\circ} = 1{,}5 - j0{,}866$$

$$1 - a^2 = \sqrt{3}\ \underline{|+30^\circ} = 1{,}5 + j0{,}866$$

A utilização desse operador permite que os sistemas de seqüência positiva e negativa sejam descritos em função de uma das fases (por exemplo, fase (a)), como indicam as expressões a seguir, resultantes da simples observação da Figura 2.20.

- Seqüência positiva: $\dot{E}_{a1} = \dot{E}_{a1}$

$$\dot{E}_{b1} = \dot{E}_{a1}\, e^{j240^\circ} = a^2\dot{E}_{a1} \qquad (2.78)$$

$$\dot{E}_{c1} = \dot{E}_{a1}\, e^{j120^\circ} = a\dot{E}_{a1}$$

- Seqüência negativa: $\dot{E}_{a2} = \dot{E}_{a2}$

$$\dot{E}_{b2} = e^{j120^\circ}\dot{E}_{a2} = a\dot{E}_{a2} \qquad (2.79)$$

$$\dot{E}_{c2} = e^{j240^\circ}\dot{E}_{a2} = a^2\,\dot{E}_{a2}$$

Para o sistema de seqüência zero, pode-se escrever

$$\dot{E}_{a0} = \dot{E}_{a0}$$

$$\dot{E}_{b0} = \dot{E}_{a0} \qquad (2.80)$$

$$\dot{E}_{c0} = \dot{E}_{a0}$$

Resolução de componentes de seqüência

Sejam $\dot{E}_a$, $\dot{E}_b$ e $\dot{E}_c$ as três tensões de fase desequilibradas de um circuito trifásico qualquer. Suas expressões, em função dos componentes simétricos, foram indicadas nas expressões 2.73, 2.74 e 2.75.

Entrando nessas equações com as expressões 2.78, 2.79 e 2.80, tem-se

$$\left.\begin{aligned} \dot{E}_a &= \dot{E}_{a0} + \dot{E}_{a1} + \dot{E}_{a2} \\ \dot{E}_b &= \dot{E}_{a0} + a^2\dot{E}_{a1} + a\dot{E}_{a2} \\ \dot{E}_c &= \dot{E}_{a0} + a\dot{E}_{a1} + a^2\dot{E}_{a2} \end{aligned}\right\} \qquad (2.81)$$

Pretende-se, agora, determinar os três componentes da fase *a*, $\dot{E}_{a_0}$, $\dot{E}_{a_1}$ e $\dot{E}_{a_2}$ em função dos três fasores desequilibrados $\dot{E}_a$, $\dot{E}_b$ e $\dot{E}_c$.

Somando as expressões 2.81, obtém-se

$$\dot{E}_{a_0} + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 3\dot{E}_{a_0} + (1 + a^2 + a)\dot{E}_{a_1} + (1 + a + a^2)\dot{E}_{a_2}$$

como

$$(1 + a^2 + a) = 0$$

onde

$$\dot{E}_{a_0} + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 3\dot{E}_{a_0}$$

e

$$\dot{E}_{a_0} = \frac{1}{3}(\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c) \qquad (2.82)$$

Multiplicando a segunda equação das expressões 2.81 por *a*, a terceira por a^2 e somando as duas com a primeira, tem-se

$$\dot{E}_a + a\dot{E}_b + a^2\dot{E}_c = \dot{E}_{a0} + \dot{E}_{a1} + \dot{E}_{a2} + a\dot{E}_{a0} + a^3\dot{E}_{a1} +$$

$$+ a^2\dot{E}_{a2} + a^2\dot{E}_{a0} + a^3\dot{E}_{a1} + a^4\dot{E}_{a2} =$$

$$= (1 + a + a^2)\dot{E}_{a0} + (1 + a^3 + a^3)\dot{E}_{a1} + (1 + a^2 + a^4)\dot{E}_{a2}$$

como

$$(1 + a + a^2) = 0$$
$$a^3 = 1$$
$$a^4 = a$$

Dessa maneira,

$$\dot{E}_a + a\dot{E}_b + a^2\dot{E}_c = 3\dot{E}_{a1}$$

e

$$\dot{E}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{E}_a + a\dot{E}_b + a^2\dot{E}_c) \qquad (2.83)$$

Multiplicando a segunda equação das expressões 2.81 por a^2, a terceira por *a* e somando as duas com a primeira, obtém-se

$$\dot{E}_a + a^2\dot{E}_b + a\dot{E}_c = \dot{E}_{a0} + \dot{E}_{a1} + \dot{E}_{a2} + a^2\dot{E}_{a0} + a^4\dot{E}_{a1} +$$

$$+ a^3\dot{E}_{a2} + a\dot{E}_{a0} + a^2\dot{E}_{a1} + a^3\dot{E}_{a2} =$$

$$= (1 + a^2 + a)\dot{E}_{a0} + (1 + a^4 + a^2)\dot{E}_{a1} + (1 + a^3 + a^3)\dot{E}_{a2}$$

Desse modo,

$$\dot{E}_a + a^2\dot{E}_b + a\dot{E}_c = 3\dot{E}_{a2}$$

E, portanto,

$$\dot{E}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{E}_a + a^2\dot{E}_b + a\dot{E}_c) \qquad (2.84)$$

Com as expressões 2.82, 2.83 e 2.84 é possível, dados os três fasores $\dot{E}_a$, $\dot{E}_b$ e $\dot{E}_c$, desequilibrados, obter diretamente os componentes de seqüência da fase *a*. Se necessário, os componentes das fases *b* e *c* poderão ser obtidos das expressões 2.78, 2.79 e 2.80.

A Figura 2.21 ilustra as construções de diagramas fasoriais indicadas pelas expressões 2.82, 2.83 e 2.84.

EXEMPLO

Sejam três tensões desequilibradas dadas por:

$$\dot{E}_a = (60 + j0)V$$

$$\dot{E}_b = (45 - j75)V$$

$$\dot{E}_c = (-21 + j120)V$$

(a) Os componentes de seqüência da fase a serão:

■ Da Expressão 2.82:

$$\dot{E}_{a0} = \frac{1}{3}[(60 + j0) + (45 - j75) + (-21 + j120)] =$$

$$= 28 + j15 = 31{,}76 \angle 28{,}17^\circ\ V$$

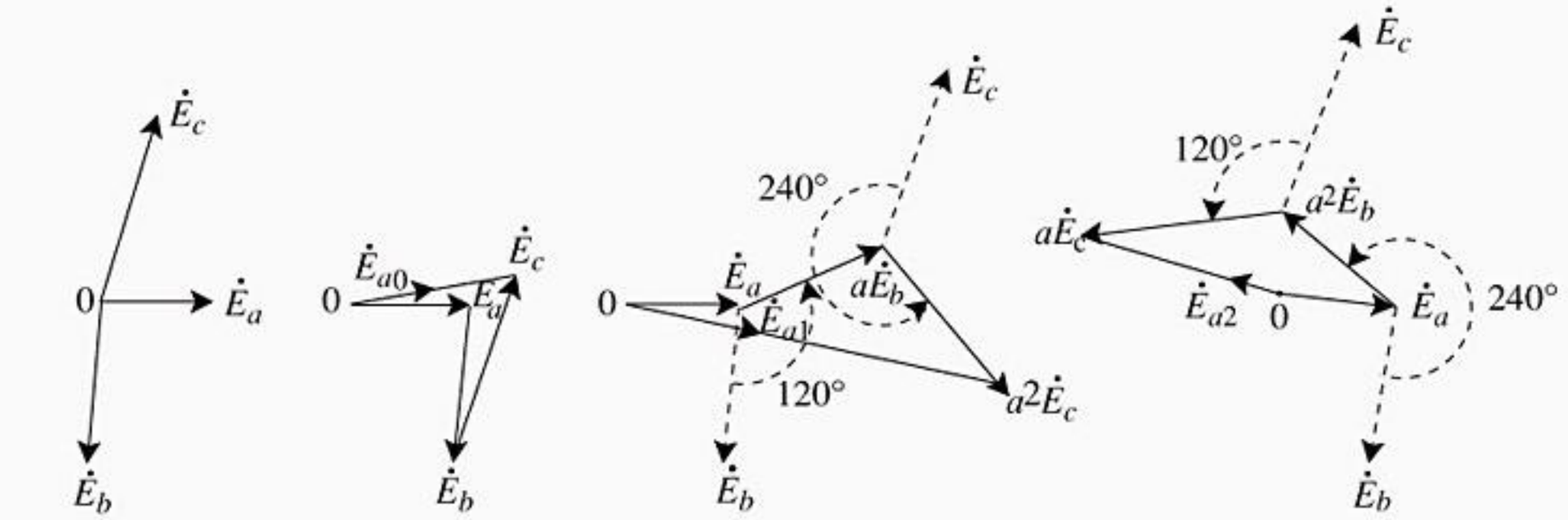


Figura 2.21 ■ Obtenção gráfica fasorial de $\dot{E}_{a0}$, $\dot{E}_{a1}$ e $\dot{E}_{a2}$ partindo de $\dot{E}_a$, $\dot{E}_b$ e $\dot{E}_c$

- Expressão 2.83:

$$\dot{E}_{a1} = \frac{1}{3}[(60 + j0) + (-0{,}5 + j0{,}866)(45 - j75) +$$

$$+ (-0{,}5 - j0{,}866)(-21 + j120)] = 72{,}2 +$$

$$+ j11{,}5 = 73{,}11 \ \underline{|9{,}05^\circ}\ V$$

- Expressão 2.84:

$$\dot{E}_{a2} = \frac{1}{3}[(60 + j0) + (-0{,}5 - j0{,}866)(45 - j75) +$$

$$+ (-0{,}5 + j0{,}866)(-21 + j120)] = -40{,}2 -$$

$$- j26{,}5 = 48{,}14 \ \underline{|-146{,}6^\circ}\ V$$

(b) Os componentes das fases *b* e *c* serão:

- Da Expressão 2.78:

$$\dot{E}_{b1} = a^2\dot{E}_{a1} = 1 \ \underline{|240^\circ} \cdot 73{,}11 \ \underline{|9{,}05^\circ} =$$

$$= 73{,}11 \ \underline{|-110{,}94^\circ}\ V$$

$$\dot{E}_{c1} = a\dot{E}_{a1} = 1 \ \underline{|120^\circ} \cdot 73{,}11 \ \underline{|9{,}05^\circ} =$$

$$= 73{,}11 \ \underline{|129{,}05^\circ}\ V$$

- Da Expressão 2.79:

$$\dot{E}_{b2} = a\dot{E}_{a2} = 1 \ \underline{|120^\circ} \cdot 48{,}14 \ \underline{|-146{,}6^\circ} =$$

$$= 48{,}14 \ \underline{|-26{,}6^\circ}$$

$$\dot{E}_{c2} = a^2\dot{E}_{a2} = 1 \ \underline{|240^\circ} \cdot 48{,}14 \ \underline{|-146{,}6^\circ} =$$

$$= 48{,}14 \ \underline{|93{,}4^\circ}\ V$$

- Da Expressão 2.80:

$$\dot{E}_{b0} = \dot{E}_{c0} = \dot{E}_{a0} = 28 + j15 = 31{,}76 \ \underline{|28{,}17^\circ}\ V$$

(c) Verificação:

- Fase *a*:

$$\dot{E}_a = \dot{E}_{a1} + \dot{E}_{a2} + \dot{E}_{a0} = (72{,}2 + j11{,}5) +$$

$$+ (-40{,}2 - j26{,}5) + (28 + j15) = 60 + j0$$

- Fase *b*:

$$\dot{E}_b = \dot{E}_{b1} + \dot{E}_{b2} + \dot{E}_{b0} = (-26{,}14 - j68{,}28) +$$

$$+ (-43{,}05 - j21{,}65) + (28 + j15) = 45 + j75$$

- Fase *c*:

$$\dot{E}_c = \dot{E}_{c1} + \dot{E}_{c2} + \dot{E}_{c0} = (-46{,}06 + j56{,}78) +$$

$$+ (-2{,}85 + j48{,}66) + (28 + j15) = -21 + j120$$

EXEMPLO

Considere que o sistema trifásico desequilibrado de correntes seja dado por:

$$\dot{I}_a = 10 \ \underline{|30^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_b = 30 \ \underline{|-60^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_c = 15 \ \underline{|145^\circ}\ \text{A}$$

(a) Os componentes de seqüência positiva serão:

- Da Expressão 2.83:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c) = \frac{1}{3}(10 \ \underline{|30^\circ} +$$

$$+ 1 \ \underline{|120^\circ} \cdot 30 \ \underline{|-60^\circ} + 1 \ \underline{|240^\circ} \cdot 15 \ \underline{|145^\circ}) =$$

$$= 17{,}6 \ \underline{|45^\circ}\ \text{A}$$

- Da Expressão 2.78:

$$\dot{I}_{b1} = a^2\dot{I}_{a1} = 1 \ \underline{|240^\circ} \cdot 17{,}6 \ \underline{|45^\circ} = 17{,}6 \ \underline{|285^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_{c1} = a\dot{I}_{a1} = 1 \ \underline{|120^\circ} \cdot 17{,}6 \ \underline{|45^\circ} = 17{,}6 \ \underline{|165^\circ}\ \text{A}$$

(b) Os componentes de seqüência negativa serão:

- Da Expressão 2.84:

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c) =$$

$$= \frac{1}{3}(10 \ \underline{|30^\circ} + 1 \ \underline{|240^\circ} \cdot 30 \ \underline{|-60^\circ} +$$

$$+ 1 \ \underline{|120^\circ} \cdot 15 \ \underline{|145^\circ} = 8{,}25 \ \underline{|203{,}8^\circ}\ \text{A}$$

- Da Expressão 2.79:

$$\dot{I}_{b2} = a\dot{I}_{a2} = 1 \ \underline{|120^\circ} \cdot 8{,}25 \ \underline{|203{,}8^\circ} = 8{,}25 \ \underline{|323{,}8^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_{c2} = a^2\dot{I}_{a2} = 1 \ \underline{|240^\circ} \cdot 8{,}25 \ \underline{|203{,}8^\circ} = 8{,}25 \ \underline{|83{,}8^\circ}\ \text{A}$$

(c) Os componentes de seqüência zero serão:

- Da Expressão 2.82:

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) =$$

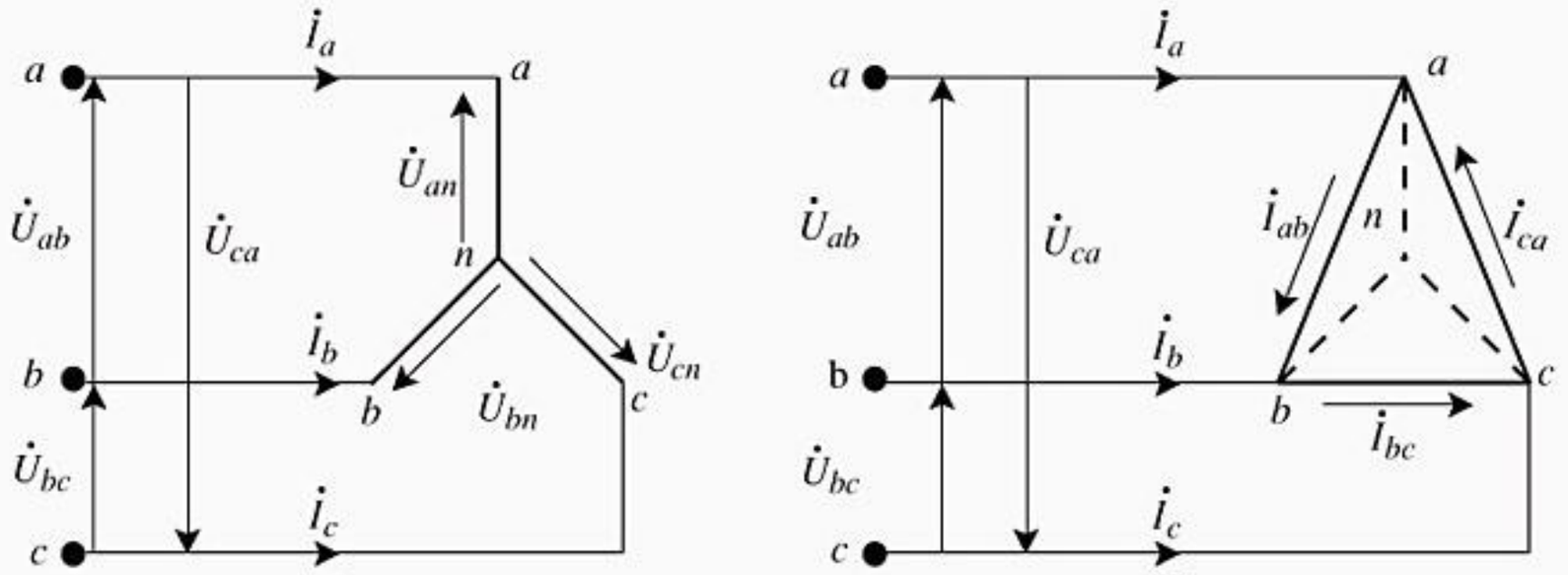
$$= \frac{1}{3}(10 \ \underline{|30^\circ} + 30 \ \underline{|-60^\circ} + 15 \ \underline{|145^\circ}) = 5{,}6 \ \underline{|312{,}6^\circ}\ \text{A}$$

- Da Expressão 2.80:

$$\dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0}\dot{I}_{a0} = 5{,}6 \ \underline{|312{,}6^\circ}$$

Cargas ligadas em *Y* e Δ

A Figura 2.22 mostra duas cargas, uma ligada em *Y* e outra em Δ, e indica os sentidos de referências das tensões e das correntes.



(a) (b)

Figura 2.22 ■ Cargas ligadas em Y e Δ

Para ambas, as tensões de linha serão iguais a:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{an} - \dot{U}_{bn}$$
$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{bn} - \dot{U}_{cn} \qquad (2.85)$$
$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{cn} - \dot{U}_{an}$$

Somando essas equações, obtém-se:

$$\dot{U}_{ab} + \dot{U}_{bc} + \dot{U}_{ca} = 0 \qquad (2.86)$$

Nessas condições, obtém-se das expressões 2.80 e 2.82

$$\dot{U}_{ab0} = \dot{U}_{bc0} = \dot{U}_{ca0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{ab} + \dot{U}_{bc} + \dot{U}_{ca}) = 0 \qquad (2.87)$$

ou seja, as tensões de linha, independentemente do grau de desequilíbrio, não possuem componentes de seqüência zero. Elas poderão ser decompostas apenas em um sistema de seqüência positiva ($\dot{U}_{ab1}$, $\dot{U}_{bc1}$, $\dot{U}_{ca1}$) e em um de seqüência negativa ($\dot{U}_{ab2}$, $\dot{U}_{bc2}$ e $\dot{U}_{ca2}$).

Com a carga ligada em Y, as tensões de fase $\dot{U}_{an}$, $\dot{U}_{bn}$ e $\dot{U}_{cn}$ poderão ter qualquer valor, desde que a soma das respectivas tensões de linha seja igual a zero (como indica a Expressão 2.86). Em geral, se a carga for desequilibrada, tem-se:

$$\dot{U}_{an} + \dot{U}_{bn} + \dot{U}_{cn} \neq 0 \qquad (2.88)$$

E, portanto, as tensões de fase devem possuir componentes de seqüência zero, mesmo sendo nulos os componentes de seqüência zero das tensões de linha.

Ao utilizar componentes simétricos, na maioria das vezes é vantajoso, no caso de cargas ligadas em Δ, utilizar o Y equivalente (ver Figura 2.23).

Apresenta-se agora, para uma carga em Y, como determinar os componentes das tensões de fase em termos de componentes de tensões de linha.

Para a seqüência positiva, tem-se, das expressões 2.78 e 2.85

$$\dot{U}_{ab1} = \dot{U}_{an1} - \dot{U}_{bn1} = \dot{U}_{an1} - a^2\dot{U}_{an1} = (1 - a^2)\dot{U}_{an1}$$

Como $(1 - a^2) = \sqrt{3}\ \underline{|30^\circ}$, tem-se:

$$\dot{U}_{ab1} = \sqrt{3}\ \underline{|30^\circ} \cdot \dot{U}_{an1}$$

e

$$\dot{U}_{an1} = \frac{\dot{U}_{ab1}}{\sqrt{3}}\ \underline{|-30^\circ} \qquad (2.89)$$

Do mesmo modo, obtém-se

$$\dot{U}_{an2} = \frac{\dot{U}_{ab2}}{\sqrt{3}}\ \underline{|30^\circ} \qquad (2.90)$$

É importante observar que não se pode obter os componentes de seqüência zero das tensões de fase partir

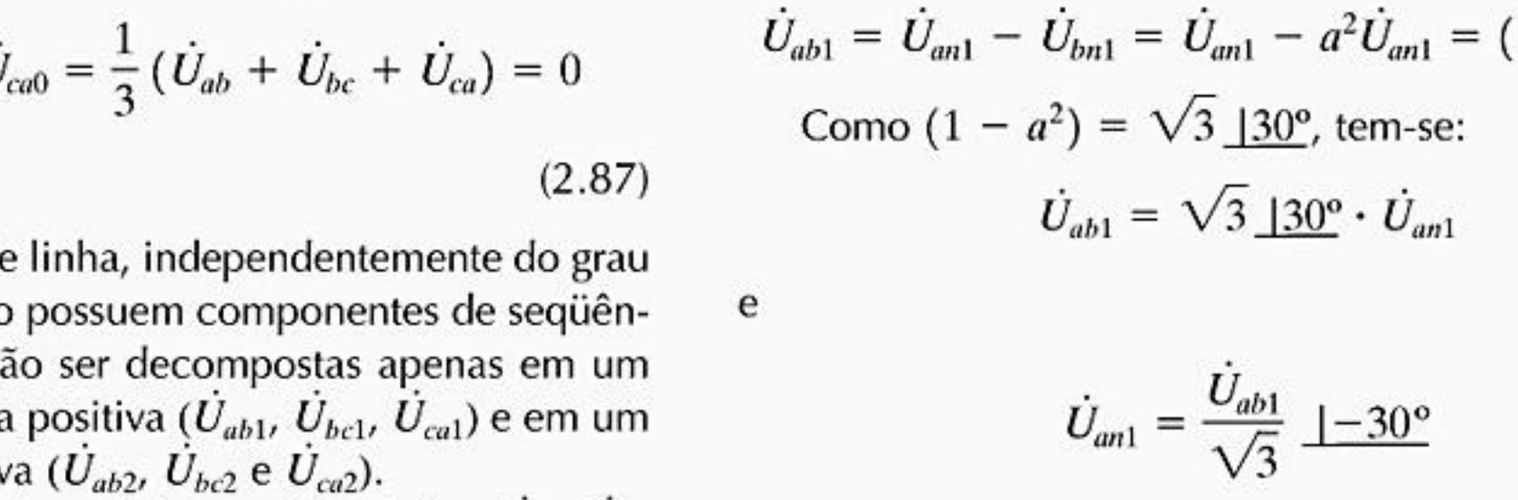


Figura 2.23 ■ Diagrama da equivalência entre cargas $Y - \Delta$

dos componentes de seqüência zero das tensões de linha, uma vez que estas, como se sabe, são nulas.

Em um circuito trifásico a três condutores, as correntes de linha não podem ter componentes de seqüência zero, visto que, para uma carga em *Y* ou para uma carga em Δ, tem-se sempre:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0 \qquad (2.91)$$

Em uma carga ligada em Δ, em geral, as correntes de fase têm sua soma diferente de zero e assim conterão componentes de seqüência zero.

Da mesma maneira como foi feito para as tensões, pode-se demonstrar para as correntes de fases de Δ que

$$\dot{I}_{ab1} = \frac{\dot{I}_{a1}}{\sqrt{3}} \underline{|30^\circ} \qquad (2.92)$$

e

$$\dot{I}_{ab2} = \frac{\dot{I}_{a2}}{\sqrt{3}} \underline{|-30^\circ} \qquad (2.93)$$

No caso das correntes em circuitos trifásicos a três condutores, também não se pode obter os componentes de seqüência zero das correntes de fase em função dos componentes de seqüência zero das correntes de linha.

EXEMPLO

Tem-se uma carga ligada em Δ composta pela associação de três resistências – 5, 10 e 20 Ω –, como mostra a Figura 2.24, alimentadas por um sistema equilibrado de tensões com 100 V de valor eficaz.

(a) Pode-se escrever para as tensões de linha:

$$\dot{U}_{ab} = 100 \underline{|0^\circ}\ V$$

$$\dot{U}_{bc} = 100 \underline{|-120^\circ}\ V$$

$$\dot{U}_{ca} = 100 \underline{|120^\circ}\ V$$

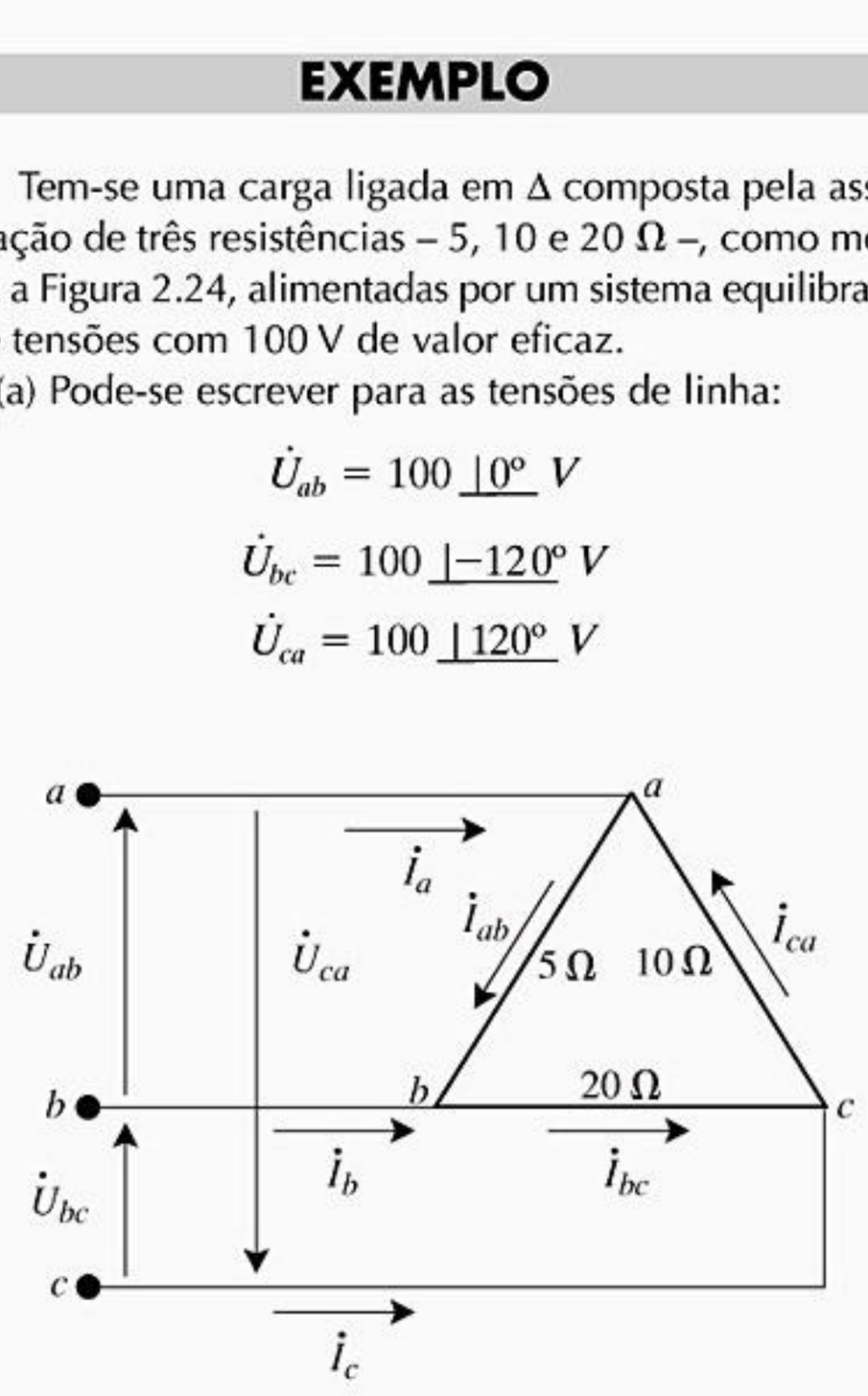


Figura 2.24 ■ Diagrama de carga desequilibrada em Δ

(b) As correntes de fase serão iguais a:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{100 \underline{|0^\circ}}{5} = 20 \underline{|0^\circ}\ \text{A} = 20 + j0$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{100 \underline{|-120^\circ}}{20} = 5 \underline{|-120^\circ}\ \text{A} = -2{,}5 + j4{,}33$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{100 \underline{|120^\circ}}{10} = 10 \underline{|120^\circ}\ \text{A} = -5 + j8{,}66$$

formando, portanto, um sistema de fasores desequilibrado.

(c) As correntes de linha serão iguais a:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = (20 + j\,0) - (-5 + j8{,}66) =$$
$$= 25 - j8{,}66 = 26{,}45 \underline{|-19{,}1^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = (_2{,}5 - j4{,}33) - (20 + j0) =$$
$$= -22{,}5 - j4{,}33 = 22{,}9 \underline{|-169{,}1^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = (-5 + j\,8{,}66) - (-2{,}5 - j4{,}33) =$$
$$= -2{,}5 + j\,12{,}99 = 13{,}22 \underline{|\ 100{,}8^\circ}\ \text{A}$$

que também formam um sistema de fasores desequilibrado.

(d) Os componentes simétricos das correntes de fase serão iguais a:

■ Das expressões 2.82, 2.83 e 2.84:

$$\dot{I}_{ab0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_{ab} + \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{ca}) =$$

$$= \frac{1}{3}[(20 + j0) + (-2{,}5 - j4{,}33) + (-5 + j8{,}66)]$$

$$= \frac{1}{3}[(12{,}5 + j4{,}33) = 4{,}16 + j1{,}44 = 4{,}40 \underline{|19^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_{ab1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_{ab} + a\dot{I}_{bc} + a^2\dot{I}_{ca}) =$$

$$= \frac{1}{3}[(20+j0) + (-0{,}5-j0{,}866) + (-2{,}5- j4{,}33) +$$

$$+ (-0{,}5 - j\,0{,}866)(-5 + j8{,}66)] =$$

$$= \frac{1}{3}(35 + j0) = 11{,}67\ \text{A}$$

$$\dot{I}_{ab2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_{ab} + a^2\dot{I}_{bc} + a\dot{I}_{ca}) =$$

$$= \frac{1}{3}[(20+j0) + (-0{,}5-j0{,}866)(-2{,}5- j4{,}33) +$$

$$+ (-0{,}5 + j0{,}866)(-5 + j8{,}66)] =$$

$$= \frac{1}{3}(12{,}5 + j4{,}33) = 4{,}16 + j1{,}44 = 4{,}40 \underline{|19^\circ}\ \text{A}$$

■ Da Expressão 2.78:

$$\dot{I}_{bc1} = a^2\dot{I}_{ab1} = 1\ \underline{|240^\circ} \cdot 11{,}67 = 11{,}67\ \underline{|240^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_{ca1} = a\dot{I}_{ab1} = 1\ \underline{|120^\circ} \cdot 11{,}67 = 11{,}67\ \underline{|120^\circ}\ \text{A}$$

■ Da Expressão 2.79:

$$\dot{I}_{bc2} = a\dot{I}_{ab2} = 1\ \underline{|120^\circ} \cdot 4{,}40\ \underline{|19^\circ} = 4{,}40\ \underline{|139^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_{ca2} = a^2\dot{I}_{ab2} = 1\ \underline{|240^\circ} \cdot 4{,}40\ \underline{|19^\circ} = 4{,}40\ \underline{|-101^\circ}\ \text{A}$$

■ Da Expressão 2.80:

$$\dot{I}_{bc0} = \dot{I}_{ca0} = \dot{I}_{ab0} = 4{,}40\ \underline{|19^\circ}\ \text{A}$$

(e) Os componentes simétricos das correntes de linha serão, da mesma maneira,

■ Das expressões 2.82, 2.83 e 2.84:

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = 0$$

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\,\dot{I}_b + a^2\,\dot{I}_c) =$$

$$= \frac{1}{3}[(25 - j8{,}66) + (-0{,}5 + j0{,}866) + (-22{,}5 - j4{,}33) +$$

$$+ (-0{,}5 - j0{,}866)(-2{,}5 + j12{,}99)] =$$

$$= \frac{1}{3}[(52{,}5 - j30{,}32) = 17{,}5 - j10{,}1 = 20{,}20\ \underline{|30^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_{ab2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c) = 7{,}64\ \underline{|10{,}8^\circ}\ \text{A}$$

■ Da Expressão 2.78:

$$\dot{I}_{b1} = a^2\dot{I}_{a1} = 1\ \underline{|240^\circ} \cdot 20{,}20\ \underline{|30^\circ} = 20{,}20\ \underline{|-90^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_{c1} = a\dot{I}_{a1} = 1\ \underline{|120^\circ} \cdot 20{,}20\ \underline{|30^\circ} = 20{,}20\ \underline{|150^\circ}\ \text{A}$$

■ Da Expressão 2.79:

$$\dot{I}_{b2} = a\,\dot{I}_{a2} = (-0{,}5 + j\,0{,}866)(7{,}5 + j\,1{,}44) = -5 +$$

$$+ j5{,}78 = 7{,}64\ \underline{|130{,}8^\circ}\ \text{A}$$

$$\dot{I}_{c2} = a^2\dot{I}_{a2} = (-0{,}5 + j\,0{,}866)(7{,}5 + j1{,}44) = -2{,}5 +$$

$$+ j7{,}22 = 7{,}64\ \underline{|109{,}1^\circ}\ \text{A}$$

■ Da Expressão 2.80:

$$\dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0} = \dot{I}_{a0} = 0$$

Impedâncias de seqüências

A Figura 2.25 mostra um trecho assimétrico (desequilibrado) de um sistema a quatro condutores, com as impedâncias (totais do trecho), por fase $\dot{Z}_a$, $\dot{Z}_b$ e $\dot{Z}_c$ –, onde $\dot{Z}_n$ é a impedância do condutor neutro. Considere $\dot{E}_a$, $\dot{E}_b$ e $\dot{E}_c$ as tensões de fase aplicadas.

Sendo $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$ e $\dot{I}_c$ as correntes de linha e $\dot{I}_n$ a corrente no neutro, tem-se:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_n \tag{2.94}$$

$$\left.\begin{aligned} \dot{E}_a &= \dot{Z}_a\dot{I}_a + \dot{Z}_n\dot{I}_n \\ \dot{E}_b &= \dot{Z}_b\dot{I}_b + \dot{Z}_n\dot{I}_n \\ \dot{E}_c &= \dot{Z}_c\dot{I}_c + \dot{Z}_n\dot{I}_n \end{aligned}\right\} \tag{2.95}$$

Das expressões 2.94 e 2.95, após algumas manipulações algébricas em função dos componentes simétricos de I_a, I_b e I_c, obtém-se

$$\left.\begin{aligned} \dot{E}_a &= (\dot{Z}_a + 3\dot{Z}_n)\dot{I}_{a0} + \dot{Z}_a\,\dot{I}_{a1} + \dot{Z}_a\,\dot{I}_{a2} \\ \dot{E}_b &= (\dot{Z}_b + 3\dot{Z}_n)\dot{I}_{a0} + a^2\dot{Z}_b\,\dot{I}_{a1} + a\,\dot{Z}_b\,\dot{I}_{a2} \\ \dot{E}_c &= (\dot{Z}_c + 3\dot{Z}_n)\dot{I}_{a0} + a\dot{Z}_c\,\dot{I}_{a1} + a^2\,\dot{Z}_c\,\dot{I}_{a2} \end{aligned}\right\} \tag{2.96}$$

Agora, substituindo os valores de $\dot{E}_a$, $\dot{E}_b$ e $\dot{E}_c$ dados na Expressão 2.96, em 2.82, 2.83 e 2.84, tem-se a Expressão 2.97, colocando-se em evidência $\dot{I}_{a0}$, $\dot{I}_{a1}$ e $\dot{I}_{a2}$.

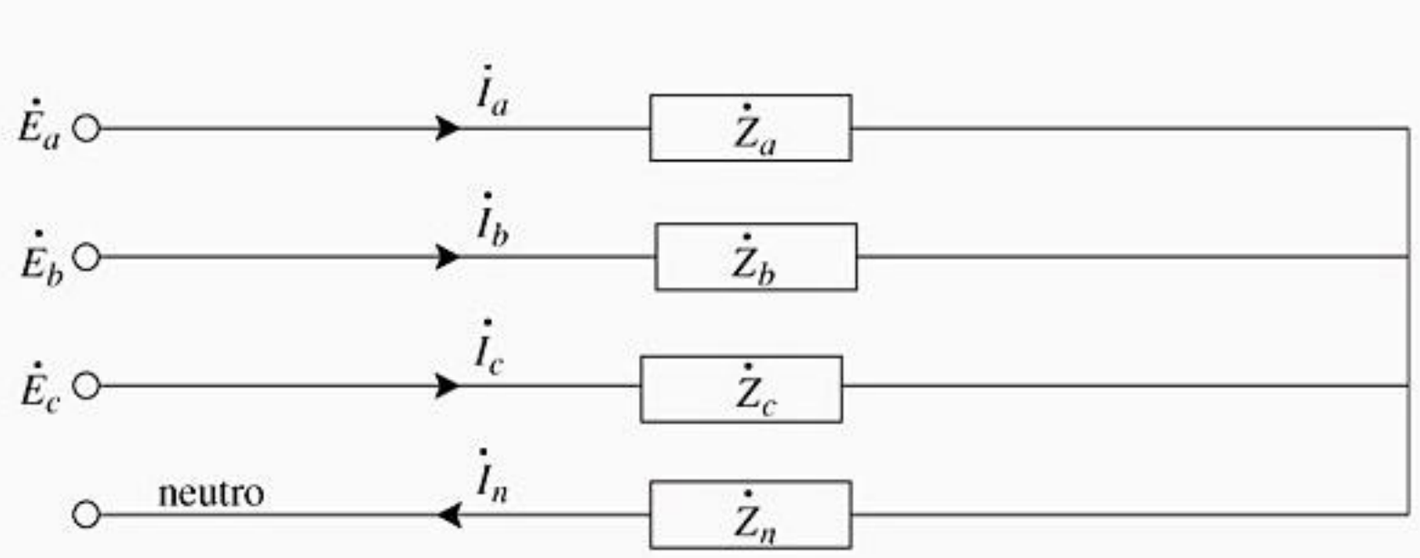


Figura 2.25 ■ Diagrama de impedâncias de um sistema a quatro condutores

$$\left.\begin{aligned}
\dot{E}_{a0} &= \frac{1}{3}(\dot{Z}_a + \dot{Z}_b + \dot{Z}_c + 9\dot{Z}_n)\dot{I}_{a0} + \frac{1}{3}(\dot{Z}_a + a^2\dot{Z}_b + a\dot{Z}_c)\dot{I}_{a1} + \frac{1}{3}(\dot{Z}_a + a\dot{Z}_b + a^2\dot{Z}_c)\dot{I}_{a2} \\
\dot{E}_{a1} &= \frac{1}{3}(\dot{Z}_a + a\dot{Z}_b + a^2\dot{Z}_c)\dot{I}_{a0} + \frac{1}{3}(\dot{Z}_a + \dot{Z}_b + \dot{Z}_c)\dot{I}_{a1} + \frac{1}{3}(\dot{Z}_a + a^2\dot{Z}_b + a\,\dot{Z}_c)\dot{I}_{a2} \\
\dot{E}_{a2} &= \frac{1}{3}(\dot{Z}_a + a^2\dot{Z}_b + a\dot{Z}_c)\dot{I}_{a0} + \frac{1}{3}(\dot{Z}_a + a\dot{Z}_b + a^2\dot{Z}_c)\dot{I}_{a1} + \frac{1}{3}(\dot{Z}_a + \dot{Z}_b + \dot{Z}_c)\dot{I}_{a2}
\end{aligned}\right\} \quad (2.97)$$

Essas equações indicam que, em um circuito trifásico com impedâncias desequilibradas, a tensão de seqüência é função de todas as correntes de seqüência.

Se as três impedâncias de fase forem iguais a $\dot{Z}$, ou seja, se o circuito for construído de modo a ficar equilibrado, obtém-se da Expressão 2.97:

$$\begin{aligned}
\dot{E}_{a0} &= (\dot{Z} + 3\dot{Z}_n)\dot{I}_{a0} \\
\dot{E}_{a1} &= \dot{Z}\,\dot{I}_{a1} \qquad (2.98) \\
\dot{E}_{a2} &= \dot{Z}\,\dot{I}_{a2}
\end{aligned}$$

As Expressões 2.98 mostram que, em um circuito simétrico (balanceado), não há interação entre as seqüências, isto é, uma tensão de dada seqüência é função apenas da corrente de mesma seqüência.

A impedância de um circuito, quando apenas circulam correntes de seqüência positiva, é chamada *impedância de seqüência positiva* ($\dot{Z}_1$); de maneira análoga, podem-se definir as *impedâncias de seqüência negativa* ($\dot{Z}_2$) e *zero* ($\dot{Z}_0$). Assim, para o circuito em estudo, tem-se

$$\begin{aligned}
\dot{Z}_1 &= \dot{E}_{a1}/\dot{I}_{a1} = \dot{Z} \\
\dot{Z}_2 &= \dot{E}_{a2}/\dot{I}_{a2} = \dot{Z} \qquad (2.99) \\
\dot{Z}_0 &= \dot{E}_{a0}/\dot{I}_{a0} = \dot{Z} + 3\dot{Z}_n
\end{aligned}$$

Dessa maneira, ao se considerar circuitos trifásicos simétricos, pode-se definir *impedância de seqüência positiva* do circuito, ou de um componente, como a impedância apresentada pelo circuito ou componente quando por ele circulam correntes de seqüência positiva (Figura 2.26(a)). Por sua vez, a *impedância de seqüência negativa* é aquela que o circuito ou o componente apresenta quando percorre correntes de seqüência negativa (Figura 2.26(b)). Em componentes estáticos, como linhas elétricas e transformadores, as impedâncias de seqüência negativa e de seqüência positiva são iguais.

A *impedância de seqüência zero* de um circuito ou de um componente é a que o circuito ou componente apresenta quando por ele circulam correntes de seqüência zero (Figura 2.26(c)). É evidente que essas correntes só podem circular em circuitos nos quais exista um condutor (neutro ou terra) ligado ao ponto neutro do circuito. Note que a impedância do neutro ou do terra aparece no circuito da seqüência zero com o valor três vezes maior.

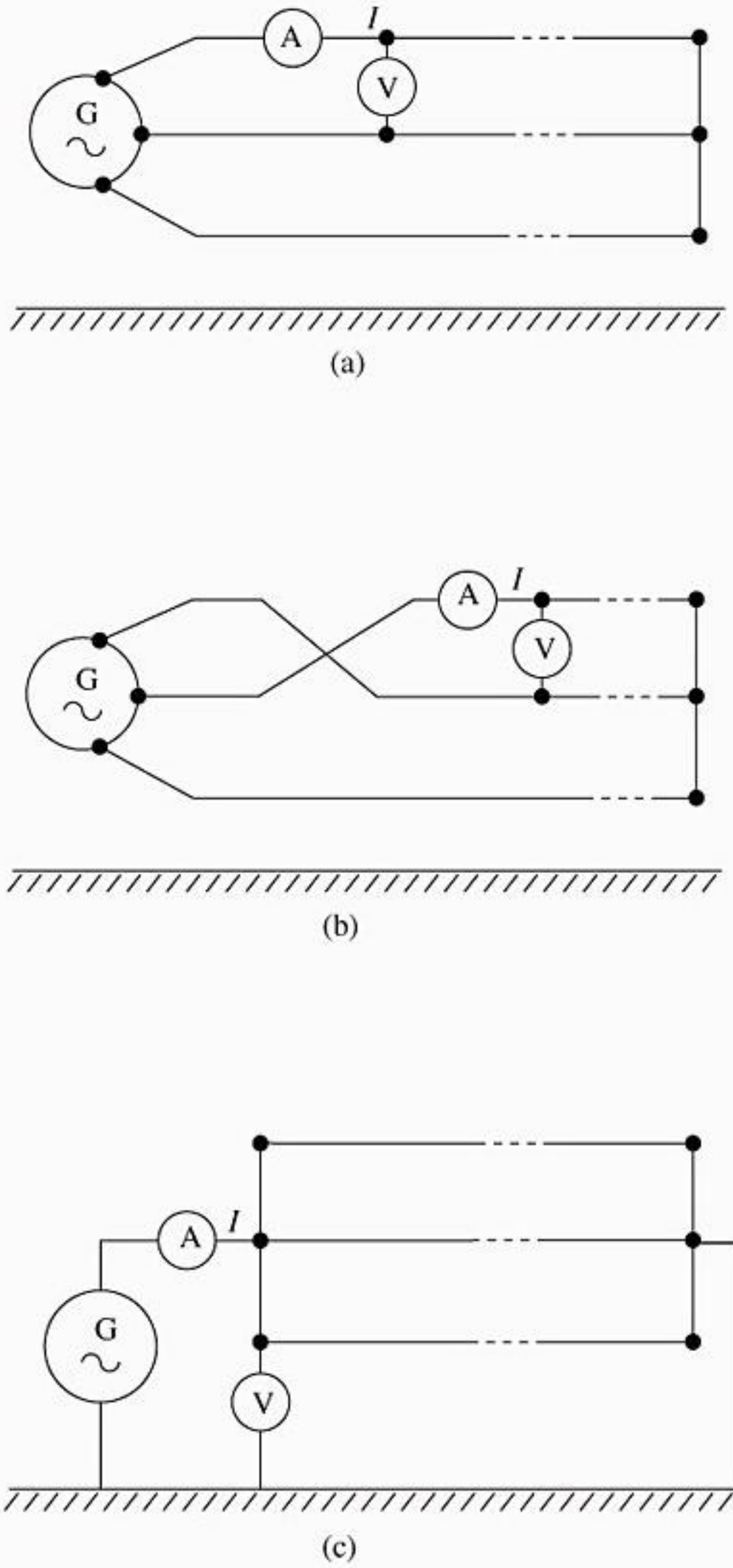


Figura 2.26 ▪ Representação do significado e esquema de medição das impedâncias de seqüência de uma linha de transmissão: (a) seqüência positiva, (b) seqüência negativa e (c) seqüência zero

Na aplicação do método dos componentes simétricos, devem ser utilizados os valores das impedâncias de seqüência positiva, negativa e zero dos componentes mais importantes do circuito.

Quando a carga está equilibrada, a corrente é somente de seqüência positiva. Portanto, a solução usual dos circuitos equilibrados é, na verdade, um caso específico, que envolve apenas o sistema de seqüência positiva, ou seja, tensões, correntes e impedâncias de seqüência positiva.

Os geradores, como foram construídos bem equilibrados, só produzem tensões de seqüência positiva. As tensões de seqüência negativa e zero resultam de quedas em impedâncias produzidas pela circulação de componentes de seqüência negativa e zero da corrente.

Tensões e correntes de seqüência positiva (negativa) produzem e estão associadas a campos magnéticos nas máquinas, que giram no sentido (oposto ao) da rotação da máquina.

As correntes de seqüência zero estão em fase nos três condutores de um circuito trifásico. Para que possam circular, o ponto neutro deverá estar ligado a um quarto condutor ou à terra. As três correntes se somam no ponto neutro e tornam-se $3I_{a0}$ no condutor neutro ou no de terra. Elas produzem nas máquinas um campo magnético estacionário e pulsante. As correntes de seqüência zero são raramente encontradas em motores, pois neles dificilmente o neutro é aterrado.

$$\left.\begin{aligned} 0 &= (\dot{Z} + 3\dot{Z}_n)\dot{I}_{a0} + \dot{U}_{a0} \\ 0 &= \dot{Z}\dot{I}_{a2} + \dot{U}_{a2} \\ \dot{E}_a &= \dot{Z}\dot{I}_{a1} + \dot{U}_{a1} \end{aligned}\right\} \quad (2.100)$$

Aplicações

Considere o circuito simétrico mostrado na Figura 2.27, na qual são apresentadas as impedâncias de cada fase, com exceção da impedância de carga (ligada entre fase e neutro).

Lembrando que $\dot{E}_{a0} = \dot{E}_{a2} = 0$ e $\dot{E}_{a1} = \dot{E}_a$ (gerador síncrono), pode-se escrever da Expressão 2.98:

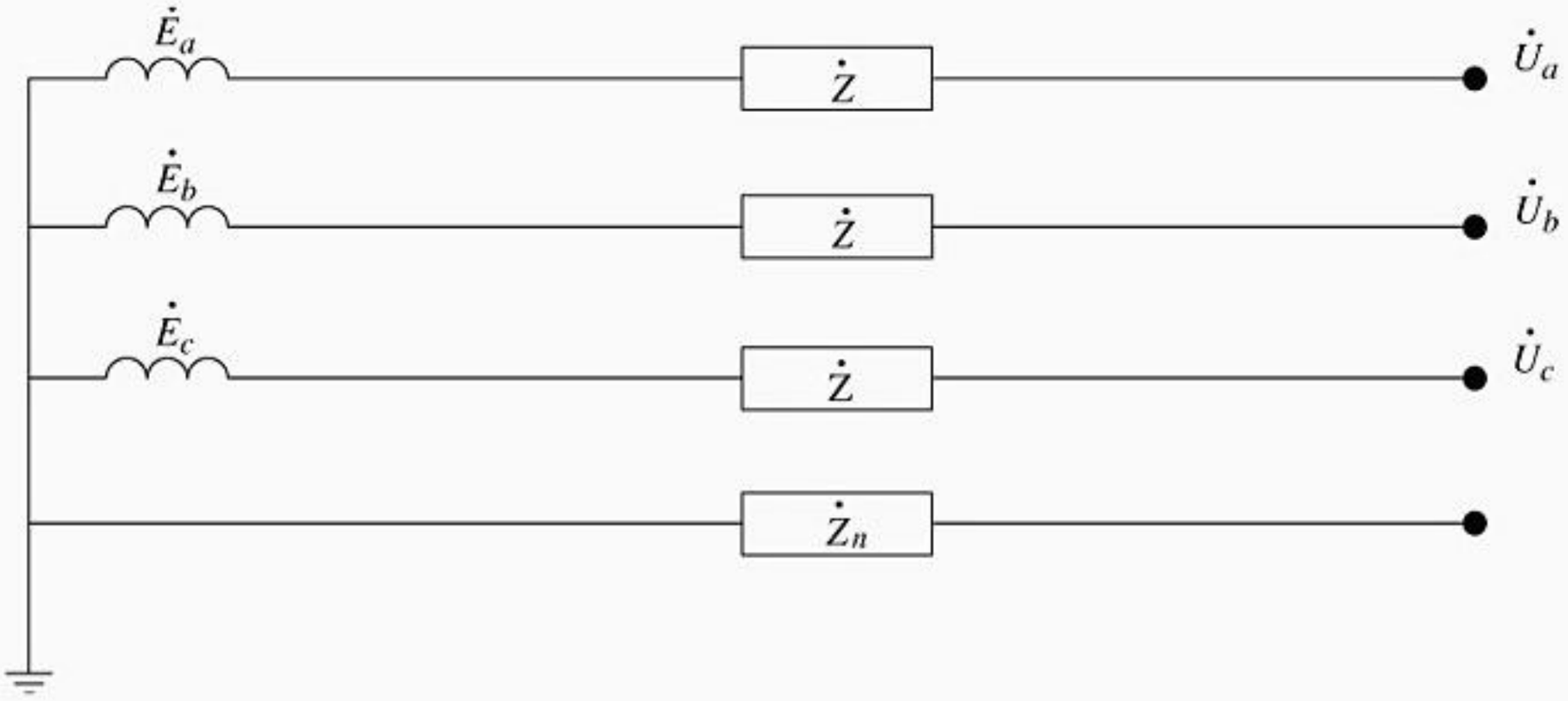


Figura 2.27 ■ Diagrama de um circuito simétrico

Considere, agora, que haja um curto-circuito trifásico, como mostra a Figura 2.28. Trata-se de um circuito equilibrado e, portanto, $\dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} = 0$ e $\dot{U}_{a1} = \dot{U}_{a2} = \dot{U}_{a0} = 0$.

Nessas condições, da Expressão 2.100 resulta

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}} \quad (2.101)$$

Pode-se então escrever:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}_1}$$

$$\dot{I}_b = a^2\dot{I}_a \quad (2.102)$$

$$\dot{I}_c = a\dot{I}_a$$

Para um *curto-circuito bifásico* nas fases *b* e *c* (Figura 2.29), tem-se como condições do defeito

$$\dot{I}_a = 0, \dot{I}_b = -\dot{I}_c \quad \text{e} \quad \dot{U}_b = \dot{U}_c$$

Equacionando o problema e aplicando as condições impostas, chega-se à expressão

$$\dot{I}_b = -\dot{I}_c = -j\sqrt{3}\,\frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad (2.103)$$

No caso de uma *falta direta fase-terra* (Figura 2.30(a)), as condições desse defeito serão

$\dot{U}_a = 0$, $\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$ resultando em

$$\dot{I}_a = \frac{3\dot{E}_a}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_n} \quad (2.104)$$

Se tiver uma *falta não-direta fase-terra* (Figura 2.30(b)) com $\dot{Z}_F$ como impedância de falta, resultará em

$$\dot{I}_a = \frac{3\dot{E}_a}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_n + 3\dot{Z}_F} \quad (2.105)$$

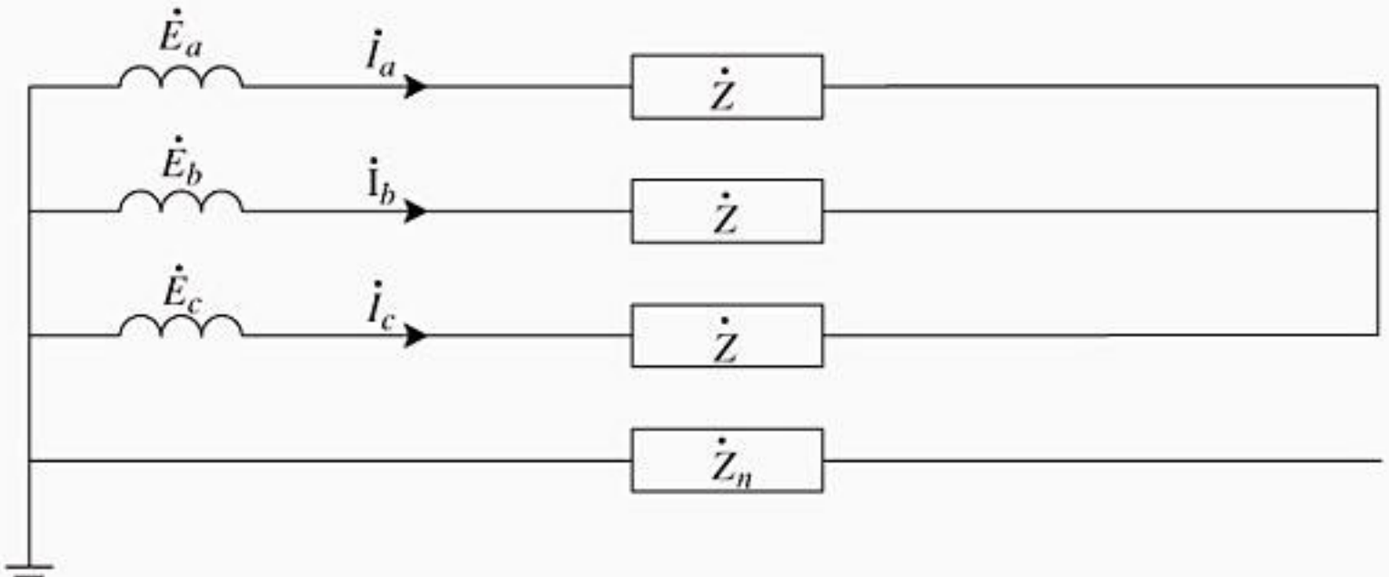


Figura 2.28 ▪ Diagrama de um curto-circuito trifásico no final da linha

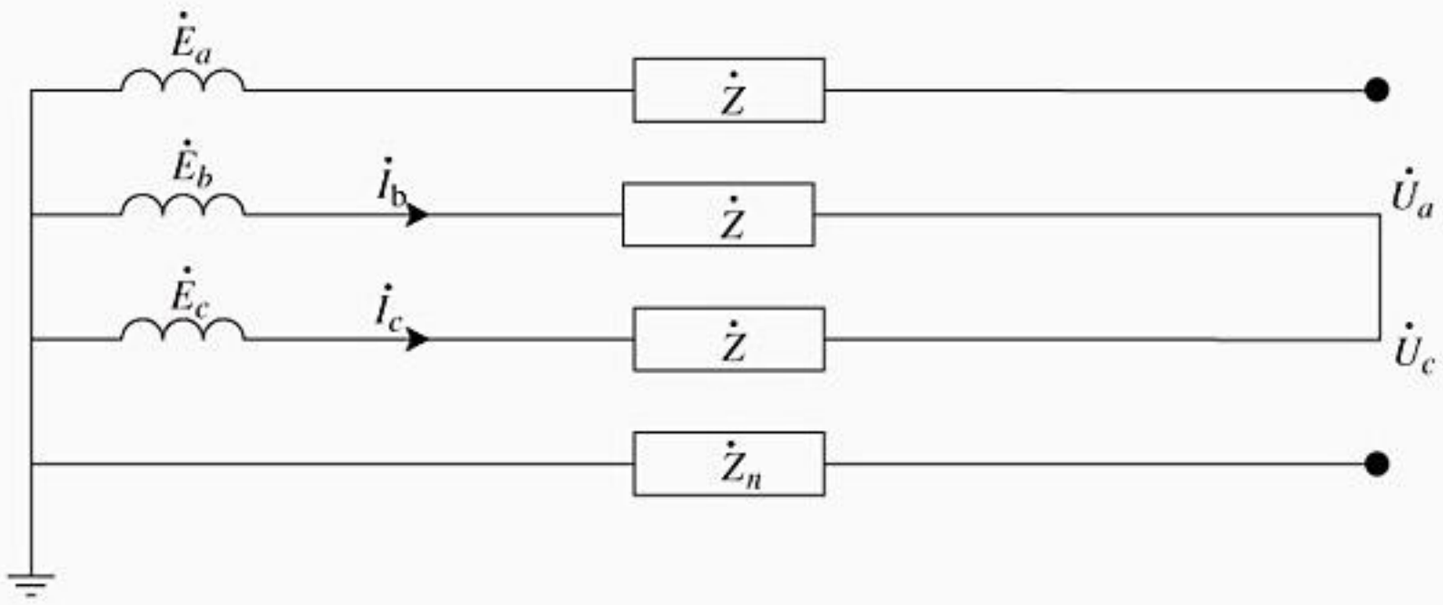


Figura 2.29 ▪ Diagrama de um curto-circuito bifásico

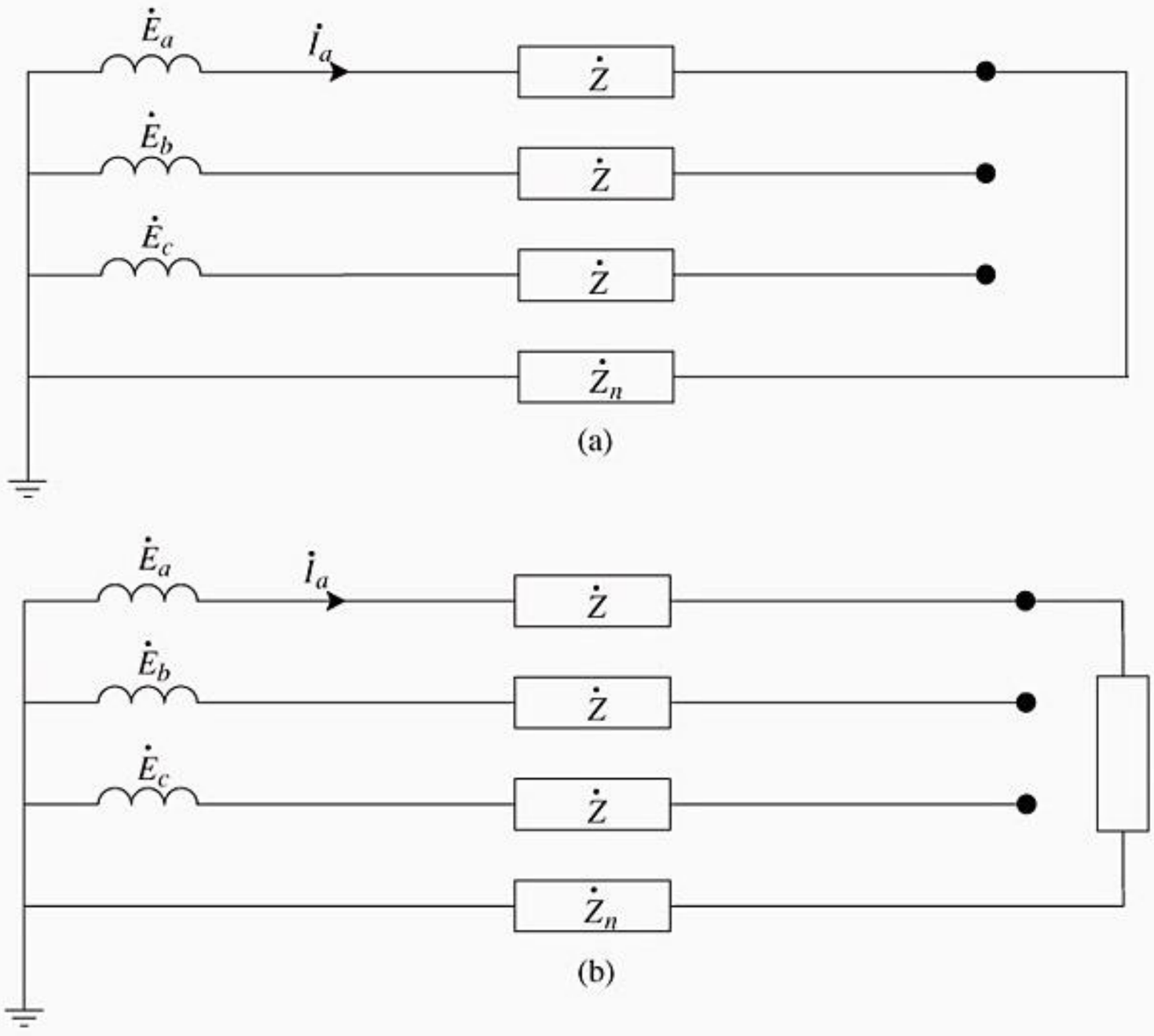


Figura 2.30 ▪ Diagrama de faltas fase-terra: (a) direta e (b) não-direta

Resumo das equações fundamentais

A Figura 2.31 apresenta o sistema geral, incluindo o gerador síncrono e a linha da transmissão. Apresenta-se, a seguir, um resumo das equações fundamentais dos componentes simétricos.

(a) Se conhecidas as correntes de linha $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$ e $\dot{I}_c$, obtém-se:

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0}$$

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c);\ \dot{I}_{b1} = a^2\dot{I}_{a1};\ \dot{I}_{c1} = a\dot{I}_{a1}$$

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\,\dot{I}_b + a\,\dot{I}_c);\ \dot{I}_{b2} = a\dot{I}_{a2};\ \dot{I}_{c2} = a^2\dot{I}_{a2}$$

(b) Se conhecidas as tensões de fase $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$ e $\dot{U}_c$, obtém-se:

$$\dot{U}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c) = \dot{U}_{b0} = \dot{U}_{c0}$$

$$\dot{U}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a\,\dot{U}_b + a^2\,\dot{U}_c);\ \dot{U}_{b1} = a^2\,\dot{U}_{a1};\ \dot{U}_{c1} = a\,\dot{U}_{a1}$$

$$\dot{U}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + a^2\dot{U}_b + a\dot{U}_c);\ \dot{U}_{b2} = a\dot{U}_{a2};\ \dot{U}_{c2} = a^2\dot{U}_{a2}$$

(c) Outras expressões:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0} = a^2\dot{I}_{a1} + a\,\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0} = a\dot{I}_{a1} + a^2\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}$$

$$\dot{U}_a = \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0}$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{b2} + \dot{U}_{b0} = a^2\dot{U}_{a1} + a\dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0}$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{c2} + \dot{U}_{c0} = a\,\dot{U}_{a1} + a^2\dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0}$$

$$\dot{E}_a = \dot{Z}_1\dot{I}_{a1} + \dot{U}_{a1};\ \dot{U}_{a1} = \dot{E}_a - \dot{Z}_1\dot{I}_{a1}$$

$$O = \dot{Z}_2\dot{I}_{a2} + \dot{U}_{a2};\ \dot{U}_{a2} = -\dot{Z}_2\dot{I}_{a2}$$

$$O = \dot{Z}_0\dot{I}_{a0} + \dot{U}_{a0};\ \dot{U}_{a0} = -\dot{Z}_0\dot{I}_{a0}$$

$$\dot{U}_a = \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0} = \dot{E}_a - \dot{Z}_1\dot{I}_{a1} - \dot{Z}_2\dot{I}_{a2} - \dot{Z}_0\dot{I}_{a0}$$

$$\dot{U}_b = a^2\dot{U}_{a1} + a\dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0} = a^2\dot{E}_a - a^2\dot{Z}_1\dot{I}_{a1} - a\dot{Z}_2\dot{I}_{a2} - \dot{Z}_0\dot{I}_{a0}$$

$$\dot{U}_c = a\dot{U}_{a1} + a^2\dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0} = a\dot{E}_a - a\dot{Z}_1\dot{I}_{a1} - a^2\dot{Z}_2\dot{I}_{a2} - \dot{Z}_0\dot{I}_{a0}$$

2.5 Valores por unidade

Definição

O sistema "por unidade", abreviadamente pu, é um meio conveniente de expressar grandezas elétricas. Impedâncias, correntes, tensões e potências são muitas vezes expressas em pu, em vez de em ohms, ampères, volts e watts.

O valor por unidade de uma grandeza é definido como a relação entre o valor da grandeza e um valor da mesma grandeza tomado como base. Assim, para uma grandeza de valor g, o valor pu g_{pu}, na base g_B, será

$$g_{pu} = \frac{g}{g_B} = \frac{\text{valor real da grandeza}}{\text{valor base da grandeza}} \qquad (2.106)$$

O valor percentual, $g\%$, será cem vezes o valor por unidade, ou seja,

$$g\% = 100\,g_{pu} \qquad (2.107)$$

Assim, por exemplo, se a tensão-base for de 127 V, as tensões de 120, 127 e 220 V ficam em pu, com os valores de

$$\frac{120}{127} = 0{,}94 \text{ pu} \quad \text{ou} \quad 94\%$$

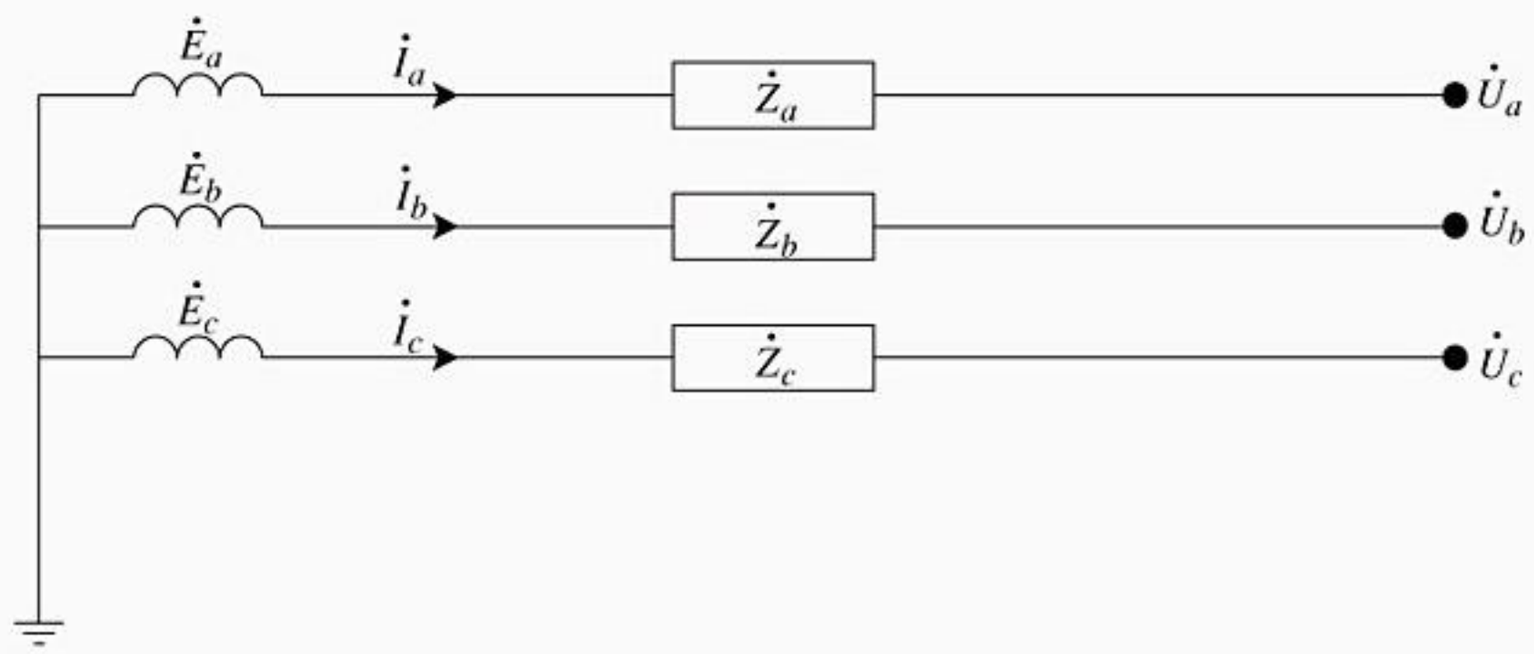


Figura 2.31 ■ Diagrama geral de um gerador síncrono e de uma linha de transmissão

$$\frac{127}{127} = 1{,}0 \text{ pu} \quad \text{ou} \quad 100\%$$

$$\frac{220}{127} = 1{,}73 \text{ pu} \quad \text{ou} \quad 173\%$$

O uso dos valores por unidade ou dos valores percentuais conduz a cálculos bem mais simples, por exemplo, na determinação de correntes presumidas de curto-circuito em sistemas elétricos. Por sua vez, o método pu apresenta a vantagem de que o produto de dois valores pu é um valor pu, ao passo que o produto de dois valores percentuais deve ser dividido por 100 para que o resultado seja também um valor percentual.

Tensão, corrente, potência e impedância são grandezas que se relacionam de tal maneira que a escolha de valores-base para quaisquer duas delas determina os valores-base para as outras duas. Nessas condições, se forem especificadas, por exemplo, as bases para a corrente e a tensão, será possível determinar as bases para a impedância e a potência. A impedância-base será a que apresentar uma queda de tensão entre seus terminais igual à tensão-base, quando por ela circular a corrente-base; a potência-base (considerando um sistema monofásico) será o produto da tensão-base pela corrente-base.

Sistema monofásico

De modo geral, para os sistemas monofásicos, adote como bases a potência aparente, em kVA, SB (kVA), e a tensão, em kV, U_B (kV). Nessas condições, têm-se as seguintes expressões para as bases das demais grandezas:

- Corrente-base em ampères:

$$I_B(\text{A}) = \frac{S_B(\text{kVA})}{U_B(\text{kV})} \qquad (2.108)$$

- Impedância-base em ohms:

$$Z_B(\Omega) = \frac{U_B(V)}{I_B(\text{A})} \qquad (2.109)$$

Ou então

$$Z_B(\Omega) = \frac{[U_B(\text{kV})]^2 \times 10^3}{S_B(\text{kVA})} \qquad (2.110)$$

EXEMPLO

Considere o circuito monofásico apresentado na Figura 2.32, na qual a carga indutiva consome 100 kVA, com fator de potência 0,8, e é alimentada por um gerador síncrono, por meio de uma linha cuja impedância é de (0,024 + *j* 0,08) ohms. A tensão na carga é de 200 V.

(a) Adote como bases:

S_B = 100 kVA

U_B = 200 V = 0,2 kV

Das expressões 2.108 e 2.109, calculam-se as bases para a corrente e a impedância:

$$I_B = \frac{100}{0{,}2} = 500 \text{ A}$$

$$Z_B = \frac{0{,}2^2 \times 10^3}{100} = 0{,}4\ \Omega$$

(b) Os valores pu relativos aos dados serão:

- A impedância da linha:

$$\dot{Z}_{\text{pu}} = \frac{0{,}024 + j0{,}08}{0{,}4} = 0{,}06 + j0{,}21$$

- A tensão na carga:

$$U_{\text{pu}} = \frac{0{,}2}{0{,}2} = 1$$

- A potência na carga:

$$S_{\text{pu}} = \frac{100}{100} = 1$$

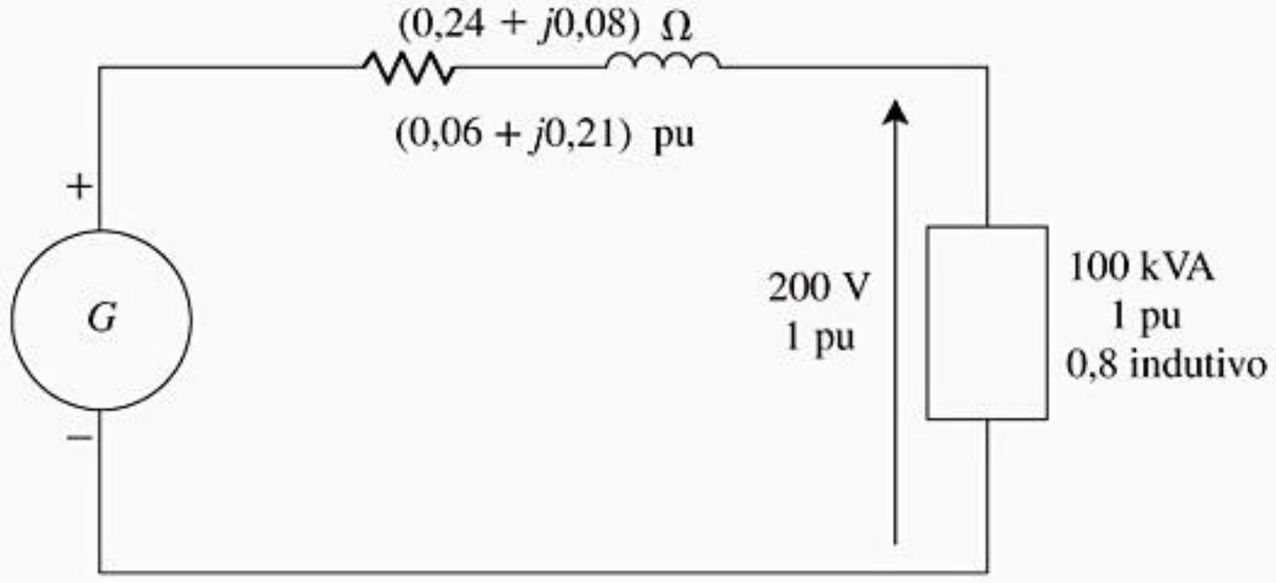


Figura 2.32 ▪ Circuito monofásico

(c) Resolvendo o circuito, obtém-se:

- A corrente:

$$I = \frac{S}{U} = \frac{100}{0{,}2} = 500 \text{ A}$$

- O fasor corrente (referência):

$$\dot{I} = 500 \angle 0^\circ \text{ A}$$

- A tensão na carga:

$$\dot{U} = 200 \angle \cos^{-1} 0{,}8 = 200 \angle 37^\circ = (160 + j120) \text{ V}$$

- A tensão no gerador:

$$\dot{U}_G = \dot{Z}\dot{I} + \dot{V}$$

$$\dot{U}_G = (0{,}024 + j0{,}08)500 + (160 + j120) =$$

$$= (172 + j160) \text{ V} = 234{,}9 \angle 43^\circ \text{ V}$$

(d) Resolvendo em pu, obtém-se:

- A corrente:

$$\dot{I}_{pu} = 1 \angle 0^\circ$$

- A tensão na carga:

$$\dot{U}_{pu} = 1 \angle 37^\circ = 0{,}8 + j\,0{,}6$$

- A tensão no gerador:

$$\dot{U}_{G\,pu} = \dot{Z}_{pu}\dot{I}_{pu} + \dot{U}_{pu} =$$

$$= (0{,}06 + j0{,}21)\ 1 + 0{,}8 + j\,0{,}6 =$$

$$= 0{,}86 + j0{,}8 = 1{,}175 \angle 43^\circ$$

- A tensão em volts:

$$\dot{U}_G = 1{,}175 \angle 43^\circ \times 200 = 234{,}9 \angle 43^\circ \text{ V}$$

Sistema trifásico

Os circuitos trifásicos, quando equilibrados, são resolvidos como uma linha simples (fase), com retorno pelo neutro, isto é, como um circuito monofásico. No diagrama de impedâncias, que será apresentado adiante, as bases são a potência aparente por fase, em kVA, e a tensão de fase (entre a linha e o neutro), em kV. Nos sistemas trifásicos são, em geral, fornecidas a potência aparente trifásica e a tensão de linha (entre linhas). Isso pode dar origem a uma confusão entre uma tensão de linha pu e uma tensão de fase pu. Embora uma tensão de linha possa ser a base, a tensão a ser usada no circuito monofásico equivalente é ainda a tensão de fase.

Para um sistema trifásico equilibrado, tem-se, entre as tensões de linha, U_L, e de fase, U_F, a relação

$$U_F = \frac{1}{\sqrt{3}}\ U_L$$

Com isso, tem-se, para as bases, a relação

$$U_{F,B} = \frac{1}{\sqrt{3}}\ U_{L,B}$$

E para a tensão pu

$$U_{pu} = \frac{U_F}{U_{F,B}} = \frac{U_L}{U_{L,B}}$$

o que significa que o valor pu de uma tensão de fase, cuja base é uma tensão de fase, é igual ao valor pu da tensão de linha correspondente cuja base é a tensão de linha correspondente à base anterior. Assim, por exemplo, se o valor de

$$U_{L,B} = 10 \text{ kV}$$

tem-se

$$U_{F,B} = \frac{1}{\sqrt{3}} 10 = 5{,}77 \text{ kV}$$

Para uma tensão de linha,

$$U_L = 4{,}16 \text{ kV},$$

A tensão de fase correspondente será igual a

$$U_F = \frac{1}{\sqrt{3}} 4{,}16 = 2{,}4 \text{ kV}$$

o que resulta em

$$U_{pu} = \frac{4{,}15}{10} = \frac{2{,}4}{5{,}77} = 0{,}416 \text{ pu}$$

A potência aparente trifásica é igual ao triplo da potência aparente por fase, ou seja,

$$S_{trif} = 3S$$

De maneira semelhante, tem-se para as bases

$$S_{trif,\,B} = 3S_B$$

Com isso,

$$S_{pu} = \frac{S_{trif}}{S_{trif,\,B}} = \frac{S}{S_B}$$

O valor pu da potência aparente trifásica, cuja base é uma potência aparente trifásica, é igual ao valor pu da potência aparente por fase correspondente cuja base é a potência aparente por fase correspondente à base anterior. Assim, por exemplo, se a base for

$$S_{trif,\,B} = 30.000 \text{ kVA}$$

tem-se

$$S_B = \frac{30.000}{3} = 10.000 \text{ kVA}$$

Para uma potência

$$S_{trif} = 18.000 \text{ kVA}$$

a potência por fase correspondente será igual a

$$S = \frac{18.000}{3} = 6.000 \text{ kVA}$$

Então,

$$S_{pu} = \frac{18.000}{30.000} = \frac{6.000}{10.000} = 0{,}6 \text{ pu}$$

É comum, nos sistemas trifásicos, adotar como bases a potência aparente trifásica em kVA e a tensão de linha em kV. Nessas condições, para as demais grandezas, tem-se:

- A corrente-base em ampères:

$$I_B(\text{A}) = \frac{S_B(\text{kVA})}{\sqrt{3}\, U_B(\text{kV})} \qquad (2.111)$$

- A impedância-base em ohms:

$$Z_B(\Omega) = \frac{[U_B(\text{kV})/\sqrt{3}]^2 \times 10^3}{S_B(\text{kVA})/3} =$$

$$= \frac{[U_B(\text{kV})]^2 \times 10^3}{S_B(\text{kVA})} \qquad (2.112)$$

É importante observar que a mesma expressão pode ser usada para determinar a impedância-base em circuitos monofásicos e trifásicos (expressões 2.110 e 2.112). Deve-se atentar, porém, para o fato de que, em um sistema monofásico, a tensão-base, U_B(kV), é a tensão de fase, e a potência-base, S_B(kVA), a potência por fase, ao passo que, no sistema trifásico, esses mesmos símbolos indicam, respectivamente, tensão de linha e potência trifásica.

Pode-se escrever, para a impedância em ohms,

$$Z = Z_{pu} \times Z_B(\Omega)$$

e, da Expressão 2.112, tem-se

$$Z = Z_{pu} \times \frac{[U_B(\text{kV})]^2 \times 10^3}{S_B(\text{kVA})} \qquad (2.113)$$

e

$$Z_{pu} = Z \times \frac{S_B(\text{kVA})}{[U_B(\text{kV})]^2 \times 10^3} \qquad (2.114)$$

EXEMPLO

Em um sistema trifásico cujas bases são 1.000 kVA e 0,48 kV, tem-se uma impedância de 5,75 por cento, à qual é aplicada a tensão de 1 pu, como mostra a Figura 2.33.

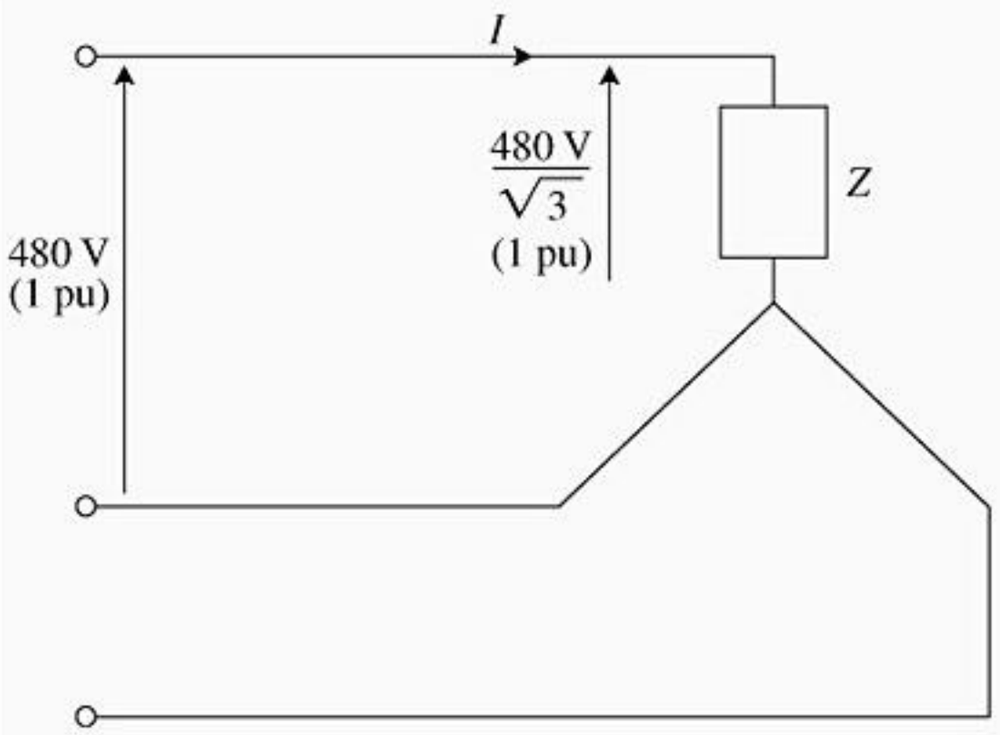


Figura 2.33 ▪ Diagrama de um sistema trifásico

(a) A corrente em pu será, por definição, igual a:

$$I_{pu} = \frac{U_{pu}}{Z_{pu}} = \frac{1}{5{,}75 \times 10^{-2}} = 17{,}39$$

(b) A corrente-base será, da Expressão 2.111,

$$I_B = \frac{1.000}{\sqrt{3} \times 0{,}48} = 1.203 \text{ A}$$

(c) A corrente em ampères será igual a:

$$I = 17{,}39 \times 1.203 = 20.920 \text{ A}$$

(d) A impedância valerá, da Expressão 2.113,

$$Z = 0{,}0575 \times \frac{0{,}48^2 \times 10^3}{1.000} = 0{,}01325\ \Omega$$

(e) A corrente, em ampères, também poderá ser obtida por:

$$I = \frac{480/\sqrt{3}}{0{,}01325} = 20.920 \text{ A}$$

Mudança de bases

Muitas vezes a impedância de um componente de um sistema é expressa em pu ou porcentagem, em uma base diferente da adotada para a parte do sistema em que o componente se situa. Para efeito de cálculo, como todas as impedâncias de qualquer parte de um sistema devem ser expressas na mesma base, é necessário proceder-se a uma mudança de base ou bases.

Considere uma impedância Z, originalmente definida por um valor Z_{pu1}, em um grupo de bases S_{B1} e U_{B1}. Pode-se escrever, da Expressão 2.114

$$Z_{pu1} = \frac{Z \times S_{B1}}{U_{B1}^2 \times 10^3} \qquad (2.115)$$

Adotando agora como bases S_{B2} e U_{B2}, a mesma impedância Z terá um valor por unidade Z_{pu2}, dado por

$$Z_{pu2} = \frac{Z \times S_{B2}}{U_{B2}^2 \times 10^3} \qquad (2.116)$$

Dividindo a Expressão 2.116 pela 2.115, obtém-se uma expressão que permite mudar as bases da impedância Z, de (S_{B1}, U_{B1}) para (S_{B2}, U_{B2})

$$\frac{Z_{pu2}}{Z_{pu1}} = \left(\frac{S_{B2}}{S_{B1}}\right) \times \left(\frac{U_{B1}}{U_{B2}}\right)^2 \qquad (2.117)$$

EXEMPLO

Considere uma impedância de 5 Ω, nas bases 10 kV e 15.000 kVA. Seu valor pu será, da Expressão 2.115, igual a

$$Z_{pu1} = \frac{5 \times 15.000}{10^2 \times 10^3} = 0{,}75$$

Mudando as bases para 15 kV e 30.000 kVA, o novo valor pu da impedância de 5 Ω será, da Expressão 2.117, igual a

$$Z_{pu2} = 0{,}75 \times \left(\frac{30.000}{15.000}\right) \times \left(\frac{10}{15}\right)^2 = 0{,}667$$

Escolha de bases

A escolha dos valores-base a serem utilizados quando se estuda um sistema (por exemplo, para cálculos de curto-circuito) deve ser feita tendo em vista a simplificação do trabalho. A princípio, são escolhidas as bases para uma parte do sistema, sendo que as bases para as demais partes, separadas da inicial e interligadas por meio de transformadores, serão determinadas de acordo com os princípios expostos a seguir.

As bases escolhidas inicialmente devem conduzir à obtenção, sempre que possível, de valores pu de tensões e correntes próximos de 1, para simplificar os cálculos. Por sua vez, haverá grande economia de tempo se a escolha for feita de modo que poucos valores pu, previamente determinados, tenham de ser convertidos em novas bases.

Para equipamentos como transformadores e máquinas girantes, os fabricantes fornecem, em geral, as impedâncias (ou as reatâncias) em porcentagem cujas bases são a potência e a tensão nominais dos equipamentos.

No caso de motores, são geralmente especificadas a potência nominal, que é a potência de saída, no eixo do motor em HP, CV ou kW, e a tensão nominal, tensão de linha, para motores trifásicos. Assim, conhecendo-se o rendimento e o fator de potência, será fácil determinar a potência aparente nominal na entrada do motor, que é a base adotada.

EXEMPLO

Considerando um motor de indução trifásica de 800 HP, 2.300 V, com reatância subtransitória de 15% , rendimento de 90% e fator de potência igual a 0,88.

(a) A potência nominal de entrada será igual a:

$$S_{nom}(\text{kVA}) = \frac{P_{nom}(\text{HP}) \times 0{,}746}{\eta \times \cos\varphi} =$$

$$= \frac{800 \times 0{,}746}{0{,}90 \times 0{,}88} = 753{,}5 \text{ kVA}$$

(b) O valor em ohms da reatância subtransitória será, da Expressão 2.113,

$$X'' = \frac{0{,}15 \times 2{,}3^2 \times 10^3}{753{,}5} = 1{,}05\ \Omega$$

Na prática, são usadas as seguintes relações, que fornecem valores bem aproximados:

- Motores de indução e motores síncronos com fator de potência igual a 0,8:

$$S_{nom}(\text{kVA}) = P_{nom}(\text{HP ou CV}) \qquad (2.118)$$

- Motores síncronos com fator de potência unitário:

$$S_{nom}(\text{kVA}) = 0{,}8\, P_{nom}(\text{HP ou CV}) \qquad (2.119)$$

Para um transformador, o valor da impedância em ohms depende do lado em que é medido, se no lado da alta ou no da baixa tensão. Quando a impedância for dada em porcentagem (ou em pu), a tensão-base será a nominal de baixa, se a impedância se referir à baixa, ou será a tensão nominal de alta, se ela se referir à alta. Sejam:

- Z_{AT}: impedância referida ao lado de alta (ohms).
- Z_{BT}: impedância referida ao lado de baixa (ohms).
- U_{AT}: tensão nominal de alta (kV).
- U_{BT}: tensão nominal de baixa (kV).

Pode-se escrever

$$\frac{Z_{BT}}{Z_{AT}} = \left(\frac{U_{BT}}{U_{AT}}\right)^2 \qquad (2.120)$$

Da Expressão 2.114, onde S é a potência nominal do transformador e levando em conta a Expressão 2.120, pode-se escrever

$$Z_{BT,\,pu} = \frac{Z_{BT} \times S}{U_{BT}^2 \times 10^3} = \frac{(U_{BT}/U_{AT})^2 Z_{AT} \times S}{U_{BT}^2 \times 10^3} =$$

$$= \frac{Z_{AT} \times S}{U_{AT}^2 \times 10^3} = Z_{AT,\,pu}$$

Dessa maneira, em um transformador, a impedância pu será a mesma em ambos os lados (alta e baixa ten-

são), o que é uma das grandes vantagens de se utilizar os valores em pu.

A escolha adequada das diferentes bases para as partes de um sistema interligado por transformador pode simplificar bastante os cálculos com valores pu. Nesse caso, recomenda-se as seguintes regras:

- Para circuitos ligados por transformador monofásico, as tensões-base devem estar relacionadas entre si como a relação nominal dos números de espiras do transformador. Dessa maneira, com a mesma potência-base, o valor pu de uma impedância será o mesmo, independentemente de ela ser expressa em função da tensão-base relativa ao lado em que está situada ou em função da tensão-base relativa ao outro lado do transformador.
- Para circuitos trifásicos interligados por transformador (ou banco de transformadores), as tensões-base nos dois lados devem estar relacionadas entre si em uma relação igual à das tensões nominais (de linha) em ambos os lados. Nessas condições, as tensões-base deverão ter a mesma relação que as tensões (nominais) entre fase e neutro em ambos os lados do transformador, e a mesma relação de números de espiras de um transformador ligado em $Y - Y$.

EXEMPLO

Considere o transformador esquematizado na Figura 2.34, com valores nominais 15.000 kVA, 13,8 kV, 138 kV e X = 10%.

- A reatância em ohms, relativa ao lado de 13,8 kV, será, da Expressão 2.113, igual a:

$$X = \frac{0{,}10 \times 13{,}8^2 \times 10^3}{15.000} = 1{,}27\ \Omega$$

- Para o lado de 138 kV, tem-se, da Expressão 2.113:

$$X = \frac{0{,}10 \times 138^2 \times 10^3}{15.000} = 127\ \Omega$$

- Os dois valores relacionam-se entre si de acordo com a Expressão 2.120:

$$\frac{1{,}27}{127} = \left(\frac{13{,}8}{138}\right)^2$$

EXEMPLO

Suponha que o gerador de 20.000 kVA, 13,8 kV, X = 30% seja ligado ao lado da baixa do transformador do exemplo anterior.

- Sua reatância em ohms será, da Expressão 2.113, igual a:

$$X = \frac{0{,}30 \times 13{,}8^2 \times 10^3}{20.000} =$$

$$= 2{,}86\ \Omega \text{ (no lado de 13,8 kV)}$$

- Quando o gerador é visto do lado de 138 kV do transformador, a reatância em ohms será, da Expressão 2.120, igual a:

$$X = 2{,}86 \times \left(\frac{13{,}8}{138}\right)^2 = 286\ \Omega \text{ (no lado de 138 kV)}$$

que, em pu, representa, da Expressão 2.114:

$$X_{pu} = \frac{286 \times 20.000}{138^2 \times 10^3} = 0{,}30 = 30\%$$

- Os valores pu ou percentuais podem ser somados, desde que as respectivas bases sejam iguais. Assim, adotando como bases 13,8 kV e 20.000 kVA, a reatância total ligada ao lado da baixa do transformador será igual a:

$$0{,}30 + 0{,}10 \times \frac{20.000}{15.000} = 0{,}30 + 0{,}1333 =$$

$$= 0{,}4333 \text{ pu ou } 43{,}33\%$$

No lado da alta, a reatância pu será a mesma, desde que a potência-base seja igual a 20.000 kVA e a tensão-base passe a ser 138 kV.

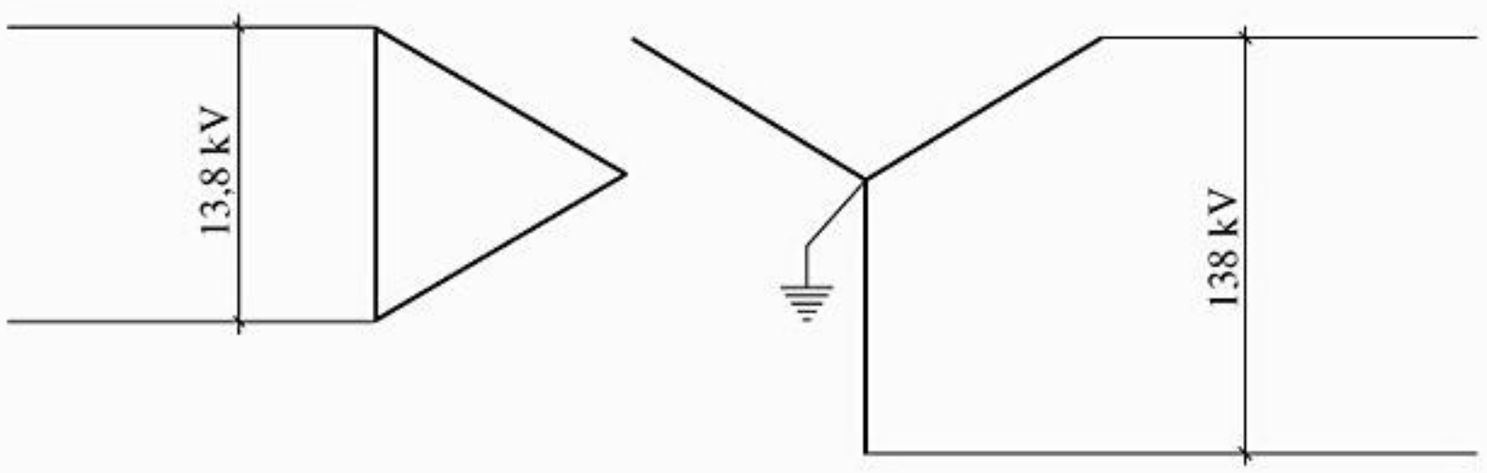


Figura 2.34 ■ Diagrama de um transformador trifásico $\Delta - Y$

2.6 Análise de um circuito *RL*

A Figura 2.35 mostra um circuito constituído pela associação em série de uma resistência R e de uma indutância L, alimentado por uma tensão instantânea u e provido de uma chave S, inicialmente aberta. A equação do circuito será

$$u = Ri + L\frac{di}{dt} \qquad (2.121)$$

onde i é a corrente instantânea.

Suponha que a tensão u seja senoidal e que, no instante do fechamento da chave S, sua fase seja Ψ (fase inicial), como mostra a Figura 2.36.

Seja U_M seu valor de crista, pode-se escrever:

$$u = U_M \operatorname{sen}(\omega t + \Psi) \qquad (2.122)$$

Substituindo a Expressão 2.122 na 2.121, obtém-se a equação diferencial

$$Ri + L\frac{di}{dt} = U_M \operatorname{sen}(\omega t + \Psi) \qquad (2.123)$$

cuja solução é

$$i = I_M \operatorname{sen}(\omega t + \Psi - \Phi) + Ae^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \qquad (2.124)$$

onde I_M vale

$$I_M = \frac{U_M}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

e Φ, defasagem entre u e i, é

$$\cos \Phi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \qquad (2.125)$$

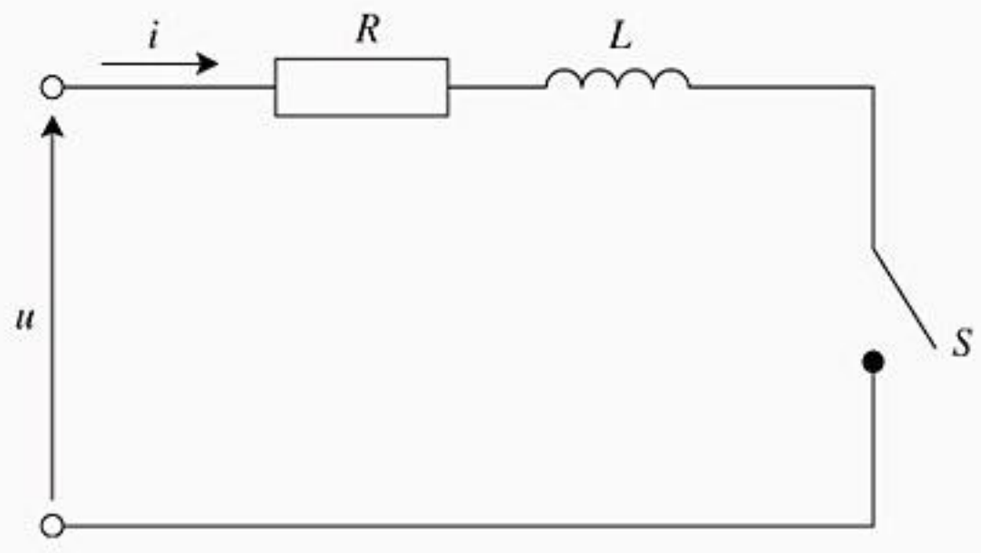


Figura 2.35 ■ Diagrama de circuito em série *RL*

É possível determinar o valor de A, lembrando que $i = 0$ no instante $t = 0$ (fechamento da chave). Assim, da Expressão 2.124, tem-se

$$O = I_M \operatorname{sen}(\Psi - \Phi) + A$$

e então

$$A = -I_M \operatorname{sen}(\Psi - \Phi) \qquad (2.126)$$

Substituindo a Expressão 2.126 na 2.124, obtém-se para a corrente

$$i = I_M \operatorname{sen}(\omega t + \Psi - \Phi) - I_M \operatorname{sen}(\Psi - \Phi)e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \qquad (2.127)$$

cuja expressão indica que a corrente é constituída por dois componentes:

- Componente *periódico*:

$$I_M \operatorname{sen}(\omega t + \Psi - \Phi)$$

- Componente *aperiódico*:

$$-I_M \operatorname{sen}(\Psi - \Phi)e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

como mostra a Figura 2.37.

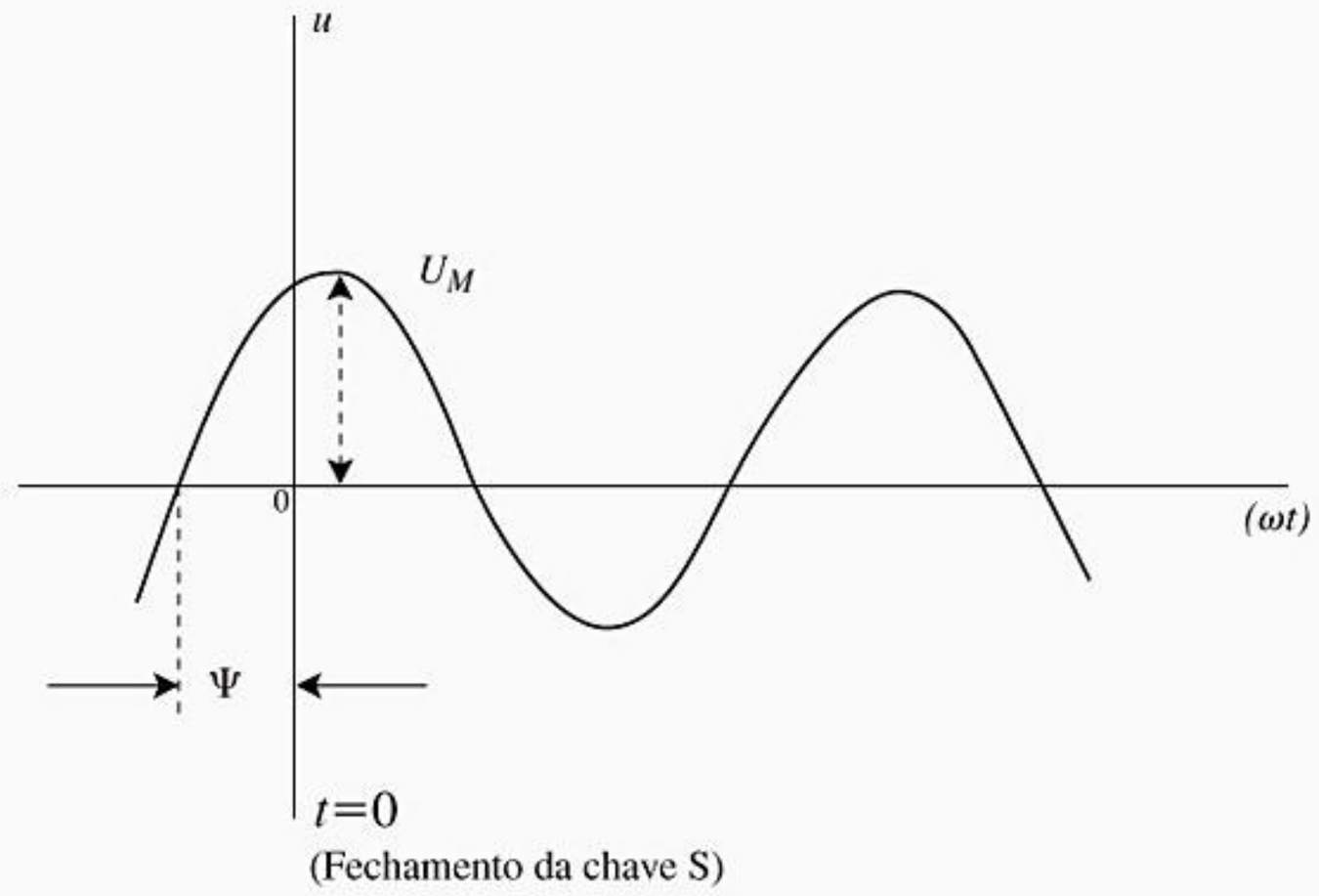


Figura 2.36 ■ Gráfico da tensão aplicada ao circuito *RL*

Observe que:

(a) O valor inicial do componente aperiódico ($t = 0$):

$$A = -I_M \operatorname{sen}(\Psi - \Phi)$$

- Será *máximo* quando

$$\operatorname{sen}(\Psi - \Phi) = \pm 1 \text{ ou } (\Psi - \Phi) = \pm 90^\circ$$

o que caracteriza a pior condição de assimetria da corrente i.

- Será *nulo* quando

$$\operatorname{sen}(\Psi - \Phi) = 0 \text{ ou } (\Psi - \Phi) = 0^\circ$$

(b) Da Expressão 2.125, para R e $\omega L = X$ dados, o ângulo Φ é constante e, assim, a maior ou menor assimetria dependerá da fase inicial Ψ da tensão u.

(c) A relação $\omega L/R = X/R$ (onde L/R é a constante de tempo do circuito) indica a *taxa de decréscimo* do componente aperiódico. Desse modo,

- $R = 0$ (circuito puramente indutivo) $\rightarrow X/R = \infty$, isto é, o componente aperiódico permanece constante:

$$Ae^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} = Ae^0 = A$$

- $X = 0$ (circuito puramente resistivo) $\rightarrow X/R = 0$, ou seja, o componente aperiódico não existe

$$Ae^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} = Ae^{-\infty} = 0$$

(d) Quando há predominância da reatância indutiva sobre a resistência ($X >> R$), pode-se considerar $\Phi \cong 90^\circ$ e a pior condição de assimetria ocorrerá, praticamente, para

$$\Psi - 90^\circ = \pm 90^\circ \text{ ou } \Psi = 0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$$

A Figura 2.37 mostra uma corrente totalmente assimétrica em um circuito em série RL, o que indica a presença de seus componentes periódico e aperiódico.

O fechamento da chave S no circuito RL da Figura 2.35 é um fenômeno semelhante a um curto-circuito em um sistema em que os parâmetros do circuito entre a fonte e a falta são R e $X = \omega L$, cujos valores são considerados constantes.

2.7 Transformadores de potência

Definições

A *potência nominal*, S_N, de um transformador de potência é um valor convencional de potência aparente, que serve de base ao projeto, aos ensaios e às garantias do fabricante, e que determina o valor da corrente nominal que circula, sob tensão nominal, em condições especificadas. É a potência que o transformador pode fornecer a determinada carga, sob condições de tensão e freqüência nominais, dentro dos limites especificados.

Em um transformador a dois enrolamentos, ambos – primário e secundário – têm a mesma potência nominal, que é a potência nominal do transformador.

A *tensão nominal*, U_N, de um enrolamento de um transformador de potência é a tensão especificada a ser aplicada, ou induzida em vazio, nos terminais de linha de um enrolamento de um transformador polifásico ou monofásico. As tensões nominais de todos os enrolamentos manifestam-se simultaneamente em vazio, quando a um deles é aplicada a respectiva tensão nominal. Assim, quando em um transformador a dois enrolamentos se aplica a um deles sua tensão nominal, nos terminais do outro, em vazio, aparecerá a tensão nominal respectiva.

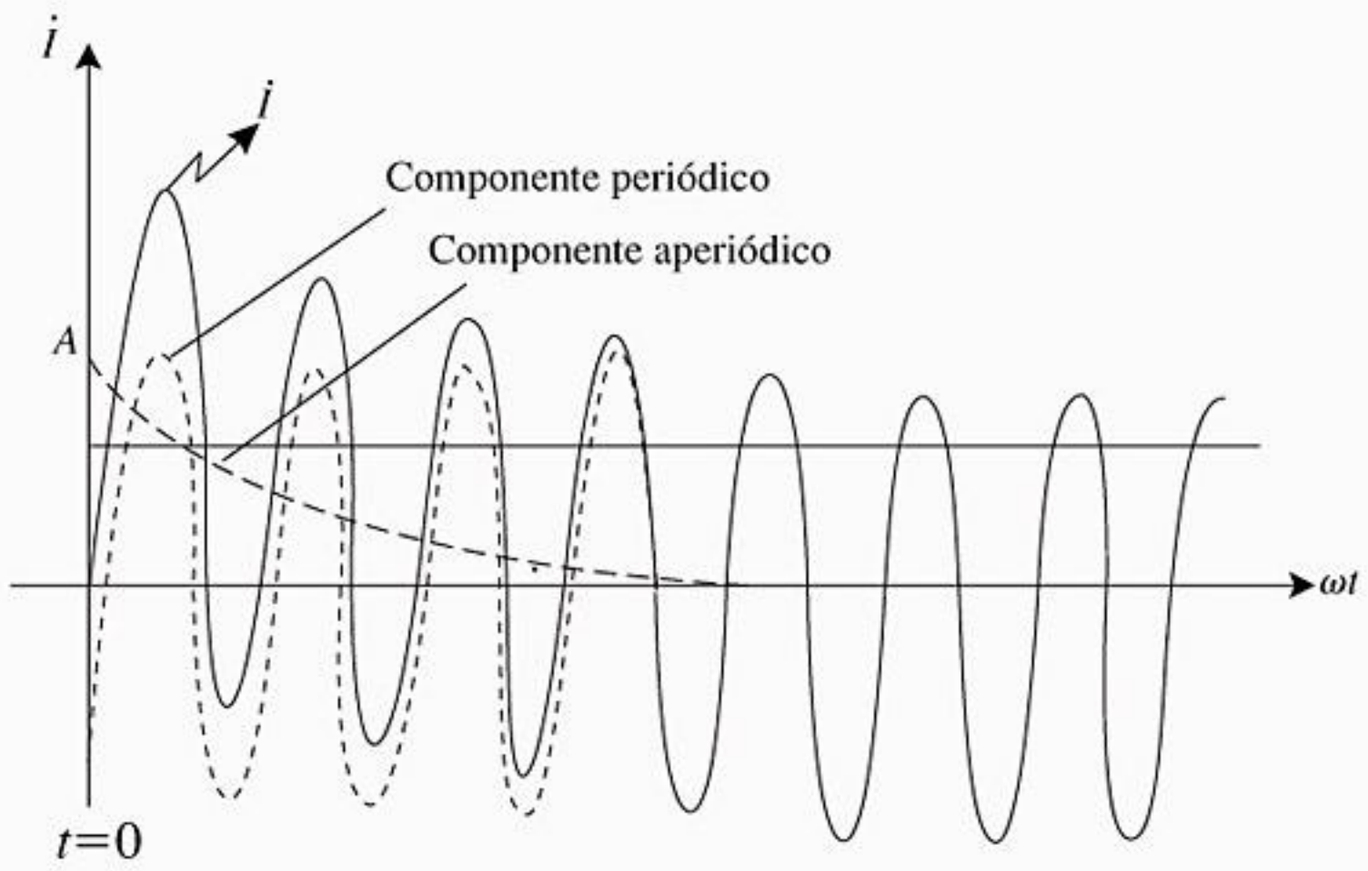


Figura 2.37 ■ Gráfico da corrente assimétrica em um circuito em série *RL*

No caso de transformadores monofásicos para bancos trifásicos, a tensão nominal de um enrolamento destinado a ser ligado em estrela é indicada por uma fração cujo numerador é a tensão entre os terminais de linha do banco e cujo denominador é $\sqrt{3}$.

A *corrente nominal*, I_N, de um enrolamento de um transformador de potência, é a corrente que circula no terminal de linha do enrolamento e cujo valor é obtido dividindo-se a potência nominal do enrolamento pela respectiva tensão nominal e pelo fator de fase aplicável, isto é, 1 para transformadores monofásicos e $\sqrt{3}$ para trifásicos. No caso de transformadores monofásicos para bancos trifásicos, a corrente nominal de um enrolamento destinado a ser ligado em triângulo é indicada por uma fração cujo numerador é a corrente de linha correspondente e cujo denominador é $\sqrt{3}$.

A *relação de tensões nominais* (ou relação de transformação), t_N, é a relação entre as tensões nominais de dois enrolamentos de um transformador, sendo sempre igual ou superior a 1.

A *impedância de curto-circuito* de um transformador a dois enrolamentos, Z_k, é a impedância entre os terminais de um dos enrolamentos, com os terminais do outro em curto-circuito, em condições especificadas. A impedância de curto-circuito é expressa em ohms por fase ou em pu cujas bases são a tensão nominal do enrolamento e a potência nominal do enrolamento.

A *tensão de curto-circuito* de um transformador a dois enrolamentos, U_k, é a tensão que, aplicada entre os terminais de um dos enrolamentos, com o outro em curto-circuito, faz circular no primeiro uma corrente igual à respectiva corrente nominal. A tensão de curto-circuito pode ser expressa em porcentagem (ou em pu) em relação à tensão nominal do enrolamento. Em pu, a tensão de curto-circuito tem o mesmo valor da impedância de curto-circuito do transformador.

Formulário

O transformador elementar de dois enrolamentos, alimentando uma carga, é apresentado na Figura 2.38.

A seguir, é apresentada uma análise sobre o transformador que opera de maneira ideal. Um transformador ideal opera com as seguintes características:

- Todo o fluxo magnético está confinado no núcleo.
- As perdas no ferro e no cobre são nulas.
- A corrente de excitação é desprezível (altíssima permeabilidade do núcleo).
- As perdas Joules nas bobinas são nulas.

Nesse caso, as equações a seguir são válidas.

$$u_1 = e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \tag{2.128}$$

$$u_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \tag{2.129}$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} = t_N \tag{2.130}$$

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \tag{2.131}$$

$$u_1 i_1 = u_2 i_2 \tag{2.132}$$

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{N_1}{N_2}\,\dot{U}_2 \\ \dot{U}_2 &= \frac{N_2}{N_1}\,\dot{U}_1 \end{aligned}\right\} \tag{2.133}$$

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{N_2}{N_1}\,\dot{I}_2 \\ \dot{I}_2 &= \frac{N_1}{N_2}\,\dot{I}_1 \end{aligned}\right\} \tag{2.134}$$

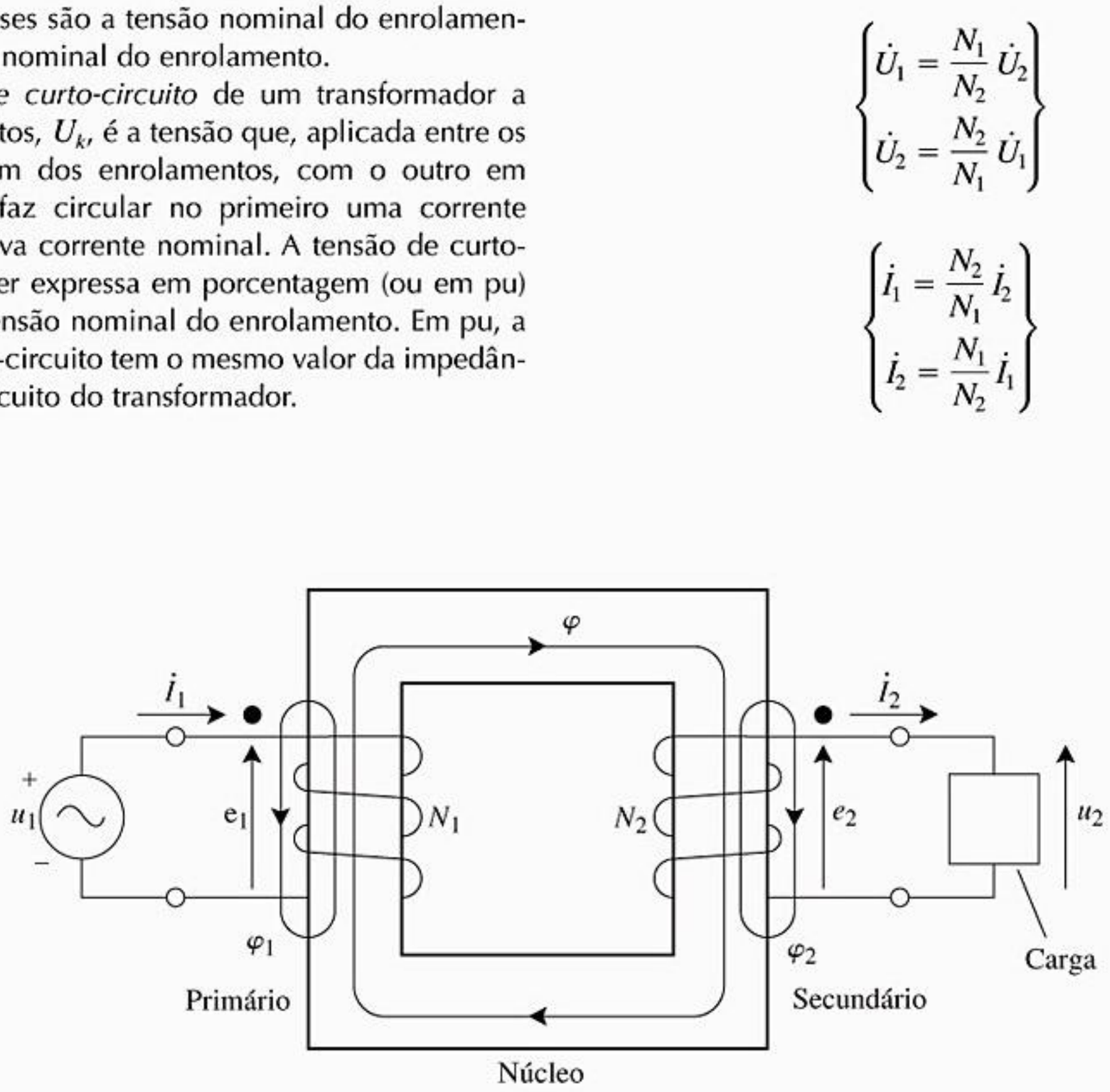


Figura 2.38 ■ Diagrama de um transformador de dois enrolamentos

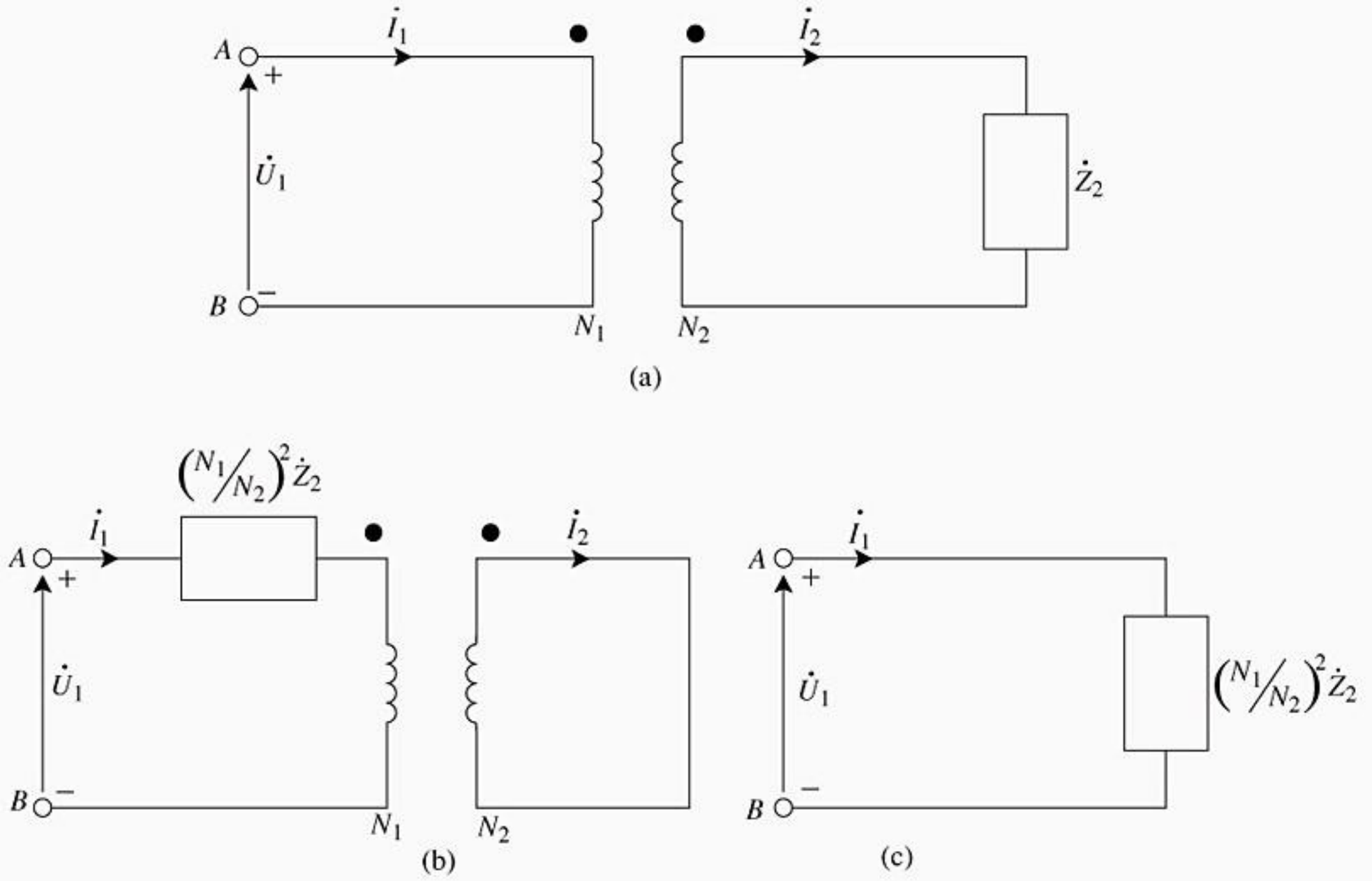


Figura 2.39 ▪ Diagramas de três circuitos equivalentes, vistos dos terminais A e B

$$\dot{Z}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \tag{2.135}$$

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{N}_1}{\dot{N}_2} = t_N \tag{2.136}$$

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2\dot{Z}_2 = \dot{Z}'_1 \tag{2.137}$$

O transformador da Figura 2.38 pode ser representado simbolicamente pelo circuito da Figura 2.39.

Em relação aos terminais A e B, os três circuitos são equivalentes. Na realidade, os transformadores não são ideais, mas equipamentos reais, com as seguintes características:

- Nem todo o fluxo magnético está confinado no núcleo magnético, pois uma pequena parcela φ_1 da Figura 2.38 não se concatena com a bobina 2. Esse fluxo é denominado de fluxo disperso (φ_1). O mesmo ocorre com o φ_2;
- Na operação, o núcleo magnético do transformador se aquece por dois motivos:
- Perdas por correntes elétricas parasitas induzidas no núcleo.
- Perdas por histerese, que correspondem às geradas pelo atrito dos domínios magnéticos elementares que giram acompanhando o laço de histerese. Essas perdas são proporcionais à área do laço de histerese.
- Há perdas joules nas resistências elétricas das bobinas primárias e secundárias do transformador.

O transformador ideal tem como circuito equivalente por fase o circuito apresentado na Figura 2.40.

Para o transformador ideal, cujo circuito equivalente é o da Figura 2.40, as seguintes equações são válidas:

$$\dot{U}_1 = R_1\dot{I}_1 + jX_1\dot{I}_1 + \dot{E}_1 \tag{2.138}$$

$$\dot{E}_1 = j\omega N_1\dot{\phi} \tag{2.139}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 + \dot{I}_\varphi \tag{2.140}$$

$$\dot{I}'_2 = \frac{N_2}{N_1}\dot{I}_2 \quad \begin{matrix}\text{corrente secundária}\\ \text{referida ao primário}\end{matrix} \tag{2.141}$$

$$\dot{I}_\varphi = \dot{I}_P + \dot{I}_m \tag{2.142}$$

$$\dot{E}_2 = j\omega N_2\dot{\phi} \tag{2.143}$$

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\dot{I}'_1}{\dot{I}_2} = t_N \tag{2.144}$$

$$\dot{U}_2 = -R_2\dot{I}_2 - jX_2\dot{I}_2 - \dot{E}_2 \tag{2.145}$$

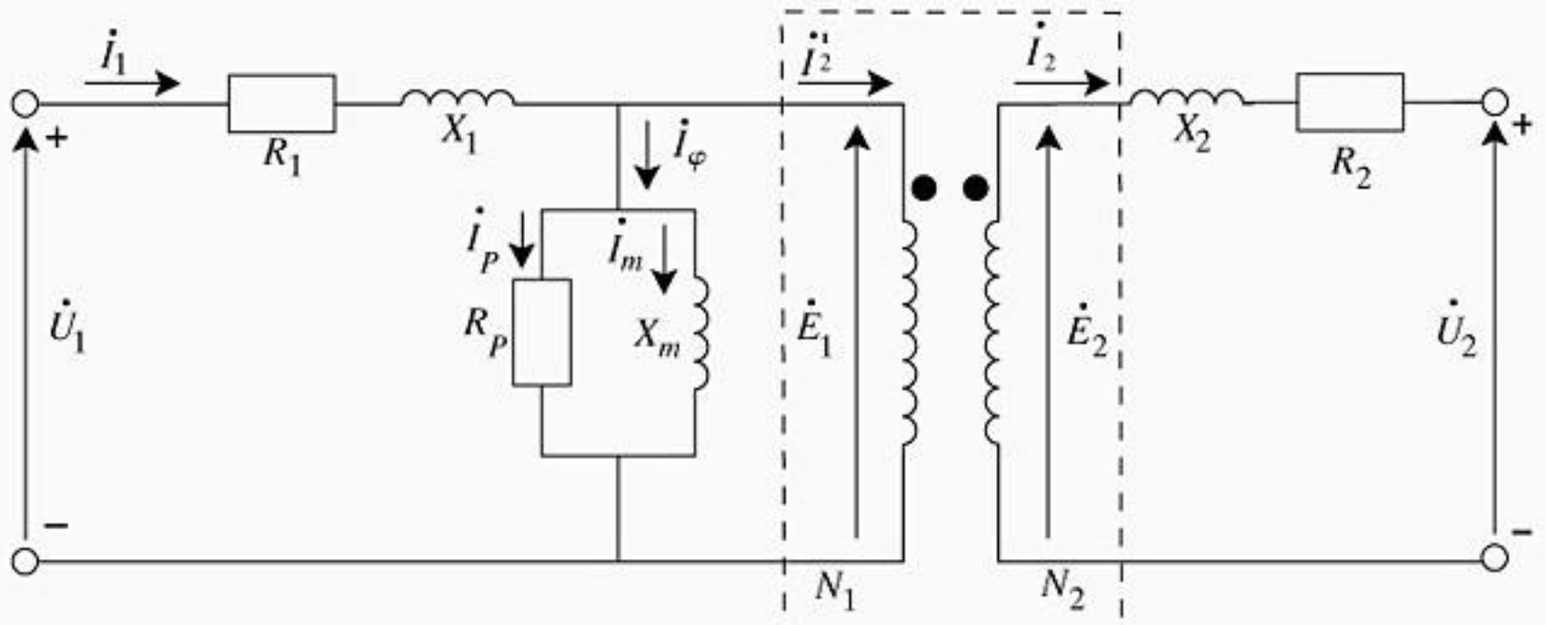


Figura 2.40 ■ Diagrama do circuito equivalente por fase de transformador ideal

$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 \qquad (2.146)$$

$$X'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_2 \qquad (2.147)$$

Pode-se referir o circuito secundário para o primário, resultando no circuito equivalente da Figura 2.41.

No circuito equivalente da Figura 2.41, pode-se eliminar a parcela à direita, na qual está representado o transformador ideal.

Dependendo da análise do estudo a ser considerado, podem-se utilizar vários modelos simplificados de circuitos equivalentes do transformador, como os apresentados na Figura 2.42, na qual a impedância séria é dada por

$$\dot{Z}_{EQ} = R_{EQ} + jX_{EQ} = R'_1 + R'_2 + j(X_1 + X'_2) \quad (2.148)$$

No ensaio de curto-circuito, utiliza-se o modelo da Figura 2.42(b), onde o ramo em derivação foi desconsiderado, o que resulta no circuito da Figura 2.43.

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = Z_{EQ} \qquad (2.149)$$

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} = R_{EQ} = R_1 + R'_2 \qquad (2.150)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = X_{EQ} = X_1 + X'_2 \qquad (2.151)$$

A seguir, apresenta-se um resumo das características dos transformadores.

- Valores nominais – transformadores a dois rolamentos.
- Potência nominal: S_N
- Tensões nominais: U_{N1}, U_{N2}
- Correntes nominais: I_{N1}, I_{N2}

monofásico: $I_N = \dfrac{S_N}{U_N}$ (2.152)

trifásico: $I_N = \dfrac{S_N}{\sqrt{3}U_N}$ (2.153)

- Relação de transformação: $t_N = \dfrac{U_{N1}}{U_{N2}} (\geq 1)$ (2.154)
- Impedância de curto-circuito: Z_k
- Tensão de curto-circuito: U_k

Valores pu (ver Seção 2.5)

- Bases: $S_B(\text{kVA}) = S_N(\text{kVA})$

$$U_B(\text{kV}) = U_{N,AT}(\text{kV}) \qquad (2.155)$$

$$Z_B(\Omega) = \frac{[U_{N,AT}(\text{kV})]^2 \times 10^3}{S_N(\text{kVA})}$$

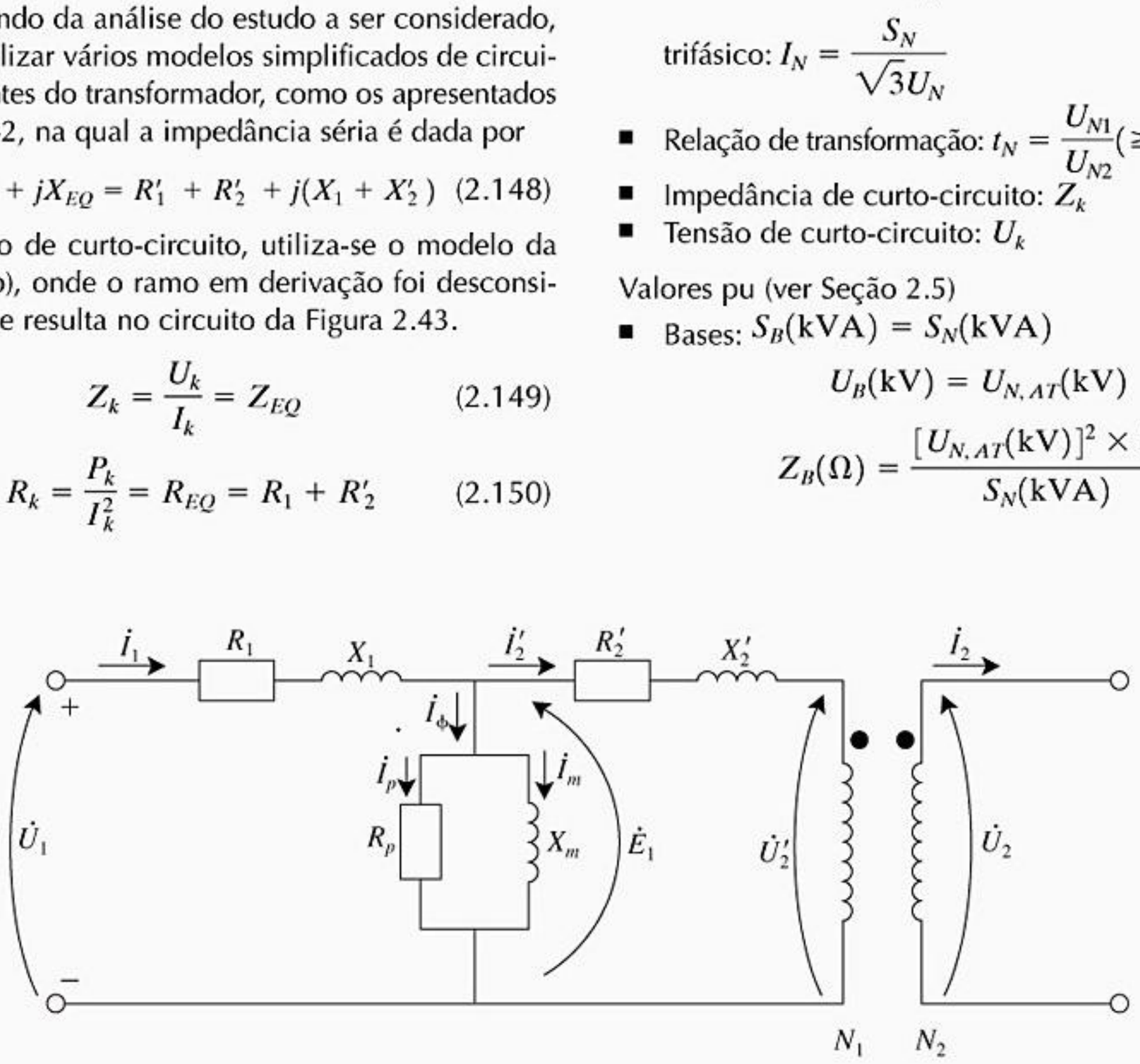


Figura 2.41 ■ Diagrama de circuito equivalente referido ao primário

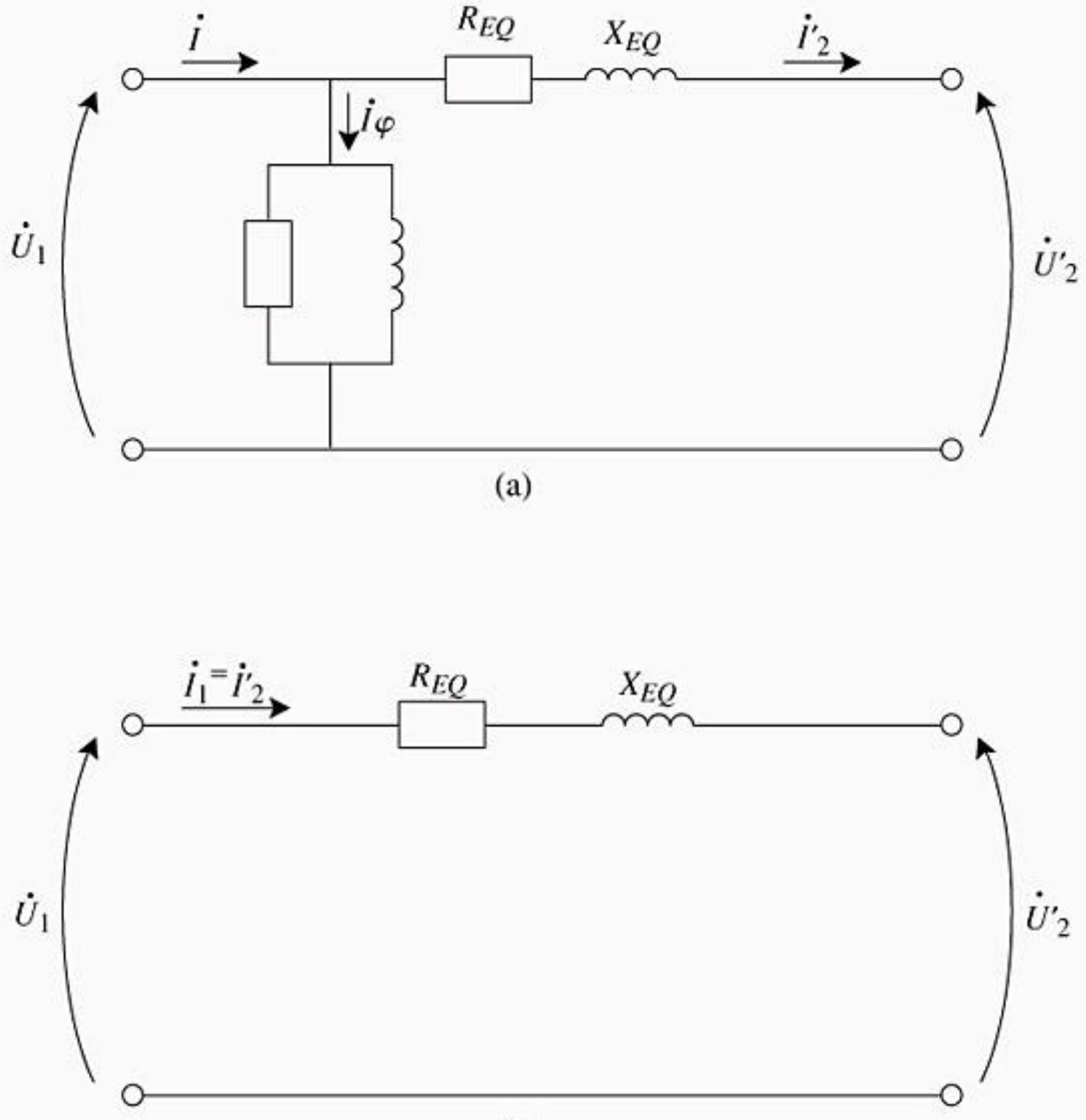


Figura 2.42 ■ Diagramas dos circuitos equivalentes simplificados

■ Impedâncias (transformador trifásico)

$$Z_{k,AT}(\Omega) = \frac{U_k(\text{kV}) \times 10^3}{\sqrt{3} I_{N,AT}(\text{A})} \tag{2.156}$$

$$Z_k = \frac{Z_{k,AT}}{Z_B} = \text{u}_k \tag{2.157}$$

$$Z_{AT}(\Omega) = u_k \frac{[U_{N,AT}(\text{kV})]^2}{S_N(\text{kVA})} \times 10^3 \tag{2.158}$$

$$Z_{BT}(\Omega) = \frac{1}{t_N^2} Z_{AT}(\Omega) = u_k \frac{[U_{N,BT}(\text{kV})]^2}{S_N(\text{kVA})} \times 10^3 \tag{2.159}$$

$$R_{AT}(\Omega) = \frac{P_k(W)}{3I_{N,AT}^2} \tag{2.160}$$

$$R_{BT}(\Omega) = \frac{1}{t_N^2} R_{AT}(\Omega) = \frac{P_k(W)}{3I_{N,BT}^2} \tag{2.161}$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \tag{2.162}$$

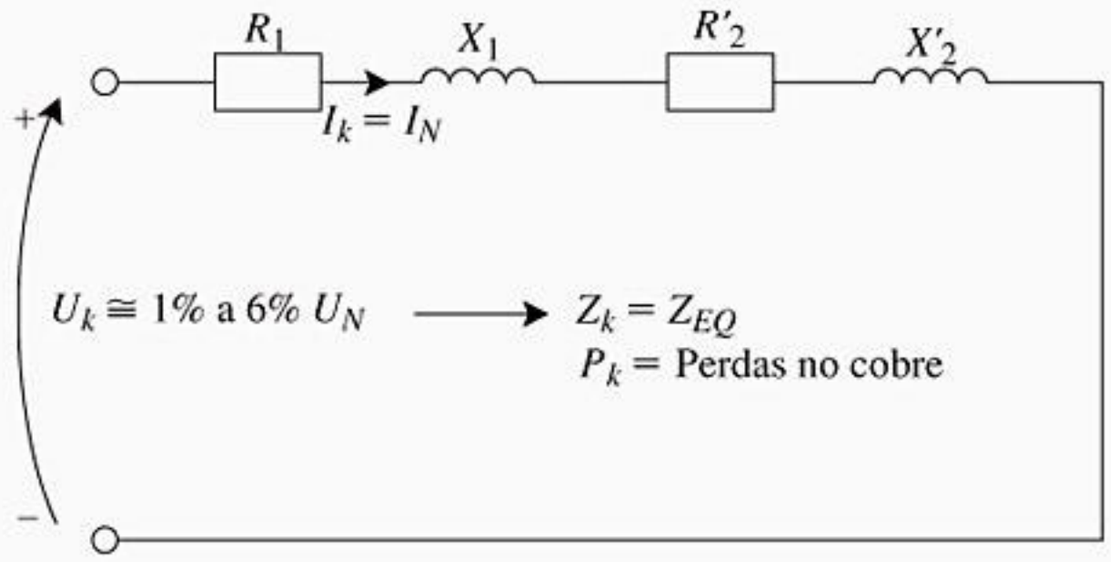


Figura 2.43 ■ Diagrama do ensaio de curto-circuito no transformador

EXERCÍCIOS

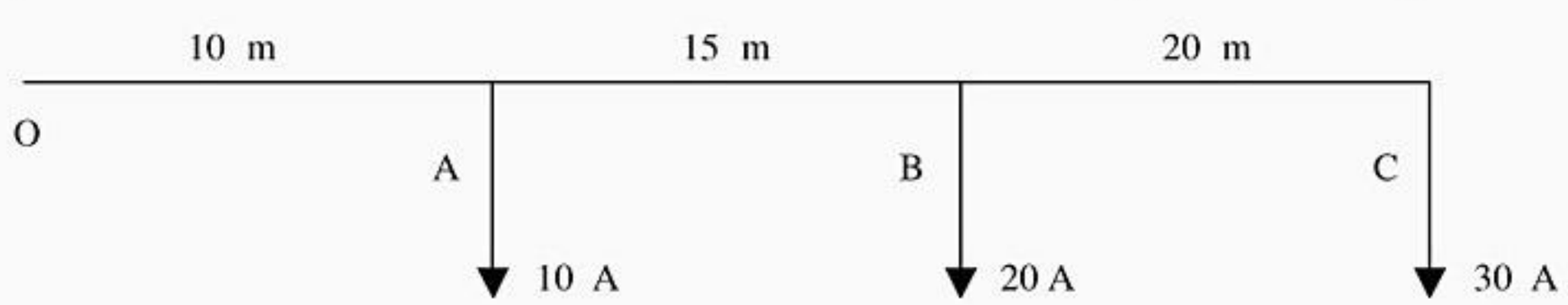
1. Calcule as potências aparente, ativa e reativa de uma carga monofásica com uma tensão e correntes de

$$U = 220/0^\circ \text{ V e } I = 10/-30^\circ \text{ A}$$

2. Uma carga trifásica ligada em estrela tem impedâncias iguais de $10 + j10\ \Omega$ por fase. Com uma tensão de linha de 220 V, quais são as potências ativa e reativa da carga?

3. Dado um circuito monofásico com três cargas, no desenho a seguir, determinar as quedas de tensão em cada trecho e a total.

Considere que os cabos tenham $r = 4{,}5\ \Omega/\text{m}$, $x = 0$ e o cos $\Phi = 0{,}8$ indutivo para todas as cargas.



4. Dada uma carga trifásica com potência ativa de 50 kW e reativa de 50 kvar indutiva, determine a potência do banco de capacitores para corrigir o fator de potência para 0,92.

5. Determinem as componentes simétricas das seguintes correntes:

$$I_a = 20/90^\circ \text{ A}, I_b = 20/-90^\circ \text{ A e } I_c = 0 \text{ A}$$

6. Para uma carga trifásica ligada em delta com as impedâncias $Z_{ab} = 10\ \Omega$, $Z_{bc} = 10/90^\circ\ \Omega$ e $Z_{ab} = 10/-90^\circ\ \Omega$ e com tensões $V_{ab} = 220/0^\circ$ V, $V_{bc} = 220/120^\circ$ V e $V_{ab} = 220/-120^\circ$ V, determine as correntes de linha e as componentes simétricas.

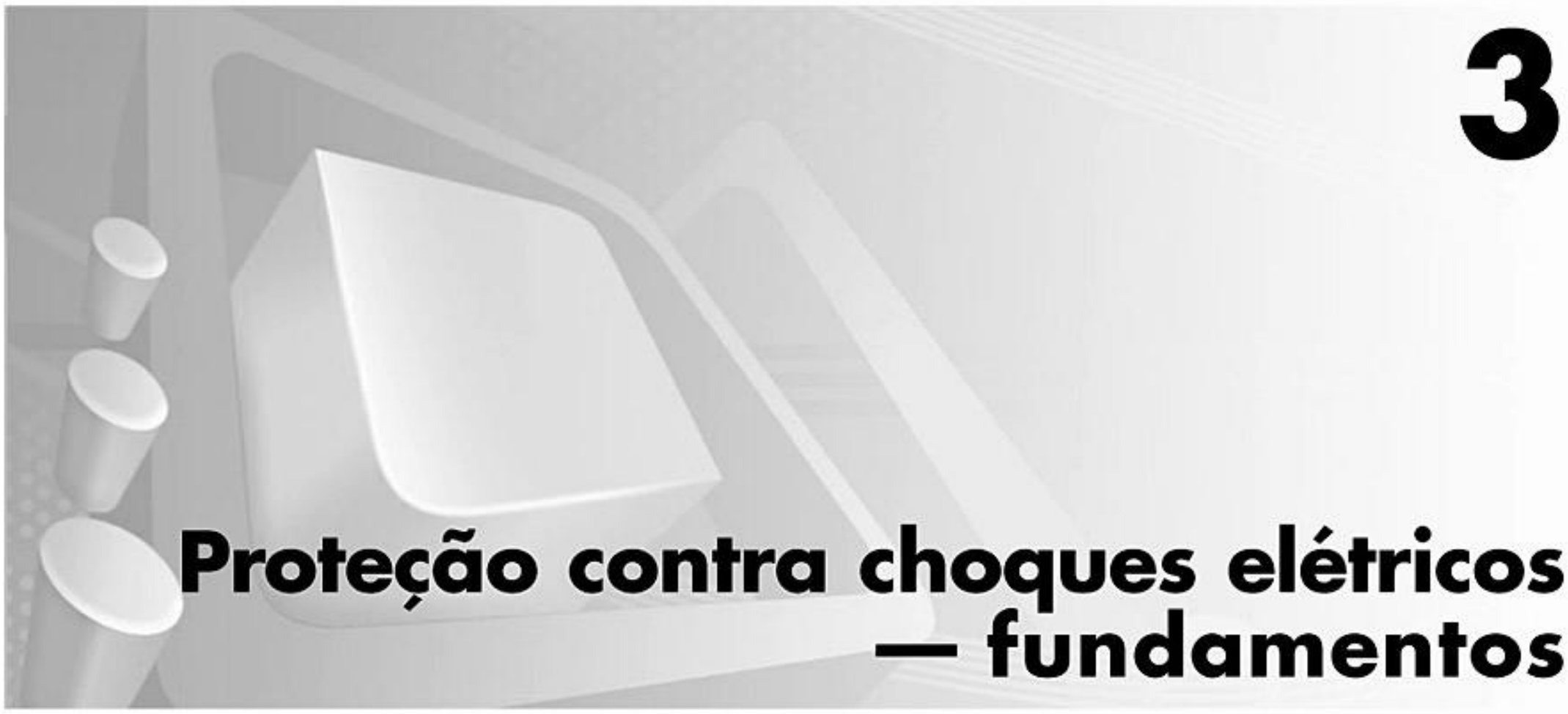
7. Qual é o valor real da impedância de um gerador monofásico de 20 por cento cuja potência nominal é de 10 kVA e tem tensão de 220 V?

8. Qual é o novo valor da impedância em pu de cinco por cento representada nas bases 13,8 kV e 30 MVA, se representada nas bases 138 kV e 60 MVA?

9. É dado um gerador trifásico de 20 MVA em 13,8 kV com reatância de 30 por cento ligado a um transformador de 20 MVA, de 13,8 para 138 kV e reatância de dez por cento. Determine a tensão do gerador em pu, quando uma carga de 15 MVA com fator de potência 0,8 indutivo sob uma tensão de 138 kV for ligada no secundário do transformador.

10. Para as medições do ensaio de curto-circuito do transformador monofásico de 2.000 VA e tensões de 200 V no primário e 100 V no secundário, determine a impedância série em pu.

$$P = 8 \text{ W}, I = 10 \text{ A e } U = 1 \text{ V}$$



3

Proteção contra choques elétricos — fundamentos

3.1 A corrente elétrica no corpo humano

O aumento substancial das aplicações e da utilização da energia elétrica nas últimas décadas levou pesquisadores de diversos países a realizar minuciosos estudos sobre os perigos que a corrente elétrica pode causar ao passar pelo corpo humano.

As pesquisas sobre o assunto começaram em 1930, com os estudos pioneiros de H. Freiberger e L. P. Ferris, aos quais se seguiram os de C. F. Dalziel, W. B. Kouwenhoven, W. R. Lee, P. Osypka, H. Antoni, entre outros. Com o objetivo de avaliar o grau de periculosidade da corrente elétrica, esses estudiosos realizaram experiências com animais (bezerros, porcos, carneiros, cães e gatos), seres humanos e cadáveres.

O documento internacional, considerado orientação básica para a proteção de seres humanos e animais domésticos contra choques elétricos em instalações elétricas, é composto por cinco publicações da série IEC 60479: *Effects of current on human beings and livestock*, que consolidam os estudos realizados sobre o assunto. Esse trabalho foi publicado pela primeira vez em 1974, depois de ter sido preparado por um grupo seleto de estudiosos, com base em uma longa pesquisa na literatura e na avaliação das respostas a um questionário preparado.

A publicação IEC/TS 60479-1 (Edição 4.0/2005): *Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects* é dividida em seis capítulos e quatro anexos, assim discriminados:

1. Objetivo
2. Normas
3. Definições
4. Impedância elétrica do corpo humano
5. Efeitos da corrente alternada de freqüências compreendidas entre 15 Hz e 100 Hz
6. Efeitos da corrente contínua

Anexo A: Medições das impedâncias do corpo humano
Anexo B: Influência da freqüência na impedância do corpo humano
Anexo C: Resistência do corpo humano para corrente contínua
Anexo D: Exemplos de cálculos de impedâncias do corpo humano

A publicação IEC/TS 60479-2 (Edição 3.0/2007): *Effects of current on human beings and livestock – Part 2: Special aspects* é dividida em onze capítulos, assim discriminados:

1. Objetivo
2. Normas
3. Definições
4. Efeitos da corrente alternada de freqüências acima de 100 Hz
5. Efeitos de formas de onda especiais de correntes
6. Efeitos das correntes alternadas com controle de fase
7. Efeitos das correntes alternadas com controle multiciclos
8. Estimativa do limiar equivalente de correntes para freqüências misturadas
9. Efeitos dos pulsos de corrente repetidos na fibrilação cardíaca
10. Efeitos da corrente elétrica em corpos imersos
11. Efeitos de impulsos de correntes unidirecionais de curta duração

A publicação IEC/TS 60479-3 (Edição 1.0/1998): *Effects of current on human beings and livestock – Part 3: Effects of currents passing through the body of livestock* é dividida em cinco capítulos, assim discriminados:

1. Geral
2. Características das impedâncias dos corpos de animais domésticos
3. Valores da impedância total dos corpos
4. Valores da resistência inicial dos corpos
5. Efeitos nos animais domésticos da corrente alternada de freqüências compreendidas entre 15 Hz e 100 Hz

A publicação IEC/TR 60479-4 (Edição 1.0/2004): *Effects of current on human beings and livestock – Part 4: Effects of lightning strokes on human beings and livestock* é dividida em seis capítulos, assim discriminados:

1. Objetivo
2. Normas
3. Definições
4. A física das descargas atmosféricas
5. As interações entre as descargas elétricas e os seres humanos e os animais domésticos
6. Efeitos das descargas atmosféricas sobre os corpos dos seres humanos e dos animais domésticos

A publicação IEC/TR 60479-5 (Edição 1.0/2007): *Effects of current on human beings and livestock – Part 5: Touch voltage threshold values for physiological effects* é dividida em cinco capítulos e quatro anexos, assim discriminados:

1. Objetivo
2. Normas
3. Definições
4. Condições e valores-limite
5. Valores-limite de tensão de contato

Anexo A: Impedâncias do corpo
Anexo B: Tensões de contato
Anexo C: Determinação das tensões de contato sob certas condições
Anexo D: Limites de aplicação

Os perigos da eletricidade

Qualquer atividade biológica, seja ela glandular, nervosa seja muscular, é estimulada ou controlada por impulsos de corrente elétrica. Se essa corrente fisiológica interna se somar a outra corrente de origem externa, devido a um contato elétrico, ocorrerá uma alteração das funções vitais normais no organismo humano, que pode levar o indivíduo à morte, dependendo da duração da corrente.

Os principais efeitos que uma corrente elétrica (externa) produz no corpo humano são tetanização, parada respiratória, queimadura e fibrilação ventricular, descritas a seguir de uma maneira simplificada.

Tetanização

A *tetanização* é um fenômeno decorrente da contração muscular produzida por uma corrente elétrica. Verifica-se que, sob a ação de um estímulo, o músculo se contrai e, em seguida, retorna ao estado de repouso, devido a uma diferença de potencial elétrico em uma fibra muscular. Se houver um segundo estímulo antes do repouso, os dois efeitos poderão se somar. Diversos estímulos simultâneos produzem contrações repetidas do músculo, de modo progressivo; é a chamada *contração tetânica*. Quando a freqüência dos estímulos ultrapassa certo limite, o músculo é levado à contração completa e permanece nessa condição até que cessem os estímulos, retornando lentamente ao estado de repouso.

O mesmo fenômeno, descrito de modo simplificado para uma fibra elementar nervimuscular, ocorre de maneira muito mais complexa no corpo humano que é atravessado por uma corrente elétrica.

As freqüências usuais de 50 e 60 Hz são suficientes para produzir uma tetanização completa, dependendo da intensidade da corrente elétrica. Uma pessoa em contato com uma peça sob tensão pode ficar "agarrada" a ela no período em que durar a diferença de potencial, que, dependendo da duração, pode levar à inconsciência e até à morte. É importante observar que o fenômeno é mais perigoso se considerarmos que a resistência elétrica do corpo humano diminui com a intensidade da tensão elétrica.

Para valores elevados de corrente, a excitação muscular pode ser suficientemente violenta, de modo a provocar uma explosão de contração muscular, levando uma pessoa a se movimentar muitas vezes, a fim de libertar-se do choque elétrico. Dependendo das condições, a pessoa pode ser lançada a certa distância.

A corrente contínua produz a tetanização, desde que tenha intensidade e duração suficientes. Isso porque, embora ela possa produzir efeitos eletrolíticos no sangue, estes só adquirem dada consistência em tempos longos e em correntes mais intensas.

Limite de largar

Define-se o *limite de largar* como a corrente máxima que uma pessoa pode suportar ao segurar um condutor energizado. Ela pode largá-lo usando os músculos voluntariamente estimulados. Em outras palavras, o *limite de largar* é o valor máximo de corrente que uma pessoa, tendo à mão um objeto energizado, pode ainda o largar. Para essa grandeza, estudos mostram que, em corrente alternada de 50 a 60 Hz, os valores se situam entre 6 e 14 mA em mulheres (média de 10 mA) e entre 9 e 23 mA em homens (média de 16 mA). Em corrente contínua, foram encontrados os valores médios de 51 mA em mulheres e 76 mA em homens.

Correntes inferiores ao limite de largar, mas com pouca intensidade, embora não produzam, em geral, alterações graves no organismo, podem dar origem a contrações musculares violentas e, indiretamente, provocar acidentes, como quedas e ferimentos causados por partes móveis de máquinas ou movimentos bruscos que levam a outros riscos.

Correntes superiores ao limite de largar, mas com pouca intensidade, podem causar uma *parada respiratória*, se a corrente for de longa duração. Essas correntes produzem sinais de asfixia na pessoa, graças à contração de músculos ligados à respiração *e/ou* à paralisia dos centros nervosos que comandam a função respiratória. Se a corrente permanece, a pessoa perde a consciência e morre por asfixia.

Por isso é importante prestar os primeiros socorros, fazendo respiração artificial (boca a boca). É necessário intervir imediatamente após o acidente (no máximo em três ou quatro minutos), para evitar asfixia ou lesões irreversíveis nos tecidos cerebrais.

Queimaduras

A passagem da corrente elétrica pelo corpo humano é acompanhada do desenvolvimento de calor por efeito Joule, podendo produzir *queimaduras*. A situação torna-se mais crítica nos pontos de entrada e de saída da corrente, uma vez que:

- A pele apresenta elevada resistência elétrica, enquanto os tecidos internos indicam resistência baixa.
- À resistência de contato entre a pele e as partes sob tensão soma-se a resistência da pele.
- A densidade de corrente é alta nos pontos de entrada e de saída da corrente, principalmente se as áreas de contato forem pequenas.

Quanto maior a densidade de corrente e mais longo o tempo pelo qual a corrente permanece, mais graves são as queimaduras produzidas. Nas altas tensões, em que há o predomínio dos efeitos térmicos da corrente, o calor produz a destruição de tecidos superficiais e profundos, bem como o rompimento de artérias, com conseqüente hemorragia e destruição dos centros nervosos. Observe que as queimaduras produzidas por correntes elétricas são internas, profundas e de difícil cura.

Fibrilação ventricular

O fenômeno fisiológico mais grave que pode ocorrer quando a corrente elétrica passa pelo corpo humano é a *fibrilação ventricular* do coração. Trata-se de um fenômeno complexo e geralmente fatal, como explicado de maneira simplificada a seguir (ver figuras 3.1 e 3.2).

Sabe-se que o músculo cardíaco (miocárdio) se contrai ritmicamente de 60 a 90 vezes por minuto e sustenta, como se fosse uma bomba, a circulação sangüínea nos vasos. A contração da fibra muscular é estimulada por impulsos elétricos provenientes do nódulo sinoatrial (NSA), situado na parte superior do átrio direito, e é um gerador biológico de impulsos elétricos que comanda o coração. Por meio de tecidos específicos de condução (feixe de His e rede de Purkinje), os impulsos de comando provenientes do nódulo sinoatrial são transmitidos às fibras musculares da parede do ventrículo do coração.

Se à atividade elétrica fisiológica normal se acrescenta uma corrente elétrica de origem externa e muitas vezes maior que a corrente biológica, é fácil imaginar o que sucede com o equilíbrio elétrico do corpo. As fibras do coração passam a receber sinais elétricos excessivos e irregulares, e as fibras ventriculares ficam superestimuladas de maneira caótica e passam a contrair-se desordenadamente, uma independente da outra, de modo que o coração não possa mais exercer sua função. É a fibrilação ventricular, responsável por tantas mortes decorrentes de acidentes elétricos, na qual as fibras musculares do ventrículo vibram desordenadamente, estagnando o sangue dentro do coração. Dessa maneira, não há irrigação sangüínea pelo corpo, a pressão arterial cai a zero e a pessoa desmaia e fica em estado de morte aparente. A fibrilação ventricular é acompanhada da parada respiratória da vítima.

O fenômeno da fibrilação ventricular é irreversível. No entanto, sabe-se hoje que, se adequadamente aplicada, uma carga elétrica violenta pode reverter o processo de fibrilação. Isso é feito com um desfibrilador elétrico, que utiliza dois eletrodos aplicados ao tórax, os quais provocam uma descarga elétrica na região cardíaca do paciente. Mesmo assim, para efeitos práticos, a fibrilação é considerada fatal, pois dificilmente existem pessoas especializadas à disposição e equipamento necessário para prestar socorro à vítima em tempo hábil. Observe que, cessada a atividade cardíaca normal, depois de três minutos começam a ocorrer lesões irreparáveis no tecido cerebral.

A onda T representa o período de repolarização das fibras musculares do ventrículo do coração.

O período vulnerável corresponde a uma parte relativamente pequena do ciclo cardíaco, durante a qual as fibras do coração estão em um estado inicial de repolarização. A fibrilação ventricular ocorrerá se elas forem excitadas por uma corrente externa de intensidade suficiente. O período vulnerável corresponde à primeira parte da onda T (como indicado) e representa cerca de 10% a 20% do ciclo cardíaco.

Os pesquisadores têm concentrado seus esforços na procura pelo valor mínimo de corrente capaz de dar início à fibrilação, em função do tempo pelo qual a corrente circula pelo corpo humano. Os experimentos não têm fornecido resultados coerentes, uma vez que as maiores dificuldades que impedem uma definição precisa do limiar de fibrilação ventricular são as seguintes:

- Impossibilidade de realizar experiências com seres humanos e dificuldade de adequar ao corpo humano os resultados obtidos com animais.
- A corrente I_0 que atinge o coração e causa diretamente a fibrilação é apenas uma fração da corrente I que circula pelo corpo humano; como apenas I é mensurável, a ela se refere o limiar de fibrilação; como

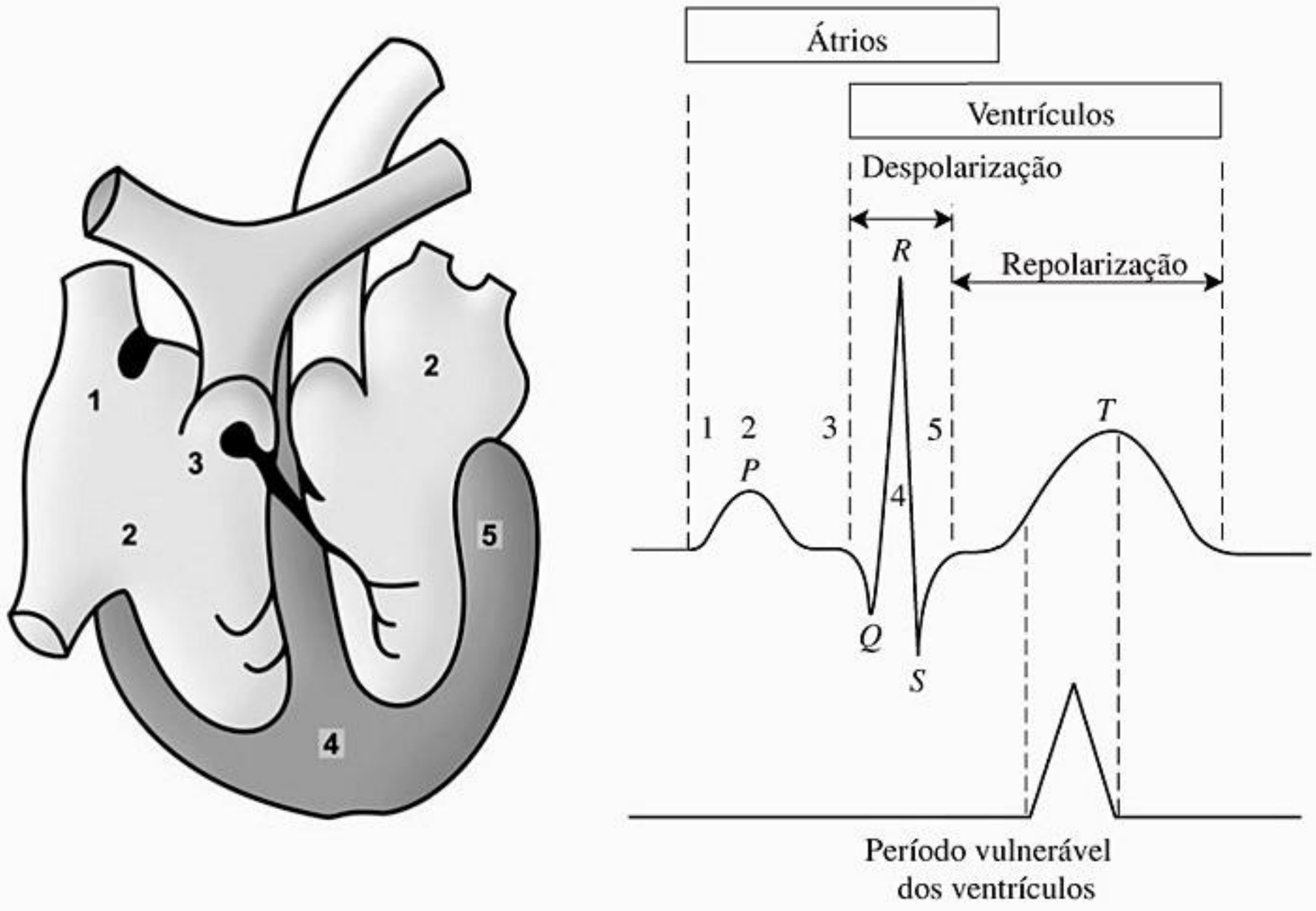


Figura 3.1 ■ Ciclo cardíaco com indicação do período vulnerável dos ventrículos (os números sinalizam as etapas progressivas do ciclo)

a relação I_0/I não é constante, pode variar de pessoa para pessoa e também em uma mesma pessoa, dependerá do trajeto da corrente.

- As condições orgânicas são distintas nos seres humanos.

Zonas de efeitos

A publicação IEC/TS 60479-1 define *cinco zonas de efeitos* para correntes alternadas de 50 ou 60 Hz e leva em consideração pessoas que pesam 50 kg e um trajeto de corrente entre as extremidades do corpo (mão/mão ou mão/pé), mostradas na Figura 3.3.

A *Zona 1* é aquela em que a corrente elétrica não produz reação alguma no corpo humano. Situa-se abaixo do chamado *limiar de percepção* (0,5 mA) e é representada pela reta da Figura 3.3. É importante salientar que esse valor varia de acordo com a pessoa, sendo menor para mulheres e crianças.

A *Zona 2* é aquela em que a corrente não produz nenhum efeito fisiopatológico perigoso. Está entre o limiar de percepção e a *curva limite de corrente fisiopatologicamente perigosa* (curva *b*) e é dada pela Expressão 3.1, a seguir.

$$I = I_L + \frac{10}{t} \tag{3.1}$$

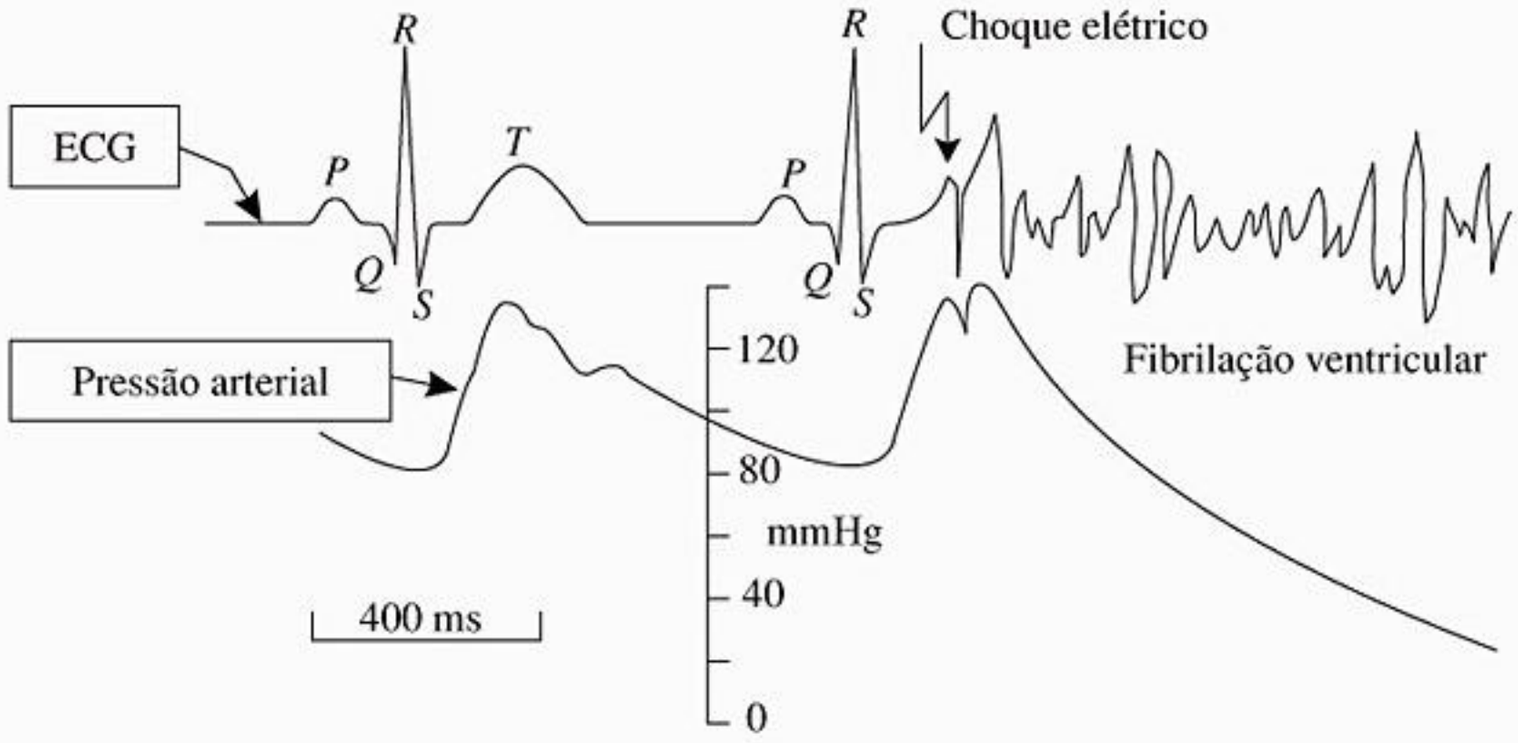
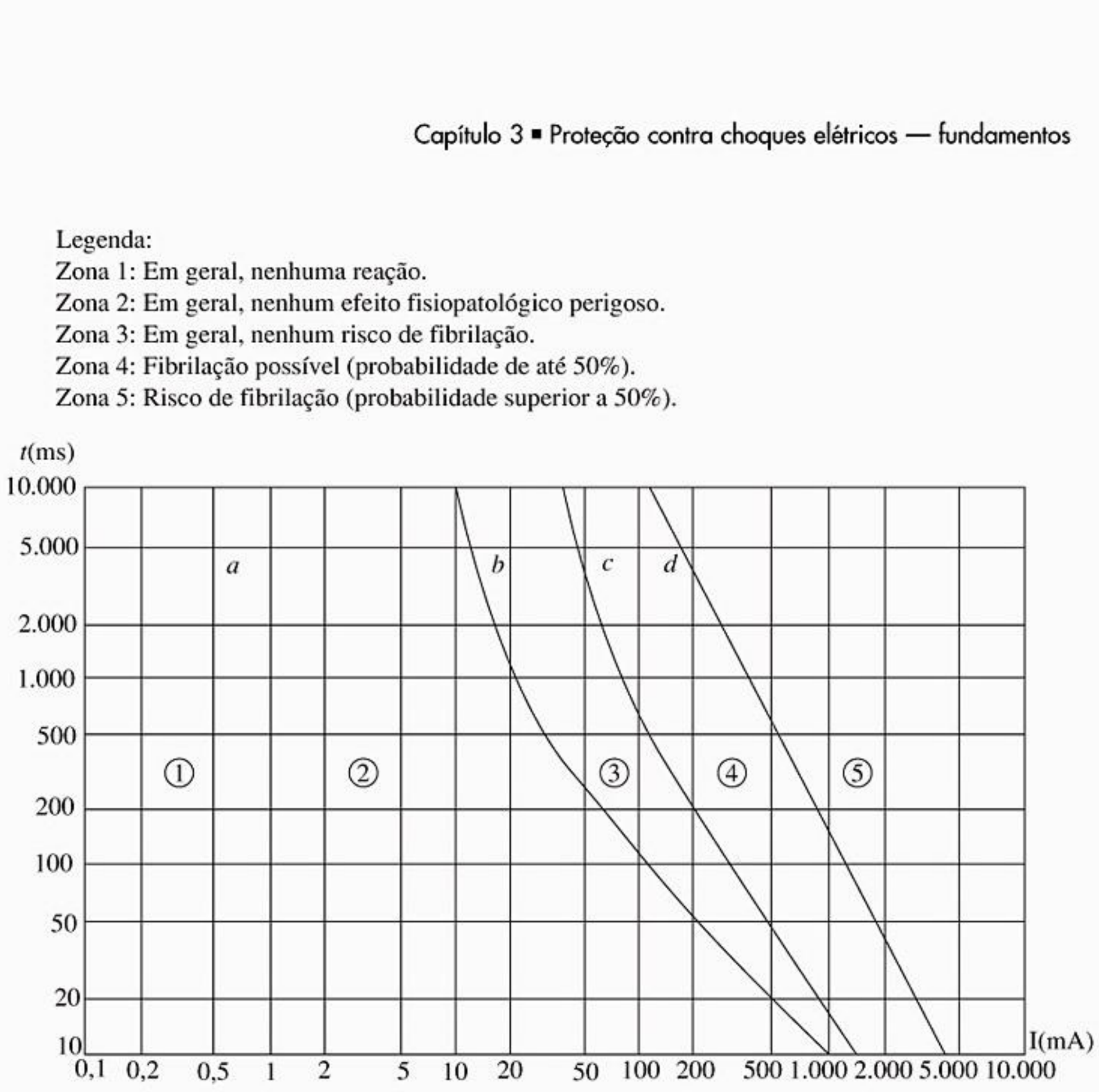


Figura 3.2 ■ Eletrocardiograma (ECG) que mostra a fibrilação ventricular e a pressão arterial



Notas:
1. No que diz respeito à fibrilação ventricular, a Figura 3.4 relaciona-se com os efeitos da corrente que passa no trajeto "mão esquerda/pés".
2. No ponto 500 mA/100 ms há probabilidade de 0,14% de ocorrer fibrilação.

Figura 3.3 ▪ Zonas de efeito de corrente alternada (50 ou 60 Hz) sobre adultos

onde I é o valor eficaz da corrente (mA), I_L é o limite de largar (valor eficaz) igual a 10 mA (em mulheres) e t é o tempo de duração do choque.

Na *Zona 3*, compreendida entre a curva *b* e a curva *c*, não há risco de fibrilação ventricular, mas a corrente pode provocar outros inconvenientes — de modo geral, não perigosos — caso a duração da corrente não seja longa. Nessa zona, se a duração for muito extensa, há possibilidades de problemas respiratórios.

Na *Zona 4*, a corrente do choque elétrico pode provocar fibrilação ventricular, com uma probabilidade que vai de 0,5 por cento (curva *c*) a 50 por cento (curva *d*).

Na *Zona 5*, situada após a curva *d*, há o perigo efetivo da ocorrência de fibrilação ventricular.

No caso de corrente alternada, com freqüência de 15 a 100 Hz, são caracterizadas quatro zonas, como mostra a Figura 3.4, para correntes de choque entre mão e pé.

Na *Zona 1* não ocorre nenhuma reação. Na *Zona 2*, não ocorre nenhum efeito fisiológico perigoso. Na *Zona 3*, não acontece, em geral, nenhum dano orgânico. Para tempos longos ocorrem contrações musculares, dificuldade de respiração e perturbações reversíveis no coração. A *Zona 3* é limitada pelas curvas *b* e c_1. Na *Zona 4*, além dos efeitos da *Zona 3*, a probabilidade de fibrilação ventricular aumenta cerca de 5 por cento (curva c_2) a 50 por cento (curva c_3) e acima de 50 por cento além da curva c_3.

A publicação IEC/TS 60479-1 define o *fator de corrente do coração* (F) como o fator que relaciona a equivalência da corrente elétrica no coração para dado percurso com uma corrente que passa entre a mão esquerda e o pé. O fator de corrente do coração permite calcular as correntes I_h para percursos diferentes desse, que representam o mesmo perigo de fibrilação ventricular que o correspondente à corrente de referência I_{REF}, entre a mão esquerda e o pé, ou seja,

$$I_h = \frac{I_{\mathrm{REF}}}{F} \tag{3.2}$$

uma vez que os valores de F estão na Tabela 3.1, para trajetos diferentes da corrente elétrica que passa pelo corpo humano.

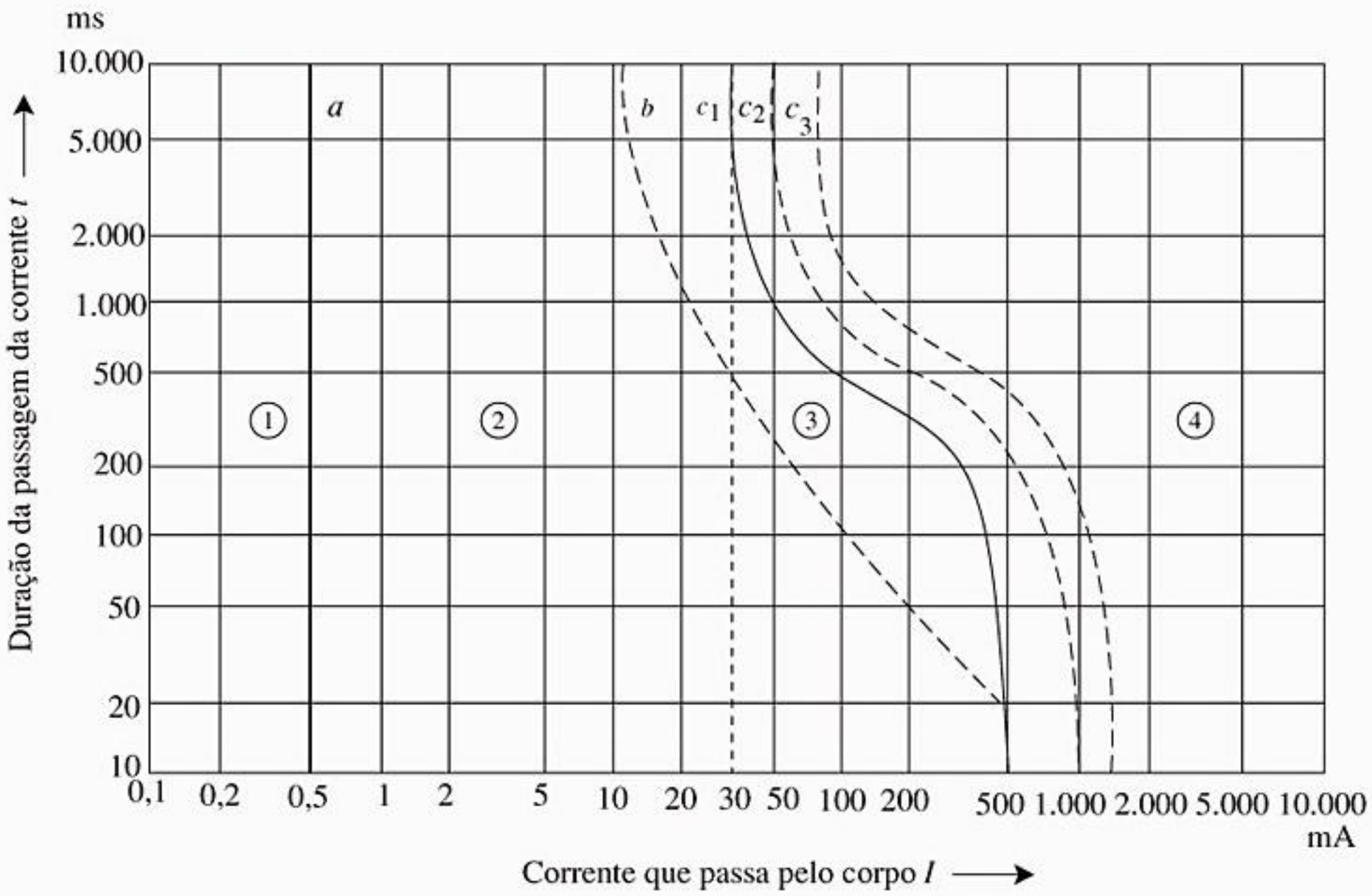


Figura 3.4 ■ Zonas de efeito de corrente alternada (15 a 100 Hz) entre mão e pé sobre as pessoas

Assim, por exemplo, uma corrente de 200 mA entre as mãos tem o mesmo efeito no coração que uma corrente de 0,4 × 200 = 80 mA da mão esquerda ao pé.

Influência da freqüência da corrente elétrica no corpo humano

Sabe-se que o efeito da corrente elétrica no corpo humano diminui com o aumento da freqüência. A tendência das correntes de alta freqüência é passar pela parte superficial do corpo humano e agir apenas na pele, sem afetar os órgãos vitais. Esse fenômeno é conhecido como efeito pelicular ou efeito Skin. As curvas da Figura 3.5 mostram os valores da corrente elétrica de choque senoidal *versus* freqüência, para as mesmas condições de contrações musculares.

Onde:

- Curva 1: mostra o limite convencional das intensidades de corrente elétrica do choque que não resulta em nenhuma percepção.
- Curva 2: é o início da percepção para 50 por cento das pessoas.
- Curva 3: é o início da percepção para 99,5 por cento das pessoas.
- Curva 4: é a *corrente de largar* para 99,5 por cento das pessoas.
- Curva 5: é a *corrente de largar* para 50 por cento das pessoas.
- Curva 6: é a *corrente de não largar* para 99,5 por cento das pessoas.

Tabela 3.1 ■ Valores do fator de corrente do coração (*F*) para diferentes trajetos da corrente

Trajeto da corrente que passa pelo corpo humano	*F*
Da mão esquerda ao pé esquerdo, ao pé direito ou a ambos os pés	1,0
Das mãos aos pés	1,0
Da mão esquerda à direita	0,4
Da mão direita ao pé esquerdo, ao pé direito ou a ambos os pés	0,8
Das costas à mão direita	0,3
Das costas à mão esquerda	0,7
Do peito à mão direita	1,3
Do peito à mão esquerda	1,5
Mão esquerda, mão direita ou mãos e nádegas	0,7

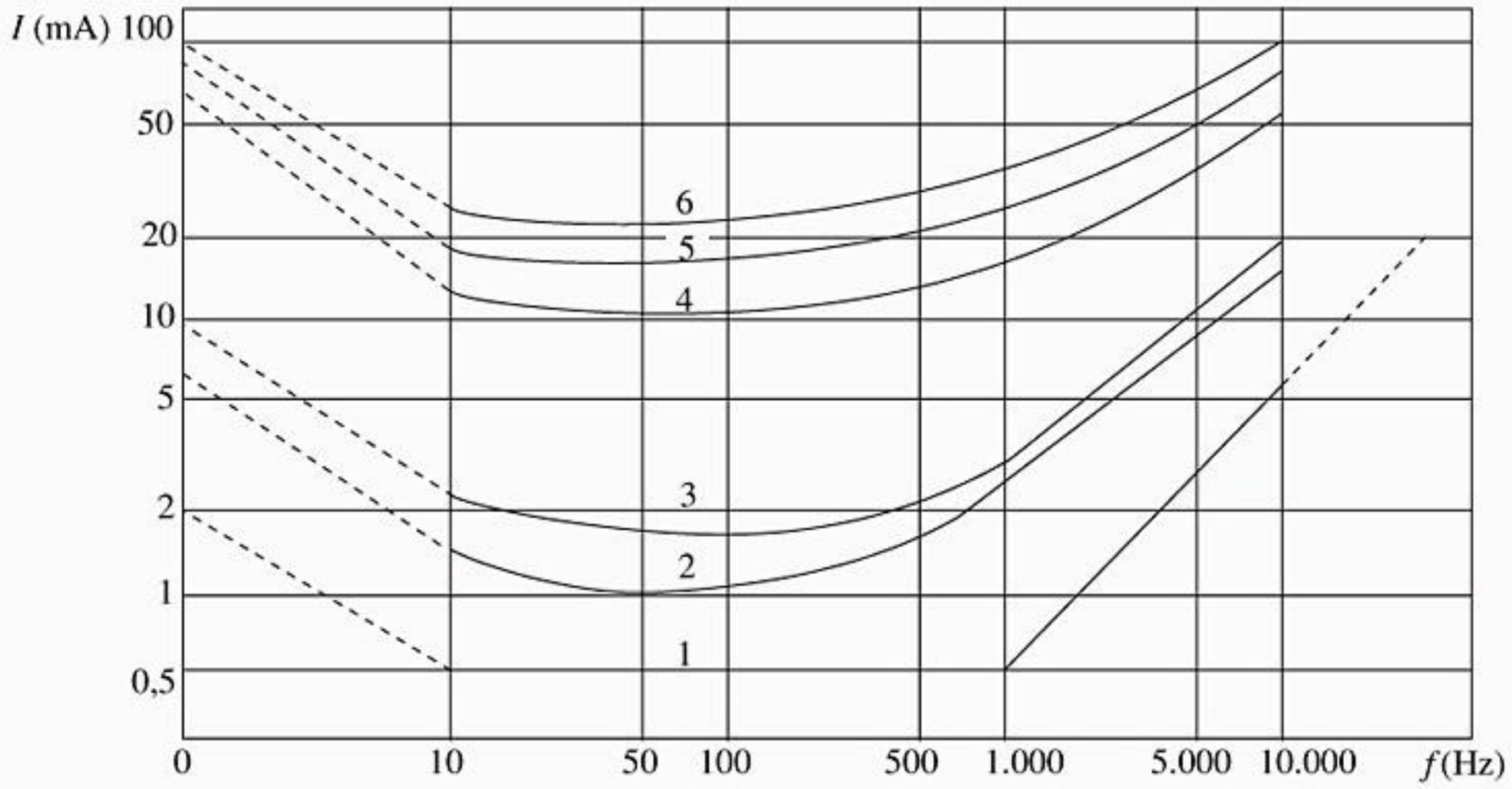


Figura 3.5 ■ Corrente elétrica *versus* freqüência para a mesma contração muscular

Note que há uma acentuada alteração nos valores da corrente elétrica com variação da freqüência para a mesma condição de contração muscular.

As correntes de choque menores que as demarcadas pela Curva 1 não provocam nenhuma percepção nas pessoas. Choques com correntes elétricas maiores que a limitada pela Curva 3 já podem ser constatadas. Para choques com correntes menores que as da Curva 4, as contrações estão dentro dos limites do comando da vontade da pessoa. A pessoa ficará presa se o choque for maior que o da Curva 6.

Observe que as freqüências de 50 ou 60 Hz não são favoráveis ao ser humano, com respeito à contração muscular, devido à corrente de choque elétrico.

As condições de *corrente de não largar* em CC e na freqüência de 10 kHz em CA são as mesmas.

Impedância do corpo humano

O corpo humano é um conjunto heterogêneo de líquidos e tecidos orgânicos de resistividade variável cujos valores maiores são encontrados na pele, no tecido ósseo e no tecido adiposo. Do ponto de vista elétrico, pode-se representar o corpo humano como um conjunto de resistores e capacitores, como mostra a Figura 3.6. A corrente reparte-se no "nó" de entrada e converge no de saída. Para alguns valores, há resistência do corpo humano em função do trajeto da corrente de choque elétrico. O Quadro 3.1 apresenta esses valores.

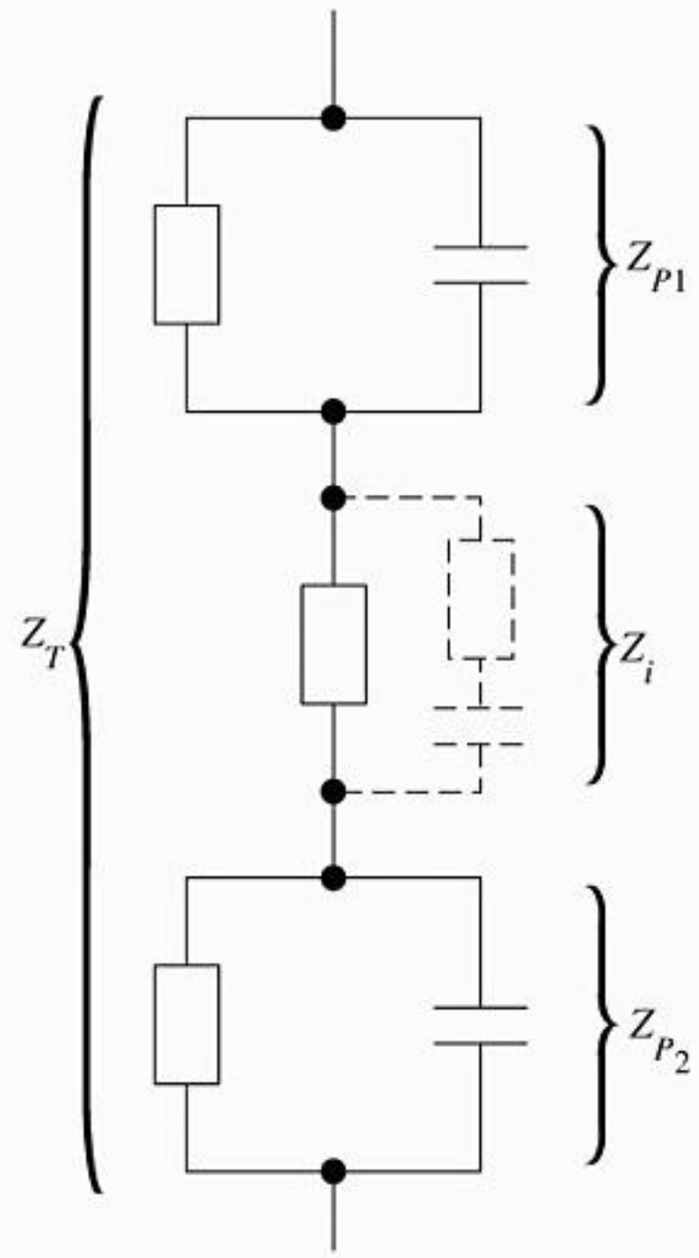


Figura 3.6 ■ Impedância do corpo humano

A resistência (ou a impedância) do corpo não é constante, pois varia de pessoa para pessoa e também na

Quadro 3.1 ■ Valores médios da resistência do corpo humano em função do trajeto da corrente		
■ Mão/pé: 1.000 a 1.500 Ω	■ Mão/mão: 1.000 a 1.500 Ω	■ Mão/tórax: 450 a 700 Ω

mesma pessoa, de acordo com as condições fisiológicas e ambientais. As principais variáveis que influem no valor da resistência elétrica do corpo humano são:

- *Estado da pele*: a maior resistência do corpo está na pele, nos pontos de entrada e saída da corrente. A umidade diminui a resistência da pele, e o suor (solução condutora de cloreto de sódio e de outros sais) agrava ainda mais a situação. O contato da pele com um condutor energizado em um ponto em que há um corte ou uma ferida diminui a resistência à corrente. Ao contrário, se na zona de contato a pele está endurecida, por exemplo, com calos, o aumento de espessura da pele contribui para aumentar a resistência, favorecendo a segurança.
- *Local do contato*: a resistência do corpo humano depende, logicamente, do trajeto da corrente, que, por sua vez, é determinado pelas partes do corpo nas quais é aplicada a tensão elétrica, por exemplo, mão/mão, mão direita/pé esquerdo etc.
- *Área de contato*: o aumento da área de contato com a parte sob tensão diminui a resistência do corpo. Ampla superfície de contato torna a pessoa muito vulnerável. É o que pode ocorrer, por exemplo, com pessoas trabalhando no interior de uma caldeira ou de uma tubulação (condição BC4).
- *Pressão de contato*: quanto maior a pressão de contato, menor a resistência elétrica da pele. É o caso das ferramentas portáteis, seguras firmemente pelo operador durante o uso.
- *Duração do contato*: ao prolongar o tempo de contato, a resistência diminui. No entanto, se a quantidade de calor desenvolvida chegar a queimar a pele, a resistência elétrica da pele atingirá valores muito baixos.
- *Natureza da corrente*: os valores da resistência do corpo humano medidos em corrente contínua e nas freqüências de 50 a 60 Hz são quase os mesmos. Em freqüências elevadas, a resistência, mais precisamente a impedância, aumenta bastante, devido ao efeito pelicular.
- *Taxa de álcool no sangue*: verifica-se que uma elevada taxa de álcool no sangue diminui a resistência elétrica do corpo.
- *Tensão elétrica do choque*: a resistência do corpo diminui com o aumento da tensão elétrica de choque, ocorrendo as maiores variações nos níveis mais baixos de tensão. Tensões elevadas provocam queimaduras e danificam a pele.

Além dessas variáveis, é muito importante observar que a resistência elétrica está intimamente ligada à atividade biológica do corpo humano e que varia, por exemplo, com a excitação, a concentração mental, o cansaço físico e a doença.

A publicação IEC/TS 60479-1 define uma série de *impedâncias* para o corpo humano e apresenta o "modelo elétrico" que está reproduzido na Figura 3.6.

Impedâncias interna, da pele e total do corpo humano

A *impedância interna do corpo humano* (Z_i) é a impedância entre dois eletrodos em contato com duas partes do corpo, após a remoção da pele sob os eletrodos. Pode ser considerada puramente resistiva, uma vez que seu valor depende do trajeto da corrente e, em menor intensidade, da superfície de contato.

A *impedância da pele* (Z_p) é a impedância entre um eletrodo sobre a pele e os tecidos condutores subjacentes. Pode ser considerada um circuito equivalente de resistência e capacitância em paralelo, e sua estrutura é constituída por uma camada semicondutora e por pequenos elementos condutores (poros). Seu valor decresce rapidamente com o aumento da corrente elétrica. De modo geral, pode-se dizer que a impedância da pele depende da tensão, da freqüência, da duração da passagem da corrente, do estado de umidade da pele e da temperatura.

A *impedância total do corpo humano* (Z_t) é definida como a soma das impedâncias internas e da pele, de acordo com o modelo apresentado na Figura 3.6.

Tensão de contato

Para dado percurso de choque elétrico pelo corpo humano, o perigo depende do valor da corrente elétrica e do tempo que ela persiste. As zonas de efeito tempo–corrente permitem avaliar as conseqüências causadas a uma pessoa pela circulação de dada corrente, durante certo período e para determinado trajeto. No entanto, essas zonas não são convenientes para aplicação ao projeto de instalações elétricas. Em geral, é mais útil ao projetista que as prescrições práticas de segurança sejam especificadas em termos de tensão elétrica. Por isso é importante definir o que é "tensão de contato".

Nas Seções 3.2 e 3.3 são definidas e analisadas a "tensão de contato-limite" e a "tensão de contato". *Tensão de contato* é definida como a tensão que pode aparecer acidentalmente, por ocasião de uma falha de isolamento entre duas partes ao mesmo tempo acessíveis.

O critério para estabelecer a proteção contra choques elétricos é o do limite admissível da tensão de contato, isto é, o produto da corrente que passa pelo corpo humano por sua impedância total em função do tempo. A relação entre a tensão e a corrente elétrica não é linear, uma vez que a impedância do corpo humano varia com a tensão de contato.

A publicação IEC/TS 60479-1 apresenta uma tabela dos valores da impedância total do corpo humano em função da tensão de contato (Tabela 3.2). Os valores de Z_t nela indicados são válidos para os seres vivos, con-

Tabela 3.2 ■ Impedância total do corpo humano (Z_t) em função da tensão de contato

Tensão de contato (V)	Valores da impedância total (Ω) do corpo humano que não são ultrapassados por		
	5%	50%	95%
	da população		
25	1.750	3.250	6.100
50	1.450	2.625	4.375
75	1.250	2.200	3.500
100	1.200	1.875	3.200
125	1.125	1.625	2.875
220	1.000	1.350	2.125
700	750	1.100	1.550
1.000	700	1.050	1.500
Valor assintótico	650	750	850

siderando um trajeto da corrente elétrica de mão a mão ou de mão a pé, superfícies de contato de tamanho razoável (de 50 a 100 cm²), condições secas e correntes alternadas.

Para tensões de contato até 50 V, os valores medidos em superfícies de contato molhadas com água normal são de 75 por cento a 90 por cento dos valores indicados; com soluções condutoras, a impedância diminui consideravelmente, chegando à metade dos valores medidos em condições secas. Para tensões superiores a 150 V, a impedância depende pouco da umidade e da superfície de contato.

Observando a Tabela 3.2, verifica-se que para uma tensão (de contato) aplicada de 50 V a impedância total do corpo humano em 95 por cento dos casos pode atingir a 4.375 Ω, enquanto em cinco por cento pode baixar até cerca de 1.450 Ω. Com 220 V a situação é bem mais desfavorável, uma vez que em 95 por cento dos casos a impedância pode atingir 2.125 Ω, enquanto em cinco por cento pode reduzir para 1.000 Ω.

3.2 Fundamentos da proteção contra choques elétricos

A exemplo de outras normas, a NBR 5410 dá grande importância à proteção contra choques elétricos, o que é plenamente justificável, tendo em vista a quantidade de equipamentos elétricos utilizados pela população.

Com efeito, se nas instalações elétricas de qualquer local não forem adotadas medidas apropriadas de segurança e proteção, serão altos os riscos de ferimentos ou até mesmo de morte por eletrocussão.

Contatos direto e indireto

O perigo pode existir tanto para o eletricista que, por acidente, toca em uma barra energizada de uma subestação ou de um quadro de distribuição, como para o operário que toca na carcaça acidentalmente energizada de um motor elétrico, e, ainda, para uma dona de casa que encosta a mão na caixa metálica de uma máquina de lavar roupa ou de uma geladeira, colocada sob tensão por uma falha na isolação.

É muito importante observar que, para uma pessoa, o perigo não está simplesmente em tocar um elemento energizado, seja uma parte viva (*contato direto*) seja uma massa sob tensão (*contato indireto*), e sim em tocar simultaneamente outro elemento que possui um potencial diferente do primeiro, ou seja, o perigo é proveniente da diferença de potencial. Como regra, deve-se levar em consideração que as pessoas estão sempre em contato com um elemento da edificação – por exemplo, o piso ou a parede – com um potencial bem-definido, em geral o da terra; nessa condição, qualquer contato com outro elemento que esteja em um potencial diferente pode ser perigoso.

Os *contatos diretos*, em sua maior parte, são devidos a desconhecimento, negligência ou imprudência das pessoas, e por isso são mais raros. Os *contatos indiretos*, por sua vez, são mais freqüentes e imprevisíveis, e representam maior perigo. A eles a norma dá maior importância, como não poderia deixar de ser.

A NBR 5410:2004 introduziu os conceitos de "proteção básica" e "proteção supletiva", que correspondem, respectivamente, aos conceitos de "proteção contra contatos diretos" e de "proteção contra contatos indiretos", que eram utilizados nas versões anteriores da norma.

Princípio fundamental de proteção contra choques elétricos

A NBR 5410:2004 indica que o princípio fundamental relativo à proteção contra choques elétricos compreende que as partes vivas perigosas não devem ser acessíveis, a fim de evitar o contato direto, e que as massas ou

partes condutoras acessíveis não devem oferecer perigo, a fim de evitar o contato indireto, seja em condições normais, seja em caso de alguma falha que as torne acidentalmente vivas.

Baseada nesse princípio fundamental, a norma indica, então, que a proteção contra choques elétricos inclui dois tipos de proteções: a básica e a supletiva.

Proteção básica

A *proteção básica (contra contatos diretos)*, a ser estudada na Seção 3.5, é garantida pela qualidade dos componentes e da instalação e por determinadas disposições físicas dos componentes, que podem ser utilizados para:

- Isolação das partes vivas.
- Barreiras ou invólucros de proteção.
- Obstáculos.
- Colocação fora do alcance das pessoas.
- Dispositivos de proteção à corrente diferencial residual.
- Limitação de tensão.

Proteção supletiva

A *proteção supletiva (contra contatos indiretos)*, a ser abordada nos capítulos 7 e 8, é prevista por meio de medidas que incluem a adoção de eqüipotencialização e seccionamento automático da alimentação, o emprego de isolação suplementar e o uso de separação elétrica.

A proteção supletiva (contra contatos indiretos) pode ser omitida para:

- Suportes metálicos de isoladores de linhas aéreas e partes metálicas associadas (por exemplo, ferragens), se não estiverem dentro da zona de alcance normal das pessoas (ver Seção 3.5).
- Postes de concreto reforçados com aço em que o reforço não seja acessível.
- Massas que, por suas dimensões reduzidas (até 50 mm x 50 mm) ou por sua disposição, não possam ser agarradas ou não possam estabelecer contato significativo com parte do corpo humano, desde que a ligação a um condutor de proteção seja difícil ou pouco confiável (por exemplo, parafusos, pinos, placas de identificação e grampos de fixação de condutores).
- Tubos ou invólucros metálicos que protejam equipamentos Classe II ou com isolação equivalente.

As *proteções básica e supletiva combinadas (contra contatos diretos e indiretos)*, a ser estudada no Capítulo 7, têm como base o uso de tensões extrabaixas e pode ser realizada por:

- Tensão extrabaixa de segurança (SELV).
- Tensão extrabaixa funcional (PELV).

Regra da proteção contra choques elétricos

A regra da proteção contra choques elétricos contida na NBR 5410 (as partes vivas não devem ser acessíveis e as massas acessíveis não devem oferecer perigo) estabelece que seja assegurado, no mínimo, o provimento conjunto de proteção básica e de proteção supletiva, mediante combinação de meios independentes ou mediante aplicação de uma medida capaz de prover ambas as proteções, simultaneamente.

Proteções ativa e passiva

Os métodos prescritos pela NBR 5410 para a proteção contra choques elétricos podem ser divididos em dois grupos: proteção passiva e proteção ativa.

A *proteção passiva* consiste em limitar a corrente elétrica que pode atravessar o corpo humano ou em impedir o acesso de pessoas a partes vivas. São medidas que não levam em conta a interrupção de circuitos com falta.

A *proteção ativa* consiste na utilização de métodos e dispositivos que proporcionam o seccionamento (abertura) automático de um circuito, sempre que houver faltas que possam trazer perigo para o operador ou usuário.

A Tabela 3.3 resume a classificação dos métodos de proteção contra choques elétricos prescritos pela NBR 5410 divididos em ativos e passivos.

As medidas de proteção por seccionamento (abertura) automático da alimentação não dependem da qualidade da instalação. De acordo com essas medidas, um dispositivo de proteção deve fazer o seccionamento de um circuito quando ocorrer uma falta para terra, impedindo que essa situação resulte em perigo para as pessoas. Sua aplicação exige a coordenação entre o esquema de aterramento e as características dos dispositivos de proteção, levando em consideração os seguintes esquemas:

- Esquema TN.
- Esquema TT.
- Esquema IT.

Influências externas determinantes

Para a seleção das medidas de proteção contra choques elétricos (por contato direto ou indireto), a NBR 5410 recomenda que sejam especialmente observadas as seguintes condições de influências externas:

- BA – competência das pessoas;
- BB – resistência elétrica do corpo humano;
- BC – contato das pessoas com o potencial da terra.

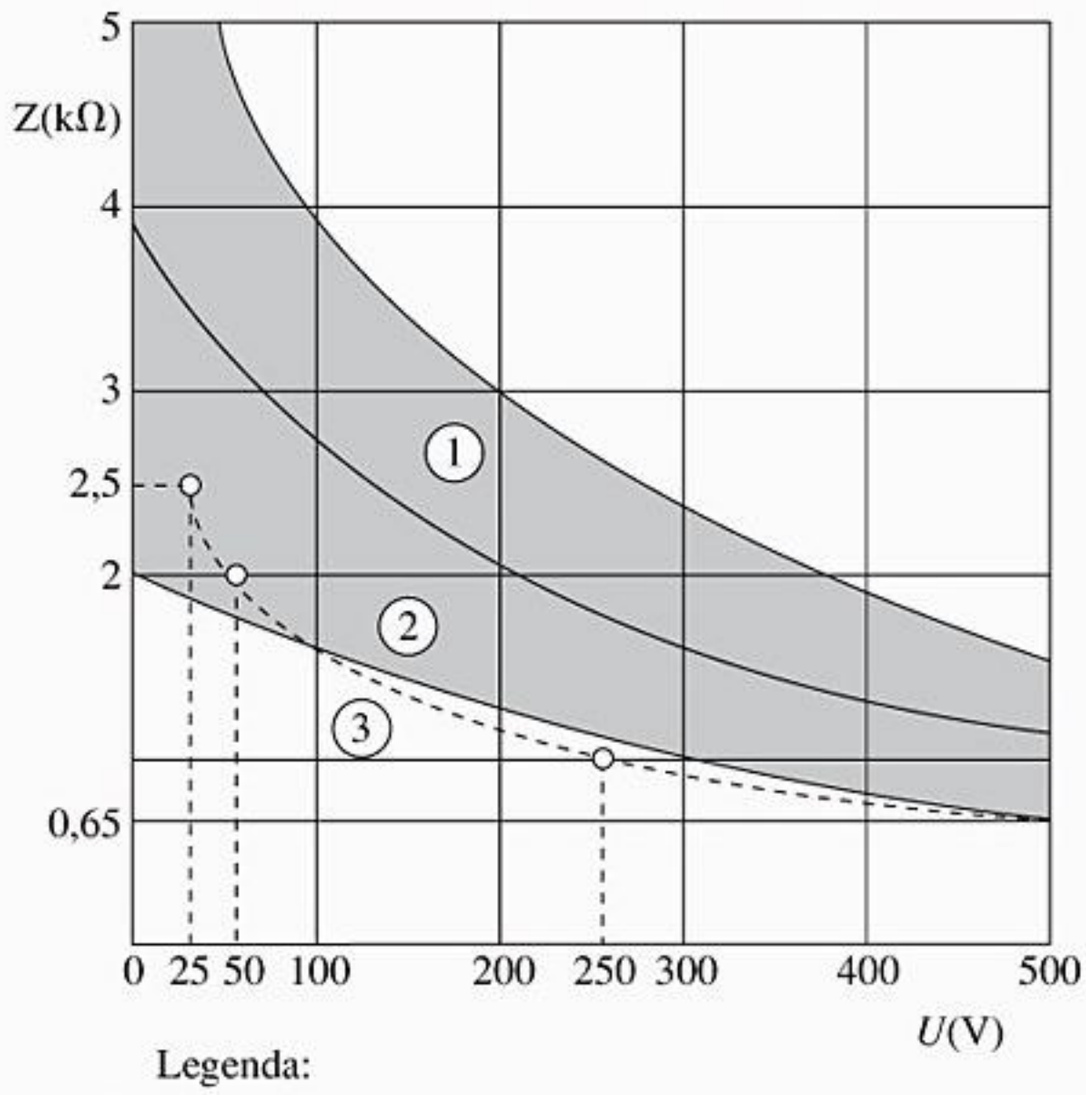
A Figura 3.7 indica os valores da resistência (impedância) do corpo humano, em função da tensão de contato, para correntes alternadas de até 100 Hz, considerando pele seca (condição BB1) e pele úmida (condição BB2), respectivamente, zonas (1) e (2).

Tabela 3.3 ■ Classificação dos métodos de proteção contra choques elétricos

Proteção	Tipo	Passiva	Ativa
Básica (contatos diretos)	Medida de proteção completa	Isolação das partes vivas	Limitação de tensão (SELV, PELV)
		Barreiras ou invólucros	
	Medida de proteção parcial	Obstáculos	–
		Colocação fora do alcance das pessoas	
	Medida de proteção adicional	–	Dispositivos de proteção à corrente diferencial–residual de alta sensibilidade
Supletiva (contatos indiretos)	–	Eqüipotencialização	Seccionamento automático limitação de tensão (SELV, PELV)
		Isolação dupla ou reforçada	
		Separação elétrica	
		Locais não condutivos	

Nas condições BB1 e BB2, considera-se o contato entre as mãos ou entre uma mão e os pés. É o caso, por exemplo, de uma pessoa com os pés no chão, que toca com a mão um objeto sob tensão. Nas condições BB3 (pele molhada) e BB4 (pele imersa em água), admite-se o contato duplo entre as mãos e os pés; por exemplo, uma pessoa com os pés molhados que toca com as mãos, também molhadas, um objeto energizado (BB3) ou que toma um banho de imersão (BB4).

Nas condições de contato nulo com o potencial da terra (BC1), não existe qualquer elemento condutor no local considerado; em particular, o piso e as paredes são isolantes. Nessa situação podem, eventualmente, ser admitidos contatos diretos com um único condutor (parte viva). Na condição de contatos fracos (BC2), o piso e as paredes são isolantes, mas podem existir elementos condutores em pequena quantidade ou de pequenas dimensões, que geralmente não são tocados por pessoas ou, então, as pessoas que os tocam não estão em contato simultâneo com massas de equipamentos elétricos. Os locais BC1 e BC2 são chamados *locais não condutores*; é o caso de salas, quartos e escri-



Legenda:
① Condições BB1
② Condições BB2
③ Valores considerados pela IEC 60479-1

Figura 3.7 ■ Impedância do corpo humano em função da tensão de contato (CA com até 100 Hz)

tórios, como, por exemplo, pisos de madeira e paredes de alvenaria.

A condição de contatos freqüentes (BC3) corresponde ao caso em que o piso e as paredes são condutores *e/ou* onde o local comporta elementos condutores que podem ser tocados simultaneamente com massas de equipamentos elétricos. Por exemplo, é o caso de cozinhas, banheiros, locais externos e locais industriais em geral.

A condição de contatos contínuos (BC4) corresponde a locais estreitos e condutores, em que a falta de liberdade de movimentos impede que as pessoas escapem facilmente do perigo. É o caso de caldeiras, tubulações e outros recintos metálicos cujas dimensões sejam tais que as pessoas que penetrem nesses recintos estejam continuamente em contato com as paredes.

Situações 1, 2 e 3

A NBR 5410:2004, no Anexo C, define três "situações", função das influências externas BB e BC. Quando existem as duas influências simultaneamente, a situação a ser levada em conta é a mais grave considerada individualmente.

- *Situação 1:* corresponde às condições BB1, BB2, BC1, BC2, BC3; é a mais encontrada nos locais residenciais (por exemplo, em quartos, salas, cozinhas e corredores), comerciais (por exemplo, em lojas e escritórios) e industriais (é o caso de depósitos e da maior parte dos locais de produção).
- *Situação 2:* corresponde às condições BB3 e BC4; é encontrada em áreas externas (como em jardins e em feiras), canteiros de obras, estabelecimentos pecuários, *campings*, marinas, *trailers*, compartimentos condutivos, edificação, volume 1 de banheiros e piscinas, dependências interiores molhadas em uso normal, entre outras.
- *Situação 3:* corresponde à condição BB4; é encontrada principalmente no volume 0 de banheiros e piscinas.

A Tabela 3.4 indica as situações 1, 2 e 3 descritas.

Tensão de contato-limite

Pode-se definir *tensão de contato-limite* como o valor mais alto da tensão de contato que pode se manifestar, no caso de ocorrer falta de impedância desprezível. A NBR 5410 estabelece os seguintes valores para a tensão de contato-limite (Tabela 3.5): 50 V na Situação 1, 25 V na Situação 2 e 12 V na Situação 3, levando em consideração tensões alternadas de 15 a 1.000 Hz e, respectivamente, 120, 60 V e 30 V, para tensões contínuas sem ondulação. Uma tensão contínua sem ondulação é definida como a que apresenta uma faixa de ondulação não superior a 10% em valor eficaz; o valor de crista máximo não deve ultrapassar 140 V para um sistema em corrente contínua sem ondulação com 120 V nominais, ou 70 V para um sistema em corrente contínua sem ondulação com 60 V nominais.

3.3 Aterramento e eqüipotencialização

Conforme a NBR 5410, o aterramento e a eqüipotencialização são fundamentais para a garantia do funcionamento adequado dos sistemas de proteção contra choques elétricos.

Para entender a diferença entre aterramento e eqüipotencialização, vejamos as definições a seguir:

- *Aterramento*: ligação elétrica intencional e de baixa impedância com a terra (solo).
- *Ligação eqüipotencial*: ligação elétrica que coloca massas e elementos condutores praticamente no mesmo potencial.

Assim, o conceito de "aterramento" envolve necessariamente algum tipo de contato das massas e elementos condutores com o solo, visando levar todos os componentes do sistema de aterramento a ficar no potencial mais próximo possível do solo. Por sua vez, o conceito de "eqüipotencialização" não envolve diretamente o solo, mas está relacionado ao objetivo de colocarmos todas as massas e elementos condutores no mesmo potencial entre si, independentemente de qual seja esse potencial em relação ao solo.

Fundamentos sobre aterramento

Solo

A *terra*, isto é, o solo pode ser considerado um condutor por meio do qual a corrente elétrica pode fluir, dispersando-se. A Tabela 3.6 apresenta as resistividades típicas

Tabela 3.4 ■ Situações 1, 2 e 3

Condição de influência externa	Situação
BB1, BB2	1
BC1, BC2, BC3	1
BB3	2
BC4	2
BB4	3

Tabela 3.5 ■ Valores da tensão de contato-limite U_L (V)

Natureza da corrente	Situação 1	Situação 2	Situação 3
Alternada, 15 Hz – 1.000 Hz	50	25	12
Contínua sem ondulação	120	60	30

de alguns tipos de solos. Observe que são considerados "bons condutores" solos com resistividades entre 50 e 100 Ωm (apenas como comparação, a resistividade do cobre é de 17×10^{-7} Ωm).

Aterramento

Aterramento é a ligação intencional da carcaça de um equipamento elétrico com a terra, que pode ser realizada utilizando apenas os condutores elétricos necessários – é o aterramento *direto* – ou por meio da inserção (intencional) de um resistor ou reator, introduzindo uma *impedância* no caminho da corrente à terra (*aterramento indireto*).

Nas instalações elétricas são considerados dois tipos de aterramento:

- *Aterramento funcional:* consiste na ligação à terra de um dos condutores do sistema, geralmente o neutro, e está relacionado ao funcionamento correto, seguro e confiável da instalação.
- *Aterramento de proteção:* consiste na ligação à terra das massas e dos elementos condutores estranhos à instalação, que visa à proteção contra choques elétricos por contato indireto.

De acordo com determinadas condições, pode-se ter, em uma instalação, um *aterramento* (combinado) *funcional* e *de proteção*.

Pode-se falar também no *aterramento de trabalho* (temporário) cujo objetivo é permitir ações seguras de manutenção em partes da instalação normalmente sob tensão, postas fora de serviço para esse fim. Trata-se de um aterramento provisório.

Eletrodos de aterramento

O *eletrodo de aterramento* é o condutor ou o conjunto de condutores enterrado(s) no solo, intimamente ligado(s) à terra para fazer um aterramento. O termo se aplica tanto a uma simples haste enterrada como a várias hastes enterradas e interligadas, e a diversos outros tipos de condutores em diversas configurações.

Os solos, geralmente, são constituídos por misturas de materiais isolantes (silicatos e óxidos) com sais minerais ionizáveis, água e, por vezes, carbono, como resíduo da decomposição de vegetais. Neles, a condução de correntes elétricas se dá pela ionização dos sais.
A resistividade do solo depende, logicamente, de sua composição, sendo muito influenciada pela temperatura e pela umidade.
Os solos que apresentam resistividade mais baixa são os que contêm resíduos vegetais, os pantanosos e os situados no fundo de vales e nas margens de rios. Os de maior resistividade são os arenosos, os rochosos e os situados em locais altos e desprovidos de vegetação.

Tabela 3.6 ■ Valores típicos de resistividade de solos

Natureza do solo	Resistividade (Ω · m)
Solos alagadiços/pantanosos	5 a 30
Lodo	20 a 100
Húmus	10 a 150
Argila plástica	50
Margas e argilas compactas	100 a 200
Areia argilosa	50 a 500
Areia silicosa	200 a 3.000
Solo pedregoso nu	1.500 a 3.000
Solo pedregoso com relva	300 a 500
Calcáreos moles	100 a 400
Calcáreos compactos	1.000 a 5.000
Calcáreos fissurados	500 a 1.000
Xisto	50 a 300
Micaxisto	800
Granito/arenito	100 a 10.000

Resistência de aterramento do eletrodo

Um eletrodo de aterramento constituído por uma haste, ao ser percorrido por uma corrente I, assumirá um potencial U_T em relação a um ponto distante de potencial zero. Define-se *resistência de aterramento* (R_T) do eletrodo como a relação

$$R_T = \frac{U_T}{I} \tag{3.3}$$

Os pontos do solo próximos à haste indicam potenciais intermediários entre U_T e zero; ou seja, o potencial do solo diminui ao afastar-se da haste até quase se anular em um ponto "suficientemente distante", como mostra a Figura 3.8.

Resistência de aterramento do conjunto eletrodo-solo

Um condutor elétrico "tradicional" apresenta uma resistência dada por $R = \rho\, l/\, S$, onde ρ é a resistividade, l é o comprimento percorrido pela corrente e S, a seção "atravessada" pela corrente. No caso do conjunto eletrodo-solo, o cálculo da resistência é mais complicado.

Para simplificar, considere que a corrente saia da haste perpendicularmente à sua superfície e que se difunda horizontalmente no solo, como indica a Figura 3.9[1]. A corrente atravessará superfícies eqüipotenciais cilíndricas cada vez maiores à medida que aumentar a distância à haste. A resistência que o solo, compreendido entre duas superfícies cilíndricas A e B, oferece à passagem da corrente é dada por

$$R \cong \rho \frac{d}{2\pi r l} \tag{3.4}$$

onde ρ é a resistividade do solo, d é a distância entre as superfícies A e B, r é o raio da superfície cilíndrica intermediária e l é o comprimento da haste (cilíndrica).

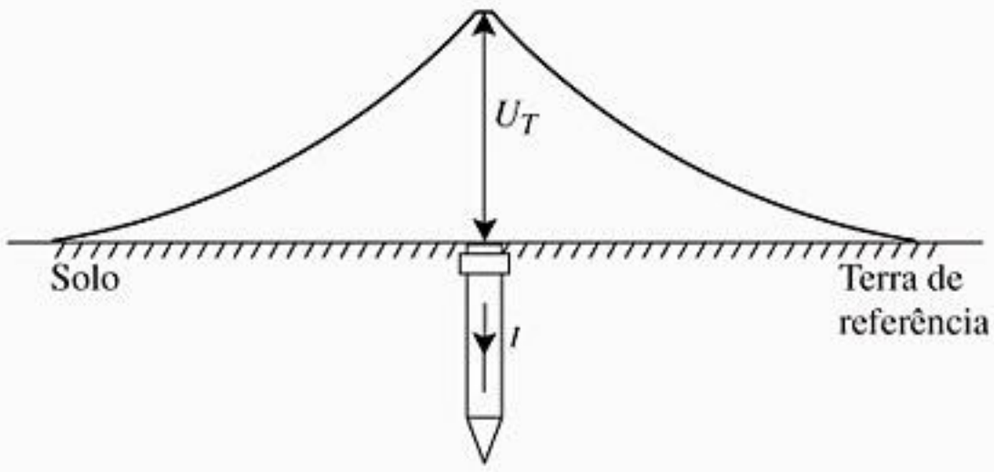


Figura 3.8 ▪ Variação das tensões geradas no solo pela passagem de corrente em um eletrodo de aterramento

1. Na realidade, a hipótese da dispersão só é válida para a zona próxima da haste. Demonstra-se que, a uma distância suficiente do eletrodo, as superfícies eqüipotenciais são sempre hemisféricas, para qualquer forma de eletrodo.

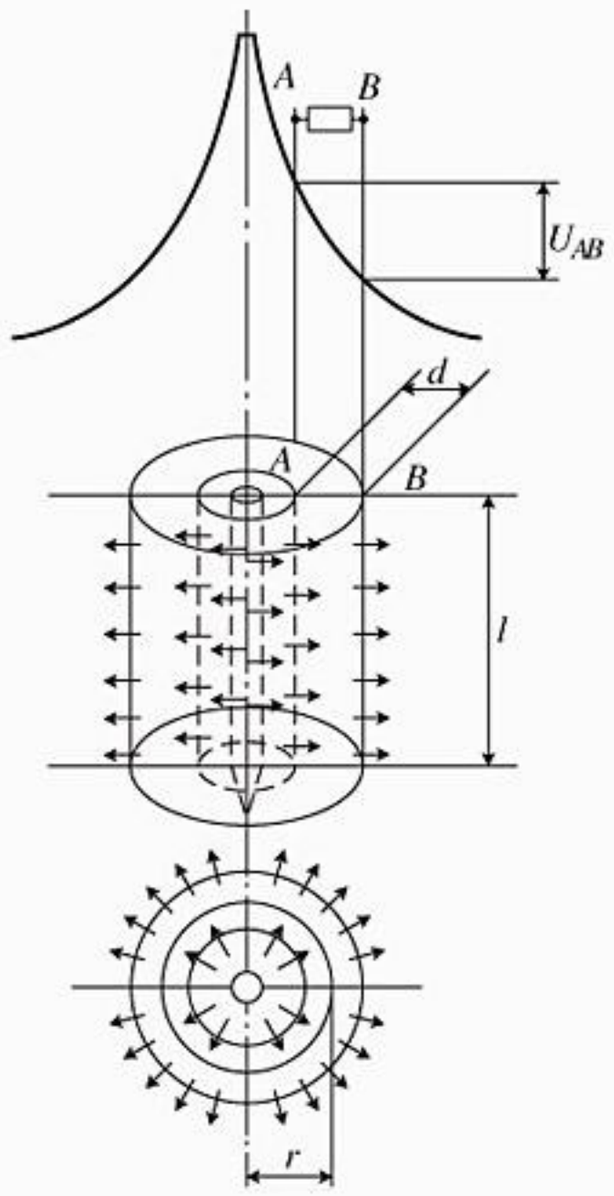


Figura 3.9 ▪ Hipótese simplificadora para a definição da resistência de aterramento do conjunto eletrodo–solo

Considerando ρ constante, isto é, solo homogêneo, a resistência de "cascas" iguais de solo (espessura d constante) será, para dado eletrodo, função apenas da distância r. A resistência da primeira "casca" é muito elevada, a da segunda, um pouco menor, a da terceira, menor ainda e assim por diante. A resistência de aterramento do eletrodo será a soma das resistências das diversas "cascas" do solo. A distribuição dos potenciais ao longo do solo corresponderá à distribuição das resistências elementares. A queda de tensão na primeira será maior que na segunda, a qual, por sua vez, será maior que na terceira, e assim por diante, até praticamente se anular nas "cascas" suficientemente distantes do eletrodo. A chamada *zona de dispersão* do eletrodo é a zona dentro da qual o solo dispersa totalmente a corrente e fora da qual a tensão é zero, como indica a Figura 3.10.

Caso haja um condutor elétrico de seção variável, com seções crescentes, de uma seção inicial, a resistência dos diversos trechos do condutor é decrescente e tende a anular-se para seções infinitamente grandes. Se o perfil do condutor for de maneira que a resistência de cada um de seus trechos corresponda a uma das resistências elementares (isto é, das "cascas" de solo) de dado eletrodo de aterramento, a resistência total do condutor será equivalente à do eletrodo. Segundo a lei que varia a seção, o perfil do condutor depende do tipo de eletrodo e da resistividade do solo, uma vez que a seção inicial equivale à seção externa do eletrodo do qual flui a corrente. A Figura 3.11 mostra o condutor equivalente.

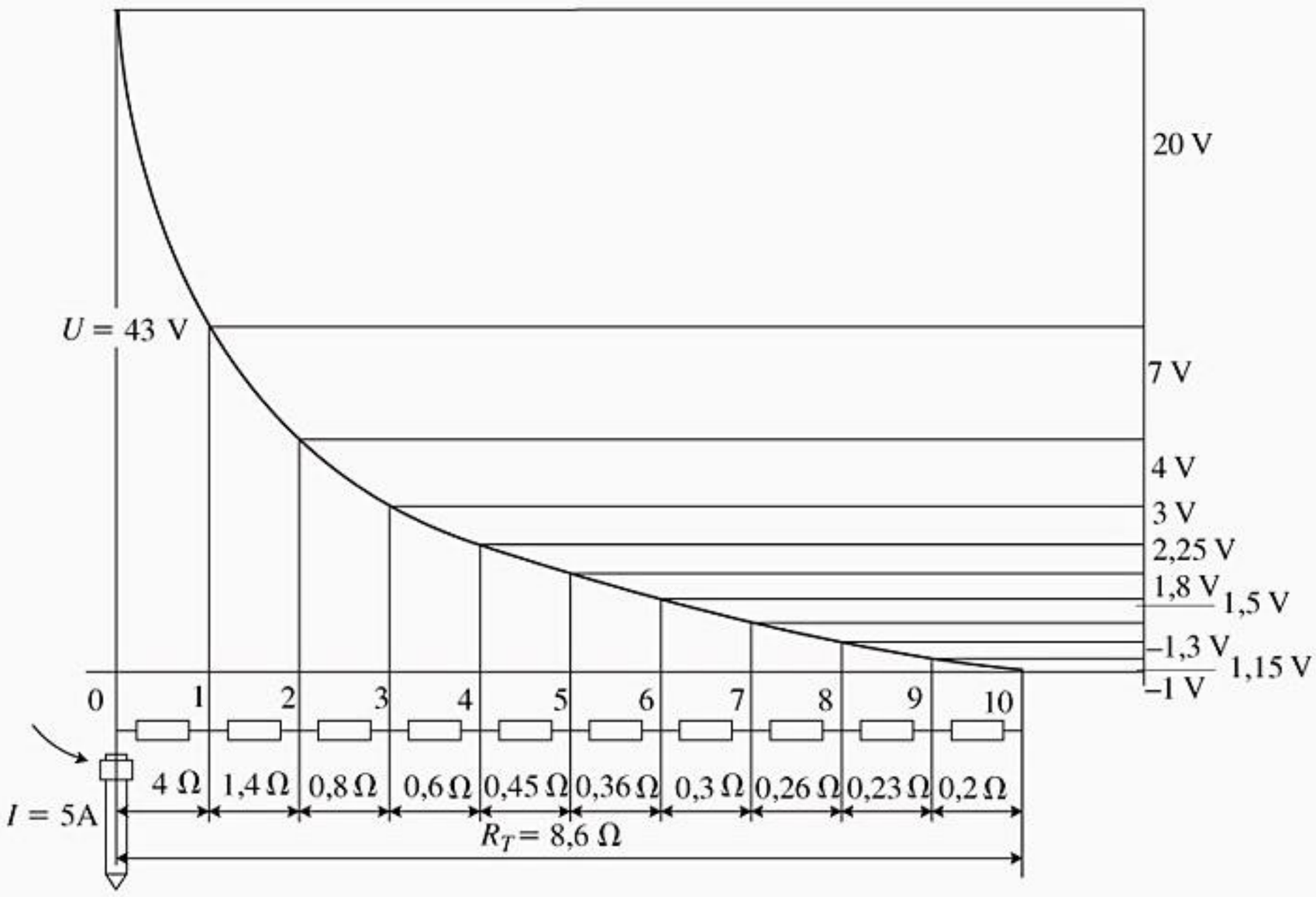


Figura 3.10 ■ Resistência de aterramento e variação da tensão

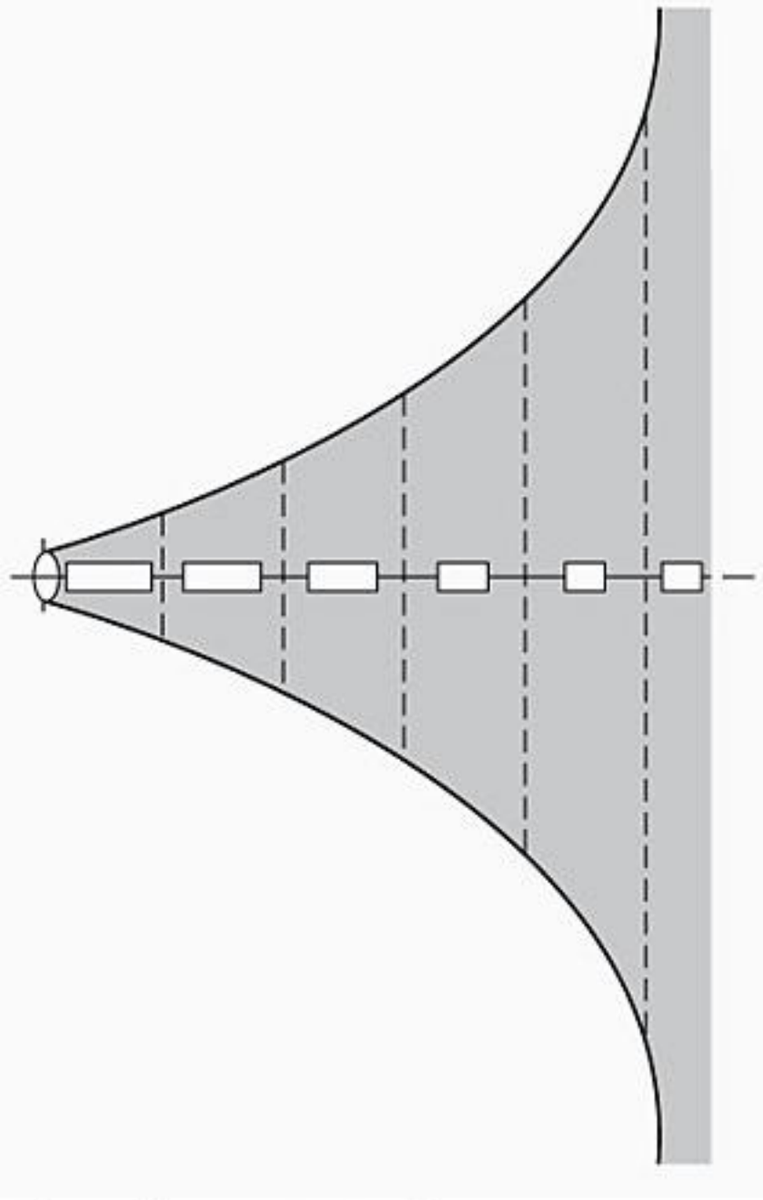


Figura 3.11 ■ Condutor elétrico equivalente de seção variável

Eletrodos de aterramento independentes

Sejam E_1 e E_2 dois eletrodos (no caso, hastes) suficientemente distantes um do outro e I a corrente que flui entre eles. Tudo se passa como se a corrente, em vez de ircular no solo, percorresse um condutor equivalente formado pela justaposição dos condutores equivalentes dos eletrodos E_1 e E_2, como mostra a Figura 3.12.

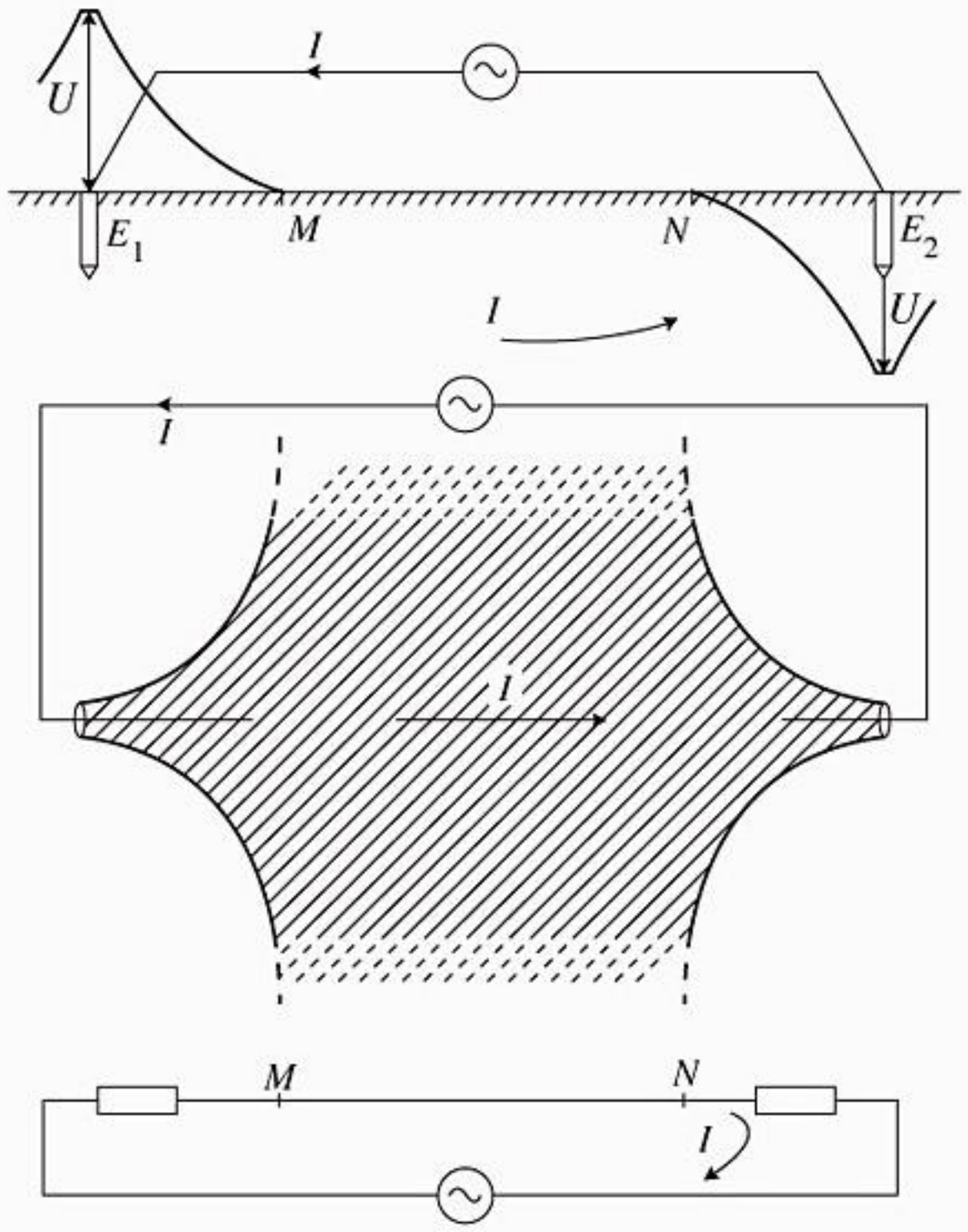


Figura 3.12 ▪ Corrente circulando entre dois eletrodos independentes

No trecho MN, a seção do condutor é tão grande que a resistência se anula e, com ela, a tensão necessária para fazer circular a corrente no trecho. É o que ocorre no solo: a uma distância suficientemente grande do eletrodo, a seção do terreno por onde circula a corrente é tão grande que a resistência é praticamente nula (a tensão tende a zero para pontos muito distantes do eletrodo). A resistência que o solo oferece entre os eletrodos E_1 e E_2, sendo o trecho MN de resistência nula (seção infinita), é *independente da distância entre eles*; ou seja, tanto faz os eletrodos estarem a 50 m ou a 50 km que a resistência entre eles não muda, uma vez que *suas respectivas zonas de dispersão não se tocam*. Os eletrodos E_1 e E_2 são *eletrodos de aterramento independentes*.

Tensões de passo, de falta e de contato

A corrente que entra no sistema de aterramento se dispersa no solo, gerando tensões elétricas. Essas tensões, se aplicadas ao ser humano, provocam choques elétricos e podem causar a fibrilação ventricular do coração.

A *tensão de passo* (U_p) é definida como parte da tensão de um sistema de aterramento à qual pode ser submetida uma pessoa com os pés separados pela distância equivalente a um passo (geralmente igual a um metro). A tensão de passo, indicada na Figura 3.13, depende da posição do passo da pessoa no solo em relação à haste de aterramento.

Observe que a tensão de passo diminui à medida que a pessoa se afasta do aterramento. A tensão de passo será máxima quando um pé estiver junto da haste de terra e o outro, afastado um metro.

A *tensão de falta* (U_F) — ou "tensão total para terra" — é a tensão que aparece, entre uma massa e uma haste de aterramento de referência, quando ocorre uma falha de isolamento.

A *tensão de contato* (U_B) é a tensão que pode aparecer acidentalmente entre duas partes ao mesmo tempo acessíveis, quando há uma falha de isolamento. A Figura 3.14 ilustra esses dois conceitos; nela, R é a resistência entre o elemento condutor e a terra, por meio da qual se tem a tensão U_R, e R_A, a resistência de aterramento das massas (resistência do eletrodo de aterramento de referência). Pelo circuito da Figura 3.14, tem-se:

$$U_F = U_B + U_R \qquad (3.5)$$

De acordo com a Expressão 3.5, a tensão de contato (U_B) é, em geral, inferior à tensão de falta (U_F). Se o elemento condutor estiver no potencial da terra, onde $R = 0$ e $U_R = 0$, então $U_F = U_B$. No Capítulo 8, as prescrições da NBR 5410 levam em consideração a tensão de falta, e não a tensão de contato, pois está a favor da segurança.

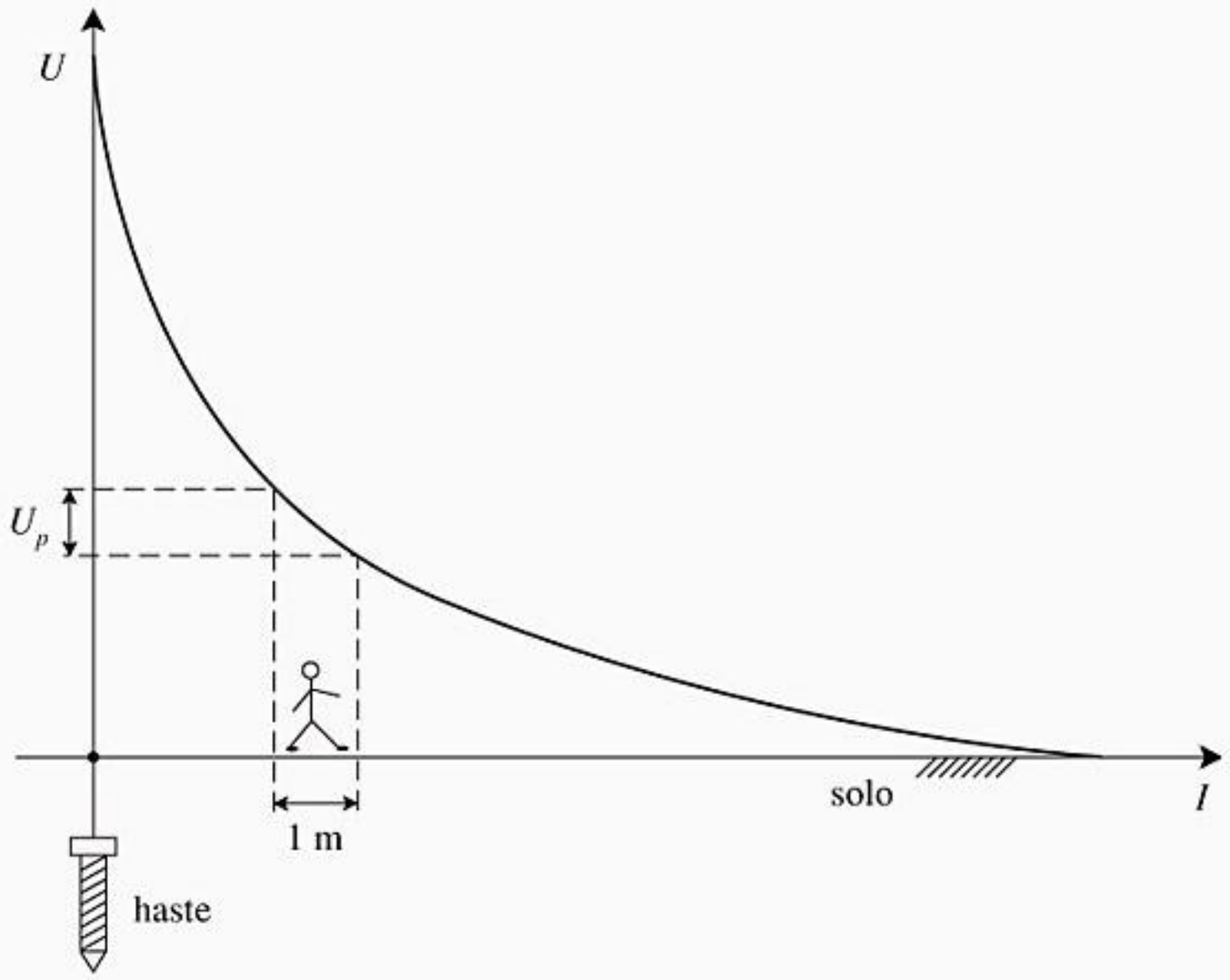
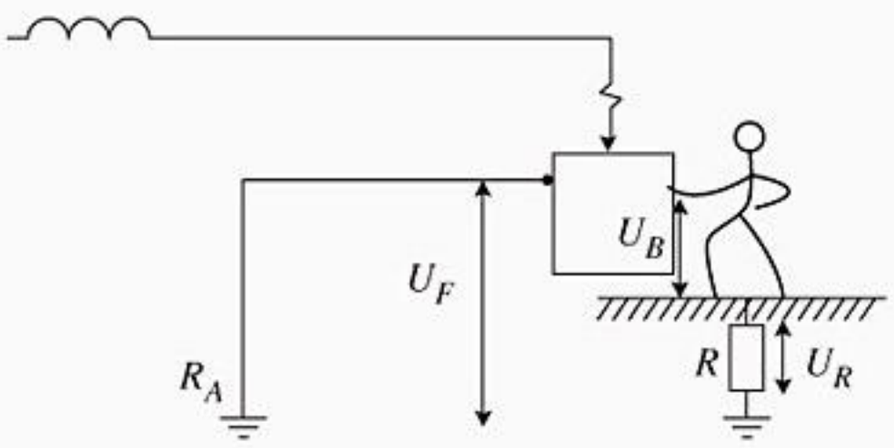
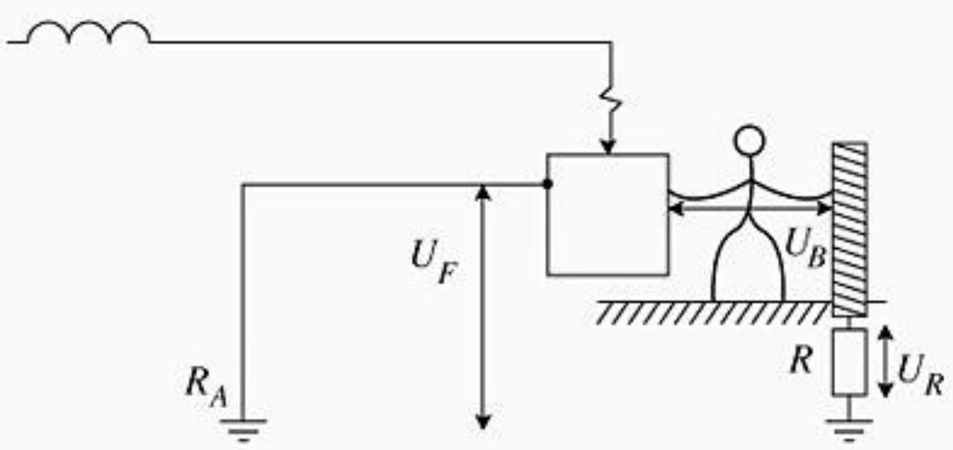


Figura 3.13 ■ Tensão de passo U_F

Observe que, no caso de uma ligação eqüipotencial entre a massa e o elemento condutor, tem-se $U_F = U_R$ e a tensão de contato será nula.



(a)



(b)

Figura 3.14 ■ Tensão de contato (U_B) e tensão de falta (U_F)

Eletrodos de aterramento

De acordo com a Seção "Fundamentos sobre aterramento", o termo *eletrodo de aterramento* aplica-se a um ou mais "condutores" enterrados no solo, ou seja, o eletrodo de terra pode ser constituído por um ou mais elementos.

Tipos de eletrodos de aterramento

Conforme a NBR 5410, toda edificação deve dispor de uma *infra-estrutura de aterramento*, denominada *eletrodo de aterramento*, sendo admitidas as seguintes opções:

- Preferencialmente, devem ser usadas as próprias armaduras do concreto das fundações.
- Usar fitas, barras ou cabos metálicos, especialmente previstos, imersos no concreto das fundações.
- Utilizar malhas metálicas enterradas, no nível das fundações, cobrindo a área da edificação e, quando necessário, complementadas por hastes verticais e/ou cabos dispostos radialmente.
- Usar anel metálico enterrado, circundando o perímetro da edificação e, quando necessário, complementado por hastes verticais e/ou cabos dispostos radialmente.

A infra-estrutura de aterramento deve ser acessível, no mínimo, junto de cada ponto de entrada e de saída de condutores e utilidades da edificação e em outros pontos que forem necessários à eqüipotencialização.

Materiais dos eletrodos de aterramento

Os materiais dos eletrodos de aterramento e as dimensões desses materiais devem ser selecionados de modo a resistir à corrosão e a apresentar resistência mecânica adequada.

A Tabela 3.7 mostra os materiais e as características dos eletrodos mais comumente utilizáveis em eletrodos de aterramento.

É importante observar que as canalizações metálicas de fornecimento de água e outros serviços *não são admitidos como eletrodos de aterramento*, tendo em vista o uso muito difundido de componentes isolantes nessas canalizações.

Também se deve notar que, quando forem utilizados diferentes metais na infra-estrutura de aterramento, devem ser tomadas precauções contra os efeitos da corrosão eletrolítica.

Eletrodo de aterramento nas fundações

Há duas formas básicas de realizar o eletrodo de aterramento pelo uso das fundações de uma edificação: os elementos metálicos são constituídos pelas próprias armaduras embutidas no concreto ou inserem-se no concreto os elementos metálicos diferentes daqueles da armadura.

No primeiro caso, mais comum em edificações de maior porte, nas quais a infra-estrutura de aterramento é *constituída pelas próprias armaduras embutidas no concreto das fundações* (armaduras de aço das estacas, dos blocos de fundação e vigas baldrames), pode-se considerar que as interligações naturalmente existentes entre esses elementos são suficientes para se obter um eletrodo de aterramento com características elétricas adequadas, sendo dispensável qualquer medida adicional.

Uma característica importante desse tipo de eletrodo é que a corrosão dos elementos metálicos da armadura é praticamente inexistente, em conseqüência de sua imersão no concreto. Além disso, geralmente a resistência elétrica total desse eletrodo (armadura metálica + concreto) resulta extremamente baixa, principalmente por causa da natureza altamente higroscópica (absorção de umidade) do concreto.

No segundo caso, mais usual em edificações de menor porte, a infra-estrutura de aterramento pode ser *constituída por fita, barra ou cabo de aço galvanizado imerso no concreto das fundações*, formando, no mínimo, um anel em todo o perímetro da edificação. Nessa situação, a fita, a barra ou o cabo devem ser envolvidos por uma camada de concreto de, no mínimo, 5 cm de espessura, a uma profundidade de, no mínimo, 0,5 m, sendo suas seções mínimas aquelas indicadas na Tabela 3.7.

Os condutores de aterramento, que ligam o eletrodo (composto por fita ou cabo de aço) aos condutores de proteção das massas, devem ser constituídos de vergalhões redondos lisos para concreto de, pelo menos, 50 mm² de seção, imersos no concreto durante a construção da edificação, e ser soldados às fitas ou aos cabos que constituem o eletrodo.

Tabela 3.7 ■ Eletrodos de aterramento mais comumente utilizáveis, de acordo com a NBR 5410

Material	Superfície	Forma	Dimensões mínimas			
			Diâmetro mm	Seção mm²	Espessura do material em mm	Espessura média do revestimento μm
Aço	Zincada a quente[1] ou inoxidável[1]	Fita[2]		100	3	70
		Perfil		120	3	70
		Haste de seção circular[3]	15			70
		Cabo de seção circular		95		50
		Tubo	25		2	55
	Capa de cobre	Haste de seção circular[3]	15			2.000
	Revestida de cobre por eletrodeposição	Haste de seção circular[3]	15			254
Cobre	Nu[1]	Fita		50	2	
		Cabo de seção circular		50		
		Cordoalha	1,8 (cada veia)	50		
		Tubo	20		2	
	Zincada	Fita[2]		50	2	40

Notas:
1. Pode ser utilizado para embutir no concreto.
2. Fita com cantos arredondados.
3. Para eletrodo de profundidade.

Deve-se ligar ao conjunto eletrodo–condutores de proteção os elementos condutores da construção, tanto os elementos metálicos quanto as armações de concreto, no maior número de pontos possível. Além disso, é aconselhável evitar ligar ao sistema eqüipotencial, assim constituído, armaduras ativas de protensão e suas capas eventuais.

Nessa configuração, do ponto de vista de obtenção de uma eqüipotencialização ideal, além do anel envolvendo todo o perímetro da edificação, seria recomendável a existência de uma malha interna a esse anel com dimensões máximas em torno de 20 m × 20 m.

Eletrodo de aterramento constituído por hastes

As *hastes de aço com capa de cobre* constituem o tipo de eletrodo mais simples e mais comum, e são utilizadas maciçamente nos sistemas de aterramento, sobretudo residenciais.

A Figura 3.15 mostra uma haste de aterramento de comprimento $l = AB$ e diâmetro d cravada em um solo homogêneo de resistividade ρ, com sua extremidade A na superfície do solo. A resistência de aterramento teórica R_T é dada pela Expressão 3.6:

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left[\frac{4l}{d}\right] \qquad (3.6)$$

A Expressão 3.6 mostra que, quanto maior o comprimento da haste, menor a resistência de aterramento. No entanto, não é prático utilizar hastes muito longas, pois não são tão simples de cravar no solo. As mais usadas são as que medem 2,4 e 3 m.

A importância do diâmetro da haste é bem menor, uma vez que a resistência depende do seu logaritmo, como mostrado pela Expressão 3.6. Em geral, não são usadas hastes com diâmetro superior a 25 mm.

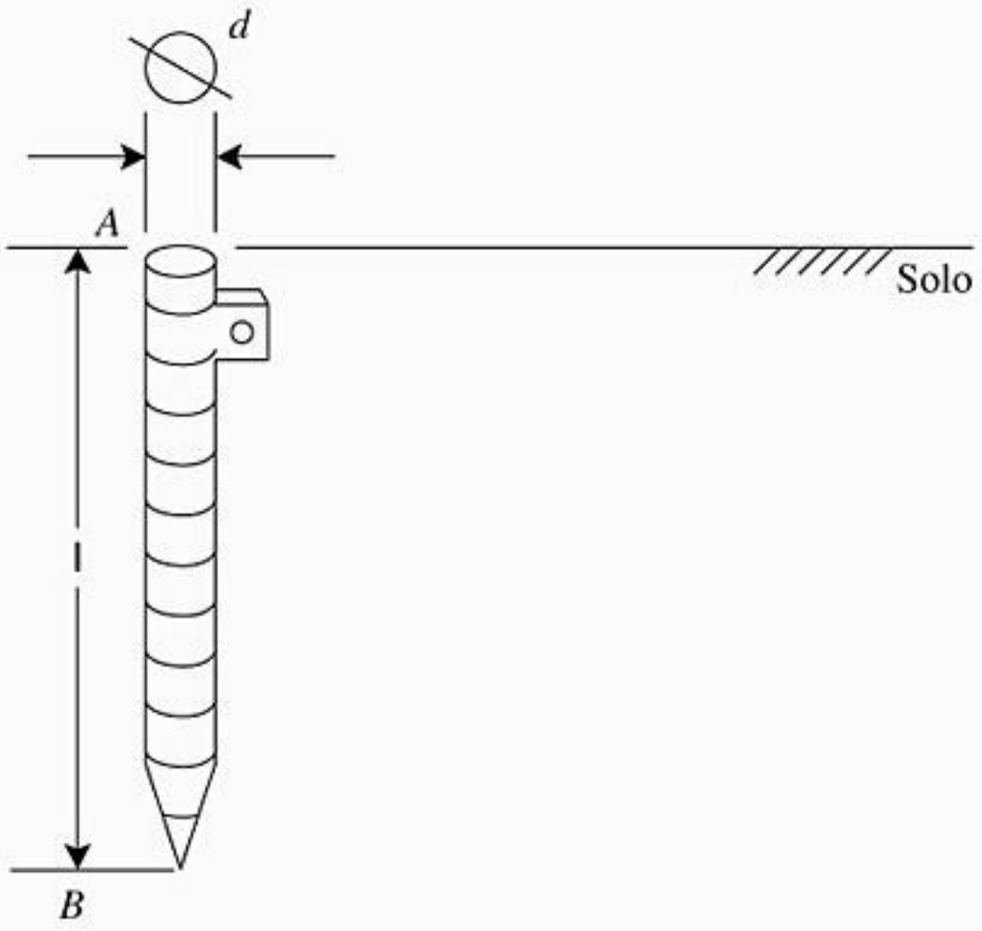


Figura 3.15 ■ Eletrodo constituído por uma haste cravada verticalmente no solo

Muito influente na resistência de aterramento é a profundidade da haste (distância de sua extremidade inferior à superfície). De fato, observa-se facilmente que, se a haste for enterrada a uma grande profundidade a área de dispersão da corrente elétrica, será maior e conseqüentemente terá uma resistência elétrica menor.

A haste encravada verticalmente no solo apresenta bons resultados para as correntes de curto-circuito na freqüência industrial e para surtos de corrente provenientes dos surtos de tensões induzidas ou das descargas atmosféricas diretas. No caso de hastes profundas, os curtos-circuitos e os surtos são dispersos profundamente no solo, atenuando os perigos das tensões de passo e de toque na superfície do solo.

A ligação de hastes em paralelo reduz a resistência do sistema de aterramento. Se as hastes paralelas forem cravadas próximas umas das outras, haverá uma zona de interferência que reduz a eficiência do sistema de aterramento (ver Figura 3.16(b)). Se elas forem afastadas, a zona de interferência diminuirá até atingir o ponto de interferência nula (ver Figura 3.18(a)).

Na prática, utiliza-se muito o afastamento entre hastes igual ou superior ao comprimento da haste. Todas as hastes deverão ser conectadas por um condutor de cobre para formar o sistema de aterramento.

Expressões práticas da resistência de aterramento

Os valores da resistência de aterramento podem ser calculados de maneira aproximada pelas seguintes expressões:

(a) *Condutor enterrado horizontalmente no solo*

$$R_T = \frac{2\rho}{l} \qquad (3.7)$$

onde ρ (Ωm) é a resistividade do solo e l (m) é o comprimento que pode ser considerado igual:

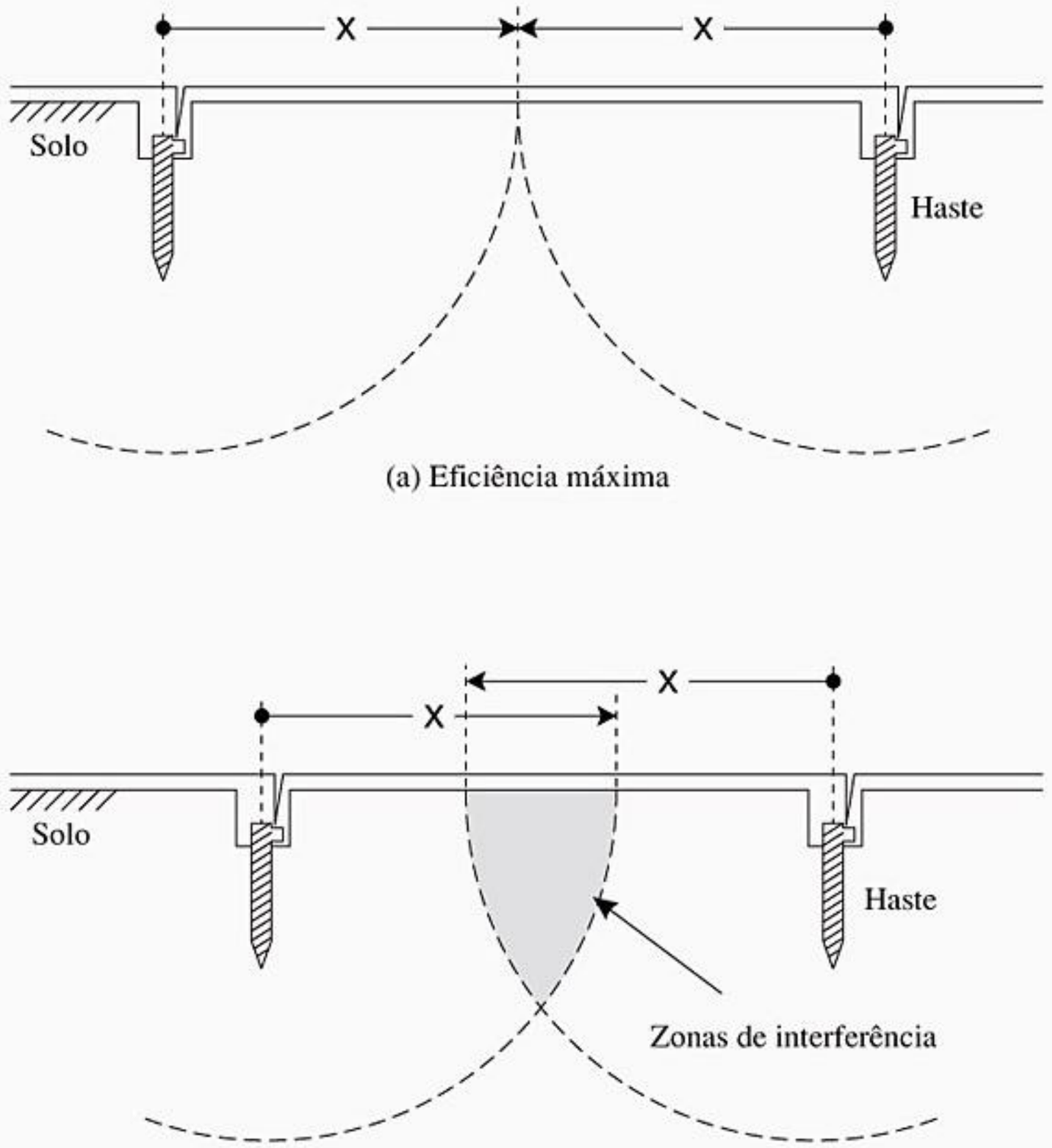
- Ao próprio perímetro, em anéis de fundo de escavação ao longo do perímetro da edificação ou em anéis enterrados a 0,5 m ao longo do perímetro.
- Ao comprimento da vala, em valas horizontais.

(b) *Haste cravada verticalmente no solo.*
Utilize a Expressão 3.6, onde l (m) é o comprimento da haste e d é o diâmetro em metros.

(c) *Chapa enterrada verticalmente no solo*

$$R_T = 0{,}8\,\frac{\rho}{l} \qquad (3.8)$$

onde l (m) é o perímetro da placa.



(a) Eficiência máxima

(b) Eficiência reduzida

Figura 3.16 ▪ Hastes em paralelo

(d) *Viga metálica*

$$R_T = 0{,}366 \frac{\rho}{l} \log \frac{3l}{\alpha} \qquad (3.9)$$

onde l (m) é o comprimento da viga enterrada no solo e α(m) é o diâmetro do círculo circunscrito à seção transversal da viga. O eventual revestimento com cimento que está enterrado no solo e que se mantém úmido ajuda a diminuir o valor de R_T.

Eletrodos de aterramento independentes

Pode-se definir *eletrodos de aterramento eletricamente independentes* como eletrodos localizados a distâncias entre si, uma vez que, quando um deles é percorrido pela corrente máxima para ele prevista, a variação do potencial dos demais não ultrapassa um valor específico (em geral, adota-se o valor de 50 V).

Na prática, pode-se dizer que, para que dois eletrodos de aterramento sejam considerados independentes, não basta (como muitos supõem) que não possuam elementos (por exemplo, hastes e cabos) comuns. De fato, dois eletrodos próximos podem influenciar-se eletricamente, ou seja, é possível encontrar em um deles uma tensão elétrica imposta pela passagem de corrente no outro. Por exemplo, considere que o eletrodo A da Figura 3.17 dispersa no solo uma corrente I e admite uma tensão de 300 V e o eletrodo B, um pouco distante, tem uma tensão de 70 V, nesse caso, A e B não são eletricamente independentes.

As diferentes correntes para as quais os aterramentos são dimensionados podem ser o motivo de a independência não ser necessariamente recíproca. Assim, por exemplo, se o eletrodo A dispersa uma corrente máxima de 1.000 A e B apenas 10 A, dependendo do valor da resistência do aterramento de A e B, é provável que A possa gerar em B uma tensão perigosa, mas é difícil que o inverso ocorra. Nessas condições, A será independente de B, mas B não será independente de A.

Por sua vez, não se pode esquecer da influência do solo, como ilustra a Figura 3.18.

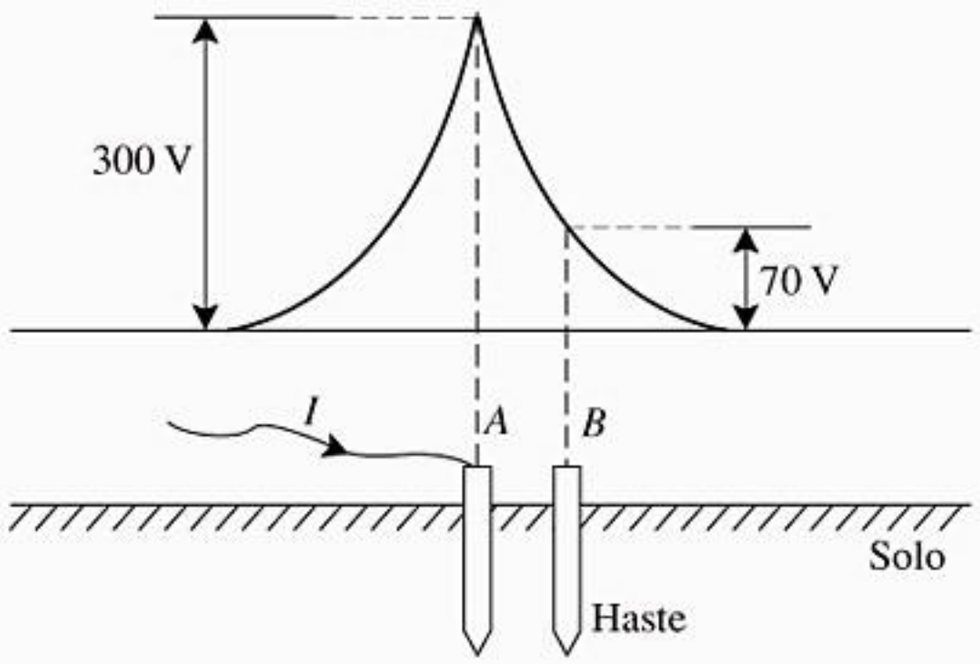


Figura 3.17 ■ No eletrodo *B*, situado na área de influência do eletrodo *A*, aparece uma tensão devida à corrente que se dispersa por *A*

Salienta-se que, se o eletrodo B é independente do eletrodo A, não significa que A seja independente de B. Para verificar a independência entre os dois eletrodos, é necessário, inicialmente, fazer passar por um deles a corrente para a qual ele é dimensionado e medir a tensão no outro, que não deverá ultrapassar 50 V; em seguida, deve-se repetir o procedimento com o outro eletrodo.

É evidente que um eletrodo de aterramento, ainda que bem-dimensionado e executado, não poderá garantir uma proteção adequada se não for eletricamente independente de um eletrodo vizinho, principalmente se esse não estiver bem-dimensionado *e/ou* executado.

Apenas eletrodos "suficientemente" afastados podem ser considerados independentes. Em geral, na prática, considera-se suficiente a distância cinco vezes maior que a das dimensões do maior sistema de aterramento para garantir a independência (ver a Figura 3.19).

Eis algumas observações práticas:

- Em edificações que abrigam a subestação, não é possível considerar independentes os aterramentos da subestação e das massas da instalação da edificação. Por esse motivo, é recomendável a utilização do sistema elétrico do tipo TN-S.
- Quando uma edificação for alimentada por subestação externa, os aterramentos da subestação e das massas da instalação da edificação só poderão ser considerados independentes se a distância entre a edificação e a subestação for de, no mínimo, 15 m, e se a ligação entre os dois for feita por linha aérea ou por linha subterrânea sem elementos metálicos e não houver qualquer canalização metálica entre eles.
- Nos centros urbanos, em razão da pequena distância entre edificações e da existência de diversas canalizações metálicas no subsolo, é extremamente difícil ter eletrodos de aterramento independentes.

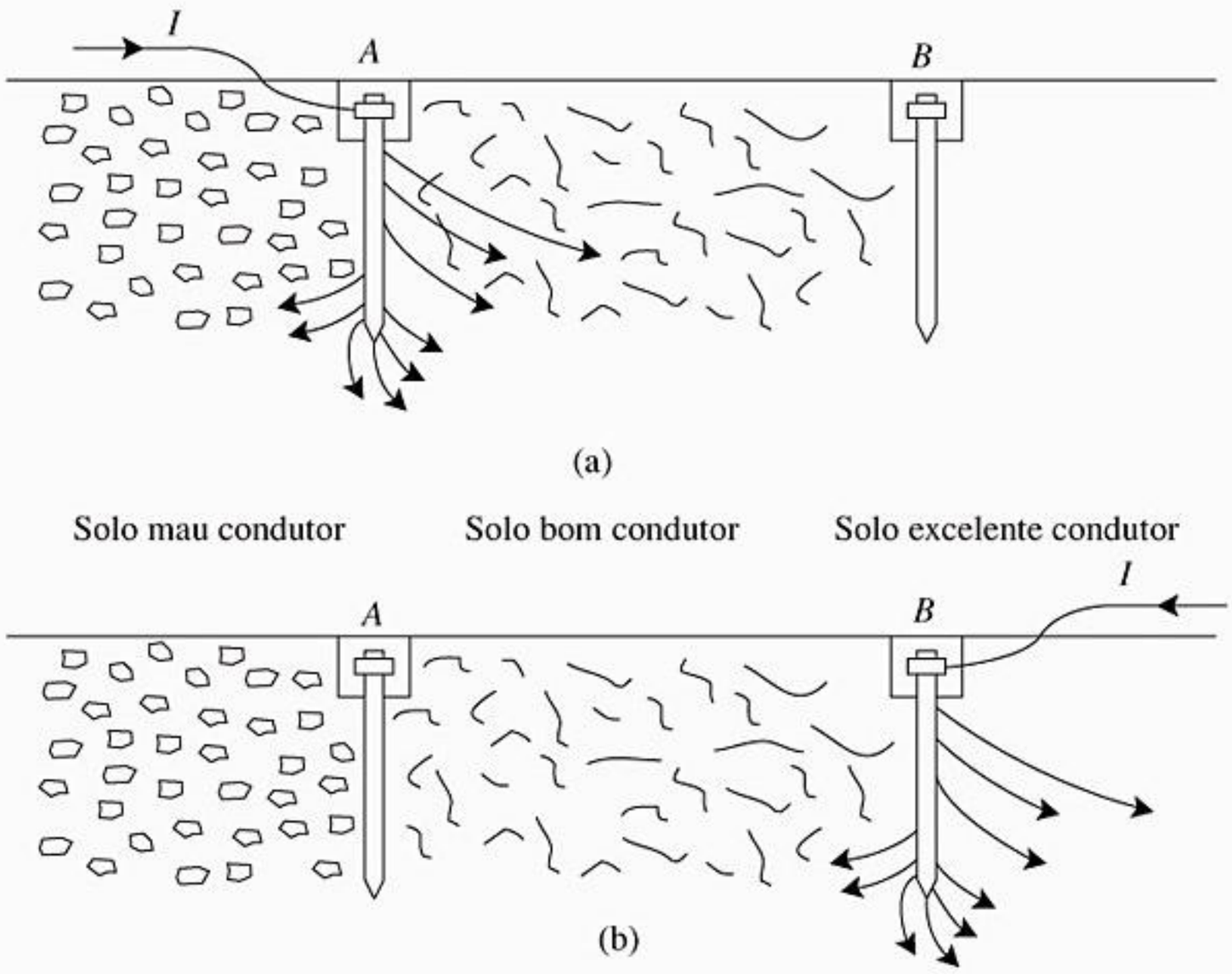
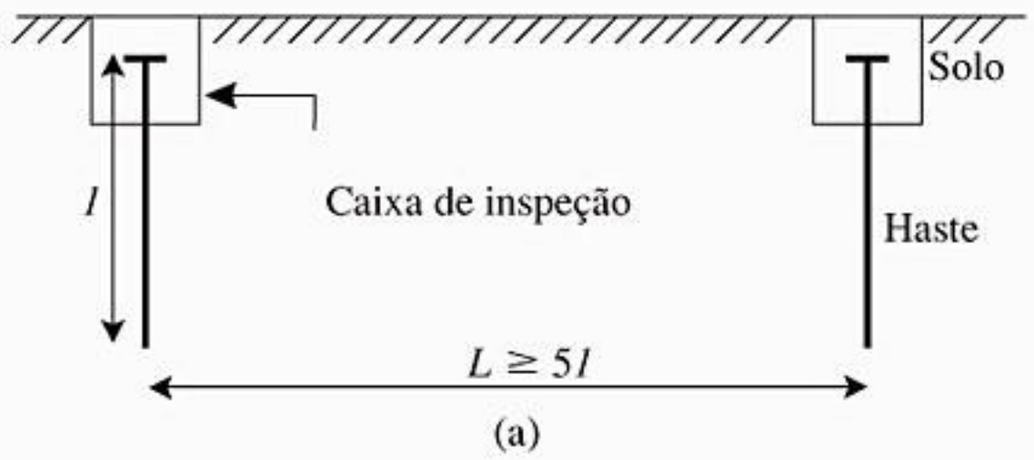


Figura 3.18 ■ Devido às características do solo (não-homogêneo): (a) a corrente que flui do eletrodo *A* dirige-se, em sua maior parte, à área na qual está contido o eletrodo *B*; (b) a corrente que flui do eletrodo *B* atinge fracamente o eletrodo *A*. Nessas condições, *A* é independente de *B*, mas *B* pode não ser independente de *A*



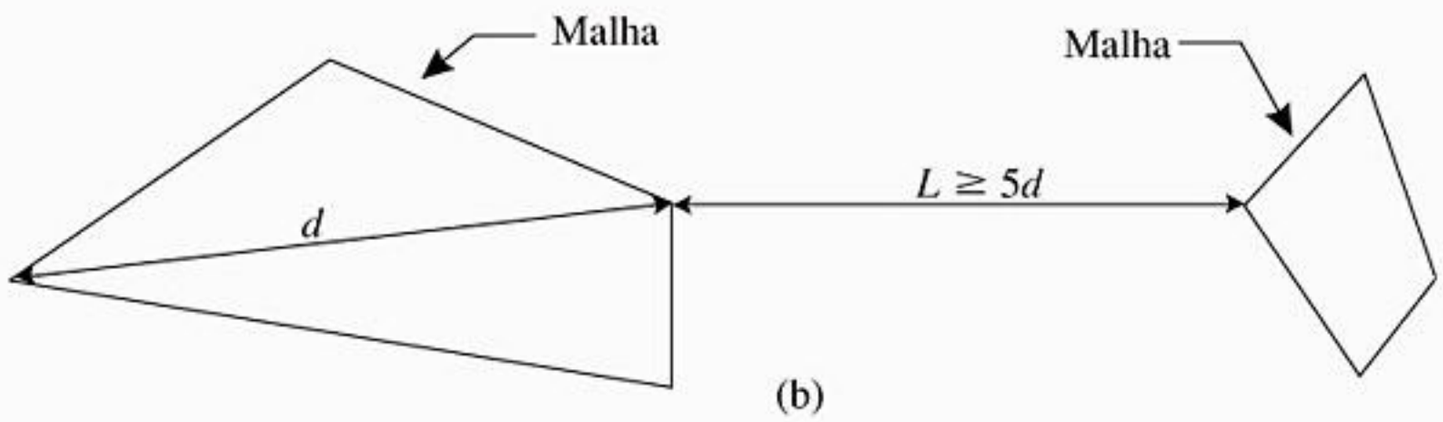


Figura 3.19 ▪ Distância mínima de separação entre sistemas de aterramento: (a) hastes iguais; (b) malhas (indicado o contorno das malhas)

Componentes do aterramento de proteção e eqüipotencialização

As medidas de proteção contra choques elétricos, de acordo com a NBR 5410, obrigatórias em qualquer tipo de edificação, baseiam-se na eqüipotencialidade das massas e dos elementos condutores estranhos à instalação.

Seu "coração" é o *barramento de eqüipotencialização principal* (BEP), geralmente uma barra, que realiza a chamada *ligação eqüipotencial principal* (ver figuras 3.20 e 3.21 — cortesia de Celso L. Pereira Mendes):

- O *condutor de aterramento* liga o barramento de eqüipotencialização principal ao eletrodo de aterramento.
- O(s) *condutor(es) de eqüipotencialidade principal(is)* liga(m) ao barramento de eqüipotencialização principal as canalizações metálicas de água, gás e outras utilidades, as colunas ascendentes de sistemas de aquecimento central ou de ar-condicionado, os elementos metálicos da construção e outras estruturas metálicas, os cabos de telecomunicação (com o consentimento da empresa operadora); quando qualquer desses elementos se originar no exterior da edificação, sua ligação ao terminal de aterramento principal deve ser feita o mais próximo do ponto em que entram na edificação.
- Os *condutores de descida de pára-raios* devem ser ligados diretamente aos eletrodos de aterramento.
- Os *condutores de proteção principais* são os condutores de proteção que estão diretamente ligados ao barramento de eqüipotencialização principal.

Todos esses elementos devem ser escolhidos e instalados de modo a resistir às solicitações térmicas, elétricas e mecânicas, bem como às influências externas a que possam estar sujeitos.

A *resistência de aterramento* deve ser medida entre o barramento de eqüipotencialização principal e um ponto no solo distante. Para isso, deve ser previsto um dispositivo, combinado ao barramento, que possibilite desligar o condutor de aterramento. O valor medido inclui, portanto:

- Resistência do condutor de aterramento, resistência do eletrodo de aterramento e resistências das conexões respectivas.
- Resistência de contato entre o eletrodo e o meio circundante (solo).
- Resistência do solo que circunda o eletrodo.

O primeiro componente tem, em geral, pouca influência, uma vez que essa resistência pode ser reduzida ainda mais com o aumento da seção do condutor de aterramento e do eletrodo de aterramento. Varia com o tempo devido à corrosão que pode ocorrer nas conexões, em função do meio em que elas se encontram. Utilizando uma solda ou revestindo as conexões com material emborrachado, pode-se minimizar o efeito de corrosão.

O segundo componente também pode ser considerado desprezível se o eletrodo e a terra que o envolve não contiverem gorduras, óxidos, materiais orgânicos, tinta, vernizes, pedras, entre outros.

Pode também variar com o tempo, devido à oxidação do eletrodo. A utilização de eletrodos cobreados minimiza o efeito da corrosão.

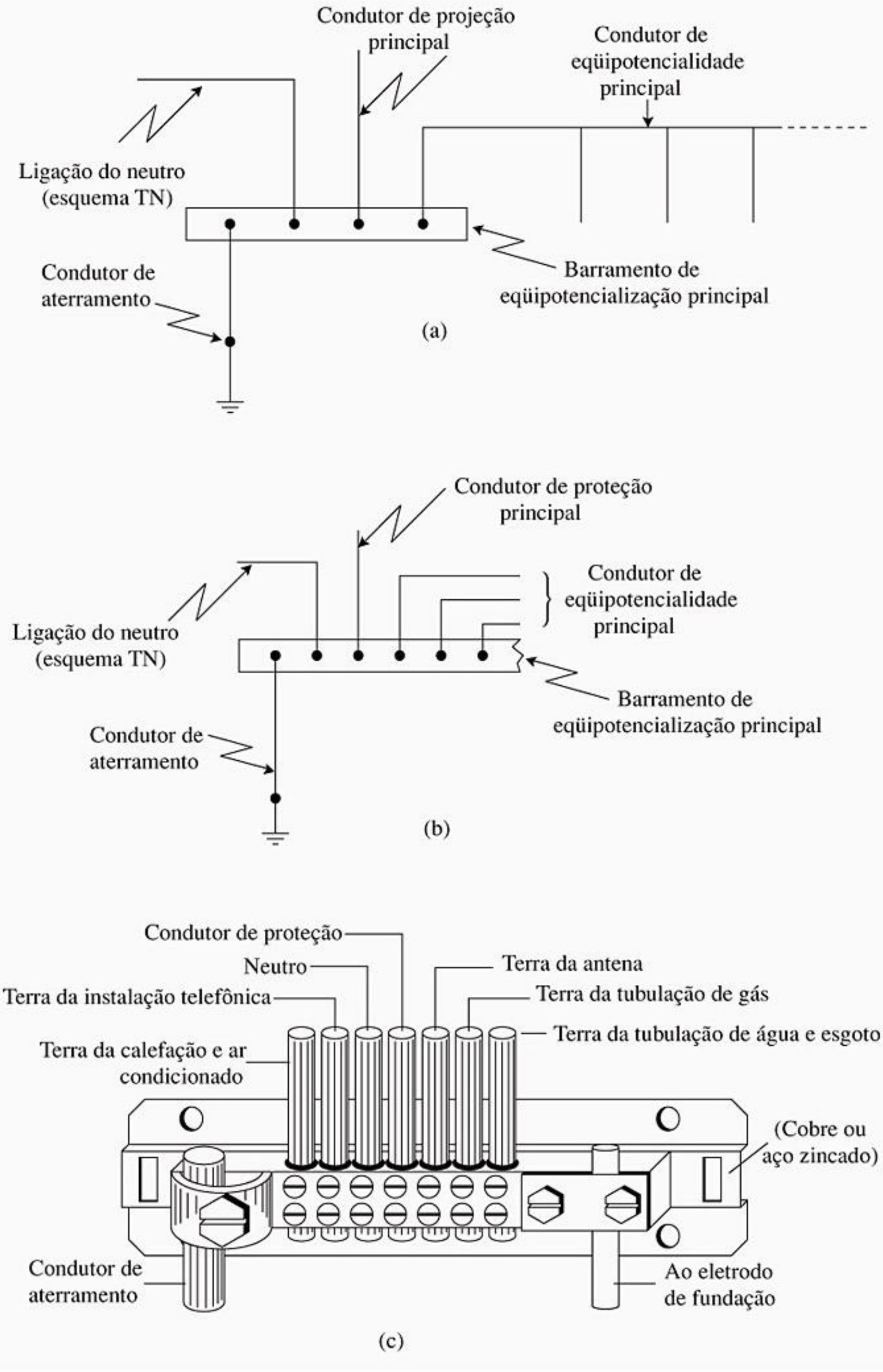


Figura 3.20 ■ Barramento de eqüipotencialização principal

O terceiro componente é o de maior importância. Depende da geometria e das dimensões do eletrodo e da resistividade do solo, que varia com a temperatura e com a umidade. Em grande parte, esse componente define a resistência de aterramento, ou seja, a corrente de curto-circuito é limitada por ele.

De acordo com a Seção "Fundamentos sobre aterramento", a resistência elétrica do solo é calculada pela soma das resistências das diversas "cascas" do solo. Interpostas entre superfícies eqüipotenciais espaçadas, essas "cascas" apresentam superfícies de passagem de corrente cada vez maiores à medida que se afastam do eletrodo.

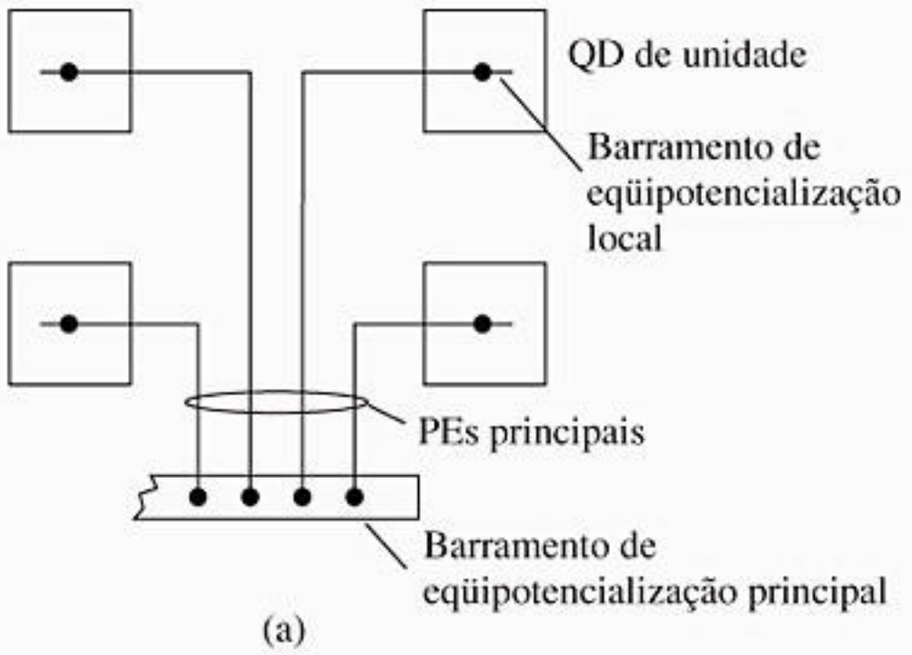


Figura 3.21 ■ Condutor de proteção principal

Conseqüentemente, as "cascas" internas, mais próximas do eletrodo, são as que apresentam valores mais elevados de resistência.

Quando o neutro do sistema de alimentação da instalação é aterrado juntamente com as massas, sua ligação ao eletrodo de aterramento é feita pelo barramento de eqüipotencialização principal. É o caso dos esquemas TN (ver Seção "Expressões práticas da resistência de aterramento"), nos quais existe um aterramento combinado, ou seja, funcional e de proteção.

Os condutores energizados dos circuitos terminais devem ser acompanhados por *condutores de proteção*, que visam a eqüipotencializar as massas dos equipamentos de utilização e originam-se nos barramentos de eqüipotencialização local dos quadros de distribuição de onde partem os circuitos terminais. Sua ligação às massas é feita diretamente ou pelo terminal terra das tomadas de energia elétrica.

Segundo a NBR IEC 60050 (826), condutor de proteção (símbolo PE) é definido como o condutor que interliga eletricamente massas, elementos condutores estranhos à instalação, os barramentos de eqüipotencialização e/ou pontos de alimentação ligados à terra.

Trata-se de uma definição bastante abrangente, na qual se incluem o condutor de aterramento, os condutores de eqüipotencialidade, além dos condutores que, na prática, são efetivamente chamados de "condutores de proteção", representados pela sigla PE (Protection Earth).

O *condutor PEN* (de PE + N) é o condutor aterrado que combina as funções de neutro e de condutor de proteção, utilizado nos esquemas TN-C e TN-C-S (ver Seção "Expressões práticas da resistência de aterramento").

Ainda fazem parte do "sistema" de proteção contra choques elétricos os condutores de eqüipotencialidade utilizados nas chamadas *ligações eqüipotenciais*, que são apresentadas no Capítulo 8.

Esquemas de aterramento

Os aterramentos devem assegurar, de modo eficaz, as necessidades de segurança e de funcionamento de uma instalação elétrica, constituindo-se em um dos pontos mais importantes de seu projeto e de sua montagem.

Aterramento de proteção

O *aterramento de proteção* consiste na ligação à terra das massas e dos elementos condutores estranhos à instalação. Possui como objetivos:

- Limitar o potencial entre massas, entre massas e elementos condutores estranhos à instalação, e entre os dois e a terra, a um valor seguro sob condições normais e anormais de funcionamento.
- Proporcionar às correntes de falta um caminho de retorno para terra de baixa impedância, de modo que o dispositivo de proteção possa atuar adequadamente.

Aterramento funcional

O *aterramento funcional* — a ligação à terra de um dos condutores vivos do sistema (em geral, o neutro) — proporciona:

- Definição e estabilização da tensão da instalação em relação à terra durante o funcionamento.
- Limitação de sobretensões devidas a manobras, descargas atmosféricas e contatos acidentais com linhas de tensão mais elevada.
- Retorno ao sistema elétrico da corrente de curto-circuito monofásica ou bifásica à terra.

Quanto ao aterramento funcional, os sistemas podem ser classificados em:

- Diretamente aterrados.
- Aterrados por meio de impedância (resistor ou reator).
- Não aterrados.

Esquemas de aterramento definidos na NBR 5410

De acordo com a NBR 5410, as instalações de baixa tensão devem obedecer, quanto aos aterramentos funcional e de proteção, a três *esquemas de aterramento* básicos, classificados em função do aterramento da fonte de alimentação da instalação (transformador, no caso mais comum, ou gerador) e das massas, e designados por uma simbologia que utiliza duas letras fundamentais:

- 1ª letra: indica a situação da alimentação em relação à terra.
- T: um ponto diretamente aterrado.
- I: nenhum ponto aterrado ou aterramento por meio de impedância razoável.
- 2ª letra: indica as características do aterramento de massa.
- T: massas diretamente aterradas, independentemente do eventual aterramento da alimentação.
- N: massas sem um aterramento próprio no local, mas que utilizam o aterramento da fonte de alimentação por meio de um condutor separado (PE) ou condutor neutro (PEN).
- I: massas isoladas, ou seja, não aterradas.

Outras letras: especificam a forma do aterramento da massa, utilizando o aterramento da fonte de alimentação:

- S: separado, isto é, o aterramento da massa é feito por um condutor (PE) diferente do condutor neutro;
- C: comum, isto é, o aterramento da massa do equipamento elétrico é feito com o próprio condutor neutro (PEN).

São considerados pela norma os esquemas TT, TN e IT.

Esquema TT

No esquema TT, o ponto da alimentação (em geral, o secundário do transformador com seu ponto neutro) está diretamente aterrado e as massas da instalação estão ligadas a um eletrodo de aterramento (ou a mais de um eletrodo), independentemente do eletrodo de aterramento da alimentação.

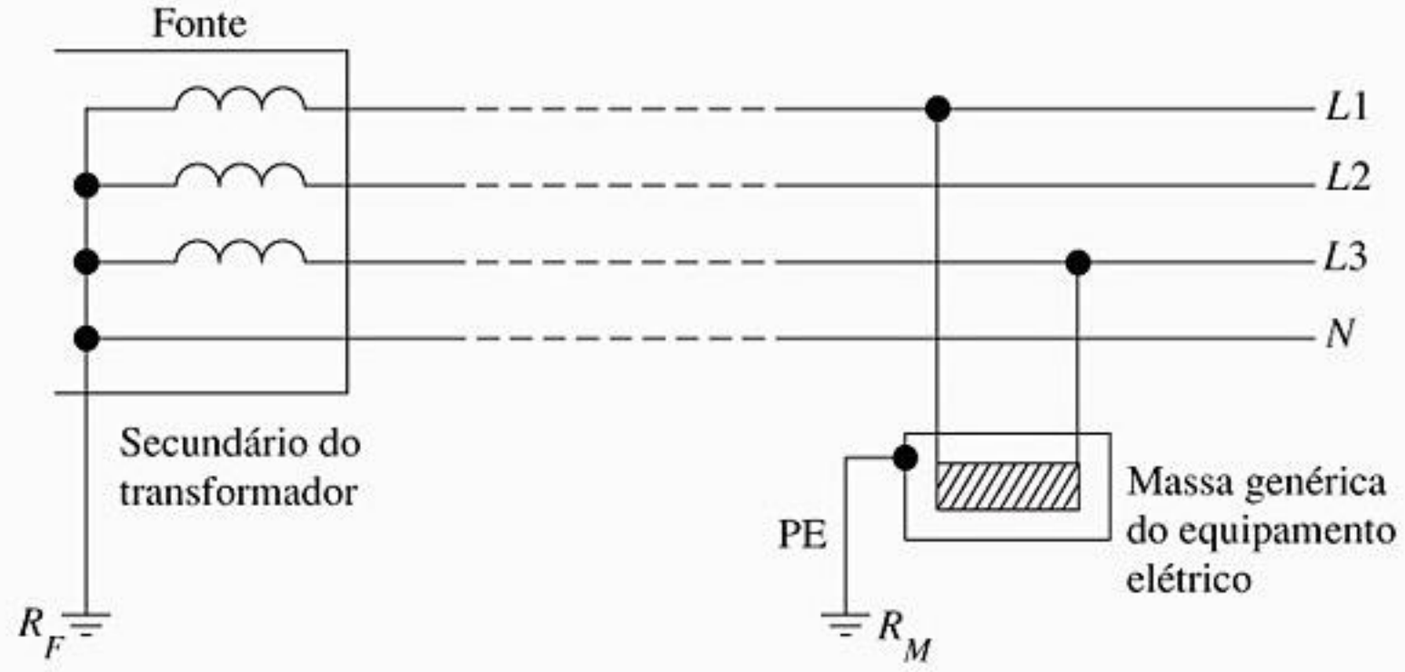


Figura 3.22 ■ Esquema *TT*

De acordo com a figura 3.22, R_F é a resistência do aterramento da fonte de alimentação e R_M é a resistência do aterramento da massa do equipamento elétrico.

Trata-se de um esquema em que o percurso de uma corrente proveniente de uma falta fase-massa (ocorrida em um componente ou em um equipamento de utilização da instalação) inclui a terra e que a elevada impedância (resistência) desse percurso limita o valor da corrente de curto-circuito. Nesse caso, a corrente de curto- circuito é praticamente dada pela Expressão 3.6:

$$I_{\text{curto-circuito}} = \frac{U_{FN}}{R_M + R_F} \qquad (3.10)$$

Nesse esquema TT, a corrente de curto-circuito depende da qualidade do aterramento da fonte e da massa. Se o aterramento não for bom, a proteção pode não atuar ou demorar muito para atuar, colocando em risco a segurança humana.

As correntes de falta direta fase-massa são de intensidade inferior à de uma corrente de curto-circuito fase-neutro.

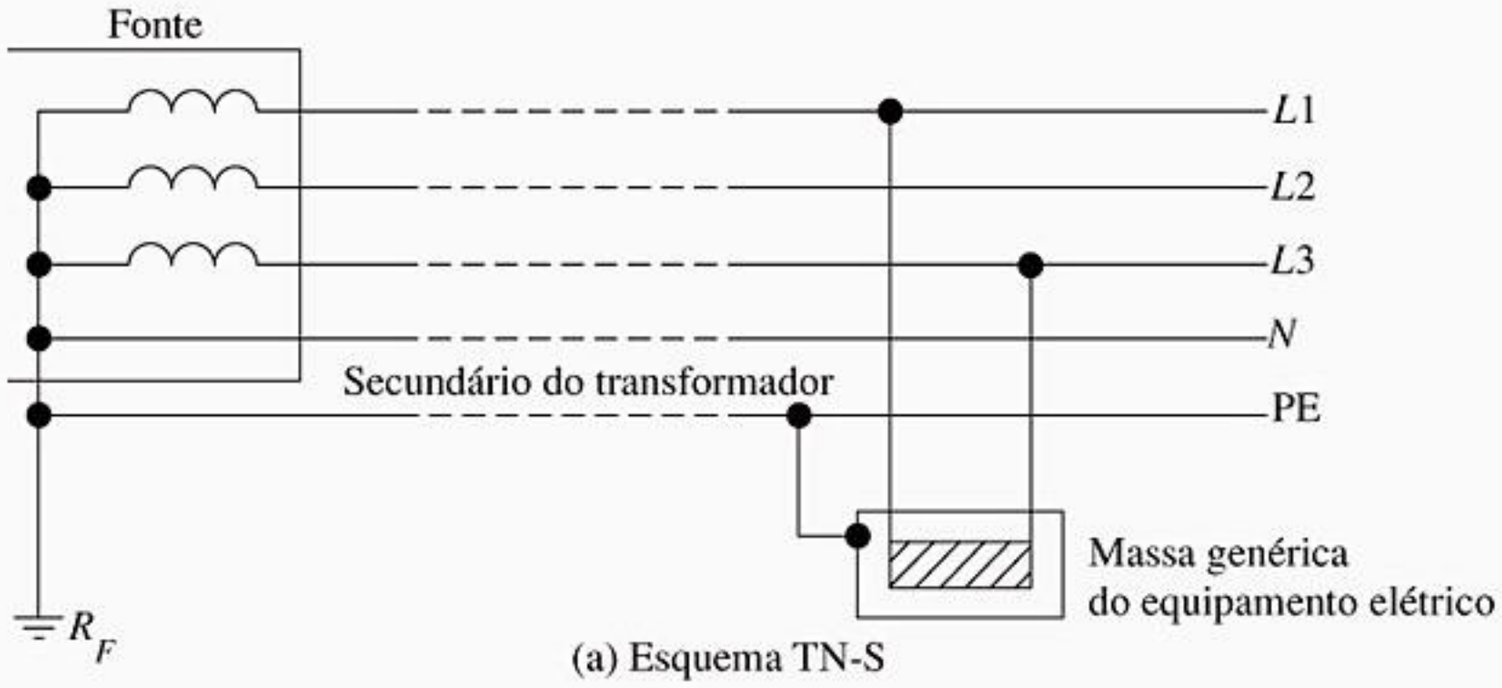
Uma das possíveis utilizações do esquema TT é quando a fonte de alimentação e a carga estiverem muito distantes uma da outra.

Esquema TN

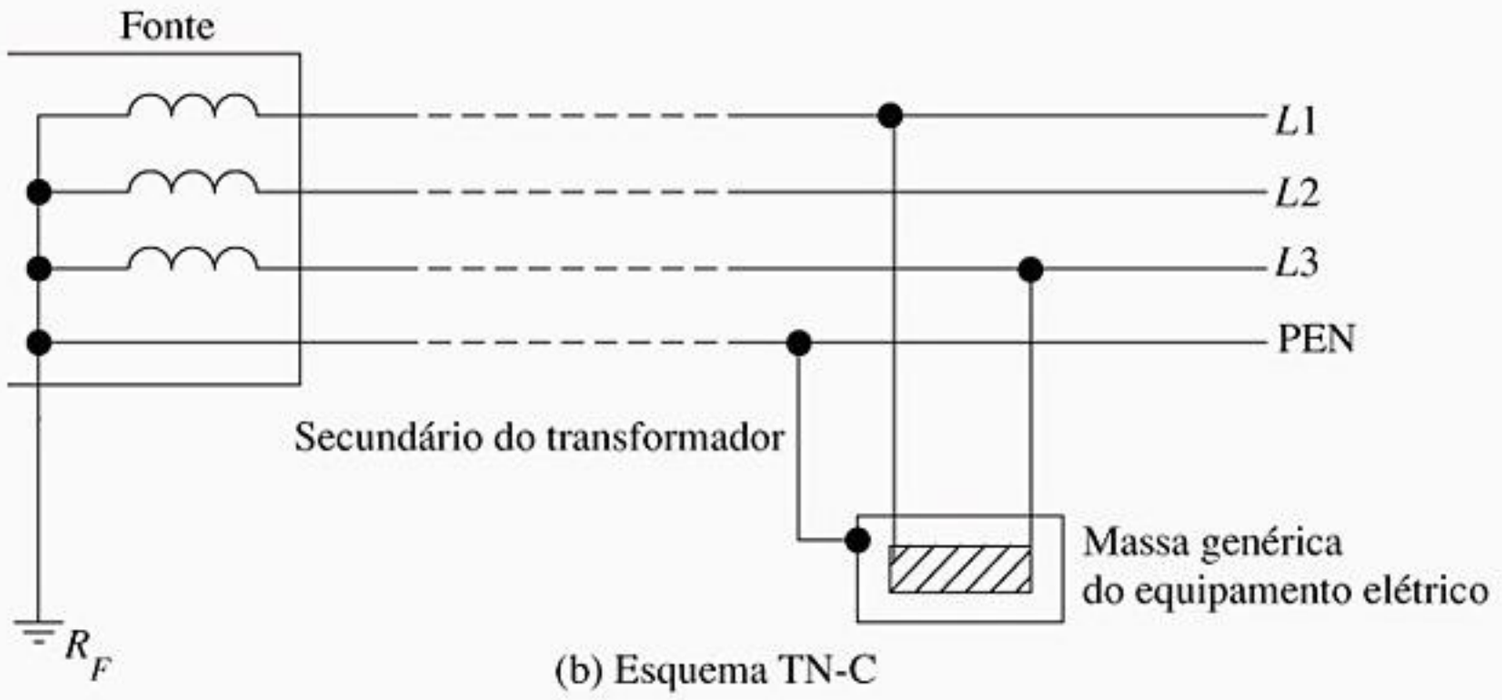
No esquema TN, um ponto da alimentação – em geral, o neutro – é diretamente aterrado e as massas dos equipamentos elétricos são ligadas a esse ponto por um condutor metálico.

Esse esquema será do tipo TN-S (ver Figura 3.23(a)), quando as funções de neutro e de proteção forem feitas por condutores distintos (N e PE), ou TN-C (ver Figura 3.23(b)), quando essas funções forem asseguradas pelo mesmo condutor (PEN). Pode-se ter, ainda, um esquema misto TN-C-S.

O esquema é concebido de modo que o percurso de uma corrente de falta fase-massa seja constituído por elementos condutores metálicos e, portanto, possua baixa impedância e alta corrente de curto-circuito. Observe que uma corrente de falta direta fase-massa será equivalente a uma corrente de curto-circuito fase-neutro.



(a) Esquema TN-S



(b) Esquema TN-C

Figura 3.23 ■ Esquema *TN*

A corrente de curto-circuito, no sistema TN, não depende do valor do aterramento da fonte (R_f), mas somente das impedâncias dos condutores pelas quais o sistema é constituído. Por isso, ela é elevada e a proteção é fortemente sensibilizada, provocando sua atuação.

Deve-se sempre dar preferência ao sistema TN-S porque, na operação normal do sistema, todo o condutor PE está sempre praticamente no mesmo potencial do aterramento da fonte, ou seja, com tensão zero ou quase zero em toda sua extensão.

Por sua vez, no sistema TN-C, a tensão do condutor PEN junto da carga não é igual a zero, porque existem correntes de carga (incluindo harmônicas) e de desequilíbrio retornando pelo neutro, causando assim quedas de tensão ao longo do condutor PEN. Portanto, as massas dos equipamentos elétricos não estão no mesmo potencial do aterramento da fonte. Nesse caso, sempre há uma diferença de potencial entre a mão e o pé do operador que toca o equipamento elétrico. Outro perigo do sistema TN-C é a perda (ruptura) do condutor neutro (*N*), quando, instantaneamente, o potencial do condutor de fase passa para a massa da carga, colocando em risco a segurança humana (ver Figura 8.4).

Esquema IT

No esquema IT, não existe nenhum ponto da alimentação diretamente aterrado; ele é isolado da terra ou aterrado por uma impedância (Z) de valor elevado. As massas são ligadas à terra por meio de eletrodo ou eletrodos de aterramento próprios (ver Figura 3.24).

Nesse esquema, a corrente resultante de uma única falta fase-massa não possui, em geral, intensidade suficiente para fazer a proteção atuar, mas pode representar um perigo para as pessoas que tocarem a massa energizada, em virtude das capacitâncias da linha em relação à terra (principalmente no caso de alimentadores longos) e à eventual impedância existente entre a alimentação e a terra. Somente em dupla falta fase-massa, em fases distintas, a corrente de curto-circuito poderá provocar a atuação da proteção.

Muitas indústrias utilizam em alguns setores o sistema IT, no qual a impedância (Z) é constituída por uma

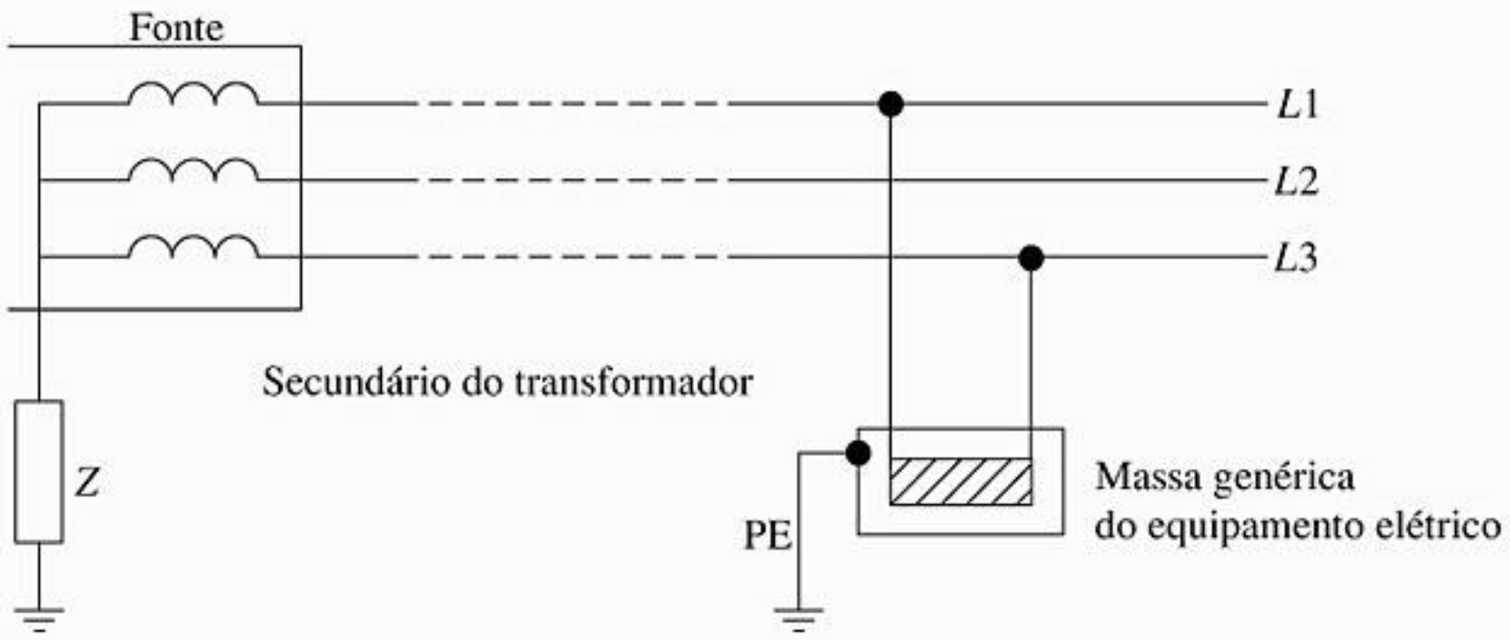


Figura 3.24 ■ Esquema *IT*

reatância projetada, a fim de que a corrente de curto-circuito, para a primeira falta fase-massa, seja limitada a um valor pequeno (por exemplo, 5 A). Essa corrente de curto-circuito sinaliza apenas a existência da primeira falta, sem necessidade de desligar o circuito, acionando apenas a equipe de manutenção.

A equipe de manutenção não precisa corrigir a falha imediatamente; a produção do setor industrial continua normalmente, e a equipe de manutenção pode programar seu serviço para um horário mais adequado.

Interligação dos aterramentos de baixa tensão, do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (pára-raios) e dos mastros das antenas

Conforme a NBR 5410, como todas as opções de eletrodos de aterramentos previstas na norma são também reconhecidas pela NBR 5419 — Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, então o eletrodo de aterramento de uma edificação deve ser usado conjuntamente pelos sistemas de baixa tensão e de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA).

De acordo com a NBR 5419, o mastro metálico da antena externa de televisão ou sua torre de suporte, instalados sobre uma estrutura, deverão ser aterrados segundo uma das seguintes alternativas:

- O mastro metálico da antena deve ser conectado ao condutor de descida do SPDA, por meio de solda exotérmica ou braçadeira com dois parafusos M8. Essa ligação deve ser a mais curta e retilínea possível e utilizar um condutor de cobre de, no mínimo, 16 mm² (ou condutor de alumínio de, no mínimo, 25 mm², ou liga de aço de seção mínima 50 mm²). A conexão com parafusos M8 deverá ser coberta com material emborrachado.

O condutor de descida do SPDA a que se refere este item pode ser natural ou não natural (instalação de condutores elétricos específicos). No primeiro caso, a NBR 5419 reconhece os seguintes tipos: pilares metálicos da estrutura; elementos da fachada (perfis e suportes metálicos) e instalações metálicas da estrutura (por exemplo, tubulações metálicas – exceto gás), desde que possuam seções elétricas adequadas e continuidade garantida; e armaduras de aço interligadas das estruturas de concreto armado.

- Se não houver SPDA, deve ser instalado um condutor de descida exclusivo para o aterramento da antena, com seção mínima de 16 mm² em cobre, ligado ao eletrodo de aterramento.

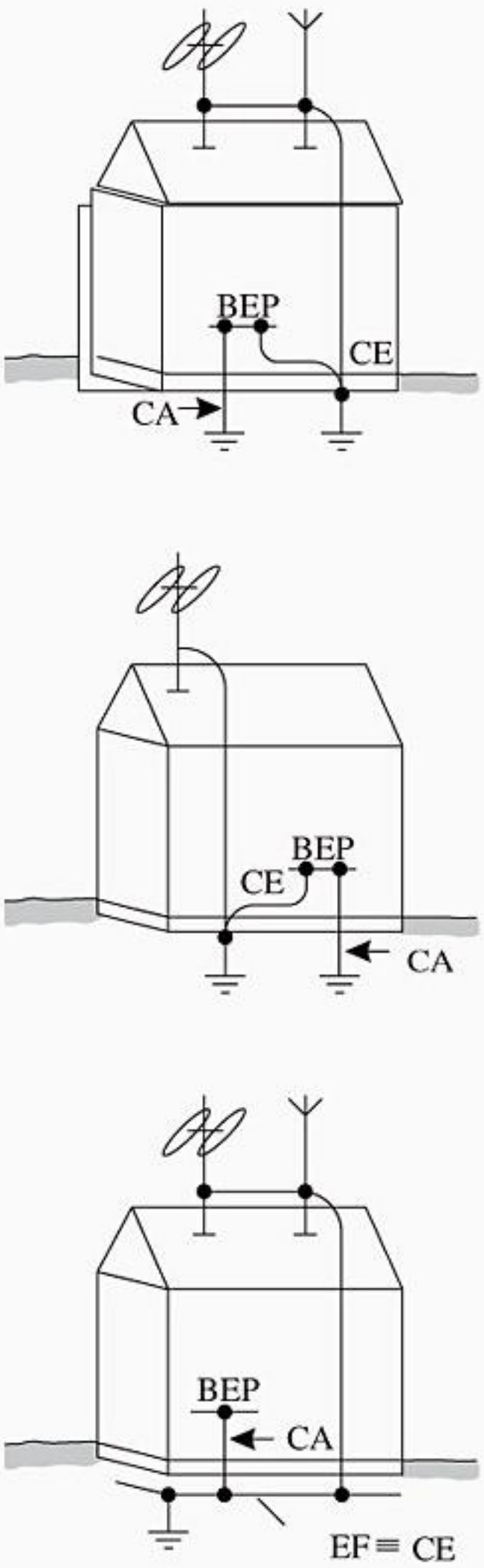
Como afirmado anteriormente, os aterramentos do SPDA, do mastro da antena e da instalação de baixa tensão devem ser interligados. De preferência, deve ser utilizado um único eletrodo de aterramento, como mostra a Figura 3.25(c). No entanto, se o eletrodo de aterramento do pára-raios *e/ou* da antena for distinto do da instalação de baixa tensão, é preciso que haja uma interligação entre os dois, como indicado nas Figuras 3.25(a) e (b).

3.4 As isolações e os graus de proteção

Os diversos componentes elétricos são isolados, ou seja, *possuem isolação*, o que significa que não só protegem contra choques elétricos, como também asseguram o funcionamento adequado do componente.

São considerados os seguintes tipos de isolação:

- *Isolação básica*, que é a isolação aplicada às partes vivas para assegurar o mínimo de proteção contra choques elétricos.
- *Isolação suplementar*, que é uma isolação adicional e independente da isolação básica, destinada a assegurar a proteção contra choques elétricos no caso de falha da isolação básica.



Legenda:
BEP = Barramento de eqüipotencialização principal
CE = Condutor de eqüipotencialidade
CA = Condutor de aterramento principal
EF = Eletrodo embutido na fundação ou enterrado no solo

(a) Aterramento da antena que utiliza a descida do pára-raios

(b) Aterramento exclusivo da antena sem pára-raios

(c) Aterramento da antena, do pára-raios e da instalação elétrica que utiliza um eletrodo comum (por exemplo, embutido na fundação ou enterrado no solo)

Figura 3.25 ■ Aterramento de SPDA, da instalação de baixa tensão e da antena

- *Isolação dupla*, que é a isolação composta por isolação básica e isolação suplementar.
- *Isolação reforçada*, que é uma isolação única, não necessariamente homogênea, aplicada às partes vivas e que tem propriedades elétricas equivalentes às de uma isolação dupla.

As isolações dos componentes de uma instalação desempenham um papel fundamental na proteção contra choques elétricos, por contato direto ou indireto. É importante lembrar que as faltas elétricas são geralmente causadas por "falhas de isolação".

Da NBR 5456, têm-se as seguintes definições:

- *Isolação*: conjunto dos materiais isolantes utilizados para isolar eletricamente. (Nota: Por extensão, a ação ou técnica de isolar eletricamente tem sentido estritamente qualitativo.)
- *Isolamento*: conjunto das propriedades adquiridas por um corpo condutor, decorrentes de sua isolação. [Nota: Esse termo tem sentido estritamente quantitativo e seu emprego é sempre associado à idéia de valor, que pode ser dada de forma explícita (isolamento para baixa tensão, isolamento para 698 V etc.) ou implícita (coordenação do isolamento, distância de isolamento, nível de isolamento, resistência de isolamento etc.]

As isolações podem, com o passar do tempo, devido a causas naturais (por exemplo, ação de umidade e temperaturas elevadas ou baixas) ou acidentais (como é o caso de choques mecânicos), ter suas propriedades

prejudicadas. No limite, há a possibilidade de ocorrer uma "anulação" do isolamento garantido pela isolação. Dessa maneira, é produzida uma *falha de isolação*, que resulta na propagação do potencial da parte viva para as massas que estejam em contato.

Na prática, a falha da isolação manifesta-se por um "caminho condutor", seja na superfície da isolação ou por perfuração no interior do material isolante. Produz-se uma "fuga" de corrente, que pode evoluir para uma corrente de curto-circuito.

O uso de uma isolação dupla em um componente reduz os riscos, uma vez que, se uma das isolações falhar, a outra mantém a segurança do componente, que passa a contar apenas com uma isolação. É possível argumentar que, nessas condições, se corre o risco de uma falha na isolação restante.

Os equipamentos elétricos (em particular, os aparelhos eletrodomésticos e eletroprofissionais) são classificados pela IEC 61140 — *Protection against electric shock — Common aspects for installation and equipment* quanto à proteção contra choques elétricos. Trata-se de classificação internacional aplicável aos equipamentos previstos para serem alimentados por fonte externa sob tensões de até 400 V entre fases ou de até 250 V entre fase e neutro, destinados a uso público em residências, escritórios, oficinas, escolas, fazendas e locais semelhantes, bem como à prática médica e odontológica. São consideradas cinco classes, descritas a seguir:

- *Classe 0*: equipamento ou aparelho no qual a proteção contra choques elétricos é assegurada exclusivamente pela isolação básica, não sendo previstos meios para ligar as partes metálicas acessíveis, se existentes, ao condutor de proteção da instalação. Em caso de falha da isolação básica, a proteção dependerá apenas do meio ambiente. Como exemplo, podem-se citar os aparelhos eletrodomésticos portáteis, como liquidificadores e batedeiras.
- *Classe 0I*: equipamento ou aparelho que tem pelo menos isolação básica em todas as suas partes vivas e possui terminal para aterramento das partes metálicas acessíveis não destinadas a conduzir corrente (massas), e que pode ficar sob tensão em caso de falha de isolação. Entretanto, o cabo de alimentação não possui condutor de proteção e o plugue não possui o pino terra. É o caso, por exemplo, de algumas geladeiras e lavadoras de uso caseiro. Nesses equipamentos, o condutor de proteção (PE) do circuito elétrico deve ser conectado à massa (carcaça) metálica do aparelho.
- *Classe I*: equipamento no qual a proteção contra choques elétricos não é assegurada apenas pela isolação, mas inclui uma precaução de segurança adicional, em que o cabo de alimentação contém um condutor de proteção (PE) conectado diretamente às massas internas dos aparelhos. É o caso dos aparelhos eletrodomésticos de maior porte ou potência (lava-louças, ar-condicionado, forno de microondas, entre outros) e da maioria dos aparelhos eletroprofissionais (como máquina copiadora e equipamento odontológico).
- *Classe II*: equipamento que tem isolação dupla ou reforçada em todas as suas partes vivas, sem previsão para aterramento ou outras precauções que dependam das condições da instalação. Podem ser de três tipos:
  - *Com carcaça isolante* durável e substancialmente contínua, que envolve todas as partes metálicas (exceto pequenas partes, como, por exemplo, placas de identificação, parafusos e rebites), as quais devem ser isoladas das partes vivas por isolação pelo menos equivalente à isolação reforçada. Nesse caso, podemos citar a maioria dos aspiradores de pó, alguns chuveiros elétricos e quase todas as furadeiras elétricas.
  - *Com carcaça metálica* substancialmente contínua, que tem isolação dupla em todas as suas partes internas, exceto naquelas em que é utilizada isolação reforçada por ser impraticável a aplicação de isolação dupla. Como exemplo, tem-se o caso de ferramentas elétricas portáteis com carcaças externas metálicas.
  - *Com carcaça mista* que combina as características dos tipos com carcaça isolante e com carcaça metálica, como em algumas ferramentas portáteis.
- *Classe III*: equipamento no qual a proteção contra choques elétricos é assegurada pela sua alimentação em extrabaixa tensão, pois, durante seu funcionamento, não podem ser induzidas tensões mais elevadas. É o caso, por exemplo, de equipamentos para uso subaquático, como iluminação de piscinas, hidromassagem etc.

Observe que, quando um equipamento tiver partes com diferentes classes de isolamento, a parte de menor classe é considerada a classe do equipamento, para efeito de aplicações de todas as medidas de proteção contra choques elétricos.

A Tabela 3.8 mostra as correntes de fuga máximas típicas de diversos equipamentos elétricos.

Os invólucros dos equipamentos elétricos são classificados por *graus de proteção*, definidos pela norma NBR IEC 60529 — *Graus de proteção para invólucros de equipamentos elétricos (código IP)* e indicados pelas letras "IP" e, em seguida, por dois algarismos. O primeiro algarismo indica a proteção contra a penetração de corpos sólidos estranhos e contatos acidentais, e o segundo indica a proteção contra a penetração de líquidos. As tabelas 3.9 e 3.10 apresentam os algarismos utilizados.

Tabela 3.8 ■ Valores máximos típicos de correntes de fuga

Equipamento	Corrente de fuga máxima (mA)
IEC 60335	
Classes 0, 0I e III	0,5
Portáteis classe I	0,75
Portáteis classe I com motor	3,5
Estacionários classe I	0,75 ou 0,75/kW de potência nominal, o que for maior com um máximo de 5[1]
Classe II	0,25
VDE 0720 E 0875	
Aquecedor elétrico de água doméstico tipo imersão	1,0
Eletrodoméstico a motor:	3,5
• fixo/estacionário	0,5
• portátil	
Aparelho para tratamento de pele	0,5
Ferramenta portátil	
• classe I	0,5
• classe II	0,1
Forno:	
• comum	10,0
• de microondas	0,5
• de maior porte	10,0/kW de potência nominal
Grill (doméstico)	5,0

Notas:
1. Para aparelhos elétricos de aquecimento de água, o valor máximo de 0,25 mA é fixo pela água.

Tabela 3.9 ■ Graus de proteção dos invólucros contra a penetração de corpos sólidos

Proteção contra o ingresso de corpos sólidos estranhos e contra acesso a partes perigosas	
Primeiro algarismo	**Grau de proteção**
0	Nenhuma proteção de pessoas contra o contato com partes internas sob tensão ou em movimento. Nenhuma proteção do equipamento contra a penetração de corpos sólidos estranhos.
1	Proteção contra contato acidental ou inadvertido de grande superfície do corpo humano. Por exemplo, a mão, com as partes internas sob tensão ou em movimento. Não oferece, porém, proteção contra a penetração de grandes corpos sólidos estranhos.
2	Proteção contra o contato dos dedos com as partes internas sob tensão ou em movimento. Proteção contra a penetração de corpos sólidos estranhos de médio porte.
3	Proteção contra o contato de ferramentas, fios ou outros objetos, de dimensão mínima superior a 2,5 mm, com as partes internas sob tensão ou em movimento. Proteção contra a penetração de corpos sólidos estranhos de pequeno porte.
4	Proteção contra o contato de ferramentas, fios ou outros objetos, de dimensão mínima superior a 1 mm, com as partes internas sob tensão ou em movimento. Proteção contra a penetração de corpos sólidos estranhos de pequeno porte.
5	Proteção total contra o contato com as partes sob tensão ou em movimento dentro do invólucro. Proteção contra pó. A penetração de pó não é evitada totalmente, mas o pó não pode entrar em quantidade que possa prejudicar o funcionamento satisfatório do equipamento.
6	Proteção total contra o contato com as partes sob tensão ou em movimento. Proteção total contra a penetração de pó.

Tabela 3.10 ■ Graus de proteção dos invólucros contra a penetração de líquido

Proteção do equipamento contra a penetração de líquidos	
Segundo algarismo	**Grau de proteção**
0	Nenhuma proteção contra a penetração de líquidos.
1	Proteção contra gotas de líquidos condensados. As gotas não devem prejudicar as partes internas do equipamento.
2	Proteção contra gotas de líquidos. A queda de gotas de líquidos não deve ter efeito prejudicial, com inclinação do invólucro não superior a 15° em relação à vertical.
3	Proteção contra chuva. A queda de água em forma de chuva, em ângulo não superior a 60° em relação à vertical, não deve ter efeito prejudicial.
4	Proteção contra respingos. Respingos de líquidos provenientes de qualquer direção não devem ter efeito prejudicial.
5	Proteção contra jatos de água: a água projetada por um bocal, proveniente de qualquer direção, sob as condições prescritas, não deverá ter efeito prejudicial.
6	Proteção contra as condições de convés de navios (relativamente a equipamentos à prova de água para o convés). A água de vagalhões não deve penetrar nos invólucros, sob as condições prescritas.
7	Proteção contra imersão em água. A água não deve penetrar no invólucro sob as condições prescritas de pressão e tempo.
8	Proteção contra imersão por tempo indefinido em água sob pressão prescrita. A água não deve penetrar no invólucro.

3.5 Proteção básica (contra contatos diretos)

A NBR 5410 considera que a proteção básica (contra contatos diretos) possa ser de três tipos: completa, parcial ou adicional.

Proteção completa

A *proteção completa* é necessária nos locais acessíveis a qualquer tipo de pessoa, principalmente pessoas comuns (BA1), crianças (BA2) e incapacitados (BA3). Pode ser realizada por isolação básica das partes vivas, por meio de invólucros ou utilizando barreiras (tratados no Anexo B da NBR 5410).

Isolação básica das partes vivas

A *isolação das partes vivas* (energizadas) consiste no recobrimento total dessas partes por uma isolação que só pode ser removida com sua destruição.

Para os componentes montados em fábrica, a isolação deve atender às prescrições relativas a esses componentes, geralmente indicadas nas normas técnicas cabíveis.

Para os demais componentes, ou seja, aqueles que são providos, completados ou restaurados na execução da instalação, a proteção deve ser garantida por uma isolação capaz de suportar as solicitações mecânicas, químicas, elétricas e térmicas a que possa ser submetida. Em geral, os vernizes, as lacas, as tintas e os produtos análogos não são considerados proteção adequada. Quando a isolação for provida durante a execução da instalação, ela deve ser verificada por meio de ensaios análogos aos aplicados aos componentes montados em fábrica.

Da NBR IEC 60050 (826), têm-se as seguintes definições:

- *barreira*: elemento que assegura a proteção contra contatos diretos, em todas as direções habituais de acesso.
- *invólucro*: elemento que assegura a proteção de um equipamento contra determinadas influências externas e a proteção contra contatos diretos em qualquer direção.
- *obstáculo*: elemento que impede um contato direto acidental, mas não impede o contato direto por ação deliberada.

Uso de barreiras ou invólucros

Por definição, o uso de barreiras ou invólucros destina-se a impedir qualquer contato com partes vivas, cumprindo assim o papel de proteção básica.

A norma indica que as partes vivas devem ser confinadas no interior de *invólucros* ou atrás de *barreiras* que confiram, pelo menos, o grau de proteção IP2X (proteção contra contato dos dedos com partes vivas; aberturas de diâmetro inferior a 12 mm).

Admitem-se, no entanto, aberturas superiores às IP2X para a substituição de partes (troca de lâmpadas ou fusíveis) ou quando necessárias ao funcionamento adequado de um equipamento ou componente (para ventilação, por exemplo). Em todos os casos, as aberturas devem ser

as mínimas compatíveis com as necessidades de substituição ou funcionamento adequado.

E devem ser tomadas medidas para impedir que pessoas ou animais domésticos toquem nas partes vivas e garantir que as pessoas tomem conhecimento de que as partes acessíveis pela abertura estão energizadas (vivas) e não devem ser tocadas intencionalmente.

Por sua vez, barreiras ou invólucros horizontais que sejam facilmente acessíveis devem atender, pelo menos, ao grau de proteção IP4X (proteção contra contato de ferramentas, fios ou outros objetos de dimensão mínima superior a 1 mm, com partes vivas). Isso se aplica, principalmente, às partes de invólucros ou barreiras sobre as quais as pessoas possam passar normalmente, como é o caso, por exemplo, de passarelas colocadas acima de barramentos. Essa prescrição visa a impedir que a queda acidental de ferramentas metálicas atinja as partes vivas, o que poderia trazer perigo para as pessoas que passassem pelo local ou tentassem pegar a peça caída.

As barreiras e os invólucros devem ser fixados de maneira segura e ser de uma robustez e de uma durabilidade suficientes para manter os graus de proteção exigidos e a separação adequada das partes vivas nas condições normais de serviço, considerando-se as condições normais de influências externas.

A retirada das barreiras, a abertura dos invólucros ou a retirada de partes de invólucros só devem ser possíveis:

- Com o uso de chave ou ferramenta.
- Após a desenergização das partes vivas protegidas, não podendo ser religada a tensão enquanto as condições não forem restabelecidas.
- Se existir uma segunda barreira interposta entre a primeira barreira e a parte viva, que só possa ser retirada com auxílio de chave ou ferramenta e que impeça qualquer contato com as partes vivas, a qual apresente, pelo menos, grau de proteção IP2X.

Proteção parcial

A *proteção parcial* contra contatos diretos só é admitida em locais acessíveis apenas a pessoas advertidas (BA4) ou qualificadas (BA5) e, mesmo assim, se forem atendidas as seguintes condições:

- As tensões nominais dos circuitos existentes não podem ser superiores a 600 V entre fase e terra ou a 1.000 V entre fases, para corrente alternada, ou a 900 V entre pólo e terra ou a 1.500 V entre pólos, para corrente contínua.
- Os locais devem ser adequadamente sinalizados – de forma clara e visível –, por meio de indicações apropriadas.

Essa proteção pode ser realizada por meio de obstáculos *e/ou* por colocação fora de alcance.

Obstáculos

Os *obstáculos*, tais como telas de arame, corrimãos e painéis, devem impedir uma aproximação física não intencional das partes vivas, bem como contatos não intencionais com partes vivas quando os equipamentos estão sob tensão. Podem ser desmontáveis sem a ajuda de ferramenta ou chave; devem, no entanto, ser fixados de modo a impedir qualquer remoção involuntária.

Quando for utilizada proteção parcial por meio de obstáculos, as distâncias mínimas a serem observadas nas passagens destinadas à operação e/ou manutenção são aquelas indicadas na Tabela 3.11 e ilustradas nas figuras 3.27, 3.28 e 3.29.

Colocação fora de alcance

A proteção parcial por *colocação fora de alcance* destina-se a impedir contatos fortuitos com partes vivas. A norma define uma *zona de alcance normal* (Figura 3.27), dentro da qual não devem se encontrar partes simultaneamente acessíveis, isto é, que estejam a uma distância de no máximo 2,50 m, sob potenciais diferentes.

Quando a superfície sobre a qual pessoas qualificadas *e/ou* advertidas se posicionam ou circulam habitualmente for limitada por um obstáculo (por exemplo, corrimão ou tela) com grau de proteção inferior a IP2X, as distâncias que limitam a zona de alcance normal devem ser determinadas desse obstáculo. No sentido vertical, a zona de alcance normal é limitada a 2,50 m da superfície *S*, sem levar em conta obstáculos intermediários que possuam grau de proteção inferior a IP2X. Esses afastamentos consideram apenas a possibilidade de as partes vivas serem tocadas diretamente com as mãos, não incluindo a hipótese de serem tocadas por objetos condutivos compridos ou volumosos (ferramentas ou escadas, por exemplo). Nesses casos, os afastamentos indicados na Figura 3.26 devem ser aumentados, levando-se em conta as dimensões de tais objetos.

Proteção adicional

A *proteção adicional* não é reconhecida pela NBR 5410 como constituindo em si uma medida de proteção completa e não dispensa de maneira alguma o emprego de medidas de proteção completa ou parcial, conforme o caso. Seu objetivo é assegurar uma proteção contra contatos diretos, no caso de falha das medidas aplicadas ou de descuido ou imprudência dos usuários.

O uso de dispositivos de proteção diferenciais-residuais (DR) com corrente diferencial-residual nominal igual ou inferior a 30 mA é reconhecido como proteção adicional contra contatos diretos pela NBR 5410.

Os casos em que o uso de dispositivo diferencial-residual de alta sensibilidade como proteção adicional é obrigatório são os seguintes:

Tabela 3.11 ■ Distâncias mínimas a serem observadas nas passagens de serviço (considerando os serviços de manutenção e operação)

Descrição	Distância mínima (m)	
	Proteção completa ou parcial existente	Proteção inexistente[2]
Entre obstáculos[1]	0,7	–
Entre manípulos de dispositivos elétricos (punhos, volantes, alavancas etc.)[1]	0,7	–
Entre obstáculos e parede[1]	0,7	–
Entre manípulos e parede[1]	0,7	–
Altura de passagem sob tela ou painel[1]	2,0	–
Apenas um dos lados apresenta partes vivas desprotegidas:		
■ entre paredes e partes vivas	–	1,0
■ passagem livre defronte a manípulos de dispositivos elétricos (punhos, volantes, alavancas etc.)	–	0,7
Ambos os lados apresentam partes vivas desprotegidas:		
■ entre partes vivas de cada lado em passagem destinada somente à manutenção, prevendo que qualquer trabalho de manutenção seja precedido de colação de barreiras protetoras.	–	1,0
■ entre partes vivas de cada lado em passagem destinada somente à manuteção, não sendo previstos a colocação de barreiras.	–	1,5
■ passagem destinada tanto à operação quanto à manutenção prevendo antecipadamente a colocação de barreiras.	–	1,2
■ passagem destinada tanto à operação quanto à manutenção, sem colocação de barreiras.	–	1,5
■ passagem livre destinada à manutenção defronte e a manípulos de dispositivos elétricos (punhos, volantes e alavancas).	–	0,9
■ passagem livre destinada à manutenção defronte e a manípulos de dispositivos elétricos (punhos, volantes para a equipe de operação).	–	1,1
Altura das partes vivas acima do solo	–	2,3

Notas:
1. Consideradas as partes dos painéis montadas e fechadas.
2. Considerando que sejam colocadas barreiras adequadas antes de ser iniciado o serviço de manutenção ou de operação.

- Os circuitos que sirvam a pontos de utilização situados em locais contendo banheira ou chuveiro.
- Os circuitos que alimentem tomadas de corrente (cada tomada até 32 A) situadas em áreas externas à edificação.
- Os circuitos de tomadas de corrente (cada tomada até 32 A) situadas em áreas internas que possam vir a alimentar equipamentos na área externa.
- Os circuitos que, em locais de habitação, sirvam a pontos de utilização situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e demais dependências internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens. Exclui-se dessa exigência os pontos que alimentem aparelhos de iluminação posicionados a uma altura igual ou superior a 2,50 m.
- Os circuitos que, em edificações não residenciais, sirvam a pontos de tomada (cada tomada até 32 A) situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e, no geral, em áreas internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens.

Em todos os casos, a proteção dos circuitos pode ser realizada individualmente, por equipamento, por ponto de utilização, por circuito ou por grupo de circuitos.

Omissão da proteção contra contatos diretos

A norma admite que sejam omitidas as medidas de proteção contra contatos diretos nos locais acessíveis somente a pessoas advertidas (BA4) ou qualificadas (BA5), desde que elas sejam devidamente instruídas com relação às condições do local e às tarefas a serem executadas, se forem simultaneamente atendidas as seguintes condições:

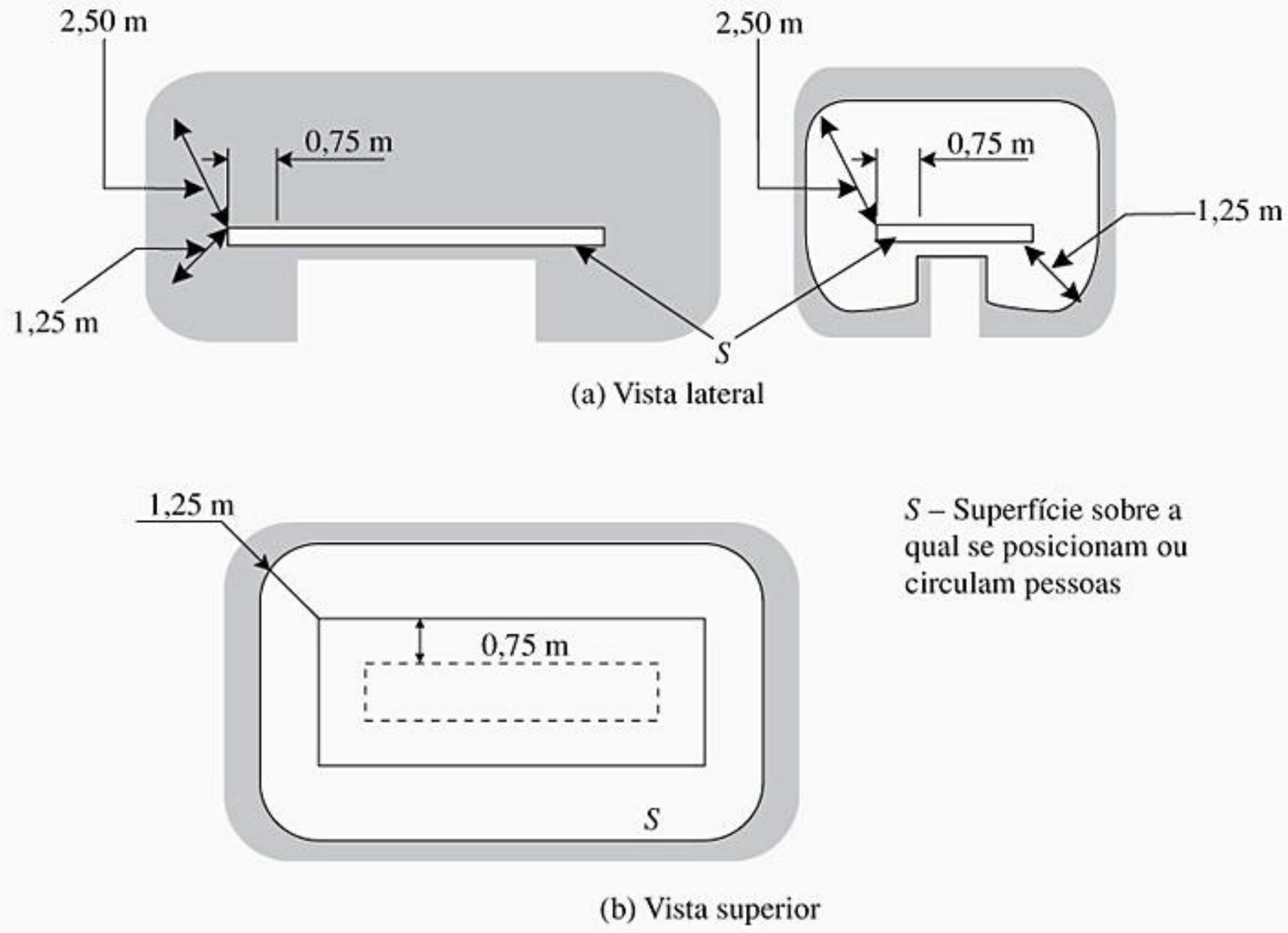


Figura 3.26 ■ Zona de alcance normal

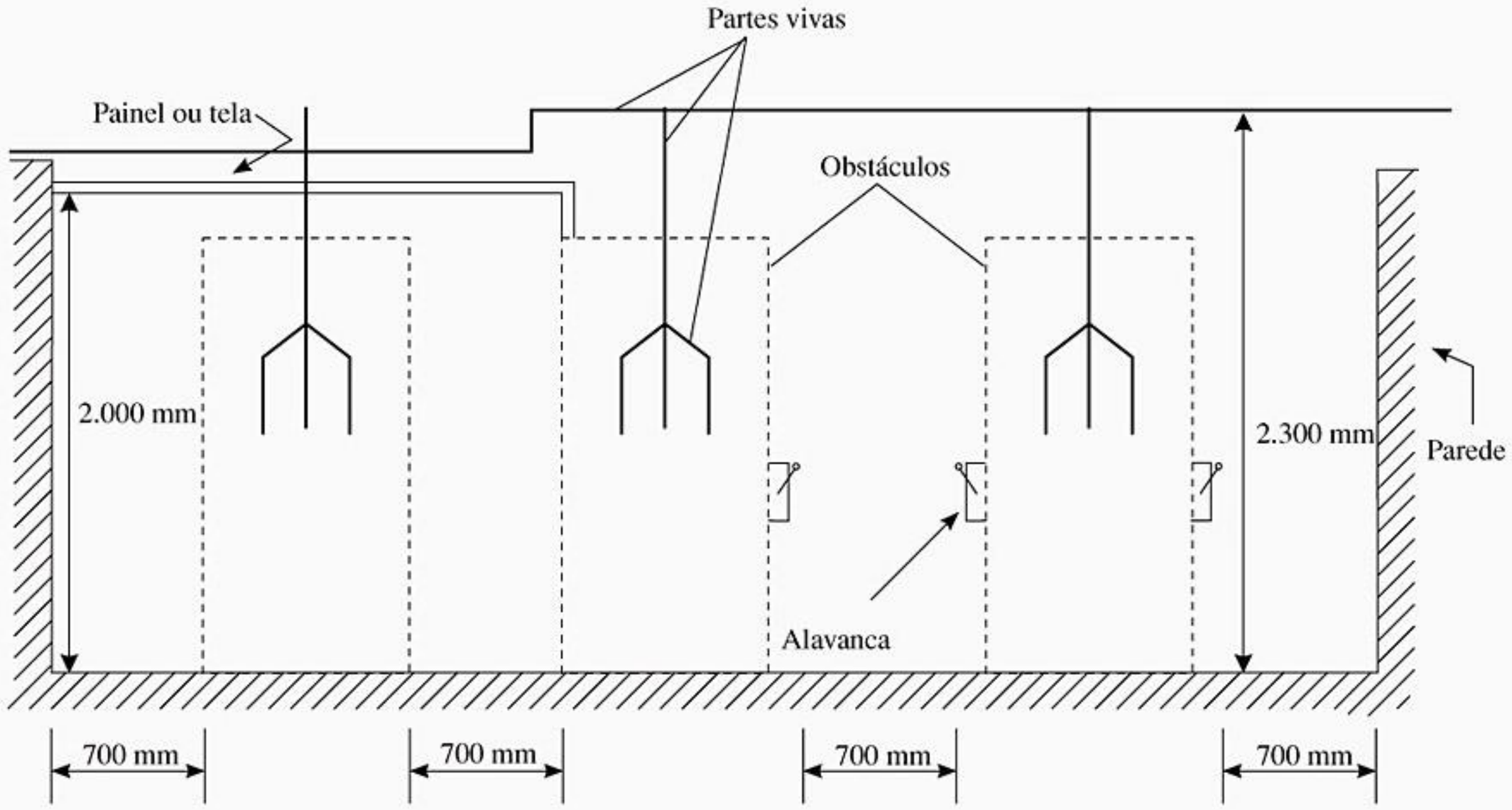


Figura 3.27 ■ Passagens destinadas à operação e manutenção em locais com proteção parcial por meio de obstáculos

- Os locais devem ser sinalizados de maneira clara e visível; não é possível entrar nos locais, a não ser com o auxílio ou a liberação de algum dispositivo especial.
- As portas de acesso aos locais devem permitir a fácil saída das pessoas, abrindo no sentido da fuga (abrindo para fora). A abertura das portas, pelo lado interno dos locais, deve ser possível sem o uso de chaves,

mesmo que as portas sejam fechadas à chave pelo lado de fora.

- As passagens cuja extensão for superior a 20 m devem ser acessíveis nas duas extremidades, recomendando-se que as passagens de serviço menores, mas com comprimento superior a 6 m, também sejam acessíveis nas duas extremidades.
- As passagens livres devem obedecer às distâncias mínimas indicadas na Tabela 3.11 e ilustradas nas figuras 3.27, 3.28 e 3.29.

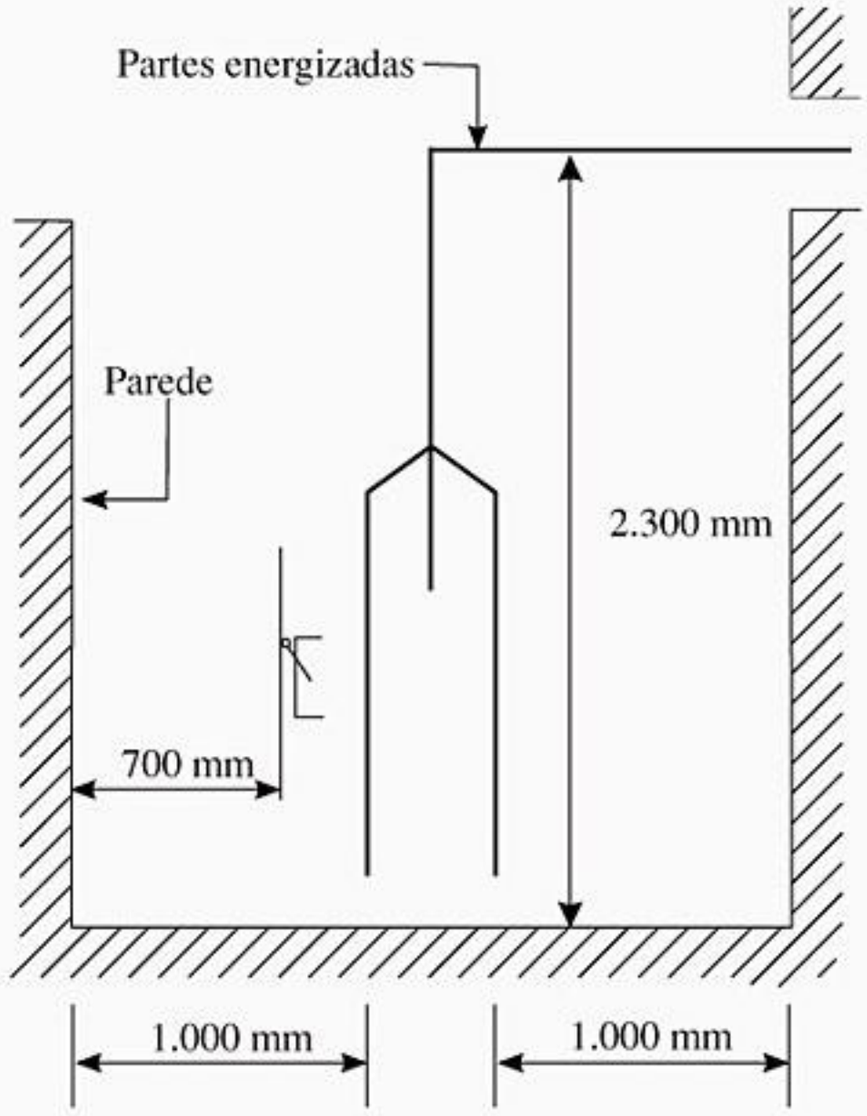
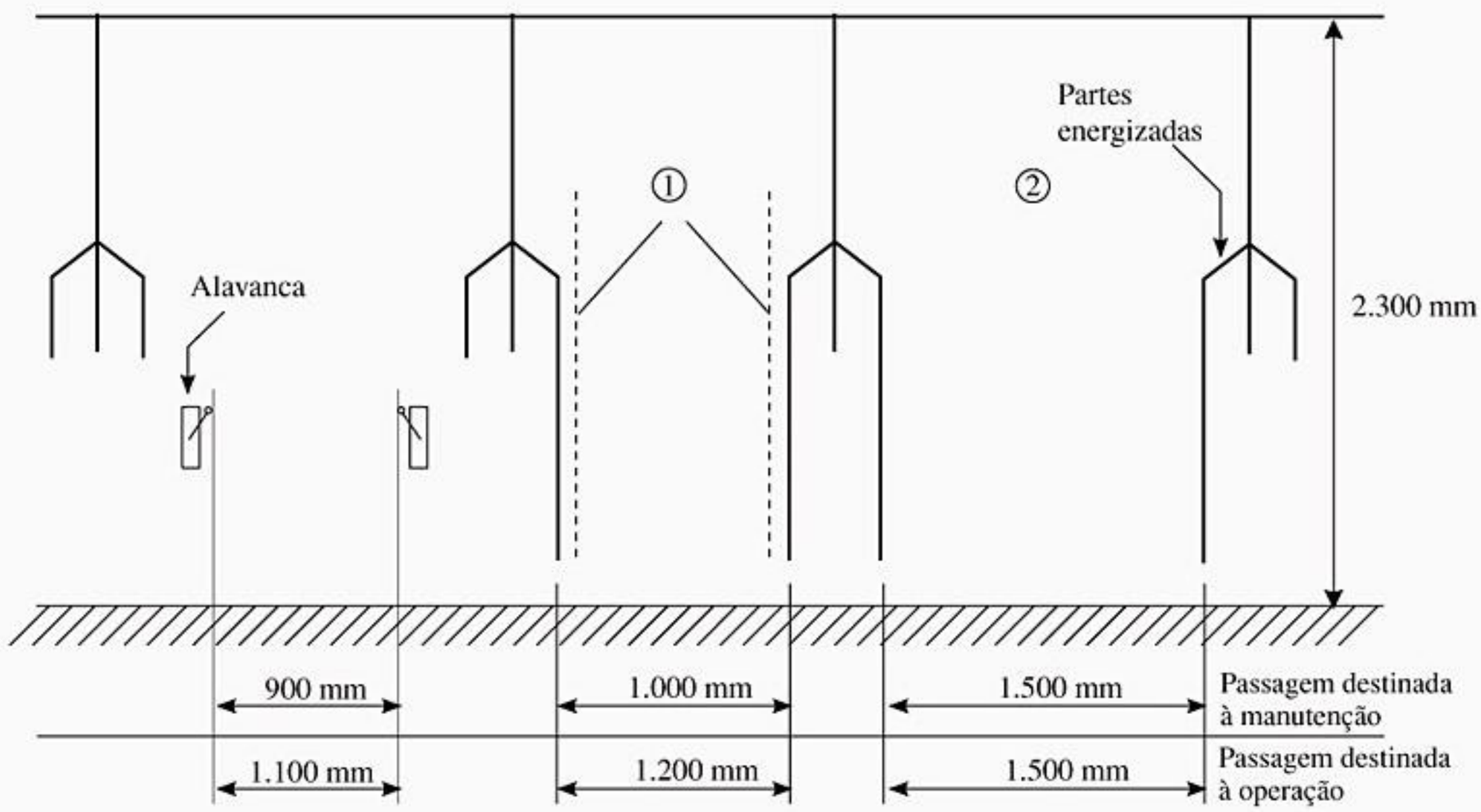


Figura 3.28 ■ Passagens sem proteção com partes energizadas de um único lado



Legenda:

1. Caso em que todo trabalho de manutenção é precedido da colocação de barreiras protetoras.
2. Caso em que os trabalhos de manutenção não são precedidos da colocação de barreiras protetoras.

Figura 3.29 ■ Passagens destinadas à operação e à manutenção em locais sem proteção com partes energizadas (vivas) dos dois lados

EXERCÍCIOS

1. Quais são os principais efeitos que uma corrente elétrica externa pode produzir no corpo humano?
2. Defina o que é o conceito "limite de largar" de uma corrente elétrica.
3. Quais são os valores médios do "limite de largar" em corrente alternada para 50 e 60 Hz para homens e mulheres?
4. O que é o fenômeno da fibrilação ventricular?
5. Quais são as principais variáveis que influem no valor da resistência elétrica do corpo humano?
6. Como se definem proteção básica e proteção supletiva?
7. O que são proteção passiva e proteção ativa contra choques elétricos?
8. Quais as condições de influências externas devem ser observadas na seleção das medidas de proteção contra choques elétricos (por contato direto ou indireto)?
9. Qual é a diferença entre aterramento e eqüipotencialização?
10. Que valores podem ter as duas letras utilizadas na simbologia dos esquemas básicos de aterramento, para representar a função do aterramento da fonte de alimentação da instalação (transformador, no caso mais comum, ou gerador) e das massas?

4

Planejamento da instalação

4.1 Demanda e curva de carga

Demanda

Em uma instalação predial qualquer (industrial, comercial, residencial, entre outras), a potência elétrica instantânea consumida (ver Figura 4.1) — a potência ativa — é variável em função do número de cargas ligadas e da soma das potências consumidas por carga. Para fins de projeto de uma instalação elétrica, é mais conveniente trabalhar com um valor médio da potência, e utiliza-se a *demanda* (D), que é o valor médio da potência ativa (P) em um intervalo de tempo (Δt) especificado (geralmente Δt = 1/4 h = 15 min, ou seja,

$$D = \frac{1}{\Delta t} \int_{t}^{t+\Delta t} P(t) \cdot dt \qquad (4.1)$$

como mostra a Figura 4.1.

A definição dada pela Expressão 4.1 indica que a demanda é medida em unidades de potência ativa (W, kW). Pode-se também definir uma *demanda reativa*, D_Q (var, kvar), e uma *demanda aparente*, D_s (va, kVA), obtidas por:

$$\left.\begin{aligned} D_Q &= D \cdot \operatorname{tg} \Phi \\ D_s &= \frac{D}{\cos \Phi} \end{aligned}\right\} \qquad (4.2)$$

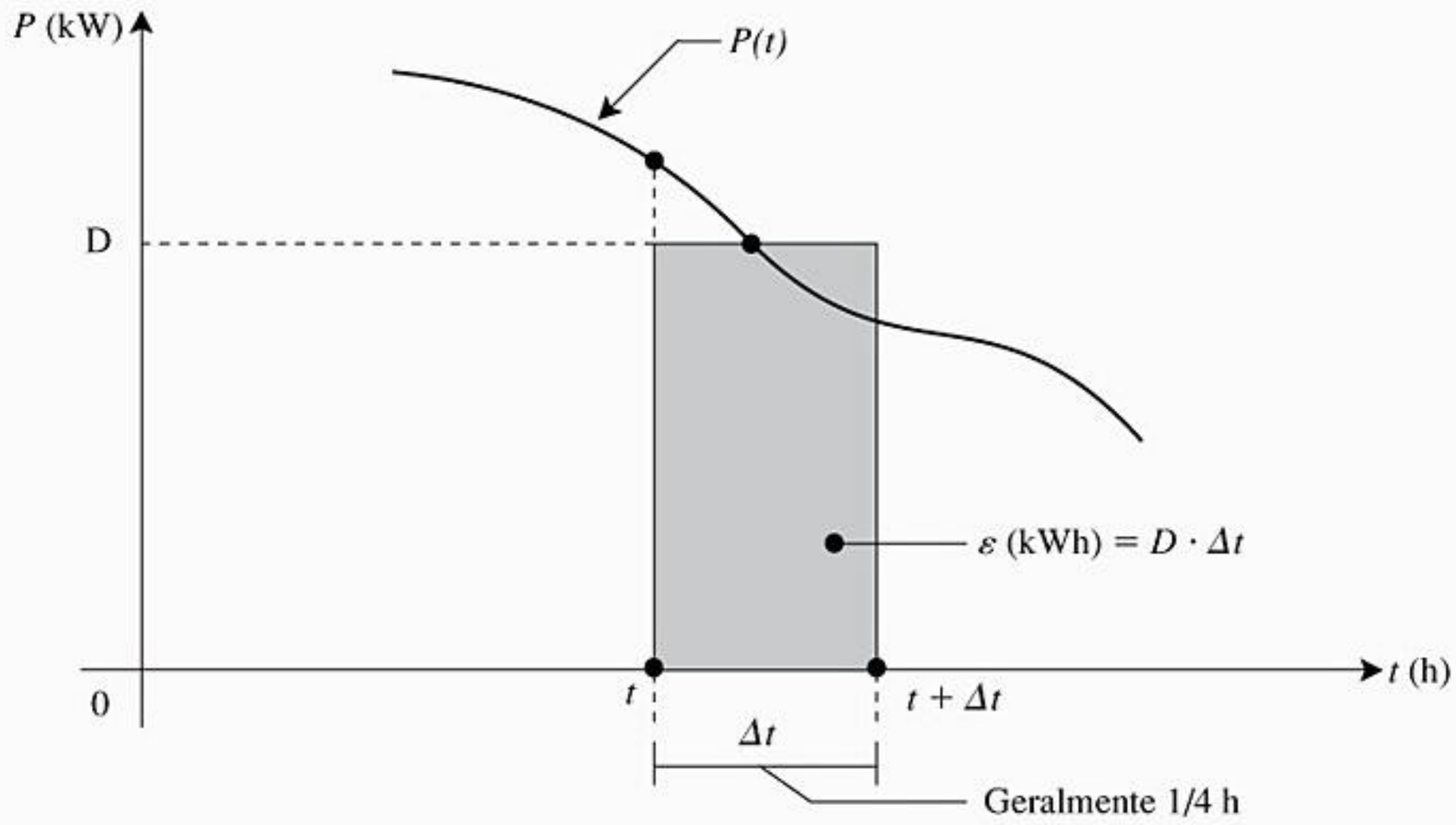


Figura 4.1 ■ Curva de carga e definição da demanda D

onde Φ é o ângulo cujo cosseno é o fator de potência da instalação elétrica.

A área entre a curva $P(t)$ e o eixo dos tempos é a energia consumida pela instalação no intervalo considerado. De acordo com a Figura 4.1, pela própria definição de demanda, a área cinza é a energia ε consumida durante Δt, ou seja,

$$\varepsilon = D \cdot \Delta t = \int_{t}^{t+\Delta t} P(t) \cdot dt \qquad (4.3)$$

Curva de carga

Define-se *curva de carga* como a curva que apresenta a demanda em função do tempo, $D(t)$, para dado período T (ver Figura 4.2). Na verdade, ela é constituída por patamares; no entanto, é mais comum apresentá-la como uma curva, resultado da união dos pontos médios das bases superiores dos retângulos de largura Δt. Para um período T, a ordenada máxima da curva define a *demanda máxima* (D_M). A energia total consumida no período ε_T é medida pela área entre a curva e o eixo dos tempos, ou seja,

$$\varepsilon_T = \int_0^T D(t) \cdot dt \qquad (4.4)$$

A *demanda média* (D_m) é definida como a altura de um retângulo cuja base é o período T e cuja área é a energia total (ε_T), ou seja,

$$D_m = \frac{\varepsilon_T}{T} \qquad (4.5)$$

como mostra a Figura 4.3.

A demanda média é, em outras palavras, a demanda constante que uma instalação elétrica deve apresentar para, no período considerado, consumir uma energia igual à que é consumida em funcionamento normal.

Para estudos e análise do desempenho de instalações prediais, a curva de carga diária (ou seja, para $T = 24$ h) é a mais comum, uma vez que cada tipo de instalação possui uma forma característica para sua curva de carga diária. Por um lado, a curva diária típica de um prédio de escritórios é diferente da de um prédio de apartamentos, e ambas são diferentes da de uma indústria química. Por outro lado, em instalações situadas em regiões onde as estações do ano são bem-diferenciadas, as curvas de carga típica variam conforme a época do ano.

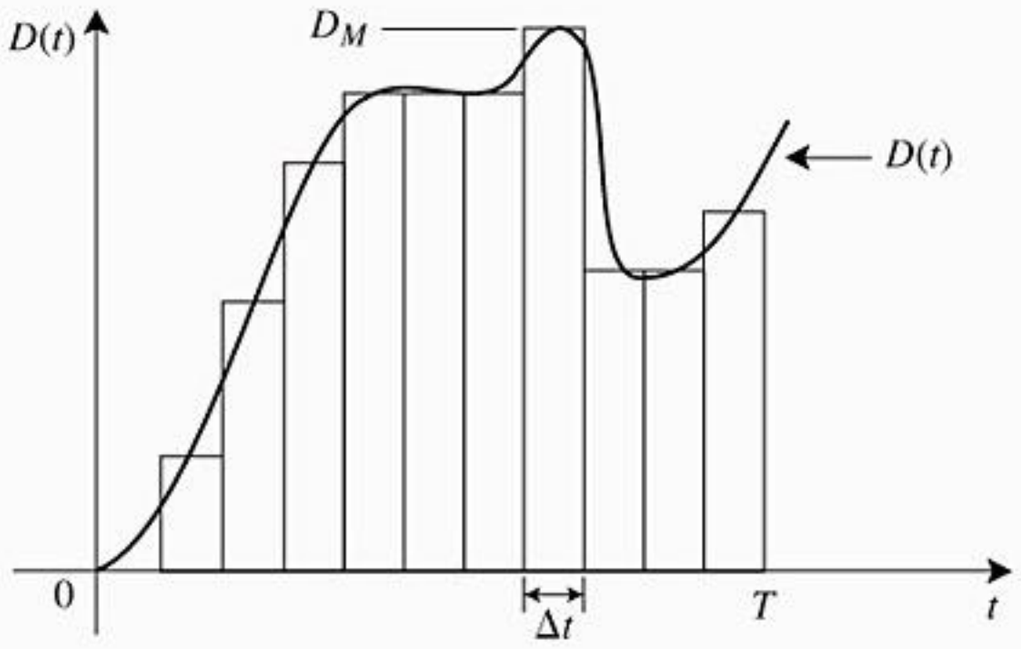


Figura 4.2 ▪ Curva de carga das demandas

É importante observar que os conceitos de demanda e curva de carga apresentados valem não só para uma instalação (como um todo), mas também para os diversos setores considerados em uma instalação, para um circuito apenas ou mesmo para um conjunto de equipamentos elétricos.

É comum indicar, com a curva de carga, a potência instalada da instalação ou do setor considerado, como é apresentado na Figura 4.3.

4.2 Fatores de projeto

Fatores de projeto são os fatores utilizados durante o projeto de uma instalação elétrica, mais precisamente na fase de *quantificação* (ver Seção 4.6), para a determinação das demandas máximas dos diversos setores da instalação e da demanda máxima global. Nesta seção, são apresentados os fatores de *utilização*, de *demanda* e de *diversidade*, bem como suas definições e características. Na Seção 4.3, serão analisados os detalhes de sua aplicação prática.

É apresentada, também nessa seção, a definição do *fator de carga*, que, embora não seja especificamente um fator de projeto, pode ser utilizado no planejamento da instalação (por exemplo, quando for necessário estimar a demanda média ou o consumo de energia).

Fator de utilização

No regime de funcionamento de um equipamento de utilização pode ocorrer de a potência efetivamente absorvida seja inferior à respectiva potência nominal. É, por exemplo, o caso dos motores elétricos, suscetíveis de funcionar abaixo de sua carga plena. O *fator de utilização* (u) é definido, para um equipamento de utilização, como a razão da potência (máxima) efetivamente absorvida (P_M) — também chamada de potência de trabalho —, para sua potência nominal (P_N), ou seja,

$$u = \frac{P_M}{P_N} \qquad (4.6)$$

onde, logicamente, $u \leq 1$.

O fator de utilização, citado em muitas normas européias e na antiga NBR 5410:1980, só pode ser aplicado no projeto quando há um perfeito conhecimento do equipamento e de suas condições de uso. Embora esse fator não tenha sido incluído nas edições posteriores da norma, ainda pode ser útil em situações específicas.

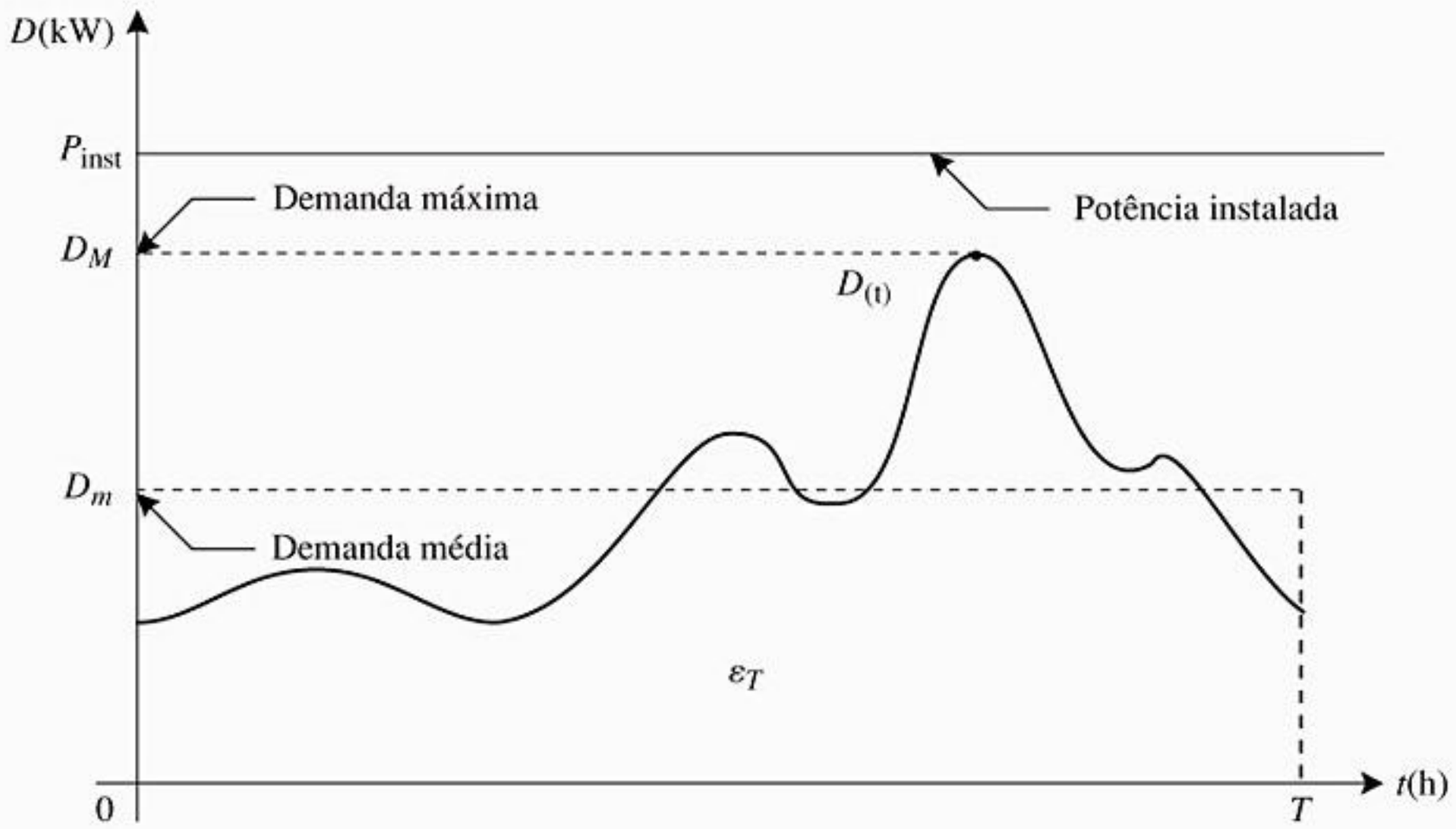


Figura 4.3 ■ Curva de carga e potência instalada

Assim, em uma instalação industrial usual, os equipamentos a motor apresentam, geralmente, fatores de utilização na faixa de 0,3 a 0,8; para tais equipamentos, a exemplo de outras normas, a NBR 5410:1980 admitia, na falta de indicação mais precisa, o uso de $u = 0{,}75$. Por sua vez, para os aparelhos de iluminação, para equipamentos de aquecimento e de ar-condicionado, a norma recomendava que o fator de utilização fosse sempre considerado igual a 1.

É muito importante observar que, se mal-aplicado, o fator de utilização pode conduzir ao subdimensionamento de circuitos (terminais e de distribuição). Portanto, seu emprego *deve ser cercado de todo o cuidado*.

Fator de demanda

O *fator de demanda de um conjunto de equipamentos de utilização* (g') é definido pela NBR IEC 60050 (826) como a razão entre a soma das potências nominais dos equipamentos — de um conjunto de equipamentos de utilização suscetíveis de funcionar simultaneamente em determinado instante — e a potência instalada do conjunto. Geralmente, o instante considerado é aquele correspondente à demanda máxima da instalação ou da parte da instalação que alimenta o conjunto.

Define-se também o *fator de demanda da instalação ou de parte da instalação* (g') como a razão entre a *potência de alimentação*, ou da parte considerada da instalação, e a respectiva *potência instalada*.

Por sua vez, a *potência de alimentação* (de uma instalação ou de parte de uma instalação), D_M, é considerada a soma das potências nominais de todos os equipamentos de utilização existentes ou previstos na instalação, ou na parte considerada da instalação, suscetíveis de funcionar simultaneamente. A potência de alimentação deve corresponder à demanda máxima presumida de uma instalação, ou de uma parte da instalação, em um período de 24 horas.

A *potência instalada* (de uma instalação, de uma parte da instalação ou de um conjunto de equipamentos de utilização), P_{inst}, é a soma das potências nominais de todos os equipamentos de utilização existentes ou previstos na instalação, na parte considerada da instalação ou no conjunto de equipamentos considerado.

Dessa forma, temos:

$$g' = \frac{D_M}{P_{inst}} \tag{4.7}$$

Esse fator, sempre inferior à unidade, deve ser aplicado a "pontos de distribuição" da instalação, isto é, a quadros de distribuição em geral. Leva em conta a provável não simultaneidade no funcionamento dos equipamentos ligados a um ponto de distribuição e, nessas condições, sua aplicação exige o conhecimento detalhado do tipo de instalação que está sendo projetado.

Seja uma instalação elétrica, seja um setor de uma instalação, constituída(o) por três conjuntos de cargas, A, B e C (por exemplo, motores, iluminação e tomadas de corrente). Cada conjunto possui sua potência instalada e sua curva de carga diária, e as demandas máximas (D_{MA}, D_{MB} e D_{MC}) ocorrem nos instantes t_A, t_B e t_C, respectivamente, como mostra a Figura 4.4.

Os fatores de demanda dos setores A, B e C, são, respectivamente:

$$g'_A = \frac{D_{MA}}{P_{inst,\,A}} \text{ e } g'_B = \frac{D_{MB}}{P_{inst,\,B}};\ g'_C = \frac{D_{MC}}{P_{inst,\,C}}$$

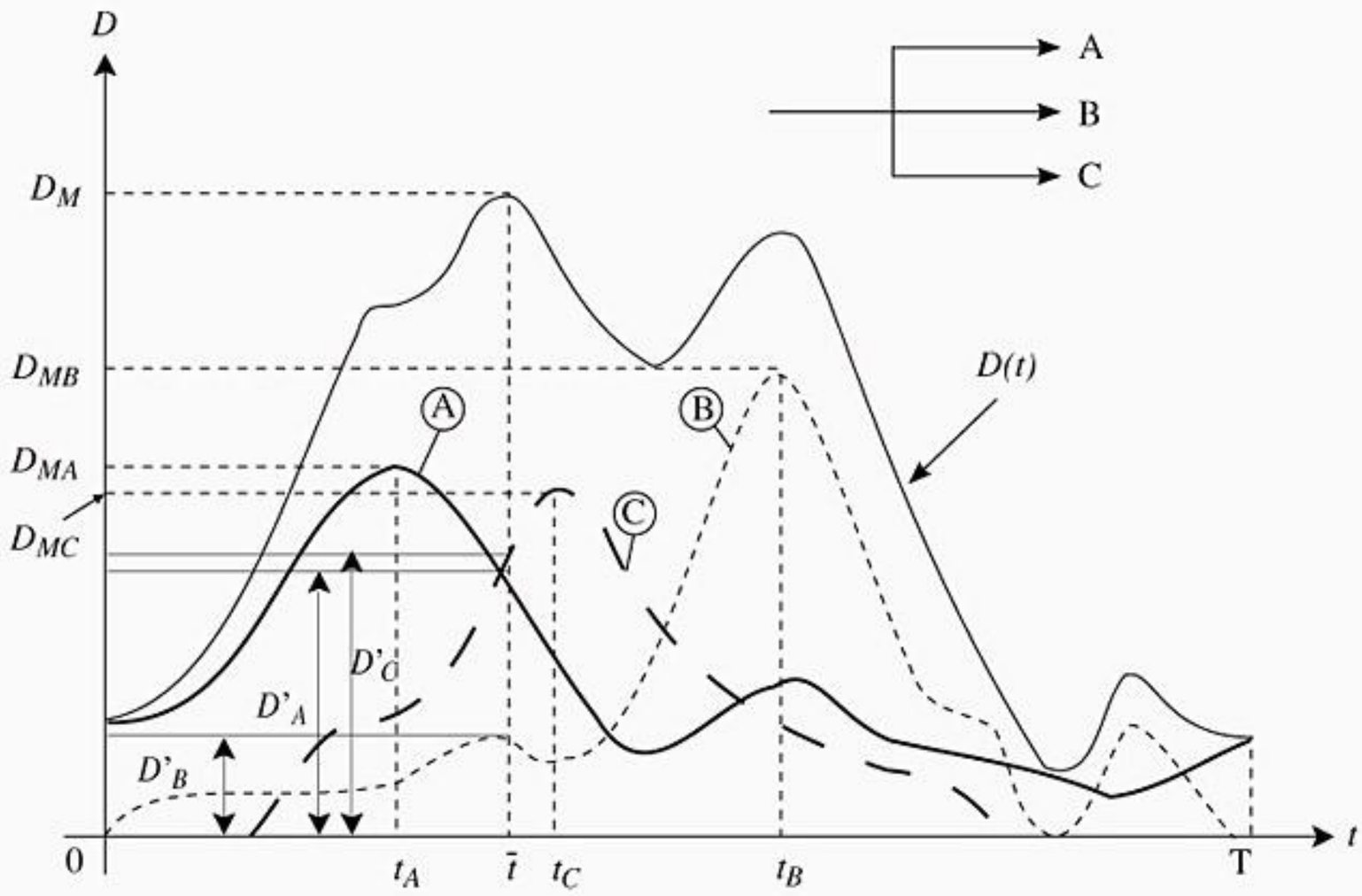


Figura 4.4 ▪ Curvas de carga dos conjuntos de cargas A, B e C de uma instalação e curva de carga total

A curva de carga total é a soma das três curvas e apresenta uma demanda máxima D_M no instante $\bar{t}$. Então, para a instalação ou setor considerado, é possível definir um fator de demanda g', que será

$$g' = \frac{D_M}{P_{\text{inst}}}$$

onde P_{inst} é a potência instalada total, que é igual à soma das potências instaladas dos conjuntos, ou seja,

$$P_{\text{inst}} = P_{\text{inst},A} + P_{\text{inst},B} + P_{\text{inst},C}$$

Para determinar a demanda máxima, D_M, das potências instaladas dos conjuntos de cargas, é necessário definir, para cada conjunto de cargas, o *fator de demanda prático* (g_i), definido como a razão da demanda do conjunto (D'_i) no instante em que ocorre a demanda máxima total D_M, instante $\bar{t}$, para a potência instalada do conjunto ($P_{\text{inst},i}$), ou seja,

$$g_i = \frac{D'_i}{P_{\text{inst},i}} \tag{4.8}$$

A demanda máxima da instalação ou do setor considerado pode ser escrita, para *n* conjuntos de carga, como:

$$D_M = \sum_{i=1}^{n} g_i \cdot P_{\text{inst},i} \tag{4.9}$$

No caso apresentado na Figura 4.4, tem-se:
fatores de demanda práticos:

$$g_A = \frac{D'_A}{P_{\text{inst},A}},\ g_B = \frac{D'_B}{P_{\text{inst},B}} \text{ e } g_C = \frac{D'_C}{P_{\text{inst},C}}$$

demanda máxima total:

$$D_M = D'_A + D'_B + D'_C =$$
$$= g_A \cdot P_{\text{inst},A} + g_B \cdot P_{\text{instt},B} + g_C \cdot P_{\text{inst},C}$$

EXEMPLO

A tabela a seguir mostra um exemplo de cálculo de demanda, dos fatores de demanda práticos e da demanda máxima total, com base no que foi apresentado anteriormente.

Nesse caso, o fator de demanda global da instalação será igual a:

$$g' = \frac{21{,}5}{47} = 0{,}457$$

Conjunto de cargas	P_{inst}, i (kW)	D_M, i (kW)	D'_i (kW)	$g'_i = \frac{D_{M_i}}{P_{\text{inst},i}}$	$g_i = \frac{D'_{M_i}}{P_{\text{inst},i}}$	$g_i \cdot P_{\text{inst}}$, i (kW)
A	12	10	9	0,83	0,75	9
B	15	14	4,5	0,93	0,30	4,5
C	20	15	8	0,75	0,40	8
P_{inst} =	47	D_M =	21,5		D_M =	21,5

Em geral, os projetistas não têm disponíveis os valores do fator de demanda prático, pois essa técnica não é usual. Os fatores de demanda típicos são observados e colocados em tabelas para o uso em planejamento e projetos de novas instalações.

Fator de diversidade

Note que, na Figura 4.4, as demandas máximas da instalação e dos setores A, B e C não ocorrem ao mesmo tempo, mas em instantes distintos, uma vez que há uma diversidade de consumo de energia em cada trecho da instalação elétrica.

Desse modo, define-se o *fator de diversidade (d)* para um ponto de distribuição de energia como a razão da soma das demandas máximas dos diversos conjuntos de cargas ligadas ao ponto ($D_{M,i}$) para a demanda máxima do ponto de distribuição (D_M), ou seja:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_{M,i}}{D_M} \tag{4.10}$$

onde o fator de diversidade é, logicamente, maior ou igual a 1.

No exemplo anterior, tem-se:

$$d = \frac{10 + 14 + 15}{21{,}5} = 1{,}81$$

Assim, a demanda máxima de uma instalação ou de um setor de uma instalação do ponto de distribuição (geral) da instalação ou do setor, à qual estão ligados n conjuntos de carga, é dada por:

$$D_M = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_{M,i}}{d} \tag{4.11}$$

Fator de carga

O *fator de carga*, c, é definido para uma instalação como a razão da demanda média, D_m, para a demanda máxima (D_M) da instalação, em dado período T, ou seja:

$$c = \frac{D_m}{D_M} \tag{4.12}$$

sendo $c \leq 1$.

A Figura 4.5 mostra uma curva de carga e indica a demanda média, D_m, e a máxima, D_M.

Trace a reta que une o ponto 0 ao ponto A, situado sobre o eixo vertical traçado na abscissa T, na altura correspondente à ordenada D_M. Essa reta cruza a correspondente D_m no ponto B; desse ponto, baixa-se a vertical que encontra o eixo das abscissas no ponto C. Chama-se a abscissa 0C de *tempo de utilização*, t_u. Dos triângulos semelhantes $0BC$ e $0AD$, pode-se escrever:

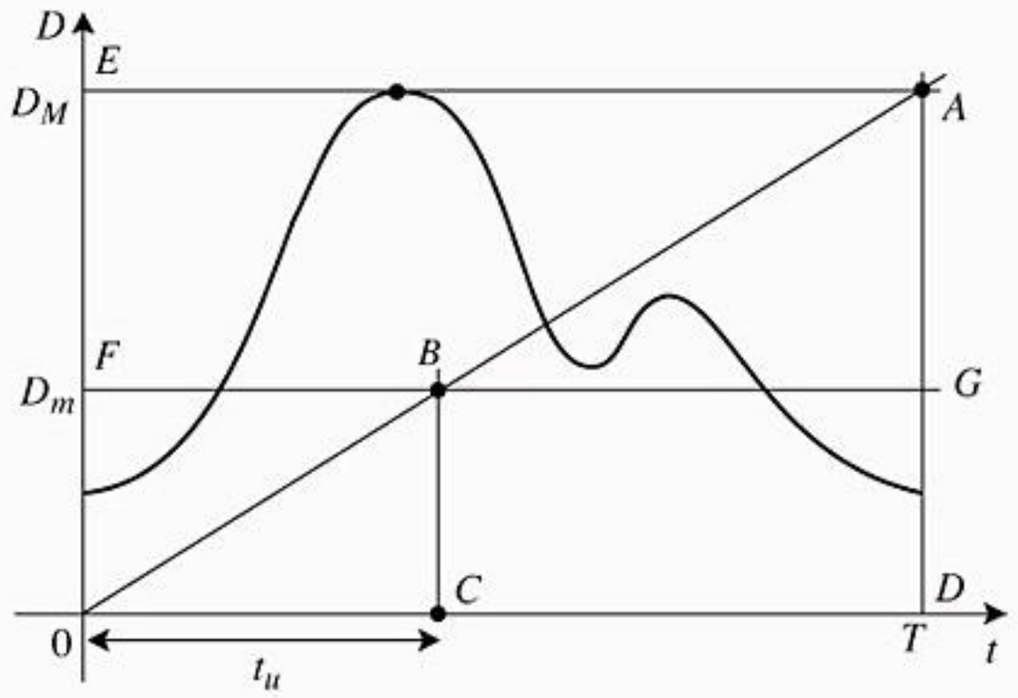


Figura 4.5 ■ Tempo de utilização

$$\frac{0C}{0D} = \frac{BC}{AD}$$

ou seja,

$$\frac{t_u}{T} = \frac{D_m}{D_M} \tag{4.13}$$

Então, da Expressão 4.12, tem-se:

$$c = \frac{t_u}{T} \tag{4.14}$$

Das expressões 4.13 e 4.5, obtém-se:

$$\varepsilon_T = D_m \cdot T = D_M t_u \tag{4.15}$$

onde ε_T é a energia elétrica consumida pela instalação no período T.

A Expressão 4.15 mostra que o tempo de utilização (t_u) é o tempo no qual a instalação deve funcionar com a demanda máxima, para que o consumo de energia seja igual ao consumo referente ao período (real) de funcionamento. A Expressão 4.14, por sua vez, mostra que o fator de carga pode ser definido pela relação entre o tempo de utilização e o período de funcionamento.

Da Expressão 4.12, multiplicando o numerador e o denominador pelo período T e considerando a Figura 4.5, tem-se:

$$c = \frac{D_m \cdot T}{D_M \cdot T} = \frac{\text{área } FGD0}{\text{área } EAD0} \tag{4.16}$$

A área $FGD0$ corresponde à energia consumida, ε_M, no período T, e a área $EAD0$, corresponde à energia, ε_M, que seria consumida durante T, caso fosse mantida a demanda máxima, D_M. Assim, da Expressão 4.16, tem-se:

$$c = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_M} \tag{4.17}$$

e então

$$\varepsilon_T = c \cdot \varepsilon_M \tag{4.18}$$

onde o fator de carga pode ser interpretado como um fator percentual da energia consumida. Em outras palavras, a instalação só consome uma porcentagem igual a c em vez de consumir com a demanda máxima mantida durante o período.

O fator de carga depende do tipo de instalação e do período considerado. Mantida a demanda máxima, quanto maior o período, menor o fator de carga. Em geral, o *fator de carga diário* ($T = 24$ h), considerado o valor médio para os dias úteis, é o mais usado.

Considere agora a instalação cuja curva de carga diária é a mostrada na Figura 4.6.

Seja t_F o tempo de funcionamento (em horas) da instalação. Em relação a t_F, é possível definir uma demanda média D_{m1}, um tempo de utilização t_{u1} e um fator de carga c_1, das expressões 4.12 e 4.13.

$$c_1 = \frac{D_{m1}}{D_M} = \frac{t_{u1}}{t_F} \tag{4.19}$$

Para um período de 24 horas, tem-se uma demanda média $D_{m2} < D_{m1}$, um tempo de utilização t_{u2} e um fator de carga diário $c_2 < c_1$, que é dado por:

$$c_2 = \frac{D_{m2}}{D_M} = \frac{t_{u2}}{24} \tag{4.20}$$

O consumo diário será, da Expressão 4.15, igual a:

$$\varepsilon_T = D_M t_{u1} = D_M t_{u2} \tag{4.21}$$

do qual se tem que:

$$t_{u1} = t_{u2} = t_u \tag{4.22}$$

Pode-se ainda escrever, das expressões 4.18 e 4.20, que

$$t_u = c_1 \ \ t_F = c_2 \cdot 24 \tag{4.23}$$

ou, então,

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{t_F}{24}$$

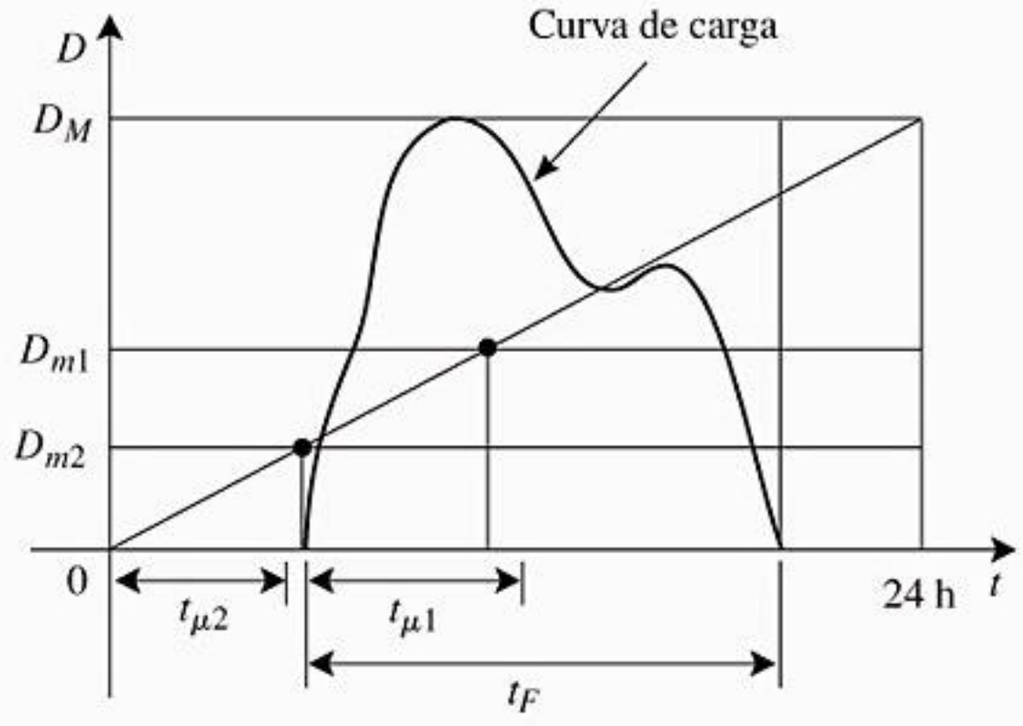


Figura 4.6 ▪ Carga operando em um ciclo menor que 24 horas

Portanto,

$$c_2 = c_1 \cdot \frac{t_F}{24} \tag{4.24}$$

Dessa maneira, o fator de carga diário é igual ao produto do fator de carga relativo ao tempo de funcionamento diário pela relação entre esse tempo de funcionamento e 24 horas.

EXEMPLO

Considere uma indústria na qual o consumo mensal de energia elétrica gira em torno de 50.611 kWh, cuja conta indica 275 kW como a demanda máxima. A indústria funciona, em média, 16,25 horas por dia e 25 dias por mês.

A energia consumida (em média) em um dia será igual a:

$$\varepsilon_T = \frac{50.611}{25} = 2.024{,}44 \text{ kWh}$$

A demanda média relativa ao tempo de funcionamento ($t_F = 16{,}25$ h) será, da Expressão 4.15, igual a:

$$D_{m1} = \frac{2.024{,}44}{16{,}25} = 124{,}58\, kW$$

O fator de carga relativo ao tempo de funcionamento será, da Expressão 4.19, igual a:

$$c_1 = \frac{124{,}58}{275} = 0{,}453 = 45{,}3\%$$

Para o fator de carga diário, tem-se, da Expressão 4.24:

$$c_2 = 0{,}453 \cdot \frac{16{,}25}{24} = 0{,}307 = 30{,}7\%$$

A demanda média diária será igual a:

$$D_{m2} = c_2 D_M = 0{,}307 \cdot 275 = 84{,}42 \text{ kW}$$

4.3 Potência de alimentação e corrente de projeto

Potência de alimentação

Como vimos anteriormente, a *potência de alimentação* deve corresponder à demanda máxima presumida de uma instalação, ou de uma parte da instalação, em um período de 24 horas.

De acordo com a NBR 5410, a determinação da potência de alimentação é essencial para a concepção econômica e segura de uma instalação, dentro de limites adequados de elevação de temperatura e de queda de tensão. Na determinação da potência de alimentação,

devem ser computados os equipamentos de utilização a ser alimentados, com suas respectivas potências nominais e, em seguida, consideradas as possibilidades de não simultaneidade de funcionamento desses equipamentos, bem como capacidade de reserva para futuras ampliações.

Na elaboração de um projeto de instalação elétrica, deve ser determinada a potência de alimentação de cada um dos pontos de distribuição, seja do ponto de alimentação de toda a instalação (quadro de distribuição geral), dos quadros terminais, seja dos quadros de distribuição intermediários. Desses valores, serão dimensionados os condutores e os dispositivos de proteção dos diversos circuitos de distribuição.

Considere um ponto de distribuição de uma instalação ao qual estejam ligados, em diversos circuitos, n conjuntos de cargas, cada um com uma potência instalada $P_{\text{inst},i}$, um fator de demanda prático g_i e um fator de potência cos Φ_i, e m cargas individuais, cada uma com uma potência nominal de entrada $P_{N,j}$ e um fator de potência cos Φ_j. A potência de alimentação do ponto é igual a:

$$P_A = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{inst,i}} \cdot g_i + \sum_{j=1}^{m} P_{\text{N},j} \qquad (4.25)$$

e a correspondente potência (de alimentação) reativa, igual a:

$$Q_A = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{inst,i}} \cdot g_i \cdot \text{tg}\ \Phi_i + \sum_{j=1}^{m} P_{\text{N},j} \cdot \text{tg}\ \Phi_j \qquad (4.26)$$

A potência de alimentação aparente do ponto de distribuição é igual a:

$$S_A = \sqrt{P_A^2 + Q_A^2} \qquad (4.27)$$

A Figura 4.7 apresenta uma carga com o consumo real estimado na hora da ponta.

O fator de potência do ponto de distribuição, em condições de demanda máxima, é igual a:

$$\cos \Phi = \frac{P_A}{S_A} \qquad (4.28)$$

Corrente de projeto

A *corrente de projeto* (I_B) do circuito de distribuição que alimenta o ponto de carga é igual a:

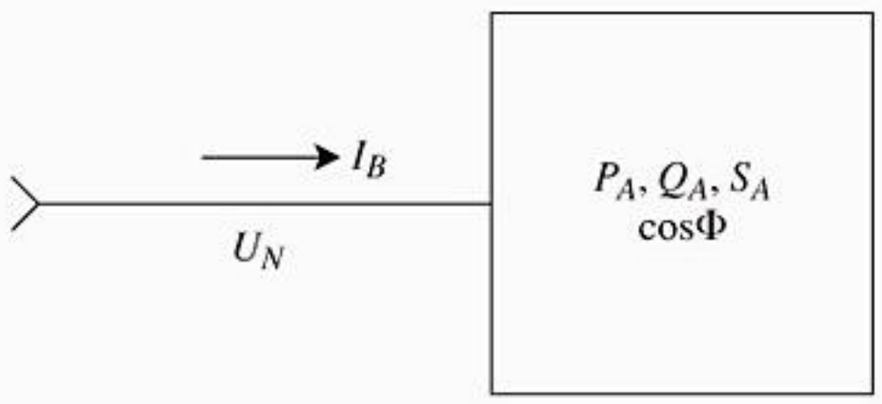


Figura 4.7 ■ Ponto de distribuição

$$I_B = \frac{P_A}{t \cdot U_N \cdot \cos \Phi} = \frac{S_A}{t \cdot U_N} \qquad (4.29)$$

onde U_N é a tensão nominal do circuito e t é um fator que vale $\sqrt{3}$ para os circuitos trifásicos e 1 para os circuitos monofásicos.

Potência nominal e fator de potência

No projeto de uma instalação, para determinar a potência de alimentação dos diversos quadros de distribuição — ou seja, dos diversos setores da instalação, incluindo o quadro geral, cuja potência de alimentação é a da própria instalação como um todo —, é necessário conhecer a potência nominal e o fator de potência de todos os pontos de utilização previstos, como:

- Pontos de luz (aparelhos de iluminação).
- Pontos de tomadas ou pontos de uso específico (onde são ligados, geralmente, equipamentos fixos).
- Pontos de tomadas de uso geral (onde são ligados, em geral, equipamentos estacionários, móveis ou portáteis).

Devem-se considerar:

- Para cada ponto de luz e tomada ou ponto de uso específico, a potência nominal de entrada e o fator de potência nominal do equipamento previsto para ser ligado.
- Para os pontos de tomadas de uso geral, em princípio, a cada tomada devem ser atribuídos a potência nominal de entrada e o fator de potência do equipamento mais potente com possibilidade de ser ligado.

O Quadro 4.1 apresenta os valores típicos de rendimentos de lâmpadas.

Uma vez determinadas as potências nominais de vários pontos de utilização, podem-se obter, ao somá-las, as potências nominais correspondentes e as potências instaladas dos diversos conjuntos de cargas. Somando esses valores com as potências nominais das cargas individuais existentes em cada setor, é possível obter as potências dos diversos setores e a potência instalada global da instalação.

Para calcular as diversas potências de iluminação, devem-se utilizar as expressões 4.25, 4.26 e 4.27, aplicando criteriosamente os fatores de demanda práticos convenientes.

Fatores de demanda

A escolha dos fatores de demanda a serem utilizados no projeto de uma instalação elétrica deve levar em consideração, no caso mais geral:

- As atividades previstas para os diversos locais do prédio.

Quadro 4.1 ■ Valores típicos de rendimentos de lâmpadas

A determinação da potência nominal dos aparelhos de iluminação, bem como sua quantidade e localização, deve, em princípio, ser obtida de um projeto específico de iluminação (ver Capítulo 16).
Para os aparelhos de iluminação incandescente, a potência nominal a ser considerada é a soma das potências nominais das lâmpadas.
Para os aparelhos de iluminação à descarga (com lâmpadas a vapor de mercúrio, fluorescentes, a vapor de sódio, entre outras), a soma das potências nominais das lâmpadas corresponde à potência de saída. À potência de entrada do circuito das lâmpadas, devem-se considerar as perdas nos reatores ou transformadores e as correntes harmônicas; o rendimento já leva em conta esses fatores. Esses aparelhos apresentam os seguintes rendimentos:

- Vapor de sódio a baixa pressão: de 0,7 a 0,8
- Vapor de sódio a alta pressão: 0,9
- Fluorescente: de 0,54 a 0,83
- Vapor de mercúrio: de 0,87 a 0,95
- Iodeto metálico: de 0,9 a 0,95

Os valores típicos do fator de potência dos aparelhos de iluminação à descarga são 0,5 para os aparelhos não compensados e 0,85 para os compensados.

- O funcionamento previsto para os diferentes equipamentos de utilização. No caso específico de equipamentos de aquecimento e de refrigeração, devem ser considerados os fatores climáticos.
- As possibilidades de alteração de layout de equipamentos, isto é, a flexibilidade necessária nos diversos setores do prédio, no que diz respeito aos circuitos.
- As condições econômicas locais.

A adoção de fatores de demanda muito baixos conduz ao subdimensionamento do circuito que alimenta o ponto de distribuição considerado. Esse fato, em princípio, causará problemas principalmente na hora do pico do consumo cuja corrente real será maior que a projetada. Com o tempo, esse sobreaquecimento diminuirá a vida útil da isolação, colocando em risco toda a instalação. Por sua vez, a utilização de um fator de demanda maior que a real produz um superdimensionamento da instalação elétrica, que, do ponto de vista da segurança, é ótimo, mas penaliza o lado econômico.

A Tabela 4.1 apresenta os valores típicos dos fatores de demanda globais e dos fatores de carga diários para vários ramos de atividade. As tabelas 4.2 a 4.6 mostram os valores típicos dos fatores de demanda práticos em diversas situações e são os resultados da experiência de companhias concessionárias e de projetistas. Em particular, são mostradas algumas tabelas da concessionária AES Eletropaulo, mas isso deve ser tomado pelo leitor apenas como exemplo. É importante destacar que essas tabelas podem não ser adequadas em algumas situações, tendo em vista as particularidades da concessionária de

Tabela 4.1 ■ Valores típicos do fator de demanda global (g) e do fator de carga diário (c) para diversos tipos de instalações. (Fonte: Cesp)

Ramo de atividade da empresa	Potência instalada	*g*	*c*
Extração de minerais			
1 – Pedreira.		0,64	0,16
2 – Extração de minerais metálicos e não metálicos (extração de minerais; extração de areia; extração e beneficiamento de minerais; mineração de argila, talco e xisto).	Até 200 kW	0,43	0,17
	Acima de 200 kW	0,57	0,33
Produtos minerais não metálicos			
1 – Britamento de pedra (britamento de granito; britamento de pedras; pedreira e britador associados).	Até 500 kW	0,55	0,15
2 – Aparelhamento de pedras, mármore, granito, serraria de granito.		0,51	0,39
3 – Fabricação de cal.			
	Até 500 kW	0,47	0,17
	Acima de 500 kW	0,62	0,74
4 – Cerâmica (sem especificação).	Até 150 RW	0,79	0,22
	Acima de 150 kW	0,62	0,38

(continua)

(continuação)

Ramo de atividade da empresa	Potência instalada	*g*	*c*
Cerâmica			
5 – Cerâmica de tijolos, telhas e telhões	Até 75 kW	0,82	0,24
	Acima de 75 kW	0,68	0,22
6 – Cerâmica de manilhas, associada ou não a telhas, lajotas, tubos e conexões	Até 140 kW	0,57	0,21
	Acima de 140 kW	0,69	0,29
7 – Cerâmica de lajotas, associada ou não a tijolos, telhas, tubos e guias		0,51	0,24
8 – Cerâmica de refratários		0,48	0,27
9 – Pisos cerâmicos, vitrificados, esmaltados, ladrilhos e pastilhas	Até 250 kW	0,62	0,39
	Acima de 250 kW	0,56	0,64
10 – Louças e porcelanas.		0,62	0,48
11 – Cerâmica de material vazado, associado ou não a outras cerâmicas		0,65	0,24
12 – Artefatos de cimento (cimento amianto, chapa de cimento, telhas; caixas d'água)		0,28	0,36
13 – Fabricação e elaboração de vidro (de fibras de vidro, fábrica de garrafas, vidraria)		0,67	0,61
14 – Moagem de pó calcário, mineração e moagem de calcário, pó calcário)	Até 100 kW	0,75	0,15
	Acima de 100 kW	0,65	0,30
Metalurgia			
1 – Metalurgia (metalurgia, redução e refino de cobre, fundição, recuperação de metais)	Até 300 kW	0,28	0,22
	Acima de 300 kW	0,37	0,43
2 – Laminação e metais		0,42	0,22
3 – Metalurgia: diversos (fábrica de arames, esquadrias metálicas, artefatos de metais, armações e estruturas metálicas, serralharias, cutelaria)	Até 150 kW	0,28	0,16
	Acima de 150 kW	0,25	0,31
Mecânica			
1 – Fabrição de máquinas operatrizes (indústria de máquinas pesadas, fundição de máquinas, indústria mecânica, indústria de máquinas e equipamentos, indústria de máquinas-ferramentas)	Até 500 kW	0,25	0,23
	Acima de 500 kW	0,25	0,37
2 – Fabricação de máquinas agrícolas (fabricação de arados, de peças de tratores e de máquinas, implementos e ferramentas agrícolas)		0,35	0,25
3 – Indústria de ferramentas agrícolas e indústrias mecânicas diversas (pregos, correntes, panelas, caldeirões, frigideiras, enxadas, enxadões, peneiras, adubadeiras)		0,48	0,19
Materiais elétricos e de comunicações			
1 – Indústria de transformadores e equipamentos elétricos		0,34	0,33
2 – Fabricação de material elétrico e de comunicações: diversos (indústria de eletrofones, geradores, equipamento elevador de carga, controles elétricos, chaves elétricas, válvulas, instalações termelétricas industriais)			0,44
Material de transporte			
1 – Estaleiro (oficina naval, oficina mecânica para conserto de barcos, instalações navais)		0,26	0,32
2 – Indústria de rodas		0,35	0,25
3 – Indústria de escapamentos		0,48	0,28
4 – Indústria de freios para veículos (autopeças) e lanternas		0,23	0,34
5 – Indústria de tanques (tanques, basculantes, reboques, carretas)		0,22	0,19
6 – Indústria de carrocerias		0,47	0,20
7 – Indústria de carrinhos de bebês		0,41	0,23
8 – Indústria de mancais e buchas		0,44	0,25

(continua)

(continuação)

Ramo de atividade da empresa	Potência instalada	*g*	*c*
Madeira			
1 – Serraria e carpintaria		0,41	0,18
2 – Fabricação de material de embalagem (fábrica de caixas de madeira, de embalagens de madeira, palha de madeira para embalagem)		0,35	0,24
3 – Fabricação de artigos de madeira e laminação de madeira (cabides, cruzetas de madeira, artefatos de madeira, portas, janelas, tacos, dormentes, tanoaria)	Até 100 kW	0,59	0,19
	Acima de 100 kW	0,25	0,23
Mobiliário			
1 – Fábrica de móveis (móveis de madeira, de fórmica, estilo colonial, móveis para escritório)	Até 120 kW	0,40	0,19
	Acima de 120 kW	0,30	0,28
2 – Fábrica de móveis e cofres de aço		0,24	0,28
3 – Fábrica de móveis estofados		0,62	0,23
Celulose, papel e papelão			
1 – Fábrica de papel e papelão (indústrias de celulose, papel, cartolina, papelão, papel miolo, papelão ondulado, saco de papel)	Até 100 kW	0,31	0,31
	Acima de 100 kW e até 1.000 kW	0,54	0,56
	Acima de 1.000 kW	0,62	0,66
Borracha, química e produtos farmacêuticos e veterinários			
1 – Indústria e usina de asfalto	Até 300 kW	0,66	0,13
	Acima de 300 kW	0,37	0,20
2 – Diversos (indústria de adubos, produtos farmacêuticos, químicos, veterinários, pirotécnicos, inseticidas, pó e talco para inseticida, pneus e ressolagem, artefatos de borracha, tinta para madeira, cera para assoalho, tintura têxtil, extração de tanino, óleo lubrificante, derivados de petróleo, indústria de sintéticos, resinas artificiais)		0,40	0,37
Couros e peles			
1 – Indústria de peles, curtume e indústria de couro	Até 100 kW	0,43	0,27
	Acima de 100 kW e até 300 kW	0,29	0,21
	Acima de 300 kW	0,45	0,43
Produtos de matéria plástica			
1 – Indústria de plástico (beneficiamento de plástico e espuma)	Até 150 kW	0,54	0,23
	Acima de 150 kW	0,40	0,55
2 – Recuperação de plástico		0,61	0,38
3 – Indústria de embalagem de plástico (sacos plásticos, cordas e fios plásticos)		0,52	0,35
Têxtil			
1 – Beneficiamento e industrialização de algodão		0,25	0,31
2 – Fiação (sem especificação)		0,57	0,58
3 – Torção e rotação de fios: indústria de linhas para coser		0,48	0,68
4 – Indústria têxtil – tecelagem – fábrica de tecidos		0,58	0,40
5 – Fiação e tecelagem associados		0,47	0,45
6 – Fábrica de tecidos de tergal, de tecidos de fios plásticos, de tecidos de algodão		0,47	0,34
7 – Fábrica de meias, rendas, malharia, chenilhas e pelúcia		0,46	0,45
8 – Tecelagem de sacos		0,60	0,29
Vestuário, calçados e artefatos de tecido			
1 – Indústria de chapéus associado ou não a calçados ou a confecções têxteis		0,46	0,24
2 – Indústria de calçados: calçados plásticos	Até 150 kW	0,33	0,27
	Acima de 150 kW	0,59	0,26

(continua)

(continuação)

Ramo de atividade da empresa	Potência instalada	*g*	*c*
Produtos alimentares			
1 – Fábrica de chá, beneficiamento de chá		0,43	0,38
2 – Beneficiamento de café e arroz, associada ou não ao amendoim	Até 100 kW	0,60	0,17
	Acima de 100 kW	0,26	0,18
3 – Beneficiamento de café associado ao algodão à ração, ao cereal – Beneficiamento, torrefação e moagem de café	Até 90 kW	0,50	0,09
	Acima de 90 kW	0,45	0,15
4 – Beneficiamento de amendoim, associado ou não ao café			0,26
5 – Beneficiamento de café		0,45	0,13
6 – Beneficiamento de arroz – máquina de arroz		0,64	0,23
7 – Climatização de banana – industrialização de banana		0,39	0,43
8 – Industrialização de laranja (barracão de laranja, beneficiamento de laranja, comércio e embalagem de laranja)		0,59	0,25
9 – Indústria de gelo	Até 500 kW	0,64	0,53
	Acima de 500 kW	0,62	0,71
10 – Indústria de óleo vegetal – extração de óleo vegetal		0,37	0,47
11 – Fecularia (sem especificação) – fábrica de farinha		0,33	0,16
12 – Fecularia de milho		0,54	0,22
13 – Produtos derivados da mandioca (fecularia, ração de mandioca, industrialização de mandioca)		0,36	0,25
14 – Abate de animais (indústria e comércio de frangos, matadouro, abate de aves, fábrica de conservas de carne)		0,38	0,39
15 – Industrialização de pescado		0,46	0,40
16 – Frigorífico		0,41	0,42
17 – Resfriamento de leite, posto de recebimento de leite	Até 60 kW	0,71	0,30
	Acima de 60 kW e até 100 kW	0,63	0,37
	Acima de 100 kW	0,44	0,38
18 – Pasteurização de leite e/ou manteiga		0,57	0,29
19 – Industrialização de leite (sem especificar a operação, laticínios, usinas de leite, cooperativa de leite)	Até 50 kW	0,78	0,33
	Acima de 50 kW	0,63	0,39
	Acima de 150 kW	0,56	0,48
20 – Derivados de leite (fábrica de leite em pó, queijo, manteiga)		0,33	0,38
21 – Fabricação e refino de açúcar, associado ou não à fabricação de álcool, melaço ou moagem de café		0,28	0,39
22 – Fabricação de massas alimentícias – pastifício		0,50	0,35
23 – Produtos alimentares diversos (fábrica de rações, farinha de ossos, moagem de ração, farelo, geléia, conservas de vegetais, vegetais industrializados)		0,50	0,26
Bebidas			
1 – Indústria de bebidas (cerveja, refrigerantes)	Até 80 kW	0,72	0,16
	Acima de 80 kW	0,49	0,40
2 – Indústria de aguardente (destilaria, alambique, engenho)	Até 140 kW	0,38	0,27
	Acima de 140 kW	0,28	0,42
3 – Engarrafamento de água e de aguardente		0,55	0,34
4 – Extração de suco cítrico e derivados (indústria de sucos, indústria de suco de laranja)		0,73	0,58

(continua)

(continuação)

Ramo de atividade da empresa	Potência instalada	*g*	*c*
Indústria de transformações diversas			
1 – Diversos (fábrica de enfeites metálicos, instrumentos musicais, jóias; indústria gráfica, armações de óculos, perucas, escovas, cadernos)		0,36	0,24
Indústria de construção			
1 – Construção civil (engenharia de construção, canteiro de obras, construtora)		0,45	0,29
2 – Pavimentação – terraplenagem – construção de estradas (construção, pavimentação e/ou conservação de estradas)		0,38	0,31
Agricultura e criação de animais			
1 – Agricultura (estação experimental de agricultura; pesquisa de agricultura)	Até 80 kW	0,25	0,30
	Acima de 80 kW e até 150 kW	0,38	0,37
	Acima de 150 kW	0,18	0,36
2 – Agropecuária	Até 150 kW	0,30	0,31
	Acima de 150 kW	0,19	0,34
3 – Criação de eqüinos		0,36	0,40
4 – Granja (sem especificação)	Até 70 kW	0,74	0,40
	Acima de 70 kW	0,45	0,47
5 – Avicultura (granja avícola, agricultura e avicultura, agropecuária e avicultura)		0,33	0,43
6 – Incubação de ovos		0,32	0,47
7 – Floricultura e fruticultura (granja e cultivo de flores, irrigação de flores)		0,45	0,30
8 – Posto de semente (classificação, secagem, tratamento de sementes)		0,23	0,23
9 – Atividades agrícolas diversas (atividade rural sem especificação, cultivo de cogumelo, reflorestamento, cooperativa agrícola, hortoflorestal, produção de mudas, piscicultura, prestação de serviços e agricultura)		0,27	0,36
Serviço de transporte			
1 – Ferrovia		0,28	0,40
Serviço de alojamento e alimentação			
1 – Hotel e motel	Até 80 kW	0,56	0,30
	Acima de 80 kW e até 200 kW	0,19	0,37
	Acima de 200 kW	0,16	0,51
2 – Hotel e restaurante, refeitório e alojamento		0,31	0,34
3 – Restaurante (cantina, bar e restaurante, escritório e refeitório)		0,77	0,50
Serviço de manutenção, reparação e conservação			
1 – Oficina mecânica (oficina de locomotivas, manutenção de locomotivas, retífica de máquinas de terraplenagem, garagem e oficina, recondicionamento de máquinas, escritório e oficina)		0,35	0,31
Serviços pessoais			
1 – Hospital (assistência hospitalar, Santa Casa, hospital com pronto-socorro)	Até 80 kW	0,37	0,28
	Acima de 80 kW e até 200 kW	0,31	0,38
	Acima de 200 kW	0,18	0,46
2 – Hospital psiquiátrico		0,43	0,49
3 – Ambulatório, centro de saúde		0,22	0,23
4 – Hospital e maternidade		0,24	0,37
5 – Sanatório	Até 100 kW	0,40	0,22
	Acima de 100 kW	0,27	0,39

(continua)

(continuação)

Ramo de atividade da empresa	Potência instalada	*g*	*c*
6 – Estabelecimento de ensino de 1º e 2º graus: tradicional (estabelecimento de ensino técnico-educacional, educandário, ginásio pluricurricular, escola normal, colégio, ginásio, escola, centro educacional, instituto de educação)		0,36	0,17
7 – Estabelecimento de ensino superior: faculdade		0,35	0,33
8 – Escola profissionalizante (estabelecimento de ensino industrial, escola do Senai, ginásio industrial, ginásio vocacional, escola profissionalizante, colégio técnico-agrícola, ginásio orientacional)		0,29	0,23
Serviços comerciais			
1 – Armazéns gerais (silos e armazém, depósito de mercadorias, depósito de gêneros alimentícios, armazém de café e cereais, depósito e distribuição de petróleo e derivados)	Até 40 kW	0,44	0,34
	Acima de 40 kW	0,24	0,33
Entidades financeiras			
1 – Estabelecimento de crédito (banco, estabelecimento bancário, casa bancária, centro de computação de dados de banco)	Até 80 kW	0,59	0,32
	Acima de 80 kW	0,61	0,25
Comércio varejista			
1 – Comércio varejista de veículos (agência de veículos, agência de tratores, concessionária de veículos, associada ou não ao posto de gasolina e oficina, comércio de máquinas e implementos agrícolas)	Até 60 kW	0,52	0,23
	Acima de 60 kW	0,28	0,24
2 – Posto de gasolina, associado ou não à lubrificação	Até 40 kW	0,67	0,43
	Acima de 40 kW	0,41	0,53
3 – Posto e restaurante	Até 90 kW	0,58	0,49
	Acima de 90 kW	0,46	0,53
4 – Posto de gasolina associado a outras formas de comércio (exceto restaurante e lubrificação)		0,41	0,22
5 – Supermercado, associado ou não à panificação	Até 80 kW	0,62	0,59
	Acima de 80 kW	0,49	0,51
Fundações, entidades e associações de fins não lucrativos			
1 – Entidades beneficentes, religiosas e assistenciais (instituto bíblico, assistência social, promoção social, mosteiro, instituto beneficiente, previdência social, asilo)	Até 130 kW	0,16	0,20
	Acima de 130 kW	0,26	0,43
2 – Organizações para a prática de esporte (praça de esportes, clube de campo, clube náutico, campo de futebol, clube esportivo e recreativo, ginásio de esportes, sociedade esportiva)	Até 150 kW	0,52	0,23
	Acima de 150 kW	0,31	0,39
3 – Colônia de férias: balneários	Até 70 kW	0,47	0,34
	Acima de 70 kW	0,23	0,25
4 – Clube social (clube, clube recreativo, centro recreativo)	Até 80 kW	0,62	0,24
	Acima de 80 kW	0,41	0,27
Serviço de comunicações			
1 – Telecomunicações	Até 75 kW	0,58	0,50
	Acima de 75 kW	0,13	0,35
Indústria de utilidade pública			
1 – Tratamento e distribuição de água (abastecimento de água, bomba, poço, tratamento, captação, serviço de água e esgoto)	Até 150 kW	0,67	0,53
	Acima de 150 kW	0,53	0,58
Administração pública direta e autárquica			
1 – Administração pública municipal, federal ou estadual (cadeia, delegacia de polícia, paço, fórum, auditório, departamento de estrada de rodagem)	Até 70 kW	0,31	0,29
	Acima de 70 kW	0,14	0,35
2 – Quartel		0,29	0,39
Residencial			
1 – Administração de prédios de departamentos	Até 100 kW	0,35	0,41
	Acima de 100 kW	0,13	0,29
2 – Residencial (residência, colônia residencial, núcleo residencial)	Até 200 kW	0,39	0,33
	Acima de 200 kW	0,20	0,33

Tabela 4.2 ▪ Fatores de demanda para iluminação e tomadas de uso geral em unidades residenciais e acomodações de hotéis, motéis e similares (Fonte: NBR 5410:2004)

Potência – P (kW)	Fator de demanda (%)
$0 < P \leq 1$	86
$1 < P \leq 2$	75
$2 < P \leq 3$	66
$3 < P \leq 4$	59
$4 < P \leq 5$	52
$5 < P \leq 6$	45
$6 < P \leq 7$	40
$7 < P \leq 8$	35
$8 < P \leq 9$	31
$9 < P \leq 10$	27
Acima de 10	24

Tabela 4.3 ▪ Fatores de demanda para iluminação e tomadas de uso geral em edificações de uso coletivo, com finalidade comercial ou industrial (Fonte: AES Eletropaulo)

Descrição	Fator de demanda (%)
Auditórios, salões para exposição e semelhantes	1,0
Bancos, lojas e semelhantes	1,0
Barbearias, salões de beleza e semelhantes	1,0
Clubes e semelhantes	1,0
Escolas e semelhantes	1,0 para os primeiros 12 kW e 0,5 para o que exceder a 12 kW
Escritórios	1,0 para os primeiros 20 kW e 0,7 para o que exceder a 20 kW
Garagens comerciais e semelhantes	1,0
Hospitais e semelhantes	0,4 para os primeiros 50 kW e 0,2 para o que exceder a 50 kW
Igrejas e semelhantes	1,0
Indústrias	1,0
Restaurantes e semelhantes	1,0

Tabela 4.4 ▪ Fatores de demanda para aparelhos de ar-condicionado (tipo janela ou centrais individuais) aplicáveis a edifícios residenciais e comerciais (Fonte: AES Eletropaulo)

Número de aparelhos	Fator de demanda (%)
2	88
3	82
4	78
5	76
6	74
7	72
8	71
9 a 11	70
12 a 14	68
15 a 16	67
17 a 22	66
23 a 20	65
31 a 50	64
Acima de 50	62

Nota: Em uma unidade residencial com mais de um aparelho, recomenda-se utilizar g = 1.

Tabela 4.5 ▪ Fatores de demanda de alguns equipamentos de uso residencial (Fonte: AES Eletropaulo)

Número de aparelhos	Chuveiro, torneira elétrica, aquecedor individual de passagem	Máquinas de lavar louças, aquecedor central de passagem	Aquecedor central de acumulação	Fogão elétrico, forno de microondas	Máquina de secar roupas, sauna, ferro elétrico	Hidromassagem
01	100	100	100	100	100	100
02	68	72	71	60	100	56
03	56	62	64	48	100	47
04	48	57	60	40	100	39
05	43	54	57	37	80	35
06	39	52	54	35	70	25
07	36	50	53	33	62	25
08	33	49	51	32	60	25
09	31	48	50	31	54	25
10 a 11	30	46	50	30	50	25
12 a 15	29	44	50	28	46	20
16 a 20	28	42	47	26	40	20
21 a 25	27	40	46	26	36	18
26 a 35	26	38	45	25	32	18
36 a 40	26	36	45	25	26	15
41 a 45	25	35	45	24	25	15
46 a 55	25	34	45	24	25	15
56 a 65	24	33	45	24	25	15
66 a 75	24	32	45	24	25	15
76 a 80	24	31	45	23	25	15
81 a 90	23	31	45	23	25	15
91 a 100	23	30	45	23	25	15
101 a 120	22	30	45	23	25	15
121 a 150	22	29	45	23	25	15
151 a 200	21	28	45	23	25	15
201 a 250	21	27	45	23	25	15
251 a 350	20	26	45	23	25	15
351 a 450	20	25	45	23	25	15
451 a 800	20	24	45	23	25	15
801 a 1.000	20	23	45	23	25	15

Notas:

1. Somente para o cálculo da demanda de chuveiros elétricos e aquecedores elétricos de passagem utilizados em lavatórios, pias e bidês, em qualquer dependência da unidade de consumo, devem-se somar as quantidades de aparelhos e aplicar o fator de demanda correspondente à somatória de suas potências. Para os demais equipamentos, a determinação do fator demanda deve ser feita por tipo de equipamento.
2. Para fornos elétricos industriais a demanda deve ser de 100% para qualquer quantidade de aparelhos.

energia no local da instalação em questão. Sempre consulte as tabelas específicas da concessionária local.

Motores elétricos

De acordo com a orientação da concessionária AES Eletropaulo, a demanda dos motores elétricos deve ser determinada conforme a seguir:

a) Converte-se as potências de motores, de CV/HP para kVA, utilizando-se a Tabela 4.6.
b) Aplica-se o fator de demanda de 100 por cento para o motor de maior potência e 50 por cento para os demais motores, em kVA.

Cargas especiais

De acordo com a orientação da concessionária AES Eletropaulo, são considerados equipamentos especiais os aparelhos de raio X, as máquinas de solda, os fornos elétricos a arco, os fornos elétricos de indução, os retificadores

Tabela 4.6 ▪ Fatores de demanda de motores elétricos. (Fonte: AES Eletropaulo)

	Potência nominal [CV ou HP]	Potência absorvida na rede		Corrente à plena carga [A]		Corrente de partida [A]		cos Φ médio
		kW	kVA	380V	220V	380V	220V	
Motores trifásicos	1/3	0,39	0,65	0,90	1,70	4,10	7,10	0,61
	1/2	0,58	0,87	1,30	2,30	5,80	9,90	0,66
	3/4	0,83	1,26	1,90	3,30	9,40	16,30	0,66
	1	1,05	1,52	2,30	4,00	11,90	20,70	0,69
	1,5	1,54	2,17	3,30	5,70	19,10	33,10	0,71
	2	1,95	2,70	4,10	7,10	25,00	44,30	0,72
	3	2,95	4,04	6,10	10,60	38,00	65,90	0,73
	4	3,72	5,03	7,60	13,20	43,00	74,40	0,74
	5	4,51	6,02	9,10	15,80	57,10	98,90	0,75
	7,5	6,57	8,65	12,70	22,70	90,70	157,10	0,76
	10	8,89	11,54	17,50	30,30	116,10	201,10	0,77
	12,5	10,85	14,09	21,30	37,00	156,00	270,50	0,77
	15	12,82	16,65	25,20	43,70	196,60	340,60	0,77
	20	17,01	22,10	33,50	58,00	243,70	422,10	0,77
	25	20,92	25,83	39,10	67,80	275,70	477,60	0,81
	30	25,03	30,52	46,20	80,10	326,70	566,00	0,82
	40	33,38	39,74	60,20	104,30	414,00	717,30	0,84
	50	40,93	48,73	73,80	127,90	528,50	915,50	0,84
	60	49,42	58,15	88,10	152,60	632,60	1.095,70	0,85
	75	61,44	72,28	109,50	189,70	743,60	1.288,00	0,85
	100	81,23	95,56	144,80	250,80	934,70	1.619,00	0,85
	125	100,67	117,05	177,30	307,20	1162,70	2.014,00	0,86
	150	120,09	141,29	214,00	370,80	1455,90	2.521,70	0,85
	200	161,65	190,18	288,10	499,10	1996,40	3.458,00	0,85
Motores monofásicos	1/4	0,42	0,66	5,90	3,00	27,00	14,00	0,63
	1/3	0,51	0,77	7,10	3,50	31,00	16,00	0,66
	1/2	0,79	1,18	11,60	5,40	47,00	24,00	0,67
	3/4	0,90	1,34	12,20	6,10	63,00	33,00	0,67
	1	1,14	1,56	14,20	7,10	68,00	35,00	0,73
	1,5	1,67	2,35	21,40	10,70	96,00	48,00	0,71
	2	2,17	2,97	27,00	13,50	132,00	68,00	0,73
	3	3,22	4,07	37,00	18,50	220,00	110,00	0,79

e os equipamentos de eletrólise, as máquinas injetoras e as extrusoras de plástico etc.

A demanda, em kVA, desses equipamentos pode ser determinada considerando-se 100 por cento da potência, em kVA, do maior equipamento e 60 por cento da potência, em kVA, dos demais equipamentos somados.

Previsão de cargas de iluminação e tomadas em locais destinados à habitação

No caso de locais destinados à habitação — as unidades residenciais (casas e apartamentos) e as acomoda-

ções (apartamentos) de hotéis, flats, motéis e similares — a determinação da potência instalada e da potência de alimentação pode ser feita, segundo a NBR 5410, considerando-se as seguintes condições:

Iluminação

A potência de iluminação mínima de dado local é obtida em função da área (S):

- Para $S \leq 6$ m² adota-se 100 VA.
- Para $S > 6$ m² adota-se 100 VA para os primeiros 6 m² e soma-se 60 VA para cada 4 m² inteiros.

Pontos de tomada

O número de pontos de tomada deve ser determinado em função da destinação do local e dos equipamentos elétricos que podem ser nele utilizados, observando-se no mínimo os seguintes critérios:

- Em banheiros, deve ser previsto pelo menos um ponto de tomada próximo ao lavatório.
- Em cozinhas, copas, copas-cozinhas, áreas de serviço, cozinha-área de serviço, lavanderias e locais análogos, deve ser previsto, no mínimo, um ponto de tomada para cada 3,5 m, ou fração, de perímetro, e acima da bancada da pia devem ser previstas, no mínimo, duas tomadas de corrente, no mesmo ponto ou em pontos distintos.
- Em varandas, deve ser previsto pelo menos um ponto de tomada, admitindo-se que o ponto de tomada não seja instalado na própria varanda, mas próximo ao seu acesso, quando a varanda, por razões construtivas, não comportar o ponto de tomada, quando sua área for inferior a 2 m² ou, ainda, quando sua profundidade for inferior a 0,80 m.
- Em salas e dormitórios devem ser previstos pelo menos um ponto de tomada para cada 5 m, ou fração de perímetro, devendo esses pontos ser espaçados tão uniformemente quanto possível. Particularmente, no caso de salas de estar, deve-se atentar para a possibilidade de que um ponto de tomada venha a ser usado para alimentação de mais de um equipamento, sendo recomendável equipá-lo, portanto, com a quantidade de tomadas julgada adequada.
- Em cada um dos demais cômodos e dependências de habitação devem ser previstos pelo menos um ponto de tomada, se a área do cômodo ou dependência for igual ou inferior a 2,25 m² (admite-se que esse ponto seja posicionado externamente ao cômodo ou dependência, a até 0,80 m no máximo de sua porta de acesso). Se a área do cômodo ou dependência for superior a 2,25 m² e igual ou inferior a 6 m², deve ser previsto um ponto de tomada. E se a área do cômodo ou dependência for superior a 6 m², deve ser previsto um ponto de tomada para cada 5 m, ou fração de perímetro, devendo esses pontos ser espaçados tão uniformemente quanto possível.

Quanto à potência a ser atribuída a cada ponto de tomada, ela é função dos equipamentos que o ponto poderá vir a alimentar e não deve ser inferior aos seguintes valores mínimos:

- Em banheiros, cozinhas, copas, copas-cozinhas, áreas de serviço, lavanderias e locais análogos, no mínimo 600 VA por ponto de tomada, até três pontos, e 100 VA por ponto para os excedentes, considerando-se cada um desses ambientes separadamente. Quando o total de tomadas no conjunto desses ambientes for superior a seis pontos, admite-se que o critério de atribuição de potências seja de no mínimo 600 VA por ponto de tomada, até dois pontos, e 100 VA por ponto para os excedentes, sempre considerando cada um dos ambientes separadamente.
- Nos demais cômodos ou dependências, no mínimo 100 VA por ponto de tomada.

A NBR 5410 indica que em cada cômodo ou dependência deve ser previsto pelo menos um ponto de luz fixo no teto, comandado por interruptor. No entanto, admite-se que o ponto de luz fixo no teto seja substituído por ponto na parede em espaços sob escada, depósitos, despensas, lavabos e varandas, desde que de pequenas dimensões e onde a colocação do ponto no teto seja de difícil execução ou não conveniente. Além disso, nas acomodações de hotéis, motéis e similares, pode-se substituir o ponto de luz fixo no teto por tomada de corrente, com potência mínima de 100 VA, comandada por interruptor de parede.

Potência de alimentação de iluminação e tomadas

A potência de alimentação de iluminação e tomadas pode ser calculada por:

$$P_A = (P_{\text{ilum}} + P_{\text{tug}})g + \sum_{j=1}^{m} P_{Nj} \qquad (4.30)$$

onde

- P_{ilum} = potência instalada de iluminação.
- P_{tug} = potência instalada de tomadas de uso geral.
- g = fator de demanda relacionado na Tabela 4.2, em função da potência instalada de iluminação e tomadas de uso geral ($P_{\text{ilum}} + P_{\text{tug}}$).
- $\sum_{j=1}^{m} P_{N,j}$ = soma das potências nominais dos equipamentos específicos.

Deve-se ainda observar que:

- O fator de potência das cargas de iluminação dependerá do tipo de lâmpada utilizada. Como geralmente são utilizadas lâmpadas incandescentes, o mais comum é adotar-se um fator igual à unidade. Para outros tipos de lâmpadas, ver Quadro 4.1.

- O fator de potência atribuído às tomadas de uso geral é, quase sempre, igual a 0,8 indutivo;
- Para a instalação global, no caso de iluminação incandescente, adota-se o fator de potência 0,95 indutivo.

Em projetos, para o dimensionamento de circuito, com respeito às tomadas de uso geral, observe que, quando se atribui certa potência aparente a uma tomada de uso geral, como 100 ou 600 VA nos locais de habitação, considera-se, na realidade, um fator de utilização.

Assim, por exemplo, para uma tomada de 10 A em um circuito de 127 V, a potência nominal é igual a 10 × 127 = 1.270 VA, e os fatores de utilização serão:

- Para 100 VA $\rightarrow \frac{100}{1.270} = 0,078$
- Para 600 VA $\rightarrow \frac{600}{1.270} = 0,47$

EXEMPLO

Calcule a potência instalada de um apartamento padrão de um prédio residencial com as seguintes dependências e respectivas dimensões (em metros):

■ Hall de entrada	2 × 2
■ Salas (conjugadas)	5 × 8
■ Varanda	1,5 × 5
■ Lavabo	1,5 × 1,5
■ Distribuição	2 × 5,5
■ Dormitório	14,5 × 4
■ Banheiro 1	2,5 × 2
■ Dormitório 2	3,5 × 4
■ Banheiro 2	2 × 2
■ Dormitório 3	4,5 × 4,5
■ Copa-cozinha	4,5 × 5,5
■ Área de serviço	3 × 5,5
■ Quarto de empregada	2 × 2,5
■ Banheiro de empregada	2 × 1,5

Estão previstos os seguintes pontos ou pontos de tomadas de uso específico:

- Aquecedor de água (central) de 300 litros, ou 2.000 W, na área de serviço
- Chuveiro de 6.000 W no banheiro de empregada
- Exaustor de 300 W na cozinha
- Forno de microondas de 1.200 VA (cos Φ = 0,8) na cozinha
- Lava-louça de 2.800 VA (cos Φ = 0,8) na cozinha
- Torneira elétrica de 5.000 W na cozinha
- Lavadora de roupa de 770 VA (cos Φ = 0,8) na área de serviço
- Secadora de roupa de 5.000 W na área de serviço
- Três aparelhos ar-condicionador de 10.000 BTU/h, 1.400 W cada, um por dormitório.

(a) Os valores mínimos das cargas de iluminação são:

- Hall: 100 VA
- Salas: 40 m² = 6 m² + 8 × 4 m² + 2 m² _____ 100 + 8 × 60 = 580 VA
- Varanda: 100 VA
- Lavabo: 100 VA
- Distribuição: 11 m² = 6 m² + 1 × 4 m² + 1 m² _____100 + 1 × 60 = 160 VA
- Dormitório 1: 18 m² = 6 m² + 3 × 4 m² _____ 100 + 3 × 60 = 280 VA
- Banheiro 1: 100 VA
- Dormitório 2: 14 m² = 6 m² + 2 × 4 m² _____ 100 + 2 × 60 = 220 VA
- Banheiro 2: 100 VA
- Dormitório 3: 20,25 m² = 6 m² + 3 × 4 m² + 2,25 m² _____ 100 + 3 × 60 = 280 VA
- Copa-cozinha: 24,75 m² = 6 m² + 4 × 4 m² + 2,75 m² _____ 100 + 4 × 60 = 340 VA
- Área de serviço: 16,5 m² = 6 m² + 2 × 4 m² + 2,5 m² _____ 100 + 2 × 60 = 220 VA
- Quarto de empregada: 100 VA
- Banheiro de empregada: 100 VA.

Os resultados estão na Tabela 4.7.

(b) Determinação da quantidade e potência dos pontos de tomadas de uso geral:

- Hall: 1 _____ 1 × 100 = 100 VA
- Salas: 26/5 = 5,2 _____ 6 _____ 6 × 100 = 600 VA
- Varanda: 1 _____ 1 × 100 = 100 VA
- Lavabo: 1 _____ 1 × 100 = 100 VA
- Distribuição: 15 / 5 = 3 _____ 3 _____ 3 × 100 = 300 VA
- Dormitório 1: 17/5 = 3,4 _____ 4 _____ 4 × 100 = 400 VA
- Banheiro 1: 1 _____ 1 × 600 = 600 VA
- Dormitório 2: 15/5 = 3 _____ 3 _____ 3 × 100 = 300 VA
- Banheiro 2: 1 _____ 1 × 600 = 600 VA
- Dormitório 3: 18/5 = 3,6 _____ 4 × 100 = 400 VA
- Copa e cozinha: 20/3,5 = 5,7 _____ 6 _____ (3 × 600) + (3 x 100) = 2.100 VA
- Área de serviço: 17/3,5 = 4,8 _____ 5 _____ 3 × 600 + 2 × 100 c 2.000 VA
- Quarto de empregada: 1 _____ 1 × 100 = 100 VA
- Banheiro de empregada: 1_____ 1 × 600 = 600 VA

Os resultados estão na Tabela 4.7.

(c) Determinação da potência instalada:

- Iluminação P_{ilum} = 2.780 × 1 = 2.780 W
- Tomadas de uso geral _____ P_{tug} = 8.300 × 0,8 = 6.640 W

Tabela 4.7 ■ Potência instalada de um apartamento-padrão de um prédio residencial

Dependências	Dimensões		Iluminação		Tomadas de uso geral		Tomadas/pontos de uso específico	
	Área (m^2)	Perímetro (m)	Nº de pontos	Potência (VA)	Nº de pontos	Potência (VA)	Descrição	Potência (W)
Hall	4	–	1	100	1	100	–	–
Salas	40	26	3	580	6	600	–	–
Varanda	7,5	–	1	100	1	100	–	–
Lavabo	2,25	–	1	100	1	100	–	–
Distribuição	11	15	1	162	3	300	–	–
Dormitório 1	18	17	2	280	4	400	Ar-condicionado	1.400
Banheiro 1	5	–	2	100	1	600	–	–
Dormitório 2	14	15	1	220	3	300	Ar-condicionado	1.400
Banheiro 2	4	–	2	100	1	600	–	–
Dormitório 3	20,25	18	2	280	4	400	Ar-condicionado	1.400
Copa e cozinha	24,75	20	2	340	6	2.100	Exaustor	300
							Forno de microondas	960
							Lava-louças	2.240
							Torneira elétrica	4.000
Área de serviço	16,5	17	1	220	5	2.000	Aquecedor de água	2.000
							Secadora de roupas	5.000
Quarto de empregada	5	–	1	100	1	100	Chuveiro	–
Banheiro de empregada	3	–	1	100	1	600		6.000
	175,25		21	2.780	38	8.300		24.700

- Tomadas/pontos de uso específico $\sum_{j=1}^{m} P_{N,j} = P_{tue} = 24.700$ W
- $P_{inst} = 34.120$ W

(d) Determinação da potência de alimentação considerando a Tabela 4.2:

- $P_{ilum} + P_{tug} = 9.420$ W _____ $g = 0,27$ (Tabela 4.2)
- Da Expressão 4.30 _____ $P_A = 9.420 \times 0,27 + 24.700 = 27.243,4$ W

Previsão de cargas de iluminação e tomadas em locais não destinados à habitação

As prescrições da NBR 5410 sobre cargas de iluminação e tomadas em locais não destinados à habitação (estabelecimentos comerciais, industriais, institucionais etc.) são as seguintes:

Iluminação

As cargas de iluminação (quantidade e potência) devem ser determinadas como resultado da aplicação da ABNT NBR 5413. Para os aparelhos fixos de iluminação à descarga, a potência nominal a ser considerada deve incluir a potência das lâmpadas, as perdas e o fator de potência dos equipamentos auxiliares.

Pontos de tomada

- Em halls de serviço, salas de manutenção e salas de equipamentos, tais como casas de máquinas, salas de bombas, barriletes e locais análogos, deve ser previsto no mínimo um ponto de tomada de uso geral, e aos circuitos terminais respectivos deve ser atribuída uma potência de no mínimo 1.000 VA.
- Quando um ponto de tomada for previsto para uso específico, deve ser a ele atribuída uma potência igual à potência nominal do equipamento a ser

alimentado ou à soma das potências nominais dos equipamentos a serem alimentados. Quando valores precisos não forem conhecidos, a potência atribuída ao ponto de tomada deve seguir um dos dois seguintes critérios: a potência ou soma das potências dos equipamentos mais potentes que o ponto pode vir a alimentar, ou a potência deve ser calculada com base na corrente de projeto e na tensão do circuito respectivo.

- Os pontos de tomada de uso específico devem ser localizados no máximo a 1,5 m do ponto previsto para a localização do equipamento a ser alimentado.
- Os pontos de tomada destinados a alimentar mais de um equipamento devem ser providos com a quantidade adequada de tomadas.

Como verificado nas prescrições anteriores, a NBR 5410 não faz nenhuma referência específica à quantidade e potência mínimas de pontos de tomadas de uso geral, em locais não destinados à habitação. Isso não teria muito sentido, tendo em vista que a quantidade e a potência das tomadas dependem do tipo de ocupação dos diversos locais.

Quanto à iluminação, geralmente o projeto específico é indispensável. No entanto, para os pontos de tomadas de uso geral, as sugestões referentes a escritórios e lojas a seguir podem ser úteis em muitos casos:

- Para escritórios comerciais ou locais similares com área igual ou inferior a 40 m², a quantidade mínima de tomadas de uso geral deve ser calculada pelo critério, dentre os dois seguintes, que conduzir ao maior número:
  - Um ponto de tomada para cada 3 m, ou fração, de perímetro.
  - Um ponto de tomada para cada 4 m², ou fração, de área.
- Para escritórios comerciais ou locais análogos com área superior a 40 m², a quantidade mínima de tomadas de uso geral deve ser calculada com base no seguinte critério: dez pontos de tomadas para os primeiros 40 m² e um ponto de tomada para cada 10 m², ou fração, de área restante.
- Em lojas e locais similares devem ser previstos pontos de tomadas de uso geral em quantidade nunca inferior a um ponto de tomada para cada 30 m², ou fração, não consideradas as tomadas para a ligação de lâmpadas, tomadas de vitrines e tomadas para a demonstração de aparelhos.
- A potência a ser atribuída aos pontos de tomadas de uso geral em escritórios comerciais, lojas e locais similares não deverá ser inferior a 200 VA por ponto de tomada.

EXEMPLO

Em um quadro de distribuição de um local comercial são ligadas as seguintes cargas cujas características são indicadas na Tabela 4.8:

O quadro é alimentado por um circuito de distribuição trifásico (3F-N), 127/220 V.

Para calcular as potências de alimentação ativa, reativa e aparente, bem como a corrente de projeto, utiliza-se o quadro de carga da Tabela 4.9.

Assim, tem-se, dos valores calculados na Tabela 4.9:

- Da Expressão 4.25:

$$P_A = 20{,}24 + 11 = 31{,}24\ \text{kW}$$

- Da Expressão 4.26:

$$Q_A = 13{,}21 + 1{,}88 = 15{,}09\ \text{kvar}$$

- Da Expressão 4.27:

$$S_A = \sqrt{31{,}24^2 + 15{,}09^2} = 34{,}69\ \text{kVA}$$

- Da Expressão 4.28:

$$\cos \Phi = \frac{31{,}24}{34{,}69} = 0{,}9$$

- Da Expressão 4.29:

$$I_B = \frac{31{,}24 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 220 \times 0{,}9} = 91{,}1\ \text{A}$$

4.4 Corrente de projeto em circuitos terminais

No caso de circuitos terminais, a *corrente de projeto* é definida, para várias cargas (do mesmo tipo), em função das potências nominais das cargas alimentadas. Dessa maneira, se $P_{N,i}$ é a potência nominal de uma carga genérica, n é o número de cargas e cos Φ é seu fator de potência, a corrente de projeto é dada pela Expressão 4.31:

$$I_B = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{N,i}}{t \cdot U_N \cos \Phi} \qquad (4.31)$$

Para um circuito terminal que alimenta uma única carga, de potência nominal P_N, tem-se:

$$I_B = \frac{P_N}{t \cdot U_N \cdot \cos \Phi} \qquad (4.32)$$

onde t é um fator que vale $\sqrt{3}$ (para circuitos trifásicos e 1 para circuitos monofásicos.

Tabela 4.8 ▪ Cargas em um quadro de distribuição de um local comercial

	Quantidade	Tensão nominal U_N (V)	Potência nominal de saída P'_N (kW)	Rendimento η	Fator de potência nominal cosΦ	Potência nominal de entrada P_N (kW)	Potência aparente nominal de entrada, S_N (kVA)	Fator de demanda *g*
Aparelho de iluminação fluorescente	32	220	4 * 0,04	0,7	0,85	2,5	–	1
Aparelho de iluminação incandescente	8	127	0,1	1	1	–	–	1
Tomada de uso geral	28	127	–	–	0,9	–	0,2	0,3
Tomada para arcondicionado	6	220	–	–	0,8	–	2,2	1
Tomada para chuveiro elétrico	1	220	–	–	1	6	–	–
Tomada para aquecedor de marmitas	1	220	–	–	1	2,5	–	–
Tomada para máquina copiadora	1	220	–	–	0,8	2,5	–	–

Quando uma carga trabalhar com fator de utilização menor que a unidade e *esse fator for conhecido*, nas expressões 4.25, 4.26, 4.31 e 4.32, deve ser usada a potência máxima (ou de trabalho) da carga. Este é o caso de certos equipamentos industriais de grande porte.

EXEMPLO

Do quadro de distribuição do exemplo anterior partem os circuitos terminais indicados nas colunas 1, 2 e 3 da Tabela 4.10 a seguir. As respectivas correntes de projeto são calculadas, utilizando as expressões 4.31 e 4.32, por meio das colunas 4, 5, 6, 7 e 8 da referida tabela.

4.5 Conservação e uso racional de energia elétrica

A *conservação e o uso racional de energia elétrica* em determinado local consistem, basicamente, em utilizar o *mínimo* de energia elétrica que possibilite a realização de todas as atividades inerentes ao local. É conseguida com um conjunto de procedimentos que envolvem:

- A escolha dos processos a serem utilizados para a realização das atividades (por exemplo: iluminação, transporte vertical, refrigeração, produção de vapor, bombeamento de água, preparação de alimentos e aquecimentos de água).
- O dimensionamento dos equipamentos elétricos a serem utilizados nos diversos processos (como transformadores e motores, aparelhos de iluminação).
- O dimensionamento dos demais componentes elétricos a serem utilizados na instalação (como cabos, condutos e barras).
- Cuidados a serem tomados na execução da instalação.
- Regime de funcionamento dos diversos equipamentos.
- Manutenção da instalação (incluindo equipamentos).

É fácil perceber que a conservação e o uso racional de energia elétrica, no tocante à instalação elétrica propriamente dita, começam no projeto, passam pela execução e continuam com a manutenção periódica.

A NBR 5410, que justamente se refere ao projeto, à execução e à manutenção de instalações de baixa tensão, muito embora não seja especificamente uma norma que trate de conservação e uso racional de energia elétrica, tem como um de seus objetivos garantir o *bom funcionamento* da instalação e apresenta inúmeras prescrições englobando a otimização de desempenho e a redução de perdas, entre elas:

Tabela 4.9 ▪ Valores calculados do exemplo

Carga	Conjuntos de cargas					Cargas Isoladas		
	P_N (kW)	P_{inst} (kW)	$P_{inst} \times g$ (kW)	tg Φ	$P_{inst} \times g \times$ tg ϕ (kvar)	P_N (kW)	tg Φ	$P_N \times$ tg Φ (kvar)
Iluminação fluorescente	$\frac{4 \times 0{,}04}{0{,}7} = 0{,}229$	$32 \times 0{,}229 = 7{,}33$	$7{,}33 \times 1 = 7{,}33$	0,62	$7{,}33 \times 0{,}62 = 4{,}54$	–	–	–
Iluminação incandescente	$\frac{0{,}1}{1} = 0{,}1$	$8 \times 0{,}1 = 0{,}8$	$0{,}8 \times 1 = 0{,}8$	0	$0{,}8 \times 0 = 0$	–	–	–
Tomadas de uso geral	$0{,}2 \times 0{,}9 = 0{,}18$	$28 \times 0{,}18 = 5{,}04$	$5{,}04 \times 0{,}3 = 1{,}51$	0,48	$1{,}51 \times 0{,}48 = 0{,}72$	–	–	–
Ar-condicionado	$2{,}2 \times 0{,}8 = 1{,}76$	$6 \times 1{,}76 = 10{,}6$	$10{,}6 \times 1 = 10{,}6$	0,75	$10{,}6 \times 0{,}75 = 7{,}95$	–	–	–
Chuveiro elétrico	–	–	–	–	–	6	0	0
Aquecedor de marmita	–	–	–	–	–	2,5	0	0
Máquina copiadora	–	–	–	–	–	2,5	0,75	$2{,}5 \times 0{,}75 = 1{,}88$
		23,77	20,24		13,21	11		1,88
			$\left(\sum_{i=1}^{n} P_{inst,i} \cdot g_i\right)$		$\left(\sum_{i=1}^{n} P_{inst,i} \cdot g_i \cdot \text{tg}\,\Phi_i\right)$	$\left(\sum_{j=1}^{m} P_{N,j}\right)$		$\left(\sum_{j=1}^{m} P_{N,j} \cdot \text{tg}\,\Phi_j\right)$

Tabela 4.10 ■ Circuitos terminais de um quadro de distribuição e suas respectivas correntes de projeto

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Circuito			Potência nominal P_N (W)	Tensão nominal U_N (V)	Fator t	Fator de potência cos Φ	Corrente de projeto I_B (A)
Nº do circuito	Discriminação	Nº de pontos					
1	Iluminação fluorescente	10	229	220	1	0,85	12,2
2	Iluminação fluorescente	10	229	220	1	0,85	12,2
3	Iluminação fluorescente	12	229	220	1	0,85	14,7
4	Iluminação incandescente	8	100	127	1	1	6,3
5	Tomadas de uso geral	10	180	127	1	0,9	15,7
6	Tomadas de uso geral	14	180	127	1	0,9	22
7	Tomada para ar-condicionado	1	1.760	220	1	0,8	10
8	Tomada para ar-condicionado	1	1.760	220	1	0,8	10
9	Tomada para ar-condicionado	1	1.760	220	1	0,8	10
10	Tomada para ar-condicionado	1	1.760	220	1	0,8	10
11	Tomada para ar-condicionado	1	1.760	220	1	0,8	10
12	Tomada para ar-condicionado	1	1.760	220	1	0,8	10
13	Tomada para chuveiro elétrico	1	6.000	220	1	1	27,3
14	Tomada para aquecedor de marmita	1	2.500	220	1	1	11,4
15	Tomada para máquina copiadora	1	2.500	220	1	0,8	14,2

- Exigência dos corretos dimensionamentos dos condutores e equipamentos.
- Exigência de coordenação entre condutores e dispositivos de proteção contra correntes de sobrecarga, limitando o aquecimento dos condutores e, portanto, reduzindo as perdas.
- Exigências do equilíbrio das cargas elétricas, evitando perdas decorrentes do desequilíbrio.
- Exigência de instalação de condutores de proteção destinados a provocar a atuação da proteção, eliminando o defeito (e as conseqüentes perdas) rapidamente.
- Exigência (em várias situações) de instalação de dispositivos de proteção a corrente diferencial-residual, que detectam e eliminam as correntes de fuga e de falta para a terra.

Nessas condições, pode-se afirmar que a conservação e o uso racional de energia elétrica *começa com a observância da NBR 5410* e é completada com outras medidas específicas de cada caso.

4.6 O projeto de instalações elétricas

O projeto e suas etapas

Projetar uma instalação elétrica para qualquer tipo de prédio ou local consiste essencialmente em, de maneira racional, selecionar, dimensionar e localizar os equipamentos e outros componentes necessários para proporcionar, de modo seguro e efetivo, a transferência de energia elétrica de uma fonte até os pontos de utilização.

O projeto de instalação elétrica não se resume em um simples trabalho mecânico de consulta a tabelas e de aplicação de formas e fórmulas padronizadas. Muito pelo contrário, o projeto é dinâmico e diretamente ligado aos avanços tecnológicos. O projetista deve conhecer a fundo todas as técnicas usadas pela engenharia elétrica, bem como toda a normalização aplicável; e, uma vez familiarizado com o projeto que vai executar, deve ter a preocupação constante com a conservação de energia elétrica.

Convém lembrar que o projeto de instalações elétricas é apenas um dos vários projetos necessários para a construção de um prédio, assim, sua elaboração deve ser conduzida em perfeita harmonia com os demais projetos (como arquitetura, estrutura e tubulações).

Passa-se, agora, a enumerar as *etapas* que devem ser seguidas em um projeto de instalações elétricas prediais, válidas, a princípio, para qualquer tipo de prédio (industrial, residencial ou comercial). A ordem indicada é a geralmente seguida pelos projetistas de empresas de engenharia. No entanto, é bom frisar que, em muitos casos, não só a ordem pode ser alterada, como também etapas podem ser suprimidas ou, ainda, duas ou mais etapas podem vir a ser única. São elas:

- Análise inicial.
- Fornecimento de energia normal.
- Quantificação da instalação.
- Esquema básico da instalação.
- Seleção e dimensionamento dos componentes.
- Especificações e contagem dos componentes.

Elas são apresentadas resumidamente na Tabela 4.11 e em detalhes nas seções "Análise inicial" a "Especificações e contagem dos componentes".

Análise inicial

É a etapa preliminar do projeto de instalações elétricas de qualquer prédio. Nela, são colhidos os dados básicos que orientarão a execução do trabalho. Consiste, a princípio, nos passos descritos a seguir.

- Estudo, com o cliente *e/ou* arquiteto, de todos os desenhos constantes do projeto de arquitetura— implantação, plantas, cortes, detalhes importantes, entre outros —, verificando a utilização de todas as áreas do prédio.
- Verificação do cronograma da obra.

Tabela 4.11 ▪ Etapas de um projeto de instalação elétrica para qualquer tipo de prédio

Etapa	Elementos necessários	Determinar	Documentos gerados
1. Análise inicial	■ Desenhos de arquitetura ■ Contato com consultores/projetistas de outros sistemas do prédio ■ Cronograma da obra	■ Uso previsto para todas as áreas do prédio; limitaçõs físicas à instalação ■ *Layout* (planta) dos equipamentos de utilização previstos ■ Características elétricas dos equipamentos de utilização previstos ■ Classificação de todas as áreas do prédio quanto às influências externas ■ Tipos de linhas elétricas a serem utilizadas ■ Setores/equipamentos que necessitam de energia de substituição ■ Setores que necessitam de iluminação de segurança ■ Equipamentos que necessitam de alimentação de segurança ■ Resistividade do solo ■ Estimativa preliminar de potência instalada e de alimentação globais ■ Localização preferencial da entrada de energia	■ Tabela(s)/plantas(s) com a classificação de todas as áreas quanto às influências externas
2. Fornecimento de energia normal	■ Dados obtidos em (1) ■ Regulamento da concessionária ■ Contato com a concessionária	■ Modalidade e tensões de fornecimento; tipo de entrada ■ Ponto de entrada e localização de entrada de energia ■ Padrão de entrada a ser utilizado ■ Nível de curto-circuito no ponto de entrega ■ Esquema de aterramento a ser(em) utilizado(s)	
3. Quantificação da instalação	■ Dados obtidos em (1) e (2)	■ Iluminação de todas as áreas; marcação dos pontos de luz em planta ■ Tomadas de corrente e outros pontos de utilização em todas as áreas; marcação em planta ■ Divisão da instalação em setores/subsetores ■ Localização dos centros de carga dos setores/subsetores ■ Potências instaladas e de alimentação dos setores/subsetores e global	

(continua)

(continuação)

Etapa	Elementos necessários	Determinar	Documentos gerados
3. Quantificação da instalação (continuação)		■ Localização/características da(s) fonte(s) de substituição; marcação em planta ■ Localização/características da(s) fonte(s) de segurança; marcação em planta ■ Tensões de distribuição e utilização	
4. Esquema básico da instalação	■ Dados obtidos em (2) e (3)	■ Esquema unifilar básico da instalação (Componentes e ligações principais)	
5. Seleção e dimensionamento dos componentes	■ Dados obtidos em (2), (3) e (4)	■ Seleção dos componentes da entrada; dimensionamentos ■ Seleção dos componentes da(s) subestação(ões); dimensionamento ■ Seleção dos componentes das linhas elétricas e respectivas proteções; dimensionamentos ■ Seleção dos componentes dos aterramentos funcional e de proteção; dimensionamentos ■ Seleção dos componentes do(s) sistema(s) de proteção contra descargas atmosféricas ■ Complementação dos desenhos ■ Cálculos de curto-circuito ■ Verificação da coordenação seletiva das proteções ■ Revisão dos desenhos/verificação de interferências	■ Esquemas unifiliares ■ Esquemas trifilares ■ Esquemas funcionais ■ Desenhos de iluminação ■ Desenhos de força ■ Desenhos da entrada ■ Desenhos de aterramento ■ Desenhos de pára-raios ■ Memória de cálculo
6. Especificações e contagem dos componentes	■ Dados obtidos em (5)	■ Especificações dos componentes ■ Contagem dos componentes	■ Especificações dos componentes ■ Lista/relação quantitativa dos componentes

- Determinação, com o cliente *e/ou* consultores e projetistas dos demais sistemas a serem implantados no local (hidráulicos, tubulações, ar-condicionado, entre outros), do layout dos equipamentos de utilização (elétricos), de suas características de instalação e funcionamento e, muitas vezes, no caso de instalações industriais, do(s) fluxograma(s) do(s) processo(s) envolvido(s). Devem também ser estudadas as possíveis limitações (físicas) à instalação de componentes elétricos nos diversos locais, graças à instalação prevista para componentes não elétricos dos outros sistemas (por exemplo, tubulações de água, de ar-condicionado e de outros fluidos).
- Em função dos dados obtidos anteriormente, devem ser classificadas todas as áreas do prédio quanto às influências externas, tendo em vista o meio ambiente, as utilizações e a construção. Para consulta posterior, devem ser anotadas eventuais restrições existentes quanto ao tipo ou uso de componentes nos vários locais.
- Determinação dos tipos de linhas elétricas a serem utilizadas em função das características e limitações da instalação (como cabos em bandejas, em eletrodutos embutidos, em eletrodutos aparentes, barramentos blindados e sistema *undercarpet*).
- Verificação de quais setores *e/ou* equipamentos necessitam de energia de substituição. É o caso, por exemplo, de centros de processamentos de dados (CPDs), de elevadores, de certos equipamentos envolvidos em determinados processos etc.
- Verificação dos setores que necessitam de iluminação de segurança e dos equipamentos que necessitam de alimentação de segurança (por exemplo, bombas de incêndio e elevadores utilizados para a evacuação de locais).
- Estimativa preliminar de potência instalada global e de potência de alimentação (demanda) global, obtidas, em geral, com base em tabelas de densidade de potência e de fatores de demanda e de carga convenientes. Como exemplo, são apresentadas as tabelas 4.12, 4.13 e 4.14, relativas a densidades de potência típicas.
- Determinação da localização preferencial da entrada, que pode ser, dependendo da instalação, cabina

primária, subestação, cabina de barramentos ou simples caixas de entrada. Densidades de potência típicas de força motriz em áreas de produção industriais.

Fornecimento de energia normal

Nessa etapa, deverão ser determinadas as condições em que o prédio será alimentado com a energia elétrica chamada "normal", ou seja, a energia que o alimentará em condições normais. Esta, na maior parte dos casos, provém de rede de distribuição de energia elétrica (de baixa ou de média tensão), ou seja, da concessionária.

Assim, nessa fase, é imprescindível conhecer os regulamentos locais de fornecimento de energia e, quase sempre, estabelecer contato com a concessionária, a fim de determinar:

- O tipo de sistema de distribuição (rede aérea ou subterrânea, em média ou em baixa tensão) e de entrada (aérea ou subterrânea).

Tabela 4.12 ▪ Densidades de potência típicas de força motriz em áreas de produção industriais

Atividade	Densidade de potência (kVA/m²)
Pintura	0,35
Caldeiraria	0,45
Usinagem	0,30
Montagem	0,07
Expedição	0,05
Tratamento térmico	0,70

Tabela 4.13 ▪ Densidades de potência típicas para diversos locais

Local	Densidade de potência (VA/m²)	
	Iluminação e tomadas de uso geral	Outros equipamentos (com exceção de ares-condicionados)
Auditórios/teatros		
■ Geral	20-30	0
■ Palco	200-400	5
Galerias de arte	45-60	10
Agências bancárias	35-45	20
Lanchonetes	50-60	10
Igrejas	20-40	5
Lojas	30-70	5-15
Garagens comerciais	5	2
Hospitais	20-30	10
Hotéis		
■ Recepção	60-80	5
■ Apartamentos/quartos	15-25	5
Laboratórios	50-70	50-200
Bibliotecas	40-70	10
Centros médicos	40-60	20
Motéis	15-20	5
Prédios de escritórios	50-70	20
Restaurante	20-30	3
Escolas	30-50	20
■ Depósitos comerciais	3-10	3

- O esquema ou esquemas de aterramento a utilizar em função do tipo de instalação.
- As tensões de fornecimento.
- Os pontos de entrega de energia em função dos regulamentos (legislação) e das condições do prédio.
- O padrão de entrada e medição a ser utilizado em função da potência instalada (ou de alimentação), das condições de fornecimento e do tipo de prédio. São várias as possibilidades: cabina primária, subestação, cabina de barramentos, caixas de entrada, um ou mais centros de medição, entre outras.
- O nível de curto-circuito no ponto de entrega de energia elétrica, a ser obtido da concessionária.

No caso de o prédio fazer parte de um conjunto de prédios (por exemplo, em uma indústria com diversos prédios independentes), é comum ter uma única entrada (por exemplo, uma única cabina primária) e o prédio ser alimentado por uma rede de distribuição interna, de propriedade do consumidor.

Nessas condições, essa etapa é aplicável à referida entrada única.

Quantificação das instalações

Nessa etapa, devem ser determinadas as potências instaladas e as potências de alimentação da instalação como um todo e de todos os setores e subsetores a serem considerados. A rigor, isso só poderá ser feito quando todos os pontos de utilização forem conhecidos. Lembre-se de que muitos deles (geralmente equipamentos de produção *e/ou* os relacionados com os sistemas de utilidades) já foram determinados na análise inicial. Portanto, agora deverão ser determinados, ou seja, localizados, caracterizados e marcados em planta:

- Os pontos de luz (aparelhos de iluminação), geralmente no(s) projeto(s) de luminotécnica.
- As tomadas de corrente (uso geral e específico).
- Outros equipamentos de utilização que possivelmente não tenham sido determinados.

É importante observar que, em muitos casos (por exemplo, grandes prédios industriais ou comerciais), é comum que, durante a elaboração do projeto, não tenham ainda sido escolhidos todos os equipamentos de utilização. É então necessário recorrer a informações ou previsões complementares, com dados obtidos, em geral, de instalações semelhantes, obviamente sujeitos a revisões posteriores.

Em qualquer tipo de prédio, a instalação elétrica deve ser dividida em setores, e estes, se possível, em subsetores. Assim, por exemplo, em um prédio industrial pode-se ter uma ou mais áreas de produção, nas quais cada uma pode ser dividida (em função do layout) em diversas subáreas, além de depósito, expedição e escritórios. Em um prédio comercial ou residencial há conjuntos de salas, lojas ou apartamentos (a rigor, cada um constitui uma instalação separada, desde que possua medição própria) e a parte comum (geralmente uma instalação separada) formada em geral pelos subsetores, pelas garagens, pelo hall principal, pela escadaria, pelo hall dos andares e pelas casas de máquinas (elevadores e bombas).

A quantificação da instalação é feita, no caso mais geral, em vários níveis: em subsetores, setores e globalmente. Em cada um, os pontos de utilização devem ser agrupados, de acordo com seu tipo e características de funcionamento, ou seja, em "conjuntos homogêneos". Os demais pontos, que aparecem isoladamente, isto é, um de cada tipo, devem ser considerados individualmente. Por exemplo, em determinado setor de uma instalação industrial, em uma área de produção, é possível ter iluminação, tornos, pontos de força (tomadas para ligação de equipamentos móveis ou portáteis), forno (um ponto).

Em um prédio de escritórios, considerado globalmente, pode-se ter iluminação, tomadas de uso geral, chuveiros elétricos, elevadores e bombas.

Para cada conjunto de pontos de utilização, a potência instalada será a soma das potências nominais dos diversos pontos, e a potência de alimentação será obtida da aplicação dos fatores de projetos convenientes à potência instalada. Para pontos de utilização individuais, a potência de alimentação será, exceto no caso da eventual aplicação de fator de utilização, igual à respectiva potência nominal.

Nessas condições, para cada subsetor, setor e instalação global, tem-se:

- Um valor de potência instalada e um valor de potência de alimentação (demanda) para cada um dos "conjuntos homogêneos" de pontos de utilização.
- Um valor de potência nominal e um valor de potência de alimentação (geralmente iguais) para cada um dos pontos de utilização de cargas individuais.
- Se necessário, um valor único de potência instalada e de potência de alimentação, obtido, em princípio, pela soma dos respectivos valores de cada conjunto e de cada ponto isolado do subsetor, do setor ou da instalação geral.

Denomina-se *centro de carga* o ponto teórico em que, para efeito de distribuição elétrica, pode-se considerar concentrada toda a potência (carga) de determinada área. É o ponto em que deveria se localizar o quadro de distribuição ou a subestação da área considerada, de modo a reduzir ao mínimo os custos de instalação e funcionamento. Existe um processo analítico para sua determinação, em função da potência e das coordenadas dos diversos pontos alimentados (pontos de utilização ou quadros de distribuição) no quadro de distribuição ou da subestação considerada (cuja posição se quer determinar).

Cada subsetor, setor e instalação como um todo possuem seus centros de carga e, nesses pontos, deveriam *idealmente* se localizar os respectivos quadros de distribuição ou subestações. Na prática, apenas em casos excepcionais se efetua a determinação exata dos centros

de carga, recorrendo-se quase sempre à determinação aproximada, considerando-se as exigências e as limitações de cada área.

Nessa etapa, devem ser localizados (incluindo marcação em planta) e quantificados os diversos centros de cargas "reais" do prédio, ou seja, os diversos quadros de distribuição e subestações. A cada um desses centros de carga devem ser associados um ou mais valores de potência instalada e de potência de alimentação, que são os valores correspondentes à área servida pelo quadro de distribuição ou pela subestação respectiva, já determinados anteriormente. Nas instalações alimentadas em baixa tensão, tem-se, em geral, apenas quadros de distribuição, que podem ser simples quadros de luz ou painéis ou centros de comando de motores (CCMs). Nas instalações alimentadas em média tensão, além dos quadros de distribuição, é possível ter uma ou mais subestações distribuídas na área.

Na análise inicial, foram determinados os setores *e/ou* equipamentos que necessitam de energia de substituição e de alimentação de segurança. Agora, ainda nessa etapa, devem-se escolher e quantificar as respectivas fontes, com base no tipo de potência dos equipamentos a serem alimentados, bem como as localizar (em planta) de modo adequado, levando-se em consideração as exigências e as limitações do prédio. Tanto grupos geradores como baterias de acumuladores deverão ser instalados em local apropriado, obedecendo a critérios rígidos e, no caso de grupos geradores, deverá ser cuidadosamente analisado o problema de ruídos e armazenamento de combustível.

Também nessa fase deverão ser fixados os diversos níveis e valores de tensões a serem utilizados no prédio.

Em instalações de médio e de grande porte, existem geralmente três níveis de tensão:

1. Nível de entrada, com média ou alta tensão.
2. Nível de distribuição, com média tensão.
3. Nível de utilização, com baixa ou média tensão.

A escolha dos valores das tensões, nos diferentes níveis, é função de uma série de fatores, entre os quais se destacam:

- Tensões de fornecimento da concessionária.
- Tensões nominais dos equipamentos de utilização previstos.
- Existência, na instalação, de equipamentos especiais, por exemplo, grandes motores, fornos a arco, máquinas de soldas e equipamentos com ciclos especiais de funcionamento.
- Distâncias entre o ponto de entrega da concessionária e os centros de carga principais, e entre eles e os centros de carga secundários.

Esquema básico da instalação

Nessa etapa, deverá resultar um esquema unifilar inicial, no qual estarão indicados os componentes principais da instalação e suas interligações elétricas fundamentais.

Inicialmente, deve ser escolhido o sistema de distribuição adequado às condições da instalação. Nesse esquema, não devem constar detalhes quantitativos resultantes de dimensionamentos (feitos posteriormente), mas apenas aspectos qualitativos.

O esquema básico pode ser concebido, a princípio, como um esquema simples, no qual são indicados, como blocos, as subestações e os quadros de distribuição delas derivados, interligados por linhas, representando os respectivos circuitos de distribuição. Nessa etapa, deve ser feita também uma escolha preliminar dos dispositivos de proteção.

A seqüência do projeto consiste na implementação do esquema básico, transformando-o, por meio do dimensionamento de todos os componentes, no esquema unifilar final da instalação.

Escolha e dimensionamento dos componentes

É a etapa fundamental de um projeto de instalações elétricas, que consiste basicamente nos seguintes passos:

- Em função de dados obtidos em etapas anteriores, escolha os componentes de todas as partes da instalação e proceda a todos os dimensionamentos necessários. Devem ser considerados, em princípio:
  - Entrada (cabine primária, cabine de barramentos ou, simplesmente, caixa de entrada), incluindo a(s) respectiva(s) linha(s) elétrica(s).
  - Subestação(ões) de distribuição.
  - Linhas elétricas relativas aos diversos circuitos de distribuição e terminais com as respectivas proteções.
  - Quadros de distribuição (quadros de luz, painéis de força, CCMs, entre outros).
  - Aterramento(s) de proteção *e/ou* funcional(is).
  - Sistema(s) de proteção contra descargas atmosféricas.
- Complementação dos diversos desenhos que vinham sendo elaborados ao longo das etapas anteriores.
- Cálculos de curto-circuito, obtendo valores de correntes de curto-circuito presumidas em todos os pontos necessários, o que poderá, eventualmente, alterar a escolha de certos dispositivos de comando e de proteção, e mesmo de certos condutores que haviam sido escolhidos e dimensionados previamente.
  - Verificação da coordenação dos diversos dispositivos de proteção, o que também poderá conduzir a alterações nos dispositivos previamente escolhidos.
  - Revisão final dos diversos desenhos, verificando e corrigindo possíveis interferências com outros sistemas do prédio.

Especificações e contagem dos componentes

As especificações e a contagem dos componentes é a última etapa e consiste em:

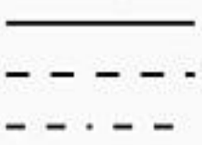
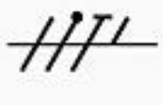
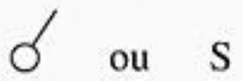
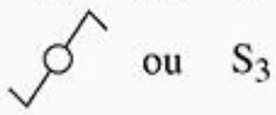
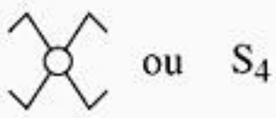
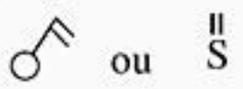
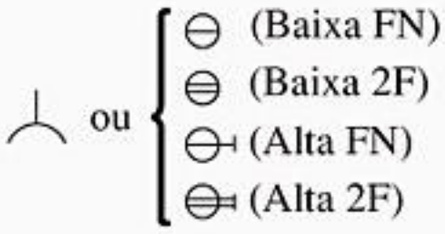
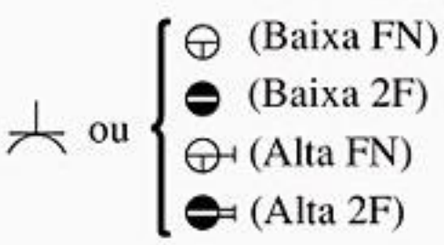
- Especificações de todos os componentes da instalação, constando, para cada um, de descrição sucinta, citação da(s) norma(s) a que deve atender e, sempre que possível, indicação de pelo menos um tipo e uma marca de referência.
- Contagem de todos os componentes da instalação.

4.7 Simbologia gráfica

Infelizmente, não existe ainda no Brasil um consenso a respeito da simbologia a ser utilizada nos desenhos de projetos de instalações elétricas. A norma brasileira em vigor — NBR 5444:1989 — Símbolos Gráficos para Instalações Elétricas Prediais: Simbologia —, por várias razões, nunca foi plenamente adotada pelos projetistas.

Por isso, a simbologia apresentada na Tabela 4.14 baseada na Publicação IEC 60617 — (Graphical Symbols for Diagram), foi complementada, quando necessário, por símbolos adotados em diversos países membros da IEC e por outros que são de uso já consagrado no Brasil.

Tabela 4.14 ■ Simbologia

	Dispositivo fusível
	Chave fusível
	Disjuntor
	Conduto (eletroduto) embutido em teto ou parede Conduto (eletroduto) aparente Conduto (eletroduto) embutido no piso
	Condutores de fase, neutro, de proteção e retorno (respectivamente) em conduto
	Conduto (eletroduto) que sobe e desce (respectivamente)
 ou S	Interruptor simples (1 pólo)
 ou S_3	Interruptor paralelo (*tree-way*)
 ou S_4	Interruptor intermediário (*four-way*)
 ou $\overset{\text{II}}{S}$	Interruptor bipolar
	Dimmer
 ou { (Baixa FN); (Baixa 2F); (Alta FN); (Alta 2F) }	Tomada bipolar (2P), em parede ou rodapé
 ou { (Baixa FN); (Baixa 2F); (Alta FN); (Alta 2F) }	Tomada bipolar com contato de terra (2P + T), em parede ou rodapé
	Idem anteriores, no piso
	Caixa de passagem
	Ponto de força trifásico
	Ponto de ligação de equipamento

(continua)

(continuação)

× ou ⊖ (No teto) / ⊖ (Embutido)	Ponto de luz incandescente
ou	Arandela (incandescente)
ou	Ponto de luz fluorescente
ou	Ponto de luz (circuito de segurança)
×	Bloco autônomo (circuito de segurança)
ou	Campainha
	Interruptor DR
	Disjuntor DR
	Botão da campainha
	Quadro de distribuição
	Quadro de distribuição geral
	Projetor de luz
	Transformador (símbolo geral)
M	Motor (símbolo geral)
	Chave (símbolo geral)
	Medidor de energia

EXERCÍCIOS

1. Defina os fatores de demanda, de utilização e de carga.

2. Qual é a definição do fator de diversidade para um ponto de distribuição de energia?

3. Para uma indústria que consome 2.000 kWh diários, trabalhando 24 horas por dia, calcule a demanda média e o fator de carga para uma demanda máxima de 200 kW?

4. Defina corrente de projeto para circuitos monofásicos e trifásicos.

5. Qual é o critério para obter a potência de iluminação mínima em função da área do cômodo?

6. Qual é o número mínimo de pontos de tomadas de 600 VA para banheiros, cozinhas, copas, copas-cozinhas, áreas de serviço, lavanderias e locais análogos?

7. Quais são os passos da etapa preliminar da análise inicial de um projeto de instalações elétricas de qualquer prédio?

8. Qual é a definição de centro de carga?

9. De quais fatores dependem a escolha dos valores das tensões, nos diferentes níveis de uma instalação elétrica?

10. Quais são os símbolos dos condutores fase, neutro, de proteção e de retorno?



5

Linhas elétricas

5.1 Aspectos gerais[1]

Os condutores elétricos são os principais componentes das linhas elétricas[2] e são responsáveis pela condução da energia ou dos sinais elétricos.

Chama-se *condutor elétrico* o produto metálico, geralmente de forma cilíndrica e de comprimento muito maior que a sua maior dimensão transversal, utilizado para transportar energia elétrica ou para transmitir sinais elétricos. Os condutores "elementares" são de dois tipos — os fios e as barras —, que serão definidos nesta seção.

É importante observar que o termo "condutor elétrico", na prática, é usado em um sentido mais amplo: para designar, além do condutor propriamente dito (definido anteriormente), os condutores isolados, os cabos uni e multipolares, os fios e os cabos nus, os fios e os cabos cobertos, as barras e os barramentos blindados.

Fio é um produto metálico, maciço e flexível, de seção transversal invariável e de comprimento muito maior que a sua seção transversal. Os fios, geralmente de forma cilíndrica, podem ser usados diretamente como condutores elétricos (com ou sem isolação) ou para a fabricação de "condutores encordoados".

Barra é um condutor rígido, em forma de tubo ou de seção perfilada, fornecido em trechos retilíneos. As barras são usadas como condutores (geralmente sem isolação) em equipamentos, tais como quadros de distribuição, painéis, subestações desabrigadas, abrigadas ou blindadas.

Linha pré-fabricada é uma linha elétrica constituída por peças em tamanhos padronizados, contendo condutores de seção maciça com proteção mecânica, que se ajustam entre si no local da instalação. Os barramentos blindados e os sistemas *undercarpet*[3] são dois exemplos de linhas pré-fabricadas.

Chama-se *barramento* o conjunto de barras de mesma tensão nominal, com seus suportes e acessórios. Um *barramento blindado* é uma linha pré-fabricada cujos condutores são barras (ver Figura 5.1), acondicionados em caixas metálicas, por meio de isoladores.

Condutor encordoado é um condutor constituído por um conjunto de fios dispostos helicoidalmente. Essa construção confere ao condutor maior flexibilidade em relação ao condutor sólido (fio). O condutor encordoado é dito *compactado* quando os interstícios entre os fios componentes tiverem sido reduzidos por compressão mecânica, por trefilação ou pela escolha adequada da forma ou da disposição dos fios. É evidente que esse tipo de construção reduz a área da seção transversal e também a flexibilidade do condutor.

Para condutores de cobre, a NBR NM 280 define seis classes de encordoamento:

- Classe 1: condutores sólidos (fios).
- Classe 2: condutores encordoados, compactados ou não.
- Classe 3: condutores encordoados não compactados;
- Classes 4, 5 e 6: condutores flexíveis com graus de flexibilidade crescentes.

1. Definições de acordo com a NBR 5471.
2. Ver definição na Seção 1.3.
3. Sistema constituído por cabo tipo FCC (*flat conductor cable*), com os respectivos protetores, conectores, terminais, adaptadores, caixas e receptáculos, desenvolvido para instalação sob o carpete.

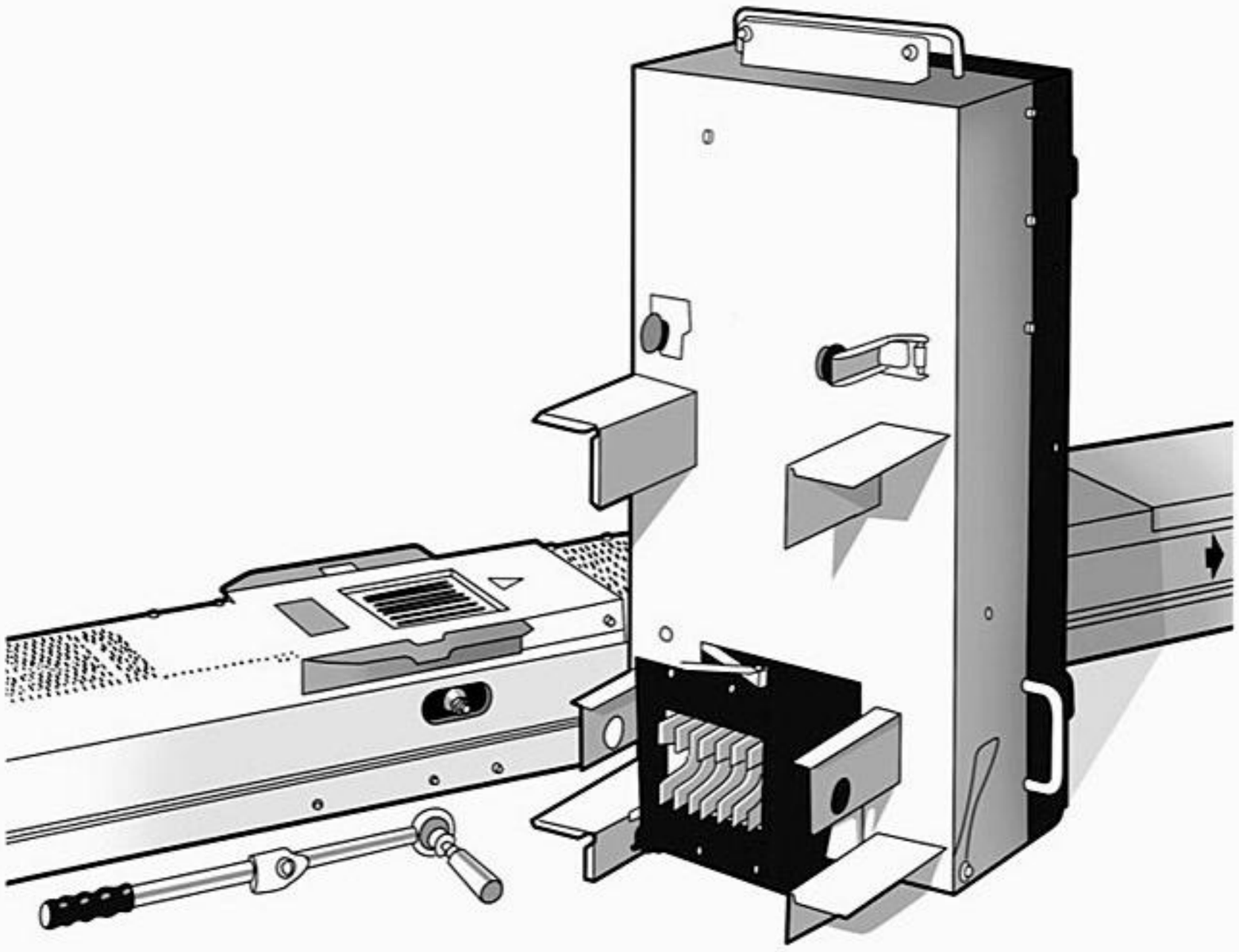


Figura 5.1 ▪ Barramento blindado com caixa (cofre) de derivação

Para condutores de alumínio, a NBR NM 280 indica as classes 1, 2, 3, B, C e D, que também diferem entre si pelo grau de flexibilidade.

Cabo é o conjunto de fios encordoados, isolados ou não entre si, podendo o conjunto ser isolado ou não.

Corda é um componente de um cabo, constituído por um conjunto de fios encordoados e não isolados entre si. *Perna* é a corda destinada a ser encordoada para a formação de "cochas" ou para a formação de uma corda com *encordoamento composto*. *Cocha* é a corda formada por pernas, destinada a ser encordoada para a formação de uma corda com encordoamento bicomposto. Assim, podem-se definir três *tipos de encordoamento* (ver Figura 5.2):

- *Simples:* formado por fios.
- *Composto:* formado por pernas.
- *Bicomposto*: formado por cochas.

Coroa é o conjunto de componentes ou de partes de componentes de um cabo, dispostos helicoidalmente e eqüidistantes de um centro de referência. *Alma* é o fio ou conjunto de fios que formam o núcleo central do cabo, para aumentar a sua resistência mecânica. Nas linhas de transmissão são muito comuns os cabos de alumínio com alma de aço (CAA) (ver Figura 5.3).

A Tabela 5.1 sintetiza o número de fios e cordas nos cabos apresentados na Figura 5.3.

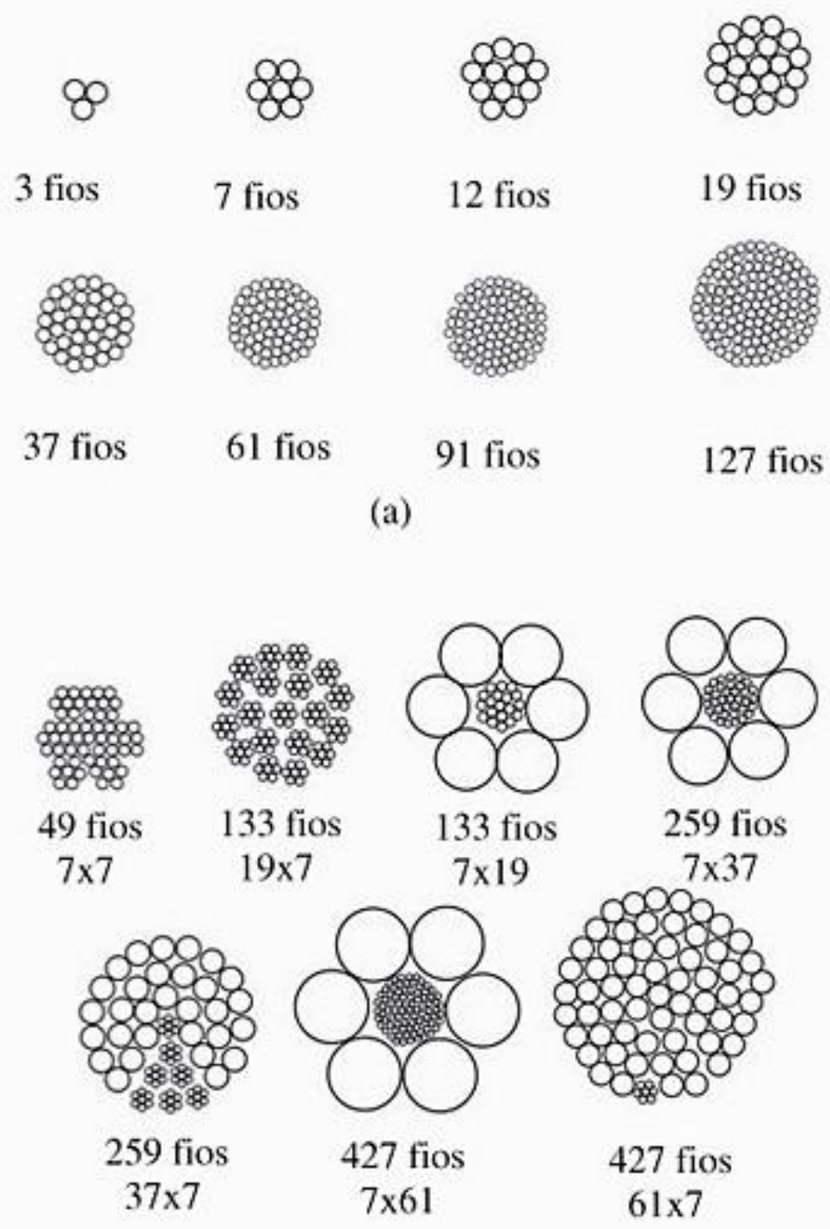


Figura 5.2 ▪ Cabos com encordoamento simples (a) e composto (b). Os espaços vazios do terceiro ao último cabo de (b) são os mesmos da perna preenchida

Tabela 5.1 ■ Fios e cordas dos cabos da Figura 5.3

Nº de fios no cabo		Nº de cordas no cabo	
Alumínio	Aço	Alumínio	Aço
6	1	1	–
18	1	2	–
36	1	3	–
12	7	1	1
26	7	2	1
45	7	3	1
54	7	3	1
54	19	3	2
84	19	4	2

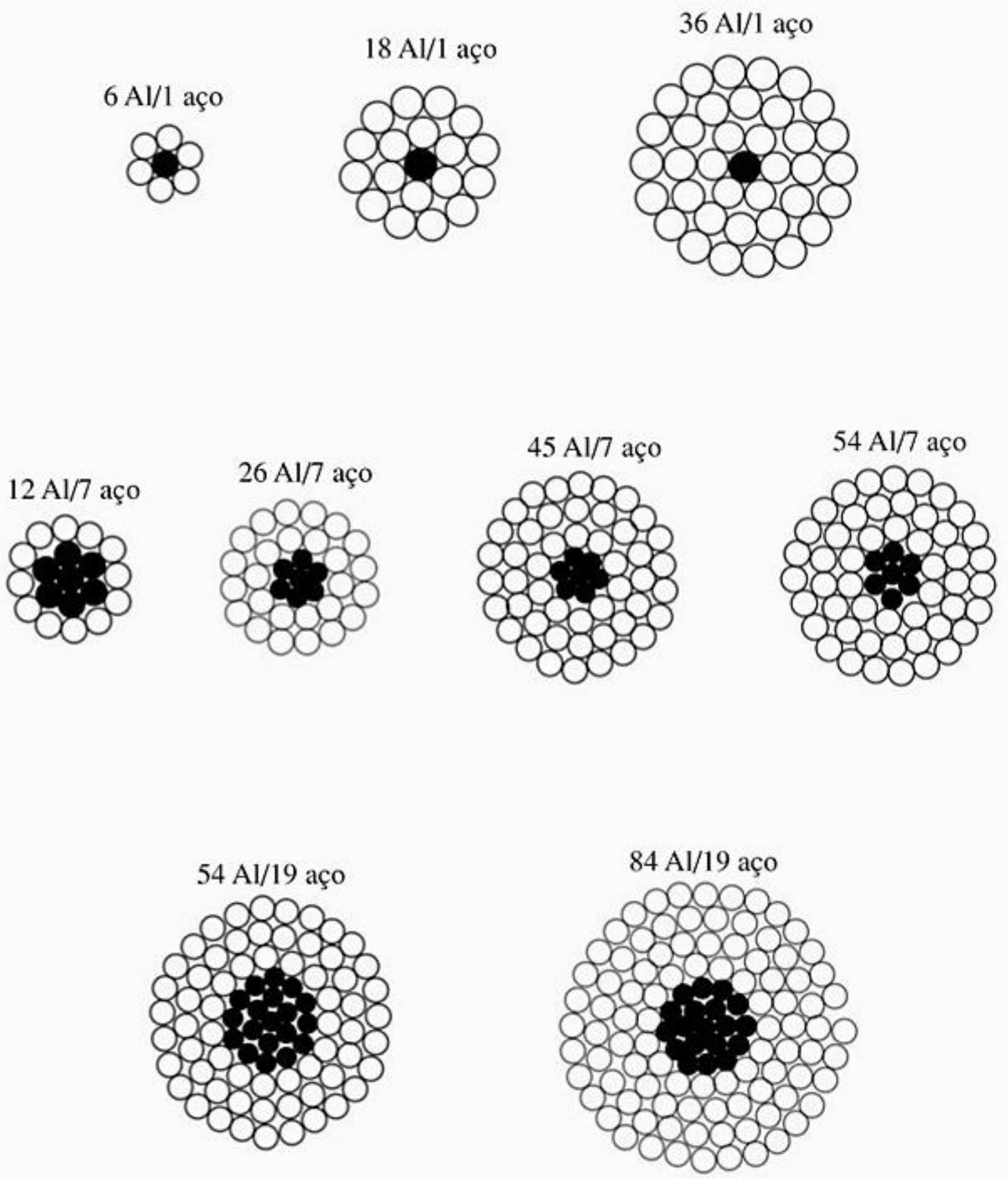
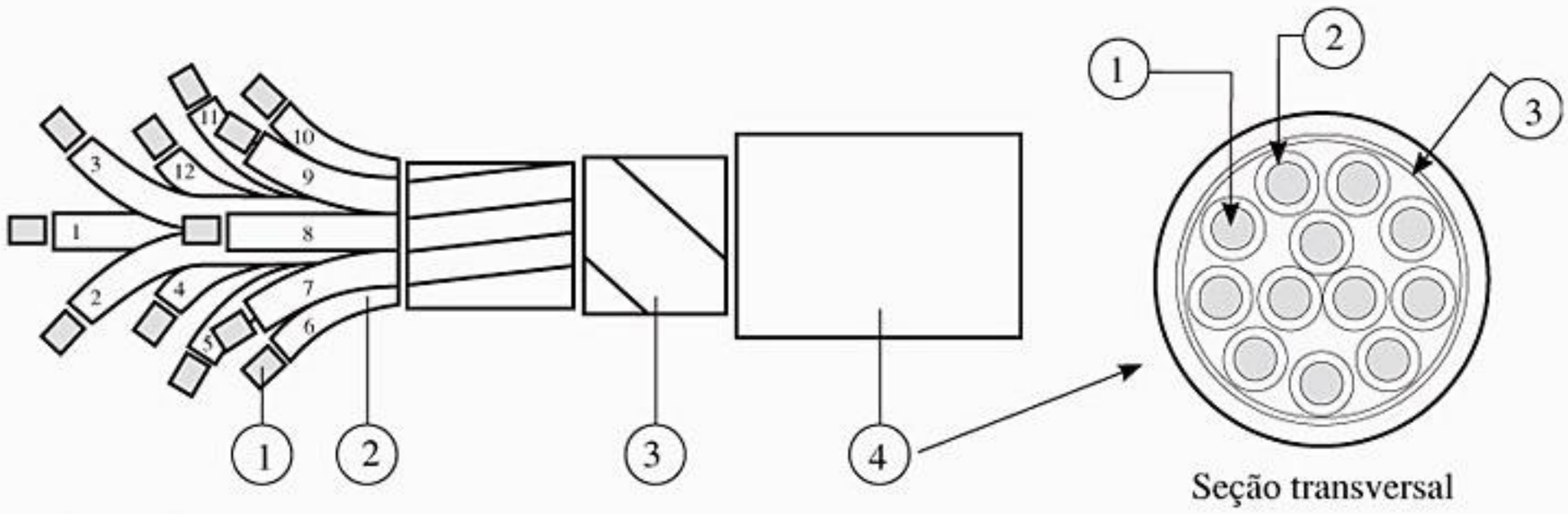


Figura 5.3 ■ Exemplo de cabos de alumínio com alma de aço (CAA)



Legenda:

1. Condutor de cobre
2. Isolação de PVC
3. Capa constituída por enfaixamento com fita de poliéster
4. Cobertura de PVC

Figura 5.4 ▪ Cabo de controle tipo Sintenax

Os *cabos de potência* são os cabos usados para o transporte de energia elétrica em instalações de geração, transmissão, distribuição e utilização. Trata-se, portanto, de uma família de cabos que engloba desde os cabos de linhas de transmissão até os cordões usados na ligação de aparelhos às tomadas de corrente. Podem ser condutores nus (fios ou cabos), condutores cobertos (fios ou cabos), condutores isolados (fios ou cabos), cabos uni ou multipolares, cabos multiplexados ou cordões.

Por sua vez, os *cabos de controle* são os utilizados nos circuitos de controle de sistemas e equipamentos, sendo, em sua maioria, cabos multipolares (ver Figura 5.4).

Revestimento é uma camada delgada de um metal ou liga, a qual é depositada sobre um metal ou liga diferente, para fins de proteção de corrosão ou de ataque de atmosfera agressiva. Um *fio revestido* é um fio dotado de revestimento, como é o caso, por exemplo, do "fio estanhado" (isto é, revestido de estanho). Um *cabo revestido* é um cabo sem isolação ou cobertura, constituído por fios revestidos.

A *isolação* é o conjunto dos materiais isolantes utilizados para isolar eletricamente. No caso dos condutores elétricos, a isolação é aplicada sobre o condutor, para isolá-lo eletricamente do ambiente que o circunda e dos outros condutores que estão próximos. Não se deve confundir *isolação* com *isolamento*; *isolação* tem um sentido estritamente qualitativo (isolação de PVC, de XLPE etc.), enquanto *isolamento* tem sentido quantitativo (resistência de isolamento, nível de isolamento etc.). As isolações serão analisadas na Seção 5.3.

Condutor isolado é o fio ou cabo dotado apenas de isolação, e esta pode ser constituída por uma ou mais camadas. O termo *building wire* é utilizado para designar o condutor isolado usado em construção civil (ver Figura 5.5).



Figura 5.5 ▪ Condutores isolados da linha Superastic cuja isolação é constituída por duas camadas de PVC, sendo a camada externa mais resistente à abrasão e bastante deslizante

Cobertura de um fio ou cabo é um invólucro externo não metálico e contínuo, sem função de isolação, destinado a proteger o fio ou cabo contra influências externas, tais como: sol, vento, chuva, elementos agressivos do ar, fezes de pássaros e insetos e toque de árvores etc. Um *fio coberto* é um fio com ou sem revestimento, dotado apenas de cobertura. Por sua vez, um *cabo coberto* é um cabo dotado somente de cobertura (ver Figura 5.6).

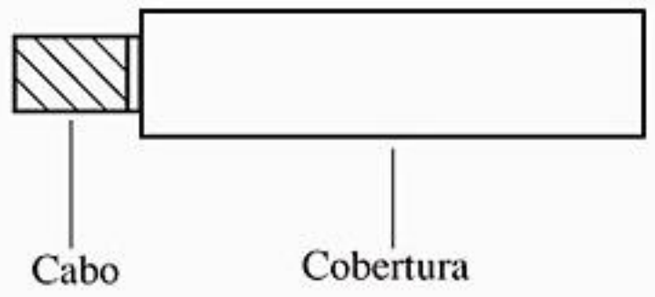


Figura 5.6 ▪ Cabo coberto utilizado em redes aéreas de distribuição



Figura 5.7 ■ Cabos uni e multipolar

Fio nu é um fio sem revestimento, isolação ou cobertura, enquanto *cabo nu* é um cabo sem isolação ou cobertura, constituído por fios nus.

Cabo unipolar é um cabo isolado dotado de cobertura. *Cabo multipolar* é constituído por dois ou mais cabos isolados e dotado, no mínimo, de cobertura. Os condutores isolados que fazem parte dos cabos uni e multipolares são denominadas *veias*. Os cabos multipolares que contêm 2, 3, 4 ou mais veias são chamados, respectivamente, cabos bipolares, tripolares, tetrapolares e assim por diante (ver Figura 5.7).

Nos cabos uni e multipolares, a cobertura age principalmente como proteção da isolação, impedindo seu contato direto com o ambiente. Deve, portanto, possuir propriedades compatíveis com as características do ambiente e do cabo.

Enchimento é o material utilizado em cabos multipolares, para preencher os interstícios entre as veias. *Capa* é o invólucro interno, metálico ou não, aplicado sobre uma veia ou sobre um conjunto de veias de um cabo. As capas não metálicas, geralmente de polímeros termoplásticos, têm como finalidade principal dar ao cabo a forma cilíndrica. As capas metálicas, normalmente, de chumbo ou de alumínio, exercem também função mecânica e elétrica.

A *armação* de um cabo é o elemento metálico que o protege contra esforços mecânicos. O *acolchoamento* consiste no material não metálico que protege mecanicamente o componente situado sob ele, em um cabo uni ou multipolar. Geralmente, o acolchoamento é colocado sob a armação nos chamados "cabos armados" (ver Figura 5.8).



Figura 5.8 ■ Cabo armado (com armação)



Figura 5.9 ■ Cabo multiplexado

Algumas vezes, nos cabos uni e multipolares são usados os *separadores*, que são invólucros não metálicos sem função de isolação, colocados entre os componentes dos cabos para impedir contatos diretos entre eles.

As coberturas, capas, armações etc. são abordadas na Seção 5.5.

Um *cabo multiplexado* é um cabo formado por dois ou mais condutores isolados ou por cabos unipolares, dispostos helicoidalmente, sem cobertura. Um *cabo multiplexado auto-sustentado* (ou *cabo pré-reunido*) é um cabo multiplexado que contém um elemento ou condutor de sustentação, isolado ou não. Os condutores isolados — ou mesmo os cabos unipolares constituintes dos cabos multiplexados e dos cabos pré-reunidos — também são chamados *veias*. A Figura 5.9 mostra um cabo multiplexado formado por condutores isolados.

Um *condutor setorial* é um condutor cuja seção transversal tem a forma aproximada de um setor de um círculo. Um *cabo setorial* é um cabo multipolar cujas veias são condutores isolados setoriais, geralmente compactados. Esse tipo de construção reduz o diâmetro externo do cabo, resultando em economia nos materiais da capa e cobertura (ver Figura 5.10).

Cordoalha é um condutor com forma de tecido de fios metálicos, extremamente flexível.

Cordão é um cabo flexível com reduzido número de condutores isolados (em geral 2 ou 3) de pequena seção transversal, dispostos em paralelo ou torcidos (Figura 5.11).

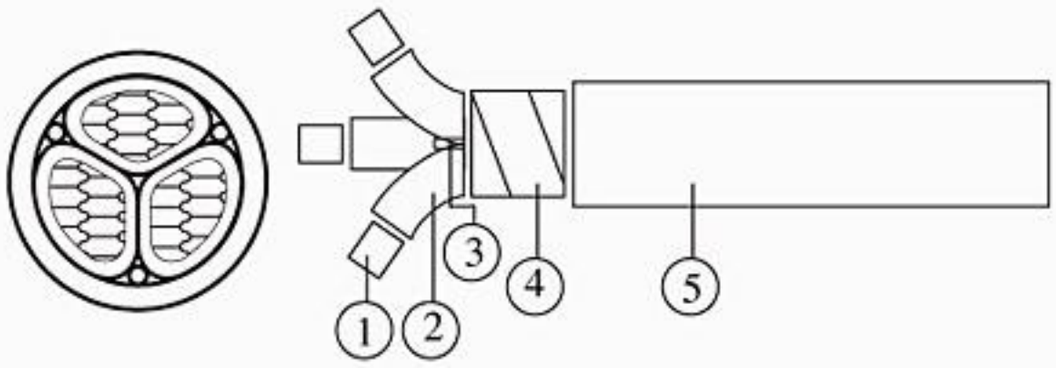
Blindagem é o envoltório condutor ou semicondutor, aplicado sobre o condutor ou sobre o condutor isolado (ou eventualmente sobre um conjunto de condutores isolados), para fins elétricos. As blindagens são analisadas na Seção 5.4.

Cabos secos são cabos unipolares ou multipolares cuja isolação é constituída exclusivamente por material sólido.

Cabo sob pressão é um cabo de potência cuja isolação é mantida sob pressão superior à pressão atmosférica, por meio de um fluido adequado com função isolante. No *cabo a óleo fluido*, o fluido utilizado é um óleo isolante que pode mover-se livremente em seu interior; no *cabo a gás*, o fluido é um gás inerte (por exemplo, hexafluoreto de enxofre, SF6).

Um *cabo concêntrico* é um cabo multipolar constituído por um condutor central isolado e por uma ou mais camadas isoladas entre si de condutores dispostos concentricamente (ver Figura 5.12).

Legenda:
1. Condutor: fios de cobre nu
2. Isolação de voltalene (Polietileno-Reticulado), cor preta
3. Enchimento de PVC
4. Enfaixamento: fita de poliéster
5. Cobertura de PVC, na cor preta



Identificação dos condutores:
Condutores numerados cor branca

Figura 5.10 ■ Cabo tripolar setorial

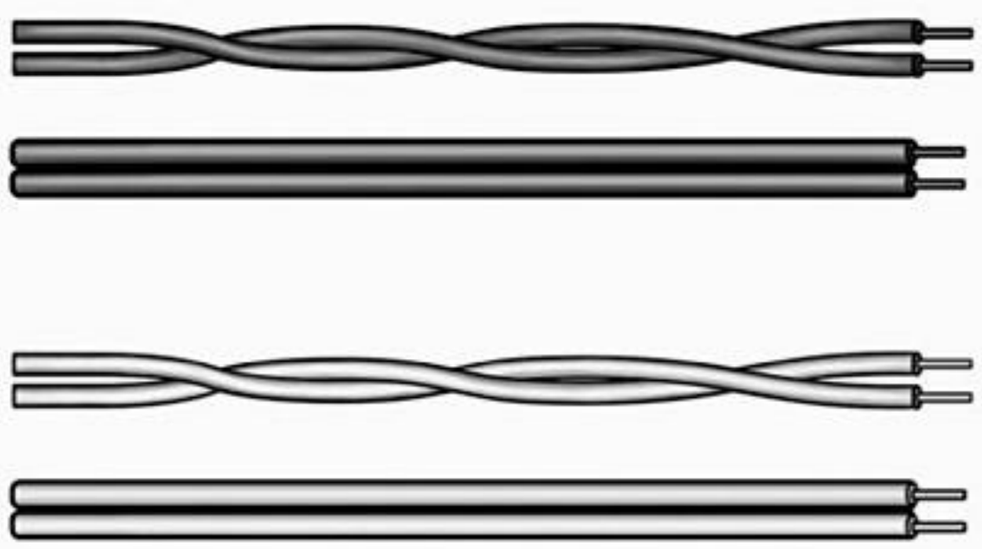
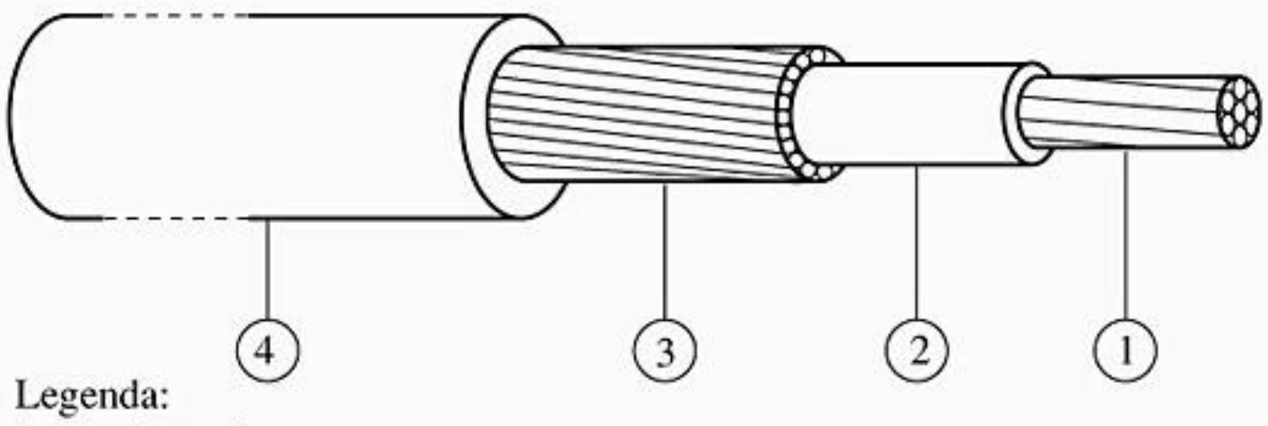


Figura 5.11 ■ Cordões



Legenda:
1. Condutor fase
2. Isolação da fase
3. Conduor neutro (e/ou de proteção)
4. Cobertura

Figura 5.12 ■ Cabo concêntrico

O Quadro 5.1 apresenta algumas aplicações de cabos em instalações elétricas de baixa tensão.

Os cabos de potência são caracterizados por três temperaturas (medidas no condutor):

Quadro 5.1 ■ Aplicações dos cabos de potência em instalações de baixa tensão

- Condutores isolados: circuitos terminais, circuitos de distribuição e ligações internas de quadros de distribuição (principalmente os flexíveis).
- Cabos unipolares: circuitos terminais e circuitos de distribuição.
- Cabos multipolares: circuitos terminais, circuitos de distribuição e ligações de equipamentos móveis ou portáteis (os cabos flexíveis).
- Cabos multiplexados: circuitos de distribuição e circuitos terminais (em certos casos).
- Cordões: ligações de equipamentos móveis ou portáteis.

1. *Temperatura em regime permanente:* que é a temperatura alcançada em qualquer ponto do condutor em condições estáveis de funcionamento; é também chamada *temperatura máxima para serviço contínuo* (ver Seção 9.2).
2. *Temperatura em regime de sobrecarga*: que é a temperatura alcançada em qualquer ponto do condutor em regime de sobrecarga (ver Seção 9.6).
3. *Temperatura em regime de curto-circuito*: que é a temperatura alcançada em qualquer ponto do condutor durante o período do curto-circuito (ver Seção 9.7).

A *capacidade de condução de corrente* de um condutor constituinte de um condutor isolado ou de um cabo isolado é a corrente máxima que pode ser conduzida continuamente pelo condutor, em condições especificadas, sem que sua temperatura em regime permanente ultrapasse um valor especificado (ver Seção 9.2).

A *tensão de isolamento nominal* de um cabo é uma característica relacionada com o material isolante, com a espessura da isolação e com as características de funcionamento do sistema (instalação) em que o cabo vai atuar. É indicada por dois valores de tensão separados por uma barra, designados por *Vo/V*, onde *Vo* se refere à tensão fase-terra e *V* à tensão fase-fase, em volts ou em quilovolts. Os valores normalizados são os seguintes:

- Baixa tensão: 300/300 V; 300/500 V; 450/750 V; 0,6/1 kV.
- Média tensão: 1,8/3 kV; 3,6/6 kV; 6/10 kV; 8,7/15 kV; 12/20 kV; 15/25 kV; 20/35 kV; 27/35 kV.

5.2 Materiais condutores, condutores e suas características

Generalidades

O cobre e o alumínio são os dois metais mais utilizados na fabricação de condutores elétricos, tendo em vista suas propriedades elétricas e mecânicas, bem como seu custo. Ao longo dos anos, o cobre tem sido o mais usado, sobretudo em condutores providos de isolação. O alumínio praticamente domina o campo dos condutores nus para transmissão e distribuição, sendo também usado na fabricação de condutores com isolação, embora em escala bem inferior ao cobre.

O cobre utilizado nos condutores é o cobre eletrolítico, com pureza de até 99,99 por cento. Esse tipo de cobre é obtido em lingotes, que, por processo de laminação ou extrusão a quente, são transformados em *vergalhões*, que são produtos de seção maciça circular. Do vergalhão, os condutores são obtidos por "estiramento a frio", que origina o *cobre duro*, ou por "recozimento", que origina o *cobre mole* ou *recozido;* entre esses dois tipos, tem-se o *cobre meio-duro*.

O alumínio para condutores, com uma pureza de cerca de 99,5 por cento, é obtido normalmente por laminação contínua. Por meio de processos análogos aos do cobre, obtém-se, o *alumínio meio-duro*. O uso desse metal baseia-se principalmente na relação condutividade/peso, a mais elevada entre todos os materiais condutores, e no seu preço, bem mais estável que o do cobre e inferior a ele.

Resistência, resistividade e condutividade

A *resistência elétrica* (R) de um condutor cilíndrico de comprimento l, seção transversal uniforme S, é obtida pela Expressão 5.1

$$R = \rho \frac{l}{S}(\Omega) \qquad (5.1)$$

onde ρ é a *resistividade* do material, também chamada *resistividade de volume*, expressa em ohm × metro (Ω.m) ou, em termos mais práticos, ohm × milímetro quadrado por metro ($\Omega.mm^2/m$).

$$\rho = R \frac{S}{l}(\Omega.\text{m ou } \Omega.\text{mm}^2/\text{m}) \qquad (5.2)$$

A *resistividade de massa*, ρ_m, de um condutor é definida como a relação entre o produto da resistência (R) do condutor por sua massa (m) e o quadrado de seu comprimento, l, sendo medida em ohm × grama por metro quadrado, ($\Omega.g/m^2$), isto é

$$\rho_m = \frac{R \cdot m}{l^2}(\Omega.\text{g/m}^2) \qquad (5.3)$$

A variação da resistividade com a temperatura é dada pela Expressão 5.4

$$\rho_2 = \rho_1[1 + \alpha_1(\theta_2 - \theta_1)] \qquad (5.4)$$

onde ρ_1 é a resistividade à temperatura θ_1, ρ_2 é a resistividade à temperatura θ_2 e α_1 é o *coeficiente de temperatura* relativo a θ_1. Normalmente, a resistividade é referida a 20°C.

A *condutividade* é o inverso da resistividade, sendo medida em siemens por metro (S/m).

$$\tau = \frac{1}{\rho}(\text{S/m}) \qquad (5.5)$$

O padrão internacional para a condutividade é o *padrão internacional de cobre recozido*, IACS (Internacional Annealed Copper Standard), que corresponde à condutividade de um fio de cobre com 1 m de comprimento, 1 mm^2 de seção e resistividade de 0,01724 $\Omega.mm^2/m$ a 20°C. A condutividade de um material condutor é geralmente expressa em uma porcentagem, obtida pela relação entre a condutividade de uma amostra do material a 20°C, $\tau_{20°}$ e a condutividade do padrão τ_{IACS} (também a 20°C), isto é

$$\tau\% = \frac{\tau_{20}}{\tau_{\text{IACS}}} \qquad (5.6)$$

A Tabela 5.2 apresenta os valores de resistividade e de condutividade de alguns materiais condutores importantes.

A norma brasileira NBR NM 280 para condutores de cobre e alumínio apresenta, para o cálculo da resistência a 20°C, R_{20}, a seguinte expressão:

$$R_{20} = \frac{4\rho_{20}}{n\,\pi\,d^2} \cdot k_1 k_2 k_3\ (\Omega/\text{km}) \qquad (5.7)$$

onde

- ρ_{20} é a resistividade-padrão do material em $\Omega.\text{mm}^2/\text{m}$, valendo $17{,}241 \times 10^{-3}$ para o cobre e $28{,}264 \times 10^{-3}$ para o alumínio.
- n é o número de fios no condutor.
- k_1 é um fator que depende do diâmetro dos fios e da natureza do metal, sendo dado na Tabela 5.3.
- k_2 é um fator que depende da classe de encordoamento do condutor, sendo dado na Tabela 5.4.
- k_3 é um fator que depende do tipo de reunião dos condutores, valendo:
  - 1,00 para condutores isolados, cabos unipolares e cabos multipolares cujos condutores não são torcidos.
  - 1,2 para cabos multipolares de alumínio e para cabos multipolares não flexíveis de cobre cujos condutores são torcidos.
  - 1,05 para cabos multipolares flexíveis de cobre cujos condutores são torcidos.

Da Expressão 5.4, fazendo $\theta_1 = 20°\text{C}$ e $\theta_2 = \theta$, obtém-se

$$R_\theta = R_{20}[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)]$$

e então

$$R_{20} = R_\theta \cdot \frac{1}{1 + \alpha_{20}(\theta - 20)} \qquad (5.8)$$

Tabela 5.2 ■ Resistividades e condutividades de alguns materiais (fios)

Material	Diâmetros nominais d (mm)	Resistividade a 20°C (Ω mm²/m)	Condutividade a 20°C (%)
Cobre recozido	–	0,017241	100,00
Cobre meio-duro	$1{,}00 \leq d \leq 8{,}00$	0,017837	96,66
	$8{,}00 \leq d \leq 11{,}20$	0,017654	97,66
Cobre duro	$1{,}00 \leq d \leq 8{,}00$	0,017930	96,16
	$8{,}00 \leq d \leq 11{,}20$	0,017745	97,16
Cobre estanhado	$0{,}075 \leq d \leq 0{,}280$	0,018508	93,15
	$0{,}280 \leq d \leq 0{,}510$	0,018312	94,16
	$0{,}510 \leq d \leq 2{,}62$	0,017930	96,16
	$2{,}62 \leq d \leq 7{,}36$	0,017745	97,16
	$7{,}36 \leq d \leq 11{,}70$	0,017654	97,66
Alumínio 1350	–	0,028264	61,00
Liga de alumínio	–	0,032840	52,50

Tabela 5.3 ■ Valores do fator k1, segundo a NBR NM 280

Diâmetro máximo dos fios do condutor		Condutor maciço			Condutor encordoado		
Acima de (mm)	Até e inclusive (mm)	Cobre revestido	Cobre nu	Alumínio nu	Cobre revestido	Cobre nu	Alumínio nu
0,05	0,10	–	–	–	1,12	1,07	1,12
0,10	0,31	–	–	–	1,07	1,04	1,07
0,31	0,91	1,05	1,03	1,05	1,04	1,02	1,04
0,91	3,60	1,04	1,03	1,04	1,03	1,02	1,03
3,60	–	1,04	1,03	1,04	–	–	–

Tabela 5.4 ■ Valores do fator k_2 segundo a NBR NM 280

Valor	Cobre	Alumínio
1,00	**Condutores maciços**	
1,02	Condutores encordoados classes 2 e 3, se o diâmetro nominal dos fios excede 0,6 mm.	Condutores encordoados classes 1, 2, e 3, se o diâmetro nominal dos fios excede 0, 6 mm.
1,03	Condutores encordoados classes 4, 5 e 6, se o diâmetro nominal dos fios for superior a 0,6 mm.	–
1,04	Condutores encordoados classes 2, 4, 5 e 6, se o diâmetro nominal dos fios for igual ou inferior a 0,6 mm.	Condutores encordoados classe 2, se o diâmetro nominal dos fios for igual ou inferior a 0,6 mm.

Fazendo

$$\frac{1}{1 + \alpha_{20}(\theta - 20)} = K_\theta \tag{5.9}$$

tem-se

$$R_{20} = R_\theta \cdot K_\theta \tag{5.10}$$

Considerando a resistência R_{20} em Ω/km e sendo R_θ referente a um cabo de comprimento l, em metro, resultar da Expressão 5.10

$$R_{20} = R_\theta \cdot K_\theta \cdot \frac{1.000}{l} \tag{5.11}$$

Para o cobre, a NBR NM 280 considera $\alpha_{20} = 0{,}004$ °C^{-1} e, para o alumínio, adota $\alpha_{20} = 0{,}00403$ °C^{-1}. Nessas condições, tem-se:

- Cobre

$$K_\theta = \frac{1}{1 + 0{,}004(\theta - 20)} = \frac{250}{(230 + \theta)} \tag{5.12}$$

- Alumínio

$$K_\theta = \frac{1}{1 + 0{,}00403(\theta - 20)} = \frac{248}{(228 + \theta)} \tag{5.13}$$

Portanto, resultará da Expressão 5.11:

- Cobre

$$R_{20} = R_\theta \cdot \frac{250}{(230 + \theta)} \cdot \frac{1.000}{l} \tag{5.14}$$

- Alumínio

$$R_{20} = R_\theta \cdot \frac{248}{(228 + \theta)} \cdot \frac{1.000}{l} \tag{5.15}$$

As Tabelas 5.5 e 5.6, respectivamente, dão os valores de K_θ para condutores de cobre e de alumínio.

Conhecendo-se o valor da resistência R de uma amostra de comprimento l à temperatura θ, pode-se obter a resistência R_{20} a 20°C, em Ω/km, usando-se a Expressão 5.11 e as Tabelas 5.5 ou 5.6 ou, ainda, usando-se a Expressão 5.14 ou a Expressão 5.15.

As resistências até aqui consideradas referem-se à corrente contínua. Em corrente alternada ocorre um aumento da resistência (R) devido ao aumento das perdas causado pelos efeitos pelicular e de proximidade.

- *Efeito pelicular* é o fenômeno pelo qual o valor da densidade de uma corrente alternada é maior perto da superfície externa de um condutor do que no seu interior.
- *Efeito de proximidade* é o fenômeno caracterizado por uma distribuição não uniforme da densidade de corrente em um condutor, causada pela influência da corrente em condutores próximos.

Assim, chamando de R a resistência em corrente contínua e de R_{CA} a resistência em corrente alternada, pode-se escrever:

$$R_{CA} = R + \Delta R\ (\Omega/\text{km}) \tag{5.16}$$

sendo

$$\Delta R = R(y_S + y_p) \tag{5.17}$$

onde y_s e y_p são fatores que levam em conta os efeitos pelicular e de proximidade, respectivamente, podendo ser obtidos pelas Expressões 5.18 e 5.20.

$$y_S = \frac{x_s^4}{192 + 0{,}8x_s^4} \tag{5.18}$$

com

$$x_S = \left(\frac{8\pi f}{R} \cdot 10^{-4} \cdot k_s\right)^{1/2} \tag{5.19}$$

e

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0{,}8x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{l}\right)^2 \left[0{,}312 \cdot \frac{d_c^2}{l} + \frac{1{,}18}{\frac{x_p^4}{192 + 0{,}8x_p^4} + 0{,}27}\right] \tag{5.20}$$

Tabela 5.5 ■ Fatores de correção da temperatura (K_θ) para condutores de cobre

Temperatura do condutor no momento da medição (°C)	Fator de correção para condutores de cobre K_θ
5	1,064
6	1,059
7	1,055
8	1,050
9	1,046
10	1,042
11	1,037
12	1,033
13	1,029
14	1,025
15	1,020
16	1,016
17	1,012
18	1,008
19	1,004
20	1,000
21	0,996
22	0,992
23	0,988
24	0,984
25	0,980
26	0,977
27	0,973
28	0,969
29	0,965
30	0,962

Nota: Os valores dos fatores de correção K_θ estão baseados no coeficiente de temperatura de resistência de 0,004°C^{-1} a 20°C.

Tabela 5.6 ■ Fatores de correção da temperatura (K_θ) para condutores de alumínio

Temperatura do condutor no momento da medição (°C)	Fatores de correção para condutores de alumínio K_θ
5	1,0644
6	1,0598
7	1,0553
8	1,0509
9	1,0464
10	1,0420
11	1,0377
12	1,0333
13	1,0290
14	1,0248
15	1,0206

(continua)

(continuação)

Temperatura do condutor no momento da medição (°C)	Fatores de correção para condutores de alumínio K_θ
16	1,0164
17	1,0122
18	1,0081
19	1,0041
20	1,0000
21	0,9960
22	0,9920
23	0,9881
24	0,9841
25	0,9802
26	0,9764
27	0,9726
28	0,9688
29	0,9650
30	0,9612

Nota: Valores baseados no coeficiente de resistência-temperatura = 0,00403 °C^{-1} a 20 °C.

com

$$x_p = \frac{8\pi f}{R} \cdot 10^{-4} \cdot k_p \qquad (5.21)$$

onde

- d_c é o diâmetro do condutor (mm); para cabos com condutores setoriais $d_c = d_x$ = diâmetro equivalente de um condutor circular de mesma seção.
- l é a distância entre eixos dos condutores (mm); para cabos com condutores setoriais $l = d_x + 2c$, sendo c a espessura do material isolante (mm);
- f é a freqüência (Hz).
- k_s e k_p são os valores experimentais, muitas vezes tomados iguais à unidade.

As perdas por efeito Joule em um condutor podem ser escritas:

$$P_j = R_{CA} \cdot I_B^2 \,(\text{W/km}) \qquad (5.22)$$

onde I_B é a corrente de projeto que circula pelo condutor.

Seções nominais

Os condutores elétricos são simplesmente caracterizados pela sua *seção nominal*. Essa seção nominal — que não deve ser confundida com a seção geométrica total (área da seção transversal), do fio ou cabo — está vinculada ao seu valor máximo de resistência a 20°C (R_{20} em Ω/km) e, em muitos casos, também é complementada por outras características (como quantidade mínima de fios ou diâmetro máximo dos fios que a compõem).

As seções nominais são dadas em milímetros quadrados, de acordo com o padrão IEC, sendo caracterizadas pelas normas NBR NM 280, para condutores de cobre e de alumínio, em função da classe de encordoamento, como é indicado nas Tabelas 5.7 a 5.16.

Reatância indutiva

A indutância L de um condutor e sua respectiva reatância indutiva X_L dependem não só das características do condutor propriamente dito, como também das distâncias entre os diversos condutores do circuito. Para a indutância e a reatância, têm-se:

$$L = k + 0{,}46 \log \frac{2S_M}{d_c} \,(\text{mH/km}) \qquad (5.23)$$

e

$$X_L = 2\pi f L \times 10^{-3} \,(\Omega/\text{km}) \qquad (5.24)$$

onde

- k é o fator que depende do número de fios do condutor, dado na Tabela 5.17;
- d_c é o diâmetro do condutor (mm);
- S_M é a distância média geométrica dos condutores (mm), definida como a média geométrica das distâncias entre os eixos dos diversos condutores do circuito
- f = freqüência (H_z)

A Tabela 5.18 mostra alguns valores típicos de distância média geométrica.

Tabela 5.7 ■ Condutores sólidos (maciços) de cobre para cabos uni e multipolares (NBR NM 280)

Seção nominal (mm²)	Resistência máxima do condutor a 20 °C	
	Condutores circulares	
	Fios nus (Ω/km)	Fios revestidos (Ω/km)
0,5	36,0	36,7
0,75	24,5	24,8
1	18,1	18,2
1,5	12,1	12,2
2,5	7,41	7,56
4	4,61	4,70
6	3,08	3,11
10	1,83	1,84
16	1,15	1,16
25	0,727 (A)	–
35	0,524 (A)	–
50	0,387 (A)	–
70	0,268 (A)	–
95	0,193 (A)	–
120	0,153 (A)	–
150	0,154 (A)	–

Nota:
(A) Condutores sólidos de seção acima de 16 mm² são para tipos de cabos especiais.

Tabela 5.8 ■ Classe 2 – condutores e encordoados para cabos uni e multipolares

Seção nominal (mm²)	Número mínimo de fios no condutor			Resistência máxima do condutor a 20 °C	
	Condutor não-compacto circular	Condutor compacto circular	Condutor compacto não-circular	Formados com fios nus (Ω/km)	Formados com fios revestidos (Ω/km)
0,5	7	–	–	36,0	36,7
0,75	7	–	–	24,5	24,8
1	7	–	–	18,1	18,2
1,5	7	6	–	12,1	12,2
2,5	7	6	–	7,41	7,56
4	7	6	–	4,61	4,70
6	7	6	–	3,08	3,11
10	7	6	–	1,83	1,84
16	7	6	–	1,15	1,16
25	7	6	6	0,727	0,734
35	7	6	6	0,524	0,529
50	19	6	6	0,387	0,391
70	19	12	12	0,268	0,270
95	19	15	15	0,193	0,195
120	37	18	18	0,153	0,154
150	37	18	18	0,124	0,126

(continua)

(continuação)

Seção nominal (mm²)	Número mínimo de fios no condutor			Resistência máxima do condutor a 20 °C	
	Condutor não compacto circular	Condutor compacto circular	Condutor compacto não circular	Formados com fios nus (Ω/km)	Formados com fios revestidos (Ω/km)
185	37	30	30	0,0991	0,100
240	61	34	34	0,0754	0,0762
300	61	34	34	0,0601	0,0607
400	61	53	53	0,0470	0,0475
500	61	53	53	0,0366	0,0369
630	91	53	53	0,0283	0,0286
800	91	53	–	0,0221	0,0224
1,000	91	53	–	0,0176	0,0177
1,200	(A)	(A)	–	0,0151	0,0151
1,400 (B)	(A)	(A)	–	0,0129	0,0129
1,600	(A)	(A)	–	0,0113	0,0113
1,800 (B)	(A)	(A)	–	0,0101	0,0101
2,000	(A)	(A)	–	0,0090	0,0090

Notas:
(A) Número mínimo de fios não especificados
(B) Seções não recomendadas

Tabela 5.9 ■ Classe 3 – condutores encordoados não-compactados para cabos uni e multipolares

Seção nominal (mm²)	Número mínimo dos fios no condutor	Resistência máxima do condutor a 20 °C	
		Formados com fio nus (Ω/km)	Formados com fios revestidos (Ω/km)
10	12	1,83	1,84
16	19	1,15	1,16
25	19	0,727	0,734
35	19	0,524	0,529
50	27	0,387	0,391
70	37	0,268	0,270
95	37	0,193	0,195
120	61	0,153	0,154
150	61	0,124	0,126
185	91	0,0991	0,100

Tabela 5.10 ■ Classe 4 – condutores flexíveis para cabos uni e multipolares

Seção nominal (mm²)	Diâmetro máximo dos fios no condutor (mm)	Resistência máxima do condutor a 20 °C	
		Formados com fios nus (Ω/km)	Formados com fios revestidos (Ω/km)
0,5	0,31	39,0	40,1
0,75	0,31	26,0	26,7
1	0,31	19,5	20,0

(continua)

(continuação)

Seção nominal (mm²)	Diâmetro máximo dos fios no condutor (mm)	Resistência máxima do condutor a 20 °C	
		Formados com fios nus (Ω/km)	Formados com fios revestidos (Ω/km)
1,5	0,41	13,3	13,7
2,5	0,41	7,98	8,21
4	0,51	4,95	5,09
6	0,51	3,30	3,39
10	0,51	1,91	1,95
16	0,61	1,21	1,24
25	0,61	0,780	0,795
35	0,68	0,554	0,565
50	0,68	0,386	0,393
70	0,68	0,272	0,277
95	0,68	0,206	0,210
120	0,68	0,161	0,164
150	0,86	0,129	0,132
185	0,86	0,106	0,108
240	0,86	0,0801	0,0817
300	0,86	0,0641	0,0654
400	0,86	0,0486	0,0495
500	0,86	0,0384	0,0391

Tabela 5.11 ■ Classe 5 – condutores flexíveis para cabos uni e multipolares

Seção nominal (mm²)	Diâmetro máximo dos fios no condutor (mm)	Resistência máxima do condutor a 20 °C	
		Formados com fios nus (Ω/km)	Formados com fios revestidos (Ω/km)
0,5	0,21	39,0	40,1
0,75	0,21	26,0	26,7
1	0,21	19,5	20,0
1,5	0,26	13,3	13,7
2,5	0,26	7,98	8,21
4	0,31	4,95	5,09
6	0,31	3,30	3,39
10	0,41	1,91	1,95
16	0,41	1,21	1,24
25	0,41	0,780	0,795
35	0,41	0,554	0,565
50	0,41	0,386	0,393
70	0,51	0,272	0,277
95	0,51	0,206	0,210
120	0,51	0,161	0,164
150	0,51	0,129	0,132
185	0,51	0,106	0,108

(continua)

(continuação)

Seção nominal (mm²)	Diâmetro máximo dos fios no condutor (mm)	Resistência máxima do condutor a 20 °C	
		Formados com fios nus (Ω/km)	Formados com fios revestidos (Ω/km)
240	0,51	0,0801	0,817
300	0,51	0,0641	0,0654
400	0,51	0,0486	0,0495
500	0,61	0,0384	0,0391
630	0,61	0,0287	0,0292

Tabela 5.12 ■ Classe 6 – condutores flexíveis para cabos uni e multipolares

Seção nominal (mm²)	Diâmetro máximo dos fios no condutor (mm)	Resistência máxima do condutor a 20 °C	
		Formados com fios nus (Ω/km)	Formados com fios revestidos (Ω/km)
0,5	0,16	39,0	40,1
0,75	0,16	26,0	26,7
1	0,16	19,5	20,0
1,5	0,16	13,3	13,7
2,5	0,16	7,98	8,21
4	0,16	4,95	5,09
6	0,21	3,30	3,39
10	0,21	1,91	1,95
16	0,21	1,21	1,24
25	0,21	0,780	0,795
35	0,21	0,554	0,565
50	0,31	0,386	0,393
70	0,31	0,272	0,277
95	0,31	0,206	0,210
120	0,31	0,161	0,164
150	0,31	0,129	0,132
185	0,41	0,106	0,108
240	0,41	0,0801	0,0817
300	0,41	0,0641	0,0654

Tabela 5.13 ■ Cabos para instalações fixas – condutores circulares de alumínio Classe 1

Seção nominal (mm²)	Número mínimo de fios no condutor	Resistência máxima do condutor a 20 °C	
		Condutores de alumínio	
		Unipolares (Ω/km)	Multipolares (Ω/km)
1	1	29,3	29,9
1,5	1	19,7	20,0
2,5	1	11,8	12,0
4	1	7,39	7,54
6	1	4,91	5,01
10	1	2,94	3,00
16	1	1,85	1,89
25	1	1,17	1,20
35	1	0,859	0,876
50	7	0,592	0,604

(continua)

(continuação)

Seção nominal (mm²)	Número mínimo de fios no condutor	Resistência máxima do condutor a 20 °C	
		Condutores de alumínio	
		Unipolares (Ω/km)	Multipolares (Ω/km)
120	19	0,245	0,250
150	19	0,194	0,198
240	37	0,126	0,128
300	37	0,0998	0,102

Tabela 5.14 ■ Cabos para instalações fixas – condutores circulares e perfilados de alumínio Classe 2

Seção nominal (mm²)	Número mínimo de fios no condutor		Resistência máxima do condutor a 20 °C	
	Condutores circulares	Condutores circulares compactados	Codutores de alumínio	
			Unipolares (Ω/km)	Multipolares (Ω/km)
1	7	–	34,8	35,4
1,5	7	–	22,2	22,7
2,5	7	–	12,1	12,4
4	7	–	7,5	7,70
6	7	–	4,99	5,09
10	7	1	2,96	3,02
16	7	1	1,87	1,91
25	7	1	1,18	1,20
35	7	6 (A)	0,851	0,868
50 (B)	19	6 (A)	0,628	0,641
70	19	15 (A)	0,435	0,443
95	19	15 (A)	0,313	0,320
120	37	15 (A)	0,148	0,253
150	37	15 (A)	0.202	0,206
185	37	30 (A)	0,161	0,164
240	61	30 (A)	0,122	0,125
300	61	30 (A)	0,0976	0,100
400	61	53	0,0763	0,0778
500	61	53	0,0605	0,0617
630	127	114	0,0469	0,0478
800	127	–	0,0367	0,0374
1.000	127	–	0,0291	0,0297

Notas:
(A) Para aplicações muito especiais, esses condutores podem ser fabricados como condutores maciços.
(B) A seção efetiva é de aproximadamente 47 mm².

Tabela 5.15 ■ Cabos para instalações fixas — condutores circulares de alumínio Classe 3

Seção nominal (mm²)	Número mínimo de fios no condutor	Resistência máxima do condutor a 20 °C	
		Condutores de alumínio	
		Unipolares (Ω/km)	Multipolares (Ω/km)
10	12	2,91	2,97
16	19	1,84	1,88
25	19	1,09	1,11
35	19	0,850	0,867
50	27	0,598	0,610
70	37	0,4347	0,445
95	37	0,323	0,329
120	61	0,242	0,247
150	61	0,196	0,200
185	91	0,162	0,166

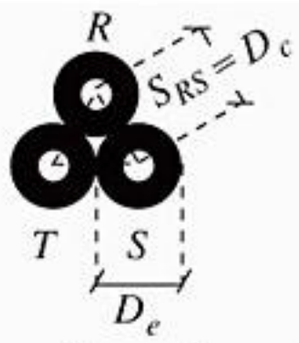
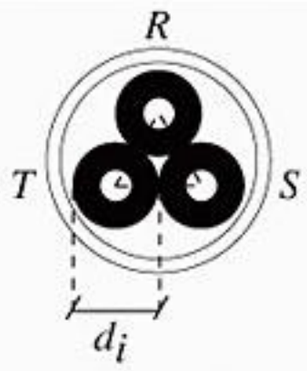
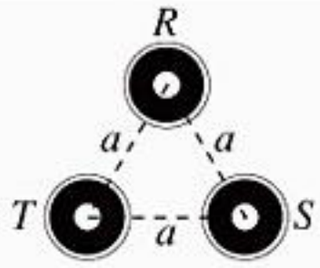
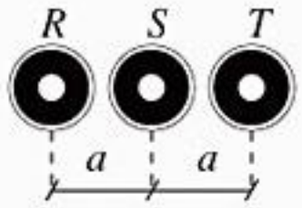
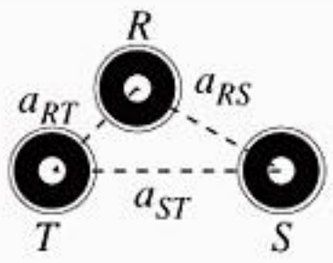
Tabela 5.16 ■ Condutores para instalações fixas — formações de condutores utilizados para o cálculo dos valores de resistência

Seção nominal (mm²)	Classe 1		Classe 2		Classe 3	
	Número de fios (n)	Diâmetro dos fios (d) (mm)	Número de fios (n)	Diâmetro dos fios (d) (mm)	Número de fios (n)	Diâmetro dos fios (d) (mm)
1	1	1,13	7	0,40	–	–
1,5	1	1,38	7	0,50	–	–
2,5	1	1,78	7	0,67	–	–
4	1	2,25	7	0,85	–	–
6	1	2,76	7	1,04	–	–
10	1	3,57	7	1,35	12	1,04
16	1	4,50	7	1,70	19	1,04
25	1	5,65	7	2,14	19	1,35
35	1	6,60	7	2,52	19	1,53
50	7	3,02	19	1,78	27	1,53
70	–	–	19	2,14	37	1,53
95	–	–	19	2,52	37	1,78
120	19	2,85	37	2,03	61	1,60
150	19	3,20	37	2,25	61	1,78
185	–	–	37	2,52	91	1,60
240	37	2,85	61	2,25	–	–
300	37	3,20	61	2,52	–	–
400	–	–	61	2,85	–	–
500	–	–	61	3,20	–	–
630	–	–	127	2,52	–	–
800	–	–	127	2,85	–	–
1.000	–	–	127	3,20	–	–

Tabela 5.17 ■ Valores do fator *k* (mH/km)

Nº de fios componentes do condutor	*k* (mH/km)
1	0,0500
2	0,0772
7	0,0642
19	0,0555
37	0,0528
61	0,0515
>> 61	0,0512
Corda compacta	0,0500

Tabela 5.18 ■ Distâncias médias geométricas para algumas disposições de cabos em circuitos trifásicos

Disposição dos condutores	Esquema	Cálculo de S_M
Três cabos unipolares em trifólio	 $S_{RT} = S_{RS} = S_{ST} = D_e$	$S_M = \sqrt[3]{S_{RT} \cdot S_{RS} \cdot S_{ST}} = D_c$
Um cabo tripolar	 $S_{RT} = S_{RS} = S_{ST} = d_i$	$S_M = \sqrt[3]{d_i^3} = d_i$
Três cabos unipolares em triângulo com distância iguais de *a*	 $S_{RT} = S_{RS} = S_{ST} = a$	$S_M = \sqrt[3]{a \cdot a \cdot a} = a$
Três cabos unipolares em plano com distância iguais de *a*	 $S_{RS} = a$ $S_{RT} = 2a$ $S_{ST} = a$	$S_M = \sqrt[3]{a \cdot 2a \cdot a} = a\sqrt[3]{2}$
Três cabos unipolares espaçados assimetricamente		$S_M = \sqrt[3]{a_{RS} \cdot a_{ST} \cdot a_{RT}}$

Para cabos com condutores setoriais, devem-se considerar d_c e S_M com valores iguais aos de um cabo com condutores redondos e seção equivalente.

Cobre *versus* alumínio

O cobre e o alumínio são os materiais condutores mais utilizados na fabricação dos condutores elétricos. A seguir, são apresentados alguns aspectos comparativos entre esses dois metais.

- *Condutividade:* o alumínio apresenta uma condutividade de cerca de 60 por cento da do cobre. Assim, para dada capacidade de condução de corrente, é necessário usar um condutor de alumínio com seção nominal de 1,67 vez maior que a seção do condutor de cobre.
- *Densidade*: a densidade do alumínio é de 2,7 g/cm^3 e a do cobre de 8,89 g/cm^3. Por ser mais leve, o alumínio é mais fácil de ser transportado e suspenso.
- A relação entre as densidades e as condutividades mostra que 1 kg de alumínio realiza o mesmo "trabalho elétrico" que cerca de 2 kg de cobre.
- *Oxidação*: quando exposta ao ar, a superfície do alumínio fica recoberta por uma camada invisível de óxido, de características altamente isolantes e de difícil remoção. Nas conexões com alumínio, um bom contato só será conseguido com a ruptura dessa camada. Com efeito, a principal finalidade dos conectores utilizados, de pressão e aparafusados, é a de romper o filme de óxido. Uma vez removida a camada inicial, costuma-se usar, durante a preparação de uma conexão, compostos que inibem a formação de uma nova camada de óxido. O cobre, com relação a esse aspecto, é superior ao alumínio.
- *Escoamento:* por ser mais mole que o cobre, o alumínio escoa com pequenas pressões. Por esse motivo, os conectores usados em condutores de alumínio devem ter as superfícies de contato grandes o suficiente para distribuir as tensões e evitar danos no local do condutor a ser comprimido. Por sua vez, é indispensável o reaperto periódico dos conectores, afrouxados pelo escoamento, para evitar a formação de óxido, que eleva a resistência elétrica da conexão, provocando o seu aquecimento. Para o condutor de alumínio, as conexões devem atender às normas NBR 9513, NBR 9313 e a NBR 9326.
- *Eletropositividade*: o alumínio e o cobre estão separados eletroquimicamente por 2 V. Essa diferença de potencial é responsável pela predisposição da conexão cobre-alumínio (ou liga de cobre – liga de alumínio) à corrosão galvânica. Devem-se utilizar conectores especiais para evitar a ocorrência da corrosão galvânica.

Dos aspectos comparativos apresentados, pode-se chegar a algumas conclusões, a seguir elencadas:

- O alumínio representa a solução ideal para linhas de transmissão e de distribuição (cabos nus), tendo em vista, principalmente, a relação condutividade/peso, com a utilização de maiores vãos empregando-se menor número de torres de transmissão.
- Em instalações em que as linhas possuam muitas conexões, não são realizadas manutenções periódicas *e/ou* são utilizados componentes com liga de cobre em seus pontos de contato (por exemplo, interruptores, tomadas de corrente etc.), geralmente os condutores de cobre (condutores *e/ou* cabos isolados) são os mais recomendados.
- Em locais da alta salinidade, tais como em regiões litorâneas, os condutores de cobre são recomendáveis.

A NBR 5410, em sua última edição, só admite o uso de condutores de alumínio:

- Em *linhas aéreas externas*, sem qualquer restrição do ponto de vista elétrico.
- Em *instalações industriais*, desde que sejam atendidas as três condições a seguir:
  (a) A seção nominal dos condutores deve ter, no mínimo, 16 mm^2.
  (b) A instalação de alumínio deve ser alimentada diretamente por uma subestação, por um transformador ou por geração própria.
  (c) A instalação e a manutenção devem ser realizadas por pessoas qualificadas (BA5).
- Em *instalações comerciais* (e análogas), desde que sejam atendidas as três condições a seguir:
  (a) A seção nominal dos condutores deve ter, no mínimo, 50 mm^2.
  (b) O local deve ser de baixa densidade de ocupação e possuir condições de fuga fáceis, isto é, local BD1 (como é o caso de prédios comerciais de até seis andares).
  (c) A instalação e a manutenção devem ser realizadas por pessoas qualificadas (BA5).

Por sua vez, a NBR 5410 não admite, sob nenhuma circunstância, o uso de condutores de alumínio em locais de alta densidade de ocupação e com condições de fuga difíceis, isto é, locais BD4 (caso de hotéis, hospitais, casas de shows etc.) e em locais residenciais.

5.3 Isolações[4]

Gradiente de potencial e rigidez dielétrica

Chama-se *gradiente de potencial*, dado normalmente em kV/mm, a relação entre a tensão aplicada a uma camada elementar de dielétrico e a espessura dessa camada.

4. Material cedido pela Prysmian.

Sabe-se que o gradiente não é uniforme em toda a espessura do dielétrico, sendo mais elevado nas proximidades do condutor e mais baixo na superfície externa da isolação, como mostra a Figura 5.13.

O gradiente médio é fornecido pela relação entre a tensão fase-terra e a espessura total isolante, o gradiente máximo corresponde ao gradiente na superfície de contato entre o condutor e a isolação, e o gradiente mínimo é usado no local de contato entre a superfície externa da isolação e a terra (ou blindagem externa do cabo, que é aterrada).

O gradiente de perfuração do dielétrico, ou *rigidez dielétrica*, é um dos parâmetros mais importantes na escolha do material isolante. É necessário ressaltar, entretanto, que a rigidez varia de seção para seção no cabo, apresentando uma dispersão considerável em torno do valor médio.

Essa dispersão é aleatória e proporcional ao número de vazios ou de impurezas localizadas na isolação, que se constituem em pontos de ionização, com enfraquecimento da rigidez dielétrica nesse local.

Por meio de provas de tensão em amostras, observa-se que a dispersão de valores de rigidez é muito menor

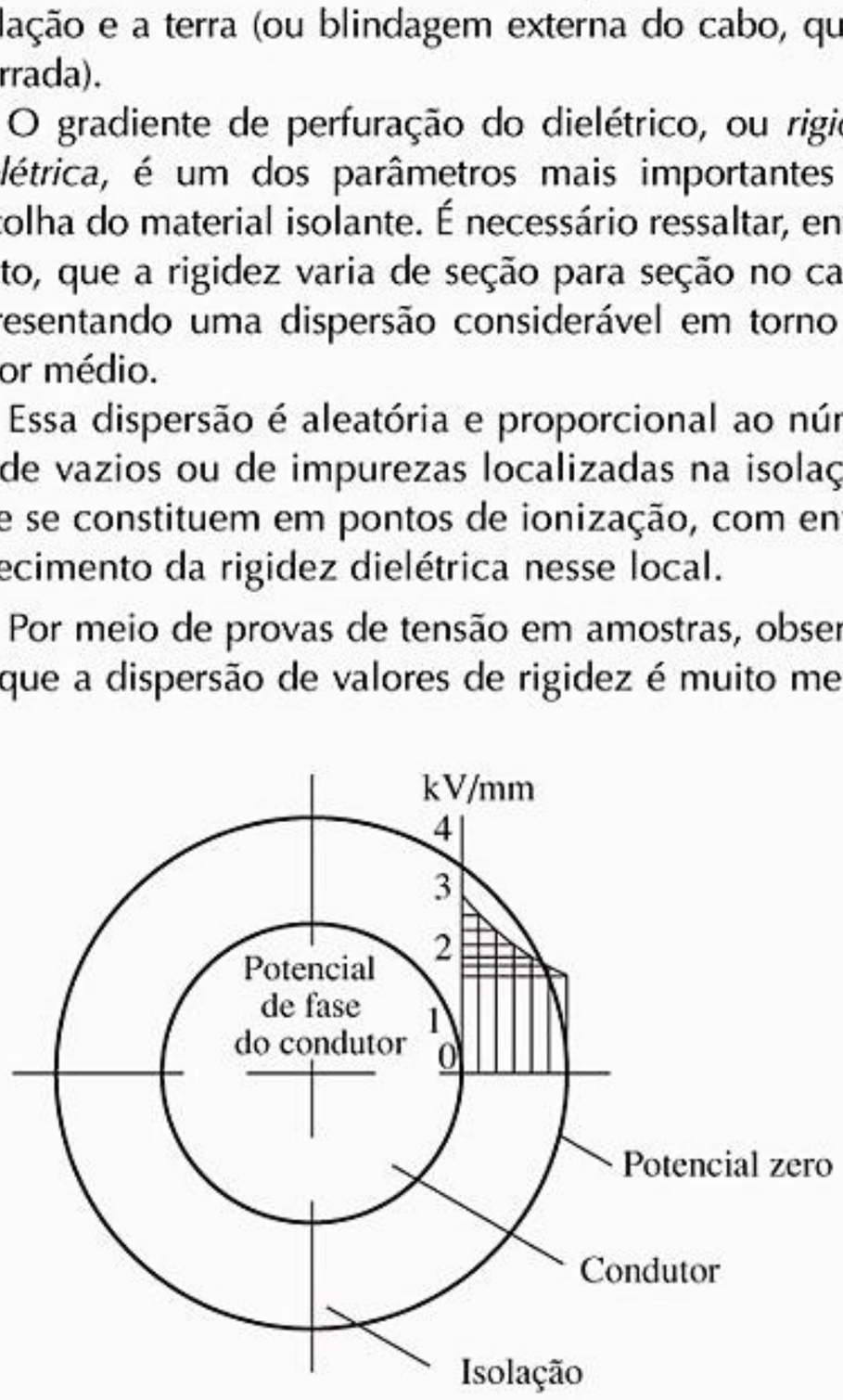


Figura 5.13 ▪ Gradiente de potencial no dielétrico

nos dielétricos estratificados que nos sólidos (extrudados). Explica-se isso pelo fato de que o método de aplicação da isolação estratificada e subseqüente impregnação (aplicação das fitas de papel em sala com pressurização positiva mantida em condições ideais de limpeza, secagem, degaseificação e impregnação) evita a presença de vazios localizados na isolação; já o processo de preparação e aplicação dos dielétricos sólidos torna quase impossível garantir a total ausência desses vazios.

Entretanto, a dispersão da rigidez nos dielétricos sólidos pode ser sensivelmente melhorada mediante um rígido controle das matérias-primas, da utilização de um equipamento adequado e da limpeza dos locais de preparação e aplicação das massas isolantes.

Materiais utilizados

As isolações dos cabos de potência podem ser constituídas por *materiais sólidos* ou podem ser do tipo *estratificada*. Os materiais sólidos podem ser *termoplásticos* (cloreto de polivinila e polietileno) e *termofixos* (borracha etileno-propileno e polietileno reticulado). As isolações estratificadas são as que utilizam *papel impregnado*.

O *papel impregnado* é ainda utilizado, principalmente, em cabos de média e de alta tensão; em cabos de baixa tensão essa isolação foi substituída, em quase todos os casos, por isolantes sólidos. Trata-se de uma isolação estratificada constituída por fitas delgadas de papel, colocadas helicoidalmente em diversas camadas e impregnadas, após rigoroso processo de secagem, por um material isolante cujas características variam com o tipo de cabo. O papel impregnado é hoje utilizado nos *cabos a óleo sob pressão* (cabos OF e cabos tipo *pipe*) e nos *cabos com massa não escoante*.

O *cabo OF* é um cabo a óleo mineral fluido submetido a uma baixa pressão, idealizado nos laboratórios da Prysmian, em Milão, no início do século XX, e aplicado com sucesso até hoje na área de transmissão subterrânea (faixa de 69 a 345 kV no Brasil e até 1.100 kV no exterior).

Os *cabos com massa não escoante* vieram substituir com vantagens os cabos tradicionais de papel impregnado em óleo mineral e encontram grande aplicação nas redes de distribuição subterrânea em média tensão.

Os *isolantes sólidos* são, hoje em dia, os mais utilizados nos cabos de baixa e de média tensão. Possuem diversas características comuns, porém cada tipo possui propriedades específicas cujo conhecimento é determinante na escolha do material. A seguir, são apresentadas as características comuns.

- *Homogeneidade da isolação e boa resistência ao envelhecimento em serviço*: os cuidados sempre crescentes com a homogeneidade e com a eliminação de vazios nesses isolantes fazem que sejam reduzidos ao mínimo os riscos de envelhecimento por causas elétricas, que no caso dos cabos de papel impregnado eram praticamente inexistentes. Outros mecanismos de envelhecimento, por causas químicas ou térmicas, podem apresentar-se, mas são eficazmente combatidos por uma formulação adequada das misturas.
- *Ausência de escoamento*: sendo sólido o isolante, o risco de escoamento é mínimo mesmo na posição vertical.
- *Reduzida sensibilidade à umidade*: os isolantes sólidos praticamente não absorvem a umidade, permitindo que se dispense a capa metálica em muitos cabos.
- *Insensibilidade às vibrações*: os cabos com isolação sólida geralmente são insensíveis às vibrações, graças à insensibilidade apresentada pelos materiais isolantes utilizados como isolação, capa ou cobertura. O

uso de uma proteção mecânica só é imposto por condições de instalação ou de funcionamento.

- *Bom comportamento ao fogo*: a resistência à propagação do fogo pode ser garantida por composições adequadas de isolantes sólidos, e a atenuação de propagação pode ser obtida com o uso de isolações especiais e por uma construção judiciosa do cabo.

As características específicas dos três isolantes sólidos mais usados nos cabos de potência — o PVC (termoplástico), o EPR e o XLPE (termofixos) — são apresentadas a seguir.

Cloreto de polivinila (PVC)

- É uma mistura de cloreto de polivinila puro (resina sintética), plastificante, cargas e estabilizantes.
- Sua rigidez dielétrica é elevada, porém, comparado com o polietileno, seu poder indutor específico é alto e sua resistência de isolamento mais fraca.
- Suas perdas dielétricas são elevadas, principalmente acima de 20 kV, limitando o seu emprego a sistemas de até 10 kV.
- Sua estabilidade química é considerável ante os produtos usuais. Misturas adequadas são muito pouco sensíveis à água.
- Transmite mal o fogo, mas sua combustão (em grande quantidade) provoca a produção de fumaça, gases corrosivos e tóxicos. A quantidade de gases e fumaça pode ser reduzida pela utilização de uma mistura de formulação adequada.
- O envelhecimento térmico pode ser eficazmente combatido por estabilizantes apropriados.
- É facilmente colorido com cores vivas.
- É um isolante muito bom para os cabos de potência e para os cabos de teletransmissão a distância média.
- De modo geral, o fabricante pode jogar com a formulação da mistura para satisfazer às mais variadas exigências. Assim, pode-se conseguir, por exemplo, para as coberturas, uma fraca absorção de água e uma elevada resistência mecânica e à abrasão, um bom comportamento com relação ao fogo e resistência específica aos solventes ou à gasolina.

Borracha etileno-propileno (EPR)

- Os compostos de EPR são, em geral, reticulados por meio de peróxidos orgânicos. As misturas correspondentes têm, por conseguinte, a melhor resistência possível ao envelhecimento térmico e aos agentes oxidantes.
- Sua flexibilidade é muito grande, mesmo a temperaturas inferiores a 0°C.
- Apresenta uma resistência excepcional às descargas e radiações ionizantes, mesmo a quente.
- Seu ângulo de perdas é bastante baixo para as misturas destinadas aos cabos de média tensão.
- Possui uma resistência à deformação térmica que permite temperaturas de 250°C, durante os curtos-circuitos.
- Apresenta uma absorção razoável de umidade, que, no entanto, pode ser reduzida por meio de formulação adequada.
- Possui boa característica no que diz respeito ao envelhecimento térmico, o que permite conservar densidades de corrente aceitáveis quando os cabos funcionam em temperatura ambiente elevada.
- Apresenta baixa dispersão da rigidez dielétrica e é praticamente isento do *treeing* — fenômeno que consiste na formação de arborescências no material, provocando descargas parciais localizadas e sua conseqüente deterioração.
- A borracha EPR é considerada um ótimo isolante sólido. Há exaustiva experiência mundial e nacional de utilização desse material, em baixa e em média tensões, bem como em alta tensão.

Polietileno reticulado (XLPE)

- A reticulação química do polietileno torna-o um material termofixo adequado à construção de isolações de cabos. O processo de reticulação consiste em criar, no interior do material, pontos intermoleculares estáveis por via química, com o auxílio de peróxidos orgânicos ou de moléculas de ligação especiais. Pode-se dizer que o polietileno sofre uma transformação interna análoga à da borracha quando vulcanizada.
- O material apresenta uma resistência à deformação térmica bastante satisfatória em temperaturas de até 250°C.
- A reticulação faz desaparecer por completo a tendência à fissuração (*stress cracking*), apresentada pela resina original.
- A reticulação não modifica sensivelmente o bom comportamento do polietileno a baixas temperaturas e, por outro lado, reforça a estabilidade química.
- A reticulação do polietileno permite a incorporação de cargas minerais e orgânicas utilizadas para melhorar o comportamento mecânico, a resistência às intempéries e, sobretudo, o comportamento ao fogo.
- O XLPE é utilizado em cabos de baixa e de média tensões. Apresenta dispersão relativamente alta da rigidez dielétrica, bem como o fenômeno do *treeing* (com certa freqüência); por isso, seu uso para tensões superiores a 15 kV exige certos cuidados.

O Quadro 5.2 apresenta a identificação dos condutores pela cor.

5.4 Blindagens

Blindagem sobre o condutor (blindagem interna)

A Figura 5.14*(a)* apresenta um condutor encordoado recoberto apenas por uma camada isolante e na Figura 5.14 (b) está coberto por uma blindagem.

Com essa construção simples, o campo elétrico assume uma forma distorcida, acompanhando as irregularidades da superfície do condutor, o que provoca concentração de esforços elétricos em determinados pontos.

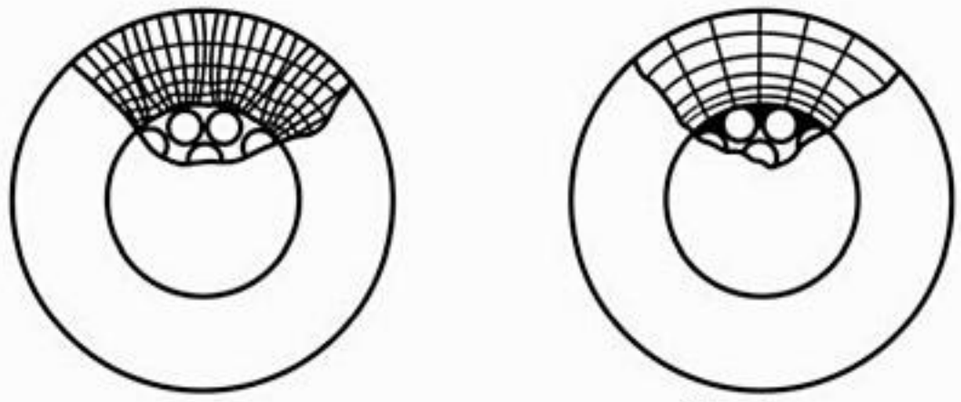


Figura 5.14 ▪ Campo elétrico do condutor (a) sem blindagem e (b) com blindagem

Nessas condições, as solicitações elétricas concentradas podem exceder os limites permissíveis da isolação, ocasionando uma depreciação na vida do cabo. Além disso, no caso de cabos com isolação sólida, a existência de ar entre o condutor e o isolante pode dar origem a ionizações localizadas, com conseqüências danosas para o material isolante.

Com a interposição de uma camada semicondutora, o campo elétrico torna-se uniforme e os problemas são minimizados ou mesmo totalmente eliminados.

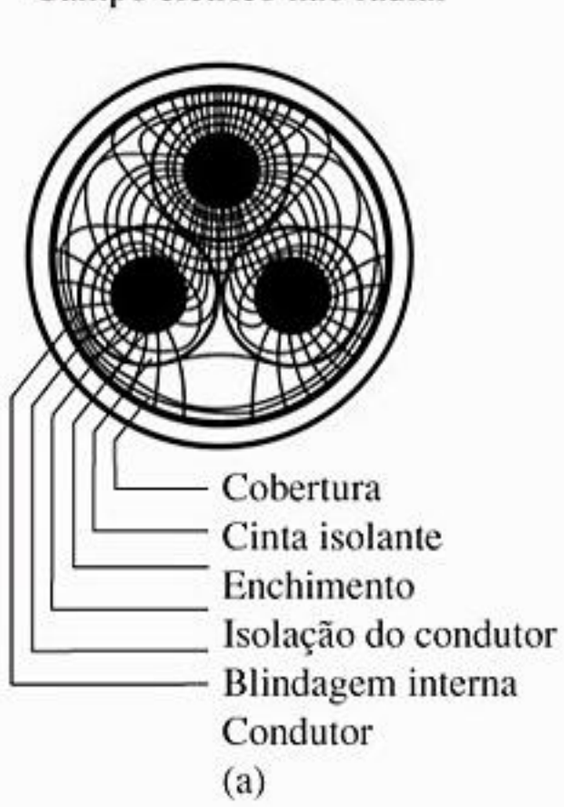
Evidentemente, para um perfeito desempenho dessa função, a blindagem interna, constituída pela camada semicondutora, deve estar em íntimo contato com a superfície interna da isolação. No caso de cabos secos (isolação extrudada), isso é alcançado mediante a extrusão simultânea do material semicondutor e da camada isolante.

No caso de isolação estratificada, a blindagem é constituída por fitas de papel semicondutor aplicadas helicoidalmente.

Blindagem sobre a isolação

Consiste em uma camada de material semicondutor e, na maioria dos casos, também em uma camada de material condutor, ambas aplicadas sobre a superfície da isolação. Sua finalidade principal é confinar e distribuir uniformemente o campo elétrico dentro do cabo isolado.

Na Figura 5.15(a), o cabo sem blindagem, isto é "o campo não radial", apresenta distribuição irregular do campo elétrico; na Figura 5.15(b), o cabo blindado, denominado "campo radial", apresenta campo elétrico distribuído de forma equilibrada e radial em relação ao condutor. A construção do campo radial é preferível, principalmente, para tensões mais elevadas, uma vez que garante solicitações elétricas uniformes em cada camada isolante (conjunto de pontos da isolação eqüidistantes do condutor).



Quadro 5.2 ▪ Identificação dos condutores pela cor

De acordo com as normas de cabos (e com a NBR 5410), quando os condutores forem identificados pela cor, às cores verde, verde-amarelo e azul-claro são reservadas aplicações específicas. Assim:

- o *azul-claro* deve ser usado na isolação de condutores isolados ou de veias de cabos multipolares, ou na cobertura de cabos unipolares, quando a função do condutor for a de *neutro* e, se a função do condutor for *PEN*, utiliza-se a mesma cor azul-claro com anilha verde-amarela nos pontos visíveis ou acessíveis;
- o *verde*, ou a dupla coloração *verde-amarelo*, deve ser usado na isolação de condutores isolados ou de veias de cabos multipolares, ou na cobertura de cabos unipolares, quando a função dos respectivos condutores for a de *condutor de proteção* (PE).

Observe que a veia com isolação azul-claro de um cabo multipolar pode ser usada para outras funções que não a de condutor de proteção. Isso ocorre quando o circuito não possui condutor neutro ou quando o cabo tem um condutor periférico utilizado como neutro.

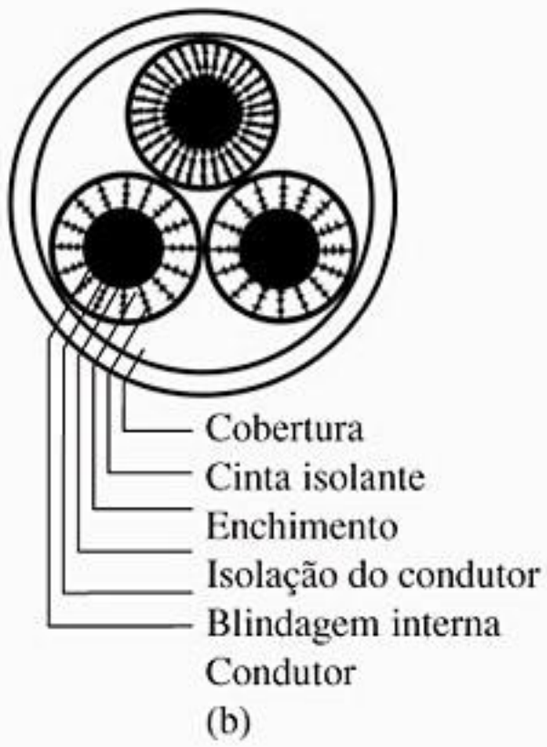


Figura 5.15 ■ Blindagem sobre a isolação

Da mesma maneira que a blindagem interna, a blindagem externa deve ser construída de modo a eliminar qualquer possibilidade de vazios entre ela e a superfície externa da isolação. Isso pode ser obtido por meio das seguintes formas:

Cabos secos

- Extrusão simultânea do material semicondutor e isolação.
- Aplicação de uma camada contínua de verniz semicondutor seguida de fita têxtil semicondutora (em desuso).

Nos cabos secos, a camada condutora é constituída por fitas ou fios de cobre e fornece um caminho de baixa impedância para a condução das correntes induzidas provenientes das correntes de curto-circuito de outros cabos. Quando se deseja uma capacidade de condução de corrente bem-definida, a construção mais indicada é a de fios cuja resistência ôhmica é praticamente constante ao longo da vida do cabo, o que não ocorre com as fitas cuja resistência ôhmica depende essencialmente da condição de contato superficial no remonte destas (ver Figura 5.16).

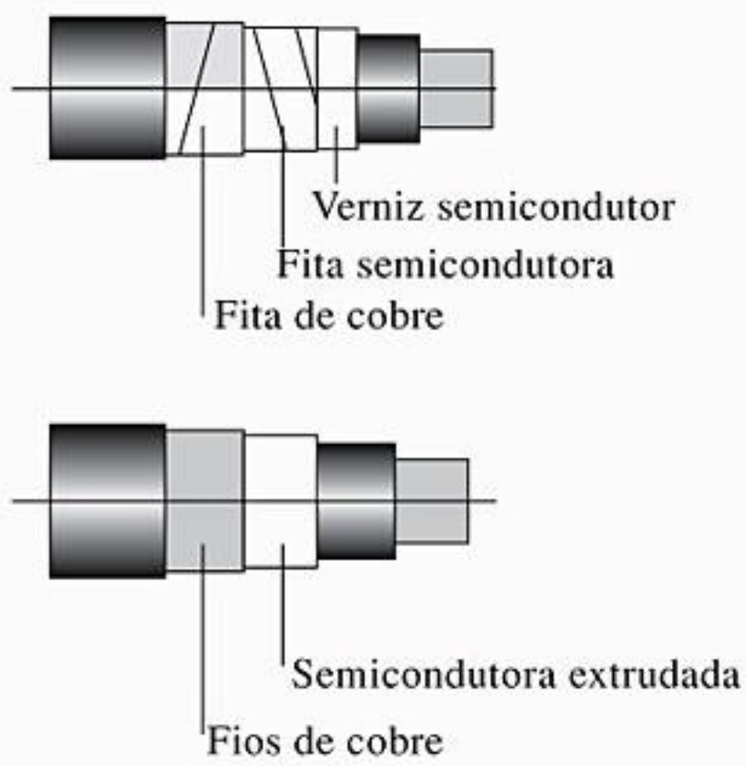


Figura 5.16 ■ Cabos blindados

Indicamos a blindagem a fios isolados como a mais recomendável para cabos de potência com dielétricos sólidos.

Cabos em papel

Aplicação de papel semicondutor. Nesses cabos em papel, o elemento de baixa impedância é constituído pela capa metálica (chumbo ou alumínio) que os recobre.

5.5 Proteção

As proteções dos cabos podem ser de dois tipos: *não metálicas* e *metálicas*.

Proteções não metálicas

Os cabos de potência são normalmente protegidos com uma cobertura, geralmente feita com PVC, polietileno ou neoprene, polietileno clorossulfonado e outros, e sua escolha baseia-se na resistência e nas ações de natureza mecânica ou química.

Na maioria dos casos, a cobertura dos cabos com isolação seca é de PVC (ver Figura 5.17), que é um material mais econômico e com resistência suficiente para o uso corrente.

O polietileno (pigmentado com negro de fumo para torná-lo resistente à luz solar) é utilizado nas instalações em ambientes com alto teor de ácidos, bases ou solventes orgânicos.

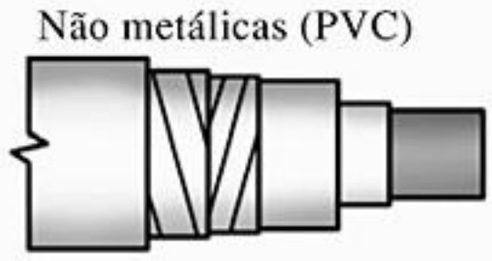


Figura 5.17 ■ Proteção não metálica

Em cabos de uso móvel, que requerem boa flexibilidade e grande resistência à abrasão e à laceração, a capa usual é o neoprene ou o polietileno clorossulfonado (*Hypalon*).

Nos cabos isolados em papel, exige-se uma cobertura metálica do tipo contínuo, para assegurar a estanqueidade do núcleo. Emprega-se tradicionalmente o chumbo e, mais recentemente, o alumínio.

Esses materiais são protegidos contra corrosão por uma cobertura de PVC ou polietileno.

Proteções metálicas

Proteções metálicas adicionais com função de armação são empregadas nas instalações sujeitas a danos mecânicos.

Os tipos mais usados de proteções metálicas são:

- Armações de fitas planas de aço, aplicadas helicoidalmente.
- Armações de fita de aço ou alumínio, aplicadas transversalmente, corrugada e intertravada *(interlocked)*. É o tipo mais moderno, que confere boa flexibilidade ao cabo, além de garantir maior resistência aos esforços radiais que o tipo tradicional (fitas planas).
- Empregam-se armações de fios de aço nos casos em que se deseja atribuir ao cabo resistência aos esforços de tração (cabos submarinos, por exemplo).

A Figura 5.18 apresenta três cabos com proteção metálicas.

5.6 Níveis de isolamento dos cabos de potência

A maioria dos circuitos elétricos destinados a transmitir potência, em corrente alternada, tem a configuração trifásica, ou seja, é constituído por três fases, com ou sem o neutro. Nos equipamentos elétricos (por exemplo, geradores, transformadores, motores etc.), as três fases podem ser interligadas em estrela ou em delta (triângulo). A Figura 5.19 apresenta uma ligação em estrela.

Nesses sistemas, individualizam-se dois valores para a tensão, quais sejam:

(a) Tensão entre as fases: U.
(b) Tensão entre fases e neutro: U_0.

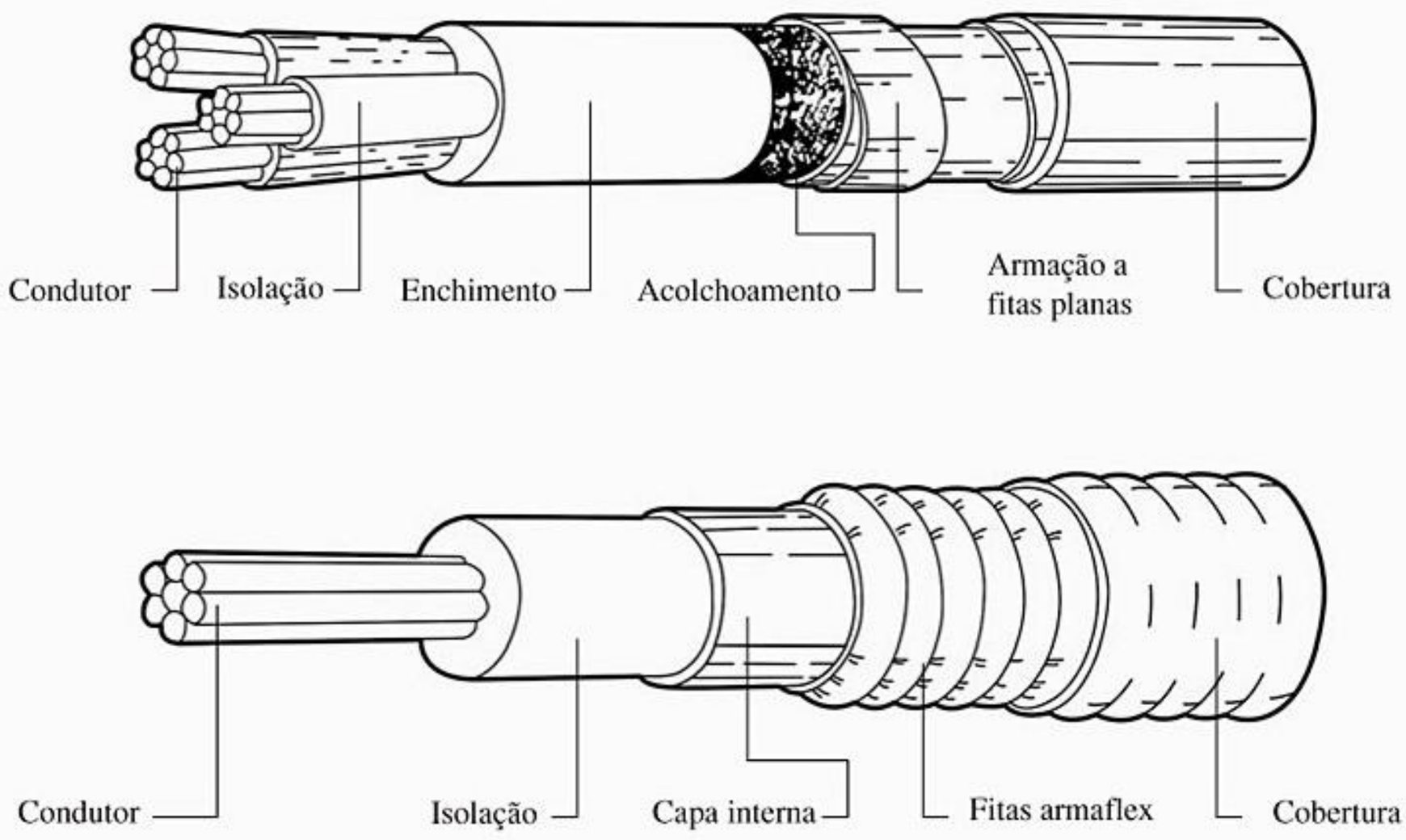


Figura 5.18 ■ Proteções metálicas dos cabos

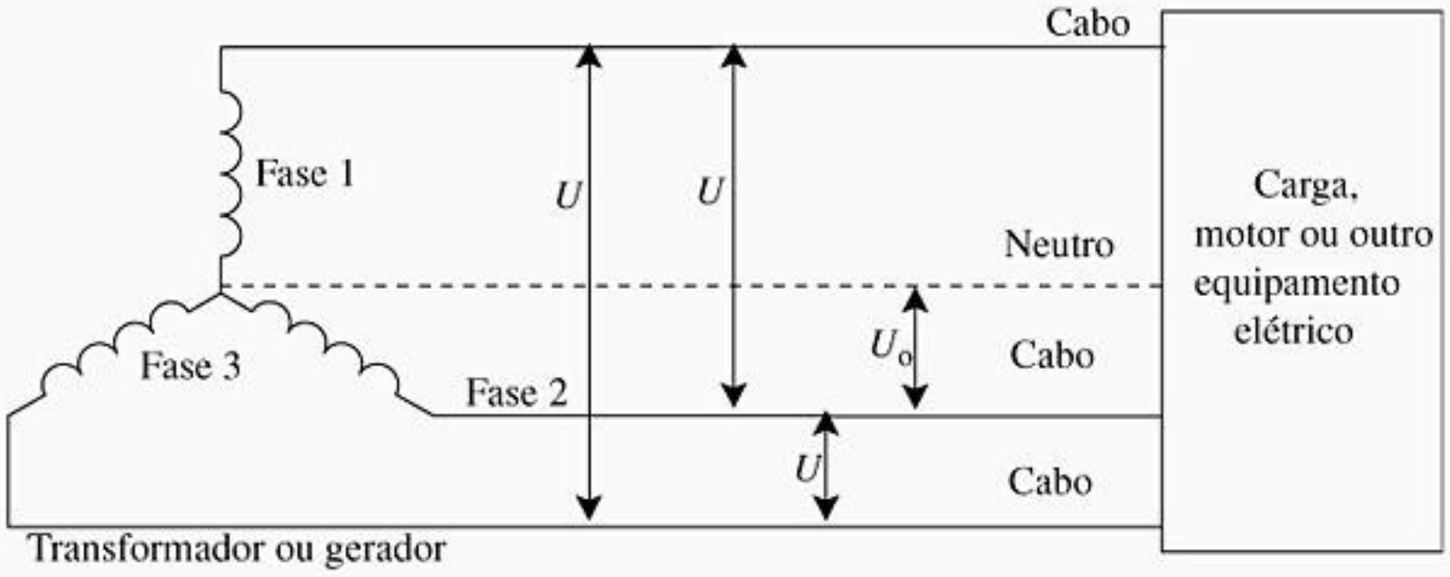


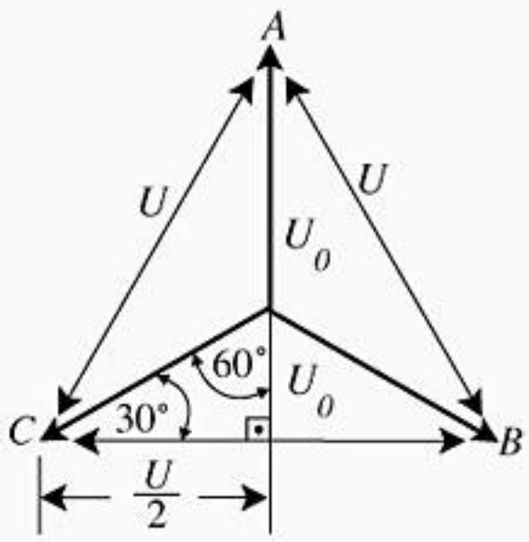
Figura 5.19 ■ Ligação em estrela

Em uma carga equilibrada, a tensão fase-fase e fase-neutro (fase-terra) é dada pela seguinte expressão:

$$U = U_0 \times \sqrt{3} \qquad (5.25)$$

O diagrama fasorial das tensões de fase-neutro e de fase-fase é apresentado na Figura 5.20.

O projeto elétrico dos cabos e seus respectivos acessórios, embora seja feito de maneira desvinculada do sistema, utiliza os mesmos conceitos anteriormente abordados. Isso pode ser mais bem visualizado no caso de cabos a "campo elétrico radial", ou seja, naqueles cabos que possuem uma blindagem sobre a isolação (ver Figura 5.21).



$$\frac{U}{2} = U_0 \cos 30° = U_o \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$U = U_0 \cdot \sqrt{3}$$

Figura 5.20 ■ Diagrama fasorial das tensões (fase-neutro e fase-fase)

Tais cabos são projetados em função da tensão fase-terra. Essa tensão é denominada "tensão de isolamento do cabo", representada por V_0. Assim, quando se diz que um cabo ou um acessório é para 15 kV, subentende-se que ele é adequado para operar em um sistema cuja tensão fase-terra pode chegar a $15/\sqrt{3} \cong 8{,}7$ kV, porque este é o valor no qual foi baseado o cálculo da isolação.

De maneira similar aos sistemas elétricos, pode-se associar ao cabo e ao acessório uma tensão de isolamento fase-fase[5] denominada V. O valor dessa tensão é dado por:

$$V = V_0 \times \sqrt{3} \qquad (5.26)$$

Seguindo a tendência internacional, as normas brasileiras passaram a adotar, para designação das classes de tensão dos cabos e acessórios, o par de valores V_0/V cuja definição é:

- V_0 = tensão fase-terra para a qual o cabo ou o acessório é projetado.
- V = tensão fase-fase para a qual o cabo ou o acessório é projetado.

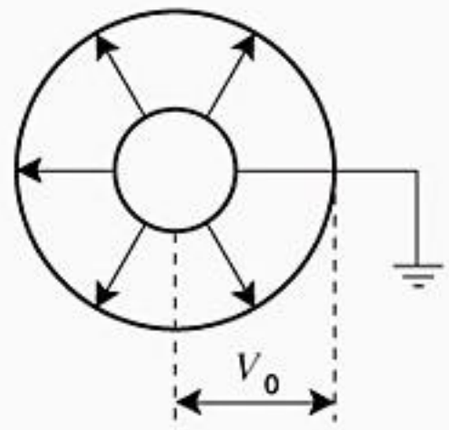


Figura 5.21 ■ Cabos com blindagens sobre a isolação

Tensões de isolamento

Os sistemas elétricos de baixa e média tensões são previstos para várias classes de tensão. Objetivando racionalizar a utilização de cabos e acessórios para esses sistemas, a NBR 6251 padronizou as seguintes tensões de isolamento:

$$V_0/V = 0{,}6/1 - 1{,}8/3 - 3{,}6/6 - 6/10 - 8{,}7/15 -$$

$$- 12/20 - 15/25 - 20/35 - 27/35 \text{ (kV)}$$

5. O valor de tensão fase-fase é de particular interesse para o projeto de cabos a campo elétrico não-radial.

Esses valores podem ser entendidos como as classes de tensão para cabos e acessórios de potência.

Para uma adequada escolha da tensão de isolamento do cabo é necessário um prévio conhecimento da *categoria* do sistema elétrico a que se destina. Essa categoria é definida considerando-se a possibilidade de uma falta para a terra (curto-circuito) de uma fase do sistema.

A norma NBR 6251 define *duas categorias* de sistemas para a escolha da tensão de isolamento do cabo.

(a) *Categoria 1*: abrange os sistemas que, sob condição de uma falta de uma fase-terra são previstos para continuar operando por um curto período, desde que somente com uma fase-terra. Esse período, em geral, não deve exceder uma hora; porém, um período maior pode ser tolerado para o campo elétrico radial e em circunstâncias especiais. Todavia, em nenhuma condição esse período pode exceder oito horas.
(b) *Categoria 2*: compreende todo o sistema que não se enquadra na Categoria 1.

Esses critérios devem ser utilizados também para a escolha da tensão do isolamento dos acessórios, uma vez que estes devem suportar as mesmas condições de sobretensão previstas para os cabos aos quais se destinam.

Após definida a categoria à qual pertence o sistema, a escolha da tensão de isolamento do cabo (V_0) pode ser feita utilizando-se a Tabela 5.19.

A tensão máxima de operação de um sistema é a tensão máxima existente entre as fases (valor eficaz), que pode ser mantida em condições normais de operação em qualquer tempo e em qualquer ponto do sistema.

Interpretação das categorias do sistema

Para melhor interpretação das categorias do sistema, considere uma carga sendo alimentada pela bobina secundária de um transformador. O neutro, ponto comum dos enrolamentos, pode ter uma das seguintes ligações:

- Diretamente ligado à terra.
- Completamente isolado da terra.
- Ligado à terra por meio de impedância.

Na Figura 5.22, apresenta-se a condição normal de operação do sistema.

Nessas condições, a tensão U é a mesma entre quaisquer duas fases do sistema. Entre qualquer fase e o neutro a tensão é $U/\sqrt{3}$.

Supondo a ocorrência de uma falta provocada pelo contato acidental fase-terra ou um dano mecânico de uma fase do cabo isolado, pode-se ter uma das seguintes situações, que dependerá da condição de ligação do neutro:

- No caso de *neutro diretamente ligado à terra*, uma intensa corrente percorrerá o circuito NCDT (ver Figura 5.23), fazendo operar a proteção. Durante o período de curto-circuito, o potencial de N permanece aquele de terra e as tensões entre as fases não afetadas e terra continuam a ser iguais a $U/\sqrt{3}$.
- No caso de *neutro isolado da terra*, o potencial da fase C passa a ser aquele da terra e o potencial do ponto N assume o valor $U/\sqrt{3}$. Nessa condição, a tensão entre as fases não afetadas e terra assume o valor U; portanto, a isolação dessas fases fica sujeita a uma tensão 1,73 superior à tensão normal de serviço (ver Figura 5.24).
- No caso de *neutro ligado à terra por meio de impedância*, a corrente de curto-circuito que circulará no circuito NCDT é limitada pela impedância a um valor suficiente para operar o sistema de proteção, reduzindo os danos causados aos componentes dos sistemas envolvidos. O potencial do ponto N dependerá da queda de tensão na impedância Z, podendo atingir, no máximo, o valor $U/\sqrt{3}$. A tensão entre as fases não afetadas e terra pode assumir valor entre $U/\sqrt{3}$ e U (ver Figura 5.25).

Tabela 5.19 ■ Tipos de tensão do isolamento do cabo

Tensão nominal do sistema (kV)	Tensão máxima de operação do sistema (kV)	Tensão de isolamento do cabo V_o (kV)	
		Categoria 1	Categoria 2
1	1,2	–	0,6
3	3,6	–	1,8
6	7,2	3,6	6
10	12,0	6	8,7
15	17,5	8,7	12
20	24,0	12	15
25	30,0	15	20
35	42,0	20	27

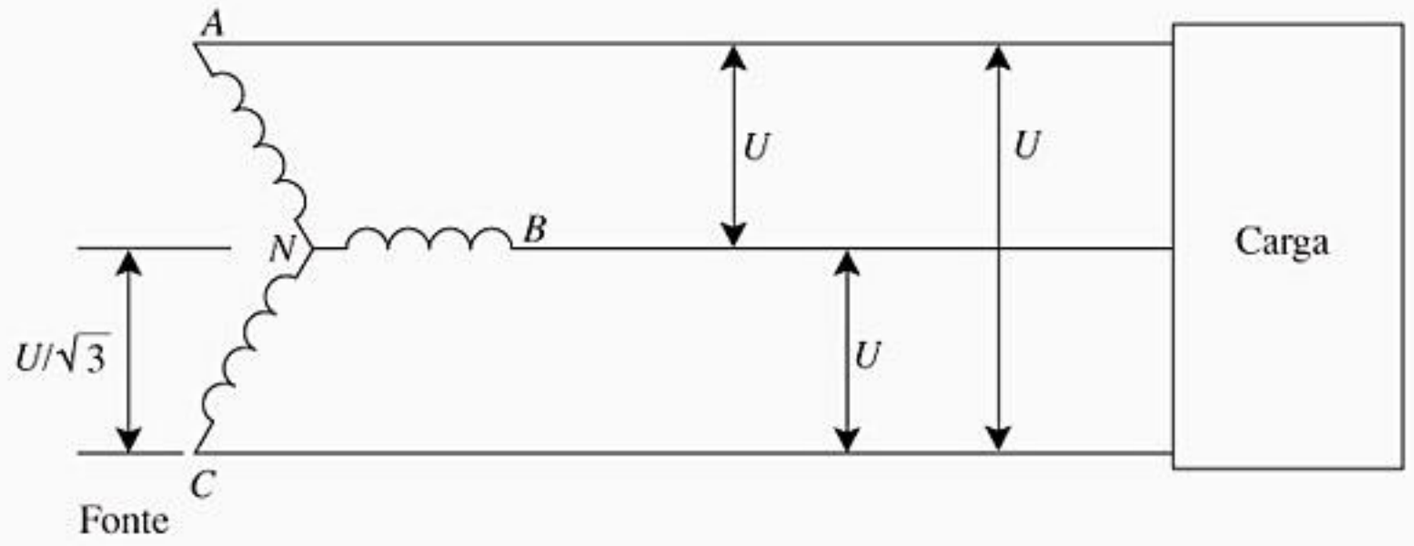


Figura 5.22 ■ Sistema elétrico: fonte e carga

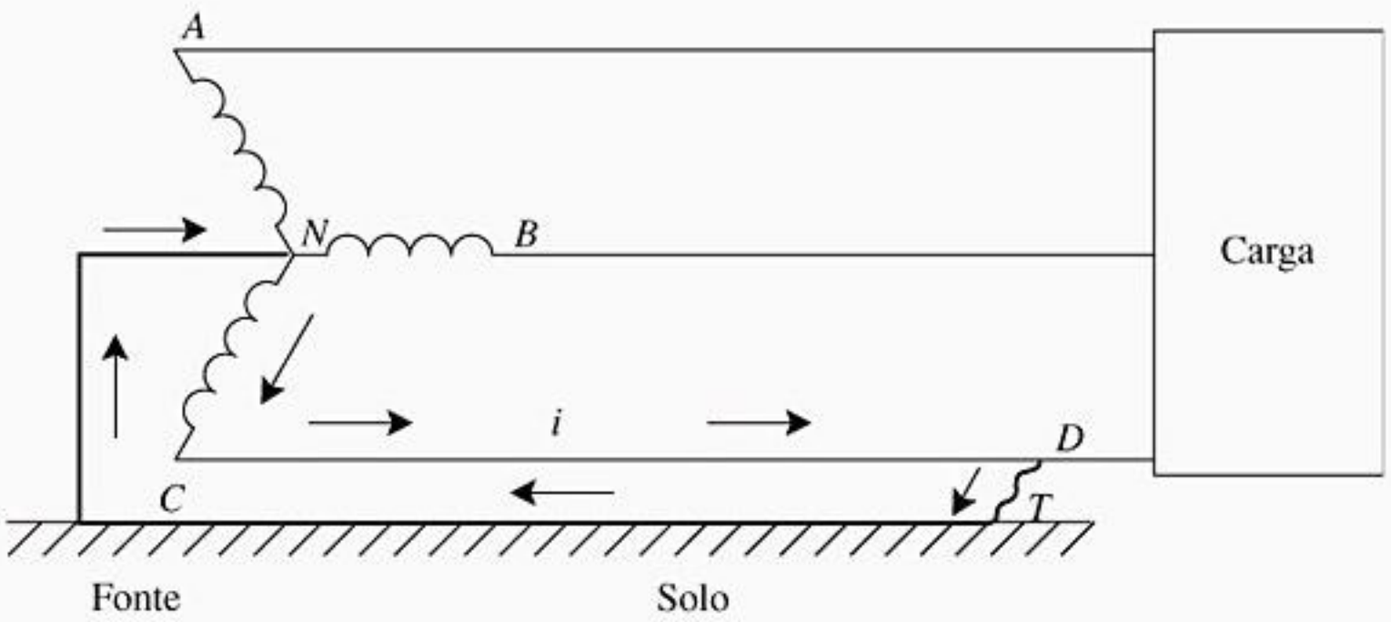


Figura 5.23 ■ Defeito fase-terra no sistema aterrado

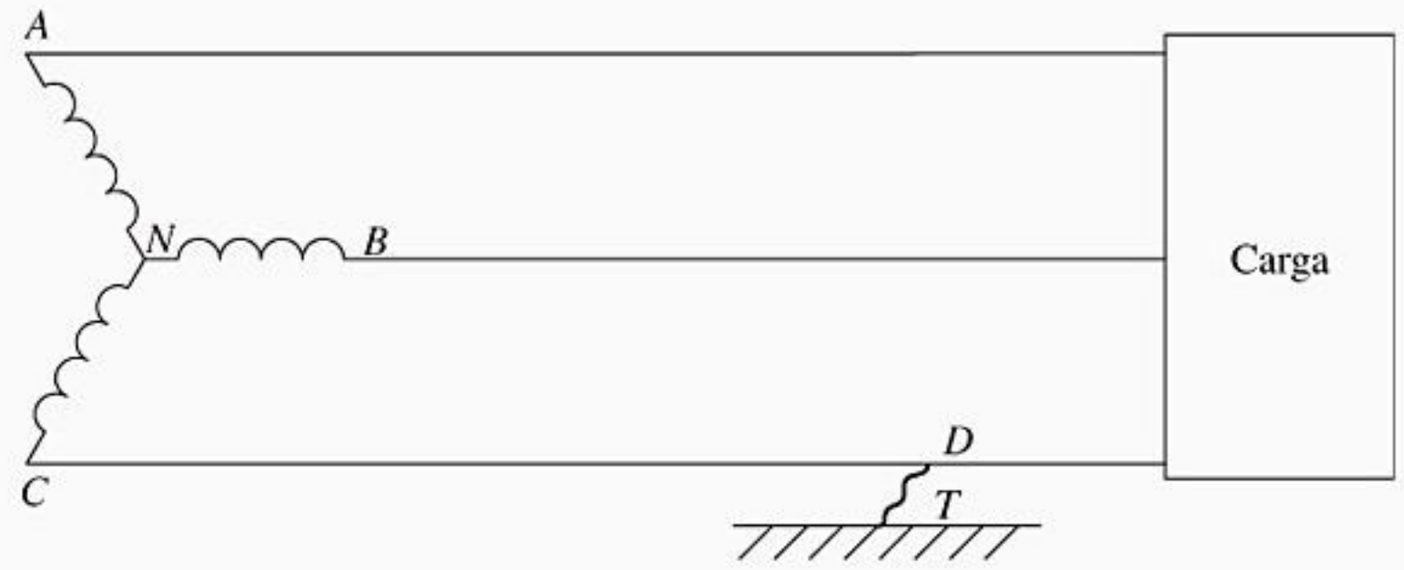


Figura 5.24 ■ Defeito fase-terra no sistema isolado

Das considerações anteriores, pode-se concluir que, em sistemas com o *neutro diretamente ligado à terra*, uma falta não provoca solicitações extras na isolação dos cabos das fases não afetadas, ou seja, a tensão dessas fases para a terra continua igual a $U/\sqrt{3}$.

Em sistemas com o *neutro completamente isolado da terra* ou *ligado à terra por meio de impedância*, uma falta provoca uma elevação na tensão das fases não afetadas, podendo chegar a assumir um valor 1,73 vezes superior àquele de regime normal. A isolação dos cabos fica, portanto, submetida a uma tensão muito superior àquela em regime normal, por um período que é função do tempo da atuação da proteção. É de esperar, portanto, que a espessura da isolação dos cabos previstos para esses sistemas seja maior que a espessura da isolação dos cabos em sistemas com o neutro diretamente ligado à terra.

As normas norte-americanas para cabos de potência (ICEA e AEIC) definem três níveis de isolamento para os cabos isolados, quais sejam:

(a) *Nível 100 por cento – NA*: cabos com essa categoria podem ser usados em sistemas com proteções tais que faltas para a terra são eliminadas em um tempo máximo de um minuto. Tais sistemas normalmente possuem o neutro diretamente ligado à terra.

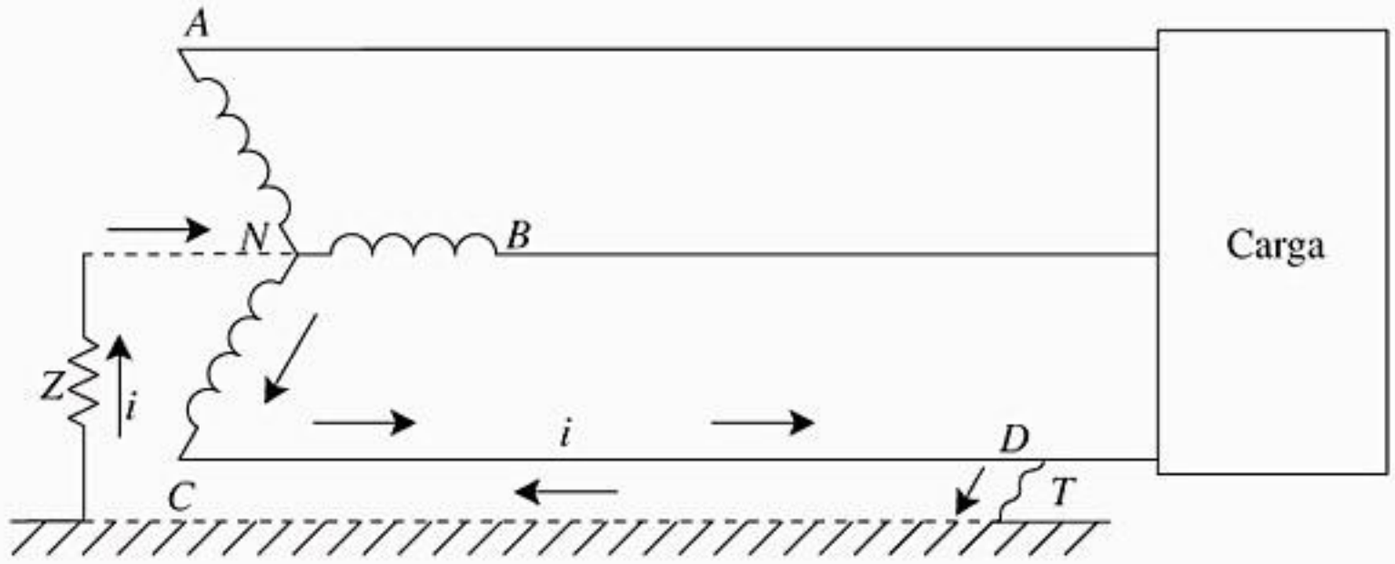


Figura 5.25 ■ Defeito fase-terra no sistema aterrado por meio de uma impedância *Z*

(b) *Nível 133 por cento – NI*: cabos com essa categoria podem ser usados em sistemas em que o tempo de desligamento de no máximo um minuto não pode ser garantido, porém existe significativa probabilidade de que a falta possa ser eliminada em um tempo máximo de uma hora. Tais sistemas normalmente possuem o neutro isolado ou aterrado por meio de impedância.
(c) *Nível 173 por cento* – cabos com essa categoria devem ser usados em sistemas que não se enquadram nas categorias anteriores, ou seja, cujo tempo de desligamento é indefinido.

Comparando essa classificação com a apresentada pela NBR 6251, verifica-se que os cabos de Categoria 1 englobam os níveis de isolamento 100 por cento e 133 por cento, ou seja, níveis NA e NI.

Na prática, os acessórios (terminais e emendas) são normalmente definidos em função dos cabos utilizados, os quais foram previamente especificados com base nas tensões de isolamento, em que se observou não existir uma correspondência direta entre a classificação segundo as normas norte-americanas e a norma brasileira — NBR 6251.

Todavia, no que se refere às dimensões dos cabos, é possível estabelecer uma equivalência entre as duas classificações. Essa equivalência, baseada *exclusivamente* nas dimensões dos cabos, é dada na Tabela 5.20.

5.7 Perdas dielétricas

As perdas dielétricas ocorrem nos cabos energizados do mesmo modo que nos capacitores. A corrente I que flui pelo dielétrico é composta por duas parcelas, uma *ativa* (*perdas*) e outra puramente *reativa* (*capacitiva*) (ver Figura 5.26).

A corrente verdadeira I que flui pelo dielétrico dos cabos é dada pela Expressão 5.27.

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_c^2} \qquad (5.27)$$

Tabela 5.20 ■ Equivalência da classificação de tensões

Classificação de tensões (kV)	
Normas norte-americanas	**Normas NBR 6251**
0,6	0,6/1
3	1,8/3
5	3,6/6
8 NI	6/10
15 NA	8,7/15
15 NI	12/20
25 NA	15/25
25 NI	20/35
35 NA	20/35
35 NI	27/35

onde

- I_p = corrente em fase com a tensão fase-terra V_0, responsável pelas perdas no dielétrico do material isolante do cabo;
- I_c = corrente que flui pelo capacitor equivalente do material isolante. A corrente está adiantada de 90° em relação a tensão U_0.

Pelo diagrama fasorial da Figura 5.26, pode-se escrever, para as perdas dielétricas:

$$P_d = U_0 I_p \tag{5.28}$$

$$I_p = I_c \cdot \operatorname{tg} \delta \tag{5.29}$$

Substituindo a Expressão 5.29 na Expressão 5.28, tem-se

$$P_d = U_0 I_c \operatorname{tg} \delta \tag{5.30}$$

A reatância capacitiva (X_c) é definida em função da capacitância C e da freqüência f, isto é,

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} (\Omega \cdot \text{km}) \tag{5.31}$$

(com C dado em F/km)

Pode-se escrever também pela lei de Ohm

$$I_c = \frac{U_0}{X_c} \tag{5.32}$$

Substituindo as Expressões 5.31 e 5.32 na Expressão 5.30, obtêm-se duas expressões para as perdas dielétricas, isto é,

$$P_d = 2\pi f C U_0^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \, (\text{W/km}) \tag{5.33}$$

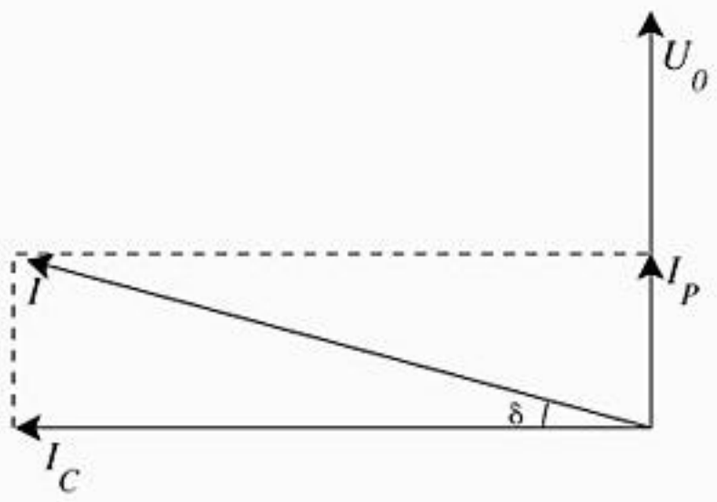


Figura 5.26 ■ Definição do ângulo *d*

$$P_d = \frac{U_0^2 \cdot \operatorname{tg} \delta}{X_c} (\text{W/km}) \tag{5.34}$$

O fator tg δ é chamado *fator de perdas* cujos valores máximos admissíveis à temperatura de serviço são:

- 0,100 para cabos com isolação em PVC.
- 0,040 para cabos com isolação em EPR.
- 0,008 para cabos com isolação em XLPE.

5.8 Comportamento dos cabos em condições de fogo e incêndio

Introdução

A construção dos cabos elétricos envolve volumes significativos de materiais orgânicos na isolação, na cobertura e em outros componentes. Tais materiais são combustíveis e podem conferir ao cabo, durante a ocorrência de um incêndio, as perigosas características de elemento propagador de fogo e de emissor de fumaça de gases tóxicos e corrosivos.

Em locais de alta densidade de ocupação (locais BD2 e BD3), como teatros, cinemas, casas de shows, shoppings, hotéis, aviões, hospitais e prédios de grande altura, ou em ambientes fechados, tais como centrais elétricas, túneis subterrâneos e galerias de cabos, podem ocorrer sérios problemas em conseqüência da fumaça gerada por cabos elétricos em combustão. A perda de visibilidade e o comprometimento da respiração são fatores muito importantes, que podem, além de causar pânico, dificultar a fuga das pessoas e o combate ao fogo. Adicionalmente, a presença de certos gases tóxicos e corrosivos na fumaça é extremamente prejudicial à saúde das pessoas (sendo fatal em muitos casos), além de promover danos e falhas em equipamentos e, em longo prazo, iniciar um processo de deterioração da estrutura do prédio.

Por sua vez, apenas a propagação da chama — considerada isoladamente — é sempre indesejável, uma vez que pode transformar um incêndio de pequenas proporções em uma grande tragédia.

Classificação

Em princípio, tendo em vista o comportamento de seu invólucro externo, isto é, a isolação no caso de condutores isolados e a cobertura no caso de cabos uni e multipolares, os condutores e cabos isolados podem ser classificados em cinco categorias:

(a) Propagador da chama
(b) Com propagação reduzida da chama
(c) Resistente à chama
(d) Resistente à chama, com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos e corrosivos
(e) Para circuitos de segurança

O *cabo propagador da chama* é o que, quando submetido à ação direta da chama, mesmo que por um curto intervalo de tempo, entra em combustão e a mantém, mesmo após a retirada da chama ativadora. O polietileno reticulado (XLPE) e a borracha etileno-propileno (EPR) podem ser considerados materiais propagadores de chama.

O *cabo com propagação reduzida da chama* é aquele que, embora utilize na isolação *e/ou* na cobertura algum tipo de material não propagante, como é o caso do PVC e do neoprene, tem seu comportamento dependente em grande parte do tempo da exposição à chama,

da intensidade da chama, do agrupamento com outros cabos etc. Os condutores isolados de cobre com isolação de PVC do tipo BW (NBR NM 247-3) enquadram-se nessa categoria.

Os *cabos resistentes à chama (não propagantes de chama)* são aqueles em que a chama não se propaga, mesmo em caso de exposição prolongada ao fogo. Quando submetidos ao rigoroso ensaio de queima vertical, efetuado em feixe de cabos com concentração de material combustível bem-definida (de acordo com as normas NBR NM IEC 60332-3-10, 3-22, 3-23, 3-24 e 3-25), os danos causados pela chama ficam limitados a poucas dezenas de centímetros.

Cabos com baixa emissão de fumaça e de gases tóxicos e corrosivos

A obtenção da propriedade de resistência à chama, ou seja, a propriedade de não propagação do fogo sob condições simuladas de incêndio (queima vertical) é, em muitos casos, conseguida à custa da utilização de compostos halogenados (à base de cloro, bromo e flúor), que são incombustíveis. No entanto, cabos que empregam esses materiais geram fumaça e gases tóxicos e corrosivos, o que os torna inadequados para uso em linhas elétricas abertas, em áreas comuns, de circulação e de concentração de público locais BD2 e BD3 e em ambientes fechados.

Tais cabos devem ser construídos e ensaiados segundo a NBR 13248:2000 - Cabos de potência e controle e condutores isolados sem cobertura, com isolação extrudada e com baixa emissão de fumaça para tensões até 1 kV — Requisitos de desempenho.

A Tabela 5.21 apresenta os gases mais importantes, suas fontes e seus efeitos, enquanto a Tabela 5.22 mostra as concentrações letais desses gases. A Tabela 5.23 apresenta uma comparação de diversos materiais quanto ao "índice de toxidez".

Cabos para circuitos de segurança

Os *cabos para circuitos de segurança* são os cabos utilizados nas linhas elétricas das instalações de segurança, conforme recomenda a NBR 5410.

Esses cabos devem ser construídos e ensaiados de acordo com a NBR 13418:1995: Cabos resistentes ao fogo para instalações de segurança.

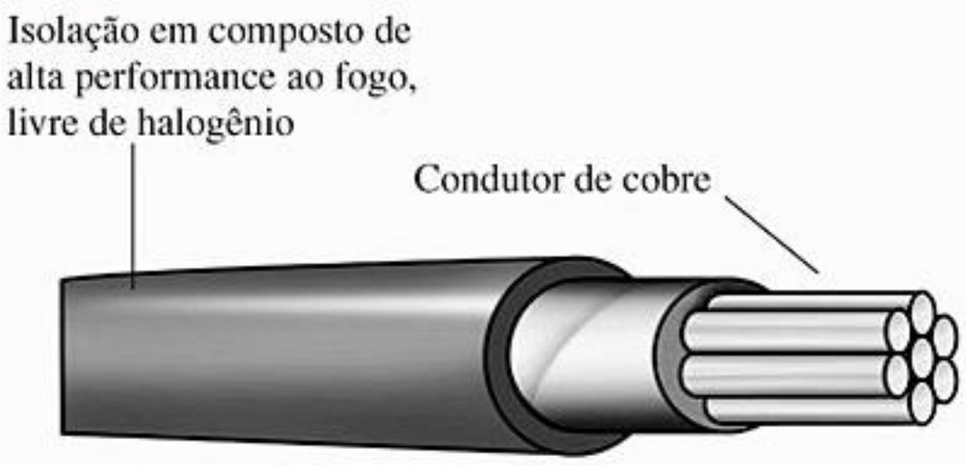


Figura 5.27 ▪ Cabo que atende à norma NBR 13418

De acordo com a NBR 5410, em áreas comuns, em áreas de circulação e em áreas de concentração de público, em locais BD2, BD3 e BD4, as linhas elétricas aparentes e as linhas no interior de paredes ocas ou de outros espaços de construção devem atender a uma das seguintes condições:

- No caso de linhas constituídas por cabos fixados em paredes ou em tetos, os cabos devem ser não propagantes de chama, livres de halogênio e com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos.
- No caso de linhas constituídas por condutos abertos, os cabos devem ser não propagantes de chama, livres de halogênio e com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos. Já os condutos, caso não sejam metálicos ou de outro material incombustível, devem ser não propagantes de chama, livres de halogênio e com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos.
- No caso de linhas em condutos fechados, os condutos que não sejam metálicos ou de outro material incombustível devem ser não propagantes de chama, livres de halogênios e com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos. Na primeira hipótese (condutos metálicos ou de outro material incombustível), podem ser usados condutores e cabos apenas não propagantes de chama; na segunda, devem ser usados cabos não propagantes de chama, livres de halogênio e com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos.

A construção dos cabos da Figura 5.27 caracteriza-se por utilizar materiais de alta resistência a temperaturas elevadas, garantindo que, mesmo em um incêndio, o cabo manterá a integridade do circuito de segurança. Isso permite a continuidade do funcionamento durante incêndios de circuitos de detectores, alarmes e bombas de incêndio, além de iluminação de emergência.

5.9 Designação dos condutores e dos cabos isolados (de acordo com a NBR 9311)[6]

Introdução

Os condutores e os cabos isolados são classificados de acordo com a norma NBR 9311.

Segundo essa norma, eles são designados por siglas compostas pela seguinte sucessão, partindo do condutor (propriamente dito) para a parte externa do condutor ou cabo:

- Número, seção nominal e eventuais particularidades do(s) condutor(es).
- Material, grau de flexibilidade e forma do condutor.
- Material e qualidade da isolação.
- Condutor concêntrico ou blindagem metálica sobre o cabo unipolar ou sobre cada veia de cabo multipolar.

6. Colaboração do engenheiro Luiz Carlos Stracieri.

Tabela 5.21 ■ Gases tóxicos, suas fontes e seus efeitos

Gás	Fonte	Efeito
Ácido cianídrico (HCN)	Lã, seda, nailon, poliuretano.	Bloqueio da função respiratória.
Ácido clorídrico (HCI)	PVC, borrachas cloradas (Hypalon, Neoprene).	Irritante do trato respiratório.
Ácidos fluorídico ou bromídrico (HF, HBr)	Materiais fluorados compostos de bromo.	Irritante do trato respiratório.
Óxidos de nitrogênio (NO, NO_2)	Compostos nitrogenados.	Edema pulmonar.
Óxido de enxofre (SO_2)	Composto com enxofre.	Forte irritante do trato respiratório.
Dióxido e monóxido de carbono (CO_2, CO)	Composto orgânicos.	Falta de oxigenação.

Tabela 5.22 ■ Concentrações letais de gases tóxicos

Gás	Concentração letal (ppm)
Dióxido de carbono (CO_2)	100.000
Monóxido de carbono (CO)	4.000
Gás sulfídrico (H_2S)	750
Amônio (NH_3)	750
Ácido clorídrico (HCI)	500
Dióxido de enxofre (SO_2)	400
Óxidos nitrogenados ($NO + NO_2$)	250
Ácido cianídrico (HCN)	150
Ácido bromídrico (HBr)	150
Ácido fluorídrico (HF)	100

- Proteção sobre o cabo unipolar ou sobre cada veia de cabo multiplexado ou multipolares.
- Composição e forma do cabo.
- Condutor concêntrico ou blindagem metálica sobre a reunião de veias de cabos multipolar.
- Proteção(ões) sobre a reunião de veias de cabo multipolar.
- Eventuais componentes específicos.
- Tensão de isolamento do condutor ou do cabo isolado.

Diz a norma, ainda, que, na eventualidade de um ou mais símbolos requererem uma indicação complementar, deve ser colocado um asterisco ao final da sigla, seguido dessa indicação complementar. Por sua vez, cabos que possuam designação própria prevista na respectiva especificação (como BW ou BWF, segundo a NBR NM 247-3) não necessitam seguir a NBR 9311.

Esta seção não fará referência à designação utilizada para condutores de cabos para sinalização, controle e instrumentação — nos quais as veias são reunidas em grupos distintos e esses grupos, por sua vez, são reunidos para formar o núcleo do cabo —, também abrangida pela NBR 9311.

Número, seção nominal e eventuais particularidades do(s) condutor(es)

Para a designação dos condutores (principais), que constituem o cabo, são indicados o número e a seção nominal em mm², separados pelo sinal de multiplicação. Assim, por exemplo:

- 3×70 indica um cabo tripolar com três condutores de 70 mm².
- 1×25 pode indicar um condutor isolado ou um cabo unipolar de 25 mm².

Quando faz(em) parte do(s) cabo(s) condutor(es) com forma, identificação ou seção específica, este(s) é(são) caracterizado(s) pela seção nominal em mm² seguida pelas letras *T*, *N*, *C* ou *CT*, indicando seu possível emprego, como se segue:

- T: condutor de mesma seção dos condutores principais ou não, com isolação de cor verde ou verde-amarelo ou não isolado, singelo ou subdividido, para uso como condutor de proteção (PE).
- N: condutor isolado ou não, quando de seção inferior à dos condutores principais, para uso como condutor neutro; no caso de cabo multiplexado auto-sustentado, a letra N designa o condutor neutro de sustentação, mesmo que seja de seção igual ou superior às dos condutores principais.
- C: condutor concêntrico de qualquer seção ou forma, isolado ou não.
- CT: condutor de verificação do aterramento.

A notação dos condutores específicos deve seguir a dos condutores principais, intercalada por um sinal de adição. Exemplos:

- $2 \times 50 + 25\ T$: indica um cabo tripolar com dois condutores de fase de 50 mm² e um condutor de proteção de 25 mm².
- $3 \times 35 + 25\ N + 25\ C$: indica um cabo multipolar com três condutores de fase de 35 mm², um condutor neutro de 25 mm² e um condutor concêntrico de 25 mm².

No caso de cabos multiplexados, são indicados o número de condutores e a seção nominal, em mm², intercalados por (xx). Assim:

- $3 \times 1 \times 50$ indica um cabo triplexado com três condutores de 50 mm²;
- $3 \times 1 \times 70 + 70\ N$: indica um cabo multiplexado auto-sustentado com três condutores de fase de 70 mm² e um condutor neutro de 70 mm².

Material, grau de flexibilidade e forma do condutor

Quando o material do condutor for cobre, nenhum símbolo é utilizado; quando for alumínio, usa-se a letra "A".

Conforme a flexibilidade e a forma do condutor, são utilizadas as seguintes designações:

- M: condutor redondo de seção maciça.
- SM: condutor setorial de seção maciça.
- S: condutor encordoado setorial.
- Rc: condutor redondo encordoado, compactado.
- R2: condutor redondo encordoado, normal, encordoamento classe 2.
- R3: condutor redondo encordoado, normal, encordoamento classe 3.
- R4: condutor redondo encordoado, encordoamento classe 4.
- R5: condutor redondo encordoado, encordoamento classe 5.
- R6: condutor redondo encordoado, encordoamento classe 6 ou superior.

Material e qualidade da isolação

A *qualidade da isolação* é relativa a uma ou mais características próprias do composto isolante, por exemplo, temperatura máxima de serviço, condição não migrante da isolação em papel impregnado etc.

Para designação da isolação, utilizam-se uma ou mais letras que definem o material que serviu de base para sua composição, seguida(s) ou não de um algarismo que indica sua qualidade. A ausência do algarismo indica a isolação no seu tipo mais usual. A Tabela 5.24 mostra os materiais isolantes mais comuns.

Condutor concêntrico ou blindagem metálica sobre a veia

Para um condutor concêntrico ou uma blindagem metálica sobre a veia de cabos unipolares ou multipolares, são usadas uma ou mais letras, seguidas ou não de um algarismo, isto é:

- C (ou A): condutor concêntrico de cobre (alumínio), constituído por uma coroa helicoidal de fios.
- C1 (ou A1): condutor concêntrico de cobre (alumínio), aplicação S-Z (tipo "ceander").
- H: blindagem helicoidal de fios redondos ou fios chatos.
- H1: blindagem helicoidal de fitas de cobre.
- H2: blindagem de trança de fios de cobre.
- H3: blindagem S – Z (tipo "ceander").
- H4: blindagem de dupla trança de cobre
- H5: blindagem de papel ou plástico metalizado ou papel carbono ou tecido misto de têxtil e cobre.
- H6: blindagem de fita de alumínio longitudinal colada à cobertura de polietileno (APL).

Em todos estes casos, o cobre pode ser revestido ou não.

Proteção sobre cabo unipolar ou sobre cada veia de cabo multipolar ou multiplexado

As designações estão apresentadas na Tabela 5.25.

Diversos

(a) *Composição e forma do cabo*: é atribuída uma letra, conforme a construção do cabo, sendo:

- O: veias, eventualmente providas de proteção, reunidas com ou sem enchimento, formando um cabo substancialmente redondo.
- Z: veias, como acima, reunidas sem cobertura (cordões e cabos multiplexados).
- D: veias, como no primeiro caso, reunidas em paralelo, formando um cabo de formato plano.
- W: condutores isolados paralelos com um sulco intermediário (cordões planos divisíveis, com bordas vivas ou arredondadas).

(b) *Condutor concêntrico ou blindagem metálica sobre a reunião de veias de cabo multipolar*: como indicado na Seção "Condutor concêntrico ou blindagem metálica sobre a veia", somente os símbolos são escritos na seqüência de construção, após os símbolos indicados no item (*a*).
(c) *Proteção(ões) sobre a reunião de veias de cabo multipolar*: como na Seção "Proteção sobre cabo unipolar ou sobre cada veia de cabo multipolar ou multiplexado", somente os símbolos são escritos na seqüência de construção, após o símbolo correspondente indicado no item (a).
(d) *Eventuais componentes específicos*: caso exista um elemento de sustentação, ele é indicado com a letra:

- S: se for de material metálico incorporado na cobertura; ou
- Y: se o elemento de sustentação for inserido entre as veias ou ligado externamente ao cabo.

(e) *Tensão de isolamento do cabo*: após a sigla alfanumérica, é acrescentada a tensão de isolamento do cabo, tal como previsto na respectiva especificação.
(f) *Características adicionais*: eventuais características adicionais do cabo, por exemplo, resistência à chama, resistência aos óleos etc., podem ser evidenciadas acrescentando, após o último símbolo da sigla, o símbolo correspondente a essa característica, intercalado por um hífen, como segue:

- F: cabo resistente ao ensaio de queima vertical (NBR NM IEC 60332-3).
- HF: cabo resistente ao ensaio de queima vertical (NBR NM IEC 60332-3), porém isento de halogênios.
- RO: cabo resistente aos óleos.
- WR: cabo resistente às intempéries.

Exemplos

(a) 1 × 6 MV-F 450/750 V: condutor isolado, constituído por um condutor de cobre de seção nominal 6 mm², maciço, isolação de PVC para temperatura de serviço de 70°C, tensão de isolamento 450/750 V resistente à chama.
(b) 1 × 25 R2 V-F 450/750 V: condutor isolado, constituído por um condutor de cobre de seção nominal 25 mm², encordoamento classe 2, isolação de PVC para temperatura de serviço de 70°C, tensão de isolamento 450/750 V, resistente à chama.
(c) 1 × 4 R4 V-F 450/750 V: condutor isolado, constituído por um condutor de cobre de seção nominal 4 mm², encordoamento classe 4, isolação de PVC para temperatura de serviço de 70°C, tensão de isolamento 450/750 V, resistente à chama.
(d) 1 × 35 R 2 VV − F 0,6/1 kV: cabo unipolar, constituído por um condutor de cobre de seção nominal 35 mm², encordoamento classe 2, isolação de PVC para 70°C, cobertura de PVC, tensão de isolamento 0,6/1 kV, resistente à chama.
(e) 3 × 25 R2 E OV 0,6/1 kV: cabo tripolar, constituído por condutores de cobre de seção nominal 25 mm², encordoamento classe 2, isolação de EPR para 90°C, cobertura de PVC, tensão de isolamento 0,6/1 kV.
(f) 3 × 70 × OV 0,6 /1 kV: cabo tripolar, constituído por condutores de cobre de seção nominal 70 mm², setorial encordoado, isolação em XLPE para 90°C, cobertura de PVC, tensão de isolamento 0,6/1 kV.
(g) 2 × 2,5 R4 VW 300/300 V: cordão bipolar, constituído por condutor de cobre de seção nominal 2,5 mm², encordoamento classe 4, isolação de PVC para 70 °C, com veias paralelas divisíveis, formando um conjunto de formato plano, tensão de isolamento 300/300 V.
(h) 3 × 70 AR2 EHOV 8,7/15 kV: cabo tripolar, constituído por condutores de alumínio de seção nominal 70 mm², encordoamento classe 2, isolação de EPR para 90°C, com blindagem individual de fios de cobre, veias reunidas, cobertura de PVC, tensão de isolamento 8,7/15 kV.
(i) 3 × 1 × 95 + 50 N AR 2 × Z 0,6/1 kV: condutor neutro de alumínio liga NU – cabo multiplexado autosustentado, com três condutores fase de alumínio seção nominal 95 mm², condutor neutro de sustentação de alumínio liga NU de seção nominal 50 mm², encordoamento classe 2, condutores fase isolados em XLPE para 90°C e reunidos ao redor do neutro, tensão de isolamento 0,6/1 kV.

Tabela 5.23 ■ Índice de toxidez dos materiais

Material	Gases desprendidos	Índice de toxidez
Kynar	CO_2, CO, HF	547
CPS (Hypalon)	CO_2, CO, HCI, SO_2	53
Polietileno	CO_2,CO	0,90
Isolação Afumex (Prysmian)	CO_2, CO	1,45
Cobertura Afumex (Prysmian)	CO_2, CO	0,85

Tabela 5.24 ■ Materiais para isolação e suas qualidades

Material	Designação	Significado
Cloreto de polivinila (PVC)	V	Temperatura de serviço 70 °C; indica PVC/A ou PVC/B
	V1	Temperatura de serviço 80 °C
	V2	Temperatura de serviço 90 °C
	V3	Temperatura de serviço 105 °C
Polietileno termoplástico	P	Baixa densidade
	P1	Média densidade
	P2	Alta densidade
Elastômero (borracha sintética)	B	Temperatura de serviço 70 °C
	B1	Temperatura de serviço 80 °C
	B2	Temperatura de serviço 90 °C
Polietileno clorossulfonado	B3	Temperatura de serviço 95 °C; silicone
	B7	Temperatura de serviço 200 °C; silicone
Etileno-propileno (EPR) ou Etileno-propilenodieno (EPR)	E	Temperatura de serviço { 85 °C; cabos navais / 90 °C
	E2	Temperatura de serviço 130 °C
Polietileno reticulado (XLPE)	X	Temperatura de serviço { 85 °C; cabos navais / 90 °C
	X2	Temperatura de serviço 125 °C
Polímeros fluorados	FL	Temperatura de serviço 200 °C
	FL1	Temperatura de serviço 260 °C
	FL2	Temperatura de serviço 125 °C
Papel impregnado	I	Composto normal
	I1	Composto não-migrante
	I2	Sob pressão de gás
	I_3	Sob pressão de óleo fluido

Tabela 5.25 ■ Proteções sobre cabo ou veia de cabo

Natureza	Material/Tipo	Designação	Significado
Não metálica	PVC	V	–
	Polietileno	P	Composto ST3
	Borracha sintética (estirólica ou similar)	B	Composto SE3
	Policloropreno, polietileno clorossulfonado ou polímero similar	k	Composto SEI/A, SEI/A, SEI/B, SE4 ou SE5
	Trança têxtil	T	–
	Revestimento de juta	J[1]	–

Nota:
1. Antes e/ou depois da proteção metálica, conforme a proteção do cabo.

(continua)

(continuação)

Natureza	Material/Tipo	Designação	Significado
Metálica	Alumínio (ou liga de alumínio)	A	Armação helicoidal de fitas planas
		A1	Armação helicoidal de fitas conformadas e intertravadas
		A2	Armação helicoidal de coroa de fios
		A3	Armação de tranças de fios
		A4	Capa extruturada lisa
		A5	Capa extruturada corrugada
	Chumbo (ou liga de chumbo)	L	Capa extruturada de chumbo puro
		L1	Capa extruturada de liga de chumbo
	Aço	F	Armação helicoidal de fitas planas
		F1	Armação helicoidal de fitas conformadas e intertravadas
		F2	Armação helicoidal de fios redondos
		F3	Armação helicoidal de fios chatos
		F4	Armação de trança de fios

5.10 Normas brasileiras de cabos de potência

As principais normas brasileiras de cabos de potência estão descritas a seguir.

Normas básicas e gerais

- NBR 5111/97: fios de cobre nu de seção circular para fins elétricos – Especificação.
- NBR 5368/97: fios de cobre mole estanhados para fins elétricos – Especificação.
- NBR 5471/86: condutores elétricos.
- NBR NM 280/2002 Condutores de cabos isolados (IEC 60228, MOD).
- NBR 6524/1998: fios e cabos de cobre duro e meio duro com ou sem cobertura protetora para instalações aéreas – Especificação.
- NBR 5118/2007: fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos.
- NBR 5285/85: fios de alumínio liga nus de seção circular para fins elétricos – Especificação.
- NBR 6251/2006: cabos de potência com isolação extrudada para tensões de 1 kV a 35 kV – Requisitos construtivos.
- NBR 9311/86: cabos elétricos isolados – Designação – Classificação.
- NBR 11301/90: cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100%) – Procedimento.
- NBR 7011/89: fios de aço-alumínio nus, encruados de seção circular para fins elétricos – Especificação.
- NBR NM IEC 60332-3-10/2005: métodos de ensaios para cabos elétricos submetidos ao fogo – Parte 3-10: Ensaio de propagação vertical da chama de cabos em feixes na posição vertical – Equipamento de ensaio.
- NBR NM IEC 60332-3-21/2005: métodos de ensaios para cabos elétricos sob condições de fogo – Parte 3-21: Ensaio de propagação vertical da chama em condutores ou cabos em feixes montados verticalmente – Categoria A F/R.
- NBR NM IEC 60332-3-22/2005: métodos de ensaios para cabos elétricos sob condições de fogo – Parte 3-22: Ensaio de propagação vertical da chama em condutores ou cabos em feixes montados verticalmente – Categoria A.
- NBR NM IEC 60332-3-23/2005: métodos de ensaios para cabos elétricos sob condições de fogo – Parte 3-23: Ensaio de propagação vertical da chama em condutores ou cabos em feixes montados verticalmente – Categoria B.
- NBR NM IEC 60332-3-24/2005: métodos de ensaios para cabos elétricos sob condições de fogo – Parte 3-24: Ensaio de propagação vertical da chama em condutores ou cabos em feixes montados verticalmente – Categoria C.
- NBR NM IEC 60332-3-25/2005: métodos de ensaios para cabos elétricos sob condições de fogo – Parte 3-25: Ensaio de propagação vertical da chama em condutores ou cabos em feixes montados verticalmente – Categoria D.
- NBR 13418/95: Cabos resistentes ao fogo para instalações de segurança.

Normas específicas

- NBR NM 247-3/2002: cabos isolados com policloreto de vinila (PVC) para tensões nominais até 450/750V, inclusive – Parte 3: Condutores isolados (sem cobertura) para instalações fixas (IEC 60227-3, MOD).
- NBR13249/2000: cabos e cordões flexíveis para tensões até 750 V - Especificação.
- NBR 9113/85: cabos flexíveis multipolares com isolação sólida extrudada de borracha sintética para tensões até 750 V – Especificação.
- NBR 8661/97: cabos de formato plano com isolação sólida extrudada de cloreto de polivinila (PVC) para tensões até 750 V – Especificação.
- NBR 9317/86: cabos flexíveis para ferro de passar roupa e outros aparelhos de aquecimento, com isolação sólida extrudada de borracha etileno-propileno (EPR), para tensões de 300V – Especificação.
- NBR 7288/94: cabos de potência com isolação sólida extrudada de cloreto de polivinila (PVC) ou polietileno (PE) para tensões de 1 kV a 6 kV.
- NBR 13249/2000: cabos e cordões flexíveis para tensões até 750 V – Especificação.
- NBR 7286/2001: cabos de potência com isolação sólida extrudada de borracha etileno-propileno (EPR) para tensões de 1 a 35 kV – Requisitos de desempenho.
- NBR 7285/2001: cabos de potência com isolação sólida extrudada de polietileno termofixo (XLPE) para tensão de 0,6/1 kV – Sem cobertura – Especificação
- NBR 7287/92: cabos de potência com isolação sólida extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de 1 kV a 35 kV.
- NBR 8344/83: cabos de potência com isolação de papel impregnado para tensões de 1 a 35 kV – Especificação.
- NBR 8182/2003: cabos de potência multiplexados auto-sustentados com isolação extrudada de PE ou XLPE para tensões até 0,6/1 kV – Requisitos de desempenho.
- NBR 9024/90: cabos de potência multiplexados auto-sustentados com isolação sólida extrudada de EPR ou XLPE para tensões de 10 kV a 35 kV.
- NBR 6524/98: fios e cabos de cobre duro e meio duro com ou sem cobertura protetora para instalações aéreas – Especificação.
- NBR 9375/94: Cabos de potência com isolação sólida extrudada de borracha etileno-propileno (EPR) blindados, para ligações móveis de equipamentos para tensões de 3 kV a 25 kV.
- NBR 7270/88: cabos de alumínio com alma de aço para linhas aéreas.
- NBR 7271/88: cabos de alumínio para linhas aéreas.
- NBR 10298/88: cabos de alumínio liga para linhas aéreas.
- NBR 10712/89: cabos de aço-alumínio nus para linhas aéreas.
- NBR 13248/2000: cabos de potência e controle e condutores isolados sem cobertura, com isolação extrudada e com baixa emissão de fumaça para tensões até 1 kV – Requisitos de desempenho.
- NBR 13249/2000: cabos e cordões flexíveis para tensões até 750 V – Especificação.

5.11 Tipos de linhas elétricas

Definições[7] e aspectos básicos

Como apresentado na Seção 1.3 do Capítulo 1, o conceito de "linha elétrica" engloba os condutores e os eventuais elementos de fixação, suporte e proteção mecânica a eles associados. São vários os tipos de linha, a saber:

- *Linha (elétrica)*: conjunto constituído por um ou mais condutores, com os elementos de sua fixação e suporte e, se for o caso, de proteção mecânica, destinado a transportar energia elétrica ou a transmitir sinais elétricos.
- *Linha aberta*: linha em que os condutores são circundados por ar ambiente não confinado.
- *Linha aérea*: linha (aberta) em que os condutores ficam elevados em relação ao solo e afastados de outras superfícies que não os respectivos suportes.
- *Linha aparente:* linha em que os condutos ou os condutores não estão embutidos.
- *Linha em parede ou no teto*: linha aparente em que os condutores ficam na superfície de uma parede ou de um teto, ou em sua proximidade imediata, dentro ou fora de um conduto.
- *Linha embutida*: linha em que os condutos ou os condutores são encerrados nas paredes ou na estrutura da edificação, com acesso apenas em pontos determinados.
- *Linha subterrânea*: linha construída por cabos isolados, enterrados diretamente no solo ou instalados em condutos enterrados no solo.
- *Linha pré-fabricada*[8]: linha construída por peças de tamanhos padronizados, contendo condutores de seção

7. De acordo com a NBR IEC 60050 (826):1997.
8. Ver Seção 5.1.

maciça com proteção mecânica, que se ajustam entre si no local da instalação.

Os condutores, e os eventuais elementos de fixação, suporte e proteção mecânica a eles associados são os seguintes:

- *Bandeja*: suporte de cabos constituído por uma base contínua, com rebordos e sem cobertura, podendo ser perfurada ou não (lisa). A Figura 5.31 apresenta uma instalação elétrica com bandejas e eletrodutos aparentes.
- *Bloco alveolado*: bloco de construção com um ou mais furos que, por justaposição, formam um ou mais condutos (ver Figura 5.29).
- *Caixa de derivação* (ver Figura 5.33) é uma caixa utilizada para passagem *e/ou* ligações de condutores entre si *e/ou* dispositivos nela instalados. *Espelho* é a peça que serve de tampa para uma caixa de derivação ou de suporte e remate para dispositivos de acesso externo.
- *Canaleta*: elemento de linha elétrica instalado ou construído no solo ou no piso, ou acima do solo ou do piso, aberto, ventilado ou fechado, com dimensões insuficientes para a entrada de pessoas, mas que permitem o acesso aos condutores ou eletrodutos nele instalados, em toda a sua extensão, durante e após a instalação. Uma canaleta pode ser parte, ou não, da construção da edificação (ver Figura 5.31).
- *Condulete*: é uma caixa de derivação para linhas aparentes, dotada de tampa própria (ver Figura 5.35)
- *Conduto elétrico*: elemento de linha elétrica destinado a conter condutores elétricos.
- *Escada ou leito para cabos*: suporte de cabos constituído por uma base descontínua, formada por travessas ligadas rigidamente a duas longarinas longitudinais, sem cobertura (ver Figura 5.32).
- *Espaço de construção*: espaço existente na estrutura ou nos componentes de uma edificação, acessível apenas em determinados pontos.
- *Eletroduto*: elemento de linha elétrica fechada, de seção circular ou não, destinado a conter condutores elétricos providos de isolação, permitindo tanto a enfiação como a retirada destes. Na prática, o termo se refere tanto ao elemento (tubo), como ao conduto formado por diversos tubos. Os eletrodutos podem ser metálicos (aço, alumínio) ou de material isolante (PVC, polietileno, fibrocimento etc.). São usados em linhas elétricas embutidas, subterrâneas ou aparentes.
- *Eletrocalha*: elemento de linha elétrica fechada e aparente, constituído por uma base com cobertura desmontável, destinado a envolver por completo condutores elétricos providos de isolação, permitindo também a acomodação de certos equipamentos elétricos. As calhas podem ser metálicas (aço, alumínio) ou isolantes (plástico); as paredes podem ser lisas ou perfuradas (ver Figura 5.28) e a tampa simplesmente encaixada ou fixada com auxílio de ferramenta.

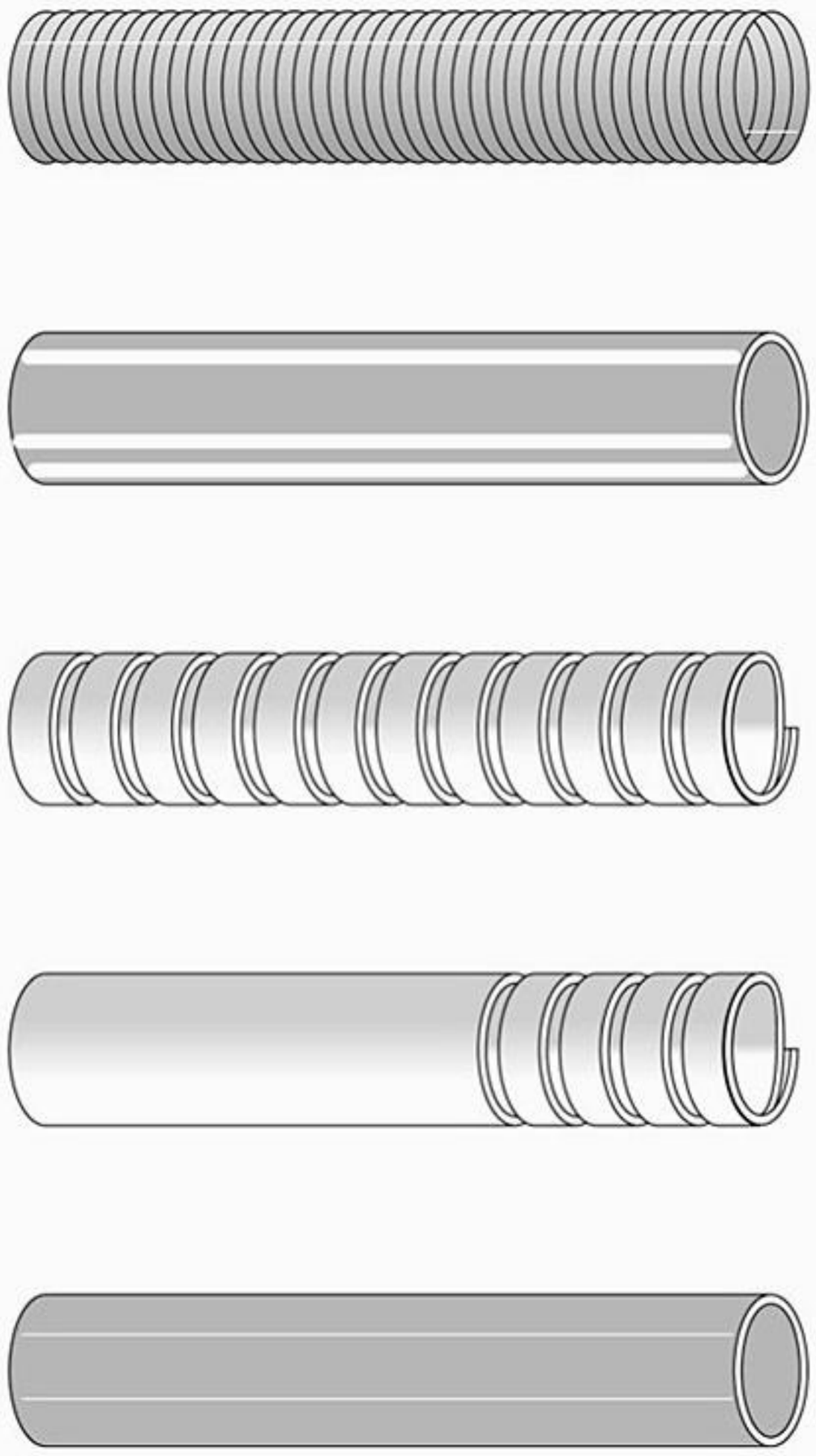


Figura 5.28 ■ Alguns tipos de eletrodutos

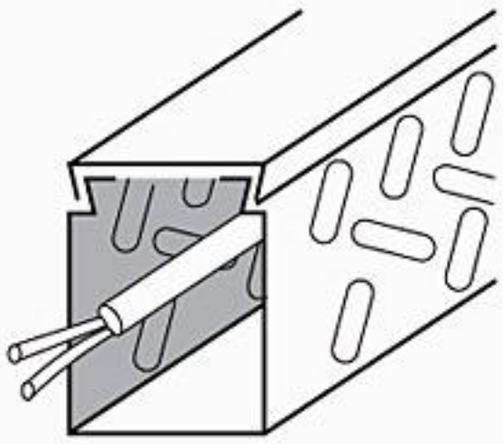


Figura 5.29 ■ Eletrocalha com paredes perfuradas e tampa removível encaixada

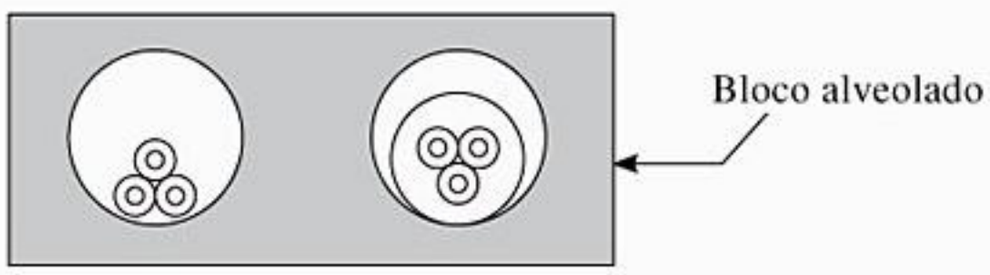


Figura 5.30 ■ Corte de um bloco alveolado com dois furos

- *Galeria*: corredor cujas dimensões permitem que pessoas transitem livremente por ele em toda a sua extensão, contendo estruturas de suporte para os condutores e suas junções e/ou outros elementos de linhas elétricas.
- *Moldura*: conduto aparente, fixado ao longo de superfícies, compreendendo uma base fixa, com ranhuras para a colocação de condutores e uma tampa desmontável. Quando fixada junto ao ângulo parede/piso, a moldura é também denominada "rodapé".
- *Perfilado*: eletrocalha ou bandeja de dimensões transversais reduzidas. Um dos tipos mais comuns de perfilados tem a dimensão 38 × 38 mm.
- *Poço*: espaço de construção vertical, estendendo-se geralmente por todos os pavimentos da edificação.
- *Prateleira para cabos*: suporte contínuo para condutores, engastado ou fixado em uma parede ou teto por um de seus lados, e com uma borda livre.
- *Suportes horizontais para cabos*: suportes individuais espaçados entre si, nos quais é fixado mecanicamente um cabo ou um eletroduto.

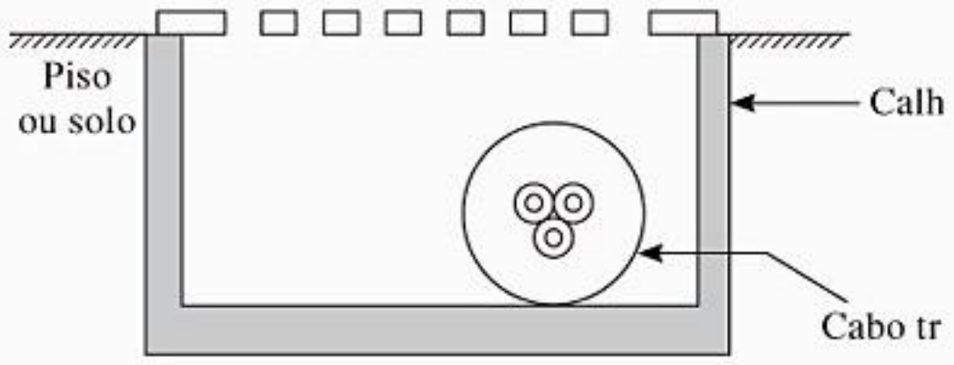


Figura 5.31 ■ Corte de uma canaleta (com tampa) ventilada

Nas instalações de baixa tensão, a NBR 5410 prescreve, nas linhas elétricas, o uso de condutores isolados, cabos uni e multipolares, cabos multiplexados e condutores nus, de cobre e de alumínio (ver Seção "Cobre *versus* alumínio", em 5.2).

Para linha pré-fabricada e barramento blindados, ver Quadro 5.3.

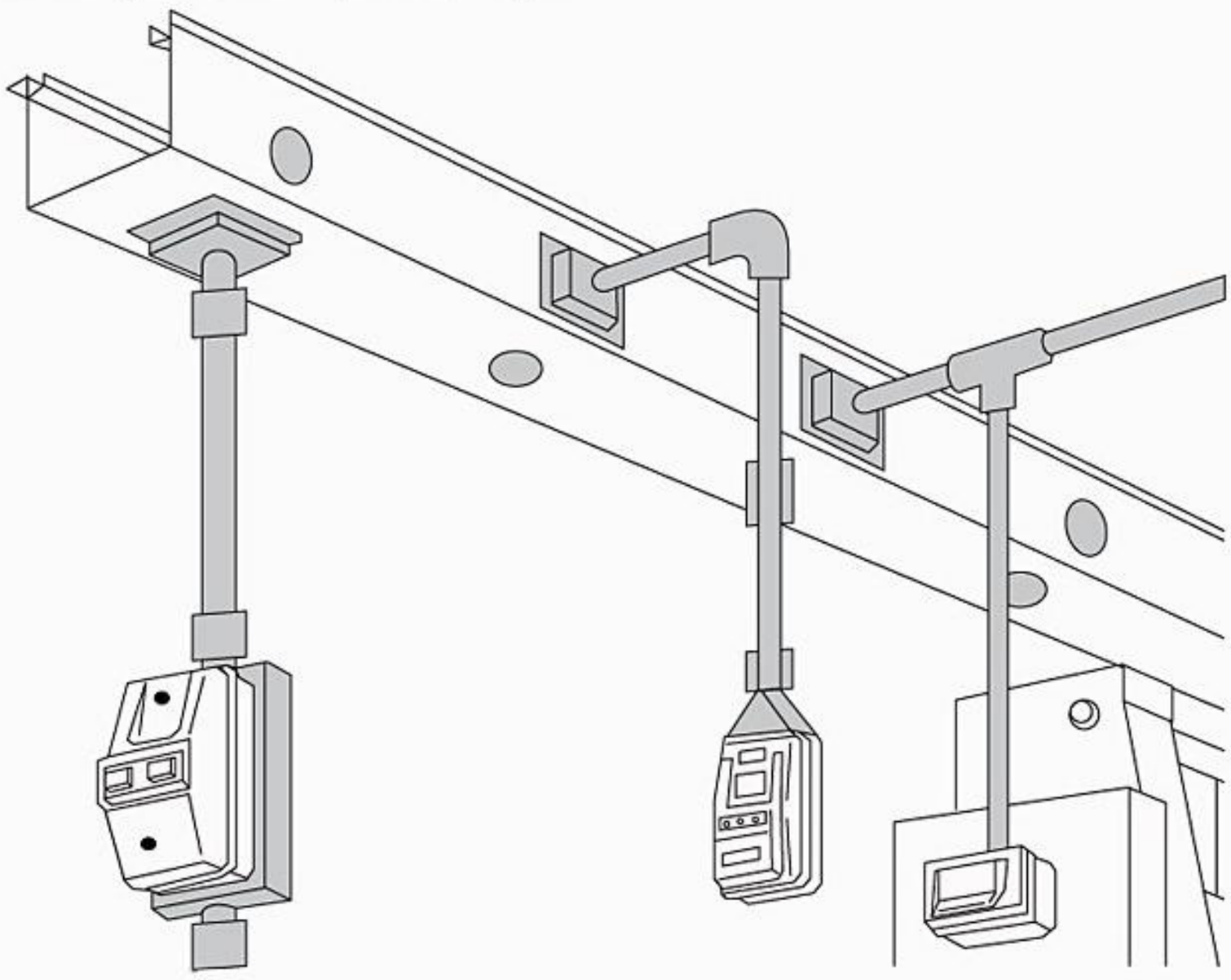


Figura 5.32 ■ Instalação utilizando bandeja e eletrodutos

Quadro 5.3 ■ Normas para linha pré-fabricada e barramento blindado

As linhas pré-fabricadas devem atender às normas específicas, ser instaladas de acordo com as instruções do fabricante e atender às prescrições da NBR 5410.
Os barramentos blindados devem atender às prescrições da norma NBR IEC 60439-2:2004 – Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão – Parte 2: Requisitos particulares para linhas elétricas pré-fabricadas (sistemas de barramentos blindados).

Aspectos gerais das linhas

Conexões

Aspectos gerais das conexões

Recomenda a NBR 5410 que as conexões entre condutores e com equipamentos devem ser realizadas de modo a assegurar contatos firmes e duráveis e permitir sua inspeção. É importante observar que tais conexões devem estar contidas em invólucros adequados (tais como caixas, quadros, canaletas etc.), que garantam a necessária proteção mecânica, e, na escolha dos dispositivos de conexão, devem ser considerados:

- O material dos condutores.
- A quantidade e a forma dos condutores.
- A seção dos condutores.
- O número de condutores a serem ligados entre si.

As conexões devem satisfazer às seguintes condições:

- Serem garantidas por dispositivos adequados à natureza dos condutores e a sua seção.
- Serem acessíveis, mas apenas após a desmontagem de uma tampa ou de um obstáculo com o auxílio de uma ferramenta, de modo a permitir a inspeção dos contatos.

É importante observar que a acessibilidade das conexões é *dispensada* em certos casos, para atender a necessidades específicas, tais como a proteção contra corrosão, penetração de líquidos, inacessibilidade, vibrações etc. É o que ocorre em:

- Emendas de cabos diretamente enterrados.
- Emendas encapsuladas ou preenchidas com massa.
- Equipamentos especiais

Exceto nos casos de linhas aéreas e de linhas de contato que alimentam equipamentos móveis, as conexões de condutores entre si e com equipamentos não devem ser submetidas a qualquer esforço de tração ou de torsão.

Devem ser tomadas todas as precauções para evitar que as partes metálicas das conexões energizem outras partes metálicas normalmente isoladas de partes vivas.

As conexões devem estar em condições de suportar os esforços provocados por correntes de valores iguais às capacidades de condução de corrente e por correntes de curto-circuito determinadas pelas características dos dispositivos de proteção. Por sua vez, as conexões não devem sofrer modificações inadmissíveis em decorrência de seu aquecimento, do envelhecimento dos isolantes e das vibrações que ocorrem em serviço normal. Em particular, devem ser consideradas as influências da dilatação térmica e das tensões eletroquímicas, que variam de metal para metal, bem como a influência das temperaturas que afetam a resistência mecânica dos materiais.

As conexões devem ser realizadas de modo que a pressão de contato não dependa do material isolante.

Soldagem e contato a pressão

As conexões devem ser feitas por soldagem ou por contato a pressão. Observe-se que o uso de conexões soldadas deve ser evitado em circuitos de potência, sendo ainda proibida a aplicação de solda a estanho na terminação de condutores, para conectá-los a bornes ou terminais de dispositivos ou equipamentos elétricos. No entanto, se usadas, devem ser concebidas levando em conta o escoamento e os esforços mecânicos. Por sua vez, deve ser lembrado que o uso de solda em condutores e cabos com isolação termofixa limita a temperatura de curto-circuito a 160°C.

No caso de conexões soldadas, as superfícies dos metais devem ser devidamente preparadas e protegidas de oxidação, principalmente no caso do alumínio.

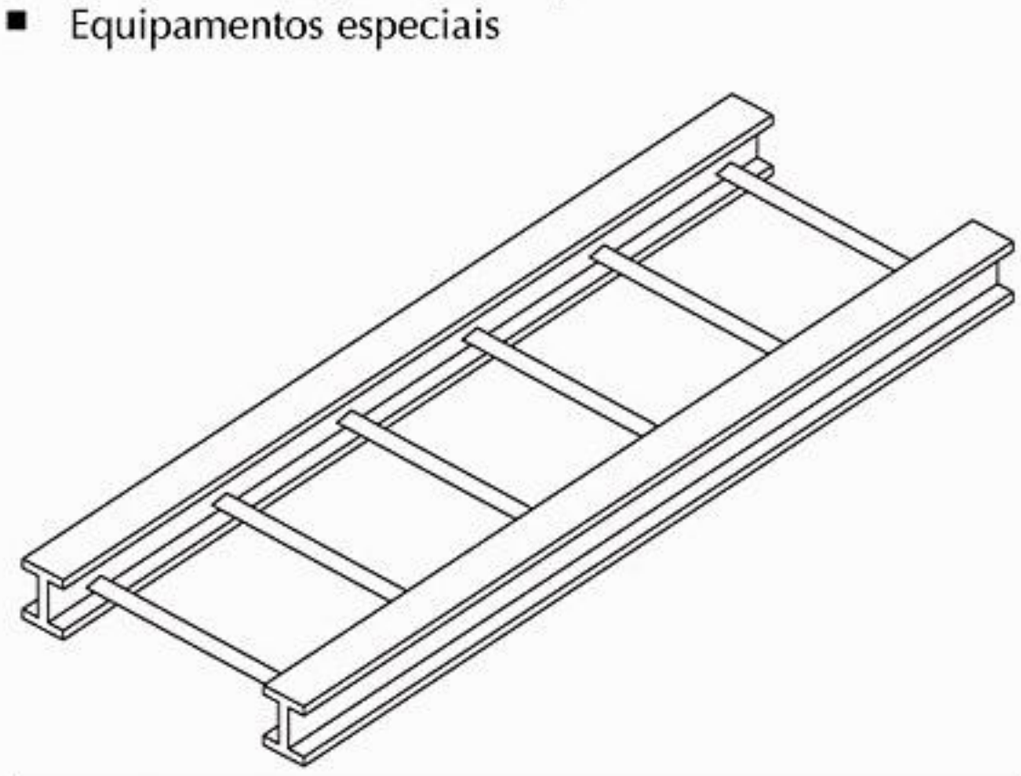


Figura 5.33 ■ Escada (leitos) para cabos

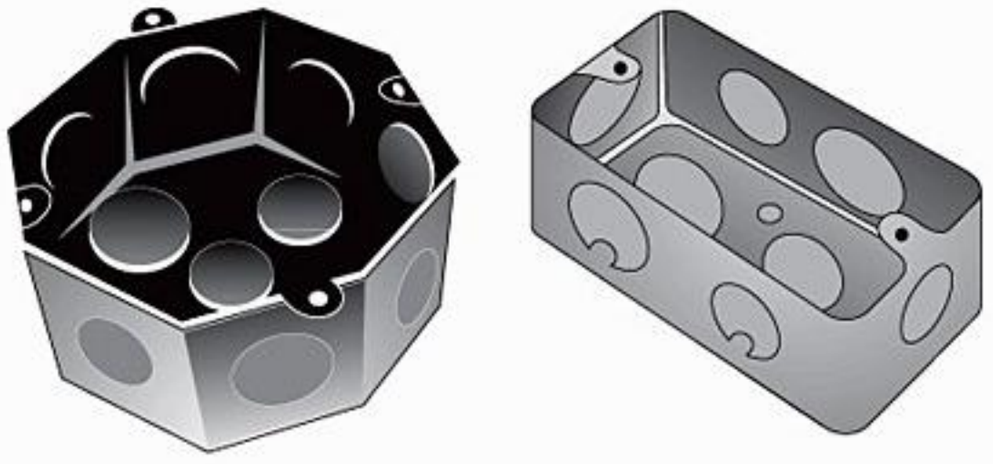


Figura 5.34 ■ Dois tipos de caixas de derivação

As conexões prensadas devem ser realizadas por meio de ferramentas adequadas ao tipo e ao tamanho de conector utilizado, de acordo com as recomendações do fabricante do conector.

Conexões de condutores de alumínio

Os meios de conexão utilizados na ligação direta de condutores de alumínio a terminais de dispositivos ou equipamentos elétricos que admitam tal conexão devem atender aos requisitos das normas aplicáveis a conexões para alumínio. Na falta de meios de conexão adequados para conexão direta com alumínio, o condutor deve ser emendado com um condutor de cobre, por meio de conector especial, e então ligado ao equipamento.

As conexões para alumínio com aperto por meio de parafuso devem ser executadas de forma a garantir pressão adequada sobre o condutor de alumínio. Essa pressão é assegurada pelo controle de torque durante o aperto do parafuso. O torque adequado deve ser fornecido pelo fabricante do conector ou do equipamento que inclua os conectores.

Em condutores de alumínio somente são admitidas emendas por meio de conectores por compressão ou solda adequada.

A conexão entre cobre e alumínio deve ser realizada exclusivamente por meio de conectores adequados a esse fim (conectores bimetálicos).

Condições gerais de instalação

Influências externas

A proteção contra as influências externas conferida ao tipo de linha instalada deve ser assegurada de maneira contínua, de acordo com as condições apresentadas no Apêndice A.

Extremidades

Nas extremidades das linhas elétricas e especialmente nos locais de entrada nos equipamentos, a proteção deve se manter de maneira contínua e, se necessário, deve ser assegurada a sua estanqueidade.

Travessias de paredes e pisos

Nas travessias de paredes, as linhas elétricas devem ser providas de proteção mecânica adequada, a menos que sua robustez seja suficiente para garantir a integridade nos trechos de travessia.

Para as travessias entre locais que possam apresentar diferenças importantes de estado higrométrico, devem ser tomadas precauções especiais, a fim de evitar a introdução e a condensação de água na travessia. Se forem utilizados condutos não obturados, estes devem ser inclinados no sentido do local mais úmido e dispostos de maneira que os condutores sejam ventilados livremente.

As mesmas precauções devem ser tomadas em relação às travessias para o exterior.

Se os condutores forem nus, as travessias devem ser efetuadas por meio de buchas de passagem ou de eletrodutos de material isolante não hidrófilo. Nesse caso, deve ser utilizado um eletroduto por condutor, devendo a distância entre os condutores ser a mesma adotada fora da travessia.

Na travessia de pisos, deve ser assegurada a proteção da linha, no nível do piso acabado, contra as degradações mecânicas e o escoamento de líquidos que possam ser derramados. Se a travessia for efetuada com condutores contidos em eletrodutos, estes devem ser estanques e sua extremidade superior deve ficar acima do piso, a uma altura no mínimo igual à dos rodapés, se existirem, e de pelo menos 11 centímetros.

Proximidade de linhas não-elétricas

Nos casos de vizinhanças entre linhas elétricas e linhas (canalizações) não-elétricas, as linhas e as canalizações devem ser dispostas de maneira a manter entre suas superfícies externas uma distância tal que toda intervenção realizada em uma instalação não danifique as demais. Na prática, uma distância de 3 cm é considerada suficiente. Essa recomendação não se aplica às linhas e canalizações embutidas.

Na vizinhança de canalizações de calefação, de ar quente ou de dutos de exaustão de fumaça, as linhas elétricas não devem correr o risco de atingir uma temperatura prejudicial e, por conseguinte, devem ser mantidas a uma distância suficiente ou ser separadas daquelas canalizações por telas (anteparos) adequadas.

As linhas elétricas não devem utilizar dutos de exaustão de fumaça ou de ventilação, nem ser colocadas paralelamente abaixo de canalizações que possam gerar condensações (tais como tubulações de água, de vapor, de gás etc.), a menos que sejam tomadas precauções para proteger as linhas dos efeitos dessas condensações.

Não é recomendável que as linhas elétricas utilizem as mesmas canaletas ou poços que as canalizações não-elétricas, a menos que sejam atendidas, simultaneamente, as condições a seguir:

- A proteção contra contatos indiretos deve ser assegurada, considerando-se as canalizações metálicas não-elétricas como elementos condutores.
- As linhas elétricas devem ser completamente protegidas contra perigos que possam resultar da presença de outras instalações.

Proximidade de outras linhas elétricas

As linhas elétricas de baixa tensão e as linhas de tensões superiores a 1.000 V não devem ser colocadas nas mesmas canaletas ou poços, a menos que sejam tomadas precauções adequadas para evitar que, em caso de defeito, a linha de alta tensão energize a linha de baixa tensão.

Além disso, os circuitos sob tensões que se enquadrem uma(s) na faixa I e outra(s) na faixa II, definida(s) na Tabela 5.26, não devem compartilhar a mesma linha elétrica, a menos que todos os condutores sejam isolados para a tensão mais elevada presente ou, então, que seja atendida uma das seguintes condições:

Tabela 5.26 ■ Faixas de tensão

Faixa	Sistemas diretamente aterrados				Sistemas não diretamente aterrados	
	Corrente alternada (V)		Corrente contínua (V)		Corrente alternada (V)	Corrente contínua (V)
	Entre fase e terra	Entre fases	Entre pólo e terra	Entre pólos	Entre fases	Entre pólos
I	U ≤ 50	U ≤ 50	U ≤ 120	U ≤ 120	U ≤ 50	U ≤ 120
II	50 < U ≤ 600	50 < U ≤ 1.000	120 < U ≤ 900	120 < U ≤ 1.500	50 < U ≤ 1.000	120 < U ≤ 1.500

- Os condutores com isolação apenas suficiente para a aplicação a que se destinam forem instalados em compartimentos separados do conduto a ser compartilhado.
- Forem utilizados condutos fechados separados.

Obturações

Quando uma linha elétrica atravessar elementos da construção, tais como pisos, paredes, coberturas, tetos etc., as aberturas remanescentes à passagem da linha devem ser obturadas de modo a preservar a característica de resistência ao fogo de que o elemento for dotado.

A obturação de travessias pode ser executada com materiais específicos, tais como compostos de amianto, fibras, cerâmicas etc. Tais obturações devem permitir modificações na instalação, sem afetar as linhas elétricas existentes. Deve-se atentar para o fato de que a presença de materiais de obturação pode reduzir, significativamente, a capacidade de condução de corrente dos condutores e cabos instalados, que é função da resistividade térmica dos materiais, de sua espessura e das dimensões da obturação.

Toda obturação deve atender às seguintes prescrições:

- Ser compatível com os materiais da linha elétrica com os quais tiver contato.
- Permitir as dilatações e contrações da linha elétrica sem que isso reduza sua efetividade como barreira corta-fogo.
- Apresentar estabilidade mecânica adequada, capaz de suportar os esforços que podem sobrevir de danos causados pelo fogo aos meios de fixação e de suporte da linha elétrica. Esta prescrição é considerada atendida se a fixação da linha elétrica for reforçada com grampos, abraçadeiras ou suportes, instalados a não mais de 750 mm da obturação e capazes de suportar as cargas mecânicas esperadas em conseqüência da ruptura dos suportes situados do lado da parede já atingido pelo fogo, e de tal forma que nenhum esforço seja transmitido à obturação, ou se a concepção da própria obturação garantir uma sustentação adequada, na situação considerada.
- Suportar as mesmas influências externas a que a linha elétrica for submetida.
- Ter uma resistência aos produtos de combustão equivalente à dos elementos da construção nos quais forem aplicadas.
- Apresentar um grau de proteção contra penetração de água pelo menos igual ao requerido dos elementos da construção nos quais forem aplicadas.
- Ser protegida, tanto quanto as linhas, contra gotas de água que, escorrendo ao longo da linha, possam vir a se concentrar no ponto obturado, a menos que os materiais utilizados sejam todos resistentes à umidade, originalmente e/ou após finalizada a obturação.

Em particular, nos espaços de construção e nas galerias devem ser tomadas precauções adequadas para evitar a propagação de um incêndio, colocando-se, por exemplo, obturações nos pontos de entrada e de saída de condutos e/ou condutores desses locais.

Instalação de condutores

Segundo a NBR 5410, os cabos multipolares só devem conter os condutores de um e apenas um circuito e, se for o caso, seu respectivo condutor de proteção.

Nos condutos fechados (eletrodutos, nas eletrocalhas, nos blocos alveolados etc.), podem ser instalados condutores de mais de um circuito nos seguintes casos:

(a) quando forem atendidas simultaneamente as três condições a seguir:

- Os circuitos pertençam às mesmas instalações, isto é, originem-se do mesmo dispositivo geral de manobra e proteção, sem a interposição de equipamentos que transformem a corrente.
- As seções nominais dos condutores de fase devem estar contidas em um intervalo de três valores normalizados sucessivos (por exemplo, 2, 5, 4 e 6 mm^2).
- Os condutores isolados ou cabos isolados devem ter a mesma temperatura máxima para serviço contínuo.
- Todos os condutores forem isolados para a mais alta tensão nominal presente.

(b) no caso dos circuitos de força, de comando *e/ou* sinalização de um mesmo equipamento.

A NBR 5410 recomenda, ainda, que os condutores isolados e os cabos unipolares de um mesmo circuito

sejam instalados próximos uns dos outros, o mesmo ocorrendo com o condutor de proteção correspondente. No caso de condutores em paralelo, eles devem ser reunidos em tantos grupos quantos forem os condutores em paralelo, cada grupo contendo um condutor de cada fase; os condutores de cada grupo devem ser instalados nas proximidades imediatas uns dos outros. Esses procedimentos, conforme apresentados no Capítulo 8, visam à redução da reatância indutiva dos circuitos, no caso do condutor de proteção, bem como à redução da impedância do percurso da corrente de falta. Assim, por exemplo, no caso de um circuito com três fases, neutro e condutor de proteção, com três condutores por fase e instalação em eletroduto, a solução poderia ser utilizar três eletrodutos, cada um contendo as três fases, um neutro e um condutor de proteção, embora esta não seja a solução mais econômica. Outra solução poderia ser utilizar um único eletroduto, contendo os nove condutores fase, um neutro único e um condutor de proteção único. Nesse caso, o efeito térmico é mais acentuado.

Tipos de linhas recomendados pela NBR 5410

A NBR 5410 indica que a instalação de um circuito ou de uma linha elétrica deve se enquadrar nos seguintes tipos de linhas elétricas (maneira de instalar), conforme apresentado na Tabela 5.27.

Linhas com eletrodutos

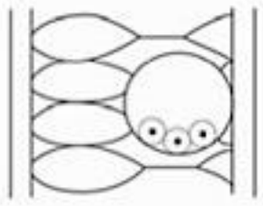
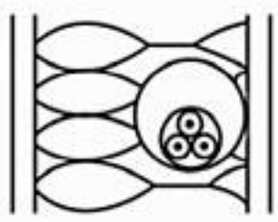
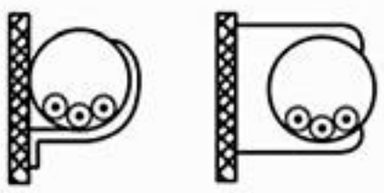
A função principal de um eletroduto é conter o caminho da fiação elétrica e proteger os condutores elétricos contra certas influências externas (por exemplo, choques mecânicos, agentes químicos etc.). Podem também, em alguns casos, proteger o meio ambiente contra incêndios e das explosões resultantes de curto-circuito envolvendo condutores.

Os eletrodutos, dependendo do material usado, podem ser *metálicos* ou *isolantes,* ou ainda *magnéticos* ou *não magnéticos*. Classificam-se em *rígidos, curváveis, transversalmente elásticos* e *flexíveis*. Veja o Quadro 5.4.

Quadro 5.4 ■ Classificação dos eletrodutos rígidos ou isolantes

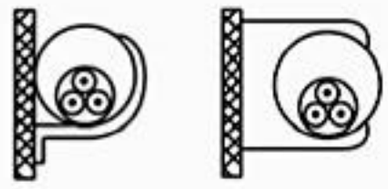
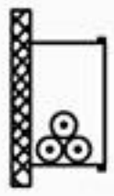
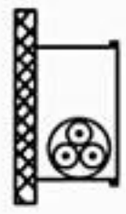
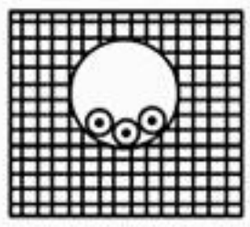
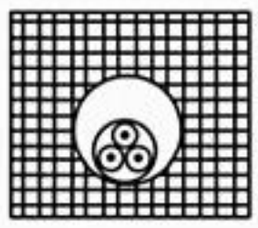
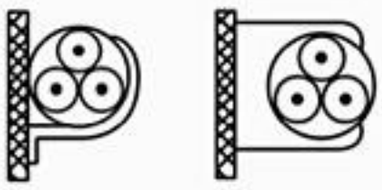
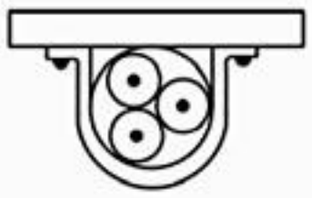
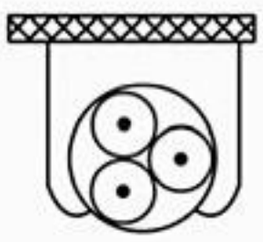
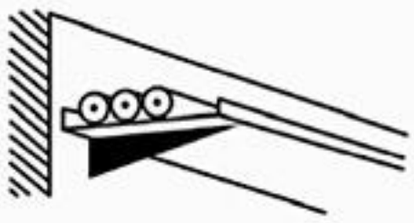
- *Eletroduto rígido*: eletroduto que não pode ser curvado, a não ser com ajuda mecânica, com ou sem tratamento especial.
- *Eletroduto curvável*: eletroduto que pode ser curvado com a mão, usando uma força razoável, mas sem qualquer outra ajuda.
- *Eletroduto transversalmente elástico*: eletroduto curvável que, deformado sob ação de uma força transversal aplicada durante um curto intervalo de tempo, retoma sua forma original logo após a cessação da força.
- *Eletroduto flexível*: eletroduto curvável que pode ser dobrado com a mão, com uma força razoavelmente reduzida, mas sem ajuda de outro meio, e que é destinado a ser freqüentemente dobrado em serviço.

Tabela 5.27 ■ Tipos de linhas elétricas (maneira de instalar)

Método de instalação número	Esquema ilustrativo da instalação	Descrição da instalação	Método de referência a utilizar para a capacidade de condução de corrente[1]
1		Condutores isolados unipolares em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante.[2]	A1
2		Cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante.	A2
3		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre parede ou espaçado desta menos 0,3 vez o diâmetro do eletroduto.	B1

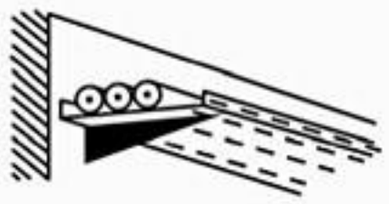
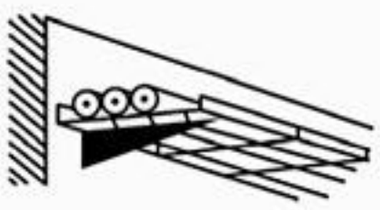
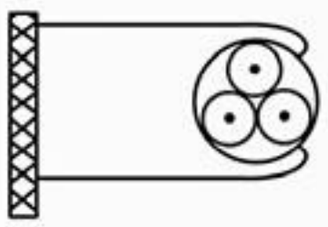
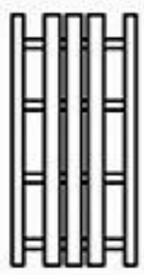
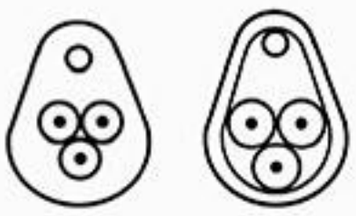
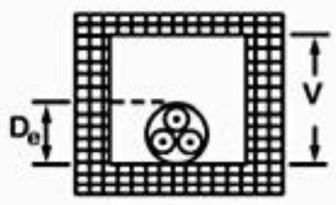
(continua)

(continuação)

Método de instalação número	Esquema ilustrativo da instalação	Descrição da instalação	Método de referência a utilizar para a capacidade de condução de corrente[1]
4		Cabo multipolar em eletroduto aparente de seção circular sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do eletroduto.	B2
5		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção não circular sobre parede.	B1
6		Cabo multipolar em eletroduto aparente de seção não circular sobre parede.	B2
7		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria.	B1
8		Cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria.	B2
11		Cabos unipolares ou cabo multipolar sobre parede ou afastado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do cabo.[4]	C
11A		Cabos unipolares ou cabo multipolar fixado diretamente no teto.[4]	C
11B		Cabos unipolares ou cabo multipolar afastado do teto mais de 0,3 vez o diâmetro do cabo.[4]	C
12		Cabos unipolares ou cabo multipolar em bandeja não perfurada, perfilado ou prateleira.[3]	C

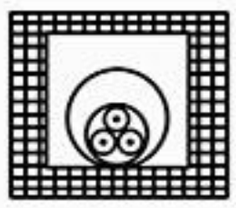
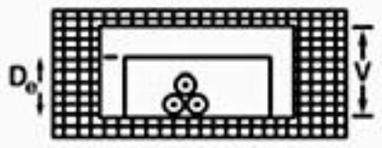
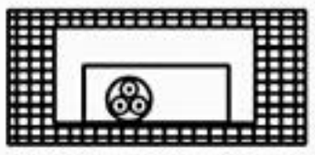
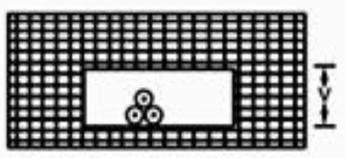
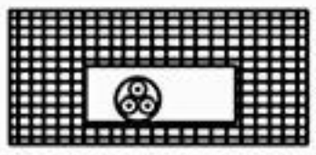
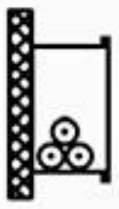
(continua)

(continuação)

Método de instalação número	Esquema ilustrativo da instalação	Descrição da instalação	Método de referência a utilizar para a capacidade de condução de corrente[1]
13		Cabos unipolares ou cabo multipolar em bandeja perfurada, horizontal ou vertical.[4]	E (multipolar) F (unipolares)
14		Cabos unipolares ou cabo multipolar sobre suportes horizontais, eletrocalha aramada ou tela.	E (multipolar) F (unipolares)
15		Cabos unipolares ou cabo multipolar afastado(s) da parede mais de 0,3 vez o diâmetro do cabo.	E (multipolar) F (unipolares)
16		Cabos unipolares ou cabo multipolar em leito (escada).	E (multipolar) F (unipolares)
17		Cabos unipolares ou cabo multipolar suspenso(s) por cabo de suporte, incorporado ou não.	E (multipolar) F (unipolares)
18		Condutores nus ou isolados sobre isoladores.	A1
21		Cabos unipolares ou cabos multipolares em espaço de construção,[5] sejam eles lançados diretamente sobre a superfície do espaço de construção, sejam instalados em suportes ou condutos abertos (bandeja, prateleira, tela ou leito) dispostos no espaço de construção.[5, 6]	$1{,}5D_e \leq V < 5D_e$ B2 $5D_e \leq V < 50D_e$ B1

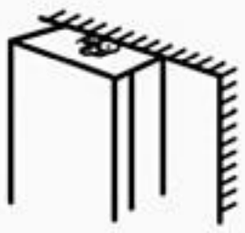
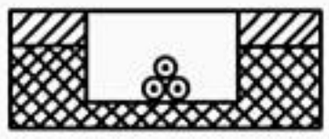
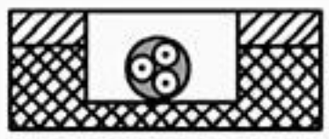
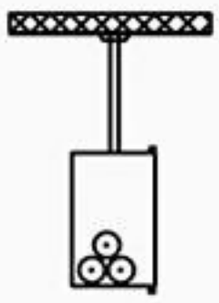
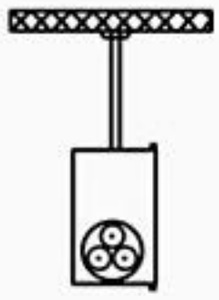
(continua)

(continuação)

Método de instalação número	Esquema ilustrativo da instalação	Descrição da instalação	Método de referência a utilizar para a capacidade de condução de corrente[1]
22		Condutores isolados em eletroduto de seção circular em espaço de construção.[5, 7]	$1{,}5D_e \leq V < 20D_e$ B2 $V \geq 20D_e$ B1
23		Cabos unipolares ou cabo multipolar em eletroduto de seção circular em espaço de construção.[5, 7]	B2
24		Condutores isolados em eletroduto de seção não circular ou eletrocalha em espaço de construção.[5]	$1{,}5D_e \leq V < 20D_e$ B2 $V \geq 20D_e$ B1
25		Cabos unipolares ou cabo multipolar em eletroduto de seção não circular ou eletrocalha em espaço de construção.[5]	B2
26		Condutores isolados em eletroduto de seção não circular embutido em alvenaria.[6]	$1{,}5D_e \leq V < 20D_e$ B2 $5D_e \leq V < 50D_e$ B1
27		Cabos unipolares ou cabo multipolar em eletroduto de seção não circular embutido em alvenaria	B2
31		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal ou vertical.	B1
32			

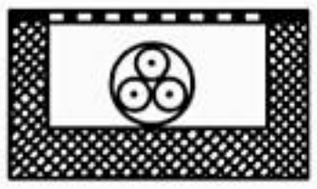
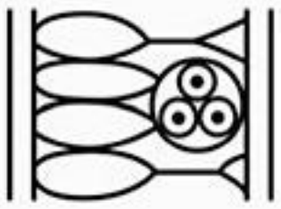
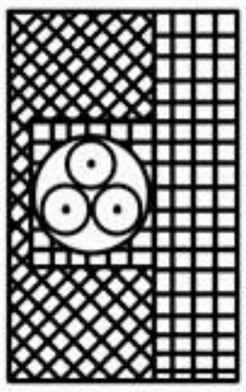
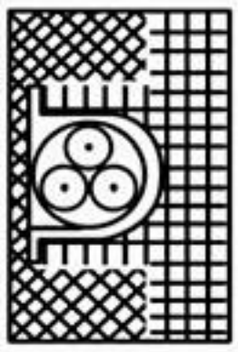
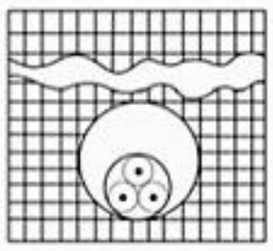
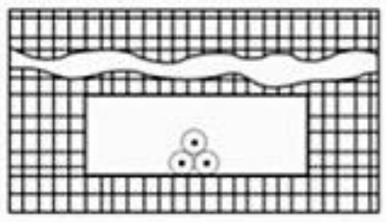
(continua)

(continuação)

Método de instalação número	Esquema ilustrativo da instalação	Descrição da instalação	Método de referência a utilizar para a capacidade de condução de corrente[1]
31A		Cabo multipolar em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal.	B2
32A		Cabo multipolar em eletrocalha sobre parede em percurso vertical.	
33		Condutores isolados ou cabos unipolares em canaleta fechada embutida no piso.	B1
34		Cabo multipolar em canaleta fechada embutida no piso.	B2
35		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha ou perfilado suspensa(o).	B1
36		Cabo multipolar em eletrocalha ou perfilado suspensa(o).	B2
41		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular contido em canaleta fechada com percurso horizontal ou vertical.[7]	$1{,}5D_e \leq V < 20D_e$ B2 $V \geq 20D_e$ B1

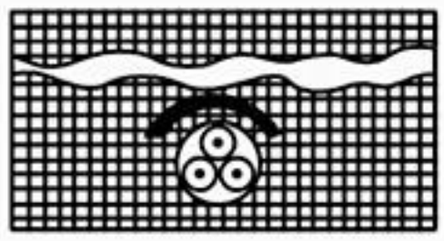
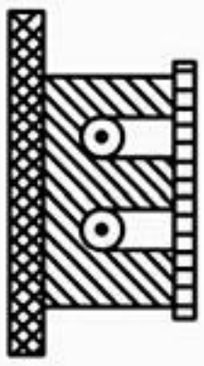
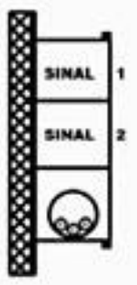
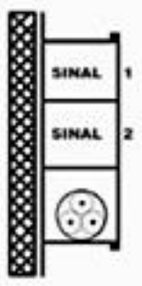
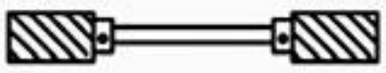
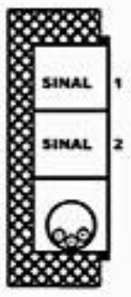
(continua)

(continuação)

Método de instalação número	Esquema ilustrativo da instalação	Descrição da instalação	Método de referência a utilizar para a capacidade de condução de corrente[1]
42		Condutores isolados em eletroduto de seção circular contido em canaleta ventilada embutida no piso.	B1
43		Cabos unipolares ou cabo multipolar em canaleta ventilada embutida no piso.	B1
51		Cabo multipolar embutido diretamente em parede termicamente isolante.[2]	A1
52		Cabos unipolares ou cabo multipolar embutido(s) diretamente em alvenaria sem proteção mecânica adicional.	C
53		Cabos unipolares ou cabo multipolar embutido(s) diretamente em alvenaria com proteção mecânica adicional.	C
61		Cabo multipolar em eletroduto (de seção circular ou não) ou em canaleta não ventilada enterrado(a).	D
61 A		Cabos multipolares em eletroduto (de seção não-circular ou não) ou em canaleta não ventilada enterrado(a).[8]	D

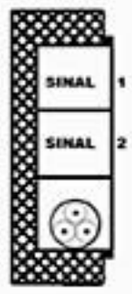
(continua)

(continuação)

Método de instalação número	Esquema ilustrativo da instalação	Descrição da instalação	Método de referência a utilizar para a capacidade de condução de corrente[1]
63		Cabos unipolares ou cabo multipolar diretamente enterrado(os), com proteção mecânica adicional.	D
71		Condutores isolados ou cabos unipolares em moldura.	A1
72		Condutores isolados ou cabos unipolares em canaleta provida de separações sobre parede.	B1
72A		Cabo multipolar em canaleta provida de separações sobre parede.	B2
73	 Vista superior	Condutores isolados em eletroduto, cabos unipolares ou cabo multipolar embutido(s) em caixilho de porta.	A1
74	 Vista superior	Condutores isolados em eletroduto, cabos unipolares ou cabo multipolar embutido(s) em caixilho de janela.	A1
75		Condutores isolados ou cabos unipolares em canaleta embutida em parede.	B1

(continua)

(continuação)

Método de instalação número	Esquema ilustrativo da instalação	Descrição da instalação	Método de referência a utilizar para a capacidade de condução de corrente[1]
75A		Cabo multipolar em canaleta embutida em parede.	B2

Notas:

1 Método de referência a ser utilizado na determinação da capacidade de condução de corrente.

2 Assume-se que a face da parede apresenta uma condutância térmica não inferior a 10 $W/m^2 \cdot K$.

3 Admitem-se também condutores isolados em perfilado.

4 A capacidade de condução de corrente para bandeja perfurada foi determinada considerando-se que os furos ocupasssem no mínimo 30% da área da bandeja. Se os furos ocuparem menos de 30% da área da bandeja, ela deve ser considerada como "não-perfurada".

5 Conforme a ABNT NBR IEC 60050 (826), os poços, as galerias, os pisos técnicos, os condutos formados por blocos alveolados, os forros falsos, os pisos elevados e os espaços internos existentes em certos tipos de divisórias (como, por exemplo, as paredes de gesso acartonado) são considerados espaços de construção).

6 *De* é o diâmetro externo do cabo, no caso de cabo multipolar. No caso de cabos unipolares ou condutores isolados, distinguem-se duas situações:
– três cabos unipolares (ou condutores isolados) dispostos em trifólio: *De* deve ser tomado igual a 2,2 vezes o diâmetro do cabo unipolar ou condutor isolado;
– três cabos unipolares (ou condutores isolados) agrupados num mesmo plano: *De* deve ser tomado igual a 3 vezes o diâmetro do cabo unipolar ou condutor isolado.

7 *De* é o diâmetro externo do eletroduto, quando de seção circular, ou altura/profundidade do eletroduto de seção não-circular ou da eletrocalha.

8 Admite-se também o uso de condutores isolados.

9 Admitem-se cabos diretamente enterrados sem proteção mecânica adicional, desde que esses cabos sejam providos de armação. Deve-se notar, porém, que essa norma não fornece valores de capacidade de condução de corrente para cabos armados. Tais capacidades devem ser determinadas como indicado na ABNT NBR 11301.

Nota: em linhas ou trechos verticais, quando a ventilação for restrita, deve-se atentar para risco de aumento considerável da temperatura ambiente no topo do trecho vertical.

Eletrodutos metálicos

Os *eletrodutos metálicos rígidos* são, geralmente, de aço-carbono, com proteção interna e externa feita com materiais resistentes à corrosão, podendo, em certos casos, ser fabricados em aço especial ou em alumínio (muito comum nos Estados Unidos). Normalmente, a proteção dos eletrodutos de aço-carbono é realizada pelo revestimento de zinco aplicado por imersão a quente (galvanização) ou zincagem em linha com cromatização, ou ainda pelo revestimento com tinta ou esmalte, ou com composto asfáltico (externamente). No Brasil, os eletrodutos metálicos rígidos com revestimento protetor devem estar em conformidade com as seguintes normas:

NBR 5597/2006: Eletroduto de aço-carbono e acessórios, com revestimento protetor e rosca NPT – Requisitos

NBR 5598/2006: Eletroduto de aço-carbono e acessórios, com revestimento protetor e rosca BSP – Requisitos

NBR 5624/93: Eletroduto rígido de aço-carbono, com costura, com revestimento protetor e rosca NBR 8133 – Especificação.

Os eletrodutos metálicos rígidos, fabricados de acordo com a NBR 5597 (que podem ser "pesado" e "extra") e segundo a NBR 5598 (um único tipo), de paredes mais grossas, são destinados, em princípio, a instalações industriais e análogas. Os esmaltados só devem ser usados em instalações internas, em linhas embutidas ou em linhas aparentes, em locais onde a presença de substâncias corrosivas não seja notável (locais AF1 e AF2). Os galvanizados são geralmente aplicados em instalações externas (aparentes) ou em linhas subterrâneas, em contato direto com a terra ou envelopados em concreto. Os fabricados conforme a NBR 5624 (um único tipo), de paredes mais finas, são destinados, em princípio, à instalações não industriais, e estão sujeitos às mesmas restrições dos esmaltados e galvanizados, quanto à aplicação.

A Figura 5.35 indica as dimensões a considerar em um eletroduto e as Tabelas 5.28 e 5.29 apresentam as dimensões normalizadas dos eletrodutos rígidos de aço-carbono e de PVC, respectivamente.

Os eletrodutos metálicos rígidos são fabricados em "varas" de três metros, sendo suas dimensões principais indicadas na Tabela 5.30.



Figura 5.35 ■ Conduletes

Eletrodutos isolantes

Os *eletrodutos isolantes rígidos* constituem outro tipo importante de conduto. São fabricados em PVC, polietileno de alta densidade, barro vitrificado (manilhas), cimento-amianto etc. Para linhas acima do solo, aparentes ou embutidas e para linhas subterrâneas em envelopes de concreto, os de PVC são os mais utilizados no Brasil. Eles devem atender à norma NBR 15465:2007 – Sistemas de eletrodutos plásticos para instalações elétricas de baixa tensão – Requisitos de desempenho, que prevê eletrodutos roscáveis e soldáveis, com duas espessuras (classe A e classe B) e "varas" também de 3 metros. Os demais tipos, com exceção dos de polietileno, são usados exclusivamente em linhas subterrâneas ou, eventualmente, contidos em canaletas. A Tabela 5.31 apresenta as principais dimensões dos eletrodutos de PVC.

Eletrodutos flexíveis

Os *eletrodutos flexíveis* podem ser *metálicos*, constituídos em geral por uma fita de aço enrolada em hélice, por vezes com uma cobertura impermeável de plástico, ou *isolantes*, de polietileno ou de PVC. Sua aplicação típica é na ligação de equipamentos que apresentem vibrações ou pequenos movimentos durante seu funcionamento.

Diâmetro interno e tamanho nominal

Tradicionalmente, no Brasil, os eletrodutos eram designados por seu *diâmetro interno* em polegadas. Com o advento das novas normas, a designação passou a ser feita pelo *tamanho nominal*, um simples número sem dimensão. É importante indicar as equivalências entre as duas designações. Essas equivalências são apresentadas nas tabelas a seguir:

Tabela 5.28 ■ Eletrodutos rígidos aço-carbono

Tamanho nominal	Diâmetro interno (Designação da rosca) (polegadas)
10	3/8
15	1/2
20	3/4
25	1
32	1 1/4
40	1 1/2
50	2
65	2 1/2
80	3
90	3 1/2
100	4
125	5
150	6

Tabela 5.29 ■ Eletrodutos rígidos de PVC

Tamanho nominal	Diâmetro interno (Designação da rosca) (polegadas)
16	1/2
20	3/4
25	1
32	1 1/4
40	1 1/2
50	2
60	2 1/2
75	3
85	3 1/2

Acessórios de eletrodutos

Em uma linha elétrica com eletrodutos, são usados os acessórios elencados a seguir.

- *Luva* (rígidos): peça cilíndrica rosqueada internamente, destinada a unir dois tubos ou um tubo e uma curva.
- *Bucha* (rígidos): peça de arremate das extremidades dos eletrodutos, destinada a evitar danos à isolação dos condutores por eventuais rebarbas, durante o puxamento, instalada na parte interna da caixa de derivação.
- *Arruela* (rígidos): peça rosqueada internamente (porca), colocada na parte externa da caixa de derivação, complementando a fixação do eletroduto à caixa.
- *Curva* (rígidos): de 45° e 90°.
- *Braçadeira* (rígidos e flexíveis).
- *Box* (flexíveis): peça destinada a fixar um eletroduto flexível a uma caixa ou a um eletroduto rígido.

Tabela 5.30 ■ Dimensões principais dos eletrodutos rígidos de aço-carbono

Tamanho	Diâmetro externo (mm)	Espessura de parede (mm)	Espessura de parede (mm)
NBR 5597		**Série extra**	**Série pesada**
10	17,1 ± 0,38	2,25	2,00
15	21,3 ± 0,38	2,65	2,25
20	26,7 ± 0,38	2,65	2,25
25	33,4 ± 0,38	3,00	2,65
32	42,2 ± 0,38	3,35	3,00
40	48,3 ± 0,38	3,35	3,00
50	60,3 ± 0,38	3,75	3,35
65	73,0 ± 0,64	4,50	3,75
80	88,9 ± 0,64	4,75	3,75
90	101,6 ± 0,64	5,00	4,25
100	114,3 ± 0,64	5,30	4,25
125	141,3 ± 1%	6,00	5,00
150	168,3 ± 1%	6,30	5,30
NBR 5598			
10	17,1 ± 0,40	2,00	
15	21,3 ± 0,40	2,25	
20	26,9 ± 0,40	2,25	
25	33,7 ± 0,40	2,65	
32	42,4 ± 1%	3,00	
40	48,3 ± 1%	3,00	
50	60,3 ± 1%	3,35	
65	76,1 ± 1%	3,35	
80	88,9 ± 1%	3,75	
90	101,6 ± 1%	4,25	
100	114,3 ± 1%	4,25	
125	139,7 ± 1%	5,00	
150	161,1 ± 1%	5,30	
NBR 5624	**Mínima**	**Máxima**	
10	16,3	16,5	1,50
15	20,0	20,4	1,50
20	25,2	25,6	1,50
25	31,5	31,9	1,50
32	40,5	41,0	2,00
40	46,6	47,1	2,25
50	58,4	59,0	2,25
65	74,1	74,9	2,65
80	86,8	87,6	2,65
90	99,0	100,0	2,65
100	111,6	112,7	2,65

Notas:

1. Para os eletrodutos fabricados de acordo com as Normas NBR 5597 e NBR 5598, são admitidas variações na espessura da parede que não excedam 12,5 por cento para menos, ficando em aberto as variações para mais.
2. Os eletrodutos devem ser fabricados em varas de 3.000 ± 20 mm.
3. As designações "série extra" e "série pesada" só se aplicam aos eletrodutos que atendem à NBR 5597.

Tabela 5.31 ■ Dimensões principais dos eletrodutos rígidos de PVC (NBR 15465)

Tamanho nominal	Diâmetro externo (mm)	Espessura de parede (mm)	
		Classe A	Classe B
Tipo soldável			
16	16,0 ± 0,3	1,5	1,0
20	20,0 ± 0,3	1,5	1,0
25	25,0 ± 0,3	1,7	1,0
32	32,0 ± 0,3	2,1	1,0
40	40,0 ± 0,4	2,4	1,0
50	50,0 ± 0,4	3,0	1,1
60	60,0 ± 0,4	3,3	1,3
75	75,0 ± 0,4	4,2	1,5
85	85,0 ± 0,4	4,7	1,8
Tipo roscável			
16	16,7 ± 0,3	2,0	1,8
20	21,1 ± 0,3	2,5	1,8
25	26,2 ± 0,3	2,6	2,3
32	33,2 ± 0,3	3,2	2,7
40	42,2 ± 0,3	3,6	2,9
50	47,8 ± 0,4	4,0	3,0
60	59,4 ± 0,4	4,6	3,1
75	75,1 ± 0,4	5,5	3,8
85	88,0 ± 0,4	6,2	4,0

Notas:
1. Para ambos os tipos são admitidas as seguintes variações na espessura de parede:
   - para tamanhos de 16 a 32 + 0,4 – 0;
   - para tamanhos de 40 a 75 + 0,5, – 0;
   - para tamanho 85 + 0,6, – 0.
2. Os eletrodutos devem ser fabricados em varas de 3,00 m com variações de +1 por cento e - 0,5 por cento.

Prescrições gerais de instalação

A NBR 5410 prescreve que é proibido o uso, como eletroduto, de produtos que não sejam expressamente apresentados e comercializados como tal, por exemplo, produtos caracterizados por seus fabricantes como "mangueiras". Isso quer dizer que produtos oferecidos ao mercado como eletrodutos devem, em primeiro lugar, atender às normas de fabricação e ensaio de eletrodutos. Nesse sentido, é muito importante que os fornecedores de eletrodutos indiquem, em seus materiais de divulgação, a qual norma técnica seu produto atende, além de gravar no produto a respectiva norma.

A NBR 5410 determina que nos eletrodutos só sejam instalados condutores isolados, cabos unipolares e cabos multipolares, admitindo-se a utilização de condutor nu em eletroduto isolante exclusivo, quando tal condutor se destinar a aterramento.

A norma permite o embutimento de *qualquer* tipo de eletroduto, desde que ele *resista aos esforços característicos do tipo de construção utilizado* e não seja danificado nos procedimentos de enfiação e retirada dos condutores quantas vezes for necessário. Na montagem das linhas a serem embutidas em concreto armado, os eletrodutos devem ser dispostos de modo a evitar sua deformação durante a concretagem. As caixas, bem como as bocas dos eletrodutos, devem ser fechadas com vedações apropriadas, que impeçam a entrada de argamassas ou a nata de concreto durante a concretagem.

As junções dos eletrodutos embutidos devem ser efetuadas com o auxílio de acessórios estanques aos materiais de construção.

A norma determina que, em todos os tipos de instalações, sejam utilizados apenas eletrodutos não propagantes da chama, como é o caso dos metálicos e dos PVC auto-extinguíveis.

Os eletrodutos só devem ser cortados perpendicularmente ao seu eixo. Deve ser retirada toda rebarba suscetível de danificar a isolação dos condutores.

Nas juntas de dilatação, os eletrodutos rígidos devem ser seccionados, o que pode exigir certas medidas compen-

satórias, como o uso de luvas flexíveis ou cordoalhas destinadas a garantir a continuidade elétrica de um eletroduto metálico.

Quando necessário, os eletrodutos rígidos isolantes devem ser providos de juntas de expansão, para compensar as variações térmicas.

A enfiação dos condutores só deve ser iniciada depois que a montagem dos eletrodutos for concluída, não restar nenhum serviço de construção suscetível de danificá-los e a linha for submetida a uma limpeza completa. Para facilitar a enfiação dos condutores, podem ser utilizados guias de puxamento, talco, parafina ou outros lubrificantes que não prejudiquem a isolação dos condutores.

Ocupação de eletrodutos, comprimentos máximos e número de curvas

As dimensões internas dos eletrodutos e respectivos acessórios, os comprimentos entre os pontos de puxada e o número de curvas devem ser tais que os condutores ou cabos a serem protegidos possam ser facilmente instalados e retirados após a instalação dos eletrodutos e acessórios. Para tanto, é necessário que:

- Os condutores ou cabos não ocupem uma porcentagem da aérea útil do eletroduto superior a 53 por cento para um condutor ou cabo, 31 por cento para dois, e 40 por cento para três ou mais.
- Os trechos contínuos de tubulação, sem interposição de caixas ou equipamentos, não excedam 15 m de comprimento para linhas internas às edificações e 30 m para as linhas em áreas externas às edificações, se os trechos forem retilíneos. Se os trechos incluírem curvas, o limite de 15 m e o de 30 m devem ser reduzidos em 3 m para cada curva de 90°; assim, por exemplo, um trecho de tubulação com 3 curvas não poderá ter um comprimento superior a $15 - (3 \times 3) = 6$ m

Quando não for possível evitar a passagem da linha por locais que impeçam, por algum motivo, a colocação de caixa intermediária, o comprimento do trecho contínuo pode ser aumentado, desde que seja utilizado um eletroduto de tamanho nominal imediatamente superior para cada 6 m, ou fração, de aumento da distância máxima calculada. Assim, um aumento, por exemplo, de 9 m implica um eletroduto com tamanho dois degraus acima do inicialmente definido, com base na taxa de ocupação máxima indicada anteriormente.

Em cada trecho de tubulação entre duas caixas, ou entre extremidades, ou ainda entre caixa e extremidade, só devem ser previstas, no máximo, 3 curvas de 90°, ou seu equivalente até, no máximo, 270°, não devendo ser previstas curvas com deflexão superior a 90°.

Caixas de derivação

As caixas de derivação devem ser previstas:

- Em todos os pontos de entrada ou de saída de condutores ou cabos na tubulação, exceto nos pontos de transição ou passagem de linhas abertas para linhas em eletrodutos, dos quais, nesses casos, devem ser rematados com buchas.
- Em todos os pontos de emenda ou derivação dos condutores ou cabos.
- Para dividir a tubulação, quando necessário, caso a distância entre duas caixas for grande.

A localização das caixas deve garantir que elas sejam facilmente acessíveis. Elas devem ser providas de tampas ou, caso alojem interruptores, tomadas de corrente e congêneres, fechadas com os espelhos que completam a instalação desses dispositivos. As caixas de saída para alimentação de equipamentos podem ser fechadas com as placas destinadas à fixação desses equipamentos.

Admite-se a ausência de tampa em caixas de derivação ou de passagem instaladas em forros ou pisos falsos, desde que essas caixas, efetivamente, só se tornem acessíveis com a remoção das placas do forro ou do piso falso, e que se destinem exclusivamente a emenda e/ou derivação de condutores, sem acomodar nenhum dispositivo ou equipamento.

Os condutores devem formar trechos contínuos entre as caixas, não se admitindo emendas e derivações senão no interior das caixas. Condutores emendados ou cuja isolação tenha sido danificada e recomposta com fita isolante ou outro material não devem ser enfiados em eletrodutos.

EXEMPLO 1

Cálculo da ocupação de um eletroduto.

A área útil de um eletroduto (A_E) é dada pela Expressão 5.35 (ver Figura 5.35):

$$A_E = \frac{\pi}{4}(d_e - 2e)^2 \ (\text{mm}^2) \qquad (5.35)$$

onde d_e é o diâmetro externo (mínimo) do eletroduto e e a espessura, ambos em mm.

A área total de um condutor/cabo isolado (A_c), por sua vez, é dada por:

$$A_c = \frac{\pi}{4}d^2 \ (\text{mm}^2) \qquad (5.36)$$

sendo d o diâmetro externo do condutor/cabo isolado, dado pelo fabricante (mm).

O número máximo de condutores ou cabos isolados (N), iguais entre si, que pode ser contido em um eletroduto será

$$N = \frac{0{,}4\,A_E}{A_c} \qquad (5.37)$$

(admitindo-se três ou mais condutores ou cabos).

Sejam, por exemplo, condutores isolados de seção nominal 2,5 mm², cujo diâmetro nominal é $d = 3,7$ mm, e seja um eletroduto de aço carbono de tamanho nominal 20, de acordo com a NBR 5598:

Da Tabela 5.28, obtém-se

$$d_e = 26,9 - 0,4 = 26,5 \text{ mm}$$

Da Expressão 5.35

$$A_E = \frac{\pi}{4}(26,5 - 2 \times 2,25)^2 = 380 \text{ mm}^2$$

Da Expressão 5.36, tem-se

$$A_c = \frac{\pi}{4} \times 3,7^2 = 10,75 \text{ mm}^2$$

Da Expressão 5.37

$$N = \frac{0,4 \times 380}{10,75} = 14,14 \rightarrow 14 \text{ condutores}$$

EXEMPLO 2

Admita-se que se queira instalar três circuitos em um eletroduto rígido de PVC, todos com condutores isolados, conforme especificado a seguir:

- Circuito 1 com três condutores de 2,5 mm² ($d = 3,70$ mm).
- Circuito 2 com três condutores de 4 mm² ($d = 4,20$ mm).
- Circuito 3 com quatro condutores de 6 mm² ($d = 4,80$ mm).

Dimensionar o eletroduto mínimo de PVC que comporta os três circuitos.

- Área ocupada pelos condutores, da Expressão 5.36
  - Circuito 1

$$3 \times \frac{\pi}{4} \times 3,70^2 = 32,26 \text{ mm}^2$$

  - Circuito 2

$$3 \times \frac{\pi}{4} \times 4,20^2 = 41,56 \text{ mm}^2$$

  - Circuito 3

$$4 \times \frac{\pi}{4} \times 4,80^2 = 72,38 \text{ mm}^2$$

$$A_c = 146,2 \text{ mm}^2$$

Área mínima do eletroduto

$$A_E = \frac{A_c}{0,4} = \frac{146,2}{0,4} = 365,5 \text{ mm}^2$$

Área de eletrodutos de PVC (NBR 15465, tipo roscável, classe A, Tabela 5.29), da Expressão 5.35

- Tamanho nominal 16

$$\frac{\pi}{4}[(16,7 - 0,3) - 2 \times 2,0]^2 = 120,76 \text{ mm}^2$$

- Tamanho nominal 20

$$\frac{\pi}{4}[(21,1 - 0,3) - 2 \times 2,5]^2 = 196,1 \text{ mm}^2$$

- Tamanho nominal 25

$$\frac{\pi}{4}[(26,2 - 0,3) - 2 \times 2,6]^2 = 336,54 \text{ mm}^2$$

- Tamanho nominal 32

$$\frac{\pi}{4}[(33,2 - 0,3) - 2 \times 3,2]^2 = 551,55 \text{ mm}^2$$

O eletroduto escolhido é o que possui área maior ou igual a 365,5 mm², que é o caso do tamanho nominal 32 (o qual, pela Tabela 5.29, é equivalente ao antigo 1 1/4).

Linhas com molduras, eletrocalhas e blocos alveolados

As molduras e as eletrocalhas são condutos para instalação aparente, não podendo, portanto, ser embutidas ou cobertas por qualquer material (por exemplo, papel de parede, tecido etc.).

Nas molduras, só podem ser instalados condutores isolados (caso mais comum) ou cabos unipolares, e cada uma de suas ranhuras, cujas dimensões devem ser suficientes, só podem conter condutores ou cabos de um mesmo circuito.

Nas eletrocalhas, podem ser instalados condutores isolados e cabos uni e multipolares.

Nos blocos alveolados, nos quais os condutores são instalados por puxamento, devido às irregularidades (nas paredes dos blocos e nos pontos de junção dos blocos), recomenda-se a instalação de cabos uni ou multipolares. No entanto, sob a estrita aplicação da norma, poderiam ser utilizados condutores isolados, uma vez que os blocos alveolados são condutos fechados.

Muito embora a NBR 5410 não faça referência à área máxima que pode ser ocupada pelos condutores no interior das eletrocalhas e dos blocos alveolados, é recomendável que ela não seja superior a 40 por cento da área útil.

Perfilados

Nos perfilados, podem ser instalados condutores isolados, cabos unipolares e cabos multipolares. Os condutores isolados só podem ser utilizados em perfilados de paredes não perfuradas e com tampas que só possam ser removidas com auxílio de ferramenta.

Admite-se o uso de condutores isolados em perfilados sem tampa ou com tampa desmontável sem auxílio de ferramenta, ou em perfilados com paredes perfuradas, com

ou sem tampa, desde que sejam instalados em locais só acessíveis a pessoas advertidas (BA4) ou qualificadas (BA5), ou sejam instalados a uma altura mínima de 2,50 m do piso.

Os perfilados devem ser escolhidos e dispostos de modo a não danificar os cabos nem comprometer seu desempenho. Eles devem possuir propriedades que lhes permitam suportar sem danos as influências externas a que forem submetidos.

Linhas subterrâneas e em canaletas

A NBR 5410 admite, em linhas enterradas (cabos diretamente enterrados ou contidos em eletrodutos enterrados), somente cabos unipolares ou multipolares, e, em linhas com cabos diretamente enterrados desprovidas de proteção mecânica adicional, só são admitidos cabos armados. Admite-se o uso de condutores isolados em eletroduto enterrado se, no trecho enterrado, não houver nenhuma caixa de passagem e/ou derivação enterrada e for garantida a estanqueidade do eletroduto.

Como regra, a norma recomenda que os cabos sejam protegidos contra as deteriorações causadas por movimentação de terra, contato com corpos duros, choque de ferramentas (no caso de escavações) e também contra umidade e ações químicas. Geralmente, isso só é conseguido com cabos uni ou multipolares cuja cobertura garanta uma estanqueidade suficiente, providos de armação, contidos em eletroduto, ou com outra proteção mecânica.

A NBR 5410 recomenda, ainda, que a linha subterrânea seja adequadamente sinalizada por um elemento de advertência, que pode ser uma fita colorida, situada, no mínimo, a 0,10 m acima da linha.

São ainda fixadas, como prevenção contra os efeitos da movimentação de terra, *profundidades mínimas* para a instalação dos cabos:

- 0,70 m em terreno normal;
- 1 m na travessia de vias acessíveis a veículos e com 0,50 m de largura disponível, de um lado ao outro da via.

Tais profundidades podem ser reduzidas em terreno rochoso ou quando os cabos estiverem protegidos, por exemplo, por eletrodutos que suportem as influências externas a que possam ser submetidos.

Deve ser observado um afastamento mínimo de 0,20 m entre duas linhas elétricas enterradas que venham a se cruzar, além de um afastamento mínimo de 0,20 m entre uma linha elétrica enterrada e qualquer linha não-elétrica cujo percurso se avizinhe ou cruze com o da linha elétrica. As canaletas, classificadas sempre como local AD4 (sujeito a projeções de água), podem conter cabos unipolares ou multipolares ou mesmo condutores isolados, desde que contidos em eletrodutos.

Espaços de construção, poços e galerias

Nos espaços de construção, nos poços e nas galerias[9], podem ser instalados condutores isolados e cabos uni ou multipolares em linhas dos tipos constantes da Tabela 5.27, desde que os condutores ou cabos possam ser colocados ou retirados sem intervenção nos elementos de construção do prédio.

Nas galerias, a solução mais comum consiste em instalar diversas camadas de bandejas ou escadas para cabos, em uma ou em ambas as paredes laterais.

Para as prumadas de prédios verticais, uma solução comum consiste em utilizar poços com cabos uni ou multipolares fixados a bandejas ou a escadas verticais.

Bandejas, leitos, prateleiras, suportes horizontais e fixação direta dos cabos em paredes ou tetos

Muito embora para esses tipos de linha só sejam recomendados cabos unipolares e cabos multipolares, admite-se utilizar condutores isolados, com isolação de XLPE, que atendam à NBR 7283, devido à espessura da isolação.

No caso de bandejas, escadas para cabos e prateleiras, a norma recomenda que os cabos sejam dispostos em uma única camada, porém admite a existência de várias camadas, o que está mais de acordo com a realidade, desde que seja reduzida a possibilidade de propagação de incêndio pelas isolações, capas ou coberturas dos cabos. Para isso, é recomendado que o volume de material combustível por metro linear de linha não exceda a 3,5 dm^3, para cabos da categoria B da NBR NM IEC 60332-3-23, e 7 dm^3 para cabos da categoria A ou A F/R das NBR NM IEC 60332-3-22 e 3-21, respectivamente.

Seja, por exemplo, um cabo unipolar categoria A de 50 mm^2 com isolação e cobertura de PVC, com diâmetro nominal do condutor $d_c = 8{,}05$ mm e com diâmetro externo nominal $d = 14$ mm. O volume de material combustível (isolação e cobertura) será, por metro linear (em dm^3):

A classificação dos cabos — para efeito do ensaio de queima vertical — é feita em três categorias, em função da quantidade de material combustível:

- NBR NM IEC 60332-3-22 *categoria A* ou NBR NM IEC 60332-3-21 *A F/R*: quer corpos de prova em número suficiente, de modo a se obter um volume total de material combustível de 7 dm^3 por metro linear do feixe;
- NBR NM IEC 60332-3-23 *categoria B*: idem, com 3,5 dm^3 por metro linear do feixe;
- NBR NM IEC 60332-3-24 *categoria C*: idem, com 1,5 dm^3 por metro linear do feixe.

9. Não citadas na NBR 5410.

$$\frac{\pi}{4} \cdot [(14 \times 10^{-2})^2 - (8{,}05 \times 10^{-2})^2] \cdot 10 =$$

$$= 0{,}103 \text{ dm}^3$$

Considerando *apenas as condições de propagação de fogo*, pode-se ter, agrupados, até

$$\frac{7}{0{,}103} = 67{,}96 = 68 \text{ cabos}$$

o que, logicamente, não é uma solução adequada do ponto de vista da capacidade de condução de corrente.

Linhas aéreas externas

Nas linhas aéreas externas, podem ser utilizados condutores nus ou providos de cobertura resistente às intempéries, condutores isolados com isolação resistente às intempéries, ou cabos multiplexados resistentes às intempéries montados sobre postes ou estruturas. Devem ser observadas distâncias mínimas entre o ponto mais baixo da linha e o solo, que, segundo a NBR 5410, são:

- 5,50 m onde houver tráfego de veículos pesados;
- 4,50 m onde houver tráfego de veículos leves;
- 3,50 m onde houver passagem exclusiva de pedestres.

Por sua vez, no caso de condutores nus, estes devem ficar fora do alcance de janelas, sacadas, escadas, saídas de incêndio, terraços e locais análogos, devendo, para tanto, atender a uma das seguintes condições:

- Estar a uma distância horizontal de, no mínimo, 1,20 m.
- Estar acima do nível superior das janelas.
- Estar a uma distância vertical de, no mínimo, 3,50 m acima do piso de sacadas, terraços ou varandas.
- Estar a uma distância vertical de, no mínimo, 0,50 m abaixo do piso de sacadas, terraços ou varandas.

Linhas sobre isoladores

Nas linhas constituídas por condutores montados sobre isoladores, podem ser usados condutores nus, condutores isolados, condutores isolados em feixe, cabos unipolares, cabos multipolares e barras (as barras são limitadas aos locais de serviço elétrico).

Seu uso não é permitido em locais de habitação.

No caso de locais comerciais ou análogos, só se admite o uso de linhas com condutores nus, como linhas em extrabaixa tensão, para alimentação de lâmpadas ou equipamentos móveis.

No caso de locais industriais, os condutores nus montados sobre isoladores só são admitidos em locais de serviço elétrico e em utilizações específicas, como é o caso de pontes rolantes.

EXERCÍCIOS

1. Qual a diferença entre condutor elétrico e fio elétrico?

2. Quais as seis classes de encordoamento dos condutores de cobre?

3. O que são cabos de potência?

4. O que é isolação de um cabo elétrico?

5. Quais as três temperaturas que caracterizam um cabo de potência?

6. Qual expressão permite calcular a variação da resistividade em função da mudança de temperatura?

7. Quais efeitos devem ser considerados para corrigir a resistência em corrente alternada?

8. Qual expressão permite calcular a reatância indutiva X_L de um condutor em função das características do condutor e das distâncias dos diversos condutores do circuito?

9. Qual a principal finalidade da blindagem de um cabo?

10. Quais os principais tipos de condutos elétricos utilizados?

6

Dispositivos de manobra, proteção, comando e seccionamento não automático

6.1 Generalidades[1]

Dispositivos de baixa e alta tensões

Os dispositivos de manobra (ou de comando) e de proteção podem ser classificados em:

- *Dispositivos de baixa tensão*, quando projetados para emprego em circuitos cuja tensão de linha é inferior ou igual a 1.000 V.
- *Dispositivos de alta tensão*, quando projetados para emprego em circuitos cuja tensão de linha é superior a 1.000 V.

Circuitos internos de um dispositivo

No caso mais geral, pode-se distinguir em um dispositivo de manobra ou de proteção três tipos de circuitos internos:

1. O *circuito principal*, que é o circuito constituído pelo conjunto de todos os circuitos associados, cujo dispositivo de manobra ou de proteção tem a função de fechar ou abrir.
2. O *circuito de comando*, que é um circuito diferente do principal e comanda a operação de fechamento, de abertura ou ambas.
3. O *circuito auxiliar*, que é um circuito diferente do principal e do circuito de comando, usado também para outras finalidades, tais como sinalização, intertravamento etc.

1. Definições de acordo com as normas NBR 5459, NBR IEC 60050 (446) e NBR IEC 60947-2.

Pólo

Pólo é uma parte do circuito principal de um dispositivo de manobra associada exclusivamente a uma fase do circuito, não incluindo as peças que asseguram a fixação e a operação conjunta de todos os pólos.

Operação de um dispositivo de manobra

A *operação* de um dispositivo de manobra é o movimento dos contatos móveis do circuito principal do dispositivo, de uma posição para outra. É importante observar que a operação de um dispositivo pode ser considerada tanto do ponto de vista elétrico (para estabelecer ou interromper uma corrente) como do ponto de vista mecânico (para abrir ou fechar os contatos principais).

Ciclo de operação de um dispositivo de manobra é a sucessão de operações de uma posição à outra e a volta à posição inicial, passando por todas as outras posições, se existentes.

Seqüência de operações é a sucessão de operações especificadas em determinados intervalos de tempo.

Classificação dos dispositivos de manobra

Os dispositivos de manobra podem ser também classificados:

- De acordo com o meio em que seus contatos fecham e abrem; assim, temos, por exemplo, dispositivos a ar (ou secos), a óleo, a vácuo, a SF_6 etc.
- Quanto ao número de pólos, em unipolares, bipolares, tripolares etc.

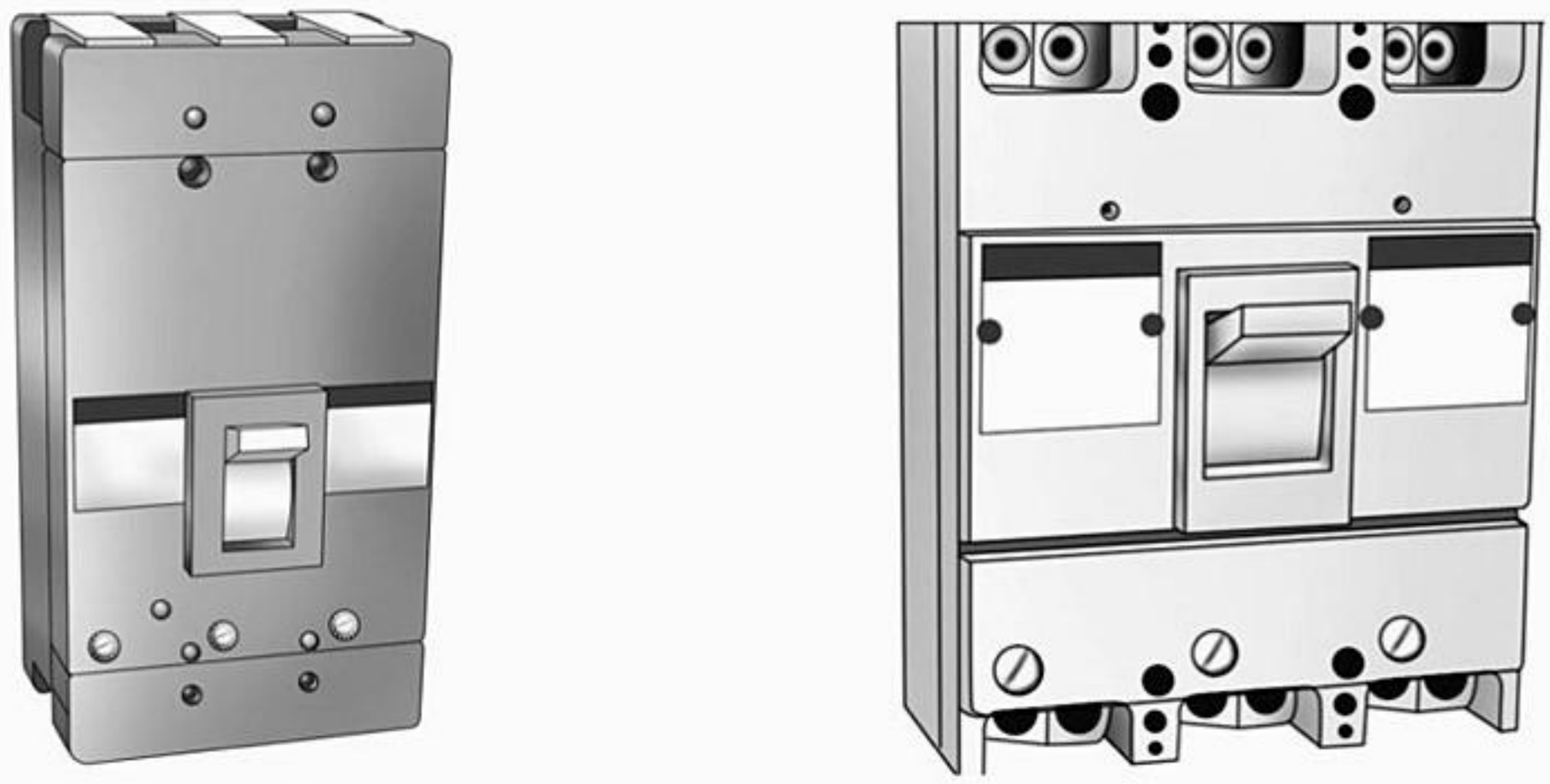


Figura 6.1 ■ Disjuntores tripolares

Disjuntor

Disjuntor é um dispositivo de manobra (mecânico) e de proteção, capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, assim como estabelecer, conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito. Ver 6.4, para mais detalhes. Na Figura 6.1, são encontrados exemplos de disjuntores.

Dispositivo fusível

Um *dispositivo fusível* é um dispositivo de proteção que, pela fusão de uma parte especialmente projetada, abre o circuito no qual se acha inserido e interrompe a corrente, quando esta excede um valor de referência durante um tempo especificado. (Ver Seção 6.3 para mais detalhes.) A Figura 6.2 apresenta as partes básicas dos fusíveis NH e Diazed.

As partes de um dispositivo fusível são, em geral:

- *Fusível*: peça substituível após a sua operação e que contém o *elemento fusível*, que é o componente que se funde quando percorrido por uma corrente que excede um valor de referência durante um tempo especificado.
- *Base*: parte fixa do dispositivo, com contatos e terminais.
- *Indicador*: parte do dispositivo que dá uma indicação visível que ele operou.
- *Percussor*: dispositivo mecânico integrante que, na operação do dispositivo, libera a energia necessária para acionar outros dispositivos ou indicadores, ou para fazer um intertravamento.
- *Porta-fusível*: parte móvel de um dispositivo fusível no qual se instala um fusível, mas não inclui este.

A Chave fusível de rede aérea de distribuição é o dispositivo fusível no qual, após a fusão do elo, o porta-fusível é levado, pela ação da gravidade, a uma posição tal que assegura a distância de isolamento especificada e dá uma indicação visível da sua atuação.

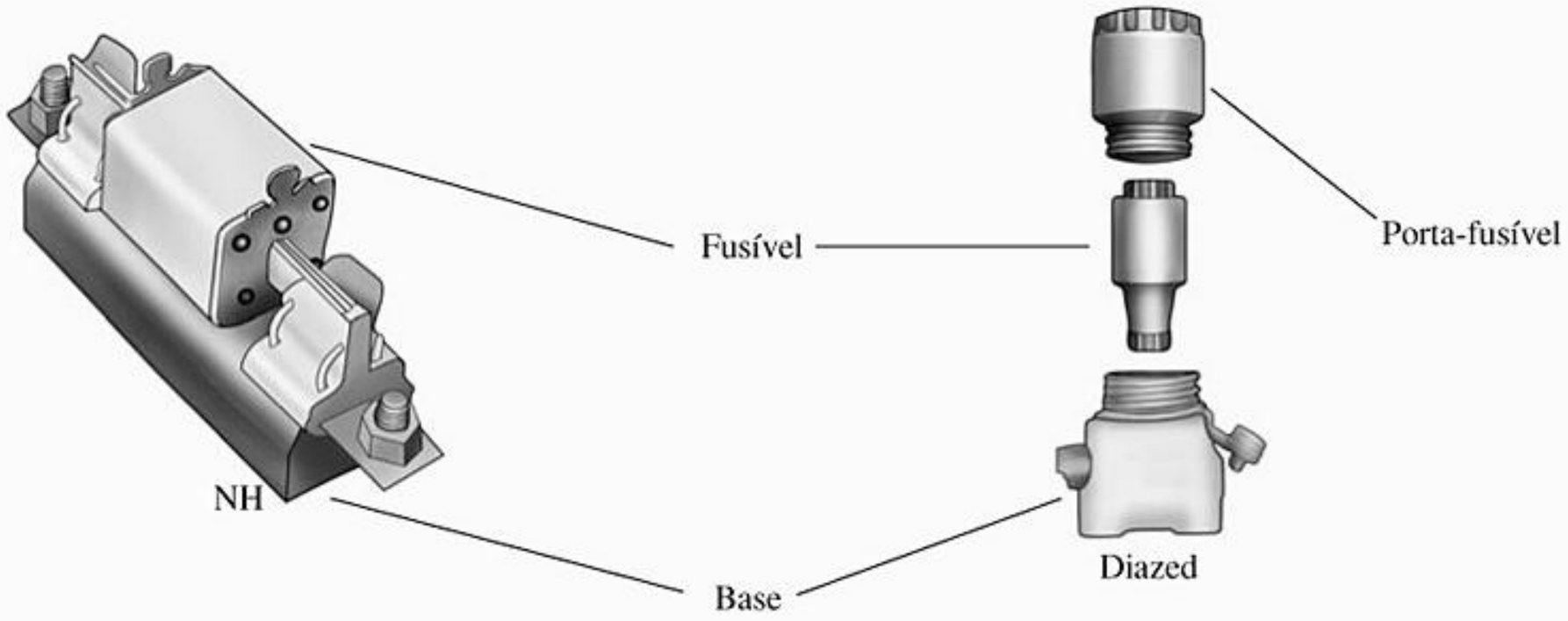


Figura 6.2 ■ Dispositivos fusíveis NH e Diazed e respectivas partes componentes

O Elo fusível de uma chave fusível de distribuição é um fusível de construção flexível destinado a manter a chave na posição fechada, quando em funcionamento, e provocar a sua abertura automática após a fusão do elemento fusível.

Chave

Chave é um termo geral que designa um dispositivo de manobra (mecânico) que, na posição aberta, assegura uma distância de isolamento e, na posição fechada, mantém a continuidade do circuito elétrico, nas condições especificadas.

Uma *chave de faca* é uma chave na qual, em cada pólo, o contato móvel é constituído por uma lâmina articulada em uma extremidade, enquanto a outra extremidade se encaixa no contato fixo correspondente. Em certos tipos, o contato móvel é um tubo. A chave de faca não é adequada para operar o circuito sob carga.

Chave eletromagnética é uma chave na qual a força necessária para o fechamento e a abertura dos contatos principais é feita por um eletroímã.

Chave de partida de um motor elétrico é o conjunto de todos os meios necessários para dar a partida e parar o motor, combinado com uma proteção adequada contra sobrecargas.

Seccionador

Seccionador é um dispositivo de manobra (mecânico) que assegura, na posição aberta, uma distância de isolamento que satisfaz os requisitos de segurança especificados.

Um seccionador deve ser capaz de fechar ou abrir um circuito quando a corrente estabelecida ou interrompida é desprezível ou, ainda, quando não se verifica uma variação significativa na tensão entre os terminais de cada um dos seus pólos. Um seccionador também deve ser capaz de conduzir correntes em condições normais do circuito, bem como de conduzir, por tempo especificado, correntes em condições anormais do circuito, tais como as de curto-circuito.

A Figura 6.3 mostra um dispositivo geralmente designado por "chave seccionadora-fusível".

Interruptor

Um *interruptor*[2] é uma chave capaz de estabelecer, de conduzir e de interromper correntes sob condições normais do circuito — que podem incluir sobrecargas de funcionamento especificadas —, e também de conduzir correntes sob condições anormais especificadas, tais como as de curto-circuito, por tempo especificado. A Figura 6.4 mostra um interruptor trifásico freqüentemente usado como chave em quadros de distribuição.



Figura 6.3 ■ Chave seccionadora-fusível

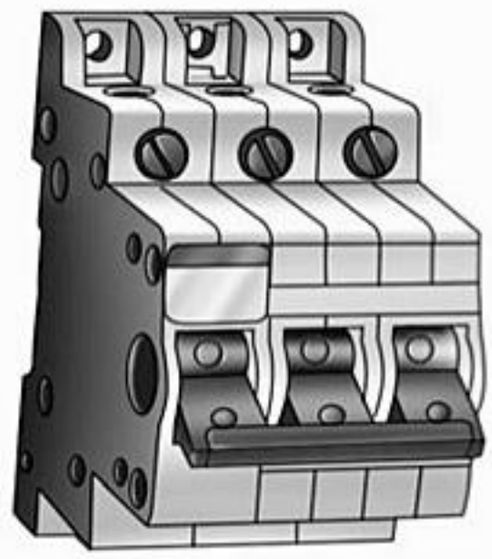


Figura 6.4 ■ Interruptor trifásico

Um *interruptor-seccionador* (também chamado "seccionador sob carga") é uma chave que reúne as características de um interruptor e de um seccionador.

Um *interruptor de uso geral* é uma chave seca de baixa tensão, de construção e características elétricas adequadas à manobra de circuitos de iluminação, de aparelhos de iluminação, de aparelhos eletrodomésticos e aplicações equivalentes.

Contator

Contator é um dispositivo de manobra (mecânico) de operação não manual (geralmente eletromagnética), que tem uma única posição de repouso e é capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais de circuito, inclusive sobrecargas.

Relé

Relé é o dispositivo elétrico destinado a produzir modificações súbitas e predeterminadas em um ou mais circuitos elétricos de saída, quando certas condições são satisfeitas nos circuitos de entrada que controlam o dispositivo. É importante observar que a definição se aplica

2. A definição de "interruptor" dada na NBR 5459 corresponde à que se apresenta aqui para "interruptor de uso geral".

aos relés elétricos de qualquer tipo e para qualquer finalidade, no sentido elementar, isto é, com apenas uma função lógica entre os circuitos de entrada e os circuitos de saída, incluindo todos os elementos adicionais necessários ao seu perfeito funcionamento específico.

Os relés são associados eletricamente aos disjuntores ou contatores, provocando sua abertura quando detectada alguma condição anormal (sobrecorrente, subtensão, desequilíbrios etc.). No Quadro 6.1 são apresentadas algumas definições relativas aos relés.

Não se deve confundir *relé* com *disparador*. Muito embora ambos possam funcionar sob o mesmo princípio e realizar funções análogas, o relé é associado *eletricamente* ao dispositivo de manobra, ao passo que o disparador é associado *mecânica* e diretamente ao dispositivo.

Dispositivo DR

Um *dispositivo a corrente diferencial-residual* (*dispositivo DR*) é um dispositivo de proteção que detecta a existência de corrente diferencial em um circuito. Ele provoca a abertura do circuito quando o valor da corrente diferencial ultrapassa um valor preestabelecido.

Funções básicas dos dispositivos de manobra e proteção

Em uma instalação elétrica de baixa tensão, pode-se distinguir *quatro funções básicas*, que podem ser exercidas por um ou mais dispositivos de manobra *e/ou* proteção. São elas: a proteção contra choques elétricos (contatos indiretos), a proteção contra sobrecorrentes, o comando funcional e o seccionamento não automático, apresentadas sucintamente a seguir:

- A *proteção contra choques elétricos (contatos indiretos)* destina-se a proteger as pessoas e os animais domésticos contra os perigos que possam resultar de um contato com massas energizadas. Consiste na detecção de tensões de contato perigosas e no seccionamento automático do circuito em que ocorreu o problema.
- A *proteção contra sobrecorrentes* tem como objetivo limitar as conseqüências destrutivas das sobrecorrentes e separar o restante da instalação da parte em que ocorreu o problema. Comporta a detecção de correntes de sobrecarga e de falta (principalmente de curto-circuito) e o seccionamento automático do circuito protegido.
- O *comando funcional* permite ao usuário intervir, voluntariamente, em qualquer setor da instalação, seccionando ou ligando circuitos, sob carga, bem como ligando ou desligando equipamentos de utilização.
- O *seccionamento não automático* (manual) é destinado a garantir a separação de uma parte da instalação de sua fonte de tensão, a fim de permitir a execução de trabalhos, consertos, localização de defeitos, substituição de componentes ou medição do isolamento da parte da instalação correspondente. Consiste no seccionamento manual, em carga ou em vazio, do circuito que alimenta o setor considerado.

Quadro 6.1 ■ Definições relativas aos relés contidas na norma NBR IEC 60050 (446)

- *Relé eletromecânico*: é aquele no qual a operação lógica é produzida pelo movimento relativo de elementos mecânicos, sob a ação de uma corrente elétrica nos circuitos de entrada.
- *Relé estático ou eletrônico*: é aquele no qual a operação lógica é produzida por componentes eletrônicos, magnéticos, ópticos ou outros, sem movimento mecânico de componentes.
- *Relé monoestável*: é aquele que, tendo alterado seu estado sob a ação de uma grandeza de alimentação de entrada, ou de sua grandeza característica, retorna a seu estado anterior após a remoção da grandeza.
- *Relé biestável*: é aquele que, tendo se alterado sob a ação de uma grandeza de alimentação de entrada, ou de sua grandeza característica, permanece no mesmo estado após a remoção da grandeza, sendo necessária uma ação suplementar para alterar seu estado.
- *Relé de tempo especificado*: é aquele no qual um ou mais dos tempos que o caracterizam deve(m) satisfazer a requisitos especificados, sobretudo quanto à exatidão.
- *Relé de tempo não especificado*: é aquele para cujos tempos que o caracterizam não se especificam quaisquer exigências relativas à exatidão.
- *Relé de medição*: é aquele destinado a comutar quando sua grandeza característica alcança, sob condições e com exatidão especificadas, seu valor de operação. Pode ser de dois tipos:
  1. A *tempo dependente*: relé a tempo especificado para o qual os tempos dependem, de maneira especificada, do valor da grandeza característica.
  2. A *tempo independente*: relé a tempo especificado para o qual o tempo especificado pode ser considerado independente do valor da grandeza característica, dentro de limites especificados desta.
- *Relé térmico*: é aquele de medição a tempo dependente, que protege um equipamento contra danos térmicos de origem elétrica, pela medição da corrente que percorre o equipamento protegido e utilizando uma curva característica que simula seu comportamento térmico.

6.2 Grandezas características dos dispositivos de proteção e de manobra[3]

Correntes

Para um dispositivo de manobra ou de proteção, a *corrente nominal* (I_N) é o valor eficaz da corrente de regime permanente que o dispositivo pode conduzir indefinidamente, sem que a elevação de temperatura de suas diferentes partes exceda os valores especificados, nas condições previstas na norma pertinente.

Para um disparador de sobrecorrente, define-se *corrente de operação* como o valor acima do qual o disparador deve operar.

Corrente de ajuste (ou *de ajustagem*) é o valor da corrente de operação para o qual o disparador é ajustado e são definidas as suas condições de operação.

Faixa de corrente de ajuste (ou *de ajustagem*) é a faixa compreendida entre os valores máximo e mínimo da corrente de ajuste.

Para um dispositivo de proteção, definimos *corrente convencional de atuação* (*de fusão*, no caso de dispositivos fusíveis) como o valor especificado de corrente que provoca a atuação do dispositivo dentro de um tempo especificado (o "tempo convencional"), sendo designada por I_2 pela NBR 5410.

A *corrente convencional de não atuação* (*de não fusão*, no caso de dispositivos fusíveis) é o valor especificado de corrente que pode ser suportado pelo dispositivo durante um tempo especificado (o "tempo convencional").

O *tempo convencional* varia de acordo com o tipo e a corrente nominal do dispositivo. Por sua vez, as correntes convencionais de atuação (de fusão) e de não atuação (de não fusão) são superiores à corrente nominal ou de ajuste do dispositivo.

A maioria das definições apresentadas a seguir foi extraída da NBR IEC 62271-100.

A *corrente presumida* (ou real) de um circuito, em relação a um dispositivo de manobra ou de proteção nele inserido, é a corrente que circularia no circuito em que se acha inserido o dispositivo considerado, se cada um de seus pólos fosse substituído por um condutor de impedância desprezível.

A *corrente presumida de interrupção* é aquela avaliada no instante em que se inicia o processo de interrupção, definido na norma pertinente. Geralmente, esse instante é definido como o do início do arco.

A *corrente presumida de estabelecimento* é aquela estabelecida em condições especificadas, quanto ao método e ao instante em que se inicia o processo de estabelecimento, definidos na norma pertinente.

Para a *corrente presumida* são considerados os seguintes valores:

- *Valor de crista*: é o valor da primeira crista durante o intervalo de tempo transitório que se segue ao seu estabelecimento por um dispositivo ideal, no pólo considerado; em um circuito polifásico supõe-se que a corrente seja estabelecida simultaneamente em todos os pólos, embora se considere apenas a corrente em um dos pólos (o valor de crista pode ser diferente de um pólo para outro, dependendo do instante do estabelecimento da corrente em relação à onda de tensão entre os terminais de cada pólo).
- *Valor de crista máximo*: é o valor de crista que se verifica quando o estabelecimento da corrente ocorre no instante que leva ao maior valor possível de crista, no pólo considerado; para um dispositivo multipolar em um circuito polifásico, esse valor ocorre em um único pólo.
- *Corrente presumida permanente*: é o valor eficaz da corrente presumida alternada, que é estabelecida em um instante tal que nenhum fenômeno transitório se segue ao seu estabelecimento no pólo considerado.

A Figura 6.5 ilustra o aspecto da *corrente de curto-circuito presumida* em um ponto de uma instalação, indicando o valor de crista (máximo) e a corrente presumida assimétrica. No Capítulo 10, será feito um estudo pormenorizado das correntes de falta, em particular das de curto-circuito.

Para um dispositivo de manobra ou de proteção, a *corrente de interrupção* é a corrente em um pólo do dispositivo no instante do início do arco, no decorrer de um processo de interrupção.

A *corrente de corte* é o valor instantâneo máximo da corrente durante um processo de interrupção, quando o dispositivo opera de tal modo que não seja atingido o valor de crista da corrente presumida do circuito. A Figura 6.6 mostra a ação de um *dispositivo limitador de corrente* (fusível ou disjuntor), indicando as correntes de interrupção e de corte.

A *corrente suportável de curta duração* é a corrente que um dispositivo de manobra ou de proteção pode conduzir na posição fechada, durante curto intervalo especificado, e nas condições previstas de emprego e funcionamento. Em particular, é muito importante o *valor de crista da corrente suportável*.

A *capacidade de interrupção* de um dispositivo de manobra ou proteção é um valor de corrente de interrupção presumida que o dispositivo é capaz de interromper, sob uma tensão dada e em condições prescritas de emprego e funcionamento. Quando as condições prescritas incluem um curto-circuito nos terminais de saída do dispositivo, denomina-se *capacidade de interrupção em curto-circuito* e *capacidade de estabelecimento em curto-circuito*.

Tensões

A *tensão nominal* de um dispositivo de manobra ou de proteção é o valor eficaz da tensão pela qual o dispo-

3. De acordo com as normas NBR 5459, RTQ DA Portaria do Inmetro 243/2006 e NBR IEC 60947-2-1.

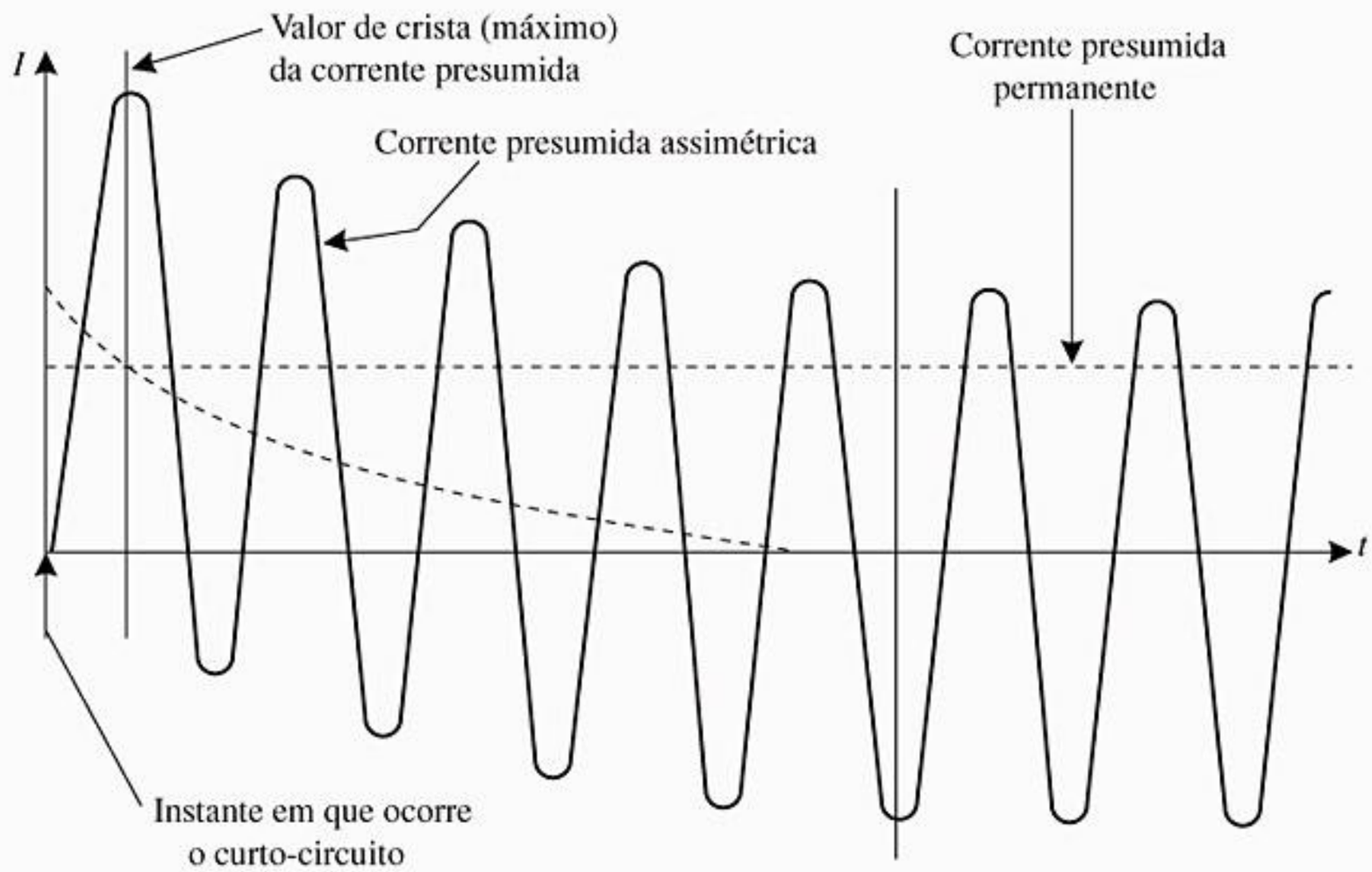


Figura 6.5 ▪ Corrente presumida de curto-circuito em um ponto de uma instalação

sitivo é designado, e ao qual são referidos outros valores nominais.

Em particular, a NBR IEC 60947-2 define para um dispositivo de baixa tensão:

- *Tensão nominal*[4] (U_e) é o valor de tensão ao qual são referidas as capacidades de interrupção e de estabelecimento nominais, bem como as categorias de desempenho em curto-circuito; para circuitos polifásicos é a tensão entre fases.
- *Tensão de isolamento nominal* (U_i) é o valor de tensão que designa o dispositivo e ao qual são referidos os ensaios dielétricos e as distâncias de isolamento e de escoamento; a não ser quando indicado em contrário, a tensão de isolamento nominal é o valor da máxima tensão nominal.

Tempos

Tempo de fusão de um dispositivo fusível é o intervalo de tempo que decorre entre o instante em que a corrente atinge valor suficiente para fundir o elemento fusível e o instante em que se inicia o arco.

Tempo de abertura de um dispositivo de manobra ou proteção é o intervalo de tempo entre o instante em que se inicia a operação de abertura, definido na norma pertinente, e o instante de separação dos contatos de arco em todos os pólos.

Tanto o tempo de fusão como o de abertura podem ser chamados *tempo de pré-arco*. O *tempo de arco* em um pólo de um dispositivo de manobra, de proteção ou de um dispositivo fusível é o intervalo de tempo entre o instante em que se inicia o arco; em um dispositivo de manobra multipolar é o intervalo de tempo entre o instante em que se inicia e se extingue o arco no primeiro pólo e o instante da extinção final do arco em todos os pólos.

Tempo de interrupção é o intervalo de tempo que decorre entre o início do tempo de abertura de um dispositivo de manobra, de proteção ou o início do tempo de fusão de um dispositivo fusível e o fim do tempo de arco.

Para um dispositivo de manobra ou de proteção, o *tempo de fechamento* é o intervalo de tempo que decorre entre o instante em que se inicia a operação de fechamento, definido na norma pertinente, e o instante em que os contatos se tocam em todos os pólos.

O *tempo de estabelecimento* é o intervalo de tempo que decorre entre o instante em que se inicia a operação de fechamento, definido na norma pertinente, e o instante em que a corrente começa a percorrer o circuito principal.

Tempo morto (durante um religamento automático) é o intervalo de tempo que decorre entre o instante da extinção final do arco em todos os pólos, na operação de abertura, e o primeiro restabelecimento de corrente em qualquer pólo, na operação de fechamento subseqüente.

O *tempo de estabelecimento-interrupção* é o intervalo de tempo que decorre entre o instante em que começa a circular corrente em um pólo e o instante da extinção final do arco em todos os pólos.

Integral de Joule

A *integral de Joule* (símbolo I^2t) é a integral do quadrado da corrente em um intervalo de tempo especificado, isto é:

$$I^2t = \int_{t_0}^{t_1} i^2 . \, dt \; [A^2 s]$$

4. Denominado pela IEC-157-I de Rated Operational Voltage.

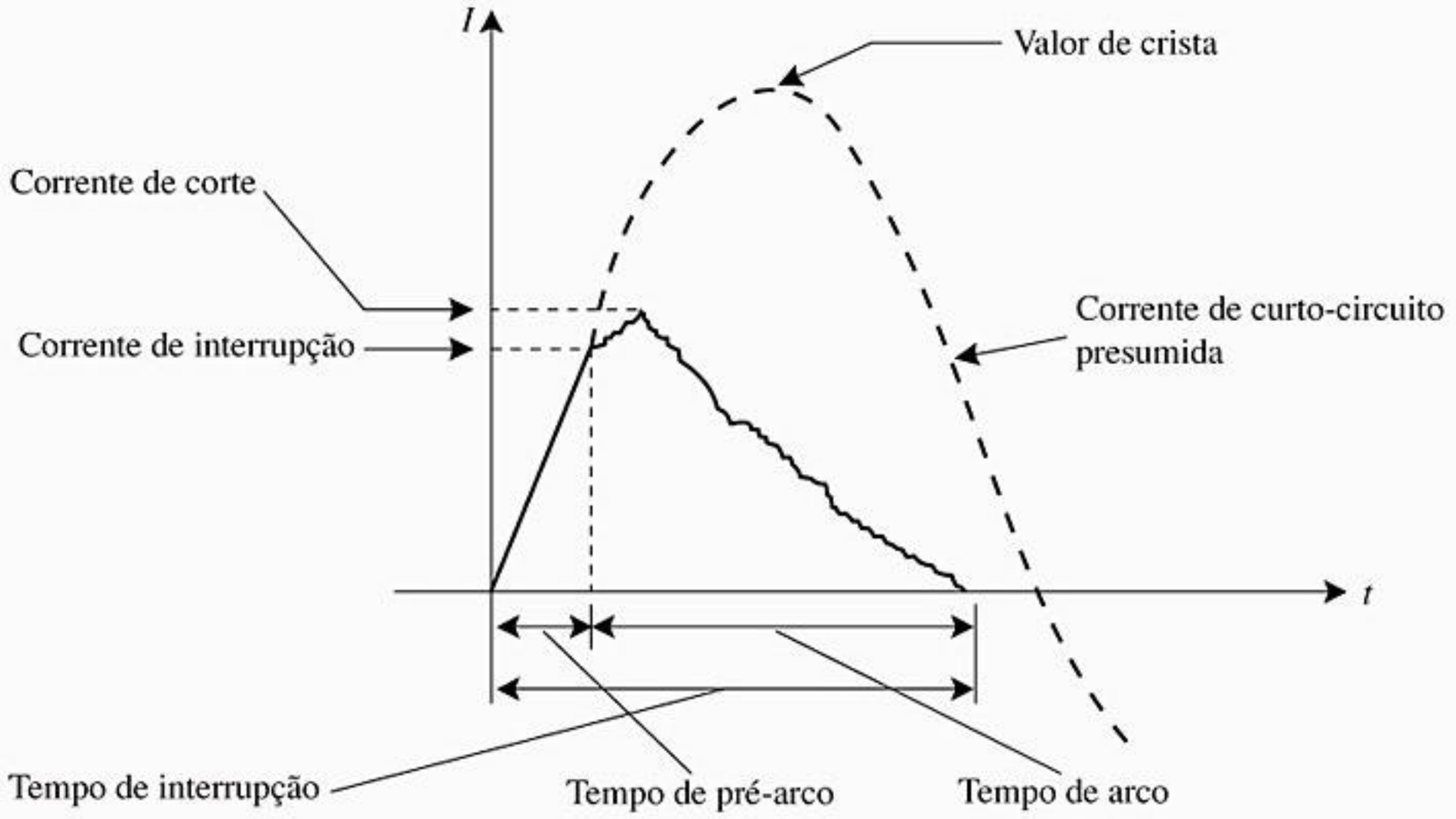


Figura 6.6 ■ Ação de um dispositivo limitador de corrente

A integral de Joule dá o valor da energia térmica por unidade de resistência (1 $A^2s = 1\ J/\Omega$) liberada em um circuito.

Trata-se de uma grandeza que atualmente assume uma importância fundamental nos estudos de proteção, assunto tratado no Capítulo 11.

Representações gráficas

A *característica tempo-corrente* de um dispositivo de manobra ou de proteção é a representação gráfica do tempo de fusão — ou do tempo de operação —, em função da corrente presumida, em condições de operação especificadas. É muitas vezes designada por "característica de atuação".

A *característica de corte* de um dispositivo de manobra ou de proteção é a representação gráfica da corrente de corte em função da corrente presumida, em condições de operação especificadas.

6.3 Dispositivos fusíveis de baixa tensão

Generalidades

Os *dispositivos fusíveis* constituem a proteção mais tradicional dos circuitos e dos sistemas elétricos. Sua operação consiste na fusão do *elemento fusível* (elo) contido no *fusível*.

O elemento fusível, isto é, o "ponto fraco" do circuito, é um condutor de pequena seção transversal que, devido a sua alta resistência, sofre um aquecimento maior que o dos outros condutores à passagem da corrente. Para uma relação adequada entre a seção do elemento fusível e a do condutor protegido, ocorrerá a fusão do metal do elemento, quando o condutor atingir uma temperatura próxima da máxima admissível.

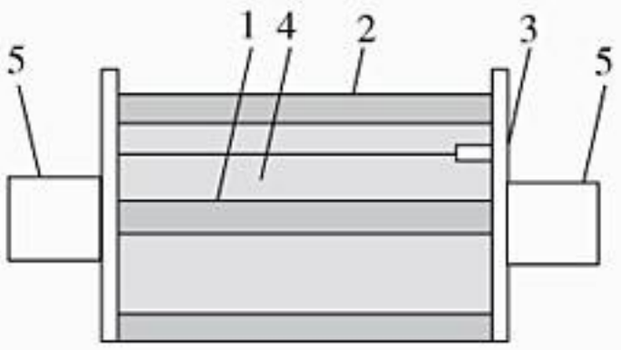
O elemento fusível é um fio ou uma lâmina, geralmente de cobre, prata, estanho, chumbo ou liga, colocado no interior do corpo do fusível, em geral de porcelana, esteatite ou papelão, hermeticamente fechado.

Alguns fusíveis possuem um *indicador*, que permite verificar se o dispositivo fusível operou ou não, o qual é composto por um fio (por exemplo, de aço) ligado em paralelo com o elemento fusível e libera uma mola após a operação. Essa mola atua sobre uma plaqueta ou botão, ou mesmo sobre um parafuso preso na tampa do corpo.

A maioria dos fusíveis contém material granulado *extintor* em seu interior, envolvendo por completo o elemento fusível; para isso se utiliza, em geral, areia de quartzo de granulometria conveniente.

A Figura 6.7 mostra a composição de um fusível (no caso mais geral).

O elemento fusível pode ter diversas formas. Em função da corrente nominal do fusível, ele pode ser composto por um ou mais fios de lâminas em paralelo, com trecho(s) de seção reduzida. No elemento fusível existe, ainda, um material adicional, um ponto de solda cuja temperatura de fusão é bem menor que o do elemento.



Legenda:
1. elemento fusível
2. corpo
3. indicador de interrupção
4. meio extintor
5. terminal

Figura 6.7 ▪ Componentes típicos de um fusível

Operação

Na Figura 6.8, mostra-se, de maneira simplificada, apenas o elemento fusível em série com os condutores do circuito operando normalmente em regime permanente.

Operando em regime permanente, o condutor e o elemento fusível são percorridos por uma corrente I, que os aquece. A temperatura do condutor assume um valor constante (θ_1). Devido à alta resistência do elemento fusível, este sofre um aquecimento maior θ_2, que é transferido para o meio adjacente, principalmente por meio das conexões com os condutores. A baixa capacidade de transmissão de calor resulta em alta temperatura no ponto médio do elemento fusível.

A temperatura decresce desde o ponto médio até as extremidades do elemento fusível, conforme mostra a Figura 6.8. Os pontos de conexão não estão submetidos à mesma temperatura do ponto médio, porém possuem uma temperatura maior que a dos condutores (θ_1). A temperatura θ_A não deve ultrapassar determinado valor, para não prejudicar a vida útil da isolação dos condutores; esse valor é limitado por norma.

A corrente que pode percorrer o fusível permanentemente sem que esse valor-limite seja ultrapassado é definida como a *corrente nominal do fusível*. A passagem de uma corrente superior à nominal resulta na elevação da temperatura ao longo do fusível. Enquanto o pico de temperatura, $\theta_{máx}$, com certa margem de segurança, permanece abaixo da temperatura de fusão do elemento fusível θ_S, o fusível permanece intacto.

O aquecimento necessário à fusão do elemento elo fusível compõe-se:

- Do aquecimento necessário à elevação da temperatura até o valor de fusão, se não ocorrer dissipação de calor.
- Do aquecimento necessário à compensação da dissipação de calor para o meio adjacente ao elemento fusível.

Se o fusível for percorrido por uma corrente muito superior à nominal, por exemplo, dez vezes maior, os trechos de seção reduzida das lâminas do elo sofrerão fusão antes do ponto de solda, em virtude da alta densidade de corrente. Se a corrente for ainda mais elevada, por exemplo, 50 vezes a corrente nominal, em um tempo de fusão de $\leq$ 1 ms, os trechos de seção reduzida do elemento fusível serão levados à temperatura de fusão antes que a energia calorífica possa fluir para as partes adjacentes.

Após a fusão, o elemento fusível está interrompido mecanicamente, porém a corrente que o levou à fusão não é interrompida, sendo mantida pelo arco elétrico pela fonte e pela indutância do circuito. Ela circula através do arco formado no ponto de interrupção do elemento fusível, como mostra a Figura 6.9.

A fusão e o arco elétrico provocam a evaporação do material metálico do elo. O arco, que é estreitamente envolvido pelo elemento extintor, vaporiza. O vapor do metal sob alta pressão é empurrado contra a areia, na qual grande parte do arco é extinta. A areia penetra e retira a energia calorífica do arco, provocando então sua extinção. Após o processo, resta um material sinterizado, que é misturado com o vapor do elemento fusível.

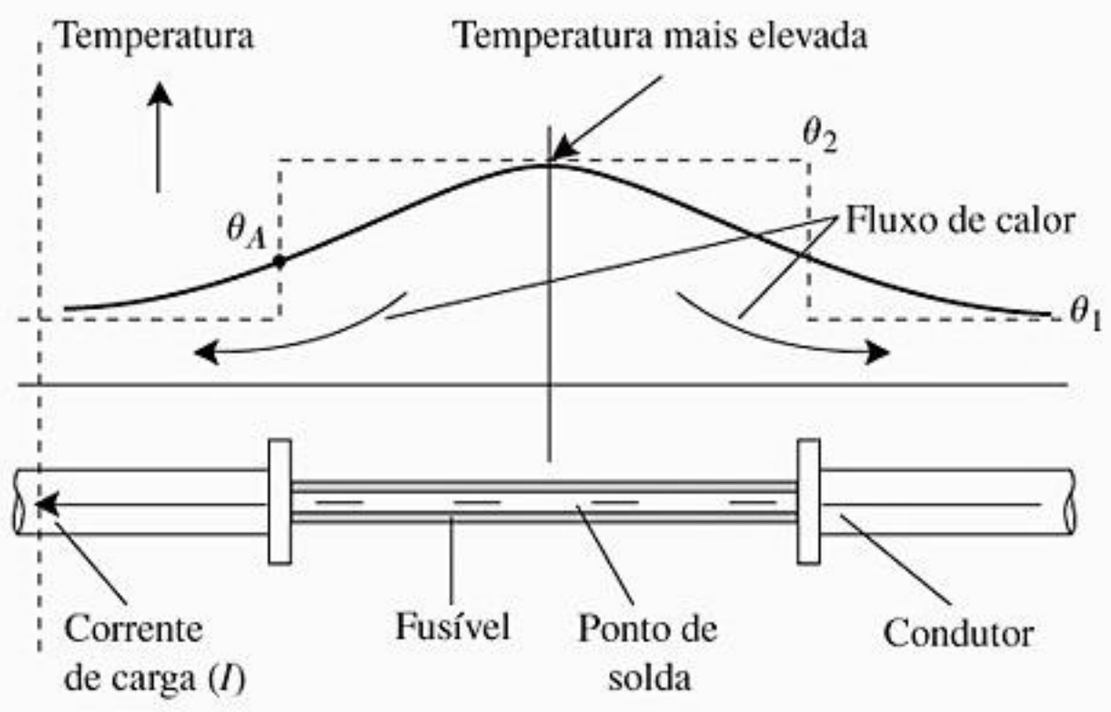


Figura 6.8 ▪ Temperatura do elemento fusível em regime normal de carga

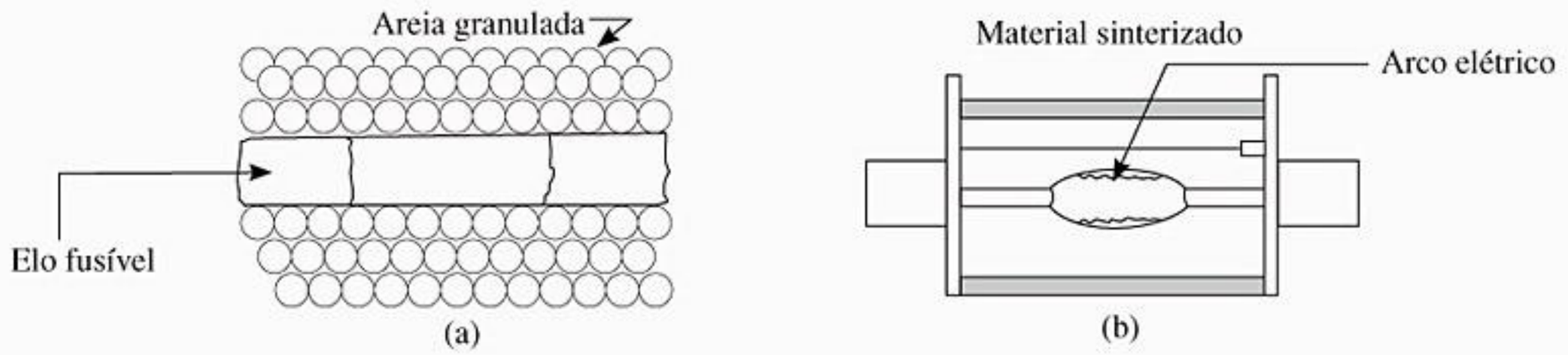


Figura 6.9 ■ Atuação de um fusível após a fusão

Nos *fusíveis limitadores de corrente*, devido às elevadas sobrecorrentes que ocorrem em um curto-circuito, a fusão pode ocorrer em um tempo inferior a 5 ms, isto é, dentro do primeiro quarto de ciclo, como mostra a Figura 6.10.

Características

A NBR IEC 60269-1 – Dispositivos fusíveis de baixa tensão, baseada na série de publicações IEC 60269, considera, para a proteção de circuitos (em CA, com tensão até 1 kV e em CC, até 1,5 kV), dispositivos limitadores de corrente, com capacidade de interrupção de corrente a partir de 6 kA.

Formato dos fusíveis

Um *fusível cartucho* é um fusível de baixa tensão cujo elemento físico é encerrado em um tubo protetor de material isolante, com contatos nas extremidades (em forma de virola ou de faca), fechando o tubo.

Um *fusível rolha* é um fusível de baixa tensão em que um dos contatos é uma peça roscada, a qual se fixa no contato roscado correspondente da base.

Um *fusível encapsulado* é um fusível cujo elemento fusível é completamente encerrado em um invólucro fechado, capaz de impedir a formação de arco externo e a emissão de gases, chama ou partículas metálicas para o exterior, durante a fusão do elemento fusível, dentro dos limites de sua característica nominal.

Faixa de interrupção e categoria de utilização

Os fusíveis são classificados inicialmente de acordo com a *faixa de interrupção* e com a *categoria de utilização*, sendo usadas, para isso, duas letras — a primeira minúscula, "g" ou "a", indicando a faixa, e a segunda, maiúscula, "G" ou "M", indicando a categoria.

Os fusíveis "g" são aqueles capazes de interromper todas as correntes que causam a fusão do elemento fusível, até sua capacidade de interrupção nominal; são, portanto, fusíveis que atuam em *toda a faixa*. Os fusíveis "a" são capazes de interromper todas as correntes compreendidas entre um valor prefixado (superior à corrente nominal) e a capacidade de interrupção nominal; são, assim, fusíveis que atuam em *faixa parcial*.

Os fusíveis "L" são adequados para proteção de cabos e linhas, os "M" protegem equipamentos eletromecânicos (motores), os "R" são próprios para proteção de dispositivos semicondutores, e os "B" são recomendados para instalações em condições pesadas (por exemplo, locais de mineração etc.).

Nas instalações elétricas de baixa tensão, os tipos mais comuns são: gL, gG, gM e aM.

Os fusíveis gL/gG são de aplicação geral, utilizados na proteção de circuitos contra correntes de sobrecarga e contra correntes de curto-circuito. São caracterizados por um único valor de corrente nominal (I_N).

Os fusíveis aM são destinados à proteção de circuitos de motores contra correntes de curto-circuito, sendo também caracterizados por um único valor de corrente nominal (I_N) e apresentando o limite inferior da faixa de atuação indicado por $K_2\ I_N$ (com $K_2 > 1$).

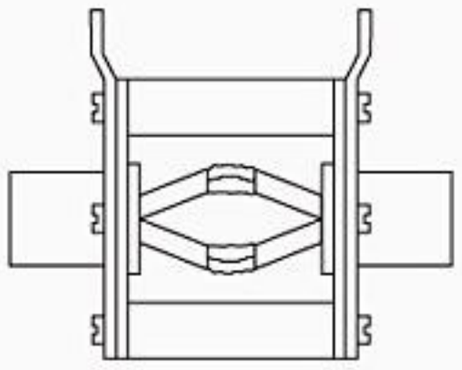
Os fusíveis gM, destinados à proteção de circuitos de motores contra correntes de curto-circuito, são caracterizados por dois valores de corrente: o primeiro, I_N, representa a corrente nominal do fusível e do respectivo porta-fusível (isto é, das respectivas partes condutoras); o segundo, I_{ch} (sendo $I_{ch} > I_N$), refere-se à característica tempo-corrente do fusível, correspondendo à de um fusível G; a indicação é feita por $I_N\ M\ I_{ch}$. Assim, por exemplo, 16M32 A indica um fusível gM montado em um dispositivo cuja corrente permanente máxima é de 16 A e cuja característica tempo-corrente é igual à de um fusível gG de 32 A.

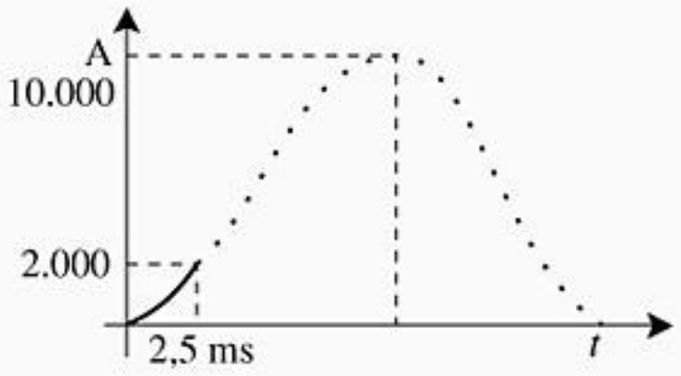
Tipo de pessoa indicada para utilização

As normas ainda classificam os dispositivos fusíveis quanto ao tipo de pessoa indicada para sua utilização, em "para uso por pessoas autorizadas" e "para uso por pessoas não qualificadas".

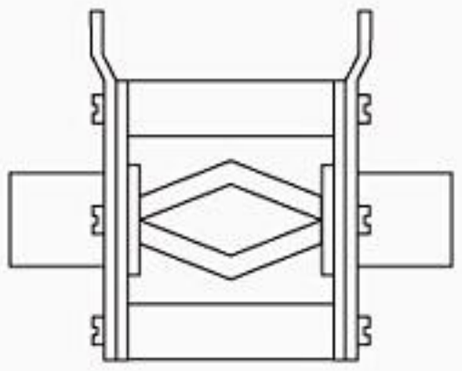
Os *dispositivos fusíveis para uso por pessoas autorizadas* (anteriormente denominados "dispositivos fusíveis para uso industrial") são destinados a instalações em que os fusíveis são, intencionalmente, só acessíveis para reposição por pessoas BA4 (qualificadas) e BA5 (habilitadas). Podem ser gL/gG, gM ou aM, com correntes nomi-

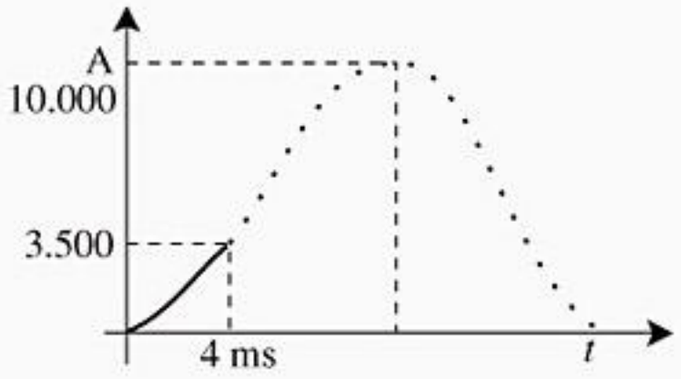
1. Características do curto-circuito: corrente presumida de 4.000 A (valor eficaz); 10.000 A de crista (admitindo onda assimétrica).



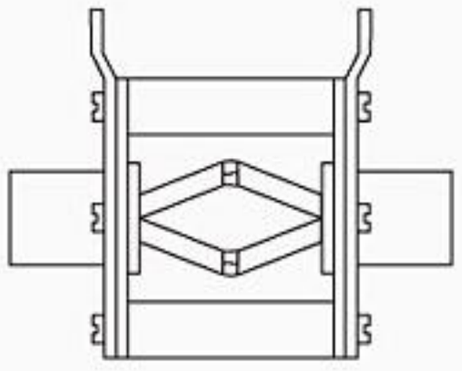


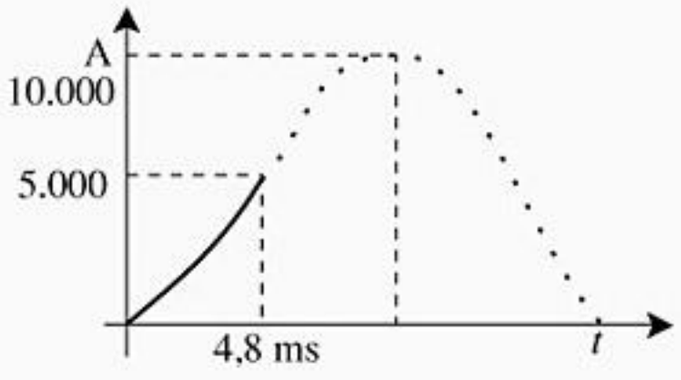
2. O curto-circuito se desenvolve: o elemento fusível se aquece; a temperatura da seção reduzida do elemento atinge 1.083°C, ponto de fusão do cobre.



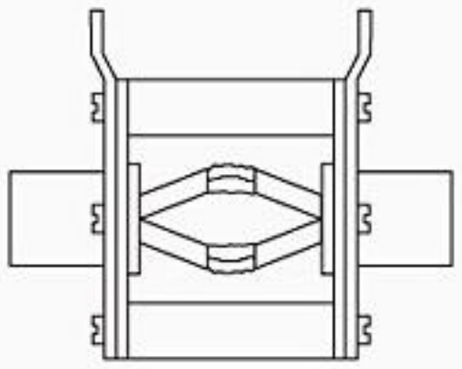


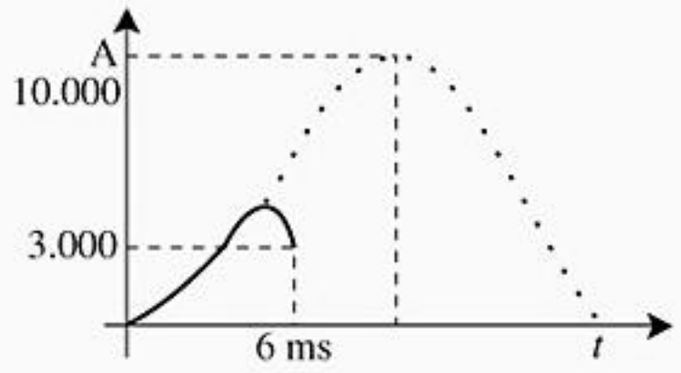
3. O curto-circuito é limitado: o elemento fusível acaba de fundir-se em duas partes; cria-se um arco elétrico que pode atingir 2.000 °C; a corrente continua a passar.



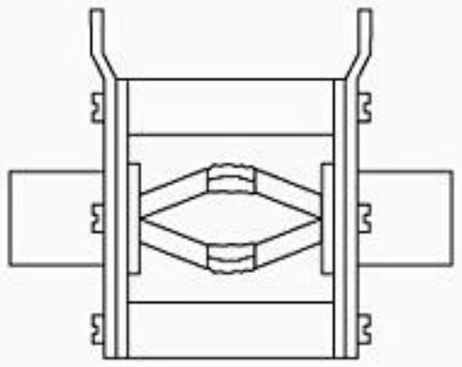


4. O arco elétrico faz fundir a areia (extintor) e o elemento fusível; a areia, ao fundir-se, resfria o arco e aumenta a resistência interna do fusível; a corrente cai.





5. O arco está extinto; o elemento fusível desapareceu; a temperatura interna do fusível está caindo; a areia fundida se solidifica; a corrente não passa mais.



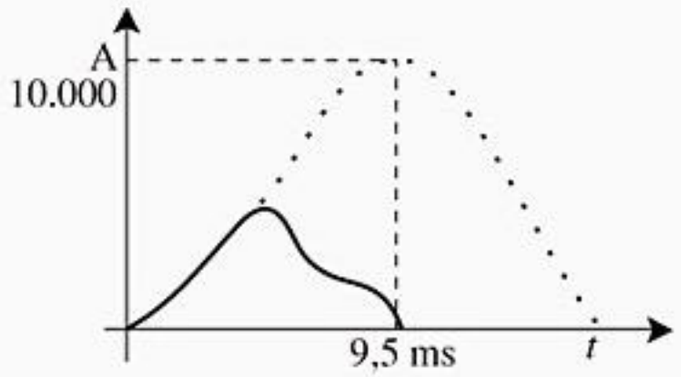


Figura 6.10 ■ Ação de fusíveis limitadores de corrente com dois elos em paralelo (Cortesia da Legrand)

nais até 1.250 A, capacidades de interrupção não inferiores a 50 kA (com tensão nominal até 660 V, em CA) ou 25 kA (com tensão nominal até 750 V, em CC), sendo considerados os fusíveis:

- Com contatos cilíndricos (geralmente chamados "cartuchos tipo industrial").
- Com contatos tipo faca (correspondendo ao tipo NH).
- Com contatos parafusados.

Os *dispositivos fusíveis para uso por pessoas não qualificadas* (anteriormente designados por "dispositivos fusíveis para uso doméstico") destinam-se a instalações em que os fusíveis são acessíveis e podem ser substituídos por pessoas comuns. São gL/gG, com correntes nominais até 100 A, capacidades de interrupção não inferiores a 6 kA (com tensão nominal até 240 V) ou 20 kA (com tensão nominal superior a 240 V e até 500 V), sendo considerados os fusíveis:

Quadro 6.2 ■ Fusíveis cartucho e fusíveis rolha não permitidos pela NBR 5410

Deve-se considerar que os *fusíveis cartuchos* cobertos pela norma NBR IEC 60269-1 nada têm a ver com outros tipos de fusíveis cartucho ainda existentes no mercado, com corpo de papelão e sem meio extintor. Tais fusíveis, que devem atender às normas NBR 6254/1988 e NBR 6996/1988, devem ser certificados compulsoriamente, de acordo com a Portaria do Inmetro 101, de 16 de julho de 2001.

Existem também ainda disponíveis no mercado os fusíveis do tipo rolha, que devem atender às normas NBR 5113/1988, NBR 5157/1988, NBR 6253/1988 e NBR 6280/1988, e devem ser certificados compulsoriamente, de acordo com a Portaria do Inmetro 101, de 16 de julho de 2001.

Tanto os fusíveis do tipo cartucho da norma NBR 6254 quanto os fusíveis do tipo "rolha" da norma NBR 5113 não são permitidos pela NBR 5410 para utilização como dispositivos de proteção contra sobrecorrente desde a sua edição de 1997. Isso significa que as novas instalações elétricas de baixa tensão e as reformas realizadas a começar daquele ano não poderiam mais empregar tais dispositivos.

- Cartucho.
- Tipo D (geralmente designados por *diazed*).

Para garantir que a reposição desses fusíveis fosse permitida, no caso de queima, e visando garantir uma qualidade mínima desses produtos, é que o Inmetro publicou, em 2001, a citada Portaria 101. Dessa forma, os "antigos" fusíveis do tipo cartucho — com corpo de papelão e do tipo rolha — ainda são fabricados e comercializados no Brasil, visando unicamente ao mercado de reposição, sendo, desde 1997, proibidos em instalações novas. Ver o Quadro 6.2.

Tensões nominais

São definidas duas séries de valores padronizados para *tensões nominais* (em CA) dos dispositivos fusíveis, como indicado na Tabela 6.1.

Correntes nominais

As *correntes nominais* dos fusíveis, expressas em ampères, devem ser escolhidas entre os seguintes valores: 2 – 4 – 6 – 8 – 10 – 12 – 16 – 20 – 25 – 32 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – 125 – 160 – 200 – 250 – 315 – 400 – 500 – 630 – 800 – 1.000 – 1.250. Para os porta-fusíveis, as correntes nominais devem ser escolhidas dentre esses valores, a menos que haja indicação em contrário.

Correntes convencionais de fusão e não fusão

As correntes convencionais típicas de fusão e de não fusão (ver definições na Seção 6.2) de fusíveis são indicadas na Tabela 6.2.

Característica tempo-corrente

A característica *tempo-corrente* de um fusível dá o tempo virtual de fusão ou de interrupção, em função da corrente presumida simétrica, sob condições especificadas de operação. A faixa compreendida entre a característica "tempo mínimo de fusão-corrente" e a característica "tempo máximo de interrupção-corrente", sob condições especificadas, é denominada *zona tempo-corrente*. A Figura 6.11 mostra a zona tempo-corrente de um fusível tipo gG e a Figura 6.12, a de um fusível tipo aM.

Segundo a NBR IEC 60269-1:

- As características tempo-corrente devem ser apresentadas para, no mínimo, tempos de fusão superiores a 0,01 s, com corrente em abscissa; e tempos em ordenada devem ser usados escalas logarítmicas em ambos os eixos coordenados.
- As bases das escalas logarítmicas (as dimensões de uma década) devem estar na razão de 2/1, com a maior dimensão na abscissa; no entanto, devido à prática há muito seguida nos Estados Unidos, a razão de 1/1 é reconhecida como um padrão alternativo.

Tabela 6.1 ■ Tensões nominais dos dispositivos fusíveis

Série I (V)	Série II (V)
	120
220 (230)	208
	240
	277
380 (400)	415
500	480
660 (690)	600

Tabela 6.2 ■ Correntes convencionais de fusão e não fusão

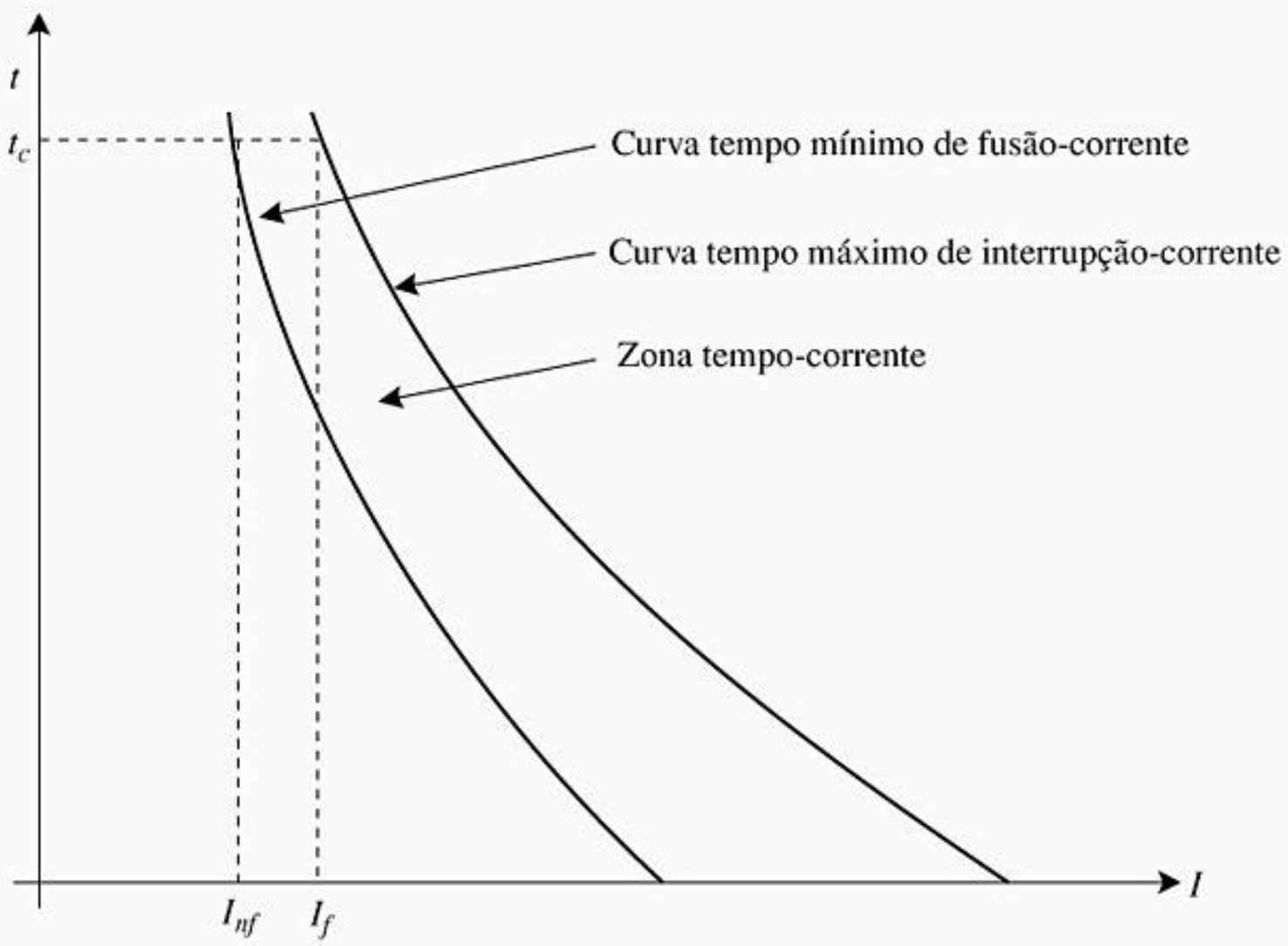
I_n (A)	I_{nf}	I_f	t_c (h)
≤ 4	1,5 I_n	2,1 I_n	1
$4 < I_n \leq 10$	1,5 I_n	1,9 I_n	1
$10 < I_n \leq 25$	1,4 I_n	1,75 I_n	1
$25 < I_n \leq 100$	1,3 I_n	1,6 I_n	1 (≤ 63 A)
			2 (≤ 100 A)
$100 < I_n \leq 1.000$	1,2 I_n	1,6 I_n	2 ($100 \leq I_n \leq 160$ A)
			3 ($160 < I_n \leq 400$ A)
			4 ($400 < I_n \leq 1.000$ A)

I_n = corrente nominal do fusível
I_{nf} = corrente convencional de não fusão do fusível
I_f = corrente convencional de fusão do fusível
t_c = tempo convencional de fusão

- As curvas devem ser apresentadas em papel tamanho A3 ou A4.
- As dimensões das décadas devem ser escolhidas das séries: 2 cm, 4 cm, 8 cm, 16 cm e 2,8 cm, 5,6 cm e 11,2 cm (são considerados preferenciais os valores de 2,8 cm e 5,6 cm).
- Salvo indicação em contrário, as curvas devem referir-se à temperatura ambiente de 20 °C.

A seguir, é apresentada a definição da curva tempo *versus* corrente do dispositivo fusível segundo a ANSI.

A atuação de um fusível limitador fica bem-definida por meio da *característica de corte*. Essa curva, definida para valores nominais especificados (tensão, freqüência e fator de potência do curto-circuito), permite obter, dada a corrente presumida simétrica:



Legenda:
t_c = Tempo convencional de fusão
I_{nf} = Corrente convencional de não fusão
I_f = Corrente convencional de fusão

Figura 6.11 ■ Zona tempo-corrente de um fusível de uso geral (gG)

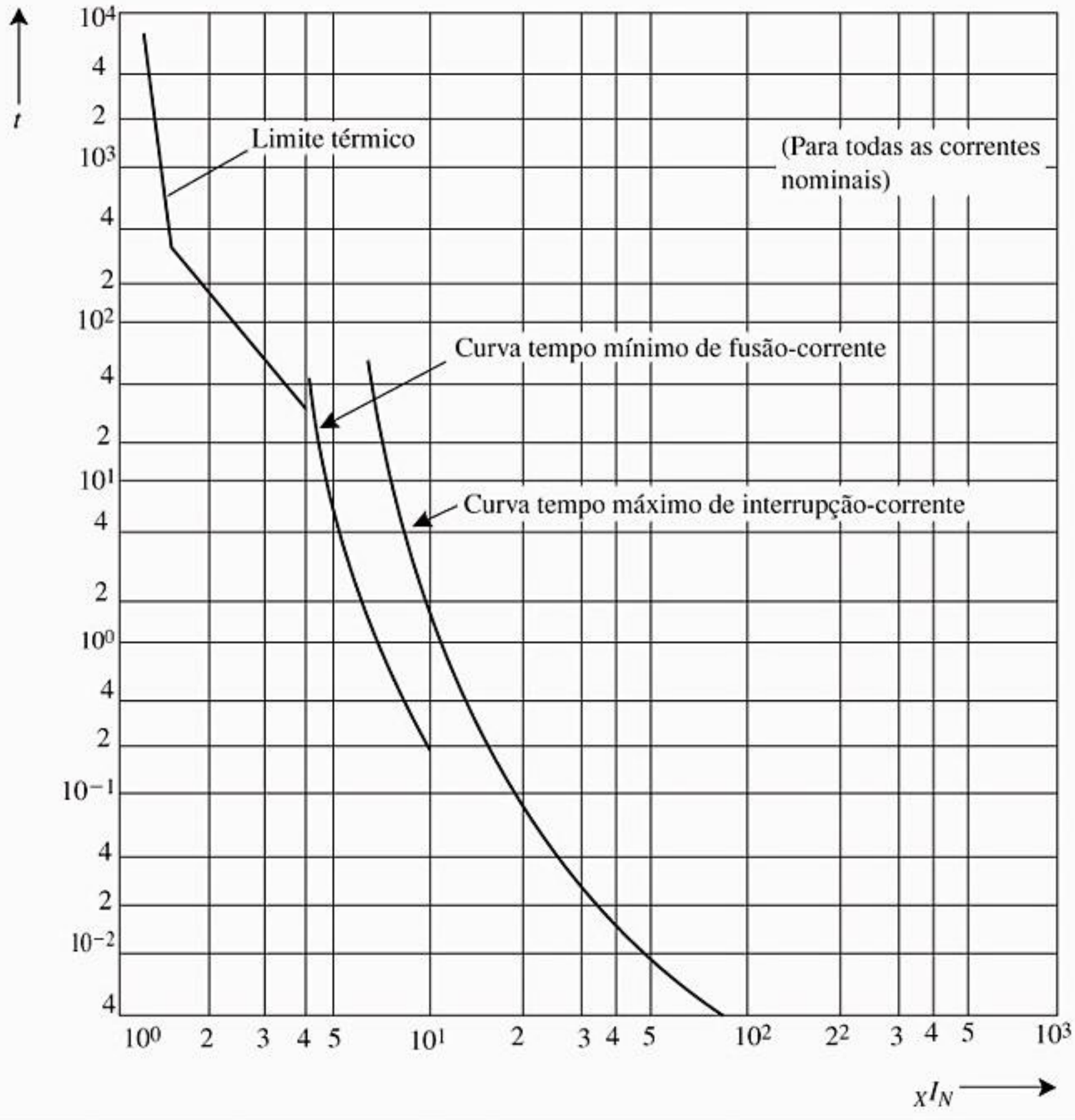


Figura 6.12 ■ Zona tempo-corrente de um fusível tipo aM (menor valor a interromper 4 I_N)

As normas ANSI definem a *curva média* "tempo de fusão-corrente" como a curva que indica o tempo médio necessário para fundir o elemento fusível. Essas normas recomendam que a corrente de fusão não deve variar de ±10 por cento para qualquer valor do tempo. Nessas condições, em vez de uma curva, temos uma faixa (ou zona) de ±10 por cento em torno da curva média; os limites dessa faixa são as curvas "tempo mínimo de fusão-corrente" e "tempo máximo de fusão-corrente". Ainda de acordo com a ANSI, para tempos superiores a 0,08 s, a curva "tempo máximo de fusão-corrente" representa a característica "tempo de interrupção-corrente"; para tempos inferiores a 0,08 s os fabricantes devem indicar a curva "tempo de interrupção-corrente".

- O valor de crista da corrente presumida.
- A corrente de corte.

A Figura 6.13 mostra a característica de corte e indica como, para dado fusível (de corrente nominal I_N), dada a corrente presumida simétrica I_k, obtém-se o valor de crista da corrente presumida, $\lambda\sqrt{2}\, I_k$ e a corrente de corte I_C. Os fabricantes geralmente apresentam duas linhas diagonais, uma para o fator de potência de curto-circuito 100 por cento, isto é, $X/R = 0$, correspondendo a $\sqrt{2} \cong 1{,}4$, e outra para o fator de potência 15 por cento, isto é, $X/R = 6{,}6$, correspondendo a $\lambda\sqrt{2} \cong 2{,}5$ (ver Capítulo 10).

As Figuras 6.14 e 6.15 mostram as características tempo-corrente para fusíveis gG.

EXEMPLO

A Figura 6.16 mostra a característica de corte de um fusível limitador gL, considerando fator de potência de curto-circuito 10 por cento, correspondendo a $\lambda\sqrt{2} \cong 2{,}5$

Considerando uma corrente de curto-circuito presumida simétrica de

$$I_k = 0{,}9\ \text{kA} = 900\ \text{A}$$

o valor de crista seria de

$$\lambda\sqrt{2}\, I_k = 2{,}5 \times 0{,}9 = 2{,}25\ \text{kA} = 2.250\ \text{A}$$

como mostra a Figura 6.16.

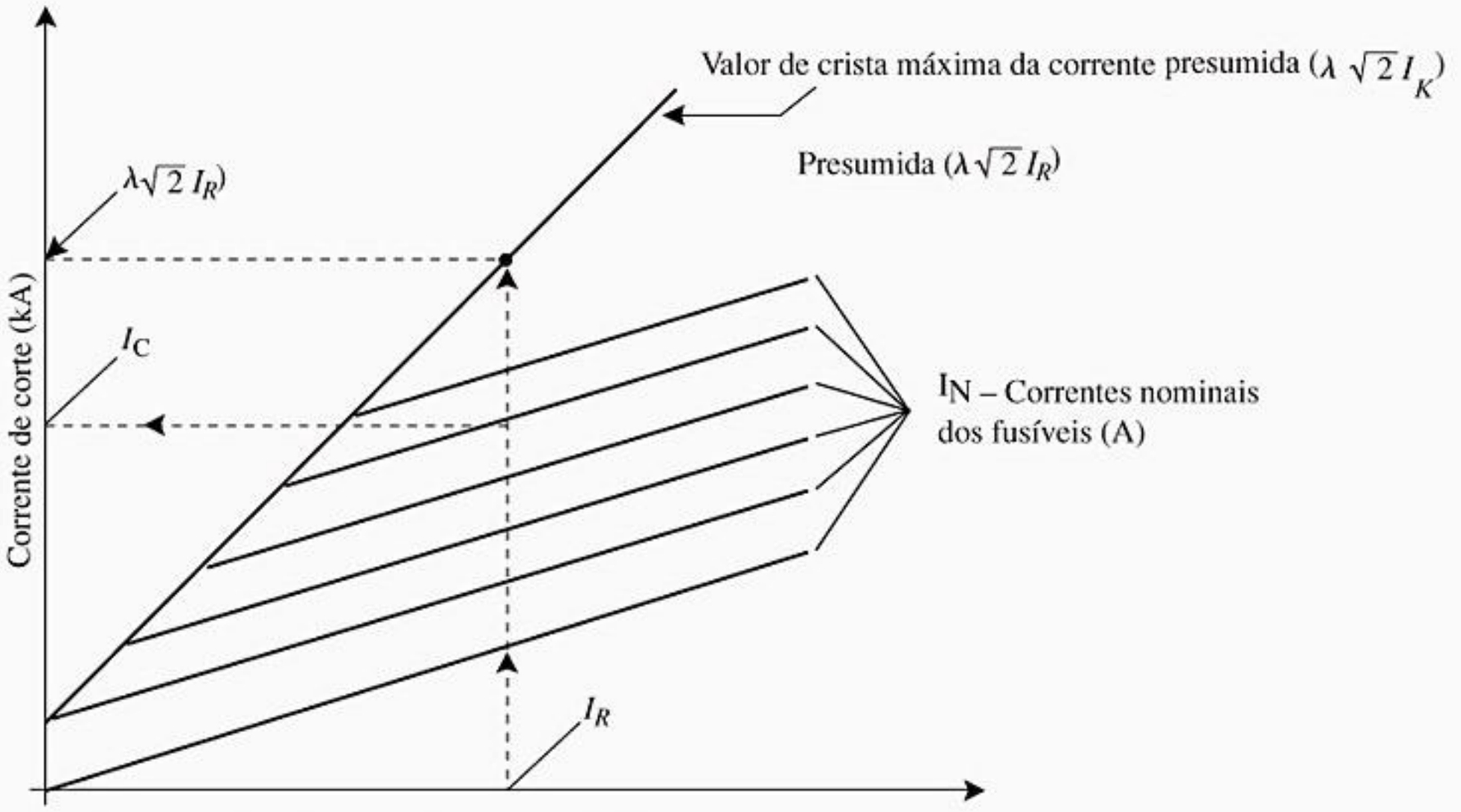


Figura 6.13 ▪ Característica de corte de um fusível limitador

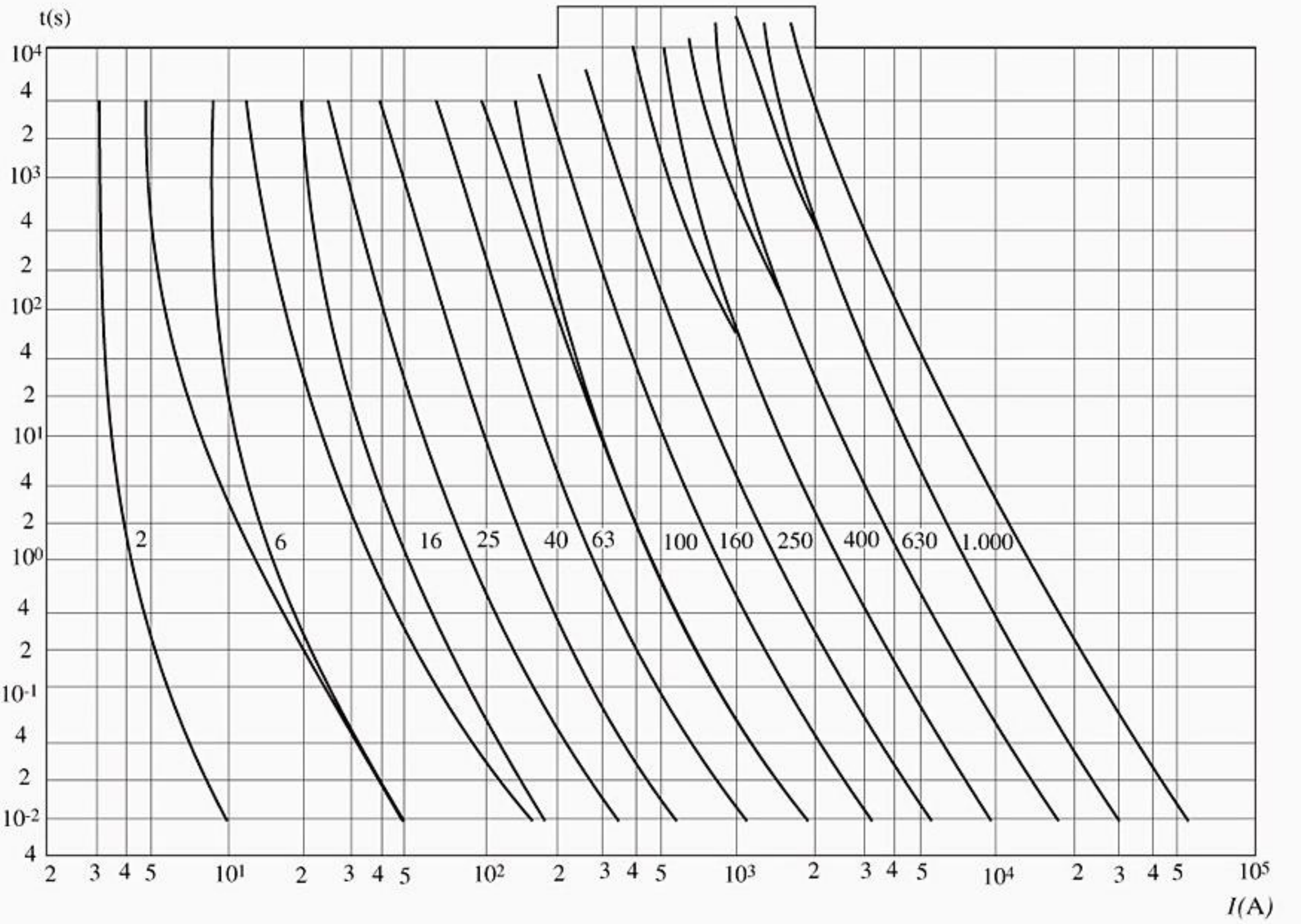


Figura 6.14 ▪ Zonas tempo-corrente para fusíveis tipo "gG" de 2, 6, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630 e 1.000 A

A corrente de corte, limitada pelo fusível, será, para um fusível de 16 A

$$I_c = 0{,}90\ \text{kA} = 900\ \text{A}$$

O Quadro 6.3 apresenta as características básicas dos fusíveis.

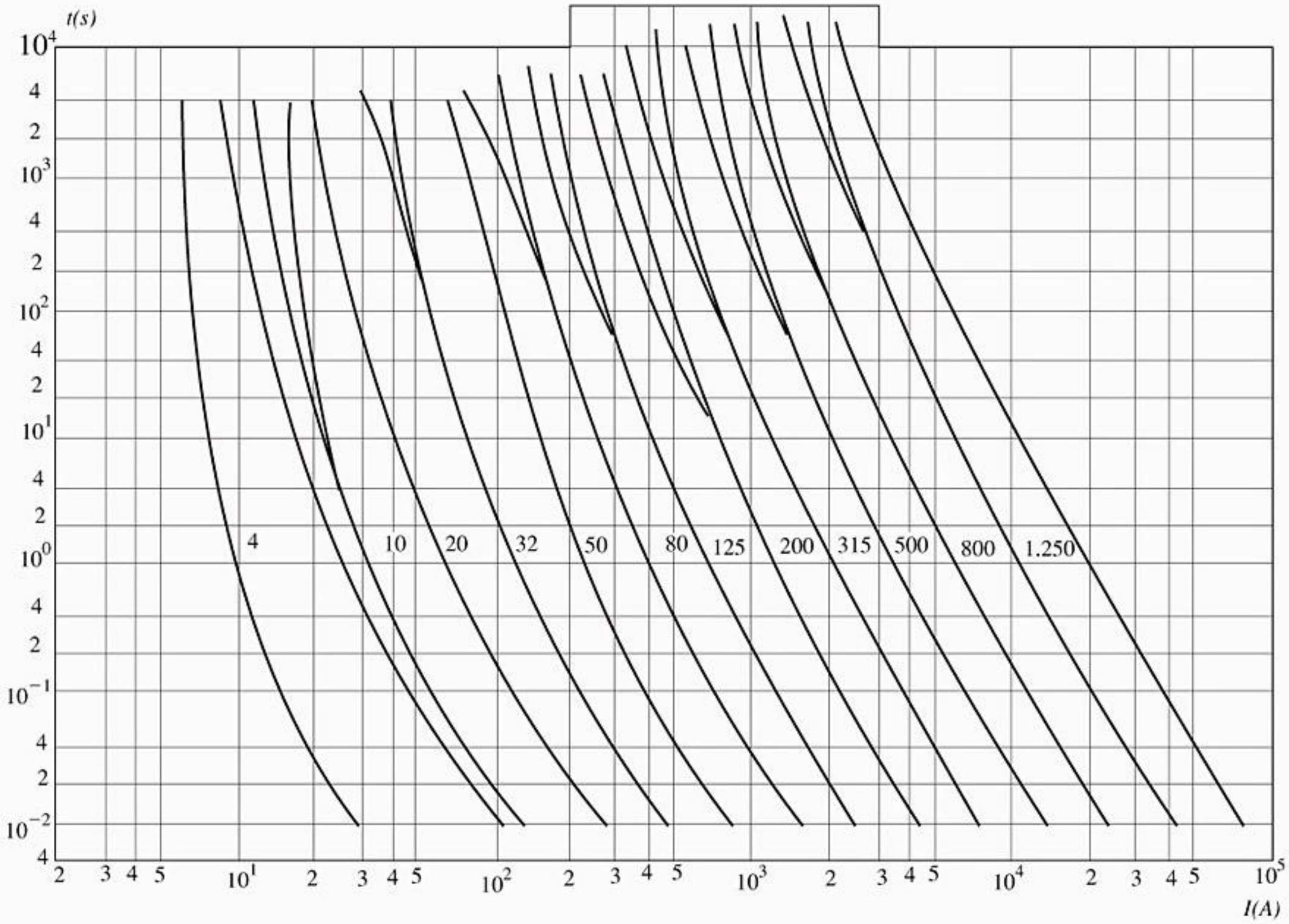


Figura 6.15 ■ Zonas tempo-corrente para fusíveis tipo "gG" de 4, 10, 20, 32, 50, 80, 125, 200, 315, 500, 800 e 1.250 A

Quadro 6.3 ■ Características básicas dos fusíveis

- São de operação simples.
- São, geralmente, de baixo custo.
- Não possuem capacidade de efetuar manobras e, portanto, são normalmente associados a chaves.
- São unipolares e, conseqüentemente, suscetíveis de causar danos a motores pela possibilidade de operação desequilibrada. Podem, por sua vez, não isolar completamente o circuito sob curto-circuito.
- Possuem característica tempo-corrente não ajustável. Esta somente pode ser alterada pela mudança do "tamanho" do fusível (mudança de corrente nominal) ou do tipo de fusível.
- Não são de operação repetitiva. Devem ser trocados, após a atuação, havendo a possibilidade de ser substituídos por um fusível inadequado.
- Constituem, essencialmente, uma proteção contra correntes de curto-circuito. Principalmente, os limitadores de corrente são mais rápidos que os disjuntores para sobrecorrentes elevadas, sendo, em geral, relativamente lentos para pequenas sobrecorrentes.
- Podem tornar-se defeituosos sob a ação de correntes elevadas que sejam interrompidas (por outros dispositivos) antes de provocar sua fusão. Nessas condições, existe a possibilidade de atuação indevida, sob a ação de correntes subseqüentes, interrompendo desnecessariamente o circuito.
- Não têm uma curva tempo *versus* corrente bem-definida, mas uma faixa da provável atuação.
- Difícil de coordenar com relés a montante.

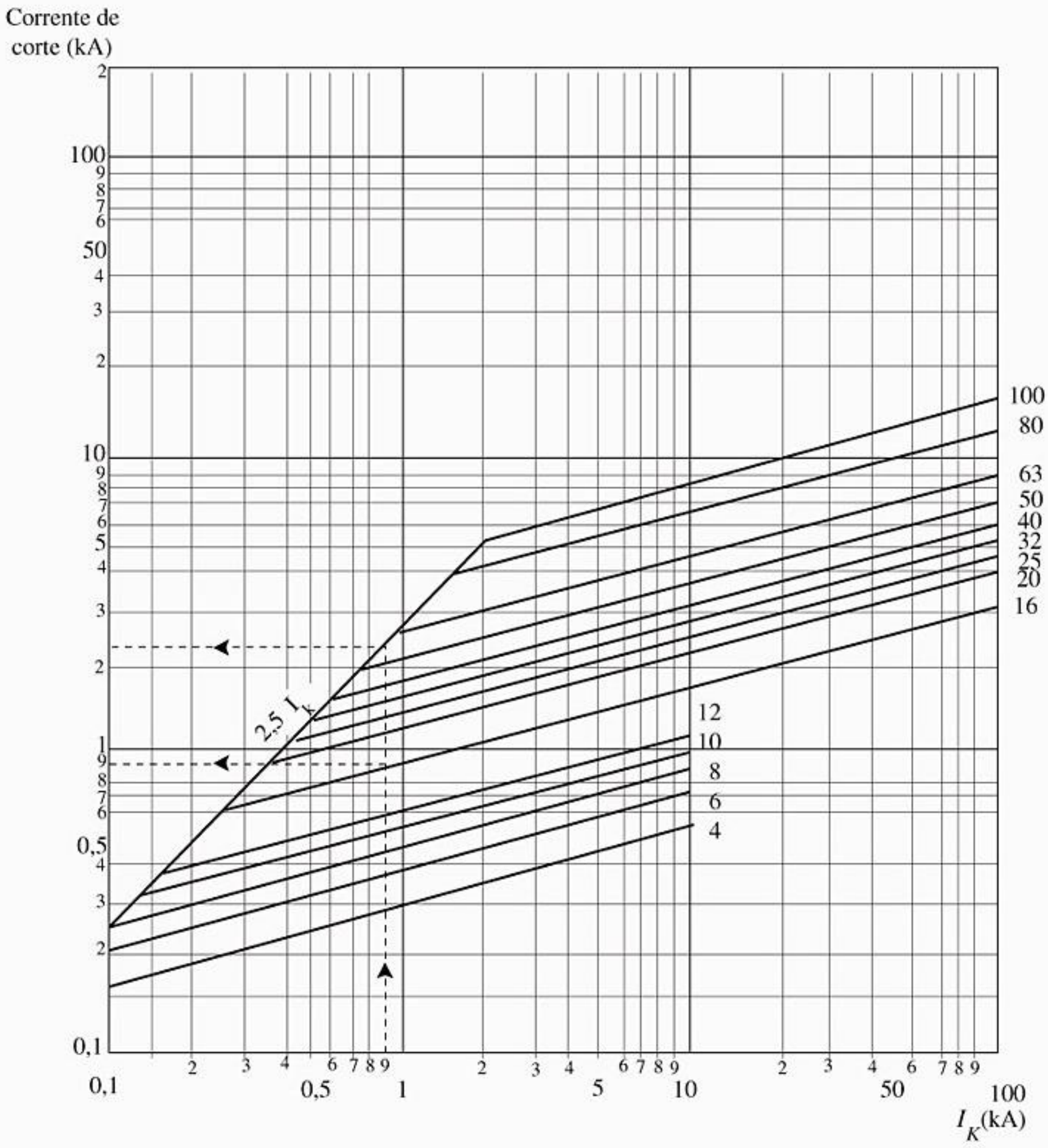


Figura 6.16 ■ Característica de corte de um fusível gL (cos ϕ = 0,1) (Cortesia de Legrand)

6.4 Disjuntores de baixa tensão

Generalidades

Funções de um disjuntor

Os *disjuntores* são, simultaneamente, dispositivos de proteção e de manobra, e exercem, a princípio, três funções básicas que caracterizam tais dispositivos:

(a) Promovem a *proteção elétrica* de um circuito, isto é, de seus condutores, por meio da detecção de sobrecorrentes e da abertura do circuito.
(b) Permitem *comandar*, por meio da abertura ou do fechamento voluntário, sob carga, circuitos ou equipamentos de utilização.
(c) Promovem o *seccionamento* de um circuito, na medida em que, ao abrir um circuito, asseguram uma distância de isolamento adequada.

A seguir, são indicados alguns casos em que *não se pode* esperar que um disjuntor atue adequadamente na proteção dos circuitos.

- *Choques elétricos*: de modo geral, os disjuntores não protegem as pessoas e os animais domésticos contra choques elétricos. No entanto, sob certas condições bem-definidas na NBR 5410, é permitida a utilização de disjuntores para a proteção contra contatos indiretos em instalações com esquemas de aterramento TN.
- *Faltas de baixa intensidade entre condutores*: suponha que o cordão que alimenta um ferro de passar roupas se torne quebradiço em decorrência de seu

uso freqüente. Isso pode levar a uma situação em que os fios elementares que fazem parte do condutor flexível de uma fase façam contato com os da fase oposta, estabelecendo, assim, um arco elétrico com uma corrente abaixo da corrente nominal do disjuntor. Nesse caso, claramente não haverá uma sobrecorrente, os condutores não estarão experimentando uma temperatura excessiva e, conseqüentemente, por definição, o disjuntor não vai atuar.

Caso o arco permaneça, ele poderá causar um incêndio. Pode ser também que esse arco leve ao rompimento total da isolação dos condutores, levando-os a uma situação de curto-circuito, fazendo então o disjuntor atuar; mas isso poderá ocorrer, em alguns casos, somente após um incêndio já ter sido iniciado.

O exemplo foi dado para um ferro de passar roupas, mas poderia facilmente ser transportado para o caso genérico de uso de extensões, em que o "enrola-desenrola" de condutores é usual. A melhor proteção, nesses casos, é a freqüente inspeção e manutenção de todos os cordões flexíveis de aparelhos e extensões, com a imediata substituição ou reparo dos produtos suspeitos de defeitos.

- *Correntes de falta à terra de pequena intensidade*: as correntes de falta à terra são similares às faltas entre linha, exceto que elas podem apresentar uma intensidade muito menor, uma vez que as impedâncias envolvidas no circuito fase-terra podem ser maiores do que as de um circuito fase-fase ou fase-neutro. Nesses casos, os disjuntores podem não ser capazes de detectar essas correntes, o que levaria a instalação a uma eventual situação perigosa. Para essa situação de falta fase-terra, os dispositivos DR são os recomendados.
- *Surtos de tensão*: durante uma tempestade com raios ou devido às manobras na rede das concessionárias, pode ocorrer a propagação de sobretensões em uma instalação pela linha de alimentação do consumidor. No entanto, essa sobretensão não é reconhecida pelos disjuntores como uma sobrecorrente e o disjuntor não vai atuar. Para esses casos, a solução indicada na NBR 5410 é o emprego de dispositivos especializados em identificar sobretensões, chamados dispositivos de proteção contra surtos (DPS).
- *Sobreaquecimentos em conexões*: se a ligação entre um condutor e um terminal de um componente qualquer não está adequada, podem ocorrer sérias elevações de temperatura naquele ponto de mau contato. O equipamento pode ser danificado e até incêndios podem ser provocados por esse motivo. Apesar do enorme calor naquela conexão e da progressiva deterioração do componente, a corrente que circula pela instalação está normal e, portanto, não há uma sobrecorrente que possa ser detectada pelo disjuntor. Nesses casos, a melhor proteção para a instalação é a prática de uma cuidadosa manutenção, com inspeções periódicas e verificação cuidadosa das condições dos contatos elétricos.

Disparadores de um disjuntor

Um *disparador* é um dispositivo associado mecanicamente a um disjuntor e que libera os órgãos de retenção (trava) dos contatos principais, provocando seu fechamento ou abertura.

Um *disparador de sobrecorrente* é aquele que provoca a abertura de um disjuntor, com ou sem retardo intencional, quando a corrente no disparador excede um valor predeterminado, em condições especificadas. Pode ser *direto*, quando energizado pela corrente no circuito principal do disjuntor, ou *indireto*, quando a energização é feita por meio de um transformador de corrente ou de um derivador.

No que diz respeito ao retardo, o disparador de sobrecorrente pode ser:

- *Instantâneo*: quando opera sem qualquer retardo intencional de tempo.
- *Com retardo (ou tempo) definido*: quando opera com um retardo definido, que pode ser:
- *Ajustável*, mas que é independente do valor da sobrecorrente;
- *A tempo inverso*: quando opera após um retardo inversamente ao valor da sobrecorrente.

Um *disparador de sobrecarga* é um disparador de sobrecorrente destinado à proteção contra sobrecargas. Um *disparador térmico de sobrecarga* é um disparador de sobrecarga a tempo inverso que depende, para sua operação (incluindo seu retardo), da ação térmica da corrente que circula no disparador.

Disparador em derivação é aquele energizado por uma fonte de tensão.

Um *disparador de subtensão* é um disparador em derivação que provoca a abertura de um disjuntor, com ou sem retardo intencional, quando a tensão nos terminais do disparador cai abaixo de um valor predeterminado.

Câmara de extinção

A *câmara de extinção* de um disjuntor é o compartimento que envolve os contatos do circuito principal, capaz de resistir às solicitações térmicas devidas ao arco, projetada especificamente para promover a extinção de arco elétrico.

Características básicas

Pode-se apresentar como características básicas dos disjuntores as seguintes:

- Operam por meio de disparadores ou, principalmente no caso dos de média e alta tensão, de relés separados.
- Apresentam (os tipos multipolares), ao contrário dos dispositivos fusíveis, atuação multipolar, evitando a operação desequilibrada em equipamentos trifásicos,

tal como a que pode ocorrer com a queima de um único fusível de uma proteção à fusível.
- Oferecem larga margem de escolha de correntes nominais, podendo, em muitos casos, admitir ajustes nos disparadores, o que, além de ampliar a margem de escolha, simplifica a coordenação com outros dispositivos de proteção.
- Sua operação é repetitiva, isto é, podem ser religados após terem atuado, sem necessidade de substituição.
- Sua característica tempo-corrente, além de ajustável em muitos casos, não é afetada por correntes que provocaram outros disparos.
- Muito embora não sejam tão rápidos como os fusíveis (principalmente os limitadores) para sobrecorrentes elevadas, eles o são para sobrecorrentes de pequena e média intensidades, as mais comuns no dia-a-dia das instalações.
- Permitem, em alguns casos, o comando a distância.

Tipos de construções de disjuntores

Existem diversos tipos de disjuntores em relação ao seu tipo de construção, a saber:

- *Disjuntor seco*: seus contatos principais operam no ar, sob pressão atmosférica.
- *Disjuntor a gás*: seus contatos principais operam em um gás diferente do ar.
- *Disjuntor a ar comprimido*: seus contatos principais operam sob um jato de ar comprimido.
- *Disjuntor a SF_6*: seus contatos principais operam em hexafluoreto de enxofre.
- *Disjuntor a grande volume de óleo*: seus contatos principais operam imersos em óleo, em quantidade suficiente para a isolação entre as partes vivas e a terra;
- *Disjuntor a pequeno volume de óleo*: seus contatos principais operam imersos em óleo, que serve essencialmente para a extinção do arco e não necessariamente para a isolação entre as partes vivas e a terra.
- *Disjuntor a sopro magnético*: seus contatos principais operam em um campo magnético produzido pela própria corrente que percorre o circuito principal.
- *Disjuntor a vácuo*: seus contatos principais operam em um vácuo especificado.
- *Disjuntor em caixa moldada*: disjuntor seco de baixa tensão, montado em uma caixa de material isolante moldado, que suporta e encerra todas as partes componentes do disjuntor. Os *disjuntores em caixa moldada*, de construção compacta, podem ser unipolares, bipolares ou tripolares, geralmente com acionamento manual, podendo ser equipados com:
  - Disparadores de sobrecorrente eletromagnéticos, instantâneos ou com retardo definido, para proteção contra curtos-circuitos.
  - Disparadores térmicos de sobrecarga.
  - Disparadores de subtensão.

São, geralmente, utilizados para proteção e manobra de circuitos de distribuição e terminais, montados em quadros de distribuição padronizados.

- *Disjuntor aberto*: disjuntor seco de baixa tensão que possui todas as partes componentes montadas em uma estrutura aberta, geralmente metálica. Os *disjuntores abertos* geralmente são tripolares de corrente nominal acima de 200 A, com acionamento manual ou motorizado, podendo ser equipados com:
  - Disparadores de sobrecorrente eletromagnéticos, instantâneos ou com retardo definido, para proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos.
  - Disparadores térmicos de sobrecarga.
  - Disparadores de subtensão.

São utilizados para proteção e manobra de circuitos de distribuição principais (de porte) e para proteção de alternadores, transformadores, capacitores etc., montados em subestações, cabines ou em quadros de distribuição de grande porte.

Níveis de proteção

Os disjuntores possuem, em geral, pelo menos dois níveis de proteção em relação às sobrecorrentes:

- Contra sobrecorrentes pequenas e moderadas (geralmente correntes de sobrecarga), por meio de disparadores térmicos; esses disjuntores são chamados apenas "térmicos".
- Contra sobrecorrentes elevadas (em geral correntes de curto-circuito), por meio de disparadores eletromagnéticos; esses disjuntores são denominados apenas "magnéticos".

Os disjuntores de baixa tensão mais comuns operam com disparadores térmicos e eletromagnéticos; são os *disjuntores termomagnéticos*. Neles, a atuação dos disparadores térmicos é normalmente caracterizada por um limiar bastante próximo da corrente nominal ou de ajuste, permitindo detectar sobrecorrentes de pequena intensidade. Por sua vez, os disparadores eletromagnéticos atuam, em geral, em uma faixa de sobrecorrentes cujo limite inferior é maior que as correntes de sobrecarga usuais e cujo limite superior é igual à capacidade de interrupção do disjuntor.

Categorias de disjuntores termomagnéticos em relação ao tempo de abertura

Os disjuntores termomagnéticos são geralmente classificados em três categorias: disjuntores *lentos*, *rápidos* e *limitadores*. Isso com base no *tempo de abertura* (ou tempo de pré-arco), que é o tempo decorrido do instante em que se manifesta a sobrecorrente e se inicia a abertura dos contatos até o momento em que os contatos se separam, dando início ao arco, como mostram as Figuras 6.17 e 6.18.

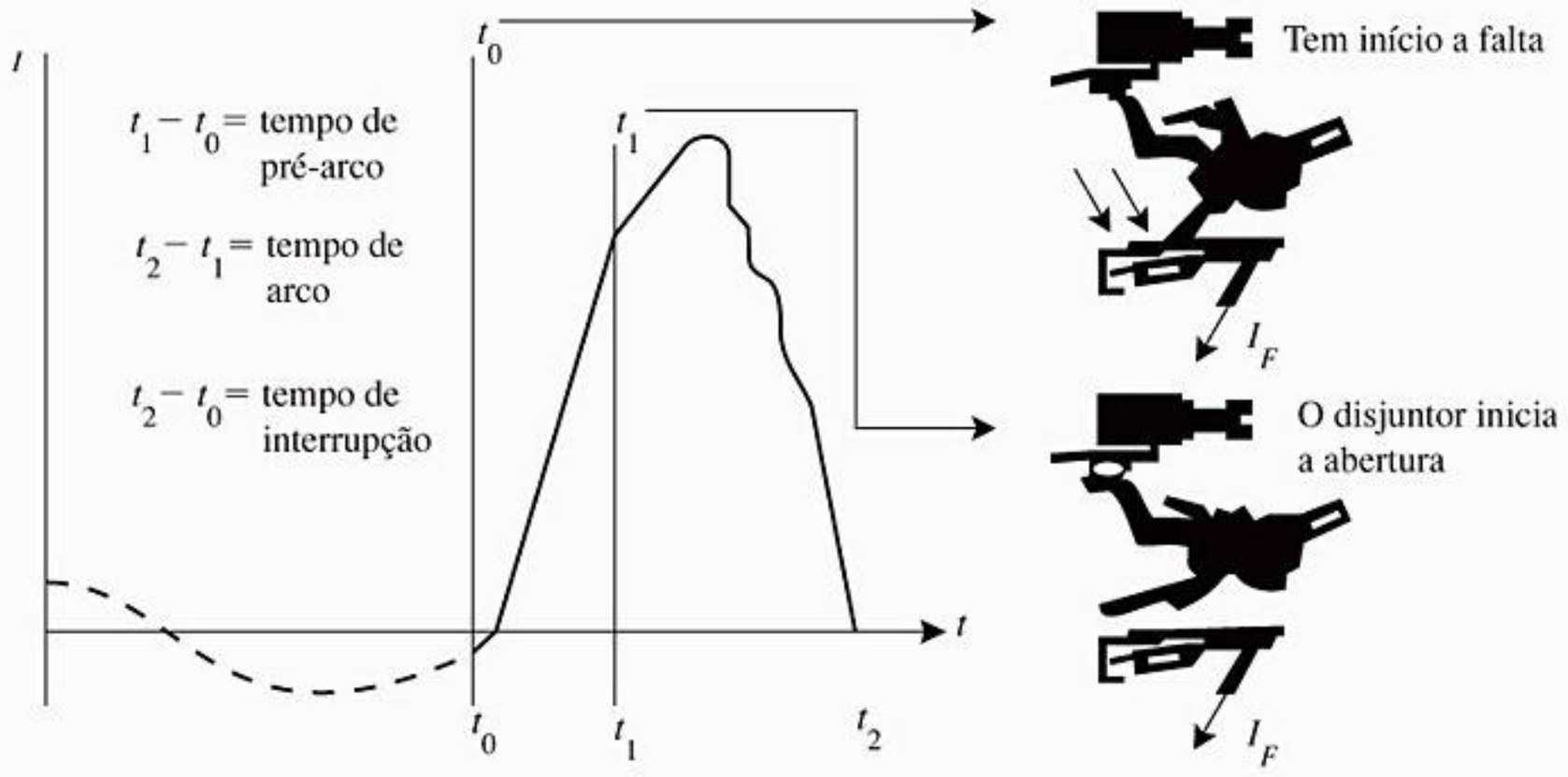


Figura 6.17 ■ O tempo de abertura (tempo e pré-arco) nos disjuntores

A caracterização de cada tipo de disjuntor é:

- *Disjuntores lentos*: com tempos de pré-arco longos, superiores a 60 ms, destinados a intervir apenas em casos extremos, quando, por exemplo, o curto-circuito ocorre no circuito de distribuição principal, a montante dos disjuntores divisionários.
- *Disjuntores rápidos*: com tempos de pré-arco da ordem de 2 a 3 ms, com os quais a corrente de curto-circuito não chega a estabilizar-se com seu valor teórico máximo, antes que se forme o arco de interrupção; nessas condições, o arco se extingue à primeira passagem da tensão pelo zero.
- *Disjuntores limitadores de corrente:* com tempos de pré-arco da ordem de 0,6 a 0,9 ms, com os quais a corrente de curto-circuito resulta fortemente limitada com respeito a seu valor teórico máximo; nessas condições, o arco se extingue durante o primeiro semiciclo de corrente e o tempo de interrupção é, em geral, inferior a 10 ms. A Figura 6.18 mostra um oscilograma típico da atuação de um disjuntor limitador.

Os *pequenos disjuntores termomagnéticos em caixa moldada* são hoje utilizados na proteção da grande maioria dos circuitos terminais, em todos os tipos de instalação. *Sua importância é decisiva na proteção da instalação,* uma vez que os incêndios de origem elétrica geralmente se iniciam de problemas nos circuitos terminais ou nos equipamentos a eles ligados, por exemplo, em uma fiação em canaleta, em uma tomada de corrente, em uma derivação para a ligação de um equipamento etc.

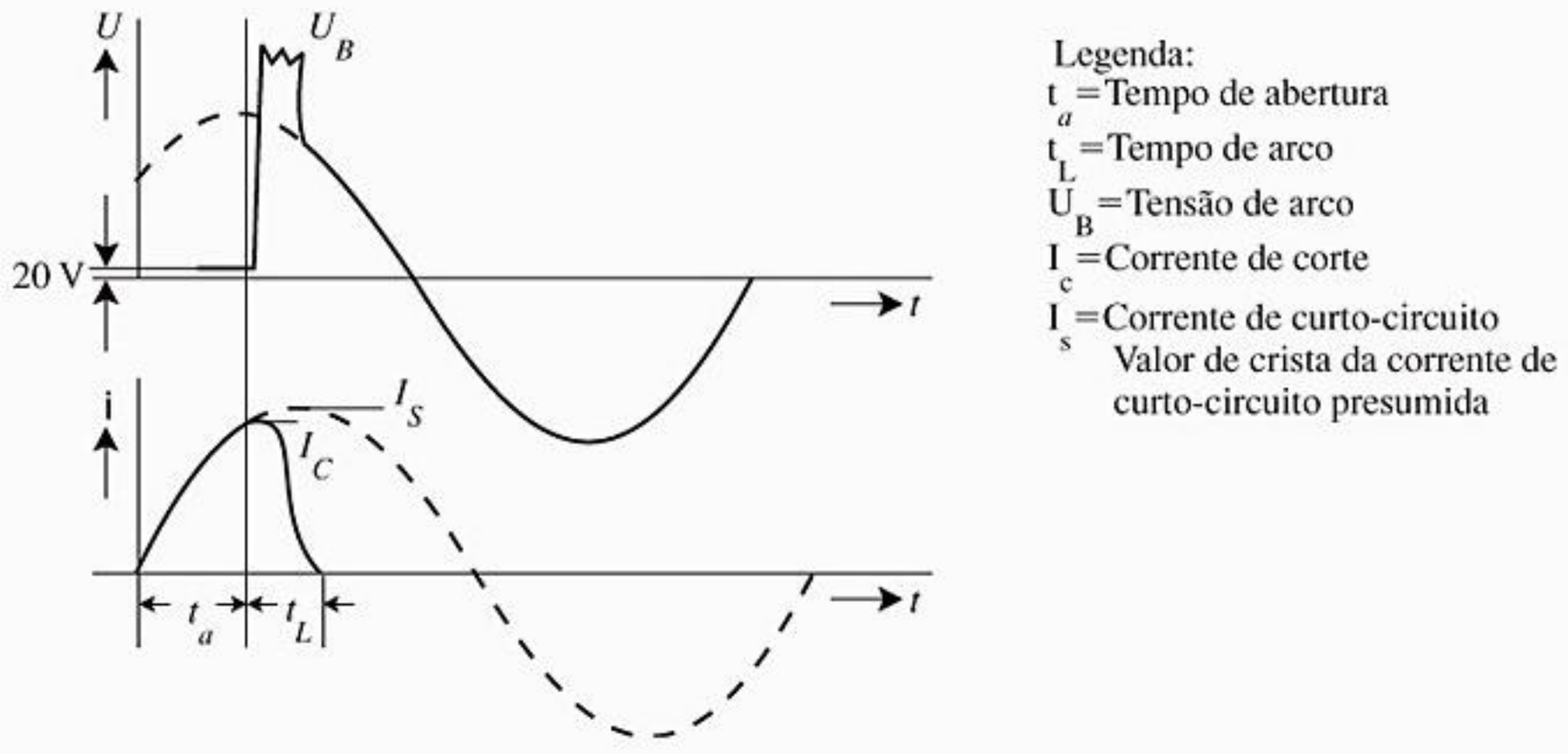


Figura 6.18 ■ Oscilograma típico da atuação de um disjuntor limitador de corrente

Operação

Disparador eletromagnético

Funcionamento

A Figura 6.19 mostra, esquematicamente, *um disparador eletromagnético* (também chamado "disparador magnético"). Sua armadura é tensionada por meio de uma mola, de tal maneira que apenas acima de um valor definido de corrente, a *corrente de operação* (*corrente de ajuste*), é vencida a inércia da armadura e a tensão da mola; a armadura é então atraída pelo núcleo, promovendo, por meio de conexões mecânicas, a abertura dos contatos principais do disjuntor.

A força necessária para equilibrar a ação da mola é proporcional ao quadrado da força magnetomotriz do circuito magnético, *N.I.*, sendo *N* o número de espiras da bobina e *I* a corrente de operação do disparador (que circula pelo circuito protegido e pela bobina). Assim, qualquer corrente superior a *I* provocará o fechamento do entreferro, isto é, a atuação do dispositivo. Observe que, mantidas todas as demais condições, se o ajuste for uma corrente de operação menor, maior deverá ser o número de espiras da bobina.

A corrente de operação pode ter um valor único fixado ou pode ser variável em uma *faixa de corrente de ajuste* (a chamada *corrente de ajuste* é um valor da corrente de operação escolhido nessa faixa), o que é conseguido pela variação do entreferro, da tensão da mola ou da mudança do número de espira da bobina magnetizante.

Os disparadores eletromagnéticos não são de grande precisão, admitindo erros em torno da corrente de operação (corrente de ajuste). Por essa razão, os fabricantes costumam indicar, para esses dispositivos, "faixas" na característica tempo-corrente.

Disparo instantâneo

O disparador é dito *instantâneo* quando promove o disparo direto e instantâneo do disjuntor. Nesse tipo, com a diminuição do entreferro, aumenta a força da mola a ser vencida pela armadura. Em um disparador *extra-rápido*, usado em disjuntores limitadores de corrente, de mecanismo mais sofisticado (contendo uma armadura e um circuito magnético auxiliares), a estratégia é diminuir a força da mola durante a ação da alavanca.

Disparo temporizado

Um disparador eletromagnético é *temporizado* quando o movimento da armadura não promove a atuação instantânea do disjuntor, que se dá após um *tempo de retardo*.

Dependendo do tipo de dispositivo, a temporização pode diminuir com o aumento da corrente ou independer dela. No primeiro caso, é obtida de forma simples, com o acoplamento de uma massa adicional à armadura; no segundo caso, nos disparadores a *tempo definido*, a temporização é conseguida por meio de um circuito pneumático, hidráulico, mecânico (preferencialmente), em alguns casos, elétricos ou, mais recentemente, eletrônico.

A temporização é classificada em '"longa" e "curta". Se for maior que 0,5 s, denomina-se *temporização longa* ou *de longa duração* (LD); até 0,5 s, tem-se a *temporização curta* ou *de curta duração* (CD).

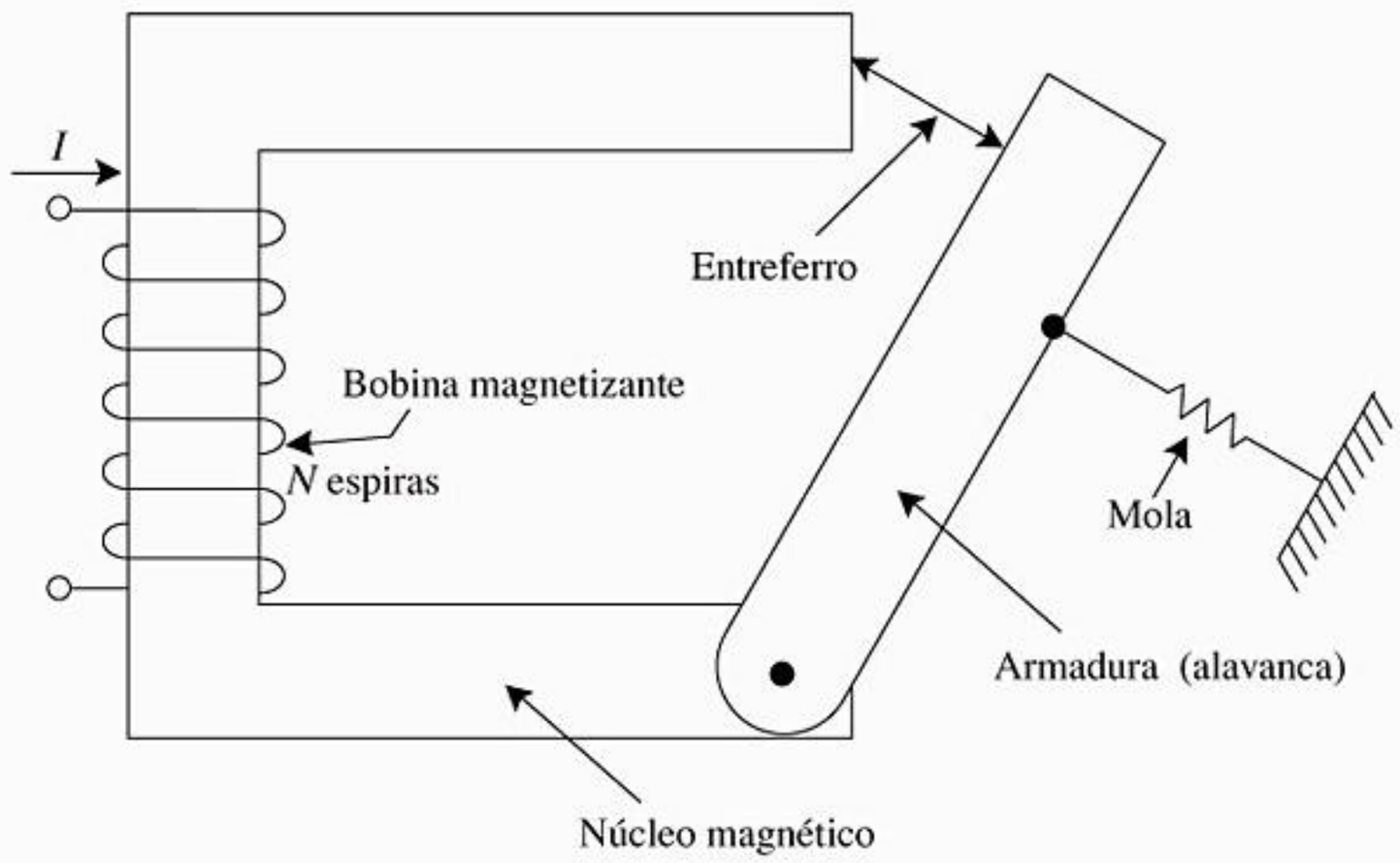


Figura 6.19 ■ Princípio de funcionamento de um disparador eletromagnético

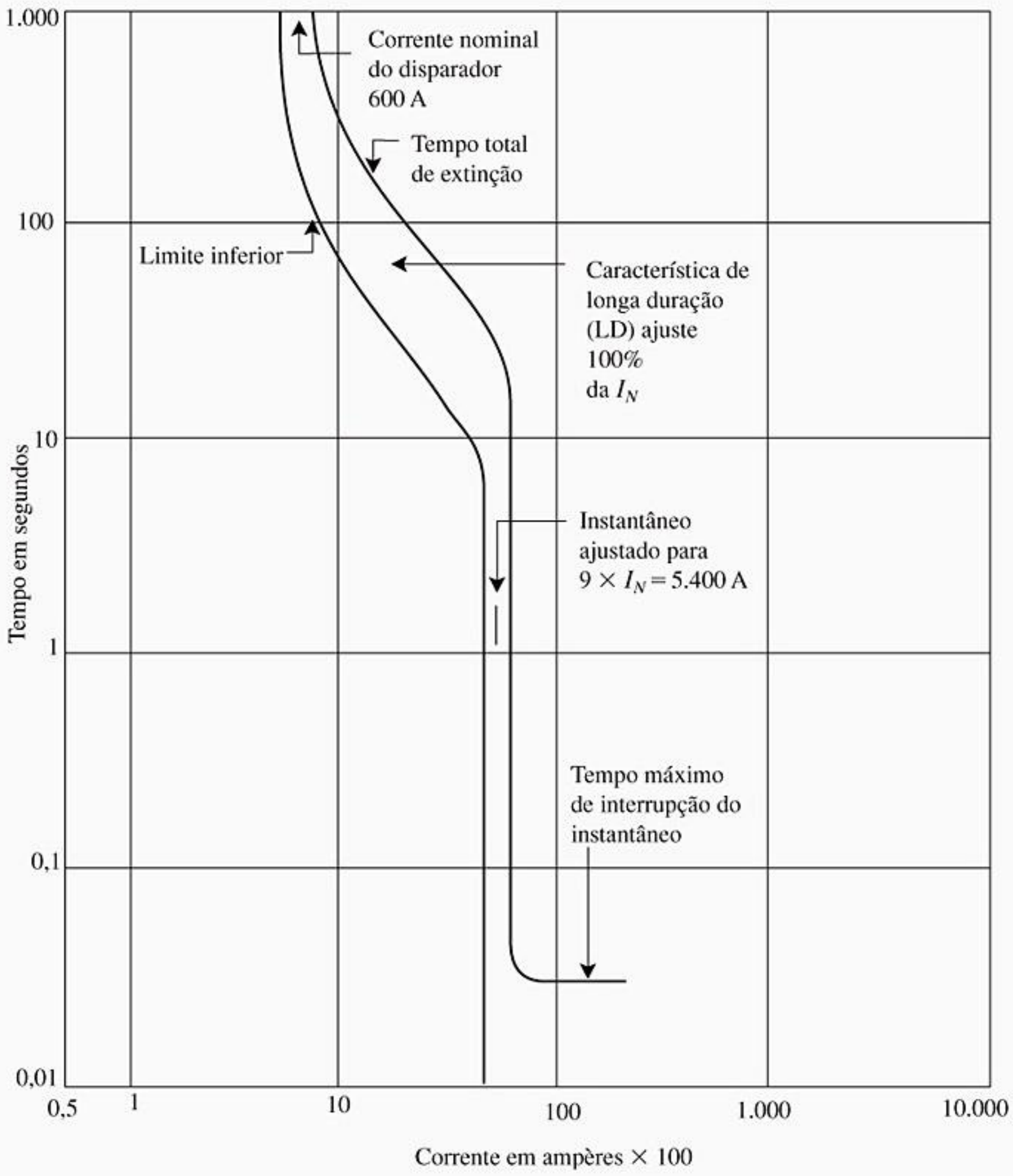


Figura 6.20 ■ Característica tempo-corrente de um disparador eletromagnético com características de longa duração e instantânea

Muitas vezes são utilizados disparadores eletromagnéticos que combinam diferentes características, tais como:

- LD + CD.
- LD + instantâneo.
- LD + CD + instantâneo.

A Figura 6.20 mostra a característica tempo-corrente de um disparador com as características de longa duração e instantânea, usadas em alguns disjuntores abertos.

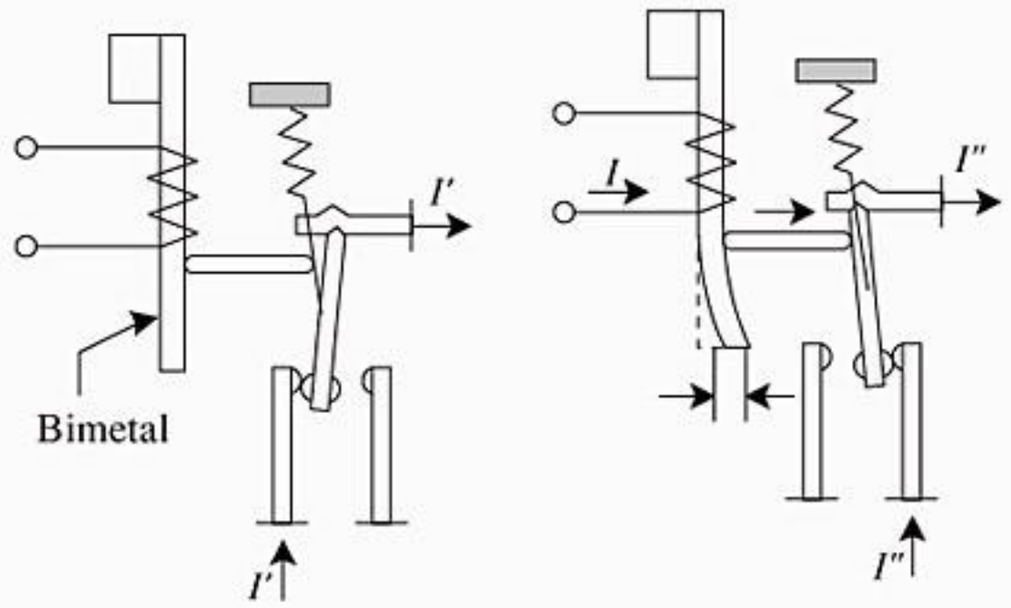
Tem-se:

- Corrente nominal: $I_N = 600$ A
- Característica LD: faixa de corrente de ajuste de 80 por cento a 160 por cento de I_N; corrente de ajuste fixada em 100 por cento $I_N = 600$ A
- Característica instantânea: faixa de corrente de ajuste de 6 a 12 I_N; corrente de ajuste fixada em 9 $I_N = 5.400$ A

Disparador térmico

Funcionamento

Os *disparadores térmicos* operam baseados no princípio dos pares (bimetálico) termoelétricos, isto é, nas diferentes



(a) Posição de repouso (b) Posição de atuação

Figura 6.21 ▪ Princípio de funcionamento de um disparador térmico bimetálico

dilatações que apresentam os metais quando submetidos a uma variação de temperatura. Duas lâminas de metais diferentes ligadas por meio de solda, sob pressão ou eletroliticamente, quando aquecidas dilatam-se diferentemente, curvando-se o conjunto, que provoca:

- A liberação do dispositivo de trava, com a conseqüente abertura dos contatos principais do disjuntor.
- O fechamento de um contato, que energiza um circuito que promove a abertura do disjuntor.

A Figura 6.21 mostra o funcionamento de um disparador térmico bimetálico.
onde:

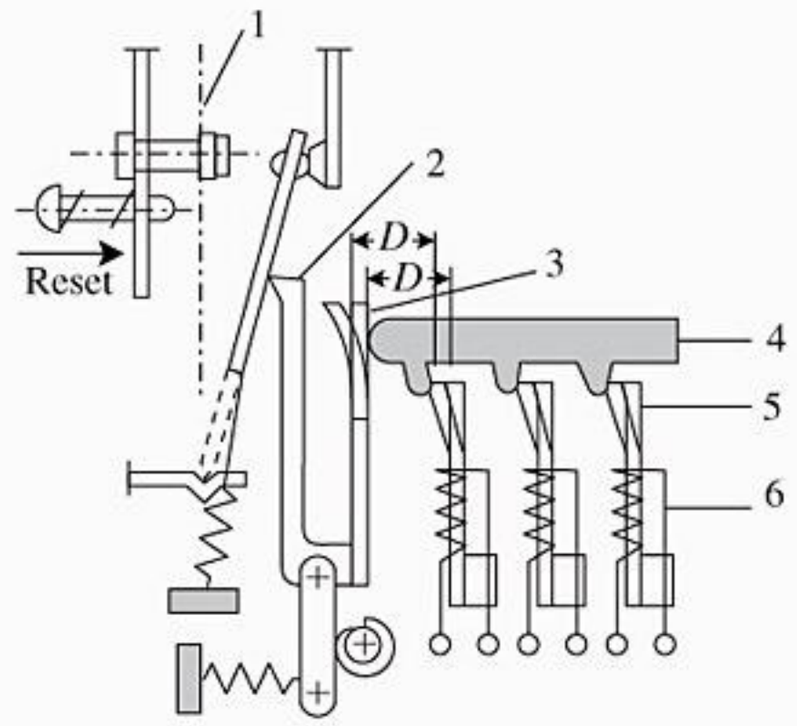
- I = corrente de operação do circuito protegido. Se a corrente for maior que o ajuste, ela promove o aquecimento que é transferido ao bimetal, que se curvará acionando a mudança nos contatos auxiliares.
- I' = corrente auxiliar de um circuito qualquer, por exemplo, sinalização, intertravamento etc.
- I'' = corrente que aciona um mecanismo de abertura do disjuntor.

Nos disjuntores, os disparadores térmicos geralmente são percorridos pela corrente de carga do circuito e devem operar de uma *corrente de operação*, referida a uma *temperatura de calibração* (ou seja, a temperatura na qual o disparador é calibrado). Para elevadas temperaturas ambientes, porém inferiores à temperatura de calibração, o disjuntor pode atuar com correntes inferiores à de operação previamente fixada.

Alguns disparadores térmicos possuem uma *faixa de corrente de ajuste* como variação realizada, atuando sobre o alongamento ou sobre a curvatura das lâminas bimetálicas.

Compensação de temperatura

Muitos disjuntores utilizam os disparadores, com *compensação de temperatura*. A Figura 6.22 mostra o princípio de funcionamento de um desses dispositivos,



Legenda:
1. Contato fixo
2. Alavanca de disparo
3. Lâmina bimetálica de compensação
4. Cursor
5. Lâminas bimetálicas das fases
6. Resistências de aquecimento das lâminas das fases

Figura 6.22 ▪ Princípio de funcionamento de um disparador térmico com compensação de temperatura

que está calibrado a uma temperatura θ, com uma corrente de operação I:

- Para uma temperatura ambiente $\theta + \Delta\theta$, as lâminas bimetálicas sofrem dilatação e se curvam, fazendo com que o cursor se desloque, percorrendo parte do seu percurso.
- Para uma corrente igual a I, o disparador já poderia atuar, o que não aconteceria se a temperatura ambiente fosse igual a θ.
- Para evitar tal atuação, é colocada uma lâmina bimetálica de compensação de mesmo material e mesmas dimensões que as lâminas, mas que não é percorrida pela corrente do circuito protegido.
- Para a temperatura ambiente $\theta + \Delta\theta$, a lâmina de compensação (3) se curvará na mesma proporção que as lâminas (5), permanecendo constante a distância D.
- Assim, as lâminas aquecidas pela corrente deverão percorrer o mesmo trajeto e resultará sempre o mesmo tempo de disparo, para uma faixa específica de temperaturas ambientes.

Disparador eletrônico (microprocessado)

Alguns disjuntores podem usar componentes eletrônicos (dispositivos semicondutores microprocessados) para monitorar os níveis de corrente, em vez de disparadores magnéticos e térmicos. Esses elementos são muito mais precisos que os convencionais e desligam o circuito mais rapidamente.

Os disjuntores equipados com disparadores eletrônicos são indicados para aplicações em que se requer ajustes de disparo e seletividade muito precisos.

Geralmente o sistema eletrônico de disparo contra sobrecorrentes compõe-se, fundamentalmente, de transformadores de corrente, de uma monitoração eletrônica por microprocessador e de um relé de disparo.

Regulamentos e normas técnicas de disjuntores

No Brasil, são utilizados os seguintes documentos técnicos para disjuntores, conforme a sua aplicação:

- *Disjuntores de alta tensão*: NBR IEC 62271-100 – Equipamentos de alta tensão – Parte 100: Disjuntores de alta tensão de corrente alternada.
- *Disjuntores de baixa tensão para uso residencial*:
  - Regulamento Técnico da Qualidade – RTQ da Portaria do Inmetro 243/2006.
  - NBR NM 60898 – Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares (IEC 60898:1995, MOD).
  - NBR IEC 60947-2 – Dispositivos de manobra e comando de baixa tensão – Parte 2: Disjuntores.
- *Disjuntores de baixa tensão para uso industrial*: NBR IEC 60947-2 – Dispositivos de manobra e comando de baixa tensão – Parte 2: Disjuntores.

Características nominais

Os disjuntores de baixa tensão são caracterizados por diversos valores nominais dependendo do documento que lhes é aplicável (ver a Seção "Regulamentos e normas técnicas de disjuntores"). Independentemente do regulamento ou norma técnica em questão, destacam-se os seguintes valores nominais, comuns a todas elas:

- *Tensão nominal*: valor de tensão ao qual são referidas certas características de funcionamento do disjuntor, por exemplo, as capacidades de interrupção e de estabelecimento nominais, bem como as categorias de desempenho em curto-circuito. Para circuitos polifásicos é a tensão entre fases e para circuitos monofásicos é a tensão entre fase e neutro.

São típicos os seguintes valores de tensões nominais de disjuntores de baixa tensão (em V): 127, 220, 240, 380, 415, 440, 460, 480, 500, 600, 690.

- *Corrente nominal*: maior valor de corrente que pode circular continuamente pelo disjuntor sem provocar seu desligamento automático nem danificar seus componentes internos e externos.

São típicos os seguintes valores de correntes nominais de disjuntores de baixa tensão:

- Regulamento Técnico da Qualidade – RTQ da Portaria do Inmetro 243/2006 (em A): 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 63.
- NBR NM 60898 – Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares (IEC 60898 : 1995, MOD) (em A): 6, 8, 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125.
- NBR IEC 60947-2 – Dispositivos de manobra e comando de baixa tensão – Parte 2: Disjuntores (em A): 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 70, 80, 90, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 320, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 1.000, 1.200, 1.400, 1.600, 1.700, 1.800, 2.000, 2.500, 3.000, 3.200, 4.000, 4.500, 5.000, 6.300.

O disparador térmico ou magnético de um disjuntor pode, em muitos casos, ser *ajustável* e, nessas condições, o disjuntor é caracterizado por uma *corrente de operação* diferente da corrente nominal. Por exemplo, seja um disjuntor termomagnético de corrente nominal $I_N = 100$ A, com disparador térmico com faixa de corrente de ajuste de 0,7 I_N a 1,0 I_N. Nesse caso, pode-se afirmar que a corrente nominal do disjuntor é 100 A e a sua corrente de operação poderá variar, conforme o ajuste, de 70 A a 100 A.

Recomenda a NBR IEC 60947-2 que os disparadores a sobrecorrente que não os térmicos operem, independentemente da temperatura ambiente, na faixa de –5 °C a + 40 °C. Para os disparadores térmicos, a corrente de operação (igual à corrente nominal no caso de disparadores não ajustáveis) deverá ser referida a uma temperatura ambiente de + 20 °C ou de + 40 °C. A NBR NM 60898 estabelece a temperatura de referência a + 30 °C, enquanto o Regulamento Técnico da Qualidade – RTQ da Portaria do Inmetro 243/2006 determina a calibração a + 25 °C. Em todos os casos, caberá ao fabricante indicar a influência das variações dessa temperatura na corrente de nominal ou de operação.

- *Correntes convencionais de atuação e de não atuação (ver definições na Seção 6.2):* a Tabela 6.3 indica os valores nominais utilizados para essas correntes nos diferentes documentos.

EXEMPLO

Seja um disjuntor em caixa moldada conforme RTQ da Portaria do Inmetro 243 com corrente nominal $I_N =$ 35A. Pela Tabela 6.3, verifica-se que suas correntes convencionais de atuação e de não atuação valem

$$I_a = I_2 = 1{,}35 \times 35 = 47{,}25 \text{ A}$$
$$I_{na} = 1{,}05 \times 35 = 36{,}75 \text{ A}$$

e que o tempo convencional é de 1 hora. Isso significa que o disjuntor deve poder conduzir a corrente de 36,75 A por 1 hora, sem atuar e que, circulando a corrente de 47,25 A, sua atuação deve dar-se, no máximo, em 1 hora.

Tabela 6.3 ■ Correntes convencionais de atuação, de não atuação e tempos convencionais para disjuntores termomagnéticos, de acordo com o RTQ da Portaria do Inmetro 243, a NBR NM 60898 e a NBR IEC 60947-2

Documento	I_n (A)	Θ_a (°C)	I_{na}	I_a	t_c (h)
RTQ da Portaria do Inmetro 243	≤ 50	25	1,05 I_n	1,35 I_n	1
	> 50				2
NBR NM 60898	≤ 63	30	1,13 I_n	1,45 I_n	1
	> 63				2
NBR IEC 60947-2	≤ 63	30	1,05 I_n	1,30 I_n	1
	> 63				2

I_n = corrente nominal (ou se ajuste) do disjuntor
I_{na} = corrente convecional de não atuação do disjuntor
I_a = corrente concecional de atuação do disjuntor
Θ_a = temperatura do ar ambiental durante o ensaio

- *Freqüência nominal*: 60 Hz.
- *Capacidade de interrupção:* também referido como *capacidade de ruptura*, é a maior corrente de curto-circuito que o disjuntor consegue interromper sem se danificar, referida às suas características nominais de tensão, freqüência e para um fator de potência determinado.

Os valores de capacidade de interrupção de disjuntores de baixa tensão podem variar, geralmente, na faixa de 1,5 a 200 kA, dependendo do modelo de cada fabricante.

- *Faixas de atuação instantânea:* no caso específico da norma NBR NM 60898, são definidas três faixas de atuação instantâneas (em curto-circuito), a saber (ver Figura 6.23):

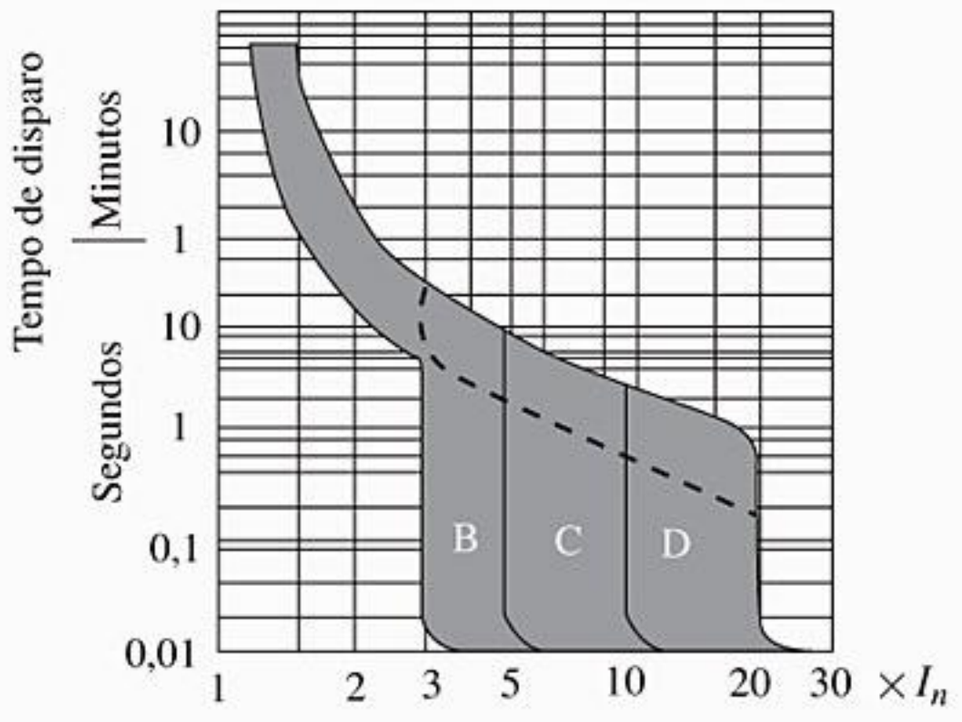


Figura 6.23 ■ Faixas de atuação instantâneas de disjuntores conforme a NBR NM 60898

- *Faixa B*: atuação instantânea do disparador para correntes acima de 3 I_N até 5 I_N, inclusive. São indicados para a proteção de circuitos onde são previstas baixas correntes de curto-circuito presumidas, como aqueles compostos por linhas longas de condutores de pequena seção transversal. Devem ser evitados onde houver equipamentos com correntes de partida ou correntes transitórias moderadas ou altas.
- *Faixa C*: atuação instantânea do disparador para correntes acima de 5 I_N até 10 I_N, inclusive. São indicados para a proteção de circuitos elétricos em geral e devem ser evitados onde houver altas correntes de partida ou transitórias.
- *Faixa D*: atuação instantânea do disparador para correntes acima de 10 I_N até 20 I_N, inclusive. São indicados para a proteção de circuitos com elevadas correntes de partida ou transitórias.

A faixa de atuação instantânea deve vir gravada no corpo dos disjuntores. Por exemplo, *D50*, significa que o disjuntor é do tipo (faixa ou curva) *D* com corrente nominal 50 A.

Nos casos do RTQ da Portaria do Inmetro 243 e da norma NBR IEC 60947-2, a definição da faixa de atuação instantânea é deixada por conta de cada fabricante. Dessa forma, é importante ter acesso às curvas características tempo-corrente, para que seja escolhido o disjuntor mais adequado em função do tipo de circuito a ser protegido. A Figura 6.24 fornece um exemplo de curva característica de um disjuntor caixa moldada conforme a NBR IEC 60947-2.

Disjuntores em caixa moldada

Os disjuntores em caixa moldada são o tipo mais comum de disjuntor de baixa tensão. Em sua grande maioria, são termomagnéticos, equipados com disparadores térmicos (cuja característica pode ser considerada de longa duração) e disparadores eletromagnéticos ins-

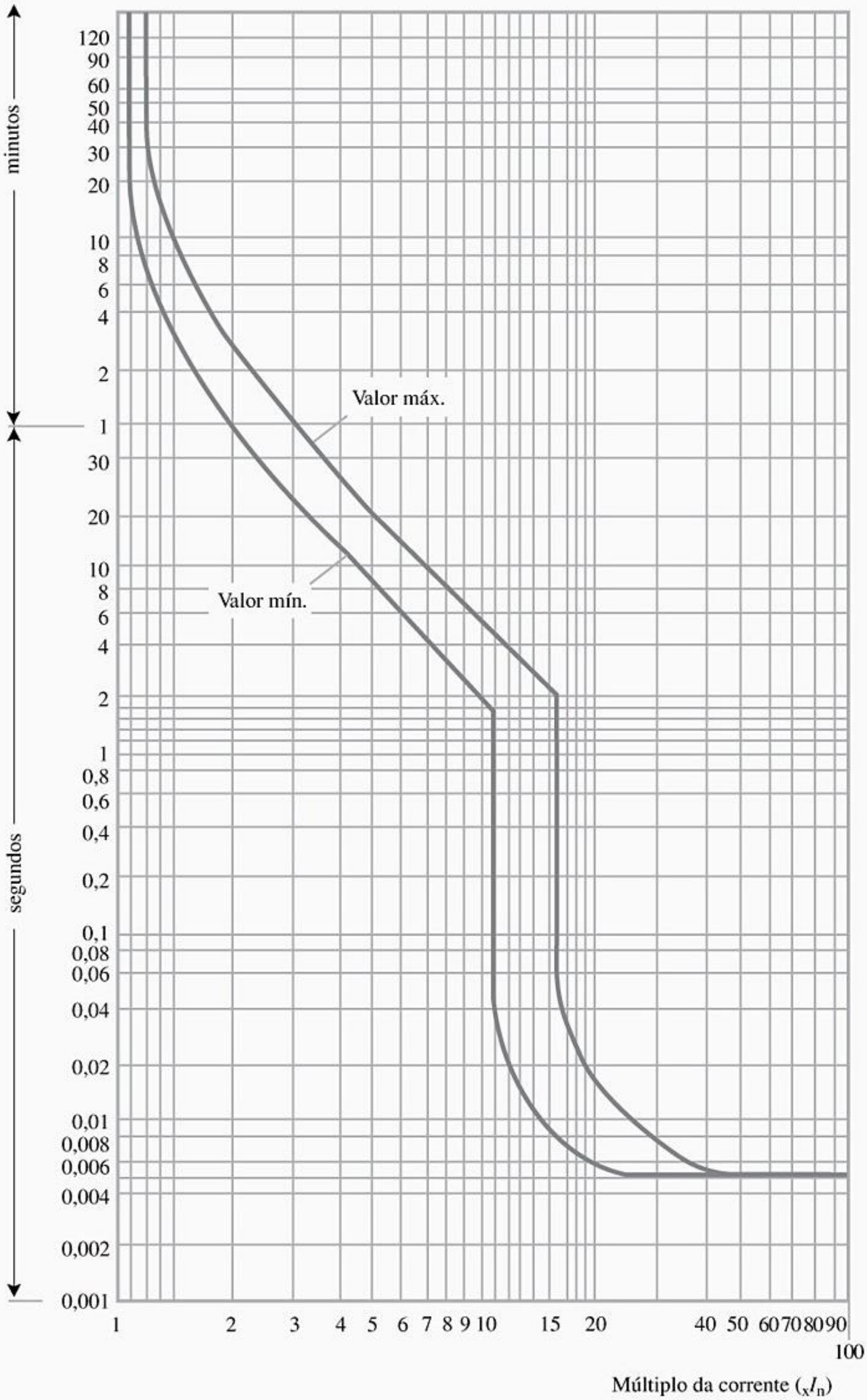


Figura 6.24 ■ Curva característica de um disjuntor em caixa moldada, conforme a NBR IEC 60947-2



Figura 6.25 ■ Disjuntores conforme RTQ da Portaria do Inmetro 243

tantâneos, com correntes nominais de 5 a 3.000 A. São utilizados na proteção de circuitos de distribuição, de circuitos terminais e de equipamentos, geralmente montados em quadros de distribuição.

Dentre os disjuntores em caixa moldada destacam-se os chamados *pequenos disjuntores* (ou "minidisjuntores"), com correntes nominais na faixa de 5 a 125 A, utilizados, principalmente, na proteção de circuitos terminais e também na proteção e no comando de certos equipamentos (por exemplo, condicionadores de ar tipo janela) e na proteção de circuitos de distribuição divisionários. A figura 6.25 mostra exemplos de disjuntores conforme RTQ da Portaria do Inmetro 243. A figura 6.26 mostra curva característica de disjuntores conforme NBR NM 60898.

Dependendo do documento técnico correspondente, os pequenos disjuntores são calibrados a 20 °C, 25 °C ou 40 °C e, em geral, são instalados em quadros de distribuição. Nesses quadros, a temperatura é superior à temperatura ambiente do local em que se encontram, de no mínimo 10 °C, dependendo da ocupação (quantidade de disjuntores).

Como geralmente, os pequenos disjuntores em caixa moldada não são compensados, a corrente nominal (isto é, a corrente de operação dos disparadores térmicos) pode ser modificada e fica reduzida pela aplicação de um fator, conforme exemplo da Figura 6.27.

6.5 Dispositivos a corrente diferencial-residual

Generalidades

Os *dispositivos a corrente diferencial-residual*, abreviadamente *dispositivos DR*, constituem-se no meio mais eficaz de proteção das pessoas (e dos animais domésticos) contra choques elétricos, sendo largamente utilizados hoje em quase todos os países do mundo. São o único meio "ativo" de proteção contra contatos diretos e, na grande maioria dos casos, o meio mais adequado para proteção contra contatos indiretos. Por sua vez, podem exercer proteção contra incêndios e também se constituir em "vigilantes" da qualidade da instalação.

O dispositivo DR detecta a soma fasorial das correntes que percorrem os condutores vivos de um circuito em determinado ponto do circuito, ou seja, a *corrente diferencial-residual* (I_{DR}) no ponto considerado provoca a interrupção do circuito, dentro de um tempo especificado, quando I_{DR} ultrapassa um valor preestabelecido, chamado *corrente diferencial-residual nominal de atuação* ($I_{\Delta N}$). Ver Figura 6.28.

Teoricamente, em um circuito normal, a soma fasorial das correntes que percorrem os condutores vivos, mesmo que haja um desequilíbrio de correntes (circuito trifásico desequilibrado) é igual a zero (1ª Lei de Kirchhoff), ou seja, a corrente diferencial-residual é nula. Na prática, no entanto, não existe nenhum circuito absolutamente "normal": os equipamentos de utilização e as linhas elétricas sempre apresentam correntes de fuga consideradas "normais". São essas correntes e as eventuais correntes de falta fase-massa que os dispositivos DR sentem, isto é:

- Sem fuga ou falta

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 + i_n = 0 & (i_{DR} = 0) \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_n = 0 & (\dot{I}_{DR} = 0) \end{cases}$$

- Com fuga ou falta

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 + i_n = 0 & (i_{DR} \neq 0) \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_n = 0 & (\dot{I}_{DR} \neq 0) \end{cases}$$

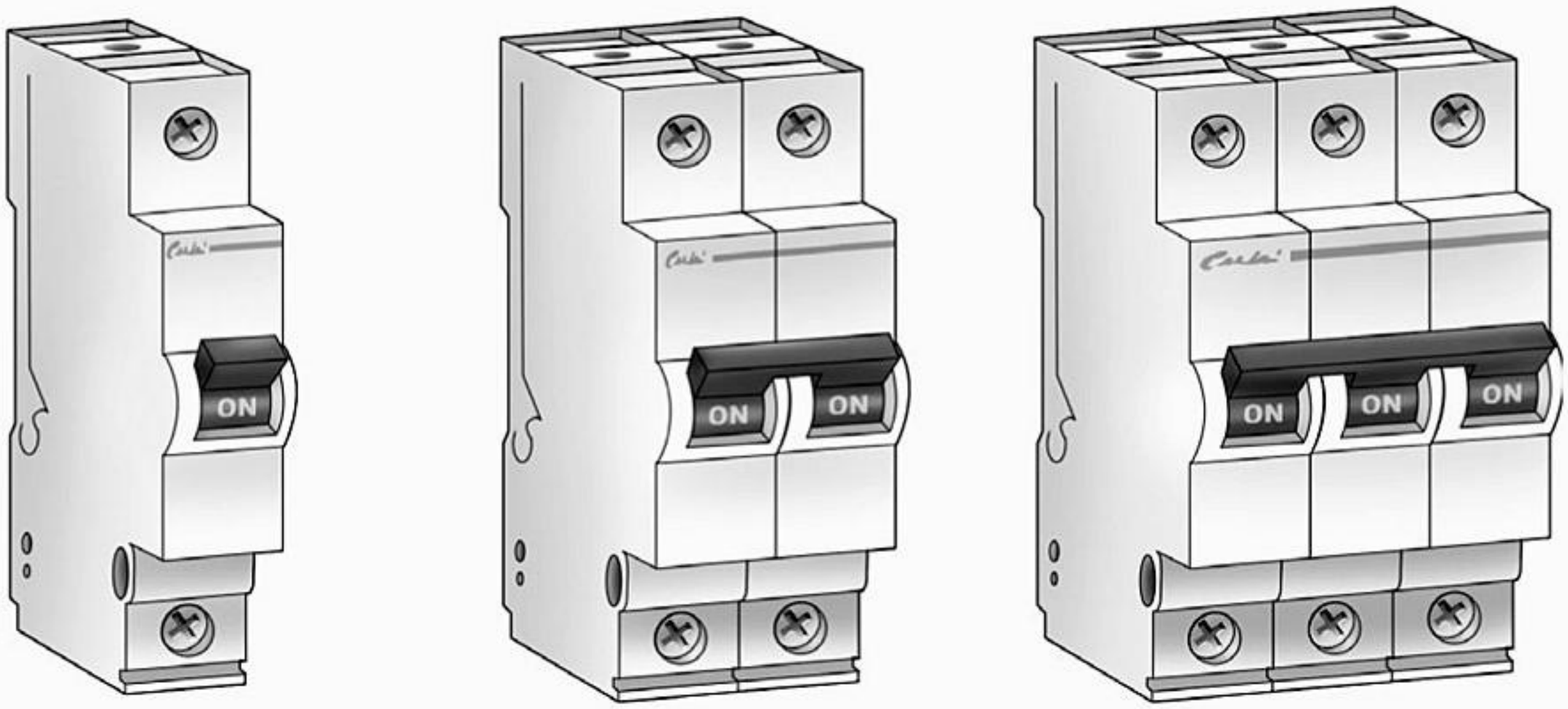


Figura 6.26 ■ Disjuntores conforme NBR NM 60898

Principais funções de um DR

As três principais funções que os componentes de um dispositivo DR devem desempenhar são:

(a) *Detecção*: consiste em o dispositivo sentir a presença de uma corrente residual. Isso pode ser feito, por exemplo, por um transformador ou por um sistema eletrônico.

(b) *Avaliação*: é a função que dá ao DR a possibilidade de operar quando a corrente residual detectada excede de certo valor de referência especificado.

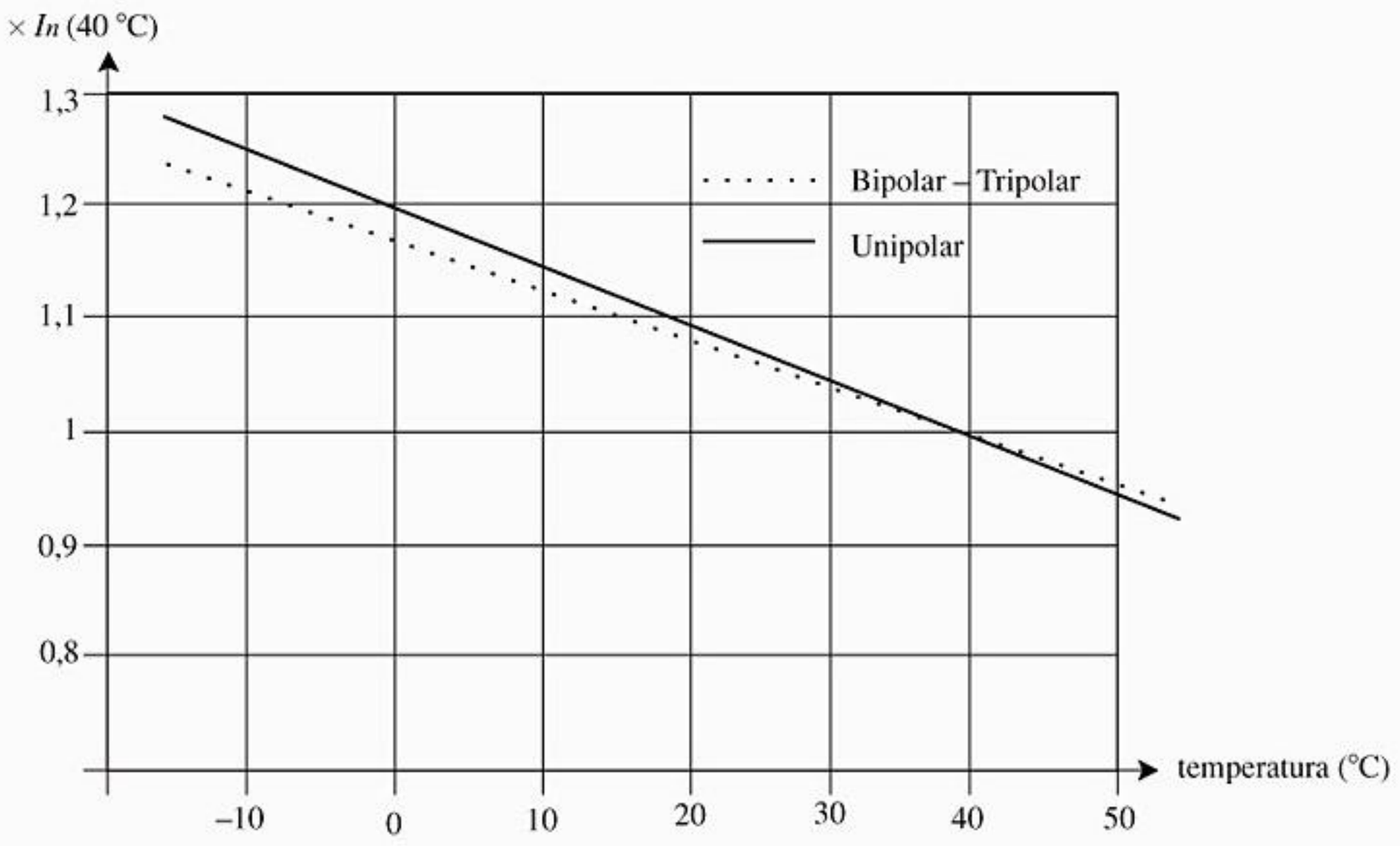


Figura 6.27 ■ Fator de correção típico aplicável aos disjuntores termomagnéticos. Tibra e Supertibra (Cortesia da Bticino)

(c). *Interrupção*: consiste em mover automaticamente os contatos principais do DR da posição *fechado* para a posição *aberto*, interrompendo assim o fluxo de corrente por ele.

A Figura 6.29 indica esquematicamente as partes essenciais de um dispositivo DR, assinalando as respectivas funções.

O circuito magnético de um DR, para poder detectar a corrente diferencial-residual, deve envolver todos os

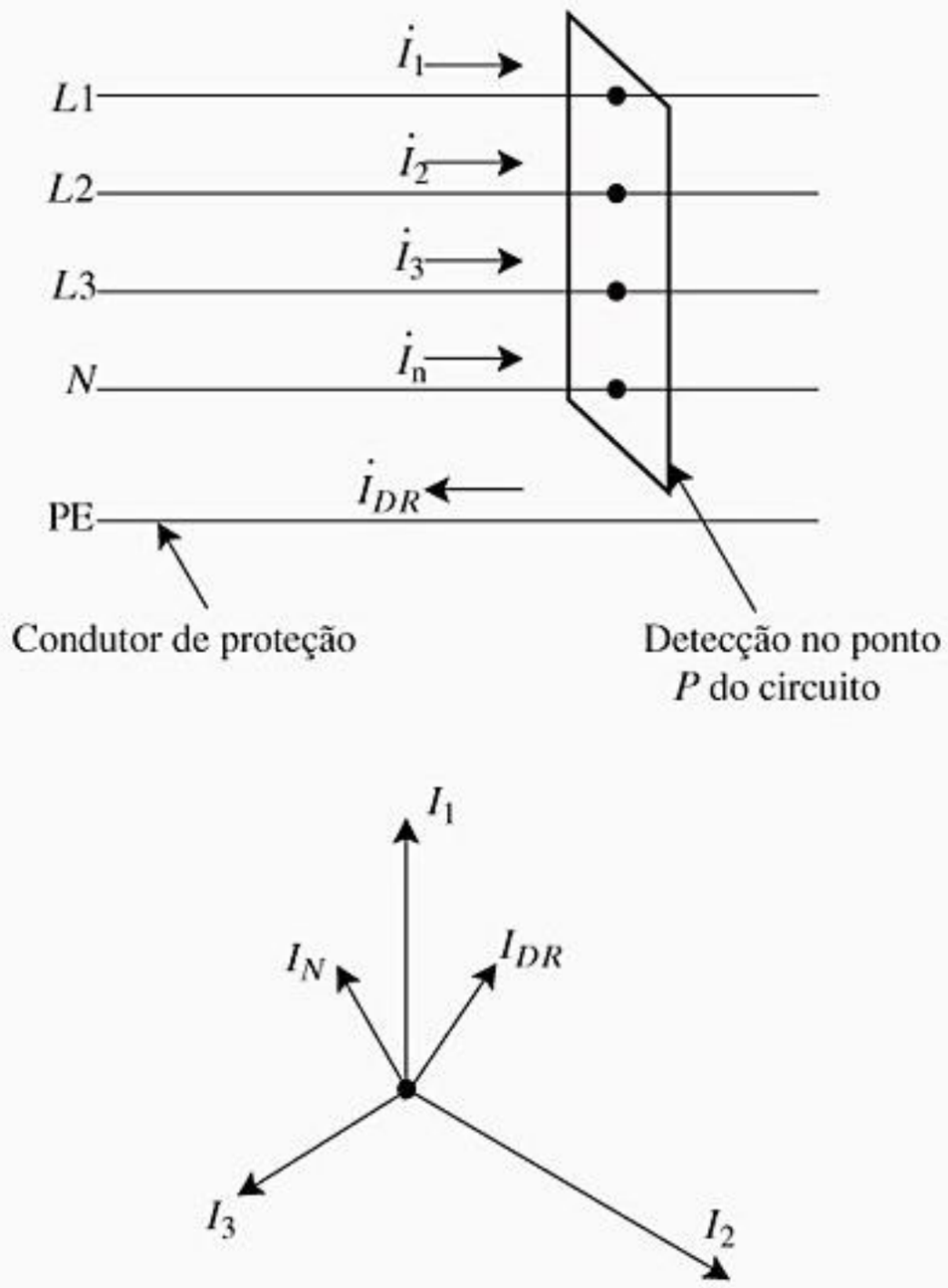


Figura 6.28 ▪ Corrente diferencial-residual em um circuito

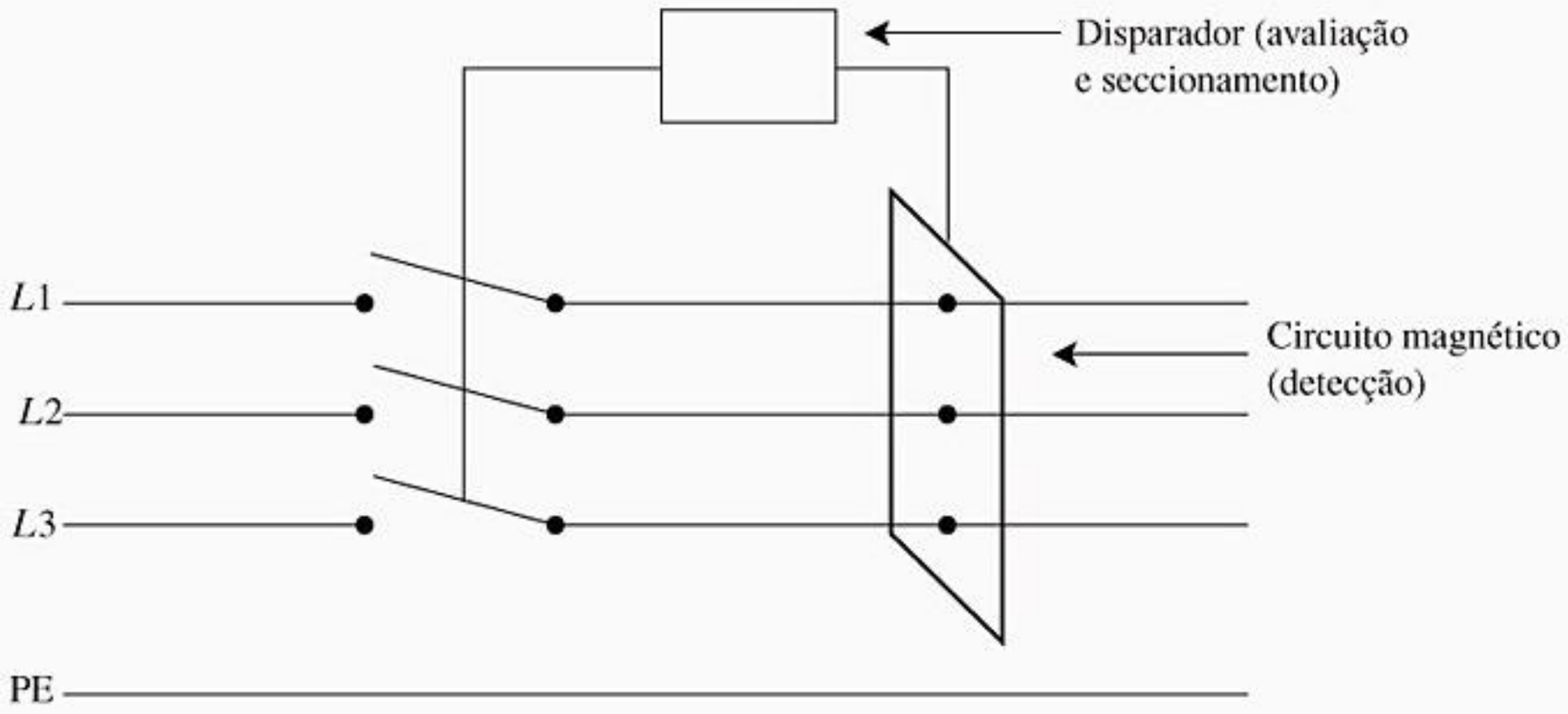


Figura 6.29 ▪ Partes essenciais de um dispositivo DR

condutores vivos do circuito (fase e neutro); o condutor de proteção correspondente deve ser exterior ao circuito magnético (Figuras 6.28 e 6.29). Em circuitos de instalações com esquema TN-C (isto é, que usam condutores PEN) não podem ser aplicados dispositivos DR.

No dispositivo DR, o *disparador* pode ser acionado diretamente pelo circuito magnético ou por meio de um amplificador de estado sólido, e deve promover o seccionamento (abertura) de todos os condutores vivos do circuito.

DRs com e sem fonte auxiliar

Os DRs podem ser classificados em dois grandes grupos, quanto ao modo como são realizadas as suas funções principais:

(a) *DRs sem fonte auxiliar*: são aqueles nos quais as funções de detecção, avaliação e interrupção não dependem de uma fonte auxiliar (geralmente a própria rede de alimentação normal da instalação). Isso ocorre, por exemplo, quando o disparador é acionado diretamente pelo circuito magnético, como é o caso dos *dispositivos eletromecânicos*;

(b) *DRs com fonte auxiliar*: são aqueles nos quais as funções de detecção, avaliação e interrupção dependem de uma fonte auxiliar (geralmente a própria rede de alimentação normal da instalação). Isso ocorre, por exemplo, com os chamados DRs eletrônicos.

Sensibilidade

Os dispositivos DR podem ser também classificados quanto à *sensibilidade*: quanto *maior* o valor da corrente diferencial-residual nominal de atuação, *menor* a sensibilidade. Os dispositivos com $I_{\Delta N} \leq 30$ mA são considerados *de alta sensibilidade*, oferecendo proteção contra contatos diretos e contra contatos indiretos; aqueles com $I_{\Delta N} > 30$ mA são *de baixa sensibilidade*, oferecendo apenas proteção contra contatos indiretos.

Interruptores e disjuntores DR

No que concerne às funções executadas, os DRs podem ser:

- *Interruptores DR*: destinados unicamente à proteção contra choques elétricos por contato direto (os de alta sensibilidade) e por contato indireto (os de alta e de baixa sensibilidade); possuem, geralmente, baixa capacidade de interrupção e podem ser acoplados a um disjuntor.
- *Disjuntores DR*: dispositivos mais completos, com capacidade de interrupção mais elevada, que garantem, além da proteção contra choques elétricos, a proteção contra sobrecorrentes, isto é, contra correntes de sobrecarga e de curto-circuito.

É importante notar que ambos os tipos exercem também as funções de comando e de seccionamento.

Princípio de funcionamento de um DR eletromecânico

Um dispositivo DR do tipo eletromecânico é constituído por (Figura 6.30):

- Um *transformador* com núcleo laminado de material com alta permeabilidade, com tantas bobinas primárias quantos forem os pólos do dispositivo e com uma bobina secundária destinada a detectar a corrente diferencial-residual; os condutores vivos são ligados às bobinas primárias.
- Um *relé polarizado* (disparador diferencial) constituído por um núcleo, um ímã permanente, uma bobina ligada à bobina secundária do transformador e uma peça móvel fixada de um lado por uma mola e ligada mecanicamente aos contatos do dispositivo; na condição de repouso a peça móvel está na posição fechada, encostada no núcleo e tracionando a mola.
- Um *circuito de prova* contendo uma resistência e um botão (de prova), destinado a simular uma falta, provocando a abertura dos contatos.
- Eventualmente, um *circuito comutador de sensibilidade* constituído por uma bobina enrolada no núcleo do transformador e por um comutador (de sensibilidade), destinado a alterar a corrente diferencial-residual nominal de atuação do dispositivo.

Na condição (teórica) de correntes iguais nos condutores vivos do circuito, as forças magnetomotrizes das bobinas primárias se anulam e não existe fluxo no núcleo do transformador; na bobina secundária não é gerada nenhuma força eletromotriz. A parte móvel do relé polarizado está em contato com o núcleo, tracionando a mola, atraída pelo campo do ímã permanente.

Quando o fluxo resultante no núcleo do transformador for diferente de zero, isto é, quando existir uma corrente diferencial-residual, será gerada uma força eletromotriz na bobina secundária e uma corrente percorrerá a bobina do núcleo do relé polarizado. Quando a corrente diferencial-residual for igual ou superior à corrente diferencial-residual nominal de atuação do dispositivo, o fluxo criado no núcleo do relé polarizado pela corrente proveniente da bobina secundária do transformador provocará sua desmagnetização. A ação da mola desloca o braço *b2* que libera a trava, abrindo os contatos principais do dispositivo, desenergizando o circuito.

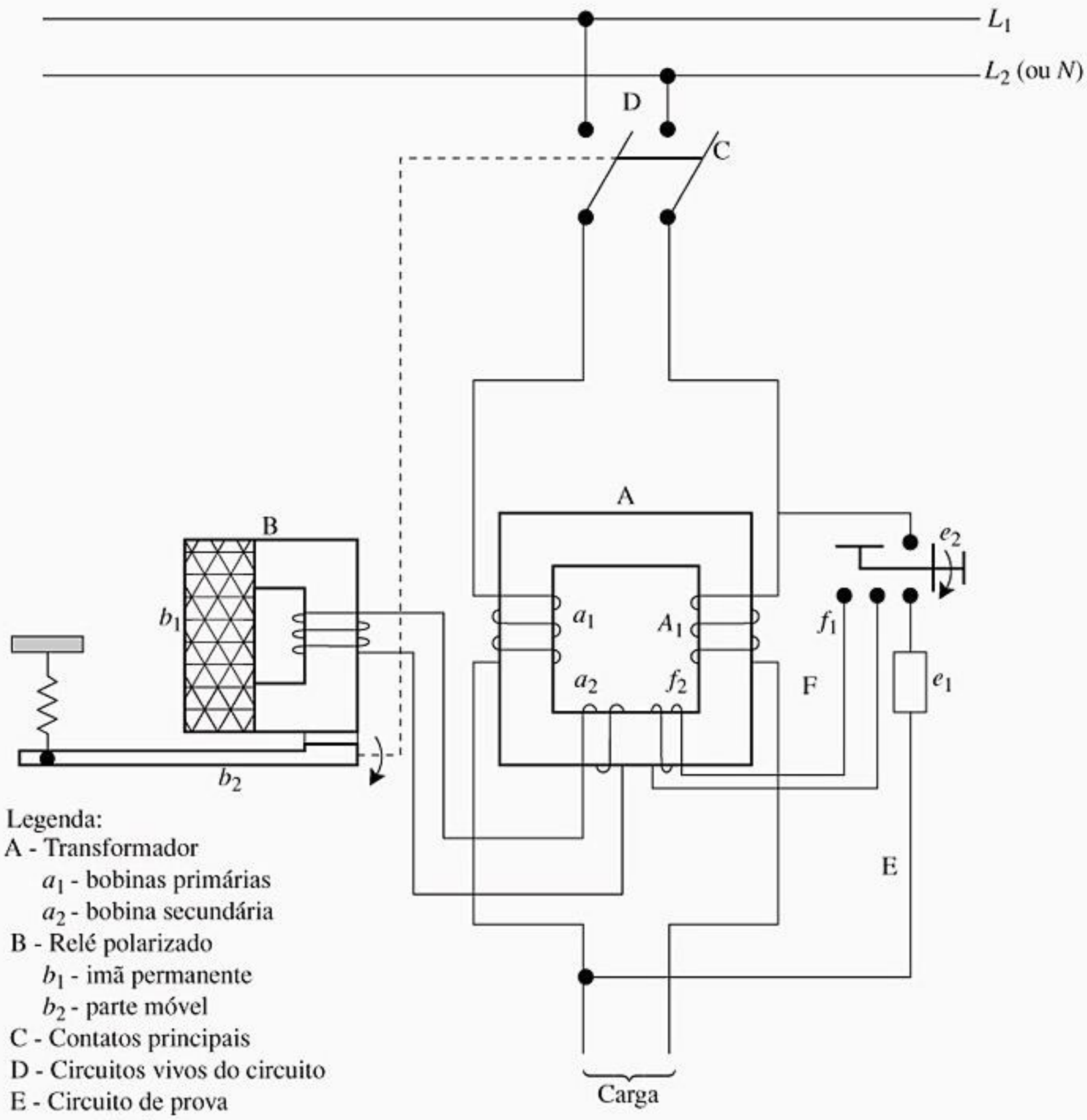


Figura 6.30 ▪ Dispositivo DR Bipolar

Fechando o contato do circuito de prova, simula-se a existência de uma corrente diferencial-residual superior ao valor nominal (por meio de resistência adequada) e pode-se verificar o funcionamento correto do dispositivo.

O fechamento do contato do circuito comutador de sensibilidade provoca, no caso de existência de corrente diferencial-residual no circuito, o aparecimento de outra força magnetomotriz no núcleo do transformador, reduzindo o fluxo resultante e, portanto, reduzindo a sensibilidade do dispositivo. Em outras palavras, com essa operação são inseridas espirais adicionais no secundário do transformador, sendo então necessário um valor maior de corrente diferencial-residual para determinar a atuação do dispositivo.

Observe que a segurança e a precisão de um dispositivo DR residem na utilização de materiais magnéticos de alta qualidade e em uma construção mecânica acurada. São conseguidos tempos de atuação da ordem de poucas dezenas de milissegundos para qualquer corrente acima da corrente diferencial-residual nominal de atuação.

Características

Conforme a IEC 60755, os dispositivos DR, interruptores ou disjuntores, são caracterizados pelos seguintes valores nominais:

- Corrente nominal (I_N): maior valor de corrente que pode circular continuamente pelo dispositivo e que pode ser interrompida sem danificar seus componentes. Os valo-

res característicos são (em A): 6, 10, 16, 20, 25, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200.

- Tensão nominal (U_N): valor de tensão ao qual são referidas certas características de funcionamento do DR. Os valores característicos são (em V): 100, 110, 120, 200, 220, 230, 240, 380, 400, 415 e 440.
- Freqüência nominal (f). Os valores característicos são (em Hz): 50/60 Hz.
- Corrente diferencial-residual nominal de atuação ($I_{\Delta N}$): corrente diferencial-residual que provoca a atuação do dispositivo. Os valores característicos são (em A): 0,006; 0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 0,5, 1; 3; 5; 10; 20.
- Capacidade de interrupção nominal (I_{CN}): maior corrente de curto-circuito que o DR consegue suportar sem se danificar, referida às suas características nominais de tensão, freqüência e para um fator de potência determinado. Os valores característicos são (em kA): 0,5; 1; 1,5; 3; 4,5; 6; 10; 20; 50.

Deve-se ainda considerar a *corrente diferencial-residual de não atuação* ($I_{\Delta N0}$) fixada em 0,5 $I_{\Delta N}$. Isso significa que um dispositivo DR pode atuar para qualquer valor de corrente diferencial-residual superior a 0,5 $I_{\Delta N}$. Por essa razão, na escolha de um DR para um determinado circuito, deve ser estimada criteriosamente a corrente de fuga que pode circular durante o funcionamento normal das cargas alimentares pelo circuito. Se o valor dessa corrente for superior a 0,5 $I_{\Delta N}$, o dispositivo poderá atuar sem que haja nada de anormal no circuito. Assim, para o correto funcionamento de um dispositivo DR, deve ser observada a condição

$$I_f \leq 0{,}5\, I\Delta_N$$

sendo I_f a corrente de fuga total pelo isolamento das cargas alimentadas.

Os tempos de atuação máximos dos dispositivos DR são fixados em função de valores da corrente diferencial-residual múltiplos de $I_{\Delta N}$, como mostra a Tabela 6.4.

Tipos de correntes que são detectadas pelos DRs

É importante observar que certos equipamentos de utilização podem dar origem a componentes contínuos em circuitos CA; é o caso de equipamentos contendo diodos, tiristores etc. Com isso, os DRs devem ser capazes de detectar não apenas as correntes senoidais, mas também as correntes com componentes contínuas. Dessa forma, os DRs são classificados em três categorias:

(a) Tipo *AC*: sensível apenas a correntes alternadas senoidais.
(b) Tipo *A*: sensível a correntes alternadas senoidais e correntes contínuas pulsantes.
(c) Tipo *B*: sensível a correntes alternadas senoidais, correntes contínuas pulsantes e correntes contínuas puras (lisas).

Em instalações elétricas com grande presença de cargas eletrônicas deve ser considerada a utilização de, pelo menos, DRs tipo *A*, enquanto que nas instalações mais usuais, tais quais as residenciais, o DR tipo *AC* pode funcionar adequadamente.

Tipos construtivos de DRs

Os tipos construtivos de DRs existentes no mercado mundial podem ser agrupados como segue:

- Interruptores diferenciais-residuais para uso em painéis (ver Figura 6.31).
- Disjuntores com proteção diferencial-residual incorporada para uso em painéis (ver Figura 6.32).
- Tomadas com interruptor diferencial-residual incorporado para uso em caixas de ligação instaladas em paredes ou tipo condulete (ver Figura 6.33).

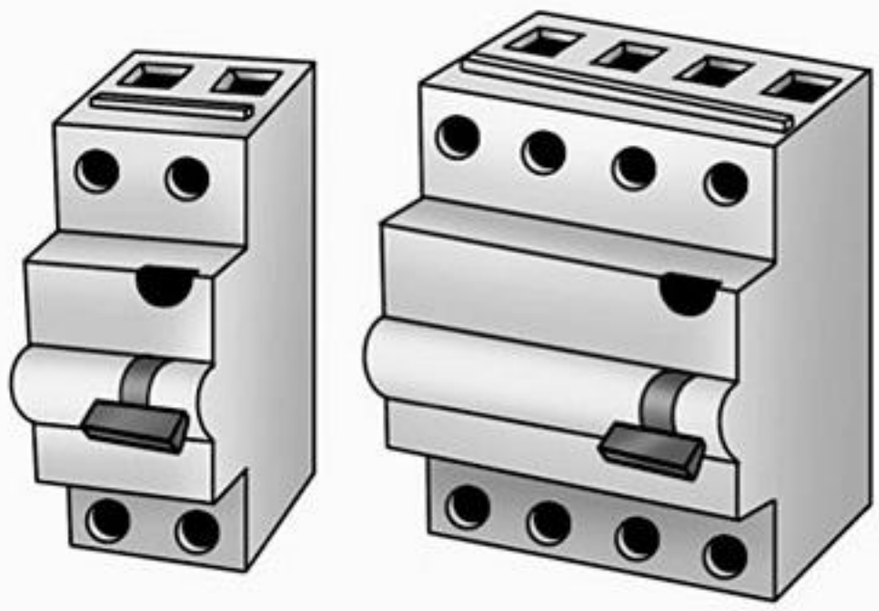


Figura 6.31 ■ Interruptores diferenciais-residuais para uso em painéis

Tabela 6.4 ■ Tempos máximos de atuação dos dispositivos DR

$I_{\Delta N}$ (mA)	Tempo máximo (s)		
	$I_{\Delta N}$	2 $I_{\Delta N}$	0,25 A
6	5	1	0,04
10	5	0,05	0,04
30	0,5	0,2	0,04

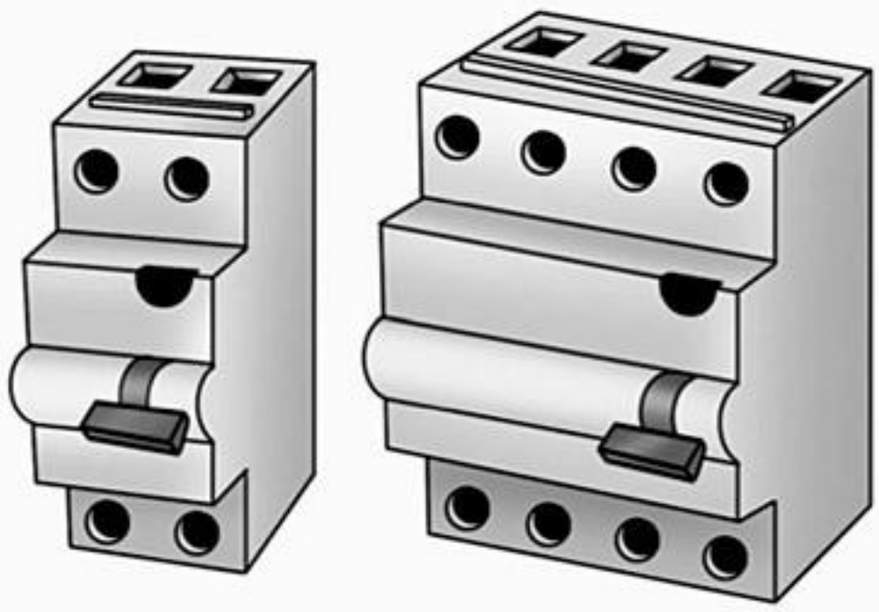


Figura 6.32 ▪ Disjuntores com proteção diferencial-residual incorporada para uso em painéis



Figura 6.33 ▪ Tomadas com interruptor diferencial-residual incorporado para uso em caixas de ligação instaladas em paredes ou tipo condulete



Figura 6.34 ▪ Interruptores diferenciais-residuais para uso em caixas de ligação instaladas em paredes ou tipo condulete



Figura 6.35 ▪ Interruptores diferenciais-residuais para uso móvel ou incorporado a cordões de ligações de equipamentos

- Interruptores diferenciais-residuais para uso em caixas de ligação instaladas em paredes ou tipo condulete (ver Figura 6.34).
- Interruptores diferenciais-residuais para uso móvel ou incorporado em cordões de ligações de equipamentos (ver Figura 6.35).
- Blocos diferenciais-residuais acopláveis a disjuntores
- Componentes avulsos, tais como relés diferenciais e transformadores de corrente, que são associados ao disparador de disjuntores e contatores.

Proteção contra contatos diretos

Os fatos mostram que a maior parte dos acidentes de origem elétrica é devida a contatos diretos, resultantes de falta de manutenção, de negligência ou de imprudência dos usuários. Como exemplo, são comuns os acidentes em que há o contato com um condutor "descascado" de um cabo multipolar flexível que alimenta um aparelho portátil, como, uma enceradeira ou um ferro de passar roupa, ou a introdução, por uma criança, de um grampo ou de um clipe em um dos orifícios de uma tomada de corrente.

As medidas de proteção contra contatos diretos prescritas pela NBR 5410 (e analisadas na Seção 3.5) são passivas, relacionadas principalmente com disposições de ordem construtiva. Entretanto, por mais bem executadas que sejam, tais medidas têm sua eficácia comprometida com o passar do tempo, pelo uso do componente, pelo envelhecimento dos materiais etc.

Nessas condições, fica bastante evidente a necessidade de *proteção adicional* contra contatos diretos, proporcionada pelos dispositivos DR de alta sensibilidade, como recomenda a NBR 5410.

A Figura 6.36 mostra a atuação de um dispositivo DR com $I_{\Delta N}$ = 30 mA na proteção contra contatos diretos, superpondo sua característica de atuação às zonas de tempo-corrente da IEC-60479.

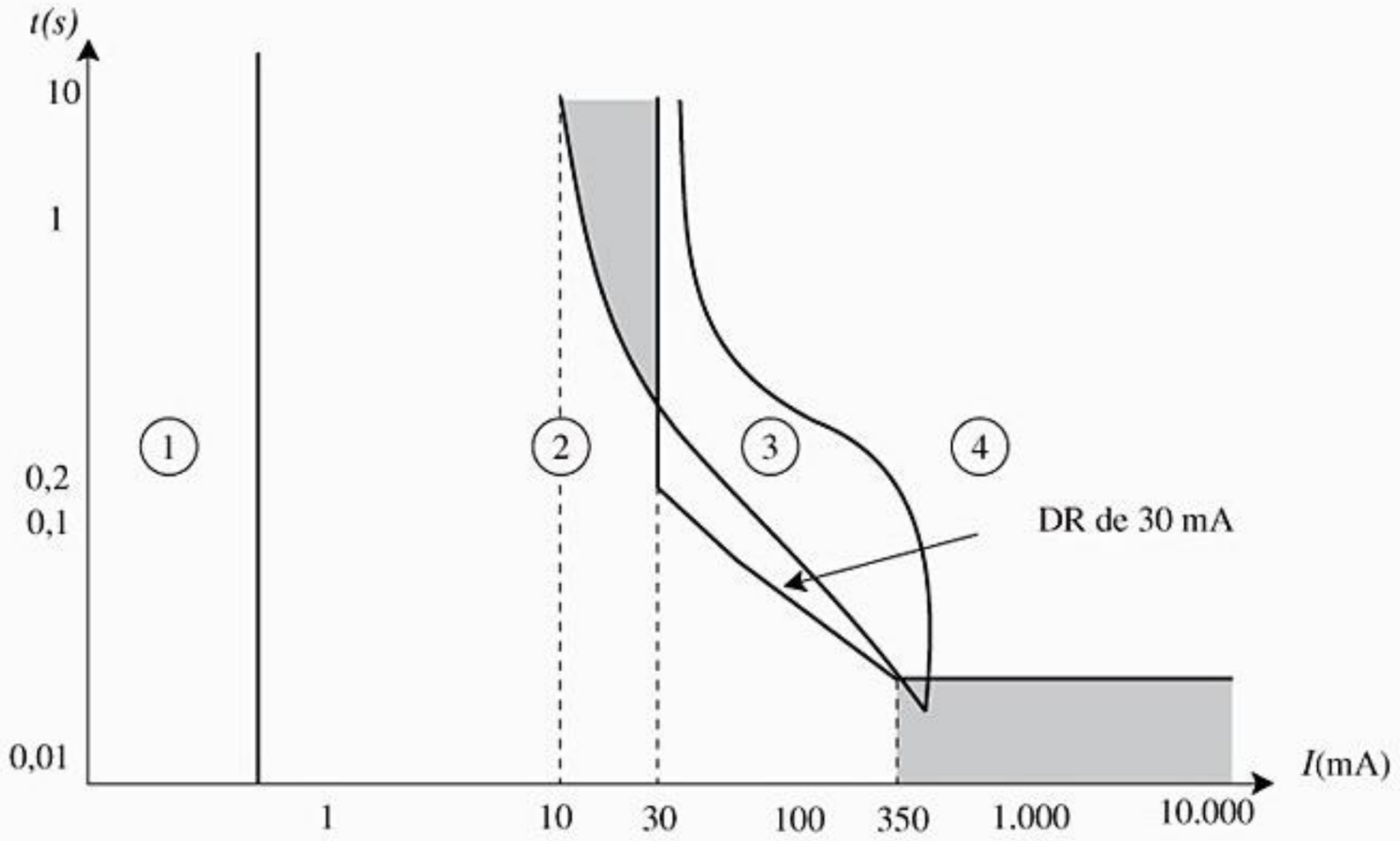


Figura 6.36 ■ Atuação de um dispositivo DR de 30 mA na proteção contra contatos diretos

Verifica-se que o dispositivo oferece (considerando os tempos máximos de atuação) proteção entre 30 e 350 mA, isto é, para correntes inferiores a 30 mA, ele pode não atuar, e, para correntes superiores a 350 mA, ele pode não atuar em um tempo considerado como suficiente; no primeiro caso, com correntes entre 10 e 30 mA, a abertura ocorre na zona 3, onde os efeitos são reversíveis, e para correntes menores dentro zona 2, onde os efeitos não são danosos; no segundo caso, existe o perigo de fibrilação ventricular.

Analisando em termos de resistência do corpo humano, para um sistema de 127/220 V, a pessoa ficará protegida se sua resistência para terra estiver compreendida entre 363 e 4.233 Ω; para um sistema de 220/380 V, os limites serão de 629 e 7.333 Ω. Resistências inferiores a 363 Ω são muito pouco prováveis, só ocorrendo em casos excepcionais (corpo totalmente imerso); assim, o DR de 30 mA oferece uma proteção muito eficaz contra a fibrilação ventricular do coração humano para a condição BB2 da pele. Por sua vez, resistências superiores a 4.233 Ω já são mais freqüentes devido à presença de sapatos e à existência de pisos mais ou menos isolantes; no entanto, nesse caso, os eventuais efeitos sobre uma pessoa só serão mais evidenciados para tempos longos.

Assim, podemos concluir que um DR de 30 mA é uma boa proteção contra contatos diretos, embora valores menores de $I_{\Delta N}$ (tais como 10 mA ou 6 mA) sejam altamente recomendados em situações críticas (locais úmidos, molhados, presença de crianças etc.).

Deve-se observar, ainda, que os DRs não protegem contra contatos diretos entre dois condutores de fases diferentes, pertencentes ao mesmo circuito. Aliás, não existe atualmente nenhum dispositivo que proteja nessa situação.

Felizmente, os casos de contato de uma pessoa com duas fases de um circuito são muito raros e, quando ocorrem, normalmente se completam com um terceiro contato com um elemento no potencial da terra, por exemplo, o piso, o que garante a atuação do DR.

Além de desenergizar o circuito, a ação do DR limita o tempo da corrente através do corpo humano. Sua ação de proteção consiste em abrir o circuito tanto mais rapidamente quanto maior for a corrente que atinge a pessoa, sem influir no valor dessa corrente.

A proteção adicional contra contatos diretos proporcionada pelos DRs de alta sensibilidade (com corrente diferencial-residual nominal igual ou inferior a 30 mA) é obrigatória, segundo a NBR 5410, nos seguintes casos:

- Os circuitos que sirvam a pontos de utilização situados em locais contendo banheira ou chuveiro.
- Os circuitos que alimentem tomadas de corrente situadas em áreas externas à edificação.
- Os circuitos de tomadas de corrente situadas em áreas internas que possam vir a alimentar equipamentos no exterior.
- Os circuitos que, em locais de habitação, sirvam a pontos de utilização situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e demais dependências internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens.
- Os circuitos que, em edificações não residenciais, sirvam a pontos de tomada situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e, no geral, em áreas internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens.

6.6 Seccionamento não automático e comando

Aspectos gerais

Nesta seção, abordaremos o seccionamento não automático cuja finalidade é evitar ou anular perigos em instalações e/ou equipamentos alimentados com energia elétrica, incluindo o seccionamento para manutenção mecânica, o seccionamento de emergência e o comando funcional, como indica a NBR 5410.

> A "ação não-automática" (ou "manual") deve ser entendida como uma ação voluntária, efetuada por uma pessoa, ao contrário da "automática", que resulta do comando de um dispositivo (geralmente um relé) sensível a determinada grandeza elétrica. Observe que o seccionamento e o comando não automáticos não excluem a intervenção de um dispositivo entre a pessoa e o dispositivo de seccionamento propriamente dito, caso do "comando a distância".

Segundo a norma, os condutores vivos (isto é, os condutores de fase e neutro) de toda a instalação devem poder ser seccionados em sua origem (exceto no esquema TN-S, no qual não é necessário seccionar o condutor neutro). Isso equivale a dizer que, em todos os circuitos da instalação, circuitos de distribuição e terminais, deve haver a possibilidade de seccionamento nas respectivas origens. Admite-se, no entanto, que, quando houver conveniência por razões de serviço, um mesmo dispositivo seccione um conjunto de serviços.

É importante observar que o condutor de proteção não pode ser interrompido por razões óbvias de segurança (proteção contra contatos diretos); conseqüentemente, no esquema TN-C o condutor PEN não pode ser seccionado.

A energização inadvertida de um equipamento, que pode trazer sérias conseqüências funcionais e de segurança, deve ser evitada fazendo-se uso de medidas apropriadas, que podem ser a colocação de avisos, o travamento do dispositivo de seccionamento por cadeado ou mesmo a instalação do dispositivo em local ou em um invólucro fechado a chave. Quando houver necessidade, como medida complementar, as partes vivas devem ser curto-circuitadas e aterradas (é o "aterramento de trabalho").

Um aspecto importante que não pode ser esquecido refere-se ao caso de um equipamento ou invólucro que contenha partes vivas ligadas a mais de um circuito. Nesse caso, a menos que haja um dispositivo capaz de garantir o seccionamento de todos os circuitos, deve ser colocado um aviso de maneira que toda pessoa que tenha acesso às partes vivas seja prevenida da necessidade de seccionar os diferentes circuitos.

Seccionamento para manutenção mecânica

O *seccionamento para manutenção mecânica* deve ser previsto quando a manutenção (mecânica) de um equipamento alimentado por energia elétrica (caso de máquinas girantes, sistemas de aquecimento e equipamentos eletromagnéticos) envolver riscos de qualquer dano. É o caso típico de elevadores, escadas rolantes, máquinas-ferramenta, guindastes, bombas, correias transportadoras etc.

Devem ser previstas medidas apropriadas para impedir qualquer religamento inadvertido do equipamento durante sua manutenção mecânica, a menos que o dispositivo de seccionamento esteja permanentemente sob controle do pessoal encarregado dessa manutenção. Essas precauções podem incluir a colocação de avisos, o travamento do dispositivo de seccionamento por cadeado ou mesmo a instalação do dispositivo em local ou em um invólucro fechado a chave.

Seccionamento de emergência

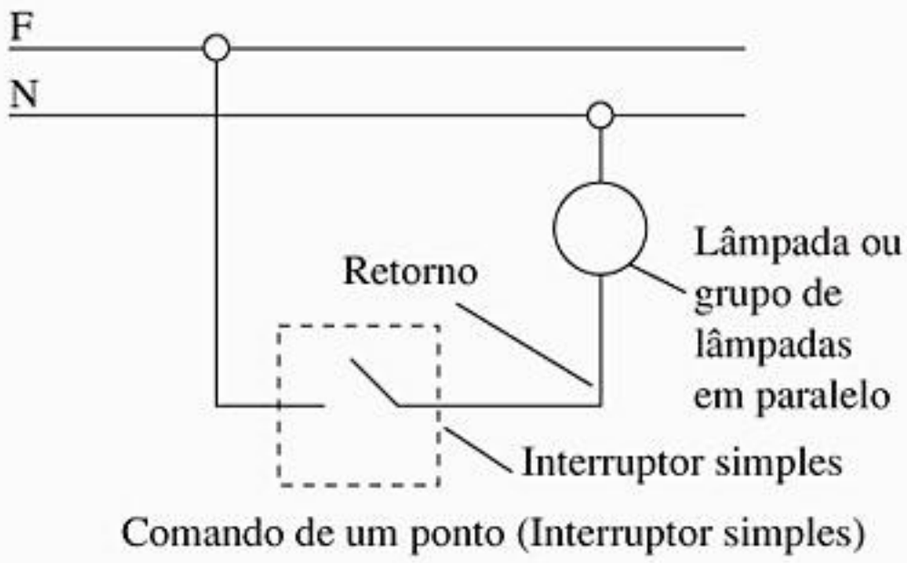
O *seccionamento de emergência* deve, por sua vez, ser previsto para toda parte da instalação em que possa ser necessário seccionar a alimentação a fim de suprimir rapidamente um perigo inesperado, sendo aplicável, por exemplo, no bombeamento de líquidos inflamáveis, em sistemas de ventilação, sistemas de computação de grande porte, em salas de caldeiras, em grandes prédios, em cozinhas industriais e comerciais, em laboratórios elétricos e instalações de pesquisa, em circuitos de lâmpadas de cargas alimentadas em AT etc.

Por sua vez, a *parada de emergência* (caso particular do seccionamento de emergência) é necessária quando os movimentos produzidos por meios elétricos puderem causar perigo, como em elevadores, escadas rolantes, esteiras transportadoras, portas controladas por eletricidade, instalações de lavagem de automóveis, máquinas-ferramentas etc.

Comando funcional

O comando funcional é aplicado aos circuitos ou partes de circuitos que necessitem de um comando independente. Os dispositivos que o realizam não precisam necessariamente atuar (seccionar) sobre todos os condutores vivos, devendo-se observar que o neutro não deve conter nenhum dispositivo unipolar.

A NBR 5410 prescreve que todo equipamento de utilização seja comandado por um dispositivo de comando funcional, admitindo, que um único dispositivo comande vários equipamentos destinados a funcionar simultaneamente. Por sua vez, quando um equipamento possuir um dispositivo de comando já incorporado em fábrica, não será necessário prever outro dispositivo na instalação para o circuito que o alimenta. Plugues e tomadas podem ser empregados como dispositivos de comando funcional, desde que sua corrente nominal não seja superior a 20 A.



Comando de um ponto (Interruptor simples)

Figura 6.37 ■ Tipos de comando com interruptores unipolares (simples)

Os dispositivos de comando funcional, que garantem a permutação de fontes de alimentação, devem abranger todos os condutores vivos e, a menos que seja especialmente requerido, não devem poder colocar as fontes em paralelo.

Segundo a norma, os circuitos de comando devem ser concebidos, dispostos e protegidos de modo a limitar os perigos que possam resultar de faltas entre o circuito de comando e outras partes condutoras que venham a provocar um funcionamento inadequado do equipamento comandado, por exemplo, uma manobra inadvertida.

Dispositivos

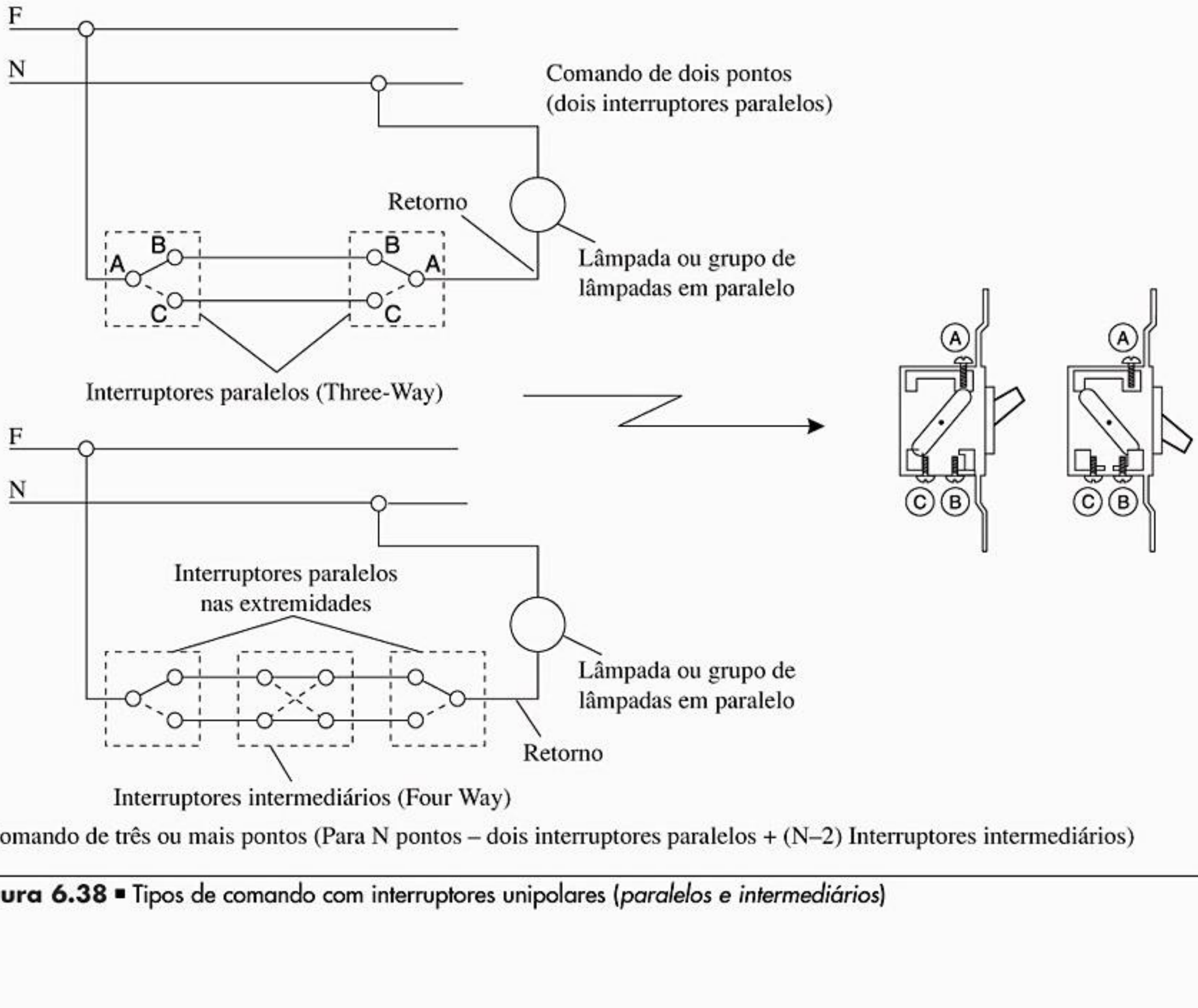
A Tabela 6.5 apresenta as características que, segundo a NBR 5410, devem ser atendidas pelos dispositivos utilizados no seccionamento e no comando funcional.

Como exemplos de dispositivos usados no seccionamento, podem ser citados os seccionadores, os interruptores-seccionadores, as tomadas de corrente, os fusíveis (retirada de), as barras, os terminais especialmente concebidos que não exijam a retirada de condutores, os dispositivos de comando e os contatores.

Para o seccionamento de manutenção mecânica podem ser usados, por exemplo, interruptores multipolares, disjuntores multipolares, dispositivos de comando, que possam ser travados na posição aberta e tomadas de corrente.

O seccionamento de emergência pode ser executado, por exemplo, por meio de interruptores multipolares, disjuntores multipolares e dispositivos de comando atuando sobre contatores.

Para o comando funcional podem-se utilizar interruptores, dispositivos a semicondutores, disjuntores, contatores, telerruptores e tomadas de corrente com corrente nominal igual ou inferior a 20 A etc.



Comando de três ou mais pontos (Para N pontos – dois interruptores paralelos + (N–2) Interruptores intermediários)

Figura 6.38 ■ Tipos de comando com interruptores unipolares (*paralelos e intermediários*)

Tabela 6.5 ■ Características dos dispositivos de seccionamento e comando segundo a NBR 5410

Função	Características dos dispositivos
Seccionamento	– Devem ser seccionados efetivamente todos os condutores vivos do circuito (no TN-C condutor PEN não deve ser seccionado).
	– A distância de abertura dos contatos deve ser clara e confiavelmente indicada pelas marcações "desligado" (ou "O") e "ligado" (ou "I").
	– Não devem ser utilizados dispositivos a semicondutor.
	– Devem ser projetados e instalados de modo a impedir qualquer restabelecimento inadvertido.
	– No caso de dispositivos destinados à abertura sem carga devem ser tomadas precauções para protegê-los contra aberturas acidentais ou desautorizadas (por exemplo, colocando o dispositivo em local/invólucro fechado a chave ou através de intertravamento com outro dispositivo de abertura sob carga);
	– Devem ser usados preferencialmente dispositivos multipolares; admite-se o uso de dispositivos unipolares colocados lado a lado.
Seccionamento para manutenção mecânica	- Devem ser preferencialmente instalados no circuito principal de alimentação; em casos específicos podem atuar no circuito de comando.
	– Não precisam necessariamente seccionar todos os condutores vivos.
	– Devem ser de operação manual (os dispositivos propriamente ditos ou os respectivos dispositivos de contato).
	– Distância de abertura dos contatos deve ser clara e confiavelmente indicada pelas marcações "desligado" (ou "O") e "ligado" (ou "I").
	– Devem ser concebidos e/ou instalados de modo a impedir qualquer restabelecimento inadvertido.
	– Devem ser localizados de modo a serem facilmente identificados e devem ser adequados ao uso previsto.
Seccionamento de emergência (incluindo parada de emergência)	– Devem poder interromper a corrente de plena carga da parte correspondente da instalação, levando em conta, eventualmente, corrente do rotor travado.
	– Podem ser constituídos por um único dispositivo capaz de interromper diretamente a alimentação apropriada ou por uma combinação de dispositivos, desde que acionados por uma única operação capaz de interromper a alimentação apropriada.
	– No caso de parada de emergência pode ser necessário manter a alimentação (por exemplo, a frenagem de parte móveis).
	– Dispositivos a comando manual devem, preferencialmente, ser escolhidos para o seccionamento direto do circuito principal; dispositivos acionados ou a distância devem abrir quando interrompida a alimentação das bobinas ou outras técnicas com segurança equivalente devem ser utilizadas;
	– Os elementos de comando (punhos, botoeiras etc) dos dispositivos devem ser claramente identificados, de preferência pela cor vermelha contrastando com fundo amarelo.
	– Devem ser localizados e marcados de modo a serem facilmente identificados e devem ser adequados ao uso previsto.
	– Devem ser facilmente acessíveis a partir dos locais onde possa ocorrer um perigo e, quando for o caso, de qualquer outro local de onde um perigo possa ser eliminado a distância.
	– Os elementos de comando devem ser travados na posição aberta do dispositivo, a menos que esses elementos e os de reenergização do circuito estejam ambos sob o controle da mesma pessoa.
Comando funcional	– Devem ter características apropriadas às condições mais severas sob as quais possam funcionar.
	– Podem apenas interromper a corrente sem, necessariamente, abrir os pólos correspondentes (caso, por exemplo, dos dispositivos a semicondutor).
	– Não devem ser usados dispositivos fusíveis, barras e seccionadores.

Interruptores de luz

Os tipos mais comuns de interruptores de uso geral são aqueles destinados ao comando de iluminação, isto é, ao comando de uma ou mais luminárias (pontos de luz) de um circuito de iluminação, desde um ou mais pontos.

No caso mais comum de instalações em locais de habitação (residências, hotéis, motéis e similares) e em locais comerciais (escritórios, lojas etc.) e institucionais (escolas, templos etc.), os circuitos de iluminação são monofásicos do tipo fase-neutro; nesses casos, são usados interruptores unipolares, como os apresentados na Figura 6.37, usando um interruptor simples e na Figura 6.38, utilizando interruptores paralelos.

A Figura 6.38 mostra o esquema de ligação, enquanto a Figura 6.39 apresenta a mesma ligação utilizando os componentes reais de interruptores paralelos.

Em alguns locais comerciais (supermercados, centros comerciais etc.) e na maioria das instalações industriais, os circuitos de iluminação são monofásicos do tipo fase-fase; aí são usados interruptores bipolares (ver Figura 6.40) ou, por vezes, contatores.

Os interruptores unipolares são normalmente fabricados com os valores nominais de 10 A e 250 V, ao passo que os bipolares são geralmente de 25 A e 250 V.

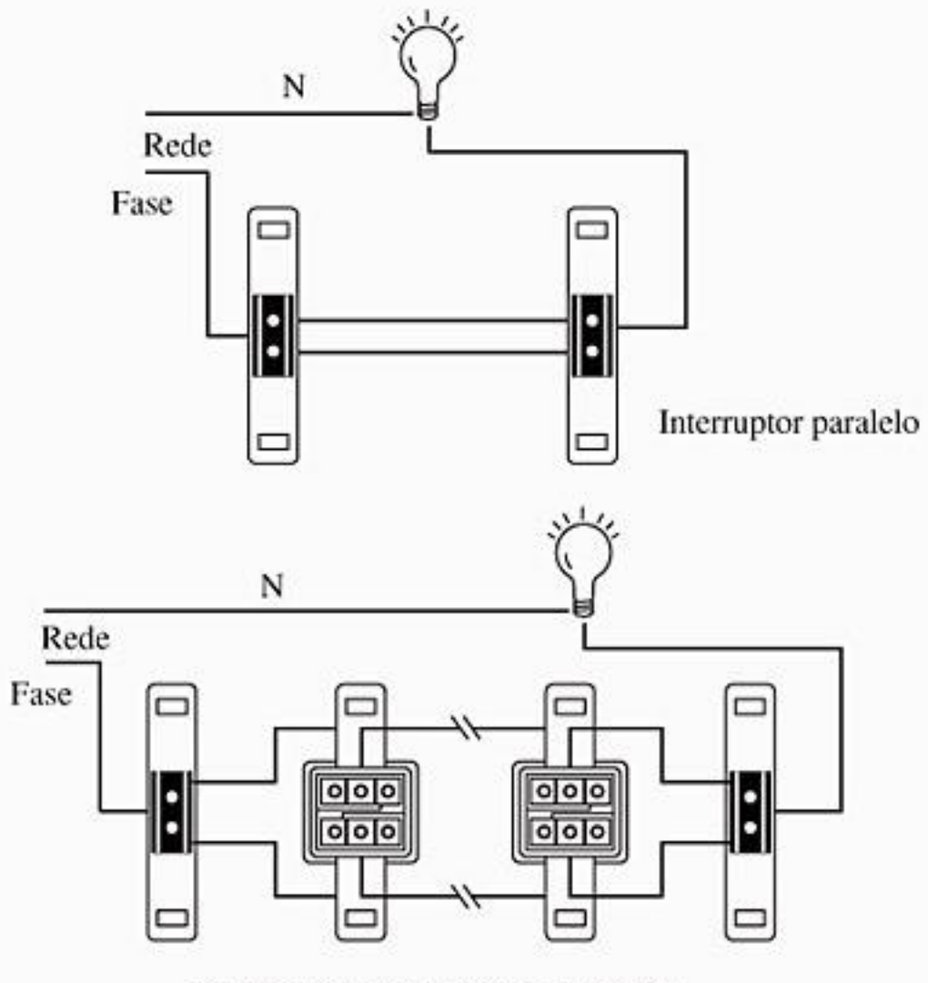


Figura 6.39 ■ Esquemas de ligação de interruptores unipolares

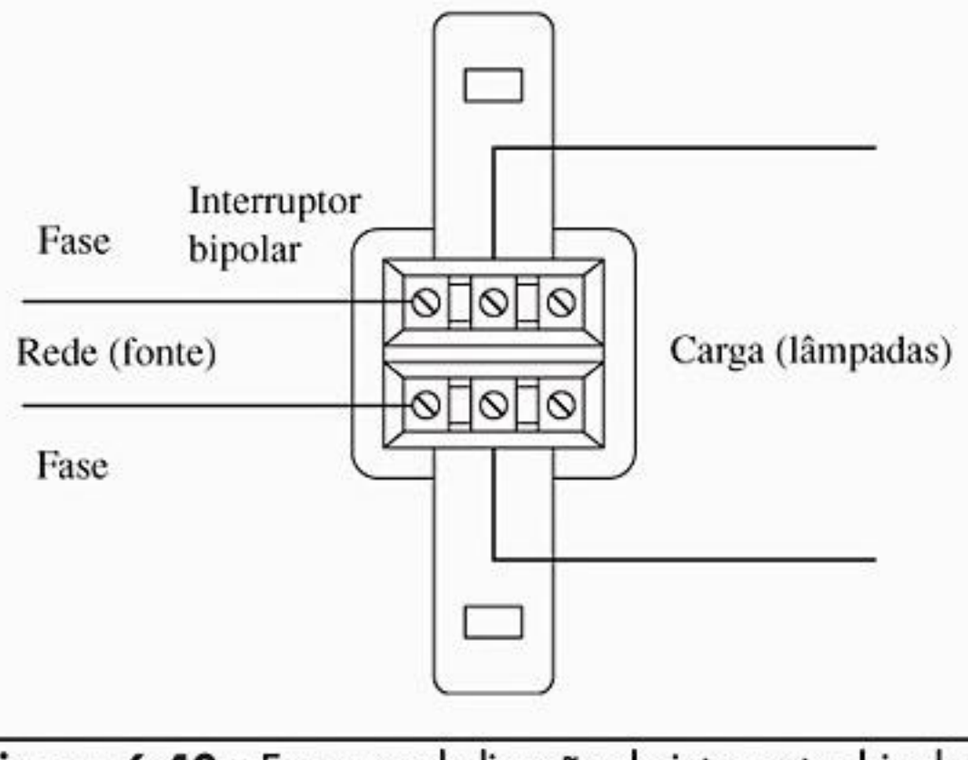


Figura 6.40 ■ Esquema de ligação de interruptor bipolar

EXERCÍCIOS

1. Quais são os três tipos de circuitos internos dos dispositivos de manobra e de proteção?

2. Qual é a diferença dos conceitos ciclo de operação e seqüência de operações?

3. O que é um disjuntor?

4. O que é um dispositivo fusível?

5. Como é feita a indicação visível da atuação de uma chave fusível de distribuição de energia elétrica?

6. A quais elementos são em geral associados os relés provocando a abertura destes em condições anormais?

7. Quais são as quatro funções básicas exercidas pelos dispositivos de manobra e de proteção?

8. Quais são as características básicas dos fusíveis?

9. Quais são as características básicas dos disjuntores?

10. Qual é a diferença entre interruptores e disjuntores DR?

7

Medidas de proteção contra choques elétricos (I) — básica e supletiva

7.1 Introdução

Conforme tratado na Seção 3.2, a NBR 5410:2004 indica que o princípio fundamental relativo à proteção contra choques elétricos compreende que as partes vivas perigosas não devem ser acessíveis (para evitar o contato direto) e que as massas ou partes condutoras acessíveis não devem oferecer perigo, seja em condições normais, seja em caso de alguma falha que as torne acidentalmente vivas (para evitar o contato indireto).

Baseado nesse princípio fundamental, a norma indica, então, que a proteção contra choques elétricos inclui dois tipos de proteção: a básica e a supletiva.

A *proteção básica (contra contatos diretos)* pode compreender: isolação das partes vivas; uso de barreiras ou invólucros de proteção; obstáculos; colocação fora do alcance das pessoas; uso de dispositivos de proteção à corrente diferencial–residual; e limitação de tensão.

A *proteção supletiva (contra contatos indiretos)* é prevista por meio de medidas que incluem a adoção de eqüipotencialização e seccionamento automático da alimentação, o emprego de isolação suplementar e o uso de separação elétrica.

Nos capítulos 7 e 8, trataremos dessas medidas de proteção contra choques elétricos.

7.2 Medida de proteção por limitação da tensão de alimentação — uso de extra-baixa tensão de segurança

Definições

O sistema de *extrabaixa tensão de segurança*, denominado pela NBR 5410 de *SELV* (do inglês, *Separated Extra-Low Voltage*), é considerado pela norma como uma medida de proteção contra contatos diretos e indiretos, a qual envolve prescrições relativas à alimentação e à instalação dos circuitos. Trata-se de um sistema eletricamente separado da terra e de outros sistemas, de tal modo que a ocorrência de uma única falta não resulta em risco de choque elétrico. Os circuitos SELV não têm qualquer ponto aterrado nem massas aterradas.

A sigla *PELV* (do inglês, *Protected Extra-Low Voltage*) refere-se a um sistema de extrabaixa tensão de segurança que não é eletricamente separado da terra, mas que atende a todos os requisitos de um SELV, de modo equivalente. Podemos dizer, simplificadamente, que o PELV é a versão "aterrada" do SELV, ou seja, os circuitos PELV podem ser aterrados ou ter massas aterradas.

A característica principal desses métodos consiste em limitar a tensão dos circuitos alimentados a valores que, mesmo em caso de falta, não possam ser superiores à tensão de contato-limite (U_L), evitando, assim, riscos para a vida humana no caso de contatos diretos ou indiretos.

Tabela 7.1 ■ Limites de tensão (V) de alimentação dos sistemas SELV e PELV

Faixa	Sistemas diretamente aterrados				Sistemas não diretamente aterrados	
	Corrente alternada		Corrente contínua		Corrente alternada	Corrente contínua
	Entre fase e terra	Entre fases	Entre pólo e terra	Entre pólos	Entre fases	Entre pólos
I	$U \leq 50$	$U \leq 50$	$U \leq 120$	$U \leq 120$	$U \leq 50$	$U \leq 120$
II	$50 < U \leq 600$	$50 < U \leq 1.000$	$120 < U \leq 900$	$120 < U \leq 1.500$	$50 < U \leq 1.000$	$U \leq 1.500$

Isso só é assegurado na tensão nominal do circuito em SELV ou em PELV, não podendo ser superior aos limites da faixa I da Tabela 7.1.

Proteção básica (contatos diretos) em sistemas SELV e PELV

Dependendo da tensão nominal do sistema SELV ou PELV e das condições de influências externas, a proteção contra contatos diretos nos seus circuitos é proporcionada pela limitação da tensão, pela isolação básica ou pelo uso de barreiras ou invólucros.

Assim, as partes vivas de um sistema SELV ou PELV não precisam necessariamente ser inacessíveis, podendo dispensar isolação básica, barreira ou invólucro nos casos elencados a seguir.

- Se a tensão nominal do sistema SELV ou PELV não for superior a 25 V, valor eficaz, em corrente alternada, ou a 60 V em corrente contínua sem ondulação, e o sistema for usado sob condições de influências externas cuja severidade, do ponto de vista da segurança contra choques elétricos, não ultrapasse aquela correspondente às condições BB1, BB2, BC1, BC2 e BC3.
- Se a tensão nominal do sistema SELV ou PELV não for superior a 12 V, valor eficaz, em corrente alternada, ou a 30 V em corrente contínua sem ondulação, e o sistema for usado sob condições de influências externas cuja severidade, do ponto de vista da segurança contra choques elétricos, não ultrapasse aquela correspondente às condições BB3 e BC4 (áreas externas, jardins, feiras, canteiros de obras, campings, volume 1 de banheiros e piscinas, compartimentos condutivos, dependências molhadas em uso normal et.c).
- No caso de sistemas PELV, se as massas e/ou partes vivas, cujo aterramento for previsto, estiverem vinculadas, via condutores de proteção, à eqüipotencialização principal.

Não sendo satisfeitas essas condições, as partes vivas do sistema SELV ou PELV devem ser providas de isolação básica ou de barreiras ou invólucros.

De todo modo, a tensão nominal do sistema SELV ou PELV não pode exceder o limite superior da faixa I da Tabela 7.1: 50 V em corrente alternada ou 120 V em corrente contínua sem ondulação. Uma tensão contínua sem ondulação é definida, convencionalmente, como a que apresenta uma taxa de ondulação não superior a 10 por cento em valor eficaz; o valor de crista máximo não deve ultrapassar 140 V, para um sistema em corrente contínua sem ondulação com 120 V nominais, ou 70 V para um sistema em corrente contínua sem ondulação com 60 V nominais.

Proteção supletiva (contatos indiretos) em sistemas SELV e PELV

Nos sistemas SELV e PELV, a proteção supletiva é assegurada pelos seguintes meios:

- Separação de proteção entre o sistema SELV ou PELV e quaisquer outros circuitos que não sejam SELV ou PELV, incluindo o circuito primário da fonte SELV ou PELV.
- Isolação básica entre o sistema SELV ou PELV e outros sistemas SELV ou PELV.
- Especificamente no caso de sistemas SELV, isolação básica entre o sistema SELV e a terra.

Fontes SELV ou PELV

Os circuitos em SELV e PELV devem ser alimentados por fontes que proporcionem uma completa separação galvânica entre eles e os circuitos a tensão mais elevada ou por fontes autônomas. Assim, podem ser as seguintes fontes:

- Um *transformador de separação de segurança* (TSS), que é um transformador cujos enrolamentos são separados por isolação pelo menos equivalente à isolação dupla ou reforçada (ver Seção 3.4) e cujo enrolamento secundário, sem espiras comuns com o enrolamento primário, é projetado para fornecer extrabaixa tensão de segurança. Esse transformador deve ser conforme a norma IEC 61558-2-6.
- Uma fonte de corrente que garanta um grau de separação equivalente ao de um TSS, por exemplo, um grupo motor-gerador com enrolamentos possuindo separação elétrica adequada.
- Uma fonte eletroquímica (pilhas ou acumuladores) ou outra que não dependa de circuito de tensão mais elevada, por exemplo, um grupo motor térmico-gerador.

- Uma fonte eletrônica na qual, mesmo ocorrendo um defeito interno, a tensão de saída seja mantida igual ou inferior a U_L.

A NBR 5410 admite o uso de fontes de segurança móveis desde que, adicionalmente, possuam isolação equivalente à da classe II ou isolação equivalente.

Circuitos SELV ou PELV

No que diz respeito aos circuitos em SELV, deve haver uma separação completa entre suas partes vivas e as de outros circuitos de tensão mais elevada, por meio de dupla isolação ou isolação reforçada, por exemplo. Também podem ser empregadas uma isolação básica e blindagem de proteção, dimensionadas para a tensão mais elevada.

Isso se refere não só aos condutores vivos, como também às partes vivas de relés, interruptores etc.

As formas de separação de proteção relacionadas anteriormente resultam nas seguintes possibilidades, em relação às linhas elétricas SELV ou PELV, sendo admitida qualquer uma delas:

- Condutores dos circuitos SELV e/ou PELV providos de cobertura não-metálica ou envolvidos por um invólucro isolante (eletroduto, moldura etc.), adicionalmente à sua isolação básica.
- Condutores dos circuitos SELV e/ou PELV providos de sua isolação básica, separados dos condutores dos circuitos em outras tensões por uma cobertura metálica aterrada ou uma blindagem metálica aterrada.
- Compartilhamento pelo circuito SELV e/ou PELV e outros circuitos em outras tensões, de um mesmo cabo multipolar, desde que os condutores, em especial os dos circuitos SELV e/ou PELV, sejam isolados para a tensão mais elevada presente.
- Condutores SELV e/ou PELV e condutores de outros circuitos em outras tensões, todos providos de sua isolação básica, formando um agrupamento, desde que os condutores, em especial os dos circuitos SELV e/ou PELV, sejam isolados para a tensão mais elevada presente.
- Condutores de circuitos SELV e/ou PELV fisicamente separados dos condutores de qualquer outro circuito.

Tanto as partes vivas como as massas de circuitos em SELV não devem possuir qualquer ligação com elementos suscetíveis de propagar potenciais incompatíveis com a segurança proporcionada pela extrabaixa tensão de segurança. Nessas condições, não deve existir nenhuma ligação de qualquer componente de um circuito em SELV com a terra nem com condutores de proteção ou massa de outras instalações nem tampouco com elementos condutores estranhos à instalação (a não ser que haja uma garantia de que tais elementos não possam ser levados a um potencial superior à extrabaixa tensão do circuito).

As tomadas de corrente dos circuitos em SELV não devem possuir contato para o condutor de proteção nem permitir a introdução de plugues de sistemas de tensões diferentes. Por sua vez, não deve ser possível inserir plugues de circuitos em SELV em tomadas alimentadas sob outras tensões.

Essa medida de proteção deve ser usada para aparelhos classe III (ver Seção 3.4), tais como brinquedos elétricos e aparelhos elétricos para tratamento de pele, cabelos etc.

Os componentes dos sistemas PELV e/ou suas massas podem ser aterrados.

7.3 Extrabaixa tensão funcional

Quando, por razões funcionais, for usada extrabaixa tensão, mas não for possível ou necessário respeitar quaisquer das condições impostas à SELV e à PELV, a extrabaixa tensão não poderá ser considerada "de segurança". A NBR 5410 utiliza o termo *extrabaixa tensão funcional,* denominada de FELV (do inglês, *Functional Extra-Low Voltage*). Isso ocorrerá quando um sistema em extrabaixa tensão for alimentado de um sistema de tensão mais elevada, por um equipamento que assegure pelo menos separação básica entre os dois sistemas, mas não preencha os requisitos de SELV e PELV mencionados anteriormente. É o caso, por exemplo, de:

- Circuitos alimentados por fontes que não sejam de segurança.
- Circuitos com um ponto aterrado.
- Circuitos com equipamentos (relés, contatores, interruptores etc.) que não apresentem propriedades de isolamento suficiente em relação aos circuitos de tensão mais elevada.

A FELV não se constitui, por si só, em uma medida de proteção, devendo ser complementada por outras medidas. Assim, no caso de contatos diretos, se a alimentação do circuito for proveniente de fonte de segurança e se todos os componentes do circuito estiverem adequadamente separados de outros circuitos, como indicado na Seção 7.2, a proteção deve ser garantida por barreiras ou invólucros ou, então, por meio de isolação capaz de suportar uma tensão de 500 V (CA) durante um minuto. No caso de não ser o circuito alimentado por fonte de segurança ou de seus componentes não estarem adequadamente separados dos outros circuitos, a proteção contra contatos diretos deve ser assegurada por meio de barreiras ou invólucros, ou, por meio de isolação correspondente à tensão mínima requerida pelo circuito primário.

Observe que, por meio de um circuito em FELV, é possível alimentar componentes cuja isolação corresponda a um valor inferior, desde que a isolação das par-

tes acessíveis, não condutoras, seja reforçada na execução da instalação, de modo a poder suportar uma tensão de ensaio de 1.500V (CA) por um minuto.

No que diz respeito à proteção contra contatos indiretos, quando o circuito em FELV tiver um ponto aterrado, porém forem atendidas todas as demais condições impostas à SELV, não será necessária qualquer outra medida de proteção complementar contra contatos indiretos, como podemos verificar com o auxílio da Figura 7.1.

No circuito mostrado, só são significativas as resistências R_H do corpo e R_A de aterramento.

Nessas condições a relação entre a tensão $U \leq U_L$ e a tensão de contato U_B será

$$\frac{U}{U_B} = 1 + \frac{R_A}{R_H} \qquad (7.1)$$

indicando que U_B será sempre inferior a U_L.

No caso de o circuito não ser alimentado por fonte de segurança ou se não houver separação adequada entre seus componentes e os de outros circuitos, a proteção contra contatos indiretos deve ser garantida:

- Pela ligação das massas dos componentes do circuito em FELV ao condutor de proteção do circuito primário, desde que o circuito primário atenda uma das medidas de proteção por seccionamento automático da alimentação (ver Capítulo 8); isso não impede a ligação de um condutor vivo do circuito em FELV ao condutor de proteção do circuito primário.
- Pela ligação das massas dos componentes do circuito em FELV ao condutor de eqüipotencialidade não aterrado do circuito primário, quando nele seja aplicável a proteção por separação elétrica (ver Seção 7.7).

As tomadas de corrente de circuitos em FELV não devem permitir a introdução de plugues de outros circuitos. Por sua vez, os plugues para FELV não devem poder ser introduzidos em tomadas de outros circuitos.

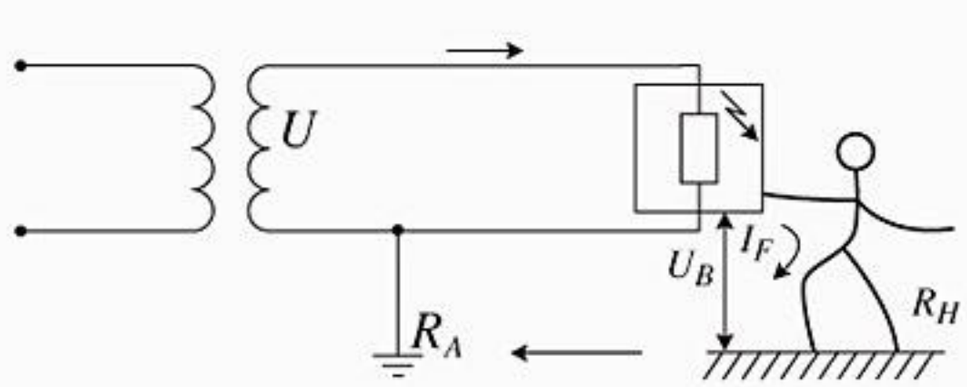


Figura 7.1 ■ Proteção contra contatos indiretos em circuitos FELV

7.4 Proteção pelo emprego de equipamentos classe II ou por isolação equivalente

A utilização de equipamentos classe II (definidos na Seção 3.4) é por si só uma medida de proteção, dispensando qualquer outra. Tais equipamentos, cuja segurança é garantida pela própria construção, não devem ser aterrados (diretamente) nem ligados a condutores de proteção, o que poderia expor acidentalmente suas partes metálicas a um potencial perigo (ver Figura 7.2).

É importante observar que certos equipamentos eletrônicos necessitam de um aterramento por razões técnicas, o que nada tem a ver com proteção contra contatos indiretos. Nesses casos, as disposições adequadas para impedir que tal aterramento comprometa a segurança conferida pela classe II devem ser observadas.

A chamada "isolação equivalente" (à classe II) é uma isolação suplementar colocada em torno de componentes elétricos que tenham uma isolação básica. Assim, o equipamento passa a apresentar uma segurança equivalente à da classe II. É o caso, por exemplo:

- De linhas elétricas constituídas por condutores isolados contidos em eletrodutos isolantes, por cabos unipolares ou por cabos multipolares
- De dispositivos de comando e de proteção contidos em caixas isolantes

A NBR 5410 apresenta prescrições bastante completas quanto à construção e às disposições a tomar para a instalação desses componentes, de tal modo que a segurança apresentada pelo conjunto seja equivalente à da classe II.

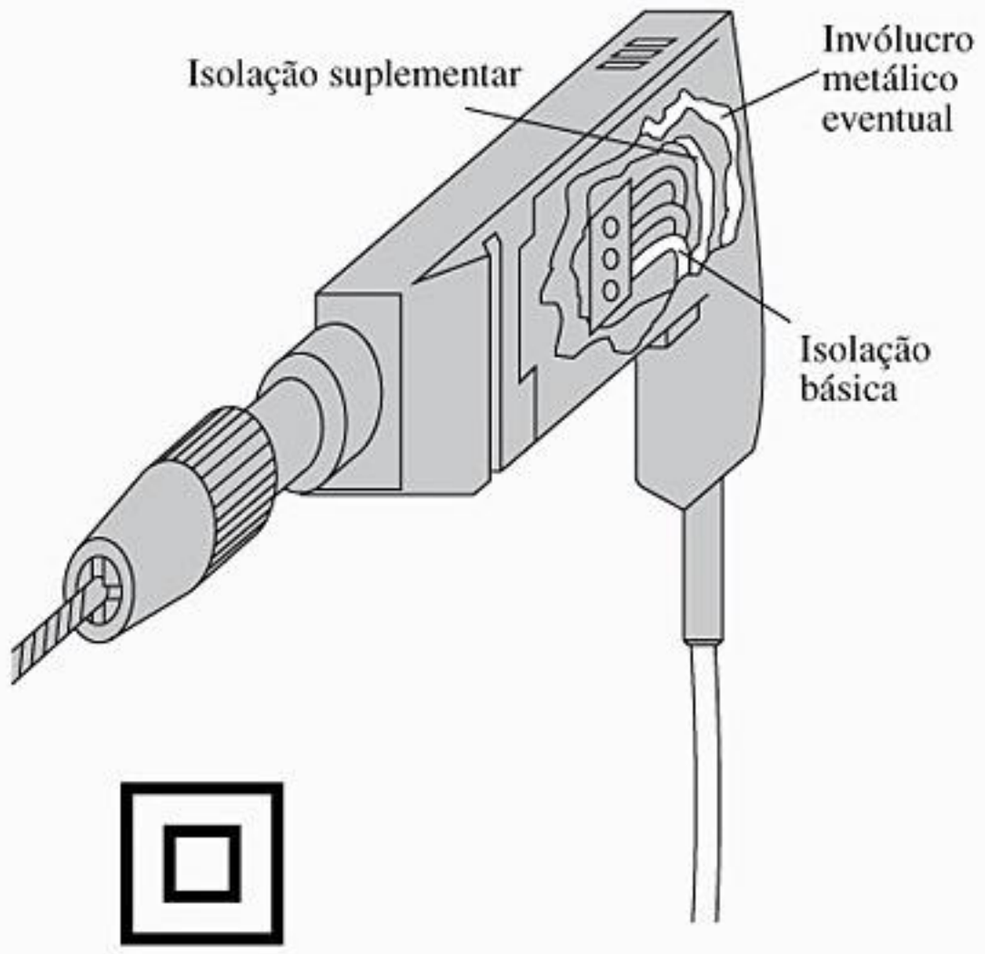


Figura 7.2 ■ Exemplo de equipamento classe II com seu respectivo símbolo

Tais prescrições são, essencialmente, as seguintes:

- O invólucro isolante deve ser adequado às influências externas a que possa ser exposto em seu uso normal, e suas propriedades devem manter-se ao longo do tempo.
- Não é permitida qualquer ligação a eletrodo de aterramento ou a condutor de proteção.
  A isolação suplementar deve ser fixada ao componente de maneira segura e durável.
  Não são permitidos elementos ou disposições que possam vir a comprometer a segurança equivalente à classe II (por exemplo, introdução de elementos no invólucro, tais como alavancas de comando; quando isso for necessário, devem ser tomadas providências para evitar o comprometimento da segurança).

Observe que é permitido usar uma isolação reforçada (ver Seção 3.4) aplicada diretamente às partes vivas, quando condições construtivas impedirem a utilização de isolação dupla.

A utilização dessa medida de proteção exige uma *rigorosa verificação* por meio de um exame detalhado e de ensaios, alguns difíceis de realizar no local da montagem (como os ensaios dielétricos). Por essa razão, sua aplicação restringe-se a situações particulares, em que as condições de execução possam ser perfeitamente supervisionadas e controladas.

7.5 Proteção em locais não condutores

São considerados *locais não condutores* aqueles cujas paredes e pisos apresentam resistência mínima, em qualquer ponto, de 50 kΩ, se a tensão nominal da instalação não for superior a 500 V, ou de 100 kΩ, se a tensão nominal da instalação for superior a 500 V. É o caso de locais com piso de madeira ou com revestimento não removível de material isolante e paredes de alvenaria.

Nos locais não condutores, a proteção passiva contra contatos indiretos é garantida se as pessoas não puderem entrar em contato simultaneamente com duas massas ou com uma massa e um elemento condutor estranho à instalação, caso tais elementos sejam suscetíveis de encontrar-se em potenciais diferentes no caso de falha da isolação principal das partes vivas. Para isso, determina-se uma dessas condições:

- O afastamento entre massas e elementos condutores não deve ser inferior a 2 m, podendo ser reduzido para 1,25 m fora da zona de alcance normal (ver Figura 7.3).
- É necessário que sejam interpostos obstáculos (não aterrados e, se possível, de material isolante) entre massas ou entre massas e elementos condutores estranhos à instalação, garantindo distanciamentos equi-

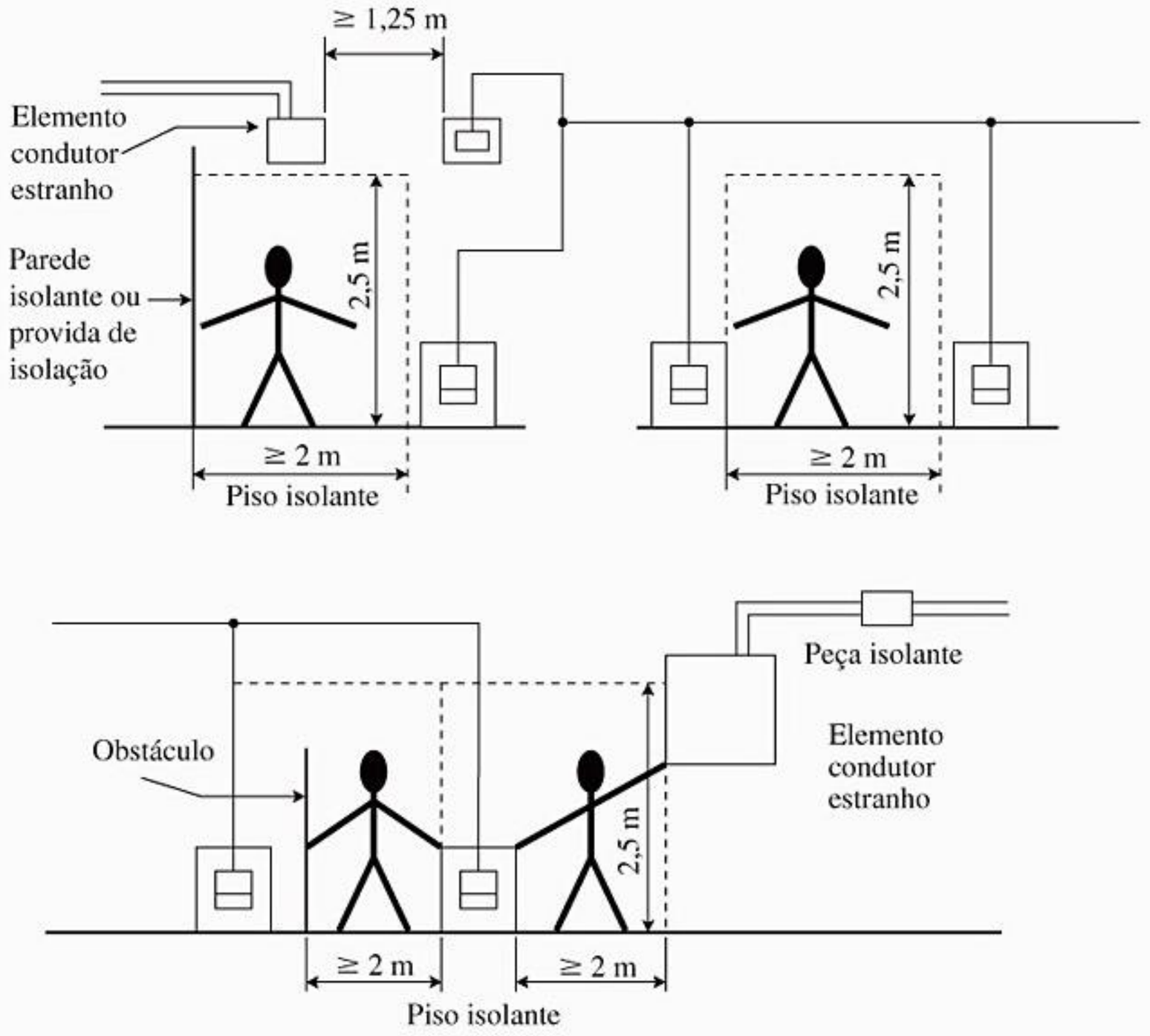


Figura 7.3 ■ Condições de aplicação das medidas de proteção em locais não condutores

valentes aos indicados anteriormente (ver Figura 7.3 para essas duas condições).

- Os elementos condutores devem possuir uma isolação com resistência mecânica adequada e que suporte uma tensão de ensaio de no mínimo 2.000 V, sendo de no máximo 1 mA a corrente de fuga em condições normais.

Nos locais não condutores, não deve ser possível a ligação de qualquer equipamento com um condutor de proteção, devido ao perigo de ser introduzido acidentalmente um potencial perigoso. Nessas condições, os equipamentos utilizados devem ser, em princípio, das classes 0 e 0I.

As providências tomadas para garantir a proteção contra contatos indiretos devem ser duráveis e não deve ser possível torná-las ineficazes, o que poderia ocorrer, por exemplo, com a introdução posterior de um elemento condutor estranho à instalação (tal como uma canalização metálica de água ou de ar-condicionado).

É importante observar que, muito embora as medidas prescritas sejam principalmente aplicáveis a locais que só possuam equipamentos fixos, admite-se a utilização de equipamentos móveis, recomendando que, nesse caso, sejam tomadas providências para garantir a segurança; uma dessas providências poderá ser a instalação de tomadas de corrente a uma distância mínima de 1 m de qualquer elemento condutor estranho à instalação.

Na prática, a aplicação dessa medida de proteção é limitada a certos locais de trabalho nos quais possa haver uma supervisão constante por pessoal qualificado e onde não seja conveniente a utilização da proteção por seccionamento da alimentação: por exemplo, em uma instalação TN ou TT, para a alimentação de um equipamento cujo funcionamento não deva ser interrompido, seja por razões de processamento de um produto vital ou de segurança.

A aplicação dessa medida de proteção a certos setores de locais de habitação (por exemplo, salas, quartos, corredores com piso de madeira e paredes de alvenaria) deve ser encarada com certa reserva, pois nesses locais, geralmente, não há qualquer supervisão por pessoal qualificado e podem ocorrer modificações (relacionadas ou não com a instalação elétrica) que anulem a segurança prevista.

7.6 Proteção por ligações eqüipotenciais locais não aterradas

Para que a corrente elétrica passe através do corpo humano, é necessário que uma pessoa toque em dois pontos das extremidades de um circuito e que entre os pontos tocados exista uma diferença de potencial.

Nesse sistema de proteção passiva, a segunda dessas condições deve ser cumprida, o que significa que entre os pontos que possam estar ao alcance das mãos e dos pés de uma pessoa não deve existir tensão, ou seja, eles devem ser *eqüipotenciais*. Na prática, isso significa ligar todas as partes metálicas que o corpo possa tocar. Com essa ligação, qualquer que seja a tensão de falta, a tensão de contato será (praticamente) nula.

As *ligações eqüipotenciais locais* não devem ser confundidas com as outras ligações eqüipotenciais, a principal e as suplementares, de aplicação geral, definidas na Seção 3.3 e descritas no Capítulo 8. Trata-se, aqui, de uma medida de proteção independente, cuja aplicação é limitada, na prática, a certos locais de trabalho onde seja difícil ou inviável a aplicação de outras medidas de proteção, em particular as que provoquem o seccionamento automático da alimentação.

Segundo a NBR 5410, todas as massas e todos os elementos condutores devem ser interligados por condutores de eqüipotencialidade, e a ligação eqüipotencial local não deve ter qualquer ligação com a terra, seja diretamente, seja por intermédio de massas ou de elementos condutores.

Se o conjunto eqüipotencial estiver totalmente isolado da terra, não haverá perigo, pois uma pessoa não poderá tocar simultaneamente em um componente do conjunto e em outro elemento externo. É importante observar que o piso do local tanto pode ser isolante como ligado à ligação eqüipotencial.

A NBR 5410 recomenda, ainda, que devem ser tomadas precauções para garantir o acesso de pessoas ao local considerado, sem que elas possam ser submetidas a uma diferença de potencial perigosa. Isso se aplica, principalmente, ao caso em que um piso condutor isolado do solo é ligado à ligação eqüipotencial (ver Figura 7.4).

7.7 Proteção por separação elétrica

A proteção por separação elétrica, prevista na NBR 5410, consiste na alimentação de um circuito por meio de uma *fonte de separação*, que pode ser um *transformador de separação* (caso mais comum), conforme normas da série IEC 61558, ou uma fonte de corrente que assegure um grau de segurança equivalente ao do transformador de separação, por exemplo, um grupo motor-gerador com enrolamentos que forneçam uma separação equivalente.

Esse sistema de proteção baseia-se na impossibilidade de "fechamento" da corrente pela terra no caso de contato de uma pessoa com uma parte energizada, como ilustra a Figura 7.5. Tal impossibilidade perdura enquanto estiver garantida a isolação para a terra e cessa após a primeira falta para a terra, o que torna evidente a necessidade de controlar permanentemente o isolamento.

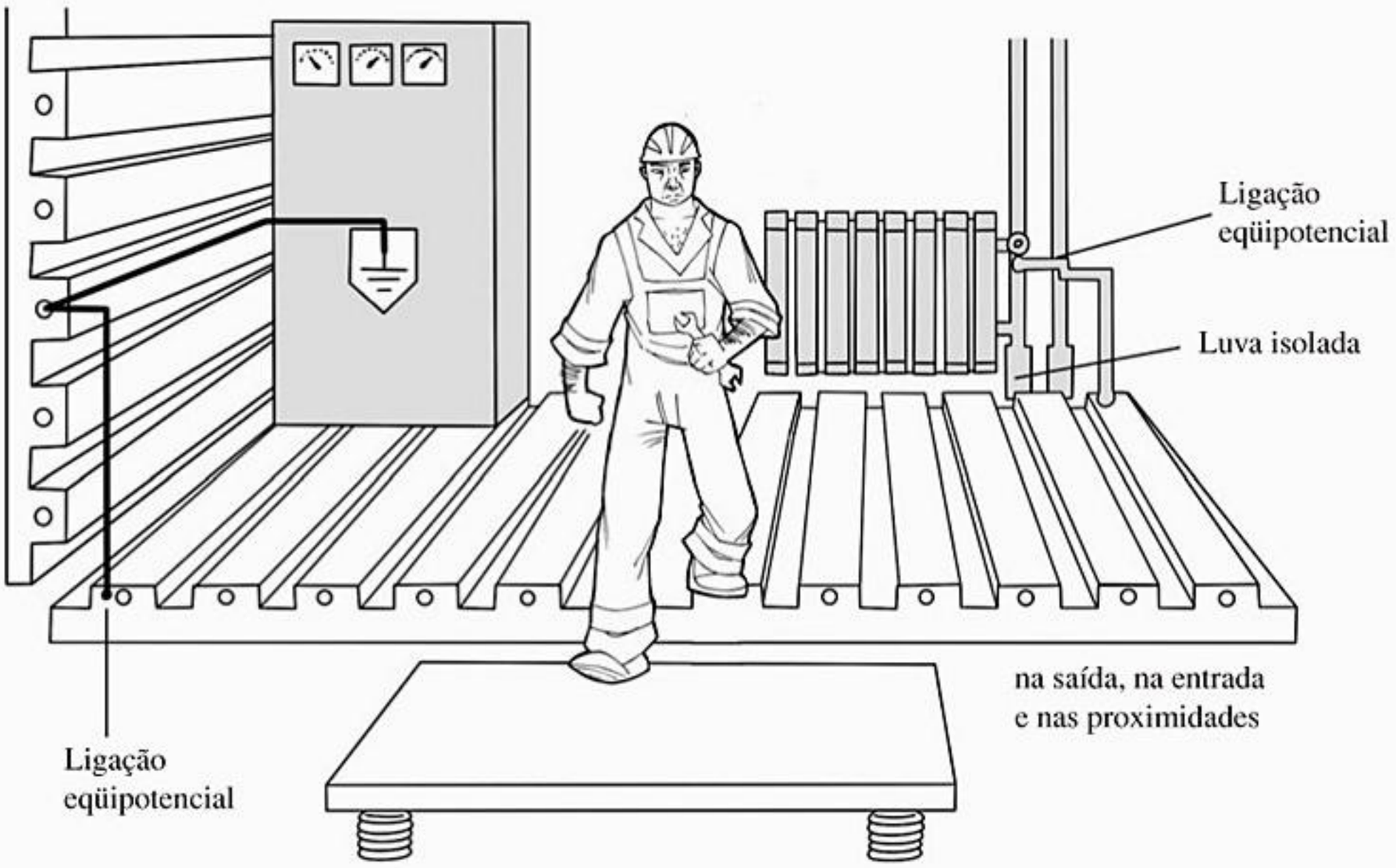


Figura 7.4 ▪ Ligação eqüipotencial local não aterrada

A fonte de separação pode ser fixa ou móvel. No caso de fonte fixa, esta deve ser de classe II ou possuir isolação equivalente, ou deve ser de tal forma que o circuito secundário esteja separado do circuito primário por isolação equivalente à classe II; se uma fonte desse tipo alimentar vários equipamentos, suas massas não devem estar ligadas ao invólucro metálico da fonte.

Se a fonte for móvel ela deverá ser de classe II ou possuir isolação equivalente.

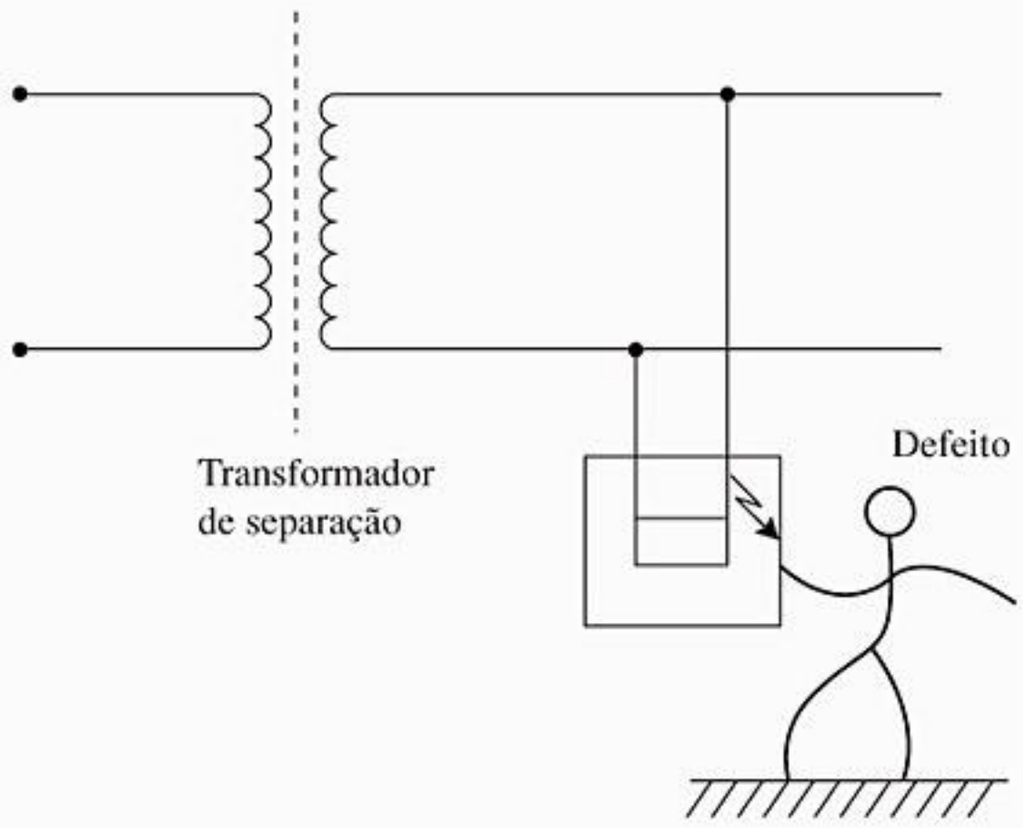


Figura 7.5 ▪ A falta não dá origem a nenhuma corrente de falta, devido à inexistência de um percurso de retorno ao circuito

O comprimento do circuito separado deve ser limitado, a fim de evitar acoplamentos capacitivos com a terra. Nesse sentido, recomenda-se que o produto da tensão nominal do circuito separado, que não deve ser superior a 500 V, pelo comprimento do circuito, em metros, não ultrapasse 100.000 e que o comprimento do circuito não seja superior a 500 m.

As partes vivas do circuito separado não devem ter qualquer ponto comum com outro circuito nem qualquer ponto aterrado. Para evitar riscos de faltas para terra, recomenda a NBR 5410 que seja dada atenção especial à isolação dessas partes em relação à terra, principalmente no que concerne aos cabos flexíveis. Estes devem ser visíveis em toda sua extensão e capazes de suportar solicitações mecânicas (condições AG2) – podem ser usados cabos uni ou multipolares flexíveis ou condutores isolados flexíveis, nesse caso, contidos em eletrodutos isolantes ou metálicos.

Os condutores de um circuito devem estar fisicamente separados dos condutores de outros circuitos, não havendo, no caso de cabos não flexíveis, quaisquer restrições quanto ao tipo de linha.

Quando um circuito separado alimentar um único equipamento, suas massas não devem ser ligadas intencionalmente a condutores de proteção, a massas de outros circuitos ou a elementos condutores estranhos à instalação.

Quando forem alimentados dois ou mais equipamentos (ver Figura 7.6), as massas existentes devem ser ligadas

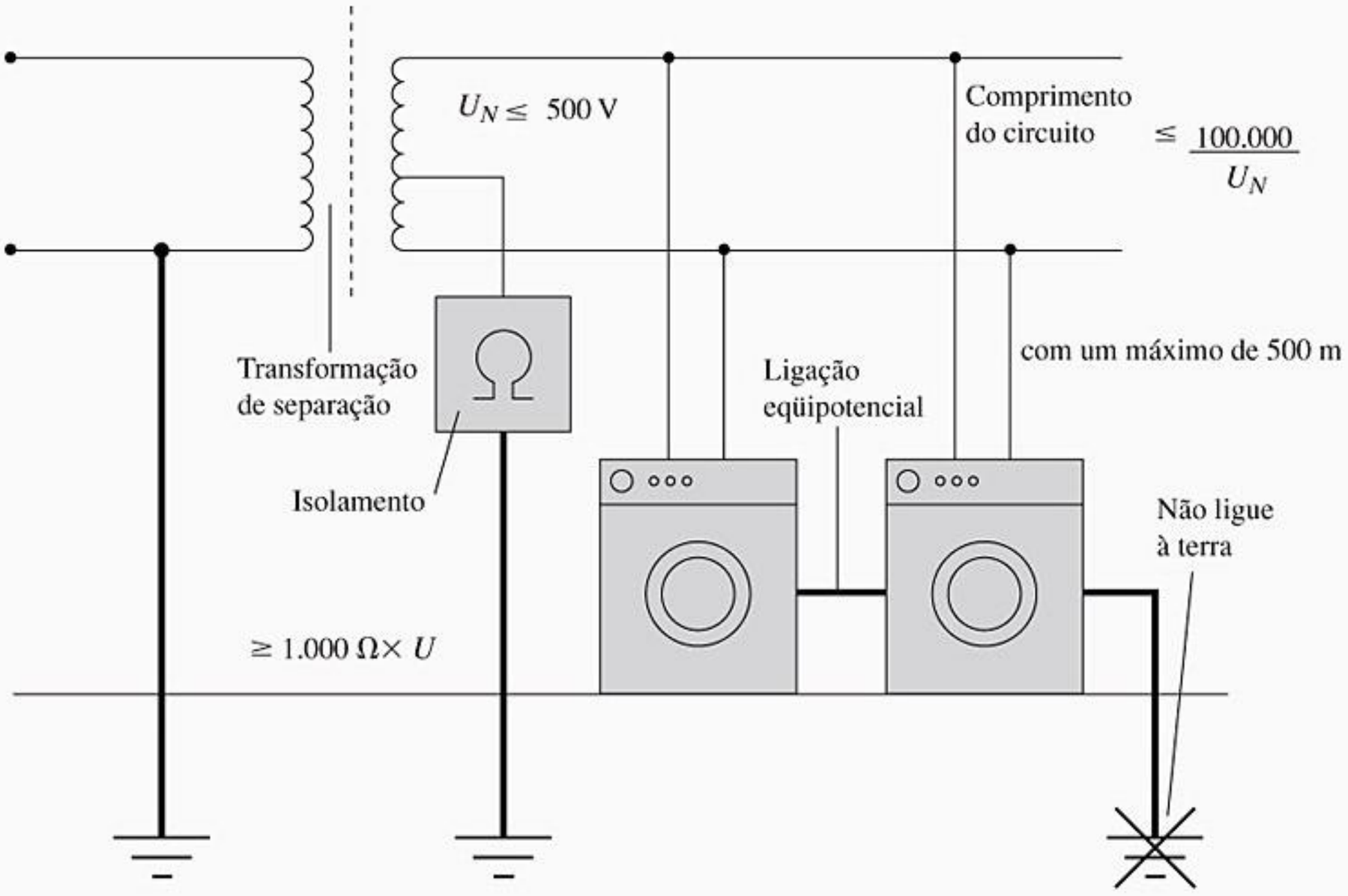


Figura 7.6 ▪ Circuito separado alimentando mais de uma carga

entre si por condutores de eqüipotencialidade não aterrados; esses condutores não devem ser ligados a condutores de proteção, às massas de outros circuitos nem a elementos condutores estranhos à instalação. As tomadas de corrente eventualmente existentes devem possuir um contato exclusivo para a ligação aos condutores de eqüipotencialidade. No caso de serem utilizados cabos flexíveis, estes devem possuir um condutor de proteção, que será utilizado como condutor de eqüipotencialidade.

EXERCÍCIOS

1. O que compreende o princípio fundamental relativo à proteção contra choques elétricos?

2. Explique o que são as proteções básica e supletiva?

3. Defina o que é um sistema SELV.

4. Defina o que é um sistema PELV.

5. Quais são as possíveis fontes que proporcionam uma completa separação galvânica entre os sistemas SELV e PELV e os circuitos a tensão mais elevada ou por fontes autônomas?

6. O que é o termo *extrabaixa tensão funcional,* denominada FELV?

7. Quais são as prescrições quanto à construção e às disposições a tomar para a instalação dos componentes de uma instalação elétrica, de tal modo que a segurança apresentada pelo conjunto seja equivalente à da classe II?

8. Quais as características dos locais considerados não condutores?

9. No que consiste a proteção por separação elétrica?

10. O que a NBR 5410 recomenda para evitar riscos de faltas para terra, principalmente no que concerne aos cabos flexíveis?

8

Medidas de proteção contra choques elétricos (II) — seccionamento automático

8.1 Fundamentos da proteção por seccionamento automático da alimentação

A *proteção por seccionamento automático da alimentação* é a principal medida de proteção supletiva contra contatos indiretos, prescrita pela NBR 5410. Destina-se a evitar que uma tensão de contato (U_B) superior à tensão de contato-limite (U_L) se mantenha por um tempo que possa resultar em risco de efeito fisiológico adverso (fibrilação ventricular) para as pessoas (ver Figura 8.1).

A proteção por secionamento automático da alimentação baseia-se, fundamentalmente, em duas condições:

(a) Existência de um percurso para a corrente de falta fase-massa (I_F) cuja composição depende do tipo de esquema de aterramento adotado (TN, TT ou IT).

(b) Seccionamento da corrente de falta por um dispositivo de proteção apropriado, atuando em um tempo adequado.

A primeira condição implica a existência de ligações de todas as massas da instalação a uma "infra-estrutura de aterramento" de proteção (ver Quadro 8.1), o que possibilitará a formação de um caminho para uma eventual corrente de falta fase-massa. A constituição de tal caminho, o *percurso da corrente de falta*, dependerá do esquema de aterramento adotado.

> Qualquer que seja o esquema de aterramento, TN, TT ou IT, a instalação deverá possuir uma *infra-estrutura de aterramento de proteção*, constituído pelos condutores de proteção (das massas e principais), pelo condutor de aterramentos e pelos condutores das ligações eqüipotenciais, todos ligados ao terminal de aterramento principal.

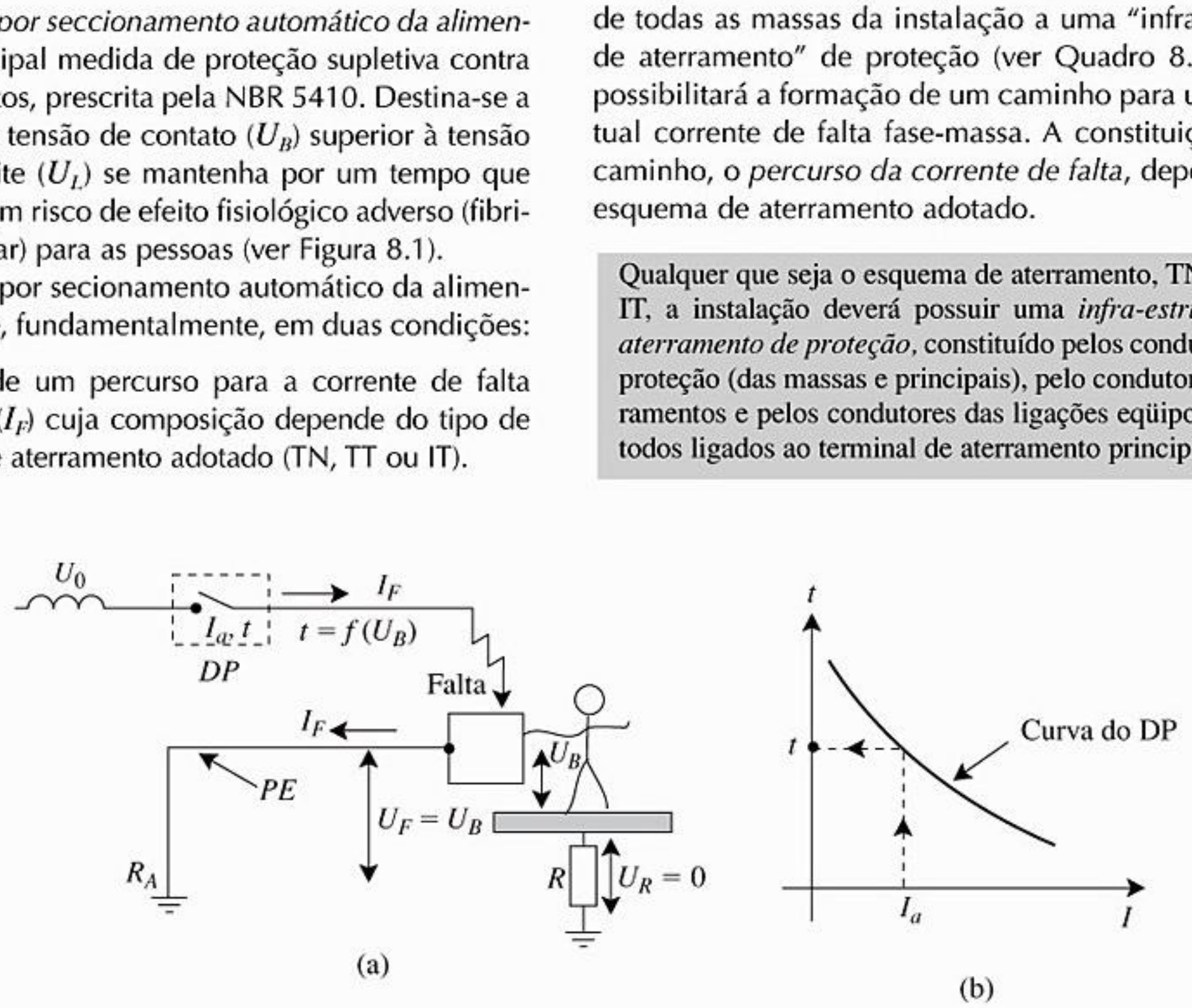


Figura 8.1 ▪ (a) Proteção contra contatos indiretos por seccionamento automático da alimentação; (b) o dispositivo de proteção (DP) percorrido por corrente I_a atua no tempo t, determinado de U_B

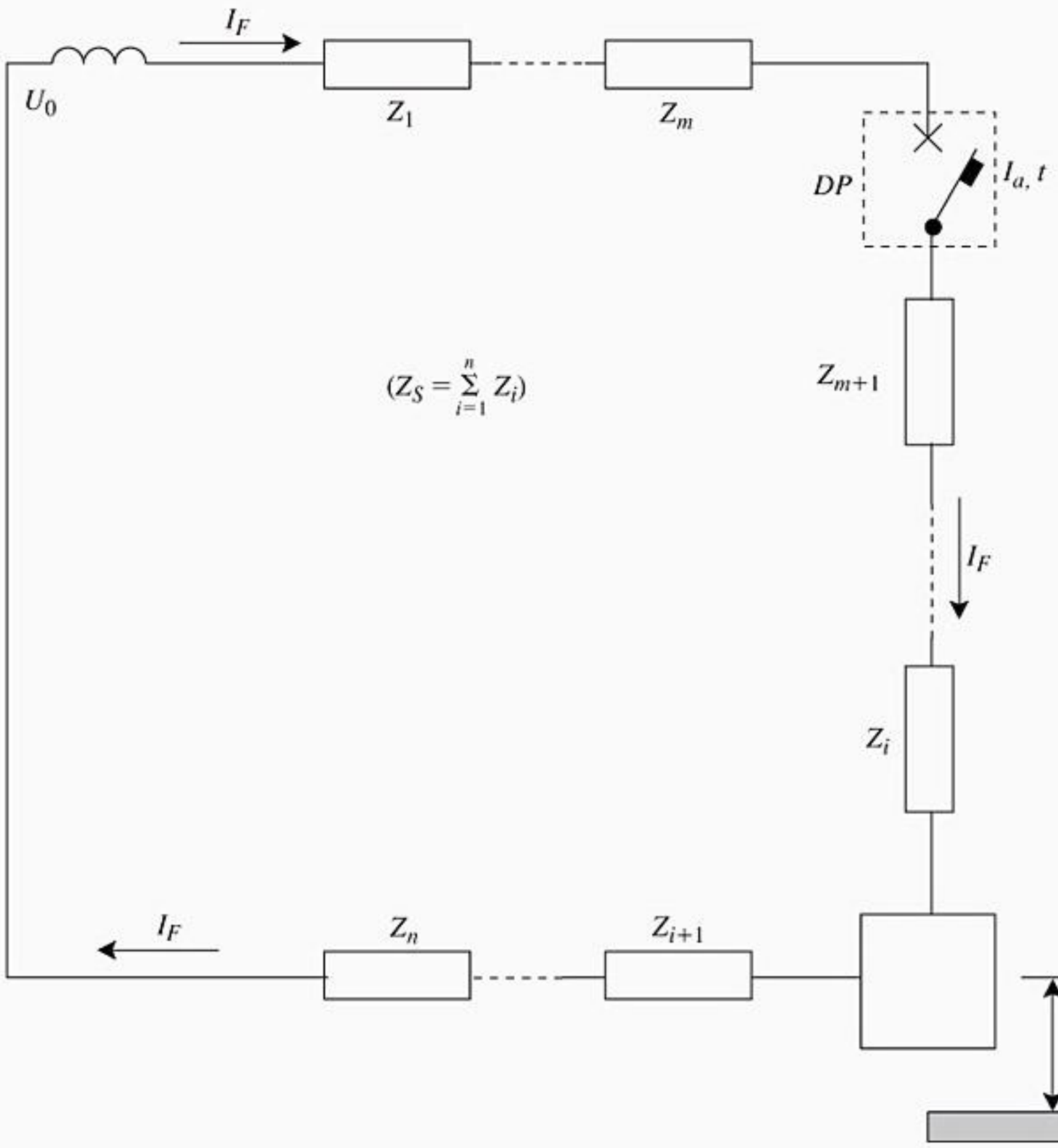


Figura 8.2 ▪ Circuito equivalente ao esquema da Figura 8.1

A segunda condição exige a instalação de dispositivos de proteção cujas características são definidas de acordo com o esquema TN, TT ou IT.

A *tensão de contato presumida* (U_B) em qualquer massa da instalação energizada devido a uma falta, é admitida igual à *tensão de falta* (U_F) e depende da tensão fase-neutro da instalação U_0, e das impedâncias existentes no percurso da corrente de falta (ver Figura 8.2).

Um dispositivo de proteção deve seccionar automaticamente, em um tempo adequado, a alimentação do circuito ou equipamento por ele protegido, sempre que uma falta (entre parte viva e massa ou entre parte viva e condutor de proteção) no circuito ou equipamento der origem a uma tensão de contato superior ao valor pertinente da tensão de contato limite U_L.

As tensões de contato limite para diferentes situações, em função das influências externas dominantes, são dadas na Tabela 8.1.

As condições a serem observadas no seccionamento automático da alimentação, incluindo o tempo máximo admissível para atuação do dispositivo de proteção, são aquelas estabelecidas adiante em 8.2 (para o esquema

Tabela 8.1 ▪ Valores da tensão de contato limite U_L (V)

Natureza da corrente	Situação 1[2]	Situação 2[2]	Situação 3[2]
Alternada, 15 Hz - 1.000 Hz	50	25	12
Contínua sem ondulação[1]	120	60	30

Notas:
1. Uma tensão contínua "sem ondulação" é convencionalmente definida como apresentando uma taxa de ondulação não superior a 10 por cento em valor eficaz; o valor de crista máximo não deve ultrapassar 140 V, para um sistema em corrente contínua sem ondulação com 120 V nominais ou 70 V para um sistema em corrente contínua sem ondulação com 60 V nominais
2. Situação 1 = BB1, BB2, BC1, BC2, BC3; Situação 2 = BB3, BC4; Situação 3 = BB4

de aterramento TN), 8.3 (para o esquema de aterramento TT), e em 8.4 (para o esquema de aterramento IT).

Independentemente do esquema de aterramento, admite-se um tempo de seccionamento maior que os definidos para cada esquema de aterramento, *mas não superior a 5 s*, para circuitos de distribuição, bem como para circuitos terminais que alimentem unicamente equipamentos fixos, desde que uma falta no circuito de distribuição, circuito terminal ou equipamento fixo (para os quais esteja sendo considerado o tempo de seccionamento de até 5 s) não propague, para equipamentos portáteis ou equipamentos móveis deslocados manualmente em funcionamento, ligados a outros circuitos terminais da instalação, uma tensão de contato superior ao valor pertinente de U_L. Se, na aplicação do seccionamento automático da alimentação, não for possível atender aos tempos de seccionamento máximos indicados em cada esquema ou não superior a 5 s, como explicado anteriormente, deve-se então realizar uma eqüipotencialização suplementar.

Os dispositivos apropriados, que foram desenvolvidos décadas atrás com a finalidade específica de proteção contra contatos indiretos, independentemente do esquema de aterramento utilizado, são os dispositivos à corrente diferencial-residual (DR). Tais dispositivos devem, portanto, controlar o tempo de ação da tensão de contato entre uma massa sob falta e qualquer elemento condutor estranho à instalação simultaneamente acessível. Sob certas condições muito particulares, nos esquemas TN e IT, a norma admite o uso dos dispositivos usuais de proteção contra sobrecorrentes (disjuntores e fusíveis) na proteção contra os contatos indiretos. No entanto, apesar de admitidos pela norma e serem uma solução de custo relativamente mais baixo, deve-se ressaltar que tais dispositivos não foram inventados para a proteção contra choques elétricos, mas, sim, como o próprio nome indica, foram desenvolvidos para a proteção contra sobrecorrentes de condutores e equipamentos elétricos. Dessa forma, seu uso como medida de proteção contra choques elétricos deve ser cercado de todo o cuidado.

8.2 Esquema TN

Generalidades

O esquema TN, como apresentado na Seção 3.3 (em "Esquemas de Aterramento"), é concebido de maneira que o percurso de uma corrente resultante de uma falta fase-massa em um componente ou em um equipamento elétrico da instalação seja constituído, exclusivamente, por elementos condutores metálicos (fios e cabos elétricos ou barramentos blindados).

A impedância desse percurso tem um valor suficientemente baixo, de modo que toda corrente de falta direta fase-massa é uma corrente de curto-circuito (fase-neutro).

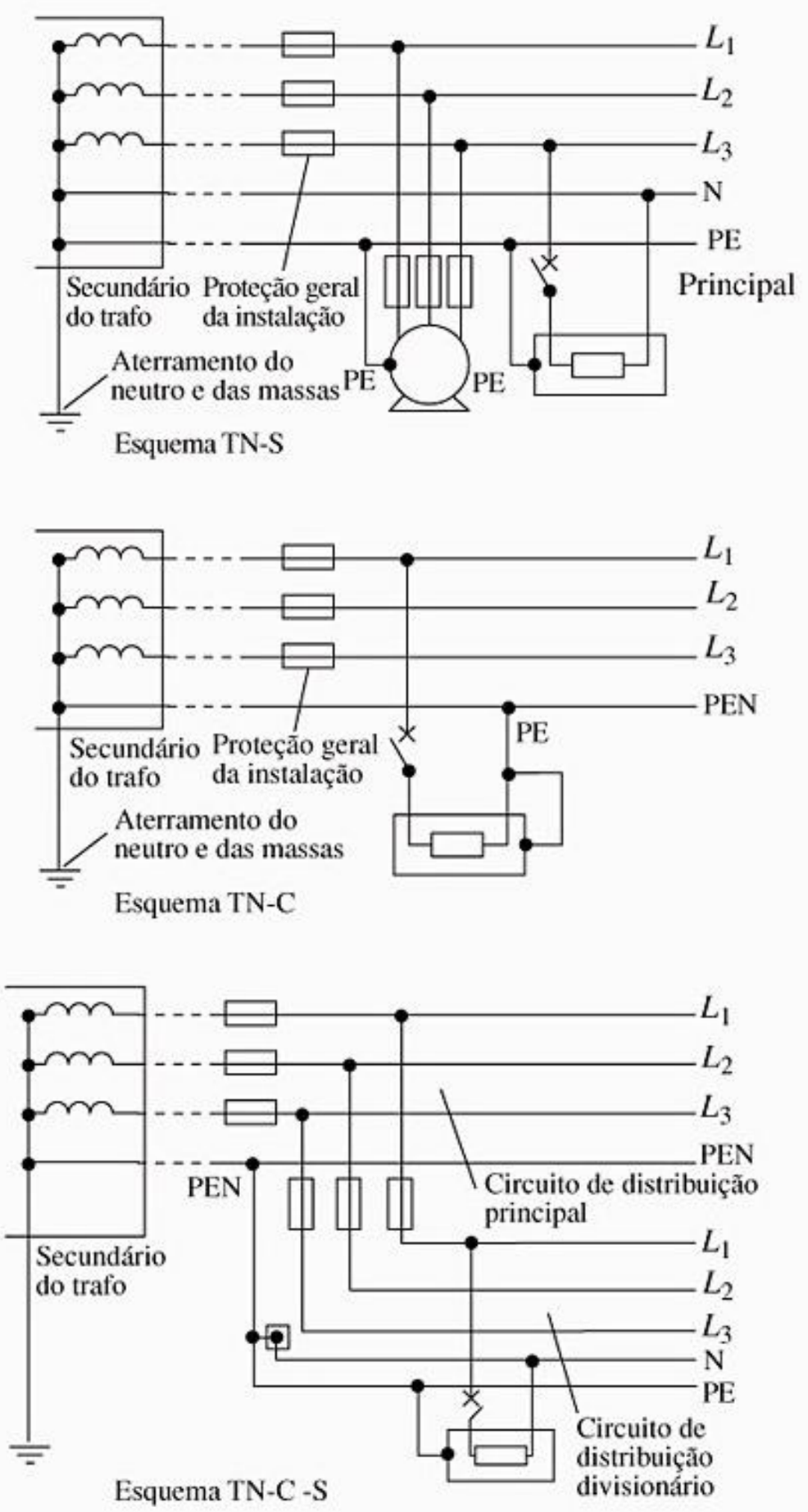


Figura 8.3 ▪ Tipos de esquemas TN

Nesse esquema, o ponto da alimentação — isto é, o secundário do transformador (ou, eventualmente, o gerador) —, em geral, o ponto neutro, é diretamente aterrado, sendo as massas da instalação ligadas a esse ponto por meio de condutores de proteção. Se o ponto neutro não for disponível nem acessível, um condutor de fase poderá ser aterrado junto do secundário do transformador (ou gerador).

São três os tipos de esquemas TN: o TN-S, em que os condutores neutro e de proteção são separados; o TN-C, em que o condutor PEN exerce a dupla função de neutro e de condutor de proteção; o TN-C-S, que é um esquema híbrido que combina os outros dois. Os três tipos são apresentados na Figura 8.3.

Esquema TN-C

No esquema TN-C, considerado o TN "original", há economia de um condutor, uma vez que é utilizado o

condutor PEN. É importante observar que esse condutor é, antes de mais nada, um condutor de proteção e deve obedecer a todas as características e condições exigidas para os condutores de proteção. O rompimento de um condutor PEN em uma instalação traz problemas sérios para a segurança, como mostra a Figura 8.4, em que um equipamento alimentado com fase e neutro ficará, devido ao rompimento do PEN, com a massa em um potencial igual ao da fase em relação à terra. Nessas condições, a NBR 5410, para minimizar os riscos, só admite o uso do esquema TN-C em instalações fixas cujos condutores tenham seção mínima de 10 mm², em cobre, ou 16 mm², em alumínio, e que não utilizem cabos flexíveis. Acrescente-se, ainda, que nesse esquema não se admite o uso de dispositivos DR, pelo simples motivo de que tal dispositivo não seria capaz de funcionar adequadamente, como tratado na Seção 6.5.

Esquema TN-S

Para o esquema TN-S não existem as restrições indicadas para o TN-C, isto é, ele pode ser usado em instalações que não sejam fixas, com condutores de qualquer tipo e seção, além de permitir o uso de dispositivos DR, quer como proteção contra contatos indiretos quer como proteção adicional contra contatos diretos. Devemos lembrar, no entanto, que no TN-S não existe a "economia" de um condutor, visto que o neutro e o condutor de proteção (PE) são separados.

Esquema TN-C-S

Na prática, principalmente em instalações de porte, utiliza-se também o esquema TN-C-S nos circuitos de maior seção, com condutores PEN, e nos demais circuitos, contendo separadamente os condutores neutro e de proteção. É importante observar que, partindo do ponto em que esses condutores se separam, a NBR 5410 não permite juntá-los novamente.

Em um esquema TN, as massas estão sempre sujeitas às sobretensões do neutro do sistema de alimentação. Por sua vez, como se pode observar na Figura 8.3, em um esquema TN-S, a tensão nas massas, em condições normais, é aproximadamente igual à tensão no ponto de ligação entre o neutro e o condutor de proteção (no BEP); no esquema TN-C, a tensão nas massas, em condições normais, é igual à tensão no ponto de ligação entre o neutro e as massas. Assim, a tensão nas massas será maior no TN-C do que no TN-S devido à queda de tensão no condutor neutro.

Condições de proteção

A Figura 8.5 indica uma situação de falta fase-massa em um esquema TN. São consideradas a resistência de aterramento do secundário do transformador (R_B), a resistência e a reatância do secundário do transformador (R_E e X_E), a resistência e a reatância (totais) dos condutores de fase, desde o transformador até a massa sob falta (R_L e X_L), a resistência e a reatância (totais) dos condutores de proteção — *e/ou* dos condutores PEN nos esquemas TN-C ou TN-C-S —, desde a massa sob falta até o terminal de aterramento principal (R_{PE} e X_{PE}), a impedância de falta (Z_F), a impedância do corpo humano (Z_H), e a resistência entre a pessoa e a terra (R) — resistência do piso e, se for o caso, do sapato.

Tendo em vista os valores de Z_H, R e R_B (da ordem de muitos ohms), geralmente muito superior à impedância total dos condutores de proteção *e/ou* PEN (da ordem de miliohms), pode-se considerar a malha superior como o único percurso da corrente de falta I_F. Para uma falta direta fase-massa, $Z_F = 0$, pode-se escrever para a impedância desse percurso, Z_S:

$$Z_S = \sqrt{(R_E + R_L + R_{PE})^2 + (X_E + X_L + X_{PE})^2} \quad (8.1)$$

chamando U_0 à tensão fase-neutro, pode-se escrever

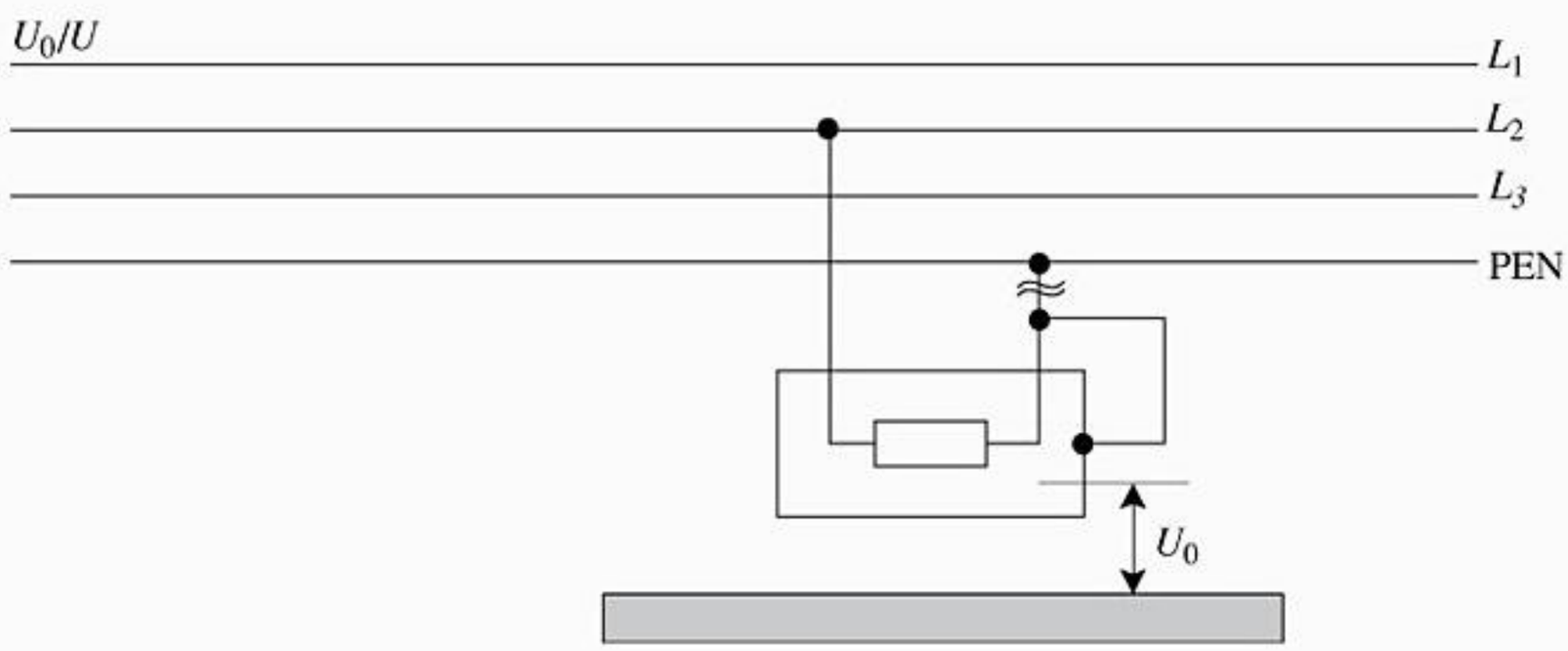


Figura 8.4 ▪ O rompimento do condutor PEN do sistema TN-C coloca a massa em um potencial igual ao da fase em relação à terra

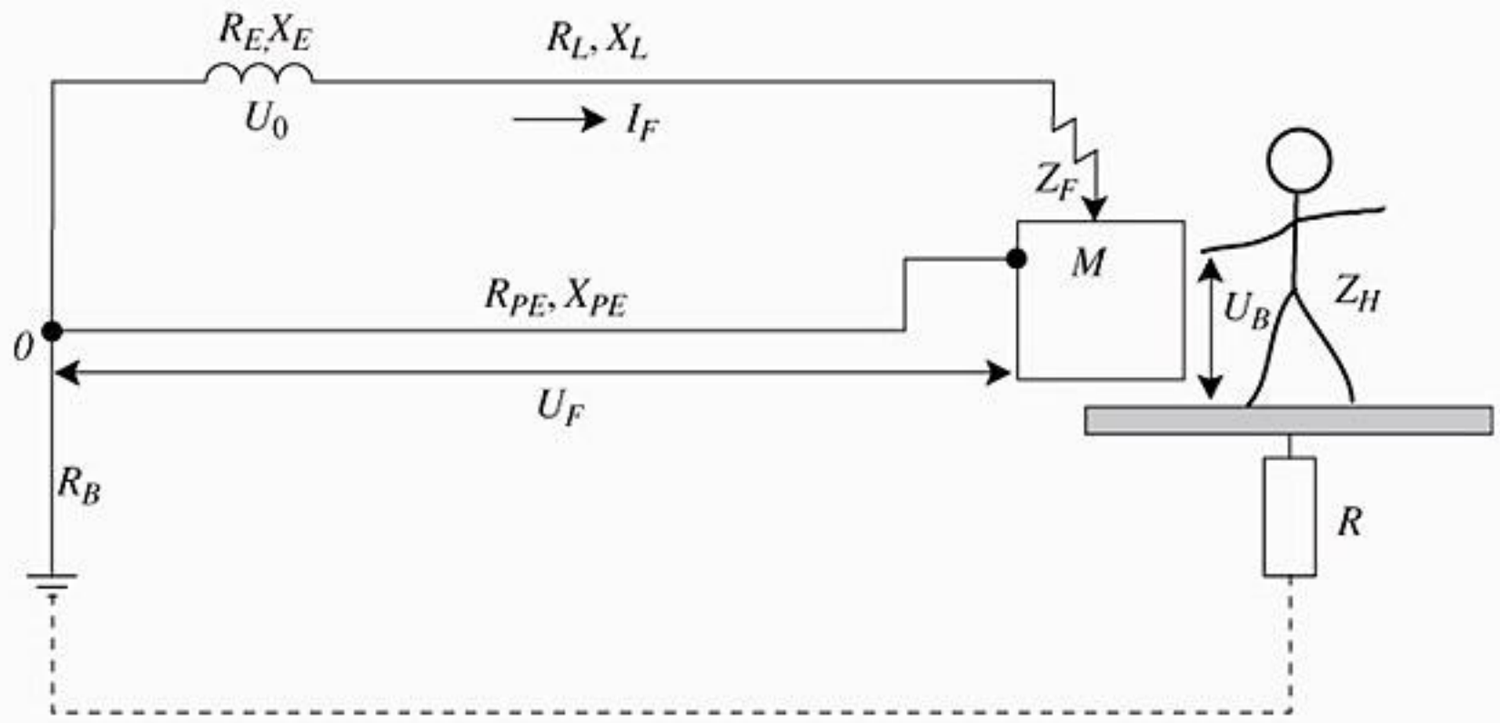


Figura 8.5 ■ Percurso da corrente de falta fase-massa em um esquema TN

$$U_0 = I_F Z_S = I_F \sqrt{(R_E + R_L + R_{PE})^2 + (X_E + X_L + X_{PE})^2} \quad (8.2)$$

A tensão de contato U_B, que, no pior caso, é igual à tensão de falta U_F (por se ter desprezado a malha inferior), será igual à queda de tensão (total) dos condutores de proteção (*e/ou* PEN), isto é, a queda entre os pontos M e O, ou seja

$$U_B = I_F \sqrt{R_{PE}^2 + X_{PE}^2} \quad (8.3)$$

dividindo a Expressão 8.2 pela Expressão 8.3, tem-se:

$$\frac{U_0}{U_B} = \frac{\sqrt{(R_E + R_L + R_{PE})^2 + (X_E + X_L + X_{PE})^2}}{\sqrt{R_{PE}^2 + X_{PE}^2}} \quad (8.4)$$

Desprezando-se as reatâncias do percurso de I_F, o que, na prática, só é possível para condutores de seção igual ou inferior a 35 mm², e admitindo-se a instalação dos condutores de proteção junto dos condutores vivos (para se desprezar a reatância mútua), obtém-se, da Expressão 8.1

$$Z_S = R_E + R_L + R_{PE} \quad (8.5)$$

da Expressão 8.2

$$U_0 = I_F 1 R_E + R_L + R_{PE} 2 \quad (8.6)$$

e da Expressão 8.3

$$U_B = I_F R_{PE} \quad (8.7)$$

Dividindo a Expressão 8.8 pela Expressão 8.7, tem-se:

$$\frac{U_0}{U_B} = \frac{R_E + R_L}{R_{PE}} + 1 \quad (8.8)$$

A análise das Expressões 8.4 ou 8.8 mostra que a relação U_0/U_B cresce e que, portanto, o perigo diminui (já que U_0 é constante), ao diminuir a impedância (ou a resistência) dos condutores de proteção, isto é, ao aumentar sua seção. Por sua vez, é fácil verificar que o *simples aterramento das massas*, ou seja, sua ligação aos condutores de proteção, *não é suficiente para garantir uma situação segura*: de fato, da Expressão 8.8, mesmo com $R_{PE} = R_L$ (condutores de proteção de mesmo tipo, seção e comprimento que os respectivos condutores de fase) e desprezando a resistência da fonte de alimentação ideal, isto é, $R_E = 0$, tem-se:

- Com $U_0 = 127$ V $\quad U_B = 63{,}5$ V
- Com $U_0 = 220$ V $\quad U_B = 110$ V

sendo ambos os valores de tensão de contato considerados perigosos, se não houver um seccionamento do circuito correspondente em um tempo adequado (cerca de 0,85 s para 63,5 V e 0,36 s para 110 V, situação 1 da Figura 3.8).

A condição de proteção prescrita pela NBR 5410, admitindo falta direta fase-massa, é:

$$Z_S \cdot I_a \leq U_0 \quad (8.9)$$

onde:

- Z_S é a impedância, em ohms, do percurso da corrente de falta, composto pela fonte, pelo condutor vivo, até o ponto de ocorrência da falta, e pelo condutor de proteção, do ponto de ocorrência da falta até a fonte.
- I_a é a corrente, em ampères, que assegura a atuação do dispositivo de proteção em um tempo no máximo igual ao especificado na Tabela 8.2, ou a 5 s, nos casos descritos anteriormente (alimentação de equipamentos fixos).
- U_0 é a tensão nominal, em volts, entre fase e neutro, valor eficaz em corrente alternada.

É importante notar que, no caso de uso de dispositivos DR, na prática, essa condição nem precisa ser verificada. Isso porque Z_S é da ordem de mΩ (condutores metálicos) e I_a é da ordem de mA (corrente de atuação do

Tabela 8.2 ■ Tempos de seccionamento máximos no esquema TN

U_0 (V)	Tempo de seccionamento (s)	
	Situação 1	Situação 2
115, 120, 127	0,8	0,35
220	0,4	0,20
254	0,4	0,20
277	0,4	0,20
400	0,2	0,05

DR), resultando no produto $Z_S \cdot I_a$ da ordem de μV, valor significativamente inferior a U_0, indicado na Tabela 8.2.

No entanto, embora simples, a aplicação dessa condição é sempre necessária no caso do emprego de dispositivos de proteção contra sobrecorrente, para a proteção contra choques elétricos. Assim:

- A tensão fase-neutro, U_0, é sempre conhecida.
- A impedância, Z_S, pode ser calculada pela Expressão 8.3 ou pela Expressão 8.7.
- Conhecendo a situação (1 ou 2), entra-se com U_0 na Tabela 8.2 e obtém-se o tempo máximo de seccionamento t.
- Entrando com t na curva tempo-corrente do dispositivo de proteção escolhido, obtém-se a corrente de atuação I_a (no caso de circuitos de distribuição e de circuitos terminais que só alimentem equipamentos fixos, na situação 1, entra-se diretamente na curva do dispositivo com $t = 5$ s).
- Basta então verificar se o produto $Z_S \cdot I_a$ é igual ou inferior a U_0.

EXEMPLO

Seja o trecho de instalação mostrado na Figura 8.6, onde se tem uma subestação (com um transformador), um circuito de distribuição e um circuito terminal, que alimenta uma massa admitida sob falta.

São dados:

- Transformador:

  50 kVA; 220/380 V; $R_E = 27{,}9\ \text{m}\Omega$, $X_E = 42{,}4\ \text{m}\Omega$

- Circuito de distribuição:
  - fases e neutro

    $S_1 = 35\ \text{mm}^2$, $l = 100$ m; $r_1 = 0{,}841\ \text{m}\Omega/\text{m}$, $x_1 = 0{,}101\ \text{m}\Omega/\text{m}$

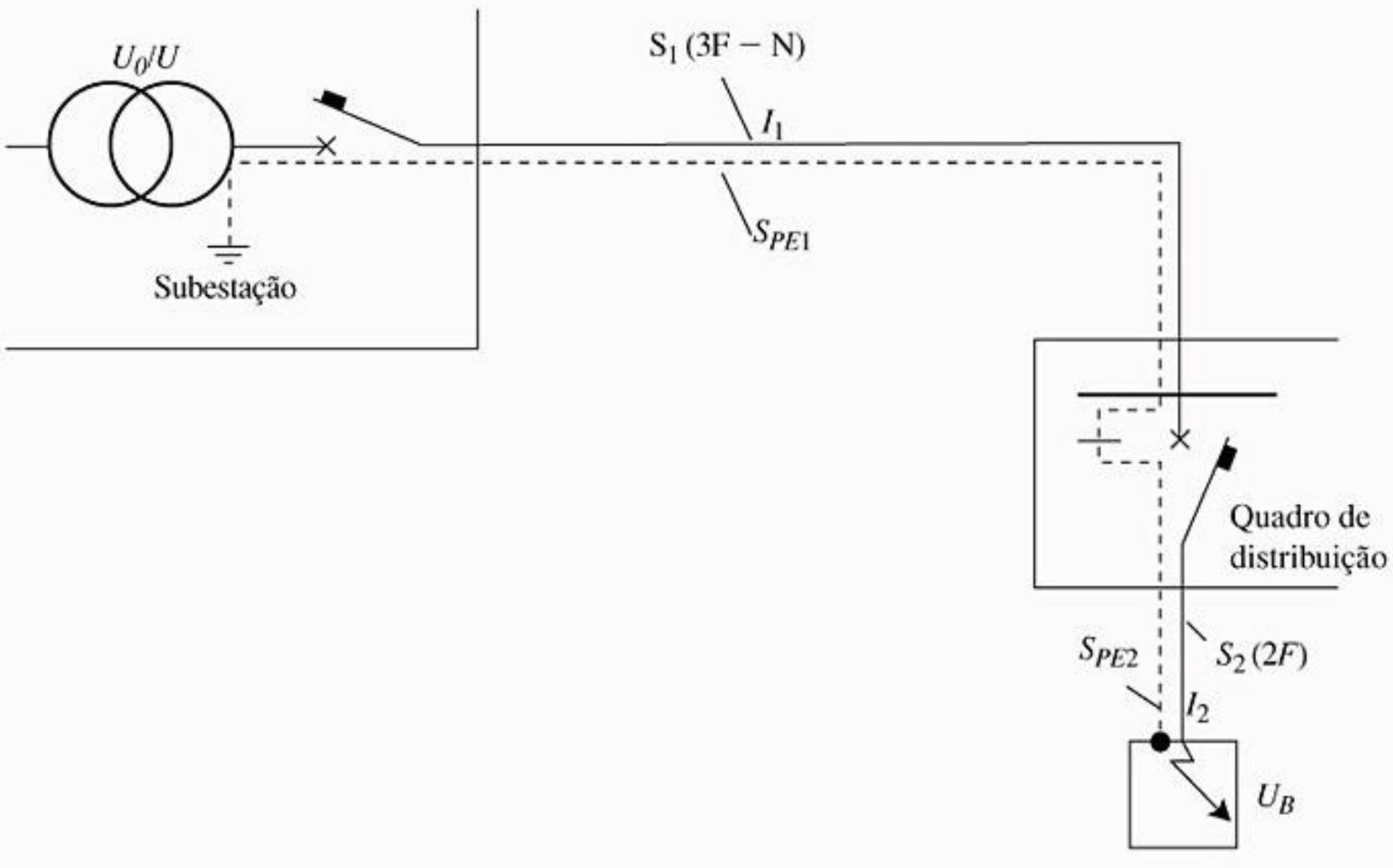


Figura 8.6 ■ Diagrama do exemplo

Tabela 8.3 ■ Determinação de impedância Z_S

	R (Ω)			X (Ω)		
Transformador	$27{,}9 \times 10^{-3}$	=	0,03	$42{,}4 \times 10^{-3}$	=	0,04
Fase S_1	$0{,}841 \times 10^{-3} \times 100$	=	0,08	$0{,}101 \times 10^{-3} \times 100$	=	0,01
Fase S_2	$5{,}57 \times 10^{-3} \times 30$	=	0,17	$0{,}143 \times 10^{-3} \times 30$	=	0
Proteção S_{PE2}	$5{,}57 \times 10^{-3} \times 30$	=	0,17	$0{,}143 \times 10^{-3} \times 30$	=	0
Proteção S_{PE1}	$1{,}41 \times 10^{-3} \times 100$	=	0,14	$0{,}112 \times 10^{-3} \times 100$	=	0,01
			$R_S = 0{,}59$			$X_S = 0{,}06$

■ condutor de proteção

$$S_{PE1} = 16 \text{ mm}^2,\ l = 100 \text{ m};\ r_{PE1} = 1{,}41 \text{ m}\Omega/\text{m},\ x_{PE1} = 0{,}112 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

■ Circuito terminal:

$$S_2 = S_{PE2} = 4 \text{ mm}^2,\ l_2 = 30 \text{ m};\ r_2 = r_{PE1} = 5{,}57 \text{ m}\Omega/\text{m},\ x_2 = x_{PE2} = 0{,}143 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

■ Disjuntor (circuito terminal) conforme NBR NM 60898, 25 A.

■ Situação 1.

(a) Impedância do percurso da corrente de falta, da Expressão 8.3

$$Z_S = \sqrt{0{,}59^2 + 0{,}06^2} \cong 0{,}59\ \Omega$$

(b) Entrando com $U_0 = 220$ V na Tabela 8.2 (Situação 1), obtém-se o tempo de seccionamento máximo $t = 0{,}4$ s.

(c) Entrando com 0,4 s na característica do disjuntor, conforme NBR NM 60898, de 25 A (Figura 8.7) obtém-se a corrente (máxima) de atuação

$$I_a = 10 \times 25 = 250 \text{ A}$$

(d) Aplicando a condição dada na Expressão 8.9

$$\underbrace{0{,}59 \times 250}_{147{,}5} < 220 \text{ V}$$

o que mostra que, nesse caso particular, o disjuntor escolhido atende às prescrições da norma em relação à proteção contra contatos indiretos.

(e) Se o circuito só alimentar equipamentos fixos, entra-se na curva do disjuntor com $t = 5$ s, obtendo (ver Figura 8.7)

$$I_a = 4{,}5 \times 25 = 112{,}5 \text{ A}$$

e então da Expressão 8.11

$$0{,}59 \times 112{,}5 = 66{,}4 < 220 \text{ V}$$

mostrando que, também nessas condições, o disjuntor escolhido atende às prescrições da norma em relação à proteção contra contatos indiretos.

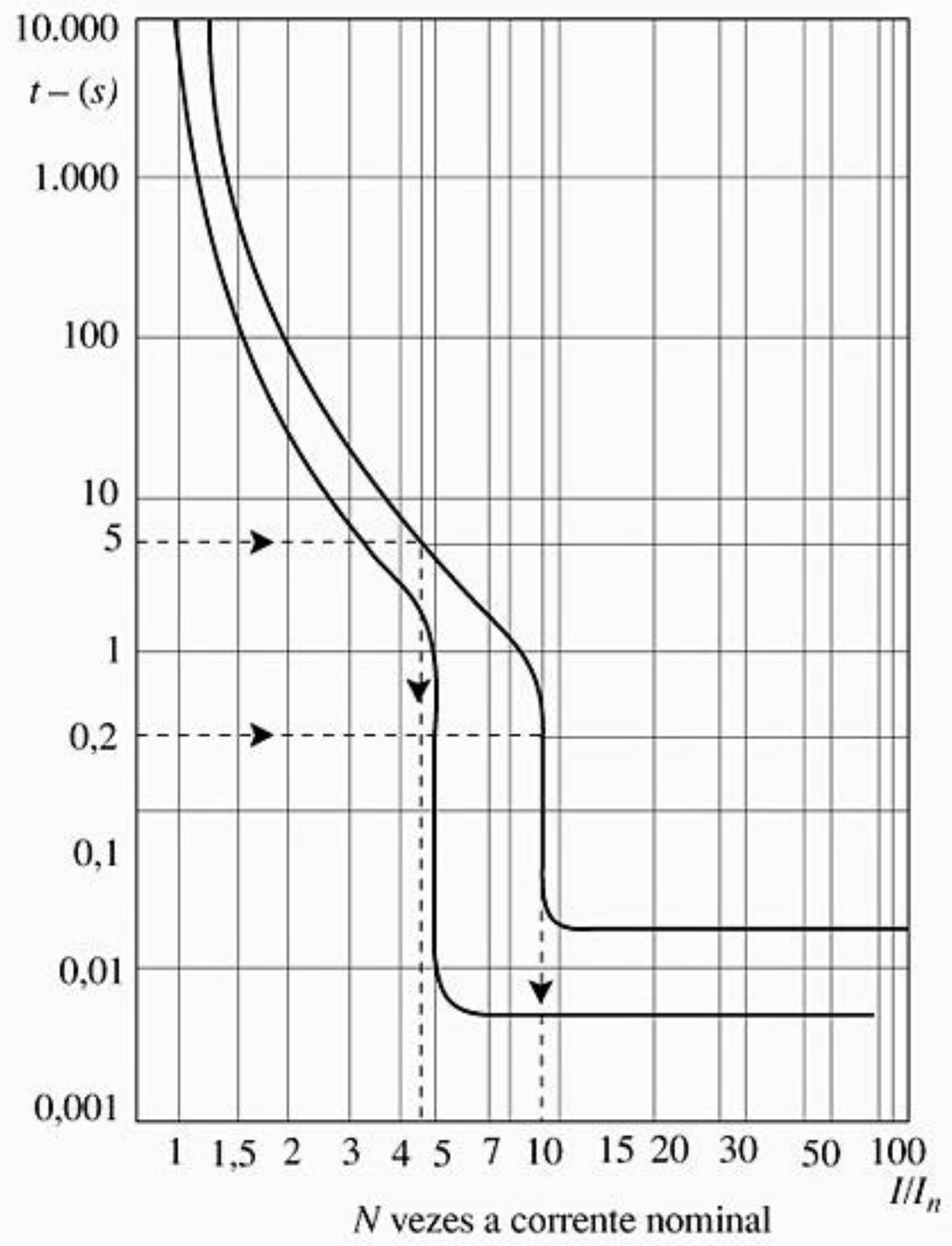


Figura 8.7 ■ Característica típica de atuação de um disjuntor conforme NBR NM 60898

Impedância Z_s

Quando se pretende usar dispositivos de proteção contra sobrecorrentes para a proteção contra choques elétricos nos esquemas TN, é de fundamental importância conhecer a impedância Z_S, que, no caso mais geral, inclui a impedância do secundário do transformador e as impedâncias de todos os condutores (fase e de proteção) entre o transformador e a falta.

A impedância Z_S pode ser medida (no caso de verificação das instalações) ou calculada (o que é mais importante no caso de projeto). Para tanto, é importante que os condutores de proteção (ou PEN), integrantes do percurso da corrente de falta, se encontrem instalados juntos aos condutores vivos dos circuitos correspondentes.

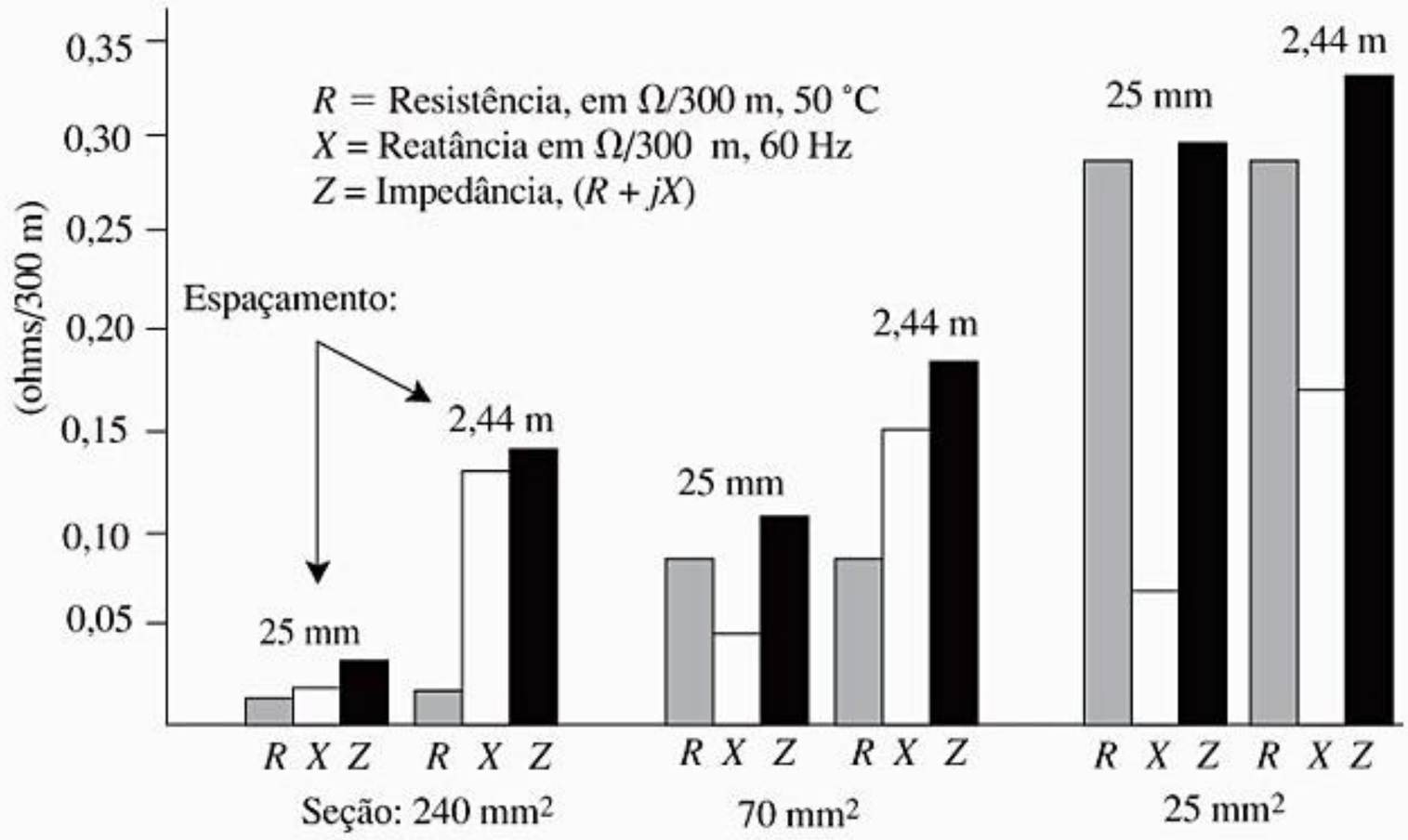


Figura 8.8 ▪ Influência do espaçamento sobre a reatância indutiva (*X*) dos condutores (*Fonte*: ANSI/IEEE 142.1982) (Cortesia de Celso L. Pereira Mendes)

Na prática, isso é conseguido quando, em cada um dos circuitos da instalação, o condutor de proteção faz parte da mesma linha elétrica que os condutores vivos (por exemplo, quando está no mesmo eletroduto que os condutores vivos ou quando é uma das veias do cabo multipolar que contém aqueles condutores).

Se os condutores de proteção não estão nas proximidades dos condutores vivos dos circuitos, não é possível calcular de modo simples a impedância do percurso da corrente de falta, uma vez que a determinação das reatâncias mútuas se torna muito complexa. Consegue-se apenas obter o valor por medição feita, logicamente, após a execução da instalação. O distanciamento dos condutores de proteção aumenta sensivelmente a reatância indutiva do percurso e, conseqüentemente, o valor de Z_S (principalmente se, no percurso, houver elementos metálicos). Isso pode ser visto na Figura 8.8.

Com base na Expressão (8.11), pode-se definir uma *impedância máxima*, $Z_{Smáx}$ para o percurso da corrente de falta dada por

$$Z_{Smáx} = \frac{U_0}{I_a} \tag{8.10}$$

Para dada tensão fase-neutro, fixando determinado tipo de dispositivo de proteção (disjuntor ou dispositivo fusível) e um tempo máximo de seccionamento, pode-se tabelar $Z_{Smáx}$ em função das correntes nominais do dispositivo.

Veja-se o exemplo genérico de um disjuntor termomagnético em caixa moldada conforme NBR NM 60898 (característica de atuação dada na Figura 8.7). Para um tempo de seccionamento $t = 5$ s (indicado para circuitos que só alimentem equipamentos fixos, Situação 1), tem-se, da característica

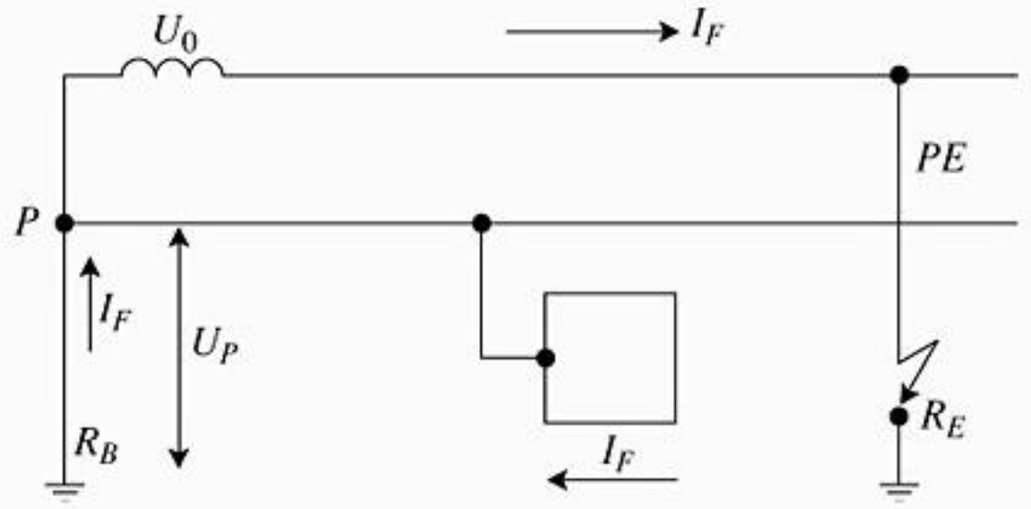


Figura 8.9 ▪ Esquema elétrico indicando falta direta entre fase e terra

$$I_a = 4{,}5\, I_N \tag{8.11}$$

e então, da Expressão 8.10

$$Z_{Smáx} = \frac{U_0}{4{,}5 I_N} \tag{8.12}$$

A Tabela 8.4 apresenta os valores de $Z_{Smáx}$ calculados da Expressão 8.13, para as diversas correntes nominais do disjuntor conforme NBR NM 60898 indicados na Figura 8.7.

Considera-se agora a situação mostrada no esquema elétrico da Figura 8.9, onde se tem indicada uma falta direta entre fase e terra. Trata-se de um caso que pode ocorrer nas linhas aéreas. Sejam R_B a resistência de aterramento global e R_E a resistência mínima presumida de contato com a terra dos elementos condutores não ligados ao condutor de proteção.

A corrente de falta (I_F) percorrerá o caminho indicado e elevará o potencial do ponto P e, conseqüentemente, do condutor de proteção e das massas a ele ligadas. Seja U_P a tensão entre P e a terra, isto é, o potencial do ponto

Tabela 8.4 ■ Valores máximos da impedância do percurso da corrente de falta fase-massa ($Z_{Smáx}$) quando a proteção contra contatos indiretos é realizada por disjuntores em caixa moldada conforme NBR NM 60898, considerando-se o tempo de seccionamento de 5 segundos

Corrente nominal I_N (A)	$Z_{Smáx}$ (Ω)	
	$U_0 = 127$ V	$U_0 = 220$ V
5	5,64	9,78
10	2,82	4,88
15	1,88	3,25
20	1,41	2,44
25	1,13	1,95
30	0,94	1,63
35	0,81	1,40
40	0,71	1,23
50	0,56	0,97
60	0,47	0,81
70	0,40	0,69
90	0,31	0,54
100	0,28	0,48

P e das massas por ocasião da ocorrência da falta. Desconsiderando-se as impedâncias da fonte e dos cabos de alimentação, pode-se escrever:

$$U_0 = (R_B + R_E)I_F \tag{8.13}$$

$$U_P = R_B \cdot I_F \tag{8.14}$$

Das Expressões 8.13 e 8.14, obtém-se

$$U_P = \frac{R_B}{R_B + R_E} U_0 \tag{8.15}$$

Para ter-se a proteção na situação mostrada, é necessário que as massas dos equipamentos elétricos não atinjam um potencial superior à tensão de contato-limite (U_L), isto é:

$$\frac{R_B}{R_B + R_E} U_0 \leq U_L$$

rearranjando essa expressão, tem-se

$$\frac{R_B}{R_E} \leq \frac{U_L}{U_0 - U_L} \tag{8.16}$$

Assim, por exemplo, com $U_0 = 127$ V, $U_L = 50$ V (Situação 1) e $R_E = 5\ \Omega$, a resistência de aterramento da alimentação e das massas deverá ser, da Expressão 8.16, de

$$R_B \leq \frac{50}{127 - 50} \cdot 5 = 3{,}25\ \Omega$$

já se $U_0 = 220$ V, tem-se

$$R_B \leq 1{,}47\ \Omega$$

Se o circuito apresentado na Figura 8.9 for protegido por um dispositivo DR, a proteção contra contato indireto nas massas estará sempre assegurada.

Dispositivos de proteção

A NBR 5410 indica, para a proteção contra contatos indiretos nos esquemas TN, o uso de dispositivos DR (logicamente, nunca nos esquemas TN-C) ou dispositivos de proteção a sobrecorrente.

O uso de DRs de alta sensibilidade é obrigatório, pela norma, em circuitos terminais:

- Que sirvam a pontos de utilização situados em locais contendo banheira ou chuveiro.
- Que alimentem tomadas de corrente situadas em áreas externas à edificação.
- De tomadas de corrente situadas em áreas internas que possam vir a alimentar equipamentos no exterior.
- Que, em locais de habitação, sirvam a pontos de utilização situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e demais dependências internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens.
- Que, em edificações não residenciais, sirvam a pontos de tomada situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e, no geral,

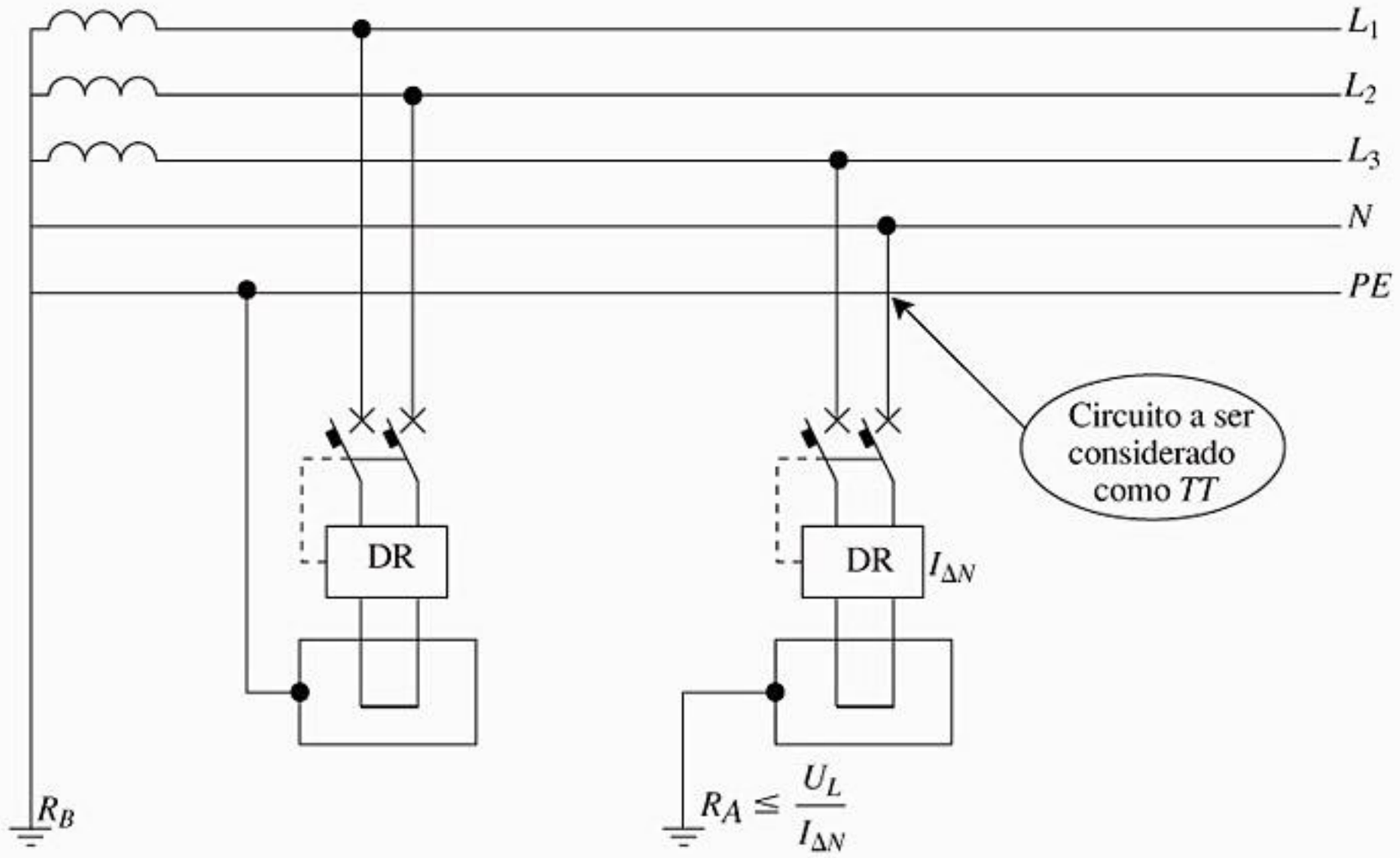


Figura 8.10 ▪ Aplicação de dispositivos DR em um esquema TN

em áreas internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens.

Observe que, nesses casos, os dispositivos DR também estarão proporcionando a já citada proteção adicional contra contatos diretos. É importante observar, também, que, para os circuitos referidos, a proteção diferencial poderá ser feita individualmente (1 DR por circuito) ou por grupos de circuitos (1 DR servindo a vários circuitos).

Por sua vez, ainda segundo a NBR 5410, quando em dado setor de uma instalação com esquema TN a condição dada na Expressão 8.9 não puder ser cumprida, deve-se assegurar a proteção utilizando dispositivos DR ou, como alternativa, executando uma ligação eqüipotencial suplementar no local.

Isso acontece quando a impedância do percurso da corrente de falta (Z_S) possui um valor suficientemente elevado para não permitir a atuação dos dispositivos de proteção a sobrecorrente no tempo adequado. É o caso, por exemplo, de instalações em prédios com subestação própria, cujas distâncias à subestação são muito grandes (devido à grande altura ou ao grande comprimento do prédio).

Quando forem usados dispositivos DR, deve-se observar que as massas dos equipamentos protegidos podem não ser ligadas ao condutor de proteção do esquema TN, desde que sejam ligadas a um eletrodo de aterramento cuja resistência seja compatível com a corrente de atuação do dispositivo DR. Nesse caso, o circuito em questão deve ser considerado de acordo com o Esquema TT (ver Figura 8.10).

Aplicação prática da condição de proteção

Para a aplicação da condição de proteção contra contatos indiretos nos esquemas TN, é necessário calcular a impedância do percurso da corrente de falta (Z_S), o que exige o conhecimento da impedância de todos os elementos que constituem o referido percurso, incluindo a fonte. Os condutores vivos e os de proteção deverão fazer parte das mesmas linhas elétricas.

Considere um *ponto de referência* como o ponto mais próximo de uma massa e cujo potencial, no caso de uma falta nessa massa, permaneça sensivelmente igual ao potencial do local onde ela está situada e igual ao potencial dos elementos condutores que possam ser tocados simultaneamente com a referida massa. Tal ponto pode ser obtido, na prática, com a realização de uma ligação eqüipotencial local, no nível do quadro de distribuição de onde parte o circuito terminal que alimenta a massa considerada, ligando o terminal de aterramento do quadro a um elemento condutor estranho à instalação (tubulação metálica, ferro de construção etc.), como sugere a Figura 8.11.

A tensão de contato presumida (U_B) pode agora ser obtida da impedância do percurso da corrente de falta no trecho entre a falta e o ponto de referência, aplicando-se um fator de correção que leva em consideração a impedância do percurso a montante do ponto de referência. Assim, sendo R_L e R_{PE}, respectivamente, a resistência do condutor de fase e do condutor de proteção entre a massa sob falta e o ponto de referência, e 1/C o fator que corrige (ou seja, majora) a impedância

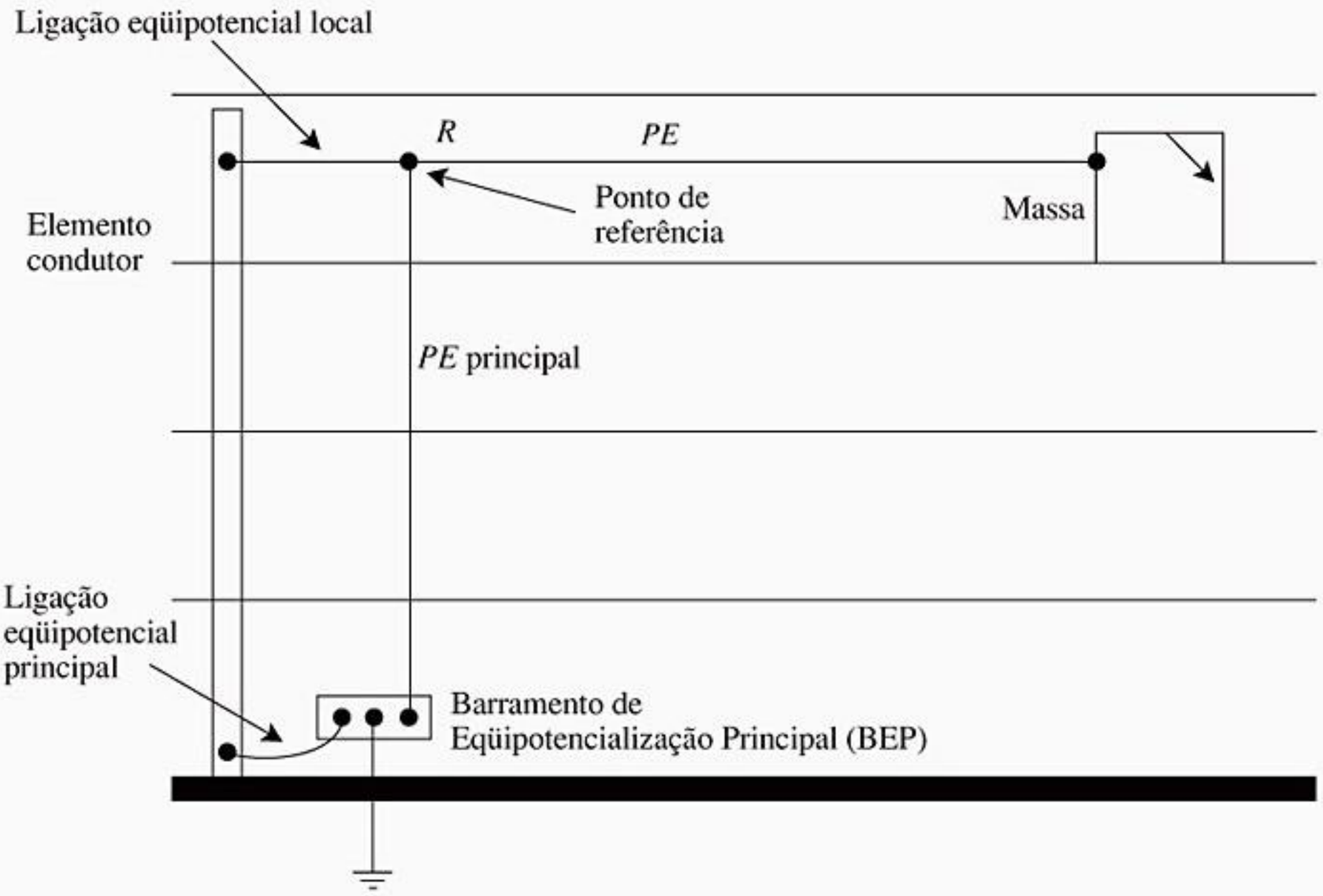


Figura 8.11 ■ Exemplo de ponto de referência

$(R_L + R_{PE})$, pode-se escrever, a partir da Expressão 8.17:

$$U_B = U_0 \frac{R_{PE}}{\frac{1}{c}(R_L + R_{PE})} = cU_0 \frac{R_{PE}}{R_L + R_{PE}} \qquad (8.17)$$

Chamando m a relação de R_{PE} para R_L, obtém-se da Expressão 8.17

$$U_B = cU_0 \frac{m}{1 + m} \qquad (8.18)$$

Observe que, se os condutores forem do mesmo material, m também será igual à relação da seção do condutor de fase para a do condutor de proteção, isto é,

$$m = \frac{R_{PE}}{R_L} = \frac{S_L}{S_{PE}} \qquad (8.19)$$

Assim, de acordo com a Expressão 8.20, nas condições indicadas, a tensão de contato pode ser determinada em função apenas da tensão fase-neutro e dos fatores c e m. O fator c pode variar de 0,6 (caso de circuito muito distanciado da fonte) a 1 (caso de circuito ligado diretamente à fonte), sendo geralmente tomado igual a 0,8, o que atende à maior parte dos casos verificados na prática. Por sua vez, m varia de 1 a 3, sendo geralmente igual à unidade para seções iguais e inferiores a 16 mm².

Considerando $0{,}6 \leq c \leq 1$ e $1 \leq m \leq 3$, verifica-se que a tensão de contato presumida (U_B) pode variar de 0,3 U_0 a 0,75 U_0. Assim:

- Para $U_0 = 127$ V _____ $38{,}1\text{ V} \leq U_B \leq 95{,}3\text{ V}$
- Para $U_0 = 220$ V _____ $66\text{ V} \leq U_B \leq 165\text{ V}$

Da Expressão 8.9, pode-se escrever, considerando as condições impostas:

$$\frac{1}{c}(R_L + R_{PE}) \cdot I_a \leq U_0$$

e daí

$$I_a \leq \frac{cU_0}{R_L + R_{PE}} \qquad (8.20)$$

Sendo ρ a resistividade do material dos condutores e l o comprimento do circuito terminal, tem-se, da Expressão 8.20

$$I_a \leq \frac{cU_0}{\rho l\left(\frac{1}{S_L} + \frac{1}{S_{PE}}\right)}$$

e multiplicando numerador e denominador por S_L, considerando a definição de m dada na Expressão 8.19, obtém-se

$$I_a \leq \frac{cU_0}{\rho l\,(1 + m)} \cdot S_L$$

e então

$$l \leq \frac{cU_0}{\rho I_a\,(1 + m)} \cdot S_L \qquad (8.21)$$

Pode-se então escrever

$$l_{\max} \leq \frac{cU_0}{\rho I_a(1+m)} \cdot S_L \qquad (8.22)$$

onde

- $l_{\max}$ é o comprimento máximo do circuito terminal (m).
- U_0 é a tensão fase-neutro da instalação (V).
- c é um fator que leva em conta o percurso da corrente de falta a montante do circuito terminal.
- S_L é a sessão nominal dos condutores vivos do circuito terminal (mm^2).
- ρ é a resistividade do material dos condutores do circuito terminal ($\Omega.mm^2/m$); considera-se geralmente para o cobre (caso mais comum) o valor 0,0225 $\Omega.mm^2/m$, que corresponde a uma temperatura de cerca de 98°C.
- I_a é a corrente que garante a atuação do dispositivo a sobrecorrente em um tempo t, obtido da Tabela 8.2 ou igual a 5 s, conforme o caso.
- m é a relação da seção dos condutores vivos para a do condutor de proteção do circuito.

Para circuitos terminais com comprimento superior a $l_{\max}$ o dispositivo de proteção a sobrecorrente *não assegura a proteção contra contatos indiretos*.

EXEMPLO

Circuito terminal de tomadas de corrente. Condutores de cobre (ρ = 0,0225 $\Omega.mm^2/m$), $S_L = S_{PE}$ = 2,5 mm^2 (m = 1), proteção com disjuntor conforme NBR NM 60898 de 16 A. Tensão fase-neutro da instalação U_0 = 127 V, Situação 2, c = 0,8. Calcular a máxima distância do circuito terminal que ainda é assegurada à proteção por contatos indiretos.

- Da Expressão 8.20: $U_B = 0{,}8 \times 127 \times 1/2 = 50{,}8$ V
- Da Tabela 8.2: t = 0,35 s
- Da curva do disjuntor (Figura 8.7): $I_a = 10 \times 16 =$ 160 A
- Da Expressão 8.24:

$$l_{\max} = \frac{0{,}8 \times 127}{0{,}0225 \times 160 \times 2} \times 2{,}5 = 35{,}3 \text{ m}$$

A Expressão 8.24 é a base do "critério da proteção contra contatos indiretos", aplicável a circuitos terminais de instalações TN, *protegidos por dispositivos a sobrecorrente*, admitindo-se que:

- O condutor de proteção esteja contido na mesma linha elétrica dos condutores vivos.
- Exista um "ponto de referência" no nível da origem do circuito.

Tal critério é aplicado, geralmente, após o dimensionamento do circuito pelos critérios tradicionais, isto é, após a determinação da seção nominal dos condutores vivos (ou seja, S_L e S_{PE} e, conseqüentemente, m) e do tipo e da corrente nominal (I_N) do dispositivo de proteção contra sobrecorrentes, conhecido, logicamente, o comprimento l do circuito. Consiste em:

- Definir o tipo de circuito terminal quanto ao(s) equipamento(s) a ser(em) alimentado(s) – fixo(s) ou não.
- Definir a situação (1 ou 2) do local em que se situa o circuito.
- Determinar o tempo máximo de seccionamento (t) do circuito, sendo:
- t = 5 s, quando o circuito somente alimentar equipamento(s) fixo(s) na Situação 1.
- t obtido da Tabela 8.2 nos demais casos.
- Da característica tempo corrente do dispositivo de proteção obter a corrente de atuação I_a correspondente ao tempo t.
- Calcular o comprimento $l_{máx}$ pela Expressão 8.24 e comparar com l; se $l \leq l_{máx}$ o dispositivo a sobrecorrente protege o circuito contra contatos indiretos; se $l > l_{máx}$, deve-se
  - Aumentar a seção dos condutores e proceder à nova verificação; ou
  - Instalar um dispositivo DR (somente nos esquemas TN-S ou TN-C-S); ou
  - Estabelecer ligações eqüipotenciais suplementares.

A Tabela 8.5 dá os valores de $l_{máx}$ para os casos mais comuns de circuito terminais, considerando disjuntores com curva de atuação conforme Figura 8.8.

No caso de ser a proteção contra contatos indiretos, realizada por dispositivos fusíveis, o que é comum, sobretudo em instalações industriais, a determinação do comprimento máximo do circuito terminal é um pouco mais trabalhosa, uma vez que as características tempo-corrente dos fusíveis não podem ser, como no caso de disjuntores termomagnéticos, colocadas sob a forma de duas curvas para toda uma gama de correntes nominais; para cada corrente nominal haverá um par de curvas.

EXEMPLO

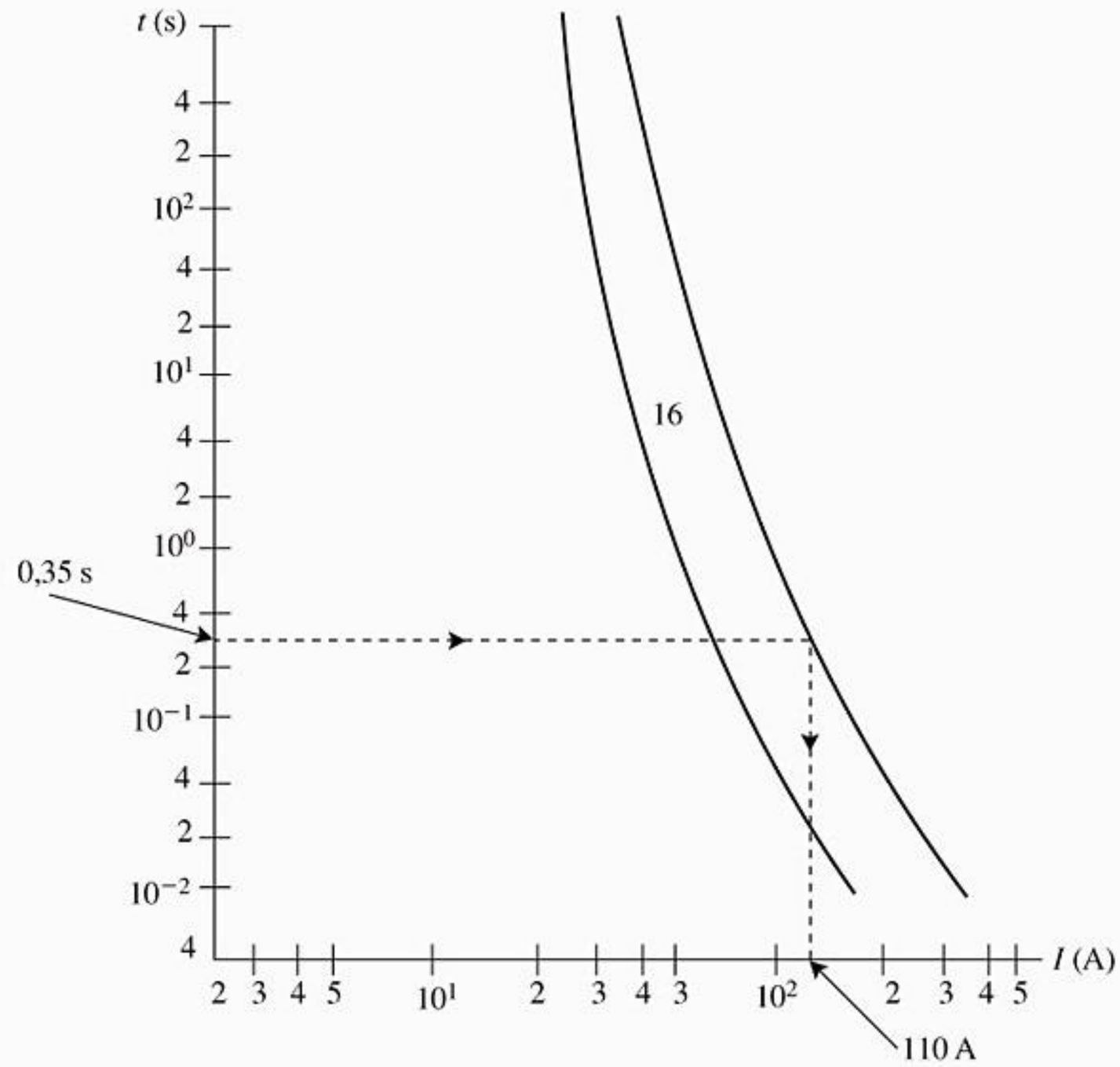
Admite-se que o circuito terminal do exemplo anterior seja protegido por um dispositivo fusível com um fusível gG de 16 A (cuja característica é dada na Figura 8.12).

- Tem-se do exemplo U_0 = 127 V e t = 0,35 s (ver Tabela 8.2)
- Da Figura 8.12: I_a = 110 A
- Da Expressão 8.24:

$$l_{máx} = \frac{0{,}8 \times 127}{0{,}0226 \times 110 \times 2} \times 2{,}5 = 51{,}3 \text{ m}$$

Tabela 8.5 ■ Comprimento máximo de circuitos terminais protegidos por disjuntores termomagnéticos conforme NBR NM 60898 contra sobrecorrentes e contra contatos indiretos (esquema TN), considerando:

- Condutores isolados, Cu/PVC, instalados em eletroduto (aparente, embutido em alvenaria ou contido em canaleta em calha ou em moldura.
- Cabos uni ou multipolares, Cu/PVC, instalados em eletroduto (aparente, embutido em alvenaria ou contido em canaleta) ou em eletrocalha ou em bloco alveolado.
- Temperatura ambiente no local de instalação dos circuitos, 30°C.
- Na Situação 1 – circuitos de tomadas.
- Na Situação 2 – qualquer circuito terminal.



Seções dos condutores (mm²)		Circuito com 2 condutores carregados			Circuito com 3 condutores carregados			Circuito com 4 condutores carregados			Circuito com 6 condutores carregados		
		I_N (A)	$l_{máx}$ (127/220 V) (m)		I_N (A)	$l_{máx}$ (127/220 V) (m)		I_N (A)	$l_{máx}$ (127/220 V) (m)		I_N (A)	$l_{máx}$ (127/220 V) (m)	
Vivos	PE		Situação 1	Situação 2		Situação 1	Situação 2		Situação 1	Situação 2		Situação 1	Situação 2
1,5	1,5	16	50/39	22/39	16	50/39	22/39	10	75/59	34/59	10	75/59	34/59
2.5	2,5	20	63/49	28/49	20	63/49	28/49	16	84/65	38/65	16	84/65	38/65
4	4	30	67/52	30/52	25	80/62	36/62	25	80/62	36/62	20	100/78	45/78
6	6	40	75/59	34/58	35	86/67	38/66	30	100/78	45/78	25	120/94	54/94
10	10	50	100/78	45/78	50	100/78	45/78	40	126/98	56/97	40	126/98	56/98
16	16	70	115/89	52/89	60	134/104	61/105	60	134/104	61/105	50	161/125	72/125
25	16	100	49/76	44/76	70	45/109	63/109	70	45/109	63/109	70	45/109	63/109
35	16	100	52/86	49/86	100	52/86	49/86	100	52/86	49/86	70	75/122	71/122
50	25	100	84/130	75/130	100	84/130	75/130	100	84/130	75/130	100	84/130	75/130

Figura 8.12 ■ Característica tempo-corrente de fusível gG de 16 A

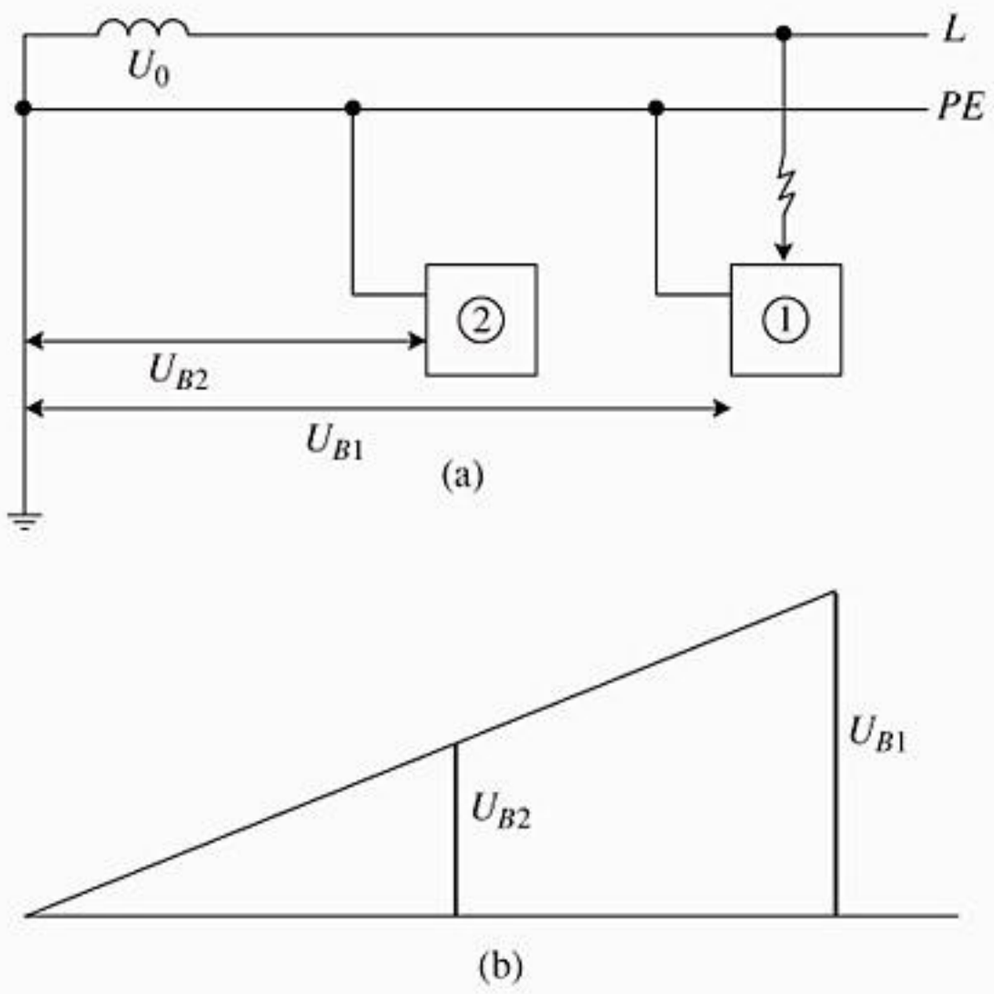


Figura 8.13 ▪ Variação do potencial ao longo do condutor de proteção. A tensão U_{B1} poderá ser suficiente para acionar a proteção de (1) (por exemplo, 40 V, considerando a Situação 1), porém, a tensão U_{B2} poderá ser perigosa e não será seccionada, embora a falta não ocorra em (2) (por exemplo, se (2) estiver na Situação 2 e U_{B2} = 30 V)

O estabelecimento do *ponto de referência*, como descrito anteriormente, na realidade, contribui para reduzir a impedância total do percurso da corrente de falta, uma vez que coloca em paralelo com o condutor de proteção principal o elemento condutor estranho à instalação, ao qual é feita a ligação eqüipotencial local (ver Figura 8.11).

Aterramento múltiplo do condutor PE

Recomenda-se que, sempre que possível, o condutor de proteção, isto é, o "sistema" de condutores de proteção, seja aterrado em vários pontos (aterramento múltiplo), a fim de assegurar, em caso de falta, que seu potencial e o das massas que lhe são ligadas fique tão próximo quanto possível do potencial da terra.

Seja uma instalação com esquema TN-S cujo condutor de proteção esteja aterrado apenas junto da fonte (ver Figura 8.13(a)).

No caso de uma falta direta fase-massa em uma dada massa da instalação, a tensão de contato presumida (sendo admitida igual à tensão de falta) assume valores perigosos. Essa tensão, muito embora vá diminuindo até anular-se ao longo do condutor de proteção, poderá representar perigo para outras massas ligadas entre a fonte e a massa sob falta (ver Figura 8.13(b)).

Analisando agora a instalação esquematizada na Figura 8.14(a), na qual o condutor de proteção está aterrado nos dois extremos (resistências de aterramento R_{B1} e R_{B2}).

Desprezando as reatâncias dos condutores e admitindo a massa sob a falta no extremo do circuito, resultará o circuito equivalente mostrado na Figura 8.14(b).

A impedância do percurso da corrente de falta I_F será

$$Z_S = R_L + \frac{R_{PE} \cdot (R_{B1} + R_{B2})}{R_{PE} + R_{B1} + R_{B2}} \qquad (8.23)$$

A corrente de falta divide-se em duas: uma "principal", I_{F1}, por meio do condutor de proteção, e outra, I_{F2}, muito inferior à primeira, pela terra. Pode-se escrever:

$$I_F = \frac{U_0}{Z_S} = \frac{U_0}{R_L + \dfrac{R_{PE} \cdot (R_{B1} + R_{B2})}{R_{PE} + R_{B1} + R_{B2}}} \qquad (8.24)$$

A tensão entre os eletrodos será

$$U' = I_F \cdot \frac{R_{PE} \cdot (R_{B1} + R_{B2})}{R_{PE} + R_{B1} + R_{B2}} \qquad (8.25)$$

e as correntes I_{F1} e I_{F2} serão, da Expressão 8.25

$$I_{F1} = \frac{U'}{R_{PE}} = \frac{I_F \cdot \dfrac{R_{PE} \cdot (R_{B1} + R_{B2})}{R_{PE} + R_{B1} + R_{B2}}}{R_{PE}} \qquad (8.26)$$

$$I_{F2} = \frac{U'}{R_{B1} + R_{B2}} = \frac{I_F \cdot \dfrac{R_{PE} \cdot (R_{B1} + R_{B2})}{R_{PE} + R_{B1} + R_{B2}}}{R_{B1} + R_{B2}} \qquad (8.27)$$

E os potenciais dos eletrodos serão

$$U_1 = I_{F2} \cdot R_{B1} \qquad (8.28)$$

$$U_2 = I_{F2} \cdot R_{B2} \qquad (8.29)$$

Assim, como mostra a Figura 8.14(c), o potencial no condutor de proteção, igual à tensão de contato presumida, variará entre U_2 e U_1, anulando-se em dado ponto P entre os eletrodos.

EXEMPLO

Sejam na Figura 8.14(a):

- Condutor fase 25 mm²: r_L = 0,88 mΩ/m
- Condutor de proteção 16 mm²: r_{PE} = 1,41 mΩ/m
- Resistência de aterramento: $R_{B1} = R_{B2}$ = 10 Ω
- Tensão fase-neutro: U_0 = 220 V
- Comprimento do circuito: l = 50 m

As resistências dos condutores serão

$$R_L = 0{,}88 \times 10^{-3} \times 50 = 0{,}0044\ \Omega$$

$$R_{PE} = 1{,}41 \times 10^{-3} \times 50 = 0{,}070\ \Omega$$

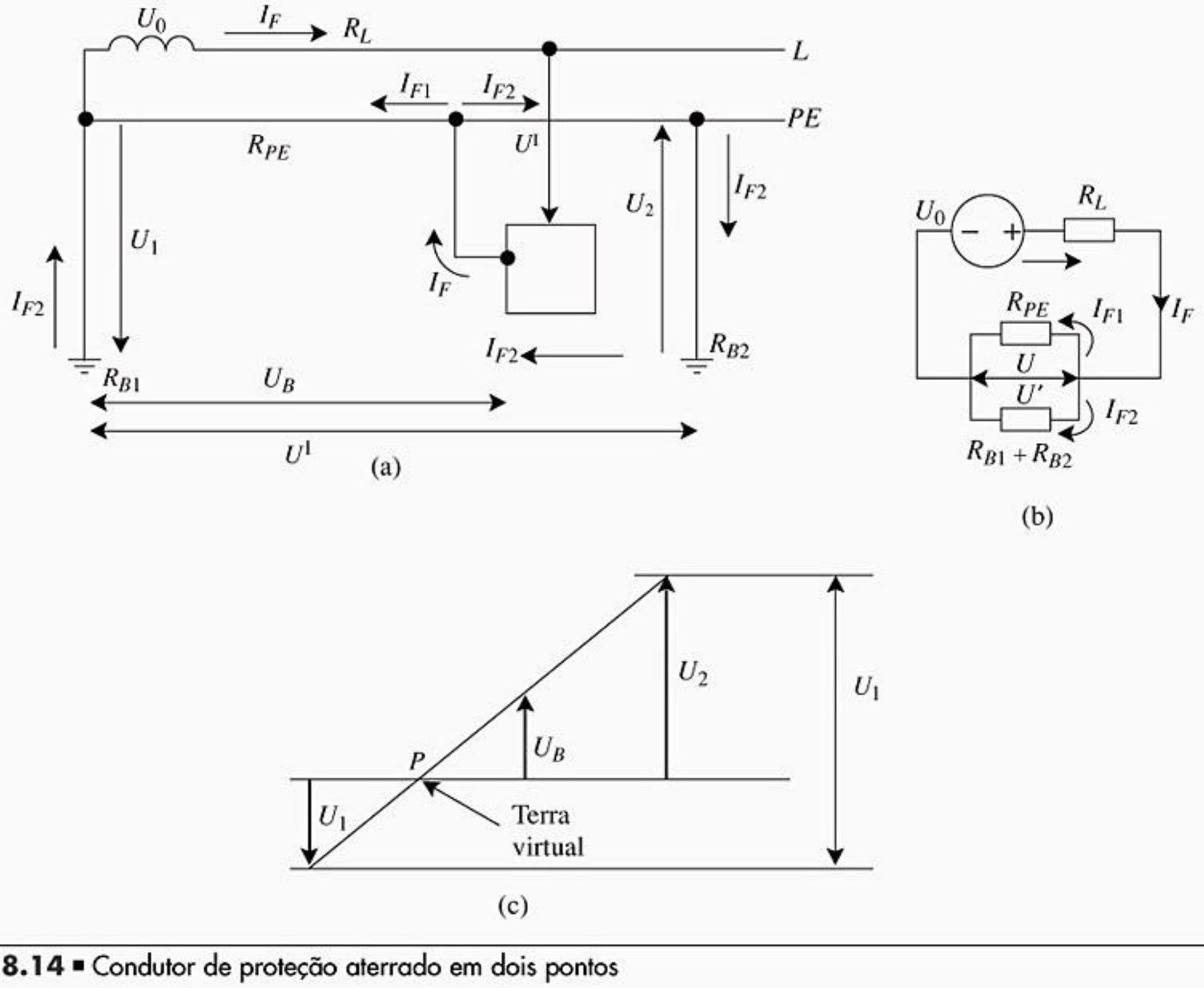


Figura 8.14 ▪ Condutor de proteção aterrado em dois pontos

A impedância do percurso da corrente de falta será, da Expressão 8.26

$$Z_S = 0{,}044 + \frac{0{,}070 \times 20}{0{,}070 + 20} = 0{,}114\ \Omega$$

A corrente de falta será, da Expressão 8.25

$$I_F = \frac{220}{0{,}114} = 1.929{,}8\ \text{A}$$

A tensão entre os eletrodos será, da Expressão 8.26

$$U' = 1.929{,}8 \times \frac{0{,}070 \times 20}{0{,}070 + 20} = 134{,}6\ \text{V}$$

As correntes parciais de falta serão, das Expressões 8.27 e 8.28

$$I_{F1} = \frac{134{,}6}{0{,}070} = 1.923\ \text{A}$$

$$I_{F2} = \frac{134{,}6}{20} = 6{,}73\ \text{A}$$

As tensões nos eletrodos serão

$$U_1 = U_2 = 6{,}73 \times 10 = 67{,}3\ \text{V}$$

isto é, a maior tensão de contato presumida na instalação será de 67,3 V; se o aterramento fosse feito apenas no transformador, essa tensão poderia atingir 134,6 V.

Com esse exemplo, percebe-se que o aterramento múltiplo do condutor de proteção, feito a intervalos regulares, reduzirá as tensões de contato presumidas ao longo da instalação. Observe-se, no entanto, que nem sempre é possível (ou viável) realizar tal aterramento múltiplo. A desvantagem do aterramento múltiplo é que as correntes de curtos-circuitos de outros circuitos podem compartilhar desse caminho condutor de baixa impedância, "contaminando" as massas dos equipamentos elétricos (introduzindo potenciais indesejado nessas massas).

8.3 Esquema TT

Generalidades

Como apresentado na Seção 3.3.6, o esquema TT é concebido de tal modo que o percurso de uma corrente produzida por uma falta fase-massa em um componente ou em um equipamento de utilização da instalação inclua a terra e que a elevada impedância desse percurso limite o valor da corrente de falta. Nesse esquema, um ponto da alimentação, isto é, do secundário do transformador (ou, eventualmente, o gerador), geralmente, o ponto neutro, é diretamente aterrado, sendo as massas da instalação aterradas, individualmente ou por grupos,

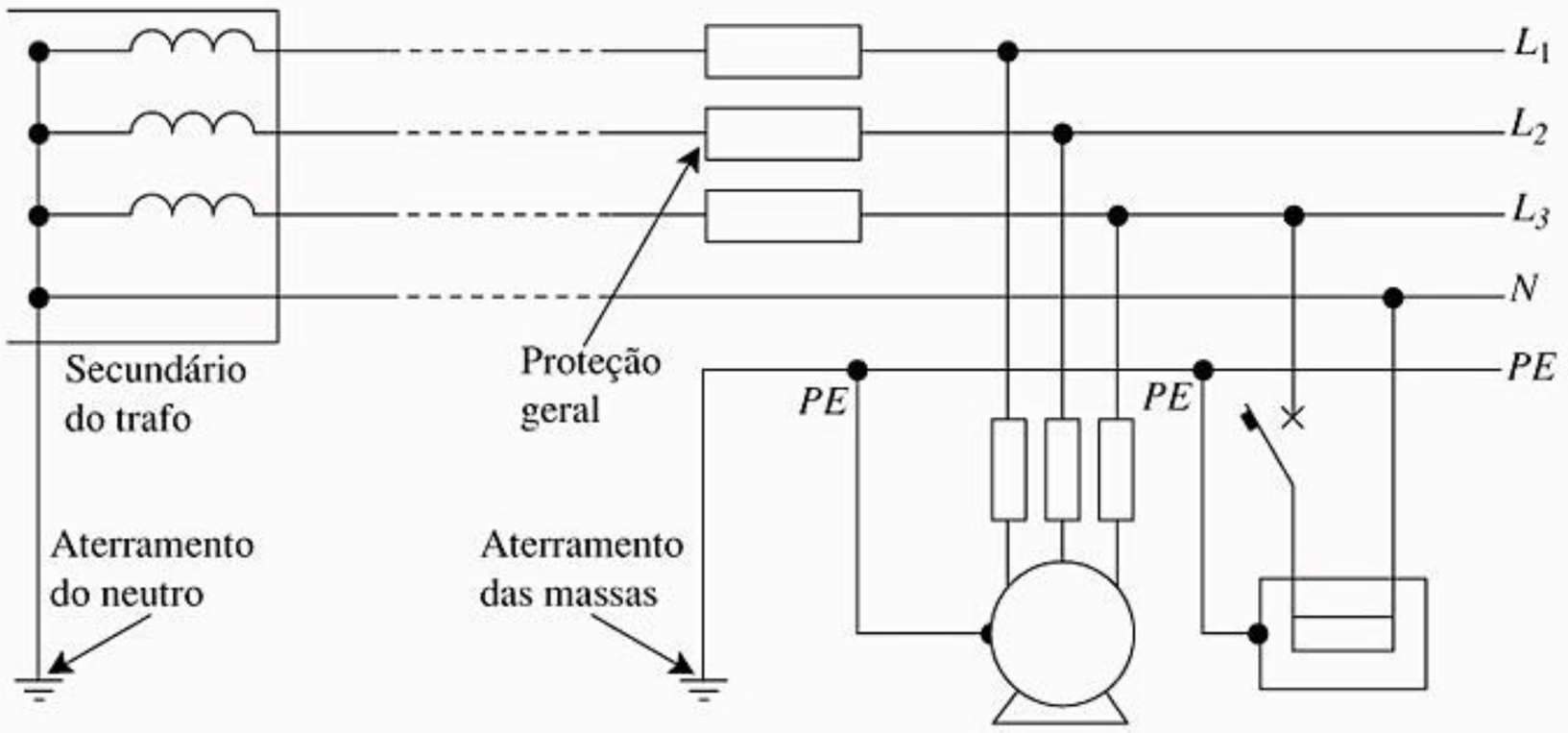


Figura 8.15 ■ Esquema TT

utilizando eletrodos de aterramento eletricamente independentes do eletrodo da alimentação, como mostra a Figura 8.15.

Todas as massas da instalação devem ser protegidas contra contatos indiretos por um mesmo dispositivo de proteção, para evitar o surgimento de eventuais tensões perigosas, e devem ser ligadas a um mesmo eletrodo de aterramento. Pelo mesmo motivo, também as massas que forem simultaneamente acessíveis devem ser aterradas no mesmo eletrodo.

Nas instalações que utilizam o esquema TT, a proteção contra contatos indiretos deve ser garantida, *obrigatoriamente*, por dispositivos de proteção à corrente diferencial-residual (dispositivos DR), que detectam diretamente a corrente que escoa para a terra.

Por um lado, a aplicação desse esquema é extremamente simples, não exigindo vigilância permanente da instalação, a não ser o controle periódico dos dispositivos DR. Por outro lado, e eficiência desse esquema baseia-se totalmente no funcionamento sem falhas e adequado do dispositivo DR.

Condições de proteção

Em uma instalação que siga o esquema TT, as correntes de falta direta fase-massa, graças às altas resistências existentes em seu percurso, apresentam uma intensidade bem inferior à de uma corrente de curto-circuito fase-neutro. No entanto, tais correntes podem ser suficientes para provocar o aparecimento de tensões de contato perigosas.

A Figura 8.16 indica uma situação de falta fase-massa em um esquema TT.

São consideradas as resistências R_A, de aterramento das massas, R_B, de aterramento do secundário, do transformador, R_E, da bobina secundária do transformador, R_L, dos condutores de fase entre o transformador e o equipamento sob falta, R_F, da falta, R_H, do corpo da pessoa e R, entre a pessoa e a terra; seja U_0 a tensão fase-neutro e I_F a corrente de falta.

Em princípio, desprezam-se R_E, R_L e R_F diante das demais resistências envolvidas e desconsidera-se R, para analisar o pior caso, em que toda a tensão V_F seja igual a V_B.

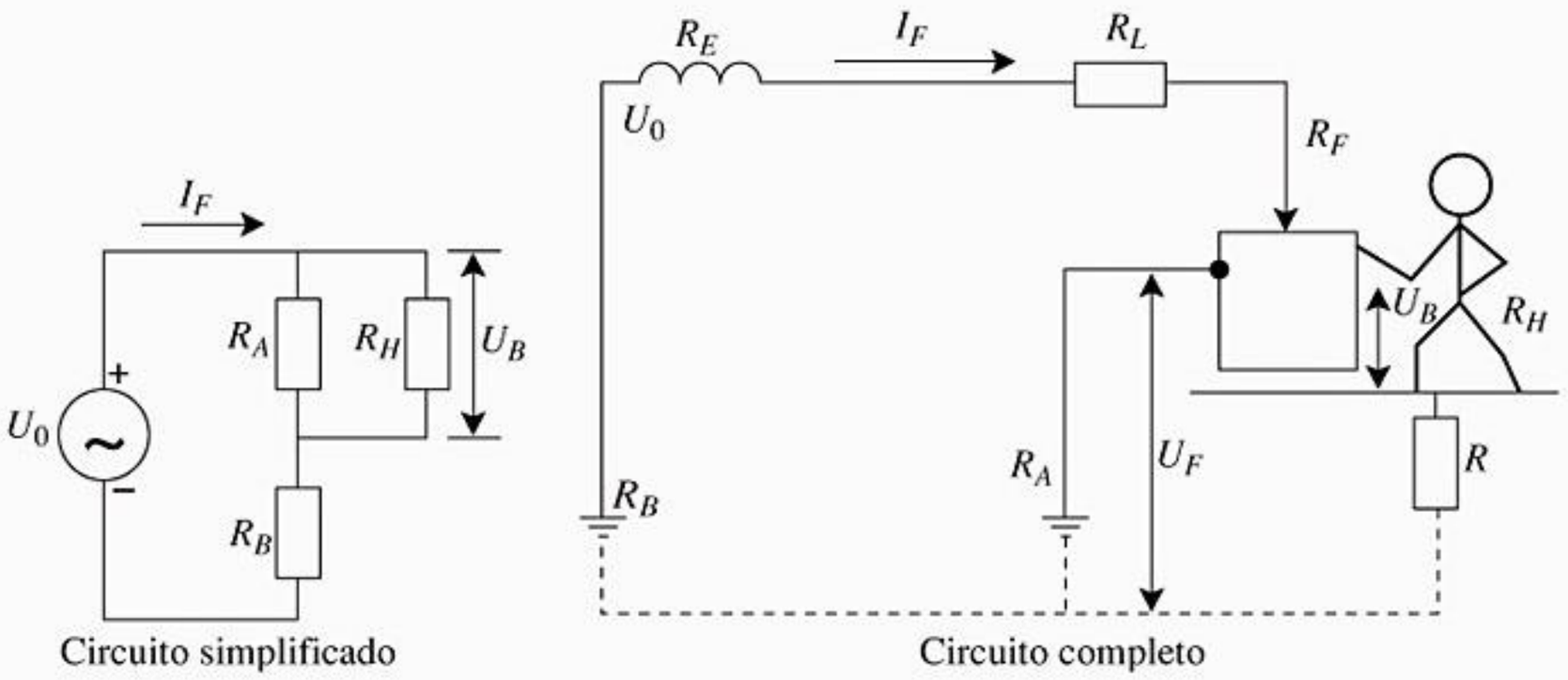


Figura 8.16 ■ Circuito de falta fase-massa em esquema TT

Nessas condições, pode-se escrever para o circuito

$$U_0 = I_F\left(\frac{R_A \cdot R_H}{R_A + R_H} + R_B\right) \qquad (8.30)$$

A tensão de contato, U_B (igual à tensão de falta, U_F, por ter-se desconsiderado R), será

$$U_B = I_F \cdot \frac{R_A \cdot R_H}{R_A + R_H} \qquad (8.31)$$

Dividindo a Expressão 8.30 pela Expressão 8.31, obtém-se

$$\frac{U_0}{U_B} = \frac{\dfrac{R_A \cdot R_H}{R_A + R_H} + R_B}{\dfrac{R_A \cdot R_H}{R_A + R_H}} = 1 + \frac{R_B}{R_A} + \frac{R_B}{R_H} \qquad (8.32)$$

Considerando que a resistência de aterramento da alimentação, R_B, é pequena (geralmente de 1 a 10 Ω) em comparação com a do corpo humano, R_H (em geral, superior a 1.000 Ω), pode-se escrever, da Expressão 8.32

$$\frac{U_0}{U_B} = 1 + \frac{R_B}{R_A} \qquad (8.33)$$

A análise dessa expressão mostra que a relação U_0/U_B cresce, e, portanto, o perigo diminui, com a redução da resistência de aterramento das massas, R_A. Fazendo R_A tender a zero, U_0/U_B tenderia ao infinito e o perigo, isto é, a tensão de contato U_B tenderia a anular-se. Observe que não se pode, na prática, contar efetivamente com isso, seja porque a resistência de aterramento, R_B, da alimentação é geralmente baixa, seja porque dificilmente se consegue reduzir R_A a valores desprezíveis ante a R_B.

Sejam, por exemplo, $U_0 = 127$ V, $R_A = 5\ \Omega$ e $R_B = 4\ \Omega$. A tensão de contato valerá, da Expressão 8.35

$$U_B = \frac{R_A}{R_A + R_B} \cdot U_0 = \frac{5}{5 + 4} \cdot 127 = 70{,}6\ \text{V}$$

que é uma tensão perigosa, com o agravante que a corrente de falta (curto-circuito) é muito baixa (I_F = 14,11 A), podendo ser até menor que a corrente de demanda máxima do circuito, impossibilitando a atuação dos dispositivos automáticos de proteção a sobrecorrente. Isso ilustra por que é obrigatória a utilização dos dispositivos DRs nos esquemas TT.

Para que a tensão de contato seja inferior à tensão de contato-limite, U_L = 50 V (Situação 1), deve-se ter:

- para $U_0 = 127$ V
- $R_A \leq 0{,}65\ R_B$
- para $U_0 = 220$ V
- $R_A \leq 0{,}29\ R_B$

Assim, por exemplo, para $R_B = 4\ \Omega$, deveríamos ter, com $U_0 = 127$ V, $R_A = 2{,}6\ \Omega$ e $U_0 = 220$ V, $R_A = 1{,}16\ \Omega$, valores *não muito fáceis* de se obter na prática.

Isso mostra que apenas o aterramento das massas, embora bem-executado, não é suficiente para garantir tensões de contato suficientemente baixas, ainda mais porque geralmente não se tem, no caso típico de instalação alimentada por rede pública de baixa tensão, controle algum sobre o valor da resistência de aterramento da alimentação (secundário do transformador). É necessário, portanto, que, além do aterramento das massas, exista um dispositivo em condições de proporcionar o seccionamento automático em um tempo adequado, sempre que a tensão de contato atinja valores perigosos.

No esquema TT, a impedância do percurso da corrente de falta será limitada praticamente por

$$Z_S = R_A + R_B \qquad (8.34)$$

Por sua vez, da Expressão 8.33, obtém-se

$$U_0 = U_B\left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) = U_B\,\frac{R_A + R_B}{R_A} \qquad (8.35)$$

substituindo a Expressão 8.34 e a Expressão 8.35 na Expressão 8.9, tem-se

$$I_a \leq \frac{U_B}{R_A}$$

e fazendo $U_B = U_L$

$$I_a \leq \frac{U_L}{R_A} \qquad (8.36)$$

ou então, como apresenta a NBR 5410 (ver Figura 8.17)

$$R_A \cdot I_a \leq U_L \qquad (8.37)$$

onde I_a é a corrente que assegura a atuação do dispositivo de proteção. Quando a proteção for realizada por dispositivos a sobrecorrente, I_a, será a corrente que garante o seccionamento em 5 segundos, situação quase impossível de ocorrer devido à exigência, para atender a essa condição, de que ela só será possível com baixíssimos valores de resistência de aterramento.

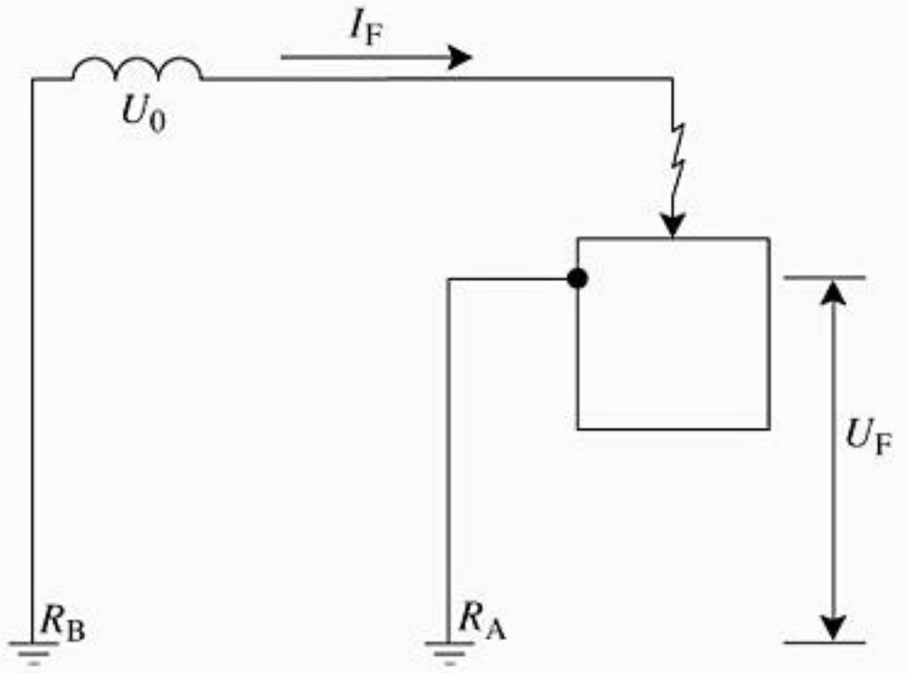


Figura 8.17 ■ Circuito equivalente considerado pela NBR 5410

Seja, por exemplo, a proteção contra contatos indiretos exercida, em dado circuito, por um disjuntor termomagnético com $I_N = 20$ A cuja característica tempo-corrente é mostrada na Figura 8.18; a corrente I_a será da ordem de 90 A.

Se as massas protegidas estiverem na situação 1, $U_L = 50$ V, a resistência de aterramento das massas deverá valer, da Expressão 8.37

$$R_A \leq \frac{50}{90} = 0{,}55\ \Omega$$

na prática um valor difícil de obter e manter.

Assim, verifica-se que em um esquema TT, para que ocorresse o seccionamento automático em condições de falta fase-massa, usando-se apenas dispositivo de proteção a sobrecorrente (o que não é permitido), seria necessário que a resistência de aterramento das massas tivesse um valor muito baixo, difícil de obter na prática e de conservar ao longo do tempo. Dessa forma, para o esquema TT, a NBR 5410 obriga o uso de dispositivos DR e, nesse caso, a condição de proteção da Expressão 8.38 fica sendo a Expressão 8.38.

$$R_A I_{\Delta N} \leq U_L \qquad (8.38)$$

onde $I_{\Delta N}$ é a corrente diferencial-residual nominal de atuação do dispositivo.

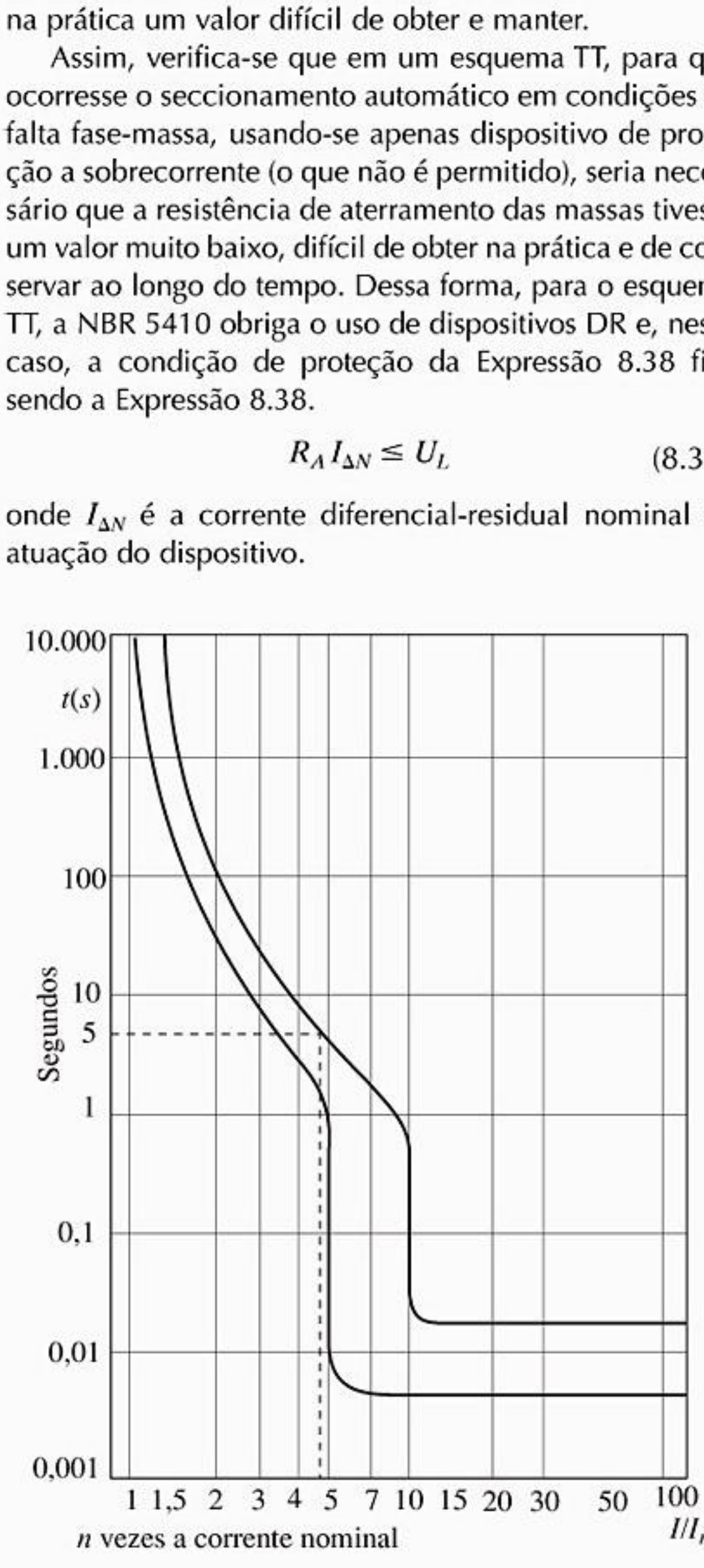


Figura 8.18 ▪ Característica tempo-corrente típica de disjuntores conforme NBR NM 60898

O valor de $I_{\Delta N}$ é, como apresentado na Seção 6.5, geralmente muito baixo (desde uns poucos miliampères até 2 ou 3 A), permitindo assim que as resistências de aterramento das massas tenham valores elevados, como se pode verificar por meio da expressão a seguir

$$R_A \leq \frac{U_L}{I_{\Delta N}} \qquad (8.39)$$

A Tabela 8.6 indica os valores máximos típicos de R_A.

8.4 Esquema IT

Generalidades

Em um esquema IT não existe, como descrito na Seção 3.3.6, o aterramento direto de qualquer ponto da alimentação estando as massas aterradas em um ou em mais eletrodos de aterramento (independentes, em geral, do eletrodo de aterramento eventualmente existente para a alimentação). Nele, quando ocorre uma primeira falta fase-massa, a corrente resultante é limitada de maneira a que nenhuma tensão de contato perigosa, isto é, superior à tensão de contato-limite (U_L), possa aparecer em qualquer massa da instalação.

Nessa condição, não é imperativo o seccionamento automático decorrente de uma primeira falta, permitindo que o setor atingido continue funcionando. No entanto, é importante que o defeito seja rapidamente localizado e eliminado, do contrário a instalação poderá comportar-se como se o esquema fosse TN ou TT, ocorrendo com dificuldade e com imprecisão o seccionamento — se acontecer uma segunda falta antes de ter sido eliminada a primeira.

No sistema IT o primeiro defeito deve ser corrigido imediatamente, portanto deve ser previsto um dispositivo supervisor de isolamento (DSI), para indicar a ocorrência de uma primeira falta à massa ou à terra. Esse dispositivo deve acionar um sinal sonoro *e/ou* visual diretamente à equipe de manutenção, ou a distância, por meio do sistema de supervisão.

O esquema IT (principalmente aterrado por meio de impedância), com indicação adequada de faltas, encontra aplicação em instalações onde seja fundamental a continuidade no funcionamento de equipamentos; é o caso de certos setores de indústrias (onde existam fornos, trefilas etc.), de alguns setores nos hospitais, em instalações de mineração e em algumas instalações de processamento de dados. Em particular, em usinas siderúrgicas, o esquema IT é empregado em áreas como manuseio de coque, carvão e aciaria.

Tipos de esquema IT

Uma instalação que utiliza o esquema IT pode ser isolada da terra ou aterrada por meio de uma impedância de valor suficientemente projetada para esse fim.

Tabela 8.6 ■ Valores máximos da resistência de aterramento das massas (R_A) em um esquema TT, em função da corrente diferencial-residual nominal de atuação do dispositivo DR ($I_{\Delta N}$) e da tensão de contato-limite (U_L)

$I_{\Delta N}$ (A)	Valor máximo de R_A (Ω)	
	Situação 1 (U_L = 50 V)	Situação 2 (U_L = 25 V)
0,03	1,667	833
0,3	167	83,3
0,5	100	50

No caso de ser a instalação isolada da terra (Figura 8.19(a)), a corrente produzida por uma primeira falta fase-massa fecha-se por meio das capacitâncias das duas outras fases em relação à terra.

Quando a instalação é ligada à terra por uma impedância (Figura 8.19(b)), a corrente produzida por uma primeira falta fase-massa é limitada pelas resistências de aterramento dos dois eletrodos, R_A das massas e R_B da alimentação, e pela impedância Z.

Quando os aterramentos da alimentação e das massas se confundem (Figura 8.19(c)), a limitação da corrente é feita apenas por Z.

Quando a alimentação é aterrada por meio de impedância, as capacitâncias das duas fases não envolvidas na falta fase-massa apresentam, em geral, uma impedância muito superior a Z, a menos que a instalação possua cabos de grande comprimento ou uma cobertura metálica.

A ligação da alimentação à terra por meio de uma impedância é prevista principalmente quando são esperadas sobretensões ou oscilações de tensão, devidas a fenômenos de ressonância. O valor de Z é escolhido de modo a evitar oscilações e a provocar a circulação de uma corrente de falta que possa ser detectada, com o objetivo de promover a sinalização. Esta não deve ser muito elevada para não provocar aquecimentos indesejáveis nos condutores de proteção e, eventualmente, nos eletrodos de aterramento.

Em geral, adota-se para Z um valor da ordem de cinco a seis vezes a tensão $U_0 = U\sqrt{3}$ da instalação, ou seja, aproximadamente 1.000 Ω, para uma instalação com U = 380 V.

É conveniente, em princípio, não distribuir o condutor neutro em instalações IT. Com efeito, se tal ocorrer, uma falta para terra envolvendo aquele condutor suprimirá as vantagens obtidas com seu não aterramento direto.

Condições de proteção — 1ª falta

Nos esquemas IT, é necessário assegurar que, quando da ocorrência de uma *primeira falta fase-massa*, a massa em questão não assuma um potencial perigoso, isto é, superior à tensão de contato-limite U_L. No caso de instalações isoladas da terra (Figura 8.19(a)) e de instalações aterradas por impedância, com as massas aterradas em eletrodo(s) independente(s) (Figura 8.19(b)), a condição de proteção, análoga à de um esquema TT, pode ser escrita

$$R_A \cdot I_F \leq U_L \qquad (8.40)$$

sendo I_F a corrente de falta, que, no caso de instalação isolada, leva em consideração as correntes de fuga naturais e a impedância global de aterramento da instalação, e R_A, a resistência de aterramento das massas.

Quando os eletrodos de aterramento da alimentação e das massas se confundem (Figura 8.19(c)), não aparece, em uma massa sob falta, nenhuma tensão de contato perigosa, pois esta é igual à queda de tensão nos condutores de proteção (como em um esquema TN) cujas impedâncias, no caso, são desprezíveis, se comparadas com a impedância Z de aterramento da alimentação. Nesse caso, não é necessário, na prática, verificar a condição dada na Expressão 8.40.

Muito embora em uma primeira falta não haja necessidade de provocar o seccionamento automático da alimentação do respectivo circuito, ela deve ser detectada, localizada e eliminada no menor tempo possível.

Condições de proteção — 2ª falta

Se a primeira falta fase-massa não for eliminada e ocorrer uma segunda falta fase-massa, envolvendo outra fase, circulará na instalação uma *corrente de dupla falta*, na verdade, uma corrente de falta entre duas fases. Esta deverá ser eliminada por seccionamento automático.

O seccionamento automático da alimentação que visa à proteção contra choques elétricos na ocorrência de uma segunda falta deve ser equacionado, seguindo-se as regras definidas para o esquema TN ou TT, dependendo de como as massas estão aterradas.

Quando a proteção envolver massas ou grupos de massas vinculadas a eletrodos de aterramento distintos, as condições aplicáveis são aquelas prescritas para o esquema TT e, quando a proteção envolver massas ou grupos de massas que estejam todas interligadas por condutor de proteção (vinculadas todas ao mesmo eletrodo de aterramento), as considerações aplicáveis são aquelas do esquema TN, devendo ser atendida a seguinte condição, quando o neutro não for distribuído:

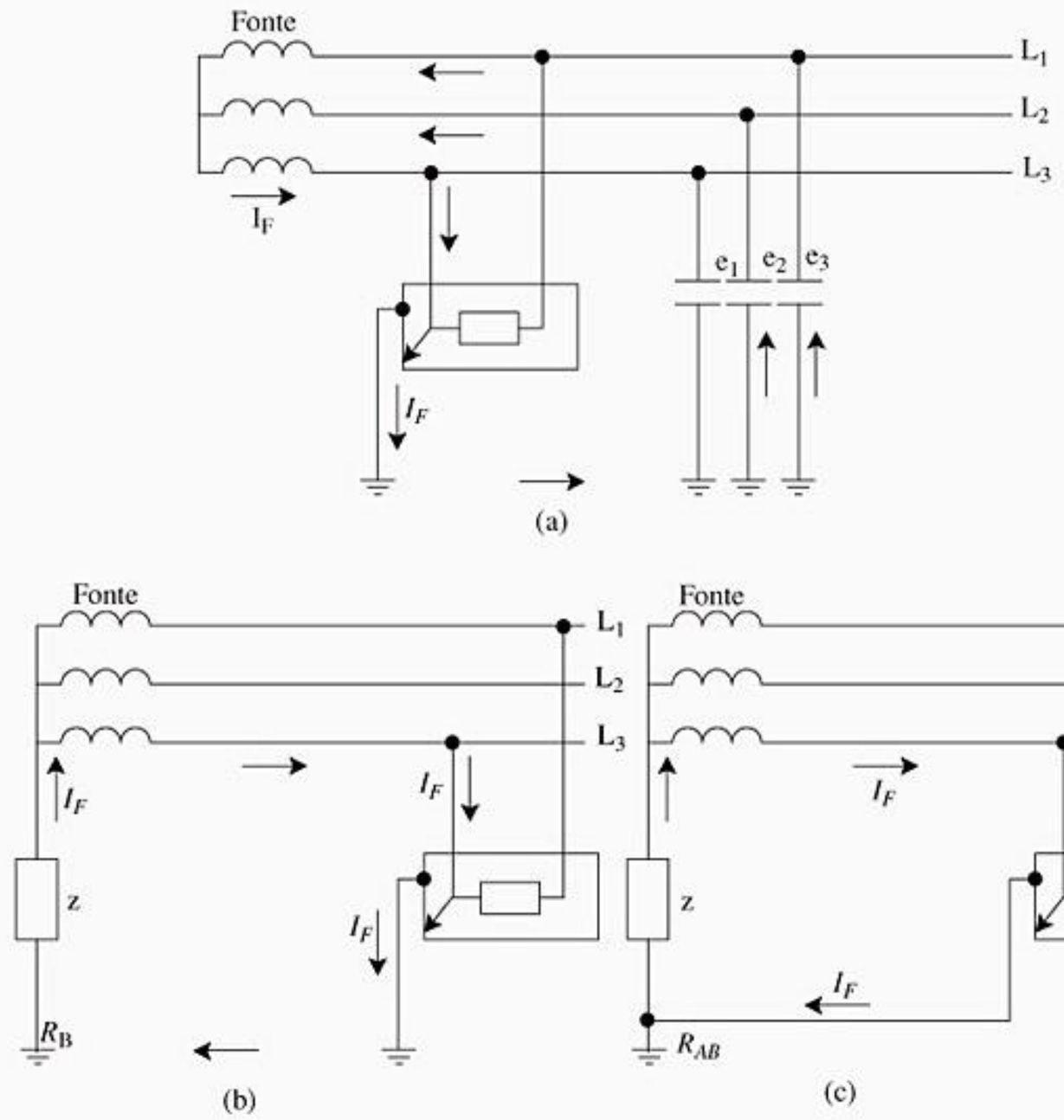


Figura 8.19 ▪ Tipos de esquema IT indicando os respectivos percursos de corrente de falta (primeira falta)

$$Z_S \leq U/2\ I_a$$

No caso do neutro ser distribuído, a condição é a seguinte:

$$Z'_S \leq U_0/2\ I_a$$

Onde:

- Z_S é a impedância, em ohms, do percurso da corrente de falta quando o neutro não é distribuído, composto pelo condutor de fase e pelo condutor de proteção do circuito.
- Z'_s é a impedância, em ohms, do percurso da corrente de falta quando o neutro é distribuído, composto pelo condutor neutro e pelo condutor de proteção do circuito.
- U é a tensão nominal entre fases, em volts, valor eficaz em corrente alternada.
- U_0 é a tensão nominal entre fase e neutro, em volts, valor eficaz em corrente alternada.
- I_a é a corrente que assegura a atuação do dispositivo de proteção em um tempo no máximo igual ao especificado na Tabela 8.7, ou a 5 s, nos casos previstos anteriormente (alimentação de equipamentos fixos).

Quando, em uma mesma instalação, as massas são aterradas individualmente ou por grupos, no caso de duas faltas em fases distintas envolvendo duas massas (aterradas separadamente ou pertencentes a diferentes grupos de massas), a condição de proteção é a mesma do esquema TT, como mostra a Figura 8.20 tendo a fonte de alimentação a tensão U.

EXEMPLO

Admite-se na instalação IT esquematizada na Figura 8.20, as tensões 220/380 V, a impedância $Z = 1.000\ \Omega$ e as resistências de aterramento das massas $R_{A1} = 3\ \Omega$ e $R_{A2} = 5\ \Omega$.

- Uma primeira falta fase-massa daria origem, na massa 1, à corrente de falta e tensão de contato:

$$\text{massa } 1 \rightarrow I_{F1} = \frac{220}{1.000 + 3} = 0{,}219\ \text{A};$$

$$U_{B1} = 0{,}219 \cdot 3 = 0{,}66\ \text{V}$$

- Para uma falta dupla, isto é, nas massas 1 e 2, tem-se a corrente

$$I_{F12} = \frac{380}{3 + 5} = 47{,}5\ \text{A}$$

e as tensões de contato

$U_{B1} = 47{,}5 \cdot 3 = 142{,}5$ V e $U_{B2} = 47{,}5 \cdot 5 = 237{,}5$ V

muito superiores à tensão de contato-limite.

Tabela 8.7 ■ Tempos de seccionamento máximos no esquema IT (2ª falta)

Tensão nominal do circuito		Tempo de seccionamento (s)			
		Neutro não distribuído		Neutro distribuído	
U (V)	U_0 (V)	Situação 1	Situação 2	Situação 1	Situação 2
208, 220, 230	115, 120, 127	0,8	0,4	5	1
380, 400	220, 230	0,4	0,2	0,8	0,5
440, 480	254, 277	0,4	0,2	0,8	0,5
690	400	0,2	0,06	0,4	0,2

Notas:
1. U é tensão nominal entre fases, valor eficaz em corrente alternada.
2. U_0 é tensão nominal entre fase e neutro, valor eficaz em corrente alternada.
3. Para valores intermediários de tensão, deve ser adotado o valor (da tabela) imediatamente superior.

É lógico que, nessas condições, deve-se dar preferência às proteções diferenciais-residuais, isto é, aos DRs. Observe, no entanto, que é necessário garantir a não atuação desses dispositivos quando ocorre uma primeira falta; para tanto, recomenda-se que, para cada dispositivo, a corrente diferencial-residual de não atuação seja, no mínimo, igual à corrente que circula no respectivo circuito em uma primeira falta direta fase-massa, ou seja,

$$\frac{I_{\Delta N}}{2} \geq I_F \qquad (8.41)$$

Assim, no exemplo anterior, deveríamos ter, nos circuitos 1 e 2, dispositivos DR com $I_{\Delta N} \geq 438\,\text{mA}$, ou seja, DRs de 500 mA.

Considere agora o esquema IT com as massas interligadas. A corrente de dupla falta, no caso de faltas diretas fase-massa, afetando duas fases distintas, será uma corrente de curto-circuito entre fases, porém sua intensidade será bem maior que a de uma corrente de curto-circuito em um único circuito, visto que, agora, são dois os circuitos envolvidos, como mostra a Figura 8.21.

Desprezando-se o risco de contato simultâneo com as duas massas sob falta, a tensão de contato a considerar será a que aparece, quando ocorre a segunda falta, entre uma massa e o terminal de aterramento principal, isto é, a queda de tensão nos condutores de proteção entre a massa e o referido terminal.

Admita-se que sejam previstos *pontos de referência* no nível dos quadros terminais (tal como foi feito no esquema TN), por exemplo, ligando o terminal de aterramento de cada quadro a um ponto da ferragem da estrutura do prédio; sejam P_1 e P_2 os pontos de referência para os circuitos 1 e 2. Nessas condições, a impedância do percurso da corrente de dupla falta (Z_S) poderá ser escrita, desprezando as reatâncias (ver Figura 8.21):

$$Z_S = \frac{1}{c}(R_{PE1} + R_{PE2} + R_2 + R_1) \qquad (8.42)$$

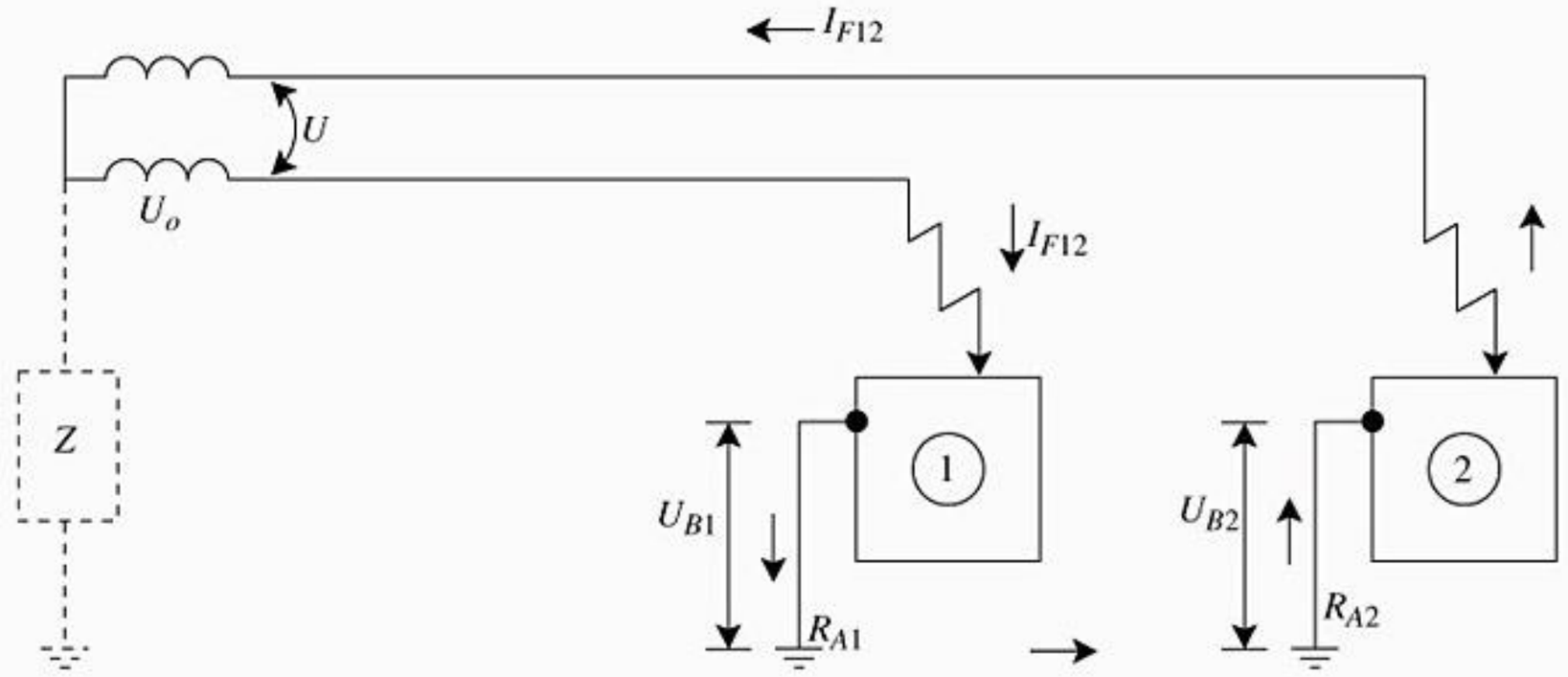


Figura 8.20 ■ Corrente de dupla falta em um esquema IT com massas não interligadas

sendo R_1 e R_2 as resistências dos condutores vivos (envolvidos na falta) dos circuitos 1 e 2, R_{PE1} e R_{PE2} as resistências dos respectivos condutores de proteção e $1/c$ um fator que corrige a soma das resistências dos dois circuitos, levando em consideração a impedância a montante de ambos (ou seja, entre os pontos de referência e o terminal de aterramento principal).

Fazendo, como no TN, $m_1 = R_{PE1}/R_1$ e $m_2 = R_{PE2}/R_2$, tem-se, da Expressão 8.42

$$Z_S = \frac{1}{c}\left[R_1(1 + m_1) + R_2(1 + m_2)\right] \quad (8.43)$$

A corrente de dupla falta, I_{F12}, obtida dividindo-se a tensão de linha U pela impedância Z_S (Figura 8.21), pode ser escrita:

$$I_{F12} = \frac{U}{\frac{1}{c}[R_1(1 + m_1) + R_2(1 + m_2)]}$$

isto é

$$I_{F12} = \frac{cU}{R_1(1 + m_1) + R_2(1 + m_2)} \quad (8.44)$$

Chamando I_{F1} à corrente de falta que circularia no circuito 1, devido a uma (única) falta direta fase-massa, admitindo que a instalação seguisse o esquema TN (com uma fase aterrada), tem-se

$$I_{F1} = \frac{cU}{R_1(1 + m_1)} \quad (8.45)$$

Analogamente, para uma falta em 2

$$I_{F2} = \frac{cU}{R_2(1 + m_2)} \quad (8.46)$$

Das Expressões 8.45, 8.46 e 8.47, pode-se escrever

$$I_{F12} = \frac{I_{F1} \cdot I_{F2}}{I_{F1} + I_{F2}} \quad (8.47)$$

fazendo $I_{F1}/I_{F2} = p$, virá da Expressão 8.47

$$I_{F12} = \frac{I_{F1}}{p + 1} = I_{F1}\frac{1}{1 + p} \quad (8.48)$$

Da Expressão 8.50, verifica-se que, se I_{F2} for superior a I_{F1}, isto é, se p for inferior a 1, a relação $\frac{1}{1 + p}$ será sempre maior que 1/2, uma vez que seu denominador será sempre inferior a 2. Conseqüentemente, I_{F2} será necessariamente superior a $I_{F1}/2$.

Pode-se também escrever, da Expressão 8.49

$$I_{F12} = \frac{I_{F2}}{1 + 1/p} = I_{F2}\frac{1}{1 + 1/p} \quad (8.49)$$

Verifica-se, da Expressão 8.51, que se I_{F1} for superior a I_{F2}, isto é, se p for superior a 1, a relação

$$\frac{1}{1 + 1/p}$$

será sempre maior que 1/2, visto que seu denominador será sempre inferior a 2, ou seja, I_{F12} será necessariamente superior a $I_{F2}/2$.

Assim, a corrente de dupla falta I_{F12} será sempre superior à metade da menor das correntes I_{F1} e I_{F2}; e são essas correntes de falta (única) direta fase-massa que circulariam nos circuitos 1 e 2, respectivamente, se a instalação fosse TN.

Dessa forma, pode-se concluir que, em um esquema IT com as massas interligadas, a condição de proteção por seccionamento automático da alimentação é satisfeita se o dispositivo de proteção de cada circuito assegurar o seccionamento de uma corrente, no mínimo, igual à metade da corrente de falta direta fase-massa, que circularia se a instalação fosse TN. Portanto, pode-se escrever, da Expressão 8.2 (ou da Expressão 8.11), como condição de seccionamento automático à segunda falta, que

$$I_a \leq \frac{U}{2\,Z_S}$$

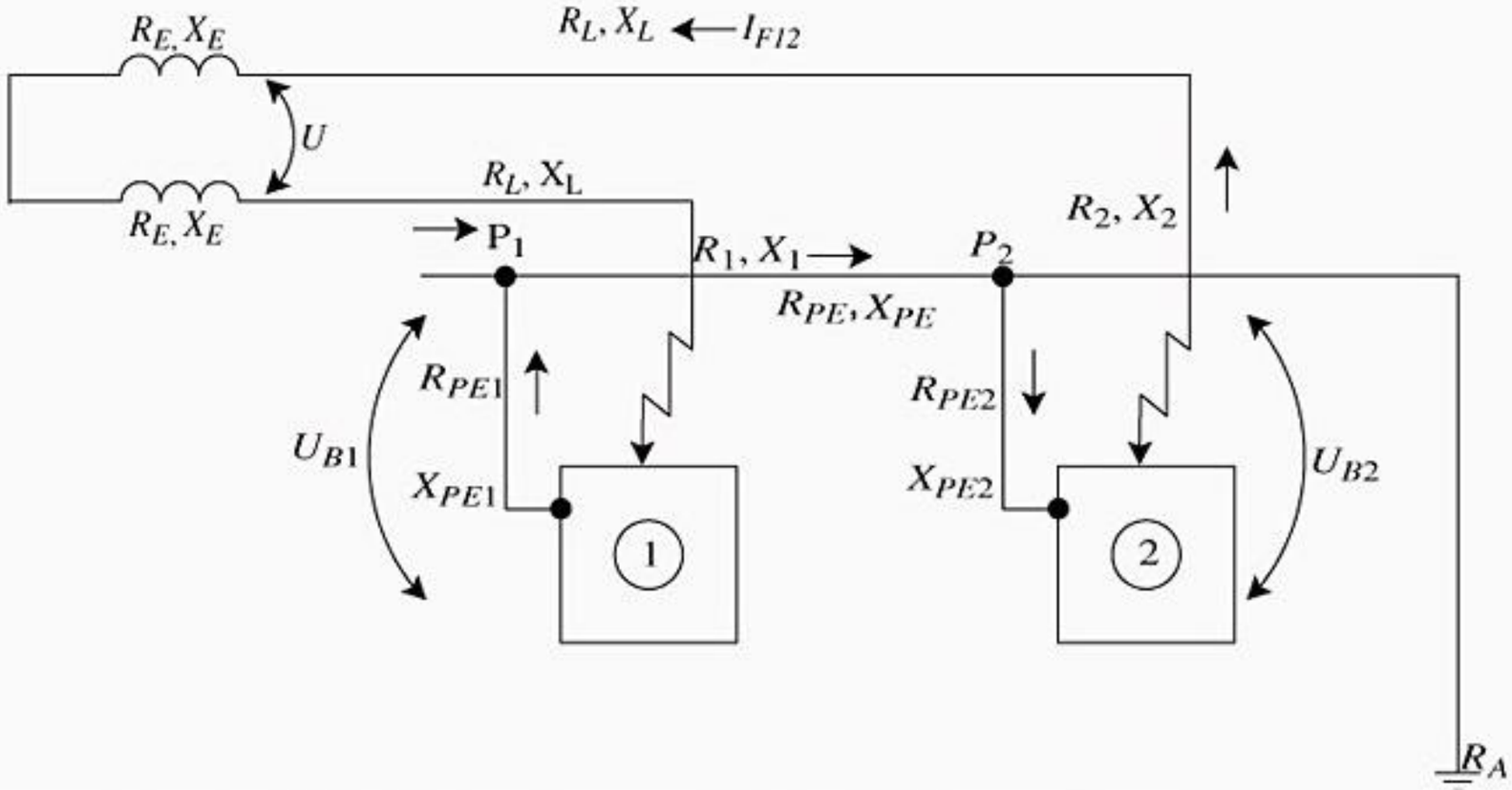


Figura 8.21 ▪ Corrente de dupla falta em um esquema IT com massas interligadas

ou, como indica a NBR 5410

$$Z_S \leq \frac{\sqrt{3}\,U_0}{2\,I_a} \qquad (8.50)$$

onde I_a = é a corrente que assegura a atuação do dispositivo de proteção em um tempo, no máximo, igual ao especificado na Tabela 8.6, ou a 5 s, como nos casos previstos na Seção 8.1.

No caso de ser o neutro distribuído, a condição de dupla falta — envolvendo uma delas o condutor neutro — é a mais desfavorável, por dar origem à menor corrente de dupla falta, tomada igual à metade da corrente de falta no esquema TN, que determinará a proteção contra contatos indiretos. Se a condição de proteção for satisfeita por uma falta dupla fase-massa e neutro-massa, também o será para uma falta dupla fase-massa.

No caso de neutro distribuído, a condição de proteção pode ser escrita

$$I_a \leq \frac{U_0}{2\,Z_S}$$

ou

$$Z_S \leq \frac{U_0}{2\,I_a} \qquad (8.51)$$

Nas Expressões 8.52 e 8.53:

- Z_S é a impedância do percurso da corrente de (dupla) falta, que pode ser considerada, no caso de existir um ponto de referência na origem dos circuitos terminais e estando os condutores de proteção da instalação nas proximidades imediatas dos respectivos condutores vivos, igual a $R + R_{PE}$, sendo R a resistência do condutor vivo (do circuito terminal considerado) entre a falta e o ponto de referência e R_{PE} a resistência do respectivo condutor de proteção.
- U_0 é a tensão de fase $U_0 = U/\sqrt{3}$);
- I_a é a corrente que assegura a atuação do dispositivo de proteção em um tempo menor ou igual ao obtido por meio da Tabela 8.6, ou a 5 segundos na Situação 1, para circuitos que somente alimentem equipamentos fixos.

A tensão de contato presumida poderá ser escrita, da Expressão 8.18:

- sem neutro distribuído

$$U_B = 0{,}5 \times \sqrt{3\frac{c\,U_0}{1+m}} \qquad (8.52)$$

- com neutro distribuído

$$U_B = 0{,}5\,\frac{c\,U_0}{1+m} \qquad (8.53)$$

Ainda considerando o caso de massas interligadas, pode-se, da Expressão 8.22 válida para o esquema TN, escrever as seguintes expressões para o comprimento máximo de circuitos terminais de esquemas IT, protegidos por dispositivos a sobrecorrente:

- sem neutro distribuído

$$l_{\max} = 0{,}5\,\sqrt{3}\,\frac{c\,U_0}{\rho\,I_a(1+m)}\,S_L \qquad (8.54)$$

- com neutro distribuído

$$l_{\max} = 0{,}5\,\frac{c\,U_0}{\rho\,I_a(1+m)}\,S_L \qquad (8.55)$$

sendo

- $l_{\max}$ o comprimento máximo do circuito terminal (*s*);
- $U_0 = U/\sqrt{3}$ tensão de fase (V).
- c = um fator que leva em conta o percurso da corrente de falta a montante do circuito terminal.
- S_L = a seção nominal dos condutores vivos do circuito terminal (mm²).
- $\rho = a$ resistividade do material dos condutores do circuito terminal (Ω.mm²/m).
- $I_a = a$ corrente que garante a atuação do dispositivo a sobrecorrente em um tempo t, obtido da Tabela 8.6, ou igual a 5 s, conforme o caso.
- $m = a$ relação da seção dos condutores vivos para a do condutor de proteção do circuito.

Dessa forma, o comprimento máximo de um circuito terminal em um esquema IT com massas interligadas poderá ser obtido multiplicando-se o comprimento máximo de um circuito análogo em um esquema TN por:

- $0{,}5\sqrt{3}$ se o condutor neutro não for distribuído, ou por
- 0,5 se o condutor neutro for distribuído.

Assim como no esquema TN, também no esquema IT com massas interligadas aplica-se o critério da proteção contra contatos indiretos a circuitos terminais protegidos por dispositivos a sobrecorrente, admitindo-se que:

- O condutor de proteção esteja instalado junto do circuito dos condutores vivos.
- Exista um "ponto de referência" no nível da origem do circuito.

Dispositivos de proteção

Nos esquemas IT, só deve ocorrer o seccionamento automático de um circuito quando nele vier a ocorrer uma falta fase-massa, preexistindo outra falta fase-massa em outro circuito ou em outra fase. Para tanto podem ser utilizados, em princípio, dispositivos de proteção a sobrecorrente e dispositivos DR, com a condição de que não atuem em uma primeira falta.

No caso de esquemas IT com massas aterradas individualmente, a exemplo dos esquemas TT, a proteção contra contatos indiretos deve, preferencialmente, ser reali-

zada por dispositivos DR, observada a condição indicada na Expressão 8.41.

No caso de esquemas IT com massas interligadas, a proteção pode ser garantida por dispositivos a sobrecorrente (disjuntores ou dispositivos fusíveis) como no esquema TN, desde que observada a condição dada na Expressão 8.52, quando o neutro não for distribuído, ou na Expressão 8.53, quando existir condutor neutro. Quando tal condição não puder ser cumprida, devido ao elevado valor da impedância do percurso da corrente de falta (isto é, no caso de circuitos cujo comprimento seja superior ao valor máximo dado na Expressão 8.54 ou na Expressão 8.55, a proteção deve ser executada por dispositivos DR ou, alternativamente, efetuando-se uma ligação eqüipotencial suplementar.

Quando as massas forem aterradas por grupos, a proteção de cada circuito deverá atuar:

- Como no caso de massas aterradas individualmente, para quando a primeira falta tiver ocorrido em um outro grupo de massas.
- Como no caso de massas interligadas, para quando a primeira falta tiver ocorrido no mesmo grupo de massas.

Nessas condições, a proteção ideal é a efetuada por dispositivos DR, observando a condição dada na Expressão 8.43.

8.5 Aplicação dos esquemas de aterramento

Comparação

A escolha do esquema de aterramento a utilizar em uma instalação deve ser feita pelo projetista logo no início do projeto, tendo em vista a influência que isso terá em diversas etapas do trabalho (escolha de dispositivos de proteção, dimensionamento de circuitos etc.). Deve basear-se em dados de natureza diversa a serem considerados em conjunto, a fim de ser tomada uma decisão que traduza a solução ótima para a instalação.

Em princípio, os três esquemas oferecem o mesmo grau de segurança no tocante à proteção das pessoas, apresentando, no entanto, características de aplicação diferentes, que se traduzem em vantagens e desvantagens fundamentais na escolha para uma instalação.

Pode-se considerar quatro aspectos fundamentais para a escolha do esquema de aterramento:

- Alimentação.
- Equipamentos de utilização.
- Natureza dos locais.
- Funcionamento.

A seguir, a análise de cada um desses aspectos:

(a) *Alimentação*:
- Em instalações alimentadas por rede pública em baixa tensão, devido à exigência de aterramento do neutro na origem da instalação, só podem ser usados os esquemas TN e TT (ver Seção 8.6).
- Em instalações alimentadas por transformador (ou gerador) próprio, em princípio, qualquer esquema pode ser utilizado, entretanto, é preferível utilizar o esquema TN (caso típico de instalações industriais e de certos prédios comerciais ou institucionais de porte) e, em alguns casos específicos, o esquema IT (como em certos setores industriais hospitalares e em instalações de mineração).

(b) *Equipamentos de utilização*:
- Quando existirem na instalação equipamentos de utilização com elevada corrente de fuga, como fornos e certos tipos de filtros, não é conveniente utilizar o esquema TT, em virtude da possibilidade de disparos intempestivos dos DRs.
- No caso de equipamentos com elevada vibração mecânica, não é recomendável o uso do esquema TN, devido à possibilidade de rompimento do condutor de proteção (contido na mesma linha elétrica dos condutores vivos).

(c) *Natureza dos locais*:
- Em locais com risco de incêndio (BE2) ou de explosão (BE3), pode não ser conveniente o uso do esquema TN, devido ao valor elevado das correntes de falta fase-massa.

(d) *Funcionamento*:
- Em instalações onde seja fundamental e indispensável a continuidade no serviço, como em certos setores de hospitais, de indústrias etc., deve-se optar pelo esquema IT.

Aterramentos de subestações de transformação

A análise dos aterramentos de subestações de transformação (ou de "postos primários", na terminologia de algumas concessionárias) envolve considerações a respeito de:

- Aterramento de proteção da subestação, ou seja, o aterramento das massas, dos elementos condutores estranhos à instalação e dos pára-raios.
- Aterramento (funcional) do neutro do(s) transformador(es).
- Aterramento de proteção da instalação de baixa tensão.

As posições relativas da subestação e do prédio, cuja instalação é alimentada, conduzem a duas soluções possíveis:

(a) Interligação dos aterramentos de proteção da subestação e da instalação de baixa tensão.
(b) Separação dos aterramentos de proteção da subestação e da instalação de baixa tensão.

A primeira solução é a indicada para subestações internas ou próximas aos prédios (na prática, essa "proximidade" pode ser traduzida por distâncias inferiores ou iguais a 15 m), tendo em vista a provável *não impedância* (ver Seção 3.3.6) entre os respectivos eletrodos de aterramento. Nessa situação, pela mesma razão, o aterramento do neutro também deve ser integrado à interligação, e a instalação de baixa tensão deve seguir o esquema TN.

É preciso observar que, mesmo no caso de uma subestação distante do prédio, essa solução é a indicada quando existir ligação entre eles por meio de cabos com armação metálica ou por meio de condutos metálicos. A segunda solução só deve ser utilizada quando for possível garantir a independência dos eletrodos dos aterramentos de proteção da subestação e do prédio. Nesse caso, o neutro da subestação deve ser aterrado juntamente com as massas e elementos condutores da subestação (já que não tem sentido separá-los), e a instalação de baixa tensão do prédio pode seguir o esquema TT.

Aterramento de instalações alimentadas por rede de distribuição pública em baixa tensão

Uma rede de distribuição pública em baixa tensão é aterrada em vários pontos ao longo de toda sua extensão. No entanto, segundo as concessionárias, para que seja atingido um grau de efetividade mínimo no aterramento do neutro, é necessário que o condutor neutro de cada ramal de ligação seja aterrado na origem da respectiva instalação consumidora. Isso, aliás, é uma exigência da NBR 5410 para todas as instalações alimentadas daquele tipo de rede.

Nessas condições, para as instalações cuja alimentação seja proporcionada por rede de distribuição pública em baixa tensão, só poderão ser utilizados os esquemas TN-C-S ou TT, como mostra a Figura 8.22.

No caso de esquema TN-C-S (Figura 8.22(a)), existem (pelo menos) dois aterramentos, o do secundário do transformador, com resistência R_B, e o do neutro na origem da

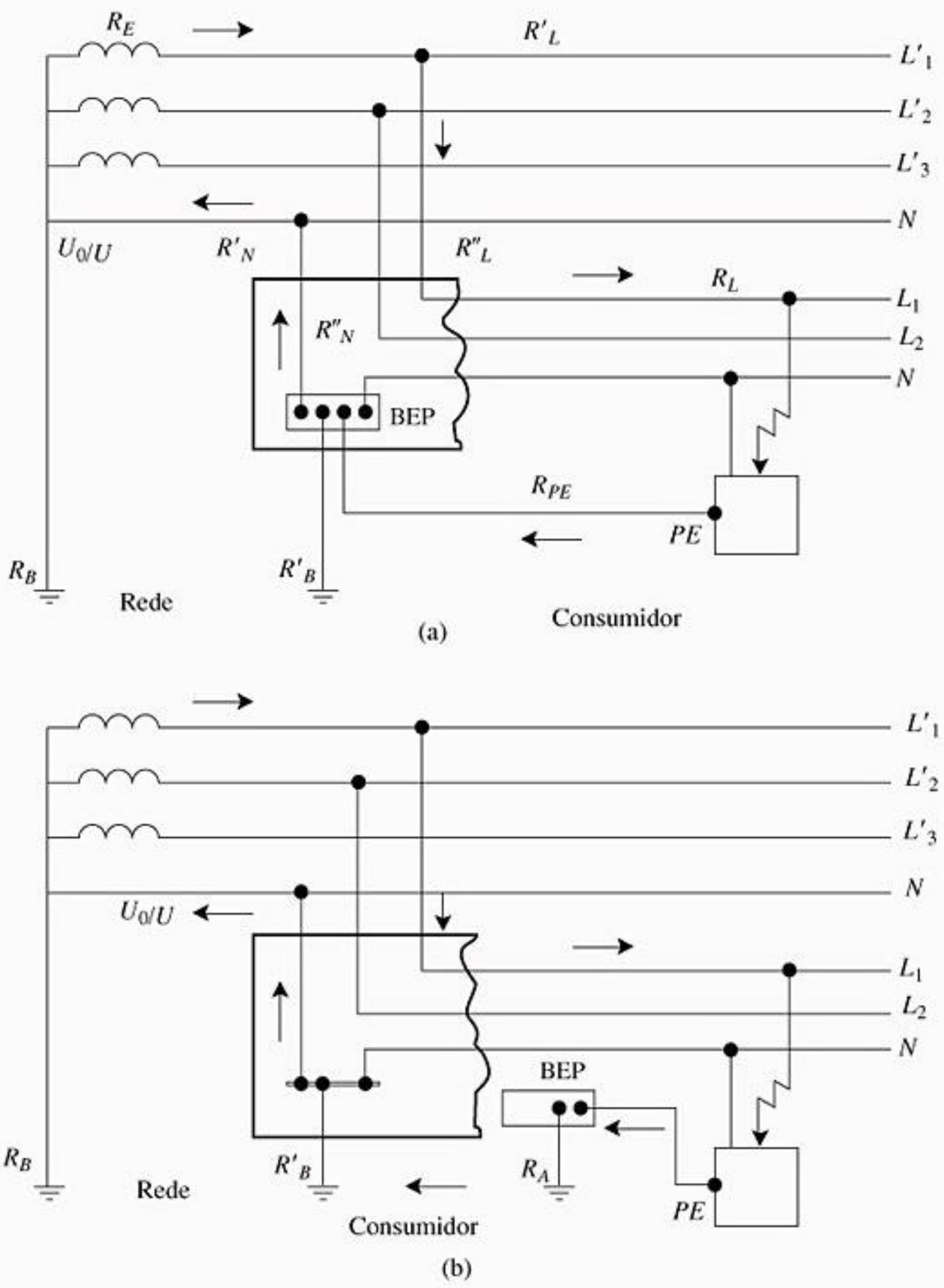


Figura 8.22 ■ Esquemas de aterramentos em instalações alimentadas por rede de distribuição em baixa tensão: (a) TN-C-S; (b) TT

instalação do consumidor, com resistência R'_B, não sendo necessária a independência elétrica entre ambos. A impedância do percurso da corrente de falta será constituída basicamente por:

- R_E – resistência do secundário do transformador.
- R'_L – resistência do condutor de fase da rede, desde o transformador até o ponto de derivação.
- R''_L – resistência do condutor de fase desde o ponto de derivação da rede até a origem da instalação.
- R_L – resistência dos condutores de fase desde a origem da instalação até a massa sob falta.
- R_{PE} – resistência dos condutores de proteção, desde a massa sob falta até o terminal de aterramento principal.
- R''_N – resistência do condutor neutro (na realidade, PEN) desde o terminal de aterramento principal até o ponto de derivação.
- R'_N – resistência do condutor neutro (na realidade, PEN) desde o ponto de derivação da rede até o secundário do transformador.

Pode-se escrever:

$$Z_S = R_E + R'_L + R''_L + R_L + R_{PE} + R''_N + R'_N \quad (8.56)$$

É importante observar que as resistências R_E, R'_L e R'_N devem ser fornecidas pela concessionária e, em geral, são inacessíveis na fase de projeto da instalação. Portanto, em princípio, o valor de Z_S não pode ser determinado pelo projetista e não é possível verificar a condição de proteção dada na Expressão 8.9.

O problema pode ser resolvido se for previsto um ponto de referência no nível de quadro terminal, como apresentado na Seção 8.2, isto é, se for prevista uma interligação entre o terminal de aterramento do quadro e um elemento condutor estranho à instalação. Assim, a impedância do percurso da corrente de falta poderá ser calculada (aproximadamente) por:

$$Z_S = \frac{1}{c}(\overline{R}_L + \overline{R}_{PE}) \quad (8.57)$$

onde $\overline{R}_L$ é a resistência do condutor fase do circuito terminal e $\overline{R}_{PE}$, a resistência do respectivo condutor de proteção, como sugere a Figura 8.23, e c um fator que pode variar de 0,6 a 1 (geralmente tomado igual a 0,8).

Outra solução é proteger a instalação como se o esquema utilizado fosse TT, isto é, utilizando dispositivos DR. Esta, por sinal, pode ser a solução mais indicada no caso de ser aérea a rede de distribuição pública, onde existe maior probabilidade de rompimento do condutor neutro. (Rompendo o condutor neutro da rede, o percurso da corrente de falta envolverá a terra e, na prática, tem-se um esquema TT.)

O uso de um esquema TT em uma instalação alimentada por rede pública de baixa tensão (ver Figura 8.22(b)) pressupõe, em princípio, a existência de três aterramentos, o do secundário do transformador, de resistência R_B, o do neutro, de resistência R'_B, e o das massas, de resistência R_A, esses dois últimos eletrodos deverão ser eletricamente independentes, o que nem sempre é possível em centros urbanos, devido não só às distâncias, como também à existência, em muitos casos, de elementos metálicos no subsolo que acabam interligando os eletrodos.

A impedância do percurso da corrente de falta será

$$Z_S = R_A + R'_B // R_B \quad (8.58)$$

Se ocorrer o rompimento do condutor neutro da rede, o esquema permanece TT e a impedância Z_S passa a valer

$$Z_S = R_A + R_B \quad (8.59)$$

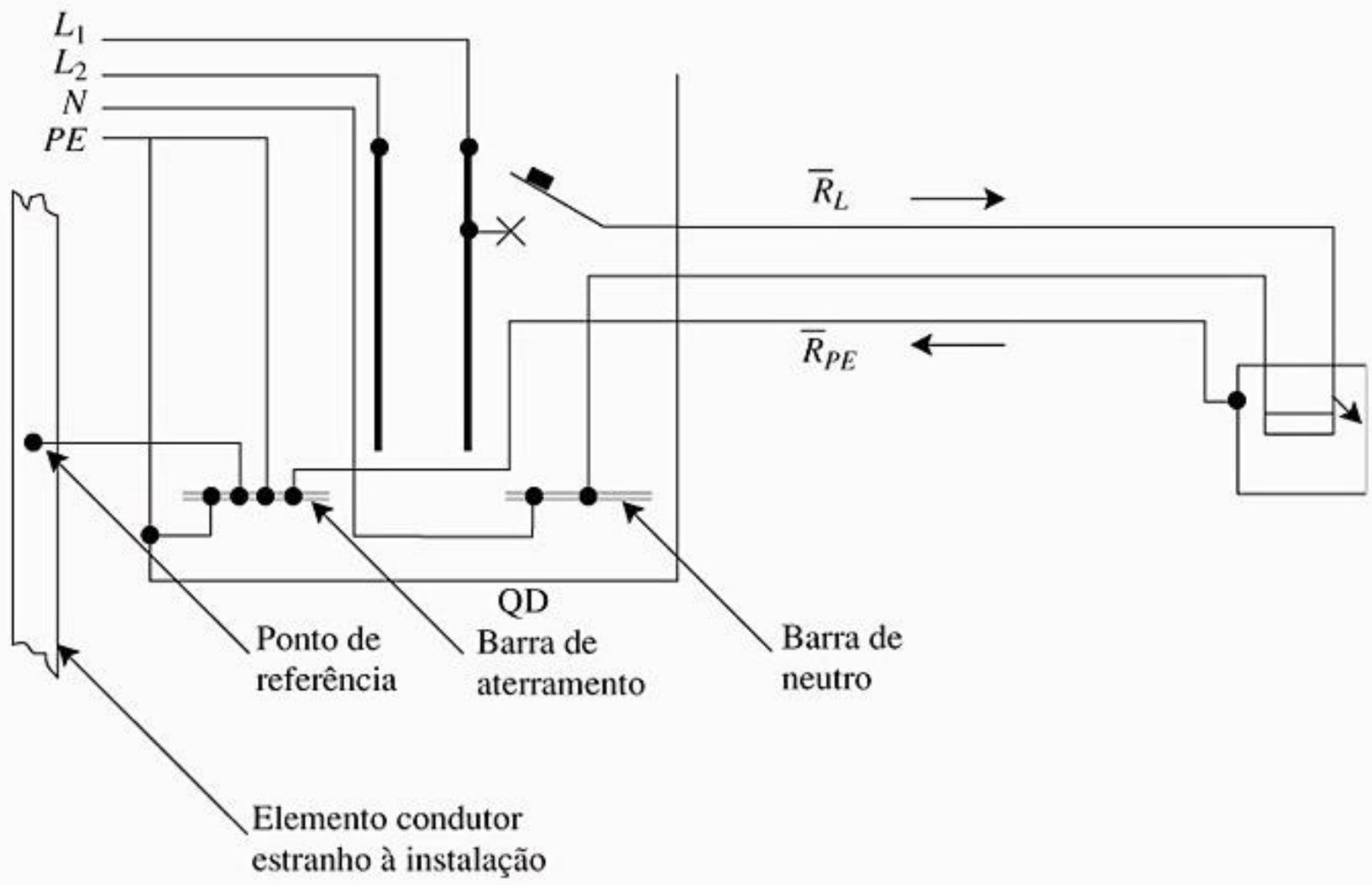


Figura 8.23 ▪ Estabelecimento do ponto de referência

Na prática, não é necessário que os eletrodos de aterramento do neutro (na origem da instalação) e das massas sejam eletricamente independentes para que a instalação seja considerada TT. Basta que o percurso de uma corrente de falta fase-massa inclua a terra, o que, geralmente, lhe confere uma impedância razoavelmente elevada. É o que ocorre, por exemplo, quando a concessionária exige, além do aterramento do neutro na origem da instalação, outro (separado) para as massas.

No Brasil, para as instalações elétricas alimentadas por redes de distribuição pública em baixa tensão, a adoção do esquema TN-C-S é, em geral, a solução mais conveniente do ponto de vista de segurança, uma vez que:

- É utilizado um único sistema de aterramento na origem da instalação do consumidor.
- As correntes de curto-circuito são elevadas e a proteção atua eficazmente.
- A rápida atuação da proteção diminui o tempo de choque elétrico, proporcionando proteção contra o contato indireto.

8.6 Aplicação dos dispositivos DR

Generalidades

Os dispositivos DR são utilizados na proteção contra contatos indiretos qualquer que seja o esquema de aterramento utilizado (TN, TT ou IT), podendo, em princípio, ser utilizados dispositivos de baixa ou de alta sensibilidade.

É preciso observar, por sua vez, que os DRs de alta sensibilidade constituem uma proteção adicional obrigatória contra contatos diretos, conforme a NBR 5410.

Esquema TT

Nas *instalações com esquema TT*, como enfatiza a NBR 5410, o DR é atualmente o único meio adequado para proteção contra contatos indiretos, o mesmo ocorrendo com as *instalações alimentadas por redes públicas em baixa tensão com esquema TN-C-S*.

A norma admite nesse esquema o uso de *um único dispositivo DR*, instalado na origem da instalação, proporcionando uma proteção geral contra contatos indiretos. Assim, nas unidades de consumo alimentadas por rede pública em baixa tensão, o dispositivo poderia ser localizado junto do medidor, isto é:

- Na caixa de entrada de unidades isoladas (como nas residências e em pequenos estabelecimentos comerciais).
- No centro de medição de prédios com várias unidades (por exemplo, em prédios residenciais ou comerciais e em shopping centers).

No caso de um único DR, a norma admite seu deslocamento da origem, por exemplo, para o quadro de distribuição (geral) da instalação, desde que o trecho compreendido entre a origem e o dispositivo não possua qualquer massa e satisfaça a medida de proteção pelo emprego de componentes Classe II ou pela aplicação de isolação suplementar. Na prática, essa condição pode ser realizada se, entre a origem e o dispositivo, existirem apenas condutores isolados em eletroduto isolante ou cabos uni ou multipolares contidos ou não em eletroduto isolante.

É importante observar que:

- O DR único deverá ser, na maioria dos casos, de *alta sensibilidade*, tendo em vista as necessidades de proteção adicional contra contatos diretos.
- Para que seja viável a utilização de um único DR de alta sensibilidade (na caixa de entrada ou no quadro geral), é fundamental que ele não atue com a corrente de fuga total normal da instalação; assim, no caso de um DR de 30 mA, a corrente de fuga em condições normais não deve ultrapassar 15 mA.
- O surgimento de uma falta fase-massa que provoque o aparecimento de uma tensão de contato perigosa deverá fazer o dispositivo atuar, desligando toda a instalação.

Nessas condições, o uso de *um único DR* (interruptor ou disjuntor) é, em geral, uma solução aplicável a instalações de pequeno e médio porte.

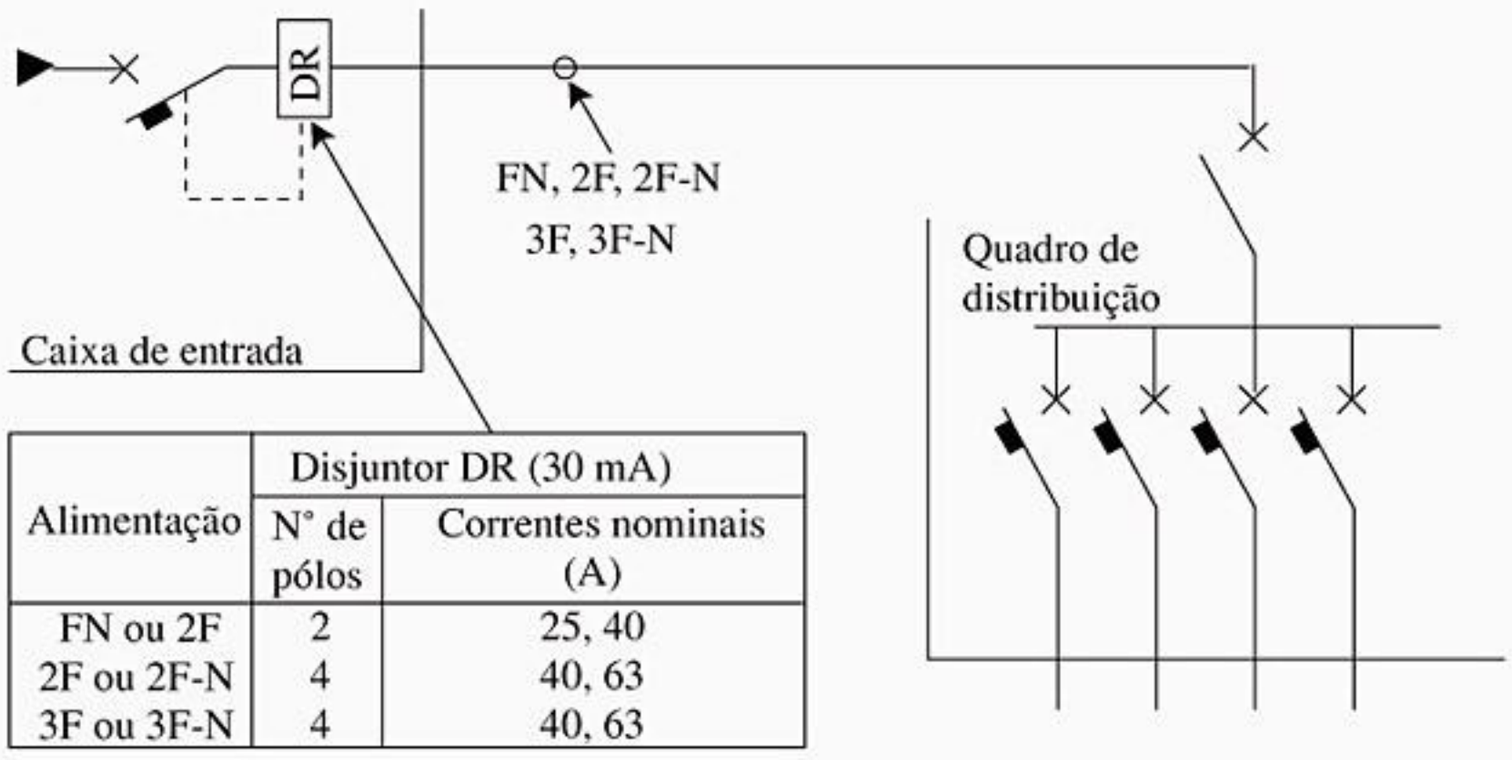
Assim pode-se utilizar, por exemplo:

- *Um disjuntor DR de alta sensibilidade* na caixa de entrada de uma unidade isolada, o que permite reunir, em um único dispositivo, a "chave geral da instalação" de proteções contra sobrecorrentes e contra choques elétricos (ver Figura 8.24(a)).
- *Um interruptor ou disjuntor DR de alta sensibilidade* no quadro de distribuição de cada unidade, em prédios com várias unidades (observadas as condições, já citadas, que permitem o deslocamento do DR), com proteção de retaguarda adequada no centro de medição (disjuntor ou dispositivo fusível) (ver Figura 8.24(b)).

Quando não for possível ou recomendável utilizar um único DR, duas são as soluções mais indicadas:

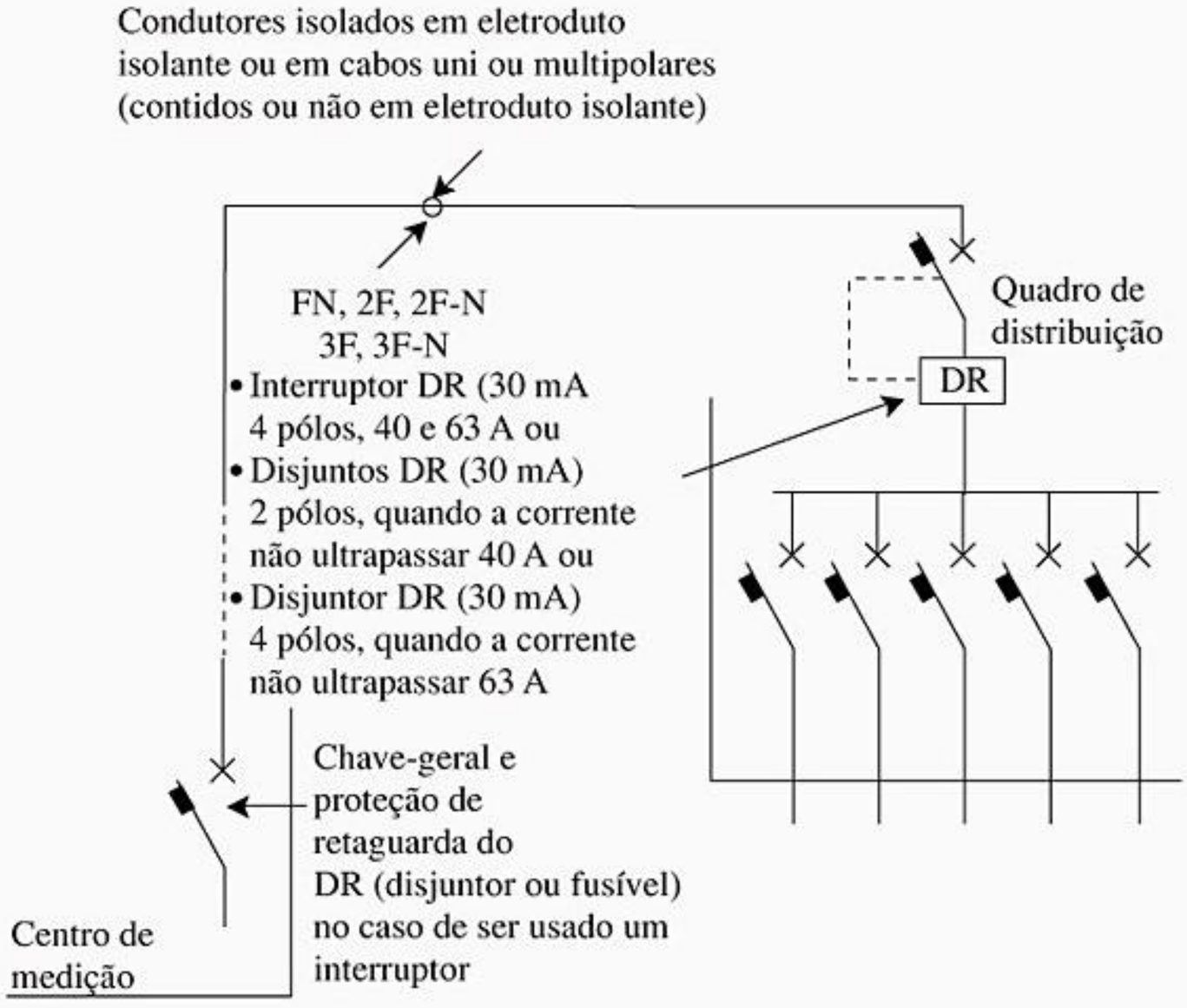
(a) Instalar *um disjuntor DR de baixa sensibilidade* como proteção geral (na origem ou no quadro de distribuição, quando possível) e *disjuntores DR de alta sensibilidade* nos circuitos terminais onde se faça necessário; obtendo-se uma coordenação entre os DRs (ver Figura 8.25(a)).

(b) Instalar *um interruptor DR* em cada derivação da instalação, isto é, em cada um dos circuitos de distribuição, se existir mais de um, ou em cada subdivisão feita no próprio quadro. Observe que os dispositivos só poderão ser instalados no quadro de distribuição se, entre a origem e o quadro, forem observadas as



Alimentação	Disjuntor DR (30 mA)	
	N° de pólos	Correntes nominais (A)
FN ou 2F	2	25, 40
2F ou 2F-N	4	40, 63
3F ou 3F-N	4	40, 63

(a)



(b)

Figura 8.24 ▪ Exemplos de utilização de um único DR: (a) unidade isolada; (b) unidade de prédio com várias unidades

condições indicadas anteriormente (para o deslocamento de um DR da origem para outra posição). A corrente nominal de cada DR não deverá ser inferior à soma das correntes de projetos dos circuitos derivados (ver Figura 8.25(b)).

No caso de uma instalação com várias derivações, cada uma protegida por um DR (como na Figura 8.25(b)) e com um aterramento comum, a resistência de aterramento (R_A) deve ser obtida pela expressão a seguir

$$R_A \leq \frac{U_L}{I_{\Delta N\max}} \qquad (8.60)$$

onde $I_{\Delta N\max}$ é o maior dos valores de corrente diferencial-residual nominal de atuação dos DRs utilizados nas derivações. Assim, por exemplo, se na instalação representada na Figura 8.25(b) tiver um DR de 30 mA e outro de 300 mA, a resistência deverá valer, para $U_L = 50$ V

$$R_A \leq \frac{50}{300 \times 10^{-3}} = 167\ \Omega$$

Existe, no entanto, a possibilidade de que correntes diferenciais-residuais (de fuga ou de falta) nas derivações, um pouco inferiores aos $I_{\Delta N's}$ dos respectivos DRs e que não provoquem sua atuação, somando-se, coloquem sob tensão as diversas massas. Essa condição é mostrada na Figura 8.26.

Considerando $R_A = 167\ \Omega$ e $I_{F1} = I_{F2} = 0{,}2$ A e $I_{F3} = 0{,}019$ A, tem-se, nas massas, a tensão

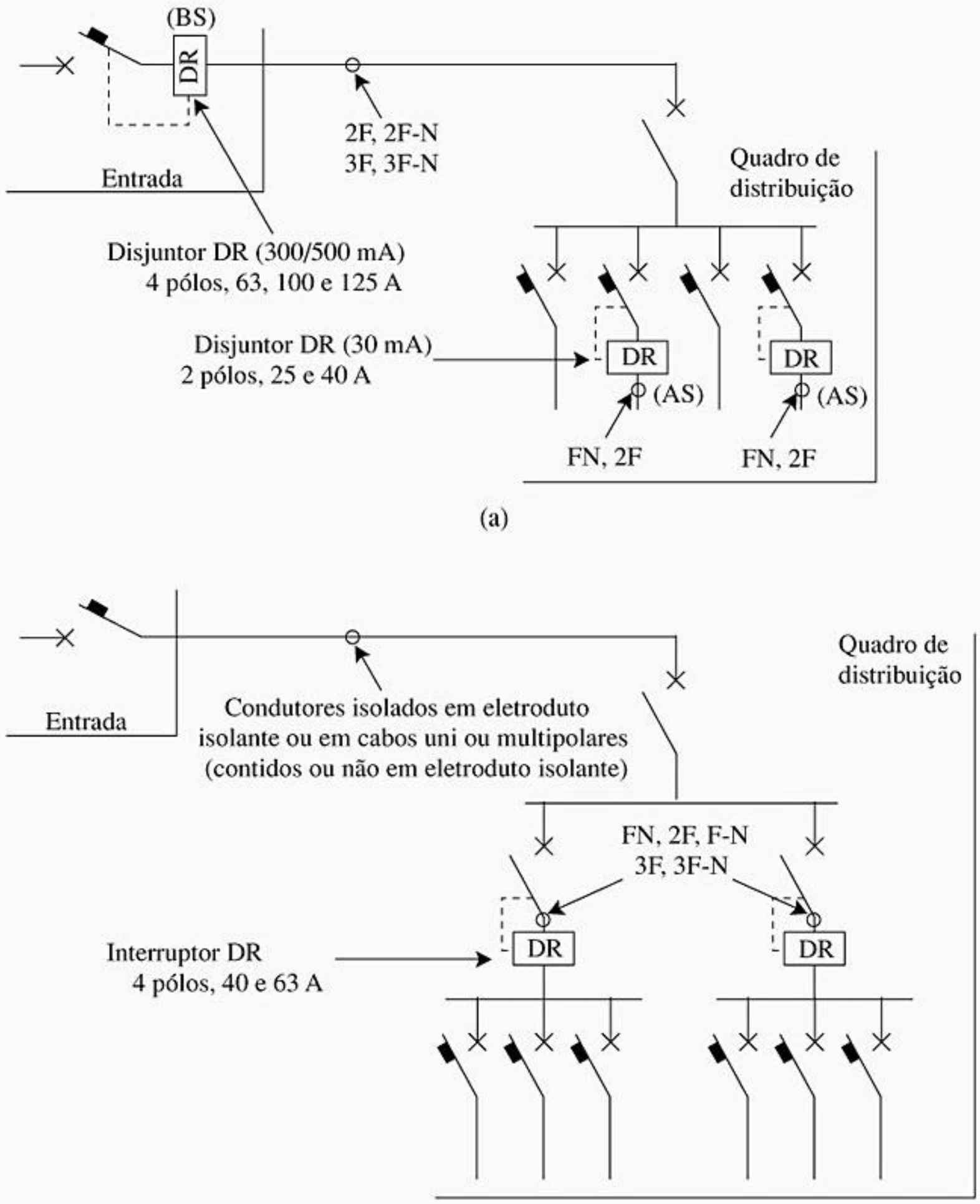


Figura 8.25 ▪ Exemplos de utilizações típicas de DRs: (a) disjuntor DR de BS na entrada e disjuntor DR de AS em determinados circuitos terminais; (b) um interruptor DR em cada subdivisão da instalação

$$U_F = U_B = 167 \cdot (0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}019) = 70 \text{ V}$$

Para evitar esse problema e reduzir a tensão de contato, a resistência de aterramento deverá ser dimensionada com base na soma das correntes diferenciais-residuais nominais de atuação dos diversos DRs instalados nas derivações cujo aterramento é comum. Assim, tem-se no caso do esquema da Figura 8.26

$$R_A \leq \frac{50}{0{,}630} = 79{,}4\ \Omega$$

Mas, se é verdade que existe a "possibilidade" citada, isto é, que em cada derivação exista uma corrente diferencial-residual pouco inferior ao $I_{\Delta N}$ do DR respectivo, é também verdade que tal possibilidade é bastante remota. Por outro lado, como sabemos, o DR pode atuar para qualquer valor de I_F na faixa $I_{\Delta N}/2 \leq I_F \leq I_{\Delta N}$. Nessas condições, é geralmente suficiente dimensionar R_A pela Expressão 8.62.

No caso de um aterramento comum a várias unidades de consumo, como em um prédio de apartamentos ou de escritórios (com esquema TT, onde sejam importantes os valores de corrente de fuga das diversas unidades, para maior segurança, é oportuno considerar a máxima corrente diferencial residual que possa permanecer na instalação comum de terra, sem provocar a atuação das proteções diferenciais.

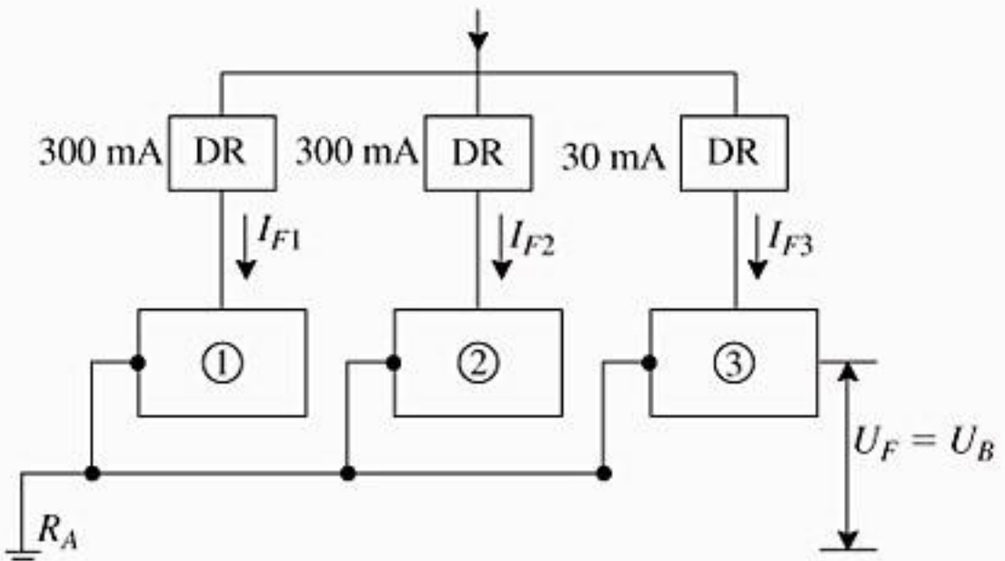


Figura 8.26 ▪ Circuitos individuais protegidos com DRs

Ao dimensionar a resistência de aterramento com base na máxima corrente diferencial-residual, é necessário considerar as fases que alimentam cada derivação. Para isso, as três derivações (ou instalações) mostradas na Figura 8.27, por exemplo, são alimentadas por duas fases de um sistema trifásico e apresentam uma corrente diferencial-residual (de fuga ou de falta) em uma das fases. Seja I_1 a corrente diferencial-residual na derivação 1, na fase *R*, I_2 na derivação 2, na fase *S*, e I_3 na derivação 3, na fase *T*, obtém-se a corrente total pela soma (fasorial) das três correntes.

Admita-se que as correntes diferenciais-residuais estejam em fase com as respectivas tensões e que o sistema de tensões seja simétrico. Como a soma de três fasores defasados de 120° não pode ser superior ao maior deles, considerando a pior hipótese (máxima corrente em uma fase, correntes nulas nas outras duas), dimensiona-se R_A com base na mais elevada dentre as somas das correntes diferenciais-residuais nominais de atuação dos dispositivos DR instalados em cada fase. No exemplo da Figura 8.28, a maior das somas corresponde à fase *S*.

Para dispositivos trifásicos, o problema é diferente, uma vez que cada um desses dispositivos pode atuar sob ação de uma corrente diferencial-residual em qualquer das três fases. Querer considerar, para o cálculo de R_A, a soma de todas as correntes diferenciais-residuais nominais de atuação dos DRs trifásicos significa admitir a ocorrência de algo possível, mas pouco provável: que em cada derivação circular a corrente diferencial-residual seja máxima e que todas elas estejam na mesma fase, como mostra a Figura 8.29.

Para concluir, pode-se dizer que a resistência de aterramento de uma instalação TT com várias derivações protegidas com DRs, ou de várias instalações protegidas por DRs com aterramento comum, deve ser calculada da Expressão 8.63, onde $I_{\Delta N máx}$ é o mais elevado dentre os valores da corrente diferencial-residual nominal de atuação dos DRs que protegem as derivações ou as instalações.

Se o objetivo é obter maior segurança para o aterramento, no caso de várias instalações com aterramento comum sujeitas a correntes de fuga consideráveis, pode-se levar em conta, no dimensionamento de R_A, a máxima corrente diferencial-residual que pode permanecer na instalação comum de terra, como foi apresentado anteriormente.

Uma resistência de aterramento inferior à obtida pela Expressão 8.62 oferece a vantagem adicional de poder fazer frente a eventuais correntes unidirecionais para terra que, embora de valor notavelmente superior a $I_{\Delta N}$, não provoquem a atuação dos DRs.

Seja, por exemplo, o prédio de apartamentos esquematizado na Figura 8.30, onde cada apartamento é protegido por um DR de 30 mA.

Devido às imperfeições das isolações, cada instalação (isto é, cada apartamento) pode apresentar uma corrente

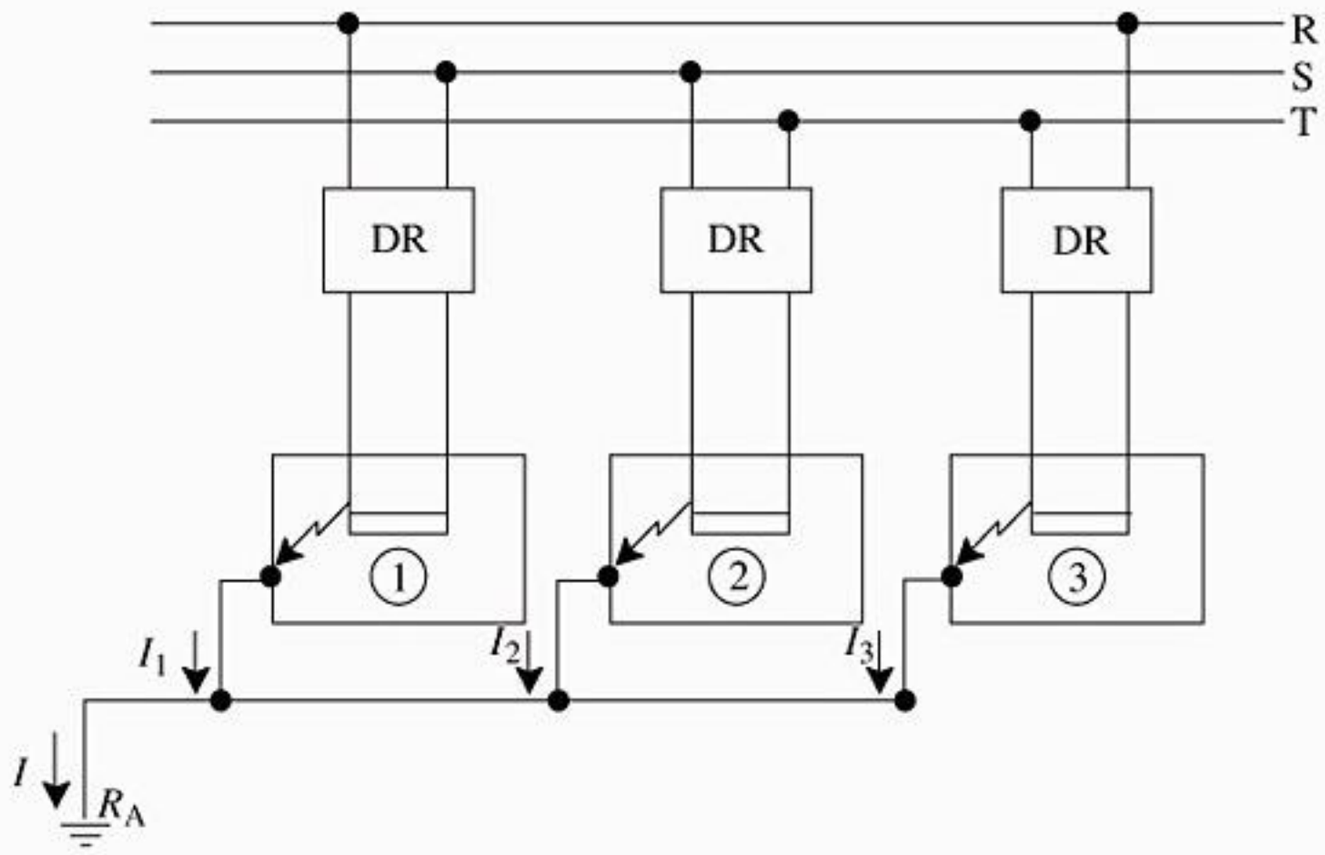
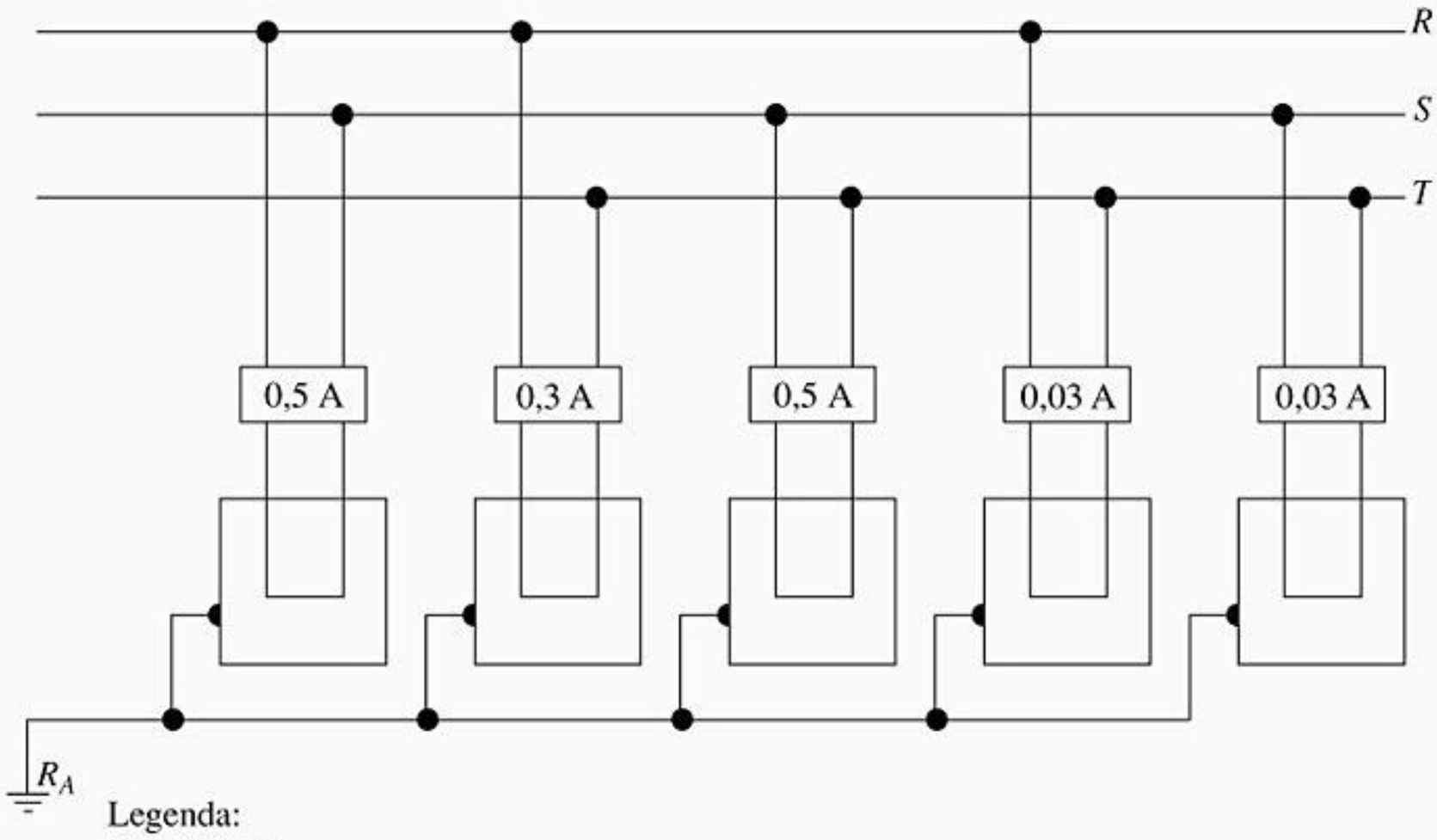


Figura 8.27 ▪ Derivações ou instalações



Legenda:
$RS = 0{,}5$ A
$ST = 0{,}5 + 0{,}03 = 0{,}53$ A
$RT = 0{,}3 + 0{,}03 = 0{,}33$ A
$R = 0{,}5 + 0{,}33 = 0{,}83$ A
$S = 0{,}5 + 0{,}53 = 1{,}03$ A
$T = 0{,}53 + 0{,}33 = 0{,}86$ A

Figura 8.28 ▪ Fase *S* com maior corrente

de fuga de alguns miliampères, insuficiente para provocar o disparo do respectivo DR. As correntes de fuga dos diversos apartamentos poderão, confluindo pelo condutor de proteção principal comum, determinar o aparecimento de tensões de contato perigosas nas massas das instalações. Assim, por exemplo, se a soma de todas as correntes de fuga (admitidas em fase) for

$$\sum I_F = 4 + 3 + 10 + \ldots + 8 = 80\,\text{mA} \quad (8.61)$$

e a resistência de aterramento valer

$$R_A = 1.000\,\Omega \quad (8.62)$$

as tensões de contato valerão

$$U_B = R_A \cdot \sum I_F = 1.000 \times 80 \times 10^{-3} = 80\,\text{V} \quad (8.63)$$

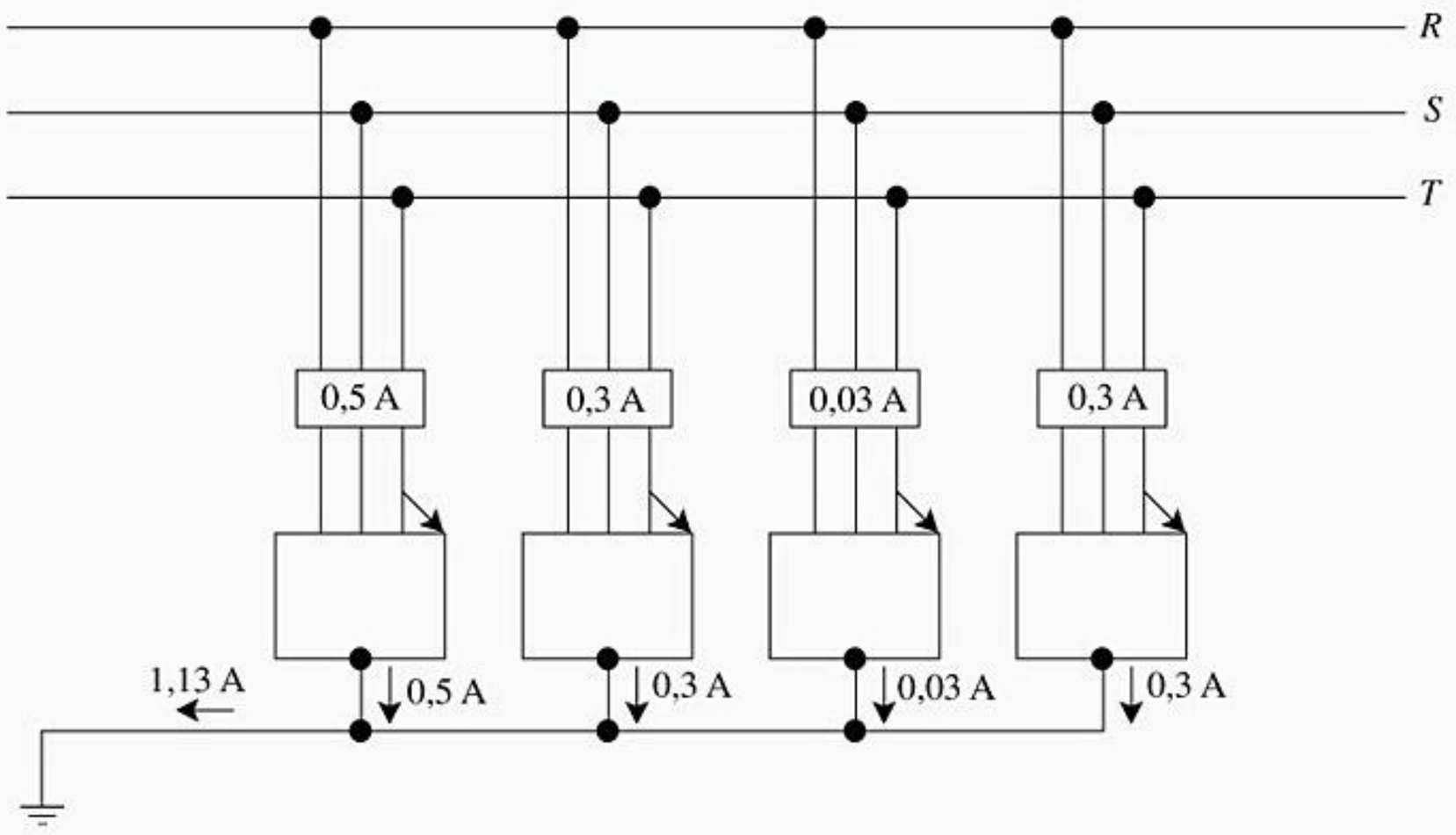


Figura 8.29 ▪ Defeito simultâneo na mesma fase (improvável)

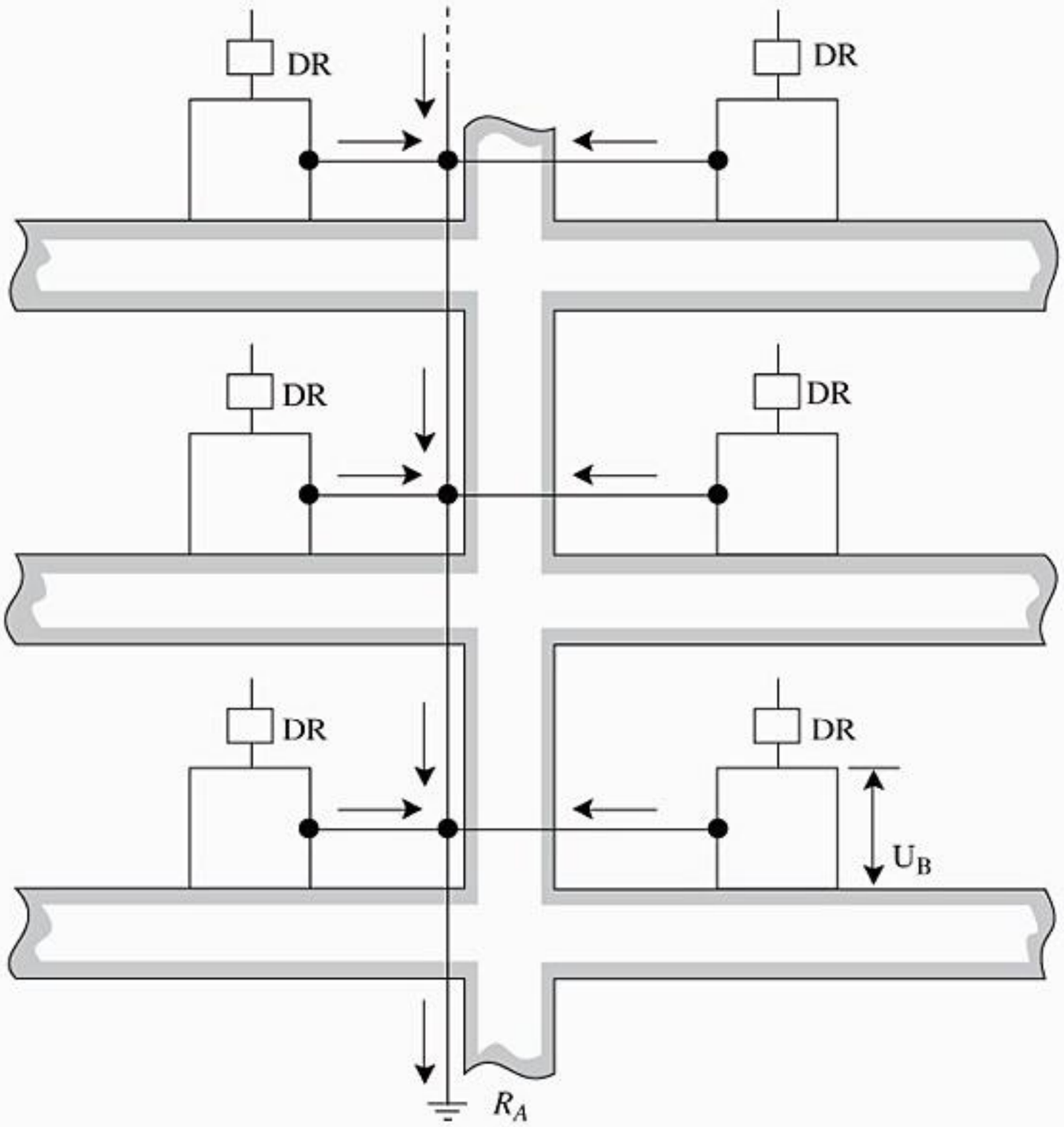


Figura 8.30 ▪ Proteção com DRs em edifício de uso coletivo

Nessas condições, a resistência de aterramento deveria estar coordenada com a soma das correntes de fuga. No entanto, sendo a corrente de fuga total de difícil (praticamente impossível) determinação, é usual adotar-se para R_A um valor não superior a 100 Ω, o que geralmente é suficiente.

A análise feita é pessimista, na verdade, uma vez que as correntes de fuga de fases diferentes estão defasadas e a soma fasorial delas, na realidade, é menor que o valor apresentado pela Expressão 8.63, fornecendo uma tensão de contato menor que a apresentada pela Expressão 8.64.

Outro aspecto interessante a observar é sugerido na Figura 8.31.

Duas cargas (ou duas instalações) (1) e (2), uma protegida contra contatos indiretos por um disjuntor termomagnético e outra por um DR, com um aterramento comum cuja R_A foi escolhida em função do DR. Ocorrendo uma falta fase-massa em (1), com corrente I_F, aparecerá uma tensão de contato

$$U_{B1} = I_F \cdot R_A$$

provavelmente superior à tensão de contato-limite, que não será eliminada em tempo hábil (devido ao valor de R_A), porque o esquema é TT. O condutor de proteção coloca (2) sob tensão de contato $U_{B2} = U_{B1}$ e o DR não atuará, uma vez que não é detectada por ele nenhuma corrente diferencial-residual.

A solução para garantir proteção contra contato indireto para esse problema seria dimensionar R_A em função da corrente que garante a atuação do disjuntor em 5 s, o que fatalmente levaria a um valor extremamente baixo e praticamente impossível de obter. Outra solução mais adequada seria prover o circuito (1) de dispositivo DR.

Esquema TN

Nas instalações com esquema TN (exceto nas que utilizam o TN-C), como apresentado na Seção 8.2, os dispositivos DR, geralmente, são a melhor opção para a proteção de circuitos em que não puder ser atendida a condição de proteção dada pela Expressão 8.11, como no caso de circuitos terminais muito distantes do transformador (por exemplo, em prédios de grande altura ou comprimento). Nesses casos, as massas protegidas *podem não ser ligadas ao condutor de proteção ao TN*, mas devem ser ligadas a um eletrodo de aterramento cuja resistência seja compatível com a corrente diferencial-residual nominal de atuação do DR utilizado. Então, nessas condições, o setor da instalação considerado deve ser admitido como TT.

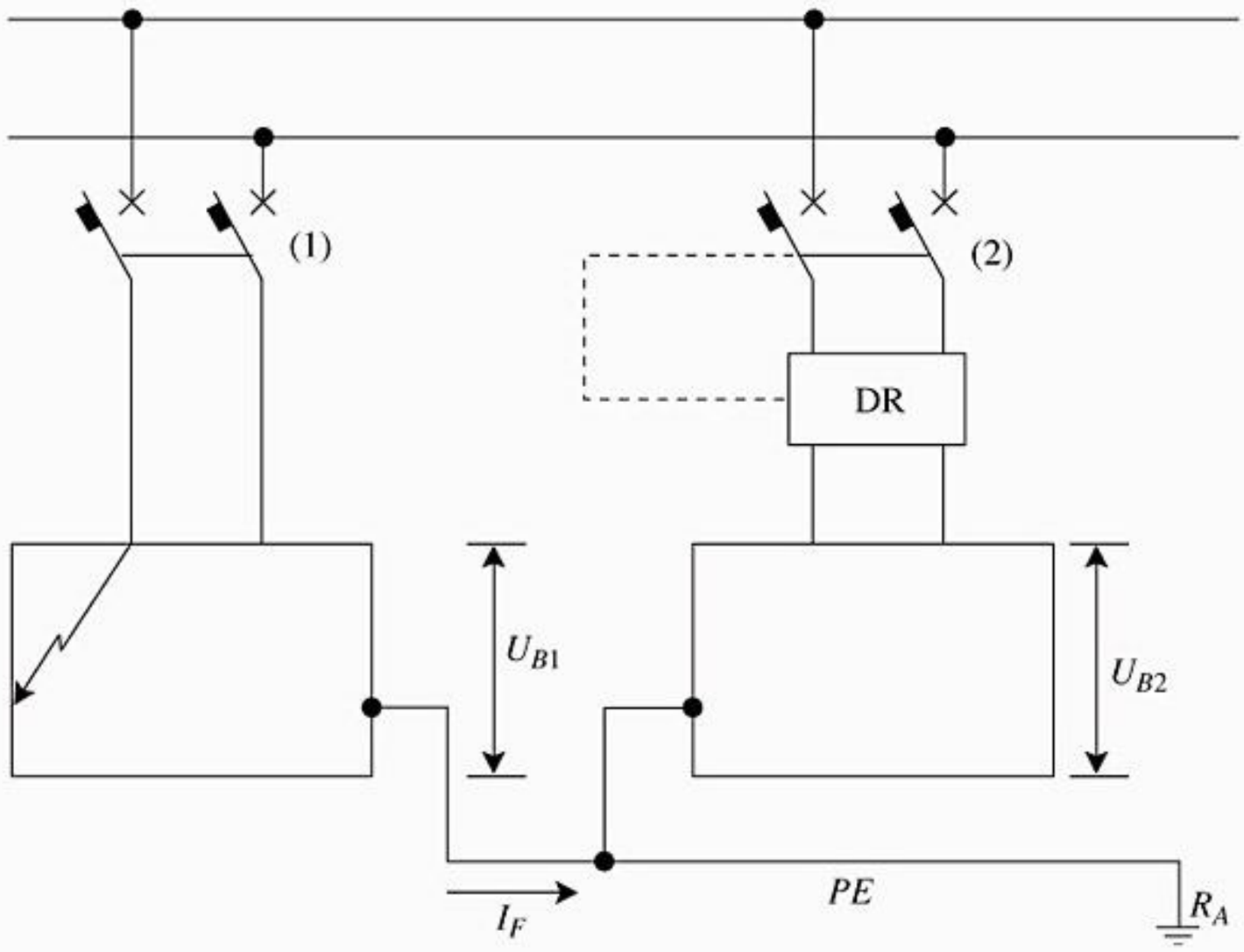


Figura 8.31 ▪ Proteção com disjuntor e DR

Também, em instalações alimentadas por rede de distribuição pública em baixa tensão, com esquema TN-C-S, a proteção (global) por DR é a solução indicada:

- Quando não houver possibilidade de verificar a condição de proteção, devido ao desconhecimento das impedâncias situadas entre a entrada e o transformador da concessionária, incluindo a deste (caso freqüente).
- Quando não puder ser garantida a integridade do neutro da concessionária (o condutor *PEN*), como ocorre em alimentações por rede aérea (para essa situação, o DR é explicitamente recomendado pela NBR 5410).

Nesses dois casos, as instalações devem ser consideradas como se seguissem o esquema TT.

Esquema IT

Nas instalações com esquema IT, o DR é o dispositivo mais indicado no caso de massas aterradas individualmente ou por grupos, observando-se que, para garantir sua não atuação em uma primeira falta, a corrente diferencial-residual de cada dispositivo deve, no mínimo, ser igual ao dobro da corrente que circularia no circuito se ocorresse uma primeira falta (direta) fase-massa (ver Expressão 8.43). Valem, no caso, todas as observações concernentes à aplicação do dispositivo no esquema TT.

Quando as massas forem todas interligadas, o uso dos DRs é particularmente indicado na proteção de circuitos em que não possa ser atendida a condição de proteção dada na Expressão 8.52, quando não houver condutor neutro, ou na Expressão 8.53, quando o neutro for distribuído. No caso, são válidas as observações referentes à aplicação da proteção diferencial do esquema TN.

Outros aspectos

A experiência internacional com o uso de dispositivos DR, que já vem de vários anos tanto na Europa como nos Estados Unidos e em outros países da América Latina (Chile e Argentina), onde existem dezenas de milhares de dispositivos instalados, mostra que muitos acidentes — choques por contato direto e por contato indireto e princípios de incêndio — já foram evitados, salvando-se vidas, equipamentos e propriedades.

Pode-se relacionar, com base na citada experiência, que os disparos dos dispositivos DR se devem a:

- Uso de equipamentos com elevado nível de corrente de fuga (por exemplo, chuveiros elétricos metálicos com resistência nua).
- Faltas em aparelhos eletrodomésticos e em aparelhos de iluminação.
- Umidade em eletrodutos (ou eletrocalhas) metálicos, sendo essa umidade geralmente resultante de inundações, de lavagem de pisos ou de condensações.
- Introdução de agulhas, clipes ou objetos análogos em tomadas de corrente.
- Falhas nas isolações de condutores, provenientes de problemas na instalação (puxamento de condutores isolados em eletrodutos metálicos com rebarbas ou com estreitamento de seção em curvas).

- Contato direto de uma pessoa com um condutor "desencapado" de um cabo flexível de alimentação de um equipamento de utilização (aparelho eletrodoméstico ou de iluminação móvel ou portátil).

O emprego de dispositivos DR é um bom diagnóstico para detectar instalações mal-executadas ou em mau estado de conservação. A corrente diferencial-residual funciona como um elemento de controle do nível de isolamento de uma instalação ou de um setor de uma instalação e, conseqüentemente, da segurança e do conforto das pessoas. Nessas condições, o dispositivo DR, principalmente o de alta sensibilidade, é um vigilante da boa qualidade de uma instalação elétrica, permitindo manter a instalação em bom estado. Por sua vez, ao limitar as correntes de fuga a valores aceitáveis, o dispositivo evita o desperdício, contribuindo para a conservação da energia elétrica.

Por último, é importante observar que os dispositivos DR podem ser utilizados na *proteção contra incêndios*. Com efeito, uma corrente de falta fase-massa elevada (da ordem de algumas centenas de miliampères) pode provocar aquecimentos indesejáveis em seu percurso, que muitas vezes é imprevisível, devido a circunstâncias locais. Tais aquecimentos, quando ocorrem em ambientes que armazenem ou processem materiais combustíveis, podem significar o início de um incêndio.

Nessas condições, a NBR 5410 recomenda que os circuitos terminais situados em ambientes classificados como BE2 contenham dispositivos DR com corrente diferencial-residual nominal máxima de 500 mA, o que representa uma proteção eficaz contra riscos de incêndio de origem elétrica. Na realidade, a NBR 5410 apresenta, além da solução com DR, que nos parece a mais viável, outra que consiste na supervisão do circuito por um dispositivo supervisor (DSI) permanente de isolamento que sinalize quando surgir uma falta no esquema IT.

Pode-se, adicionalmente, colocar dispositivos próprios para detectar princípios de incêndios, tais como detector de fumaça, de calor, de radiações infravermelhas etc.

8.7 Condutores de proteção

Muito embora a NBR 5410 utilize a expressão "condutor de proteção" referindo-se principalmente aos condutores de proteção 'dos circuitos', isto é, os que acompanham os circuitos terminais e de distribuição, o termo apresentado na Seção 3.3 (em "Eletrodos de aterramento") é mais abrangente, englobando todos os condutores ligados ao aterramento de proteção da instalação, o que inclui os condutores de aterramento e os de eqüipotencialidade (ver Figura 8.32). Todos eles devem sempre estar presentes nas instalações, seja qual for o esquema de aterramento adotado (TN, TT ou IT).

Os *condutores de proteção* (dos circuitos) (*PEs*) devem estar presentes:

- Em um circuito terminal ligando a(s) massa(s) do(s) equipamento(s) de utilização e, se for o caso, o(s) terminal(is) "terra" da(s) tomada(s) de corrente, alimentado(s) pelo circuito ao terminal de aterramento do quadro de distribuição respectivo.
- Em um circuito de distribuição, interligando o terminal de aterramento do quadro de onde parte o circuito ao terminal de aterramento do quadro alimentado por circuito.

Um condutor de proteção deve fazer parte da mesma linha elétrica do circuito, como está explicitamente recomendado pela NBR 5410 no caso dos esquemas TN (ver Seção "Condições de proteção"). Por sua vez, pode-se ter um condutor de proteção comum a vários circuitos, desde que estes estejam contidos na mesma linha elétrica.

Podem ser usados como condutores de proteção:

- Veias de cabos multipolares.
- Condutores isolados, cabos unipolares ou condutores nus em conduto comum com os condutores vivos.
- Armações, coberturas metálicas ou blindagens de cabos.
- Eletrodutos metálicos e outros condutos metálicos, desde que sua continuidade elétrica seja assegurada por disposições construtivas ou conexões adequadas, e que constituam proteção contra deteriorações de natureza mecânica, química ou eletroquímica. Além disso, desde que sua condutância seja, no mínimo, igual à resultante da aplicação da Expressão 8.65.

Quando a instalação contiver barramentos blindados com invólucros metálicos, esses invólucros podem ser usados como condutores de proteção, desde que satisfaçam simultaneamente às três prescrições seguintes:

(a) Sua continuidade elétrica deve ser assegurada por disposições construtivas ou conexões adequadas, que constituam proteção contra deteriorações de natureza mecânica, química ou eletroquímica.
(b) Sua condutância seja, no mínimo, igual à resultante da aplicação da Expressão 8.65.
(c) Permitam a conexão de outros condutores de proteção em todos os pontos de derivação predeterminados.

No caso de elementos condutores estranhos à instalação, é importante observar que sua aplicação a esse uso deve ser analisada e, se necessário, devem ser feitas as adaptações necessárias.

Os seguintes elementos metálicos não são admitidos como condutor de proteção:

- Tubulações de água.
- Tubulações de gases ou líquidos combustíveis ou inflamáveis.
- Elementos de construção sujeitos a esforços mecânicos em serviço normal.
- Eletrodutos flexíveis, exceto quando concebidos para esse fim.

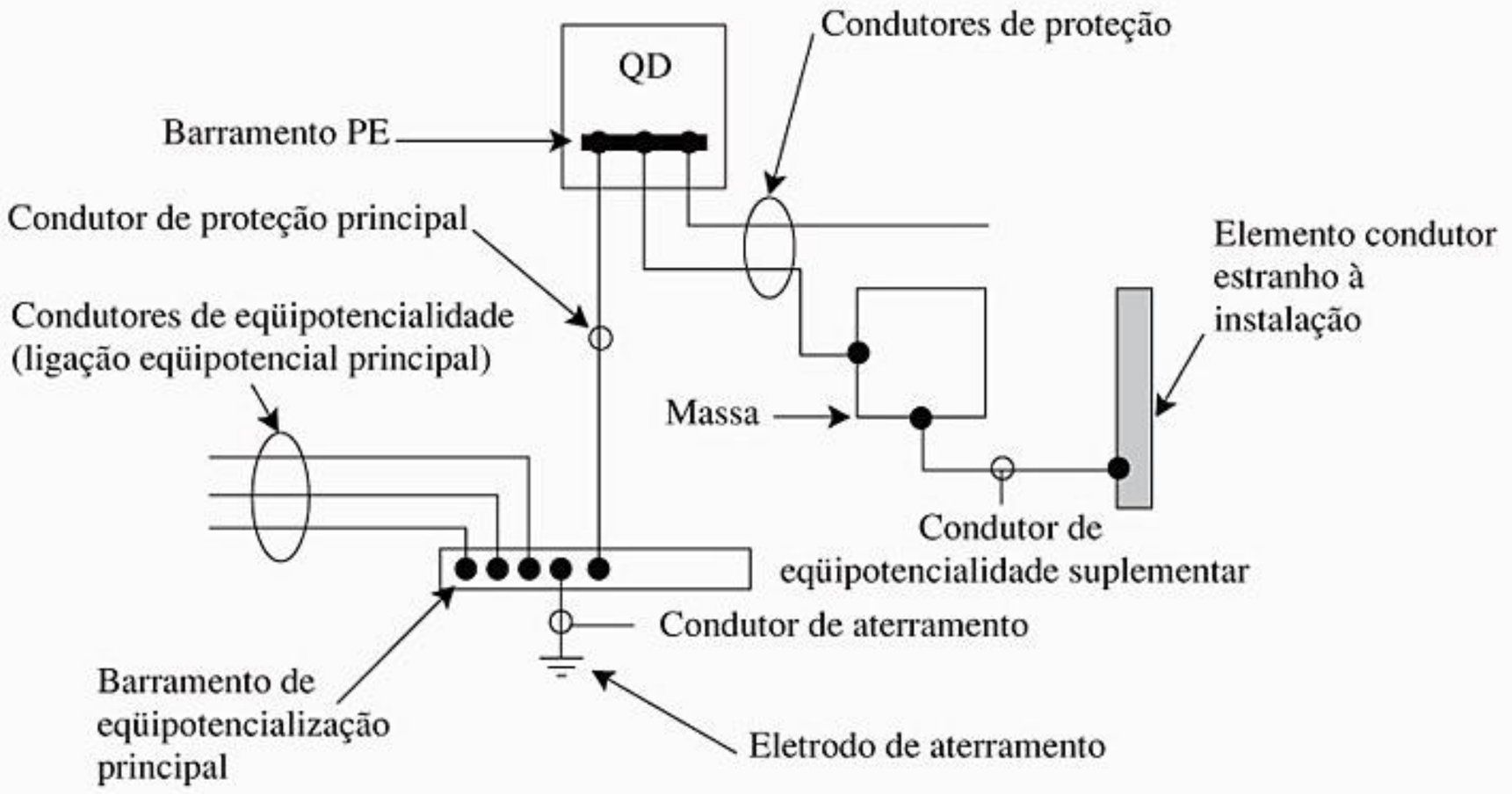


Figura 8.32 ■ Os condutores de proteção de uma instalação

- Partes metálicas flexíveis.
- Armadura do concreto.
- Estruturas e elementos metálicos da edificação.

Nenhuma ligação que vise à eqüipotencialização ou ao aterramento, incluindo as conexões às armaduras do concreto, pode ser usada como alternativa aos condutores de proteção dos circuitos.

As seções dos condutores de proteção devem atender a dois critérios, o mecânico e o elétrico.

Assim:

- Os condutores de proteção devem possuir uma resistência mecânica suficiente para resistir aos esforços mecânicos a que possam ser submetidos.
- A passagem de uma corrente de falta por um condutor de proteção não deve provocar um aquecimento que possa pôr em risco sua integridade, sua continuidade elétrica e suas ligações.

As seções mínimas dos condutores de proteção devem estar de acordo com a Tabela 8.8.

Em alternativa ao uso da Tabela 8.8, a seção mínima do condutor de proteção pode ser calculada pela Expressão 8.63, obtida da Expressão 11.7 (aplicável apenas para tempos de atuação dos dispositivos de proteção que não excedam 5 segundos)

$$S_{PE} = \frac{\sqrt{I^2 t}}{K} \qquad (8.65)$$

Onde:

- S_{PE} é a seção do condutor (mm²).
- I é o valor eficaz da corrente de falta que pode circular pelo dispositivo de proteção, para uma falta direta (A).
- t é o tempo de atuação do dispositivo de proteção (s);
- K é um fator que depende do material do condutor de proteção, de sua isolação e de outras partes e das temperaturas inicial e final, sendo dado pelas Tabelas 8.9, 8.10, 8.11, 8.12, 8.13 (citadas na NBR 5410).

Os condutores de proteção devem estar convenientemente protegidos contra as deteriorações mecânicas e químicas e contra os esforços eletrodinâmicos. Suas ligações devem ser acessíveis para verificações e ensaios, com exceção das executadas dentro de caixas moldadas ou juntas encapsuladas.

Nenhum dispositivo de comando ou de proteção deve ser inserido no condutor de proteção, porém podem ser utilizadas ligações desmontáveis por meio de ferramentas, para fins de ensaio. Quando for utilizado um dispositivo de controle de continuidade de aterramento, as bobinas de operação não devem ser inseridas no condutor de proteção.

Os *condutores de aterramento* devem, em princípio, ter sua seção mínima determinada pela Expressão 8.65 ou pela Tabela 8.9; no entanto, quando enterrados no solo devem atender à Tabela 8.14.

Deve-se observar que, na execução da ligação de um condutor de aterramento a um eletrodo de aterramento, deve ser garantida a continuidade elétrica e a integridade do conjunto.

Os *condutores de eqüipotencialidade da ligação eqüipotencial principal* devem possuir seções não inferiores à metade da seção do condutor de proteção de maior seção da instalação, com um mínimo de 6 mm², podendo ser limitadas a 25 mm² se o condutor for de cobre, ou à seção equivalente, se de outro metal.

Os *condutores de eqüipotencialidade das ligações eqüipotenciais suplementares*, quando ligarem duas massas, devem possuir uma seção equivalente igual ou supe-

Tabela 8.8 ■ Seção mínima dos condutores de proteção

Seção dos condutores de fase do circuito S (mm²)	Seção mínima do condutor de proteção correspondente S_{PE} (mm²)
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	$S/2$

Tabela 8.9 ■ Fator *k* para condutor de proteção isolado não incorporado a cabo multipolar e não enfeixado com outros cabos

Material do condutor	Isolação	
	PVC(*)	EPR ou XLPE
Cobre	143/133	176
Alumínio	95/88	116
Aço	52/49	64

(*) O valor mais baixo aplica-se a condutores com seção maior que 300 mm²

Notas:
1. A temperatura inicial considerada é de 30 °C.
2. A temperatura final considerada é:
- PVC até 300 mm²: 160 °C.
- PVC maior que 300 mm²: 140 °C.
- EPR e XLPE: 250 °C.

Tabela 8.10 ■ Fator *k* para condutor de proteção nu em contato com a cobertura de cabo, mas não enfeixado com outros cabos

Material do condutor	Cobertura do cabo	
	PVC	Polietileno
Cobre	159	138
Alumínio	105	91
Aço	58	50

Notas:
1. A temperatura inicial considerada é de 30 °C.
2. A temperatura final considerada é de 200 °C para o PVC e 150 °C para o polietileno.

Tabela 8.11 ■ Fator *k* para condutor de proteção constituído por veia de cabo multipolar ou enfeixado com outros cabos ou condutores isolados

Material do condutor	Cobertura do cabo	
	PVC	Polietileno
Cobre	159	138
Alumínio	105	91
Aço	58	50

Notas:
1. A temperatura inicial considerada é de 30 °C
2. A temperatura final considerada é de 200 °C para o PVC e 150 °C para o polietileno.

Tabela 8.12 ■ Fator *k* para condutor de proteção constituído por armação, capa metálica ou condutor concêntrico de um cabo

Material do condutor	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
Cobre	141	128
Alumínio	93	85
Chumbo	26	23
Aço	51	46

Notas:
1. A temperatura inicial considerada é de 60 °C para o PVC e 80 °C para o EPR e o XLPE.
2. A temperatura final considerada é de 200 °C para o PVC, EPR e XLPE.

Tabela 8.13 ■ Fator *k* para condutor de proteção nu onde não houver risco de que as temperaturas indicadas possam danificar qualquer material adjacente

		Material do condutor					
		Cobre		Alumínio		Aço	
Condições	Temperatura inicial (°C)	Fator *k*	Temperatura máxima (°C)	Fator *k*	Temperatura máxima (°C)	Fator *k*	Temperatura máxima (°C)
Visível e em áreas restritas	30	228	500	125	300	82	500
Condições normais	30	159	200	105	200	58	200
Risco de incêndio	30	138	150	91	150	50	150

Tabela 8.14 ■ Seções mínimas de condutores de aterramento enterrados no solo

	Protegido contra danos mecânicos	Não protegido contra danos mecânicos
Protegido contra corrosão	Cobre: 2,5 mm² Aço: 10 mm²	Cobre: 16 mm² Aço: 16 mm²
Não protegido contra corrosão	Cobre: 50 mm² (solos ácidos ou alcalinos) Aço: 80 mm²	

rior à seção do condutor de proteção de menor seção ligado a essas massas. Quando ligarem uma massa a um elemento condutor estranho à instalação, devem possuir uma seção equivalente igual ou superior à metade da seção do condutor de proteção ligado a essa massa, com uma seção mínima de 2,5 mm², se protegidos mecanicamente, ou de 4 mm², caso contrário.

É importante observar que uma ligação eqüipotencial suplementar pode ser executada por elementos condutores estranhos à instalação, desde que não desmontáveis, como é o caso de estruturas metálicas.

8.8 Locais especiais

Locais contendo banheira ou chuveiro

Os locais contendo banheira ou chuveiro, onde é maior o perigo do choque elétrico devido à redução da resistência elétrica do corpo humano e ao contato com o potencial da terra, merecem um tratamento especial por parte da NBR 5410.

Nessas áreas são considerados quatro volumes, conforme indicado nas Figuras 8.33 e 8.34.

Em caso de cabine de banho pré-fabricada, no volume gerado a 60 cm da porta de entrada, não pode ser instalado nenhum interruptor de tomada de corrente, conforme mostra a Figura 8.35.

A Tabela 8.15 apresenta as características dos componentes da instalação em cada um dos volumes definidos.

No volume 0, admite-se apenas o uso de SELV com tensão nominal não superior a 12 V, e as partes vivas do sistema SELV, qualquer que seja sua tensão nominal, devem ser providas de isolação capaz de suportar ensaio de tensão aplicada de 500 V durante 1 min ou devem ser usadas barreiras ou invólucros com grau de proteção pelo menos IP2X. Além disso, a fonte de segurança deve ser instalada fora do volume 0 e deve ser realizada uma eqüipotencialização suplementar, reunindo todos os ele-

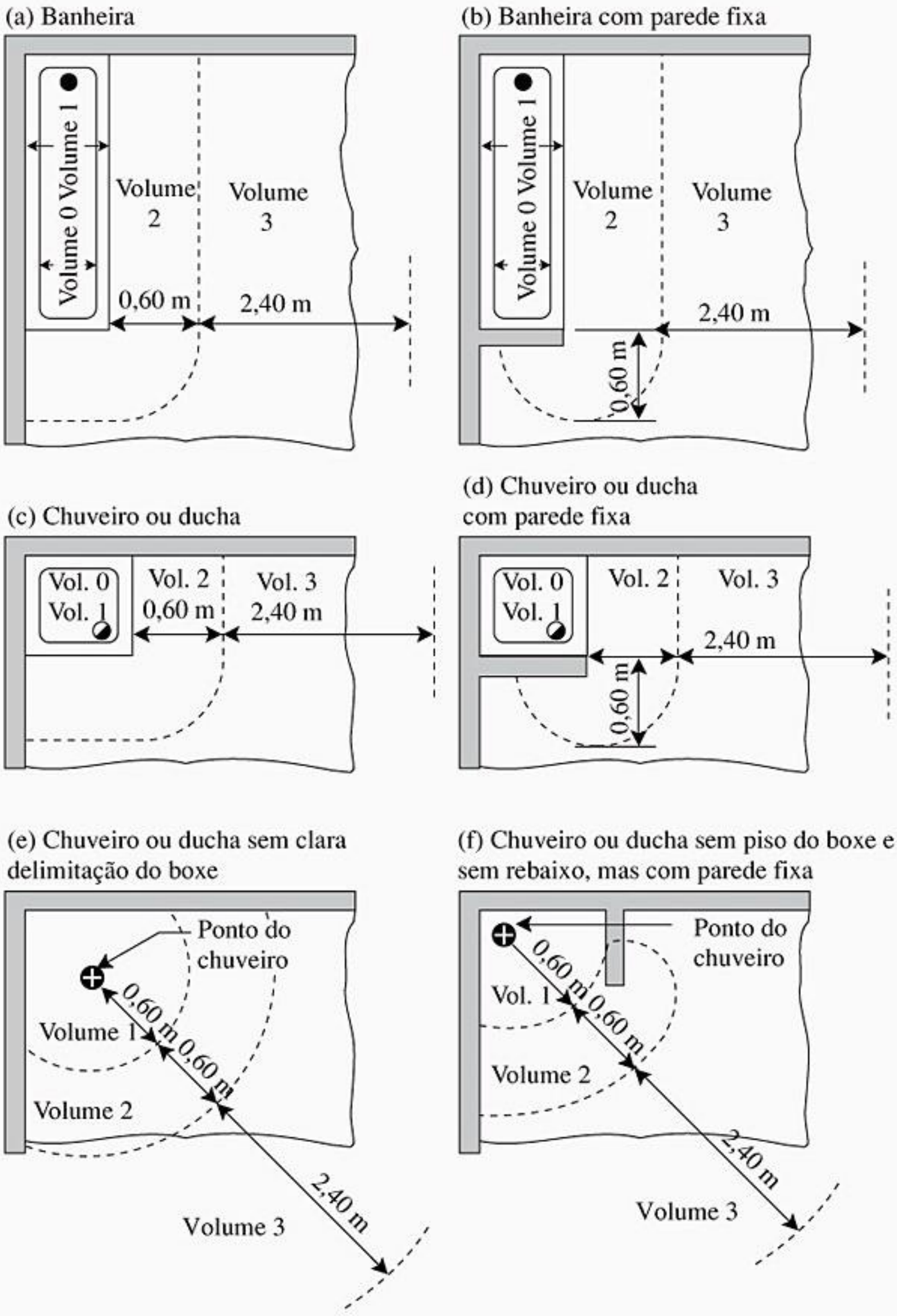


Figura 8.33 ■ Dimensões dos volumes (planta baixa)

mentos condutivos dos volumes 0, 1, 2 e 3 e os condutores de proteção de todas as massas situadas nesses volumes.

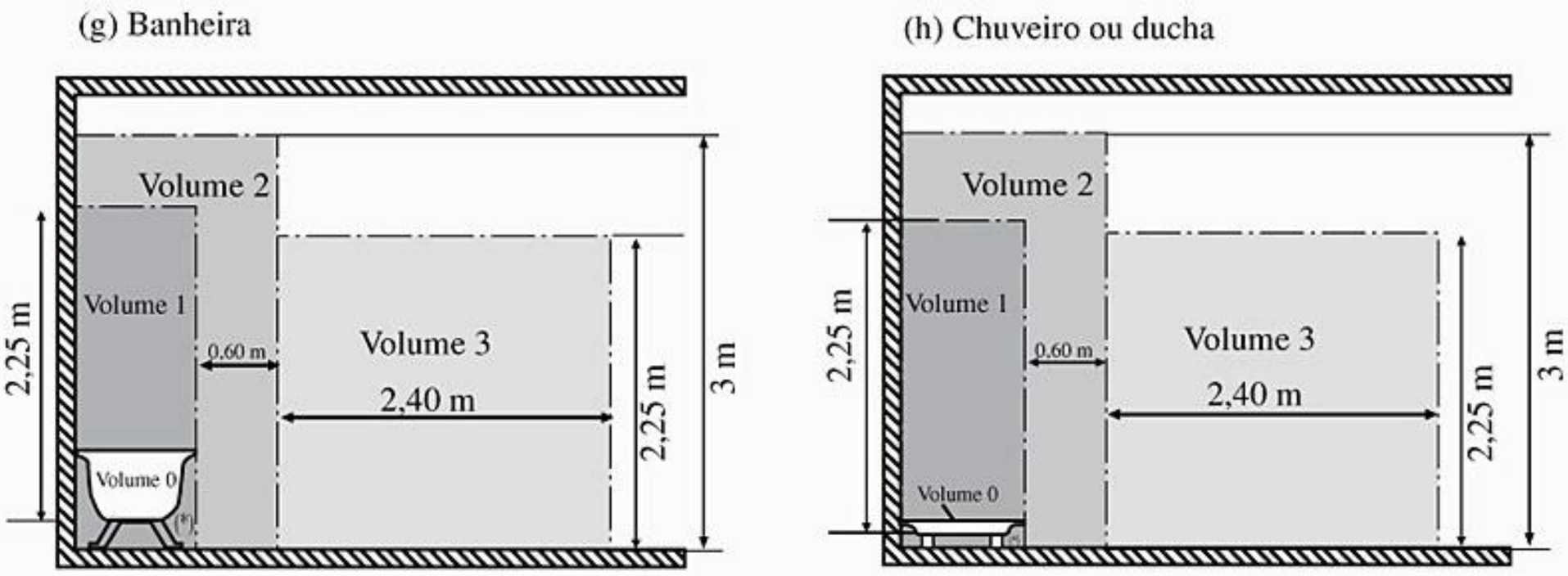
Piscinas

A redução da resistência elétrica do corpo humano e o contato com o potencial da terra torna as piscinas (inclusive lava-pés e áreas adjacentes) locais tão perigosos quanto os que contêm banheira ou chuveiro.

A NBR 5410 considera, nesse caso, três volumes conforme indicado nas Figuras 8.36 e 8.37.

Nos volumes 0 e 1, admite-se apenas o uso de SELV com tensão nominal não superior a 12 V em corrente alternada, ou 30 V em corrente contínua, e as partes vivas do sistema SELV, qualquer que seja sua tensão nominal, devem ser providas de isolação capaz de suportar ensaio de tensão aplicada de 500 V durante 1 min ou devem ser usadas barreiras ou invólucros com grau de proteção pelo menos IP2X. Além disso, a fonte de segurança deve ser instalada fora dos volumes 0, 1 e 2.

No volume 2, são admitidas uma ou mais das seguintes medidas de proteção:



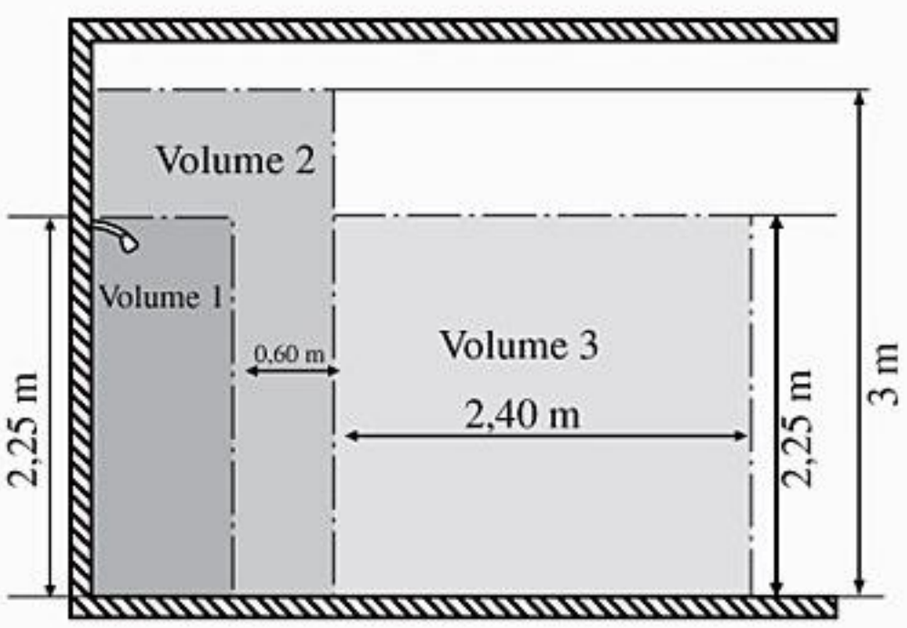


Figura 8.34 ■ Dimensões dos volumes (vista em elevação)

- Uso de SELV, sendo a fonte de segurança instalada fora dos volumes 0, 1 e 2.
- Eqüipotencialização e seccionamento automático da alimentação, sendo o seccionamento automático provido por dispositivo DR com corrente diferencial-residual nominal não superior a 30 mA.
- Separação elétrica individual (ver 5.1.2.4), sendo a fonte de separação instalada fora dos volumes 0, 1 e 2.

A Tabela 8.16 apresenta as características dos componentes da instalação em cada um dos volumes definidos.

Compartimentos condutivos

São considerados *compartimentos condutivos* os locais cujas paredes são constituídas essencialmente de partes metálicas ou condutivas e no interior dos quais uma pessoa pode, por meio de uma parte substancial de seu corpo, entrar em contato com as partes condutoras circundantes, sendo limitada a possibilidade de interrupção desse contato, em geral, devido às dimensões desses locais. É o caso, por exemplo, de tanques metálicos onde os operários precisam entrar para realizar manutenção.

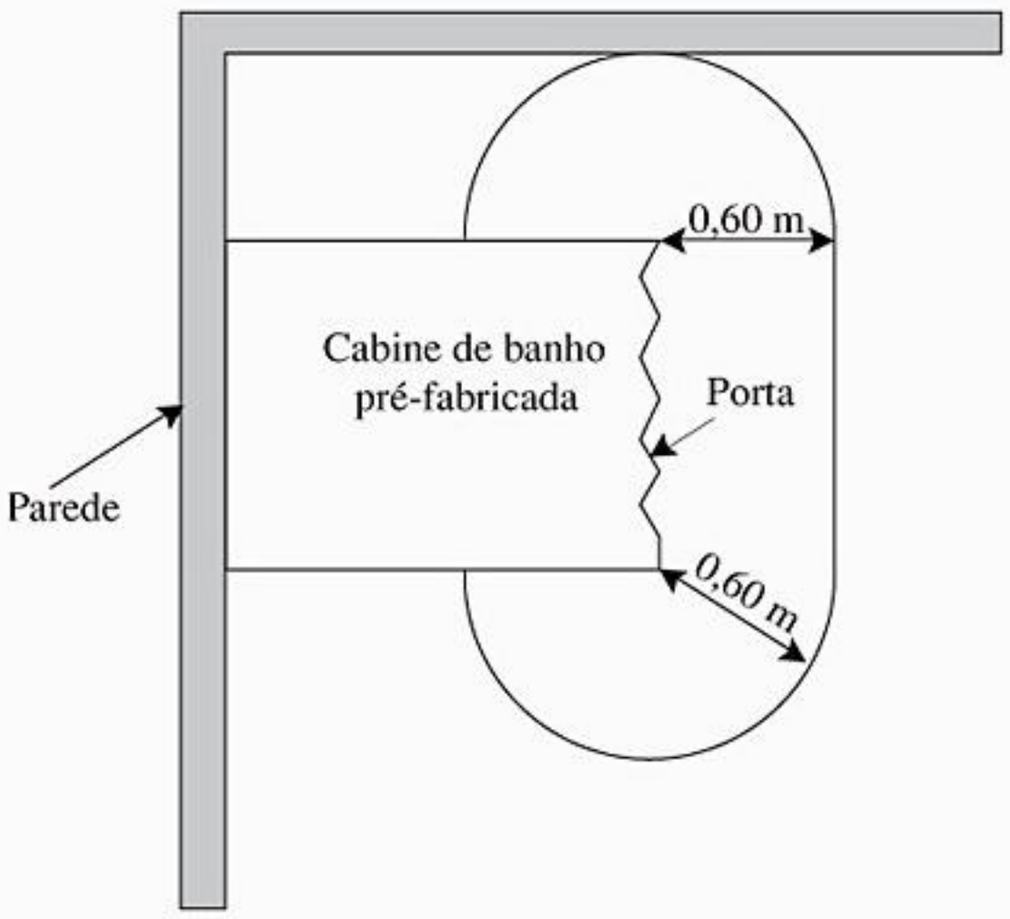


Figura 8.35 ■ Cabine de banho pré-fabricada

Tabela 8.15 ■ Características dos componentes instalados em locais com banheira ou chuveiro

	Volume 0	Volume 1	Volume 2	Volume 3
Grau de proteção mínimo dos componentes	IPX7	IPX4	IPX3 IPX5 (banheiros públicos)	IPX1 IPX5 (banheiros públicos)
Linhas elétricas aparentes ou embutidas (até a profundidade de 5 cm)	Linhas limitadas somente à necessidade de alimentação dos equipamentos usados nesses volumes. Uso de condutores isolados em condutos fechados isolantes, cabos uni ou multipolares dispostos ou não em condutos de qualquer tipo			Linhas aparentes ou embutidas (até a profundidade de 5 cm) iguais às permitidas nos volumes 0, 1 e 2; ou linhas constituídas por condutores isolados ou por cabos unipolares contidos em condutos fechados metálicos embutidos, desde que sejam incluídos na ligação eqüipotencial suplementar, e que os circuitos sejam protegidos por DR de alta sensibilidade
Ligação eqüipotencial suplementar	Ligação eqüipotencial suplementar deve reunir todos os elementos condutivos dos volumes 0, 1, 2 e 3 e os condutores de proteção de todas as massas desses volumes			
Dispositivos de comando, de proteção e seccionamento, tomadas de corrente	Nenhum dispositivo de proteção, comando ou seccionamento ou tomada. Nos volumes 1 e 2 são admitidos cordões isolantes de interruptores acionados a cordão, desde que atendam aos requisitos da IEC 60669-1, bem como elementos de comando (circuitos auxiliares) alimentados em SELV ou funcionando por radiofreqüência, infravermelho ou outro meio que ofereça grau de segurança equivalente			Apenas tomadas de corrente, desde que: ■ Alimentadas individualmente por transformador de separação ou ■ Alimentadas em SELV ou ■ Protegidas por DR de alta sensibilidade
Outros Componentes fixos	Apenas equipamentos previstos para uso em banheira.	Apenas aquecedores de água elétricos classe II ou protegidos por DR de alta sensibilidade.	Apenas aquecedores de água elétricos e aparelhos de iluminação classe II, classe I ou protegidos por DR de alta sensibilidade.	Nenhuma restrição

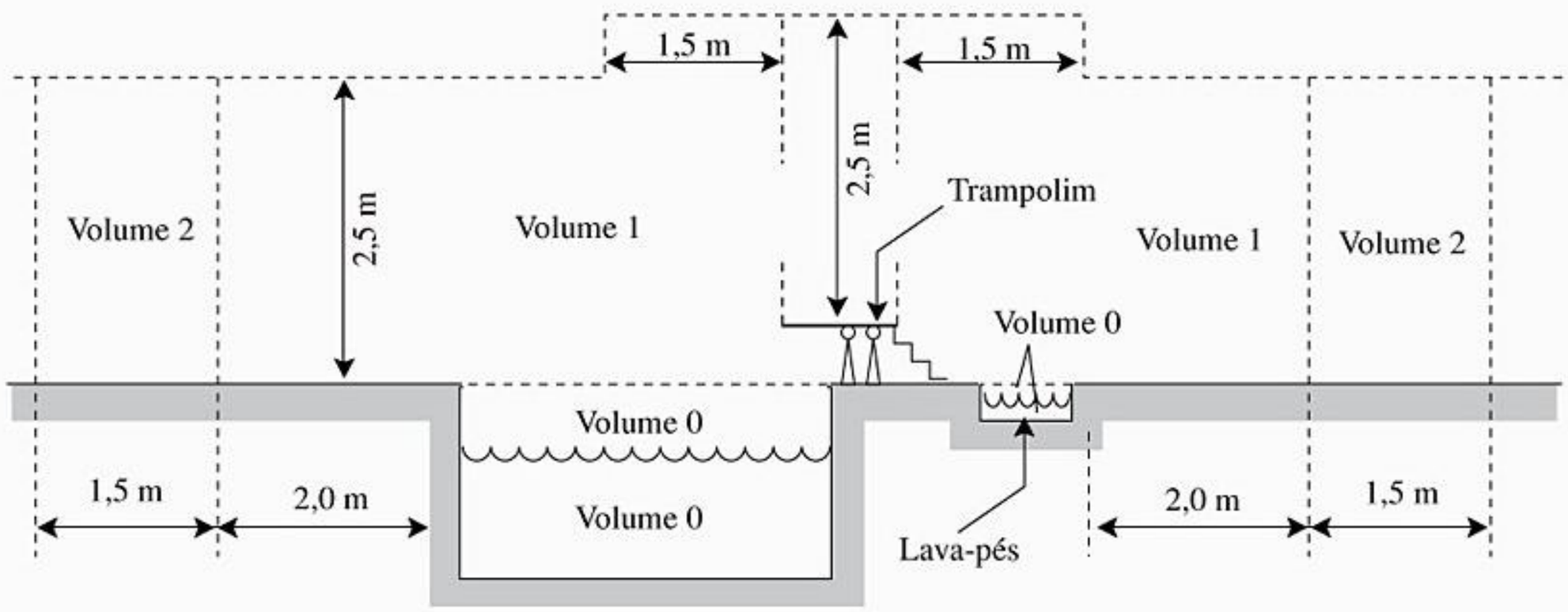


Figura 8.36 ■ Dimensões dos volumes para piscinas e lava-pés. As dimensões podem ser medidas levando-se em conta paredes e divisões fixas

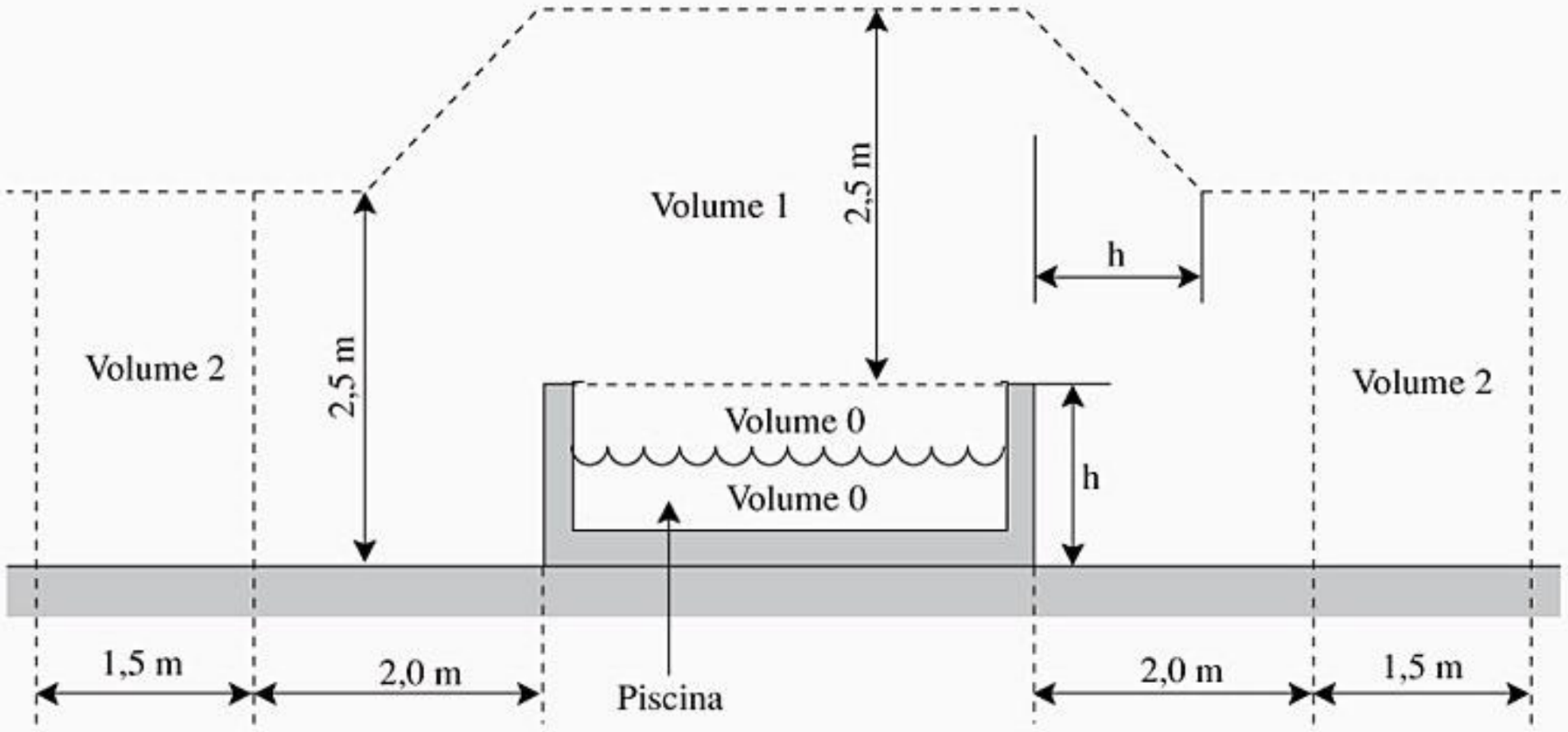


Figura 8.37 ▪ Dimensões dos volumes para piscina acima do solo. As dimensões podem ser medidas levando-se em conta paredes e dimensões fixas

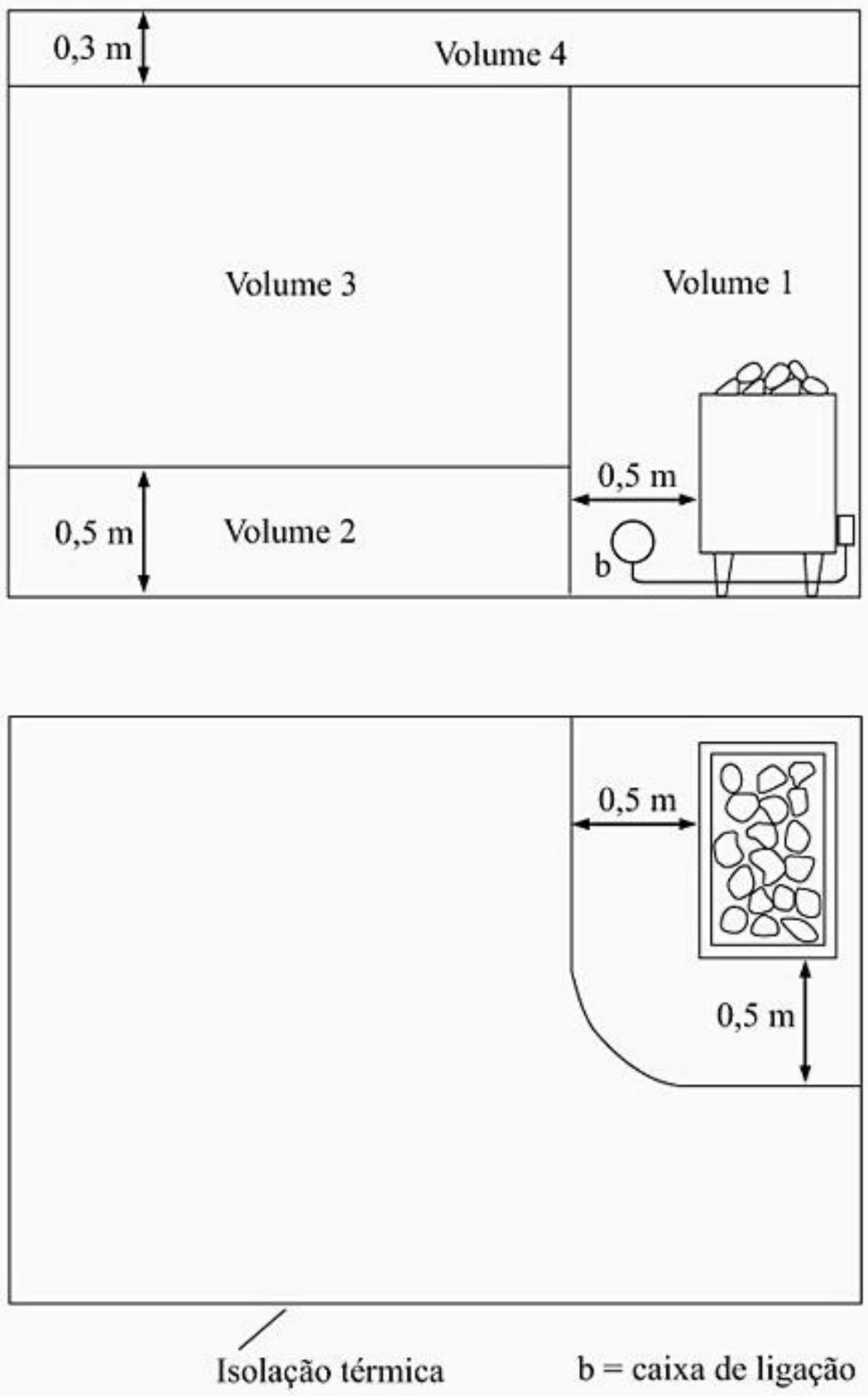


Figura 8.38 ▪ Dimensões dos volumes de uma sauna

Tabela 8.16 ■ Características dos componentes instalados em piscinas

	Volume 0	Volume 1	Volume 2
Grau de proteção mínimo dos componentes	IPX8	IPX5 IPX4 (para pequenas piscinas cobertas que não sejam normalmente submetidas a lavagens com jatos d'água sob pressão)	IPX2 (para as piscinas cobertas) IPX4 (para as piscinas ao tempo) IPX5 (quando o volume estiver sujeito a lavagens com jatos d'água sob pressão)
Linhas elétricas aparentes ou embutidas (até a profundidade de 5 cm)	Linhas limitadas somente à necessidade de alimentação dos equipamentos usados nesses volumes. As linhas não devem comportar acessível. Os revestimentos metálicos não acessíveis devem ser incluídos na eqüipotencialização suplementar.		As linhas não devem comportar nenhum revestimento metálico acessível. Os revestimentos metálicos não acessíveis devem ser incluídos na eqüipotencialização suplementar.
Ligação eqüipotencial suplementar	Ligação eqüipotencial local (BEL) deve reunir todos os elementos condutivos dos volumes 0, 1 e 2 e os condutores de proteção de todas as massas desses volumes. Nessa eqüipotencialização, a função de BEL pode ser desempenhada pela barra PE do quadro de distribuição terminal mais próximo, por algum acessório especialmente previsto ou mesmo pelo terminal PE de algum equipamento, se tal terminal comporta as interligações envolvidas. As massas dos sistemas SELV não devem ser intencionalmente conectadas à terra, a condutores de proteção ou massas de outros circutos e/ou a elementos condutivos.		
Dispositivo de comando, de proteção e seccionamento, tomadas de corrente	Nenhum dispositivo de proteção, comando ou seccionamento ou tomada. Como exceção, em pequenas piscinas onde a instalação de tomadas de corrente fora do volume 1 não for possível, admite-se sua instalação no volume 1, desde que as tomadas não possuam corpo e/ou cobertura metálica, sejam posicionadas fora do alcance da mão (distância igual ou superior a 1,25 m), do limite do volume 0, e no mínimo a 0,3 m acima do piso. Além disso, as tomadas devem ser: ■ Alimentadas em SELV sob tensão nominal não superior a 25 V em corrente alternada ou 60 V em corrente contínua e sendo a fonte de segurança instalada fora dos volumes 0 e 1; ou ■ Protegidas por dispositivo DR com corrente diferencial-residual nominal não superior a 30 mA; ou ■ Protegidas por separação elétrica individual, sendo as fontes de separação, tantas quantas forem as tomadas, instaladas fora dos volumes 0 e 1.		Apenas tomadas de corrente e interruptores, desde que: ■ Alimentados individualmente por transformador de separação; ou ■ Alimentados em SELV; ou ■ Protegido por DR de alta sensibilidade.
Outros componentes fixos	Apenas equipamentos (luminárias subaquáticas conforme IEC 60598-2-18, bombas etc.) alimentados em SELV com tensão nominal limitada a 12 V CA e 30 V CC.	Equipamentos fixos expressamente destinados a uso em piscinas (por exemplo, grupos de filtração, hidromassagem), alimentados em tensão que não SELV limitada a 12 V CA. ou 30 V CC, se as condições a seguir forem simultaneamente atendidas: ■ Os equipamentos devem ser providos, por disposição construtiva ou em sua instalação, de invólucro cuja isolação seja equivalente a uma isolação suplementar e garanta proteção mecânica AG2. ■ O acesso ao equipamento só deve ser possível por meio de tampa ou porta cuja abertura requeira chave ou ferramenta, e que, ao ser aberta, provoque o seccionamento de todos os condutores vivos, O dispositivo responsável pelo seccionamento e a linha de alimentação devem ser de classe II ou providos de proteção equivalente, seja por disposição construtiva, seja na sua instalação.	Equipamentos alimentados por transformador de separação, ou da classe II, ou da classe I protegidos por DR de alta sensibilidade.

(*Continua*)

(*Continuação*)

	Volume 0	Volume 1	Volume 2
Grau de proteção mínimo dos componentes	IPX8	IPX5 IPX4 (para pequenas piscinas cobertas que não sejam normalmente submetidas a lavagens com jatos d'água sob pressão)	IPX2 (para as piscinas cobertas) IPX4 (para as piscinas ao tempo) IPX5 (quando o volume estiver sujeito a lavagens com jatos d'água sob pressão)
		■ Uma vez aberta a tampa ou a porta, o grau de proteção apresentado pelo equipamento deve ser IPXXB, no mínimo. ■ A alimentação do equipamento deve ser: ■ Em SELV sob tensão não superior a 25 V CA ou 60 V CC, sendo a fonte de segurança instalada fora dos volumes 0, 1 e 2; ou ■ Protegido por dispositivo DR com corrente diferencial-residual nominal não superior a 30 mA; ou ■ Protegida por separação elétrica individual, sendo a fonte de separação instalada fora dos volumes 0, 1 e 2. Em pequenas piscinas onde a instalação de luminárias fora do volume 1 não for possível, admite-se sua instalação no volume 1, desde que elas fiquem posicionadas fora de alcance (1,25 m) do volume 0 e possuam invólucro que assegure isolação classe II (ou equivalente) e proteção mecânica AG2. Além disso, as lumínarias devem ser: ■ Alimentadas em SELV; ou ■ Protegidas por dispositivo DR com corrente diferencial-residual nominal não superior a 30 mA; ou ■ Protegidas por separação elétrica individual, sendo as fontes de separação, tantas quantas forem as luminárias, instaladas fora dos volumes 0 e 1.	

Nesses locais, quando for utilizada SELV, a proteção contra contatos diretos, qualquer que seja a tensão nominal, deve ser garantida por barreiras ou invólucros com grau de proteção IP2X, no mínimo, ou por isolação capaz de suportar um ensaio de tensão aplicada de 500 V, por um minuto. Observe que não são permitidos, como proteção contra contatos diretos, o uso de obstáculos e a colocação fora de alcance.

No que diz respeito à proteção contra contatos indiretos, as medidas indicadas pela NBR 5410 são indicadas na Tabela 8.16.

Locais contendo aquecedores de sauna

Os locais contendo aquecedores de sauna também merecem um tratamento especial por parte da NBR 5410.

Nessas áras são considerados quatro volumes, conforme indicado na Figura 8.38.

Em locais destinados a sauna, quando for usada SELV ou PELV, as partes vivas do sistema SELV ou PELV, qualquer que seja sua tensão nominal, devem ser providas de isolação capaz de suportar ensaio de tensão aplicada de 500 V durante 1 min ou ser protegidas por barreiras ou invólucros com grau de proteção pelo menos IP2X.

A Tabela 8.18 apresenta as características dos componentes da instalação em cada um dos volumes definidos.

Tabela 8.17 ■ Medidas de proteção contra contatos indiretos em compartimentos condutivos

Equipamento	Medidas de proteção	Observações
Ferramentas portáteis e aparelhos de medição portáteis	■ SELV; ou ■ Separação elétrica (um equipamento por enrolamento secundário do transformador de separação).	Preferência ao uso de equipamentos classe II; admitido o uso de equipamentos classe I, com, pelo menos, punhos em material isolante ou com revestimento isolante.
Lâmpadas portáteis	■ SELV; ou ■ Aparelho fluorescente com transformador de dois enrolamentos incorporado e alimentação em SELV.	
Equipamentos fixos	■ Seccionamento automático da alimentação e realizando-se ligação eqüipotencial suplementar envolvendo as massas dos equipamentos fixos e as partes condutoras do compartimento; ou ■ SELV; ou ■ Separação elétrica limitada a um único equipamento por enrolamento secundário do transformador de separação.	

Notas:
1. As fontes de segurança e as de separação, exceto as destinadas à alimentação de ferramentas a aparelhos de medição portáteis e de equipamentos fixos, devem ser instaladas fora do compartimento condutor.
2. Se certos equipamentos fixos, tais como equipamentos de medição e de controle, necessitarem de aterramento funcional, deve ser realizada uma ligação eqüipotencial envolvendo todas as massas, todos os elementos condutores no interior do compartimento e o aterramento funcional.

Tabela 8.18 ■ Características dos componentes instalados em saunas

	Volume 1	Volume 2	Volume 3	Volume 4
Grau de proteção mínimo dos componentes	IP24 Só se admite da instalação do próprio aquecedor e eventuais acessórios.	IP24 Os componentes da instalação localizados no volume 2 não estão sujeitos a nenhum requisito especial quanto à suportabilidade térmica.	IP24 Os componentes devem ser capazes de suportar, em serviço contínuo, uma temperatura de no mínimo 125 °C.	IP24 Só são admitidos dispositivos de controle do aquecedor (termostatos e protetores térmicos) e as linhas respectivas. Os componentes devem ser capazes de suportar, em serviço contínuo, uma temperatura de no mínimo 125 °C.
Linhas elétricas	Linhas constituídas de cabos uni ou multipolares, dispostos ou não em condutos e, nesse caso, independentemente do tipo de conduto; ou linhas dispostas em condutos fechados não metálicos, sob a condição de que sejam utilizados no mínimo condutores isolados. Os condutores e cabos devem possuir isolação capaz de suporta, em serviço contínuo, uma temperatura de no mínimo 170 °C.			
Dispositivos de comando, de proteção e seccionamento, tomadas de corrente	Dispositivos de proteção, comando ou manobra que não integrem o aquecedor da sauna devem ser instalados fora do local da sauna. Não são admitidas tomadas de corrente, em nenhum volume, dentro do local da sauna. Deve ser instalada dispositivo capaz de desligar automaticamente a alimentação do aquecedor quando a temperatura, medida no volume 4, ultrapassar 140 °C.			

EXERCÍCIOS

1. Quais são as duas condições em que se baseia a proteção por seccionamento automático da alimentação?

2. Qual é o tempo máximo, independentemente do esquema de aterramento, que se admite para o seccionamento em cada esquema de aterramento?

3. Quais dispositivos apropriados foram desenvolvidos décadas atrás com a finalidade específica de proteção contra contatos indiretos, independentemente do esquema de aterramento utilizado?

4. Quais são os três tipos de esquemas TN?

5. Qual é a limitação dos sistema TN-C que não permite o uso do DR?

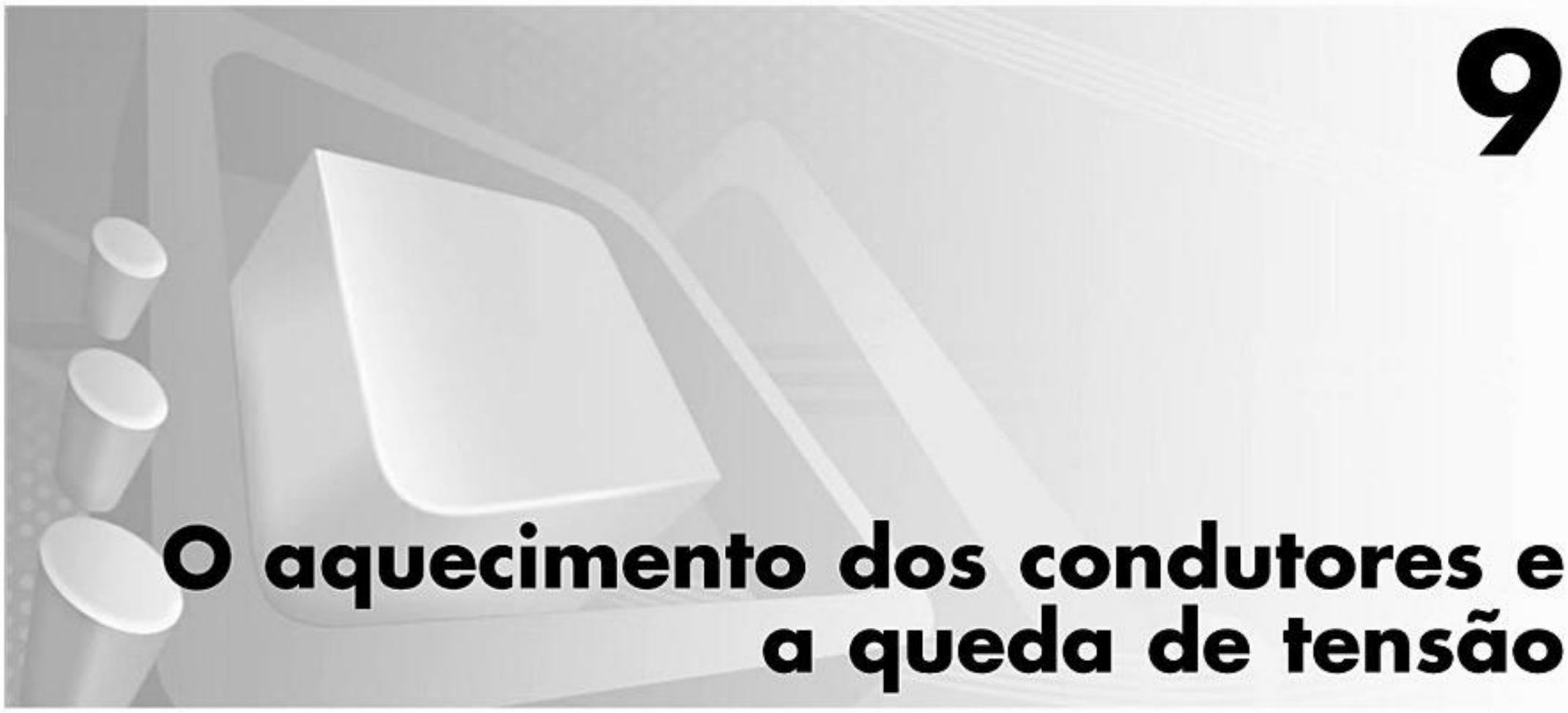
6. O uso de DRs de alta sensibilidade é obrigatório pela norma em quais tipos de circuitos terminais?

7. Quais são os quatro aspectos fundamentais para a escolha do esquema de aterramento?

8. Quais análises dos aterramentos de subestações de transformação devem ser feitas?

9. Explique as razões que justificam a adoção, no Brasil, das instalações elétricas alimentadas por redes de distribuição pública em baixa tensão, do esquema TN-C-S, como a solução mais conveniente do ponto de vista de segurança.

10. Quais são as principais causas relatadas de disparo de DRs?



9

O aquecimento dos condutores e a queda de tensão

9.1 Introdução

O dimensionamento correto dos condutores e de sua proteção contra correntes de sobrecarga e de curto-circuito é, para as instalações de baixa tensão, essencialmente um *problema térmico*. Trata-se de limitar a corrente, tanto a de regime permanente como a transitória, de modo que os condutores constituintes dos condutores isolados e dos cabos uni e multipolares não atinjam, por efeito Joule, temperaturas que possam afetar a integridade física, química e mecânica, bem como a durabilidade da isolação.

É importante observar que os danos que uma isolação pode sofrer dependem não só da temperatura, mas também e principalmente da duração da solicitação térmica.

9.2 Equilíbrio térmico e corrente em regime permanente nos condutores e cabos isolados

A corrente elétrica transportada por um condutor metálico, constituinte de um condutor isolado ou de um cabo isolado, produz, devido a sua resistência elétrica, uma quantidade de calor (por efeito Joule) cuja dissipação depende da natureza dos materiais que compõem o condutor ou o cabo isolado e do meio em que ele se situa.

Se a corrente no condutor for constante, o *equilíbrio térmico* será atingido quando o calor produzido for igual ao calor dissipado, isto é, quando a potência térmica produzida no condutor se dissipar totalmente no ambiente. Nessas condições, nenhum acúmulo de calor será possível e o condutor ou cabo isolado manterá certa temperatura, que permanecerá constante desde que não haja nenhum aporte posterior de potência térmica, interno ou externo. É o que mostra a Figura 9.1.

Assim, circulando uma corrente I constante pelo condutor, inicialmente à temperatura ambiente θ_A, após um período transitório, é atingido o equilíbrio térmico com o condutor na *temperatura de regime* θ_R. Nessas condições, à corrente I corresponderá uma *sobretemperatura de regime* $\Delta\theta_R = \theta_R - \theta_A$. Pode-se escrever para o equilíbrio térmico

$$\rho \frac{l}{S} I^2 = K \Delta\theta_R \tag{9.1}$$

onde ρ é a resistividade do condutor; l, seu comprimento; S, sua seção; e K, a *condutância térmica global* do condutor ou cabo isolado, definida por

$$K = \frac{k_1 A}{z} \, (W/^\circ C) \tag{9.2}$$

expressão válida para uma parede plana de área A e espessura z, sendo k_1 o *coeficiente de transmissão global de calor* que é função do material isolante.

Temperatura de funcionamento

A temperatura de funcionamento (θ_R) é considerada na superfície de separação entre o condutor e a isolação, como mostra a Figura 9.2, sendo definida em condições de equilíbrio térmico.

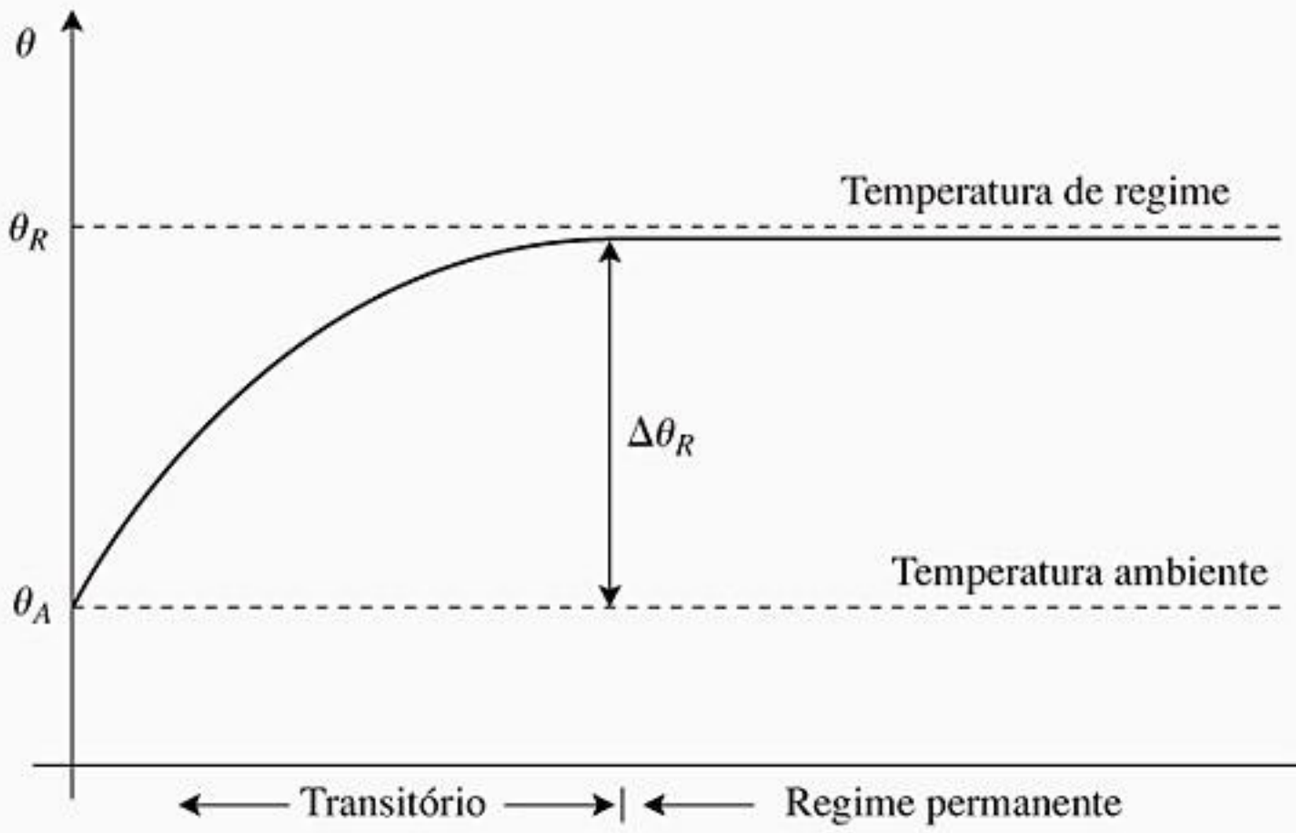


Figura 9.1 ■ Equilíbrio térmico em um condutor ou cabo isolado

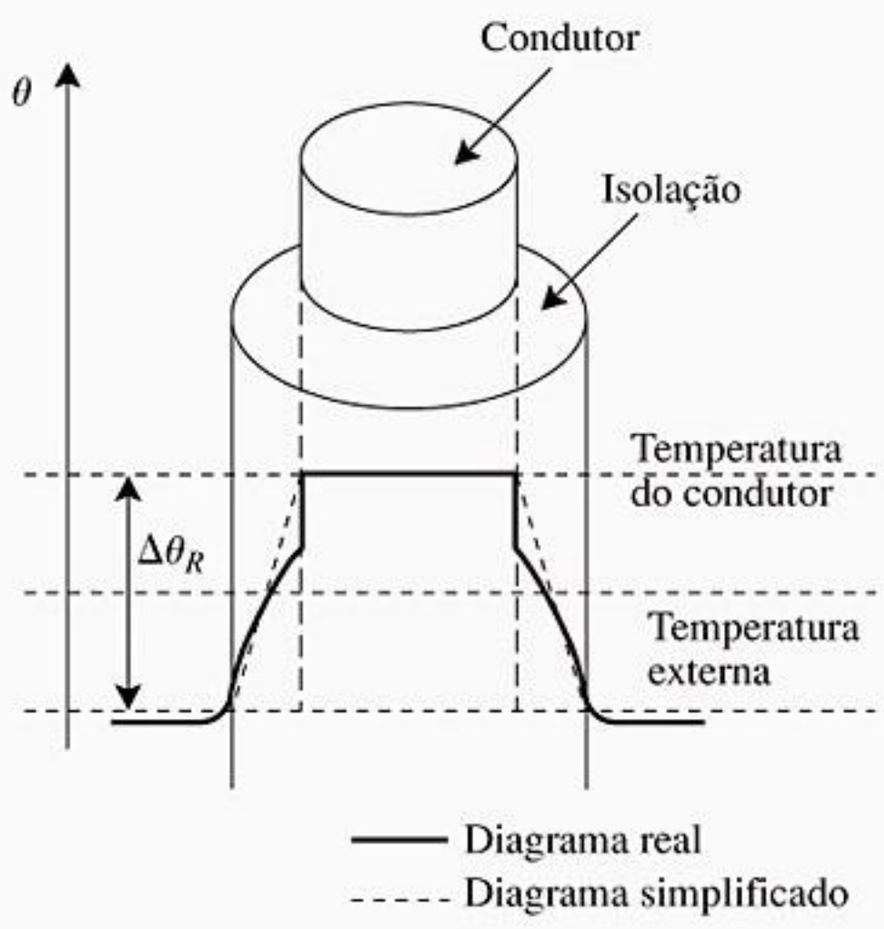


Figura 9.2 ■ Variação de temperatura em um condutor isolado

Modelo simplificado

A Figura 9.3 mostra um modelo simplificado de condutor isolado. O condutor propriamente dito é um cilindro homogêneo de raio r; a isolação tem uma espessura z.

Valem as relações

$$z = 0{,}7\sqrt{r} = 0{,}52 = \sqrt[4]{S} = 0{,}52\ S^{0{,}25} \qquad (9.3)$$

A Tabela 9.1 apresenta uma comparação entre os valores da espessura z fornecidos pela Prysmian para seus condutores isolados e os obtidos pela Expressão 9.3.

A superfície de condutor da Figura 9.3 é dada por

$$A = 2\pi r l \qquad (9.4)$$

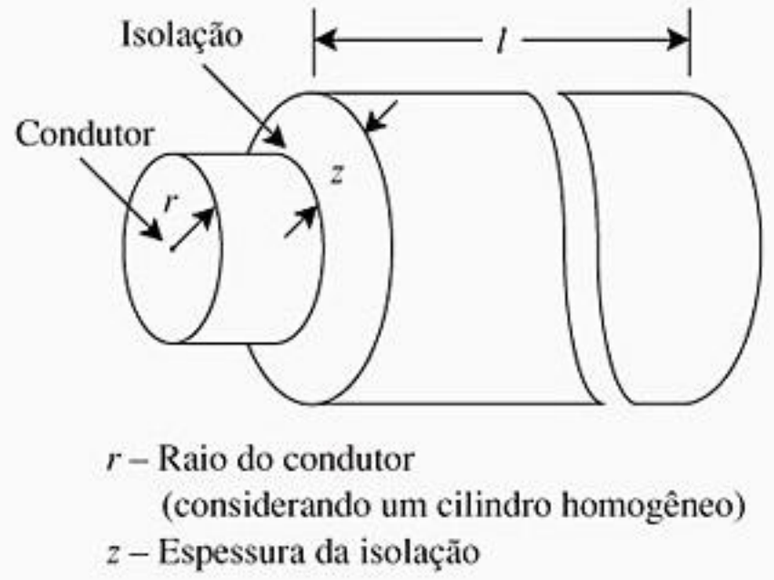


Figura 9.3 ■ Modelo simplificado de condutor isolado

Substituindo as expressões 9.3 e 9.4 na Expressão 9.2, obtém-se

$$K = k_1 \frac{2\pi r\, l}{0{,}7\sqrt{r}} = k_1 \frac{2\pi r^{0{,}5} l}{0{,}7}$$

e fazendo

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \frac{S^{0{,}5}}{\pi^{0{,}5}}$$

virá

$$K = k_1 \frac{2\pi}{0{,}7\pi^{0{,}25}} S^{0{,}25} l$$

resultando

$$K = 6{,}74\ k_1 l \sqrt[4]{S} \qquad (9.5)$$

expressão simplificada da condutância térmica.

Verifica-se que, para seções pequenas (até 10 mm²), a Expressão 9.5 apresenta erros por excesso de cerca de 30%. Assim, para tais seções, adota-se

$$K = 5k_1 l \sqrt[4]{S} \qquad (9.6)$$

Tabela 9.1 ■ Comparação entre valores reais da espessura z da isolação e valores calculados pela expressão $z = 0{,}7\sqrt{r}$ para condutores isolados Superastic*

Seção nominal (mm²)	Fios				Cabos			
	Diâmetro nominal d (mm)	Raio $r = d/2$ (mm)	Espessura nominal da isolação z (mm)	$0{,}7\sqrt{r}$	Diâmetro nominal d (mm)	Raio $r = d/2$ (mm)	Espessura nominal da isolação z (mm)	$0{,}7\sqrt{r}$
1,5	1,36	0,68	0,70	0,58	1,55	0,78	0,70	0,62
2,5	1,74	0,87	0,80	0,65	2,00	1,00	0,80	0,70
4	2,20	1,10	0,80	0,73	2,50	1,25	0,80	0,78
6	2,70	1,35	0,80	0,81	3,10	1,55	0,80	0,87
10	3,50	1,75	1,00	0,92	3,75	1,88	1,00	0,96
16	4,41	2,21	1,00	1,04	4,75	2,38	1,00	1,08
25					5,95	2,98	1,20	1,21
35					7,00	3,50	1,20	1,31
50					8,05	4,03	1,40	1,41
70					9,70	4,85	1,40	1,54
95					11,45	5,73	1,60	1,68
120					12,80	6,40	1,60	1,77
150					14,25	7,13	1,80	1,87
185					15,85	7,93	2,00	1,97
240					18,35	9,18	2,20	2,12

* Condutores isolados de cobre com isolação e PVC, tipo BWF, tensão de isolamento 450/750 V, de acordo com as normas NBR NM 247-3, NBR 6245 e NBR NM IEC60332-3.

Substituindo a Expressão 9.5 ou a Expressão 9.6 na Expressão 9.1 e explicitando o valor de I, corrente em regime permanente, obtém-se

$$I = (2{,}2 \text{ ou } 2{,}6)\sqrt{\frac{k_1}{\rho}}\sqrt{\Delta\theta_R} = S^{0{,}625} \quad (9.7)^1$$

Para dado condutor isolado, para uma mesma sobretemperatura de regime, a corrente em regime permanente pode ser escrita por

$$I = \alpha\, S^{0{,}625} \quad (9.8)$$

sendo α uma constante.

Temperatura máxima para serviço contínuo

A temperatura de regime de um condutor ou de um cabo isolado não deve ultrapassar a chamada *temperatura máxima para serviço contínuo*, θ_Z, função do material que constitui a isolação do condutor ou cabo. A Tabela 9.2 indica os valores de θ_Z para as isolações usuais de condutores e cabos de baixa tensão.

Capacidade de condução de corrente

Para dado condutor isolado ou cabo isolado, em determinada condição de instalação e para dada temperatura ambiente θ_A, a *capacidade de condução de corrente* (I_Z) é a corrente que, circulando continuamente pelo condutor, produz a *máxima sobretemperatura de regime*, $\Delta\theta_Z = \theta_Z - \theta_A$. Assim, pode-se escrever da Expressão 9.7:

$$I_z = (2{,}2 \text{ ou } 2{,}6)\sqrt{\frac{k_1}{\rho}}\sqrt{\Delta\theta_z}\, S^{0{,}625} \quad (9.9)$$

expressão que evidencia que I_Z depende:

Tabela 9.2 ■ Temperaturas máximas para serviço contínuo

Material de isolação	Temperatura máxima para serviço contínuo θ_z (°C)
Cloreto polivinila (PVC)	70
Borracha etileno-propileno (EPR)	90
Polietileno reticulado (XLPE)	90

1. O valor 2,2 é usado para seções de até 10 mm², e o valor 2,6 para as demais.

- Do material condutor, representado pela resistividade ρ.
- Da seção nominal S.
- Da máxima sobretemperatura de regime $\Delta\theta_Z$, isto é, da temperatura máxima para serviço contínuo θ_Z e da temperatura ambiente ou do solo (para linhas subterrâneas) θ_A.
- Do coeficiente de transmissão global de calor k_1, que depende do material da isolação e das condições de instalação (maneira de instalar, agrupamento de condutores e, no caso de linhas subterrâneas, da resistividade térmica do solo).

Em diversas publicações, a capacidade de condução de corrente dos condutores isolados e dos cabos isolados, para dada temperatura ambiente e em certa condição de instalação, é expressa por

$$I_z = a\,S^{0,625} \tag{9.10}$$

E a se refere à capacidade de condução de corrente de um condutor ou cabo isolado de mesmo tipo e com seção unitária (1 mm²), na mesma temperatura ambiente e nas mesmas condições de instalação e de ambiente, e S à seção nominal do condutor ou cabo. A Tabela 9.3 apresenta os valores de a para diversos tipos de linhas (ver Tabela 5.28) considerando dois e três condutores carregados e uma temperatura ambiente de 30 °C.

Temperatura (final) de regime

Em relação à Expressão 9.7, para determinado tipo de condutor isolado, em dada condição de instalação (portanto k_1, ρ e S constantes), pode-se escrever que a corrente I é igual a uma constante multiplicada pela raiz quadrada da sobretemperatura $\Delta\theta_R$. Para duas condições de sobretemperatura no mesmo condutor, pode-se chegar à expressão

$$\frac{I_1}{I_2} = \sqrt{\frac{\Delta\theta_{R1}}{\Delta\theta_{R2}}}$$

$$\frac{\Delta\theta_{R1}}{\Delta\theta_{R2}} = \frac{I_1^2}{I_2^2} \tag{9.11}$$

Genericamente, para a temperatura máxima em regime permanente do condutor, tem-se

$$\frac{\Delta\theta_R}{\Delta\theta_z} = \frac{I^2}{I_z^2} \text{ ou } \frac{\theta_R - \theta_A}{\theta_z - \theta_A} = \frac{I^2}{I_z^2}$$

e daí

$$\theta_R - \theta_A = \frac{(\theta_z - \theta_A)\,I^2}{I_z^2} \tag{9.12}$$

ou ainda

$$\theta_R = \theta_A + (\theta_z - \theta_A)\left(\frac{I}{I_z}\right)^2 \tag{9.13}$$

expressão que permite obter a temperatura final (de regime) θ_R produzida por uma corrente I, conhecendo-se a capacidade de condução de corrente I_Z, a temperatura máxima para serviço contínuo θ_Z e a temperatura ambiente θ_A. Da Expressão 9.13, obtém-se os gráficos da Figura 9.4, para os condutores isolados com PVC e com EPR ou XLPE, que permitem determinar a temperatura θ_R conhecendo-se I/I_Z.

Considere, agora, um condutor isolado com dado θ_Z e que, a uma temperatura ambiente de 30 °C, possui uma capacidade de condução de corrente I_Z. Determine sua nova capacidade de condução de corrente $I_{Z'}$, sabendo-se que são mantidas as demais condições e que a temperatura ambiente θ_A é diferente de 30 °C. Assim, da Expressão 9.11, pode-se escrever

$$\frac{\Delta\theta_z}{\Delta\theta_{z1}} = \frac{I_z^2}{I_{z1}^2} \tag{9.14}$$

fazendo

$$\Delta\theta_z = \theta_z - 30$$

e

$$\Delta\theta_{z1} = \theta_z - \theta_A$$

virá, da Expressão 9.14

Tabela 9.3 ■ Valores do coeficiente *a* para alguns tipos de linhas (temperatura ambiente 30 °C)

Tipo de linha	Valor de *a*							
	Condutor de cobre				Condutor de alumínio			
	Isolação de PVC		Isolação de EPR/XLPE		Isolação de PVC		Isolação de EPR/XLPE	
	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados
A	11	10,5	15	13,5	8,5	8	11,5	8
B	13,5	12	18	16	10,5	9,5	14	9,5
C	15	13,5	19	17	11,5	10,5	15	10,5
D	17,5	14,5	21	17,5	13,5	11,5	16	11,5
E	17	14,5	21	18	13	11	16	13,5
F	17	14,5	21	18	13	11	16	13,5

Quadro 9.1 ■ Vida útil de condutores elétricos

A partir desses dados, pode-se concluir que não convém levar a temperatura de regime de um cabo a limites extremos, porque o pouco que se ganha em corrente não compensa o risco que se corre de reduzir excessivamente a vida útil do cabo. Com efeito, a vida útil de um cabo é de cerca de 20 anos, considerando sua utilização em temperaturas não superiores à temperatura máxima para serviço contínuo. Admite-se que, para cada 5 °C além de θ_Z, cai pela metade a vida útil do cabo. Assim, por exemplo, estima-se que um condutor de cobre isolado com PVC ($\theta_Z = 70$ °C) dure dez anos com 75 °C, dois anos e meio com 85 °C e pouco mais de sete meses com 95 °C, desde que opere em regime contínuo com a corrente de sobrecarga mantida.

$$I_{z1} = I_z \sqrt{\frac{\theta_z - \theta_A}{\theta_z - 30}} \qquad (9.15)$$

o que evidencia o fato de que, com uma temperatura ambiente superior a uma temperatura prefixada — no caso, 30 °C —, ocorre uma redução da capacidade de condução de corrente.

EXEMPLO

Seja um circuito trifásico constituído por três condutores de cobre, isolado com PVC, de 4 mm², instalado em eletroduto, embutido em alvenaria em um local onde a temperatura ambiente é de 30 °C.

(a) A capacidade de condução de corrente pode ser obtida da Expressão 9.10

- Da Tabela 9.3, tipo de linha B, 3 condutores carregados: $a = 12$ A

$$I_z = 12 \times 4^{0,625} = 28 \text{ A}$$

(b) A temperatura de regime atingida com uma corrente $I = 56\,A$ pode ser obtida da Expressão 9.13, lembrando que $\theta_Z = 70$ °C e $\theta_A = 30$ °C

$$\theta_R = 30 + (70 - 30)\left(\frac{56}{28}\right)^2 = 190\,°\text{C}$$

(c) Com $I = 14$ A, virá da Expressão 9.13

$$\theta_R = 30 + (70 - 30)\left(\frac{14}{28}\right)^2 = 40\,°\text{C}$$

(d) Os resultados de (b) e (c) podem também ser obtidos utilizando o gráfico da Figura 9.4, entrando com $n = 2$ e $n = 0,5$, respectivamente.

(e) A capacidade de condução de corrente para uma temperatura ambiente de 45 °C pode ser obtida utilizando-se a Expressão 9.15;

$$I_{z1} = 28\sqrt{\frac{70 - 45}{70 - 30}} = 22,13\,A$$

Igualando-se as expressões 9.9 e 9.10, obtém-se

$$(2,2 \text{ ou } 2,6)\sqrt{\frac{k_1}{\rho}}\sqrt{\Delta\theta_z}\,S^{0,625} = aS^{0,625}$$

e daí

$$(2,2^2 \text{ ou } 2,6^2)\frac{k_1}{\rho}\Delta\theta_z = a^2$$

Considerando condutores de cobre, onde $\rho = 20 \times 10^{-3}\,\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ (faixa de 70 a 90 °C), então

$$(2,2^2 \text{ ou } 2,6^2)k_1 = \frac{20 \times 10^{-3}}{\Delta\theta_z}a^2$$

ou

$$(5 \text{ ou } 6,7)k_1 = \frac{20 \times 10^{-3}}{\Delta\theta_z}a^2$$

Para isolação de PVC, com $\theta_A = 30$ °C, $\Delta\theta_Z = 40$ °C, a expressão fica

$$(5 \text{ ou } 6,7)\,k_1 = 0,5 \times 10^{-3}a^2 \qquad (9.16)$$

Para isolação de EPR ou XLPE, com $\theta_A = 30$ °C, $\Delta\theta_Z = 60$ °C, a expressão é

$$(5 \text{ ou } 6,7)\,k_1 = 0,33 \times 10^{-3}a^2 \qquad (9.17)$$

Tirando o valor de k_1 das expressões 9.16 e nas 9.17 e substituindo nas expressões 9.5 e 9.6, obtém-se:

- Para PVC

$$K = 0,5 \times 10^{-3}\,a^2 l\sqrt[4]{S} \qquad (9.18)$$

- Para EPR ou XLPE

$$K = 0,33 \times 10^{-3}\,a^2 l\sqrt[4]{S} \qquad (9.19)$$

Substituindo as expressões 9.18 e 9.19 na Expressão 9.1 e considerando $\rho = 20 \times 10^{-3}\,\Omega \cdot$ mm2/m, obtém-se para a corrente em regime permanente I,

- No caso de condutor de cobre, isolação de PVC

$$I = 0,158\,a\,S^{0,625}\sqrt{\Delta\theta_R} \qquad (9.20)$$

- No caso de condutor de cobre, isolação de EPR ou XLPE

$$I = 0,128\,a\,S^{0,625}\sqrt{\Delta\theta_R} \qquad (9.21)$$

Das expressões 9.20 e 9.21, obtém-se uma expressão para θ_R, que será

$$\theta_R = \frac{I^2}{\beta^2 a^2 S^{1,25}} + \theta_A \qquad (9.22)$$

onde β vale 0,158 para isolação em PVC e 0,128 para isolação em EPR ou XLPE, da qual também se pode obter os gráficos da Figura 9.4.

Para o item (b) do exemplo anterior, obtém-se, utilizando a Expressão 9.22,

$$\theta_R = \frac{56^2}{0{,}158^2 \times 12^2 \times 4^{1{,}25}} + 30 = 190\,^{\circ}\text{C}$$

9.3 Capacidades de condução de corrente

Os valores das capacidades de condução de corrente de condutores isolados e dos cabos isolados, funcionando em regime permanente, em todas as tensões alternadas ou em tensões contínuas até 5 kV, enterrados diretamente no solo, contidos em condutos ou ao ar livre, podem ser determinados a partir da norma NBR 11301: Cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100%) – Procedimento.

As tabelas de capacidades de condução de corrente de condutores e cabos isolados de baixa tensão indicadas na NBR 5410 foram montadas utilizando valores obtidos por ensaios ou por cálculos. Nas tabelas, os valores de I_Z são apresentados em função de:

- Material condutor (cobre ou alumínio).
- Tipo de isolação (PVC, EPR ou XLPE).
- Tipo de linhas elétricas (de acordo com a Tabela 5.28).
- Número de condutores carregados (2 ou 3).
- Temperatura ambiente ou do solo (30 °C ou 20 °C, respectivamente).
- Resistividade térmica do solo, para linhas subterrâneas (2,5 K.m/W).

Na Tabela 5.28, os ensaios ou cálculos foram baseados em métodos de referência, de acordo com o tipo de

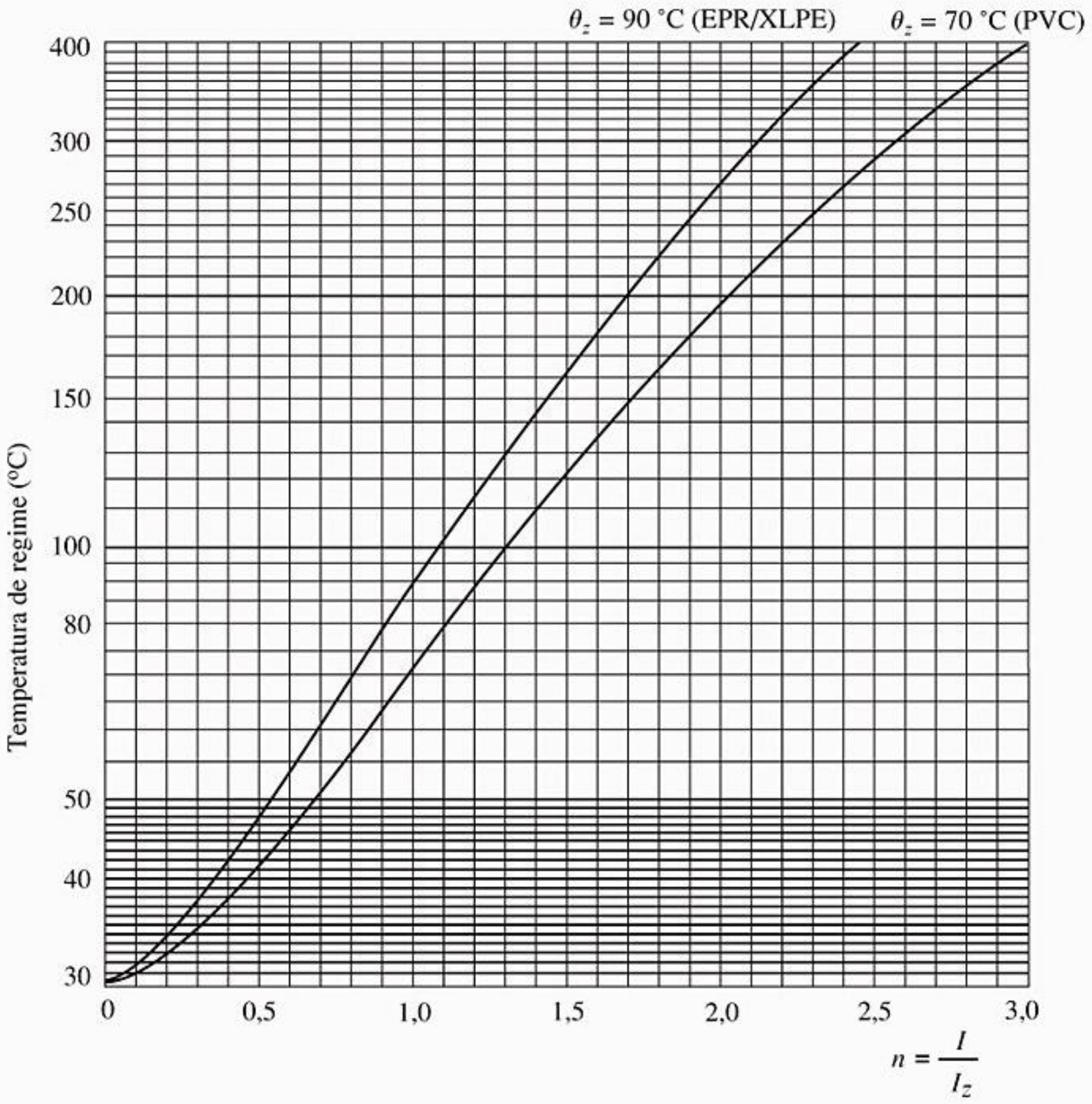


Figura 9.4 ■ Temperatura de regime permanente em função da relação n para condutores de cobre com isolações de PVC e de EPR ou XLPE para temperatura ambiente de 30 °C

linhas elétricas utilizadas. Os métodos de referência são caracterizados por:

- A_1 → condutores isolados em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante.
- A_2 → cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante.
- B_1 → condutores isolados em eletroduto de seção circular sobre parede de madeira.
- B_2 → cabo multipolar em eletroduto de seção circular sobre parede de madeira.
- C → cabos unipolares ou cabo multipolar sobre parede de madeira.
- D → cabo multipolar em eletroduto enterrado no solo a uma profundidade de 70 cm;
- E → cabo multipolar ao ar livre;
- F → cabos unipolares justapostos (na horizontal, na vertical ou em trifólio) ao ar livre.
- G → cabos unipolares espaçados ao ar livre.

Com base nessas referências, que estão relacionadas na Tabela 5.28, foram feitos os ensaios ou cálculos da capacidade de condução de corrente que estão apresentados nas tabelas 9.4, 9.5, 9.6 e 9.7. Essas tabelas correspondem às tabelas da NBR 5410 e são válidas para circuitos simples com dois ou três condutores carregados, isto é:

- dois condutores isolados, dois cabos unipolares ou um cabo bipolar; ou
- três condutores isolados, três cabos unipolares ou um cabo tripolar.

Nos métodos E, F e G, a distância entre o cabo multipolar — ou qualquer cabo unipolar — e qualquer superfície adjacente deve ser de, no mínimo, 30% do diâmetro externo do cabo, para o multipolar, ou no mínimo igual ao diâmetro do cabo, para cabos unipolares. No método G, o espaçamento mínimo entre os cabos deve ser igual ao diâmetro externo do cabo.

Os valores apresentados nas tabelas 9.4, 9.5, 9.6 e 9.7 são valores em ampères da corrente de I_Z, que em regime permanente levará a temperatura interna do condutor a 70 °C para PVC ou a 90 °C para EPR ou XLPE.

Por exemplo, um cabo tripolar de cobre, isolação de PVC, de 10 mm², temperatura ambiente de 30 °C, operando dentro de um eletroduto de seção circular embutido em parede de alvenaria, terá pela Tabela 5.28 o método de referência B2, e pela Tabela 9.4, a corrente máxima em regime permanente será de 46 A. Essa corrente de 46 A levará a temperatura interna do condutor a 70 °C.

Número de condutores carregados

Em princípio, o *número de condutores carregados* a considerar é o de *condutores vivos* do circuito, isto é, fases e neutro, se existir, não sendo levada em consideração a existência de condutor de proteção, a menos que se trate de condutor PEN.

Em particular, no caso de circuito trifásico com neutro, quando a circulação de corrente no neutro não for acompanhada de redução correspondente na carga dos condutores de fase, o neutro deve ser computado como condutor carregado. É o que acontece quando a corrente nos condutores de fase contém componentes harmônicas de ordem três e múltiplos em uma taxa superior a 15%. Nessas condições, o circuito trifásico com neutro deve ser considerado como constituído de 4 condutores carregados e a determinação da capacidade de condução de corrente dos condutores deve ser afetada do fator de correção devido ao carregamento do neutro. Tal fator, que em caráter geral é de 0,86, independentemente do método de instalação, é aplicável então às capacidades de condução de corrente válidas para três condutores carregados.

As tabelas de capacidade de condução de corrente (Tabelas 9.4 a 9.7) trazem colunas para dois e para três condutores carregados, mas nenhuma coluna válida especificamente para quatro condutores carregados. Por isso, a determinação da capacidade de condução de corrente para quatro condutores carregados deve ser feita aplicando-se o fator de 0,86 às capacidades de condução de corrente válidas para três condutores carregados, sem prejuízo dos demais fatores de correção eventualmente aplicáveis, como os referentes a temperatura ambiente, resistividade térmica do solo e agrupamento de circuitos.

Alternativamente, o fator de correção devido ao carregamento do neutro pode ser determinado caso a caso, de acordo com o método de instalação, assumindo-se que quatro condutores carregados correspondem a dois circuitos de dois condutores carregados cada. Nessas condições, o fator de correção devido ao carregamento do neutro corresponde então ao fator de agrupamento válido para dois circuitos e para o método de instalação considerado e é aplicável às capacidades de condução de corrente válidas para dois condutores carregados.

Em resumo, temos a seguinte situação para o número de condutores carregados a considerar:

- dois condutores carregados: circuito monofásico a dois condutores e dois fases sem neutro.
- três condutores carregados: circuito monofásico a três condutores, duas fases com neutro, trifásico sem neutro e trifásico com neutro.

Temperatura ambiente

O valor da *temperatura ambiente* a utilizar é o da temperatura do meio circundante, quando os condutores ou cabos considerados não estiverem operando. As tabelas 9.4 a 9.7 consideram como temperaturas de referência: 20 °C, para cabos enterrados diretamente no solo ou

Tabela 9.4 ■ Capacidades de condução de corrente em ampères, para os métodos de referência *A1, A2, B1, B2, C* e *D*

- Condutores isolados, cabos unipolares e multipolares — cobre e alumínio, isolação de PVC
- Temperatura de 70 °C no condutor
- Temperatura: 30 °C (ambiente); 20 °C (solo)

Seções nominais (mm²)	Métodos de instalação e de referência defenidos na Tabela 5.58											
	A1		*A2*		*B1*		*B2*		*C*		*D*	
	2 CC	3 CC	2 CC	3 CC	2 CC	3 CC	2 CC	3 CC	2 CC	3 CC	2 CC	3 CC
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1,0	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4,00	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6,00	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86
35	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119	125	103
50	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144	148	122
70	151	136	139	125	192	171	168	149	213	184	183	151
95	182	164	167	150	232	207	201	179	258	223	216	179
120	210	188	192	172	269	239	232	206	299	259	246	203
150	240	216	219	196	309	275	265	236	344	299	278	230
185	273	245	248	223	353	314	300	268	392	341	312	258
240	321	286	291	261	415	370	361	313	461	403	361	297
300	367	328	334	298	477	426	401	358	530	464	408	336
400	438	390	398	355	571	510	477	425	634	557	478	394
500	502	447	456	406	656	587	545	486	729	642	540	445
630	578	514	526	467	758	678	626	559	843	743	614	506
800	669	593	609	540	881	788	723	645	978	865	700	577
1.000	767	679	698	618	1.012	906	827	738	1.125	996	792	652
Alumínio												
16	48	43	44	41	60	53	54	48	66	59	62	52
25	63	57	58	53	79	70	71	62	83	73	80	66
35	77	70	71	65	97	86	86	77	103	90	96	80
50	93	84	86	78	118	104	104	92	125	110	113	94
70	118	107	108	98	150	133	131	116	160	140	140	117
95	142	129	130	118	181	161	157	139	195	170	166	138
120	164	149	150	135	210	186	181	160	226	197	189	157
150	189	170	172	155	241	214	206	183	261	227	213	178
185	215	194	195	176	275	245	234	208	298	259	240	200
240	252	227	229	207	324	288	274	243	352	305	277	230
300	289	261	263	237	372	331	313	278	406	351	313	260
400	345	311	314	283	446	397	372	331	488	422	366	305
500	396	356	360	324	512	456	425	378	563	486	414	345
630	456	410	416	373	592	527	488	435	653	562	471	391
800	529	475	482	432	687	612	563	502	761	654	537	446
1.000	607	544	552	495	790	704	643	574	878	753	607	505

Nota:
CC = condutores carregados

Tabela 9.5 ■ Capacidade de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência *A1, A2, B1, B2, C* e *D*

- Condutores isolados, cabos unipolares e multipolares — cobre e alumínio, isolação de EPR ou XLPE
- Temperatura no condutor: 90 °C
- Temperatura: 30 °C (ambiente); 20 °C (solo)

Seções nominais (mm²)	Métodos de instalação e de referência defenidos na Tabela 5.58											
	A1		*A2*		*B1*		*B2*		*C*		*D*	
	2 CC	3 CC	2 CC	3 CC	2 CC	3 CC	2 CC	3 CC	2 CC	3 CC	2 CC	3 CC
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	10	9	10	9	12	10	11	10	12	11	14	12
0,75	12	11	12	11	15	13	15	13	16	14	18	15
1	15	13	14	13	18	16	17	15	19	17	21	17
1,5	19	17	18,5	16,5	23	20	22	19,5	24	22	26	22
2,5	26	23	25	22	31	28	30	26	33	30	34	29
4	35	31	33	30	42	57	40	35	45	40	44	37
6	45	40	42	38	54	48	51	44	58	52	56	46
10	61	54	57	51	75	66	69	60	80	71	73	61
16	81	73	76	68	100	88	91	80	107	96	95	79
25	106	95	99	89	133	117	119	105	138	119	121	101
35	131	117	121	109	164	144	146	128	171	147	146	122
50	158	141	145	130	198	175	175	154	209	179	173	144
70	200	179	183	164	253	222	221	194	269	229	213	178
95	241	216	220	197	306	269	265	233	328	278	252	211
120	278	249	253	227	354	312	305	268	382	322	287	240
150	318	285	290	259	407	358	349	307	441	371	324	271
185	362	324	329	295	464	408	395	348	506	424	363	304
240	424	380	386	346	546	481	462	407	599	500	419	351
300	486	435	442	396	628	553	529	465	693	576	474	396
400	579	519	527	472	751	661	628	552	835	692	555	464
500	664	595	604	541	864	760	718	631	966	797	627	525
630	765	685	696	623	998	879	825	725	1.122	923	711	596
800	885	792	805	721	1.158	1.020	952	837	1.311	1.074	811	679
1.000	1014	908	923	826	1.333	1.173	1.088	957	1.515	1.237	916	767
Alumínio												
16	64	58	60	55	79	71	72	64	84	76	73	61
25	84	76	78	71	105	93	94	84	101	90	93	78
35	103	94	96	87	130	116	115	103	126	112	112	94
50	125	113	115	104	157	140	138	124	154	136	132	112
70	158	142	145	131	200	179	175	156	198	174	163	138
95	191	171	175	157	242	217	210	188	241	211	193	164
120	220	197	201	180	281	251	242	216	280	245	220	186
150	253	226	230	206	323	289	277	248	324	283	249	210
185	288	256	262	233	368	330	314	281	371	323	279	236
240	338	300	307	273	433	389	368	329	439	382	322	272
300	387	344	352	313	499	447	421	377	508	440	364	308
400	462	409	421	372	597	536	500	448	612	529	426	361
500	530	468	483	426	687	617	573	513	707	610	482	408
630	611	538	556	490	794	714	658	590	821	707	547	464
800	708	622	644	566	922	830	760	682	958	824	624	529
1.000	812	712	739	648	1.061	955	870	780	1.108	950	706	598

Nota:
CC = condutores carregados

Tabela 9.6 ■ Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência *E, F* e *G*

- Condutores isolados, cabos unipolares e multipolares — cobre ou alumínio, isolação de PVC
- Temperatura de 70 °C no condutor
- Temperatura ambiente: 30 °C

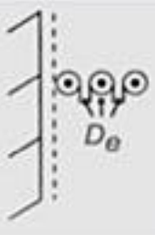
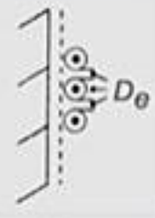
Seções nominais (mm²)	Métodos de instalação e de referência definidos na Tabela 5.28						
	E	*E*	*F*	*F*	*F*	*G*	*G*
							
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Cobre							
0,5	11	9	11	8	9	12	10
0,75	14	12	14	11	11	16	13
1	17	14	17	13	14	19	16
1,5	22	18,5	22	17	18	24	21
2,5	30	25	31	24	25	34	29
4	40	34	41	33	34	45	39
6	51	43	53	43	45	59	51
10	70	60	73	60	63	81	71
16	94	80	99	82	85	110	97
25	119	101	131	110	114	146	130
35	148	126	162	137	143	181	162
50	180	153	196	167	174	219	197
70	232	196	251	216	225	281	254
95	282	238	304	264	275	341	311
120	328	276	352	308	321	396	362
150	379	319	406	356	372	456	419
185	434	364	463	409	427	521	480
240	514	430	546	485	507	615	569
300	593	497	629	561	587	709	659
400	715	597	754	656	689	852	795
500	826	689	868	749	789	982	920
630	958	798	1.005	855	905	1.138	1.070
800	1.118	930	1.169	971	1.119	1.325	1.251
1.000	1.292	1.073	1.346	1.079	1.269	1.528	1.448
Alumínio							
16	73	61	73	62	65	84	73
25	89	78	98	84	87	112	99
35	111	96	122	105	109	139	124
50	135	117	149	128	133	169	152
70	173	150	192	166	173	217	196
95	210	183	235	203	212	265	241
120	244	212	273	237	247	308	282
150	282	245	316	274	287	356	327
185	322	280	363	315	330	407	376
240	380	330	430	375	392	482	447
300	439	381	497	434	455	557	519
400	528	458	600	526	552	671	629
500	608	528	694	610	640	775	730
630	705	613	808	711	640	775	730
800	822	714	944	832	875	1.050	1.000
1.000	948	823	1.092	965	1.015	1.213	1.161

Tabela 9.7 ■ Capacidades de condução de corrente, em ampères, para as maneiras de instalar *E*, *F* e *G*

- Condutores isolados, cabos unipolares e multipolares — cobre e alumínio, isolação de EPR ou XLPE
- Temperatura de 90 °C no condutor
- Temperatura ambiente: 30 °C

Seções nominais (mm²)	Métodos de instalação e de referência definidos na Tabela 5.28						
	E	*E*	*F*	*F*	*F*	*G*	*G*
							
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Cobre							
0,5	13	12	13	10	10	15	12
0,75	17	15	17	13	14	19	16
1	21	18	21	16	17	23	19
1,5	26	23	27	21	22	30	25
2,5	36	32	37	29	30	41	35
4	49	42	50	40	42	56	48
6	63	54	65	53	55	73	63
10	86	75	90	74	77	101	88
16	115	100	121	101	105	137	120
25	149	127	161	135	141	182	161
35	185	158	200	169	176	226	201
50	225	192	242	207	216	275	246
70	289	246	310	268	279	353	318
95	352	298	377	328	342	430	389
120	410	346	437	383	400	500	454
150	473	399	504	444	464	577	527
185	542	456	575	510	533	661	605
240	641	538	679	607	634	781	719
300	741	621	783	703	736	902	833
400	892	745	940	823	868	1.085	1.008
500	1.030	859	1.083	946	998	1.253	1.169
630	1.196	995	1.254	1.088	1.151	1.454	1.362
800	1.396	1.159	1.460	1.252	1.328	1.696	1.595
1.000	1.613	1.336	1.683	1.420	1.511	1.958	1.849
Alumínio							
16	91	77	90	76	79	103	90
25	108	97	121	103	107	138	122
35	135	120	150	129	135	172	153
50	164	146	184	159	165	210	188
70	211	187	237	206	215	271	244
95	257	227	289	253	264	332	300
120	300	263	337	296	308	387	351
150	346	304	389	343	358	448	408
185	397	347	447	395	413	515	470
240	470	409	530	471	492	611	561
300	543	471	613	547	571	708	652
400	654	566	740	663	694	856	792
500	756	652	856	770	806	991	921
630	879	755	996	899	942	1.154	1.077
800	1.026	879	1.164	1.056	1.106	1.351	1.266
1.000	1.186	1.012	1.347	1.226	1.285	1.565	1.472

contidos em eletrodutos enterrados; e 30 °C, para as demais maneiras de instalar.

No caso de a *temperatura ambiente ou do solo* no local da instalação ser diferente das temperaturas de referência, haverá alteração no valor da capacidade de condução de corrente, e

- I_Z será reduzido para $\theta_A > 30$ °C ou 20 °C; e
- I_Z aumentará para $\theta_A < 30$ °C ou 20 °C.

como pode ser deduzido da Expressão 9.15. Nessas condições, devem ser utilizados os *fatores de correção* (f_1) constantes da Tabela 9.8.

É importante observar que tais fatores não consideram o aumento de temperatura devido à radiação solar ou a outras radiações infravermelhas. Quando os cabos ou condutores forem submetidos a tais radiações, as capacidades de condução de corrente deverão ser calculcadas pelos métodos especificados na NBR 11301.

Resistividade térmica do solo

Para as linhas subterrâneas, as tabelas consideram uma *resistividade térmica do solo* de 2,5 K.m/W, valor recomendado pela IEC no caso geral para percursos no interior ou em torno de prédios.

A resistividade térmica do solo é extremamente sensível ao conteúdo de umidade, que pode apresentar grandes variações ao longo do tempo, dependendo do tipo de solo, das condições topográficas e meteorológicas e, sobretudo, do carregamento do cabo. Por isso, em linhas elétricas subterrâneas constituídas por cabos diretamente enterrados, quando se deseja manter um conteúdo mínimo de umidade residual, mesmo sob severos gradientes térmicos, é costume reconstituir a região da vala em torno dos cabos com areias selecionadas (*backfills*).

No entanto, pesquisas recentes realizadas no Brasil indicam, ao contrário do que se estabelecerá até então, que o uso de areias com características controladas *não garante* a manutenção de uma quantidade mínima de umidade do solo e, portanto, de um valor aceitável de resistividade térmica.

A partir dos resultados de tais pesquisas, a tendência atual é utilizar materiais de formulação específica (os chamados *backfills* estabilizados) em torno dos cabos, que garantam uma baixa resistividade térmica (inferior a 1 K.m/W), mesmo em condições de baixíssimo conteúdo de umidade. Quando isso não for feito, são recomendados *critérios restritivos no dimensionamento térmico dos cabos*, tais como fixar uma temperatura-limite na cobertura dos cabos (da ordem de 50 °C) para conter a migração de umidade ou utilizar a resistividade térmica na condição de solo seco (da ordem de 2,5 K.m/W).

Para linhas subterrâneas, quando forem conhecidos valores mais precisos de *resistividade térmica do solo* e estes forem diferentes do valor de referência, 2,5 K.m/W, utiliza-se à Tabela 9.9, que apresenta *fatores de correção* (f_2).

Quanto maior a resistividade térmica, piores as condições de dissipação e, portanto, menor I_Z.

Fatores de agrupamento

Quando for instalado mais de um circuito na mesma linha elétrica, ou quando tivermos linhas elétricas contíguas, devem ser aplicados os *fatores de agrupamento* (f_3) das tabelas 9.10 a 9.13, extraídas da NBR 5410.

Omissão dos fatores de agrupamento

Os fatores de agrupamento são sempre calculados admitindo-se que todos os condutores ou cabos agrupados sejam de mesmo tipo, têm a mesma seção e estão igualmente carregados, condições que ocorrem muito raramente na prática. Em geral:

- Os condutores ou cabos possuem seções diferentes, que podem, eventualmente, até ser de tipos diferentes.
- Os agrupamentos podem compreender condutores ou cabos de circuitos de potência e de circuitos de comando, sinalização etc.
- As capacidades de condução de corrente dos condutores e cabos podem ser sensivelmente superiores às correntes de projeto dos circuitos correspondentes, por exemplo, devido às quedas de tensão.
- Os condutores ou cabos não são percorridos constantemente pelas correntes de projeto dos respectivos circuitos, podendo as cargas ser cíclicas ou intermitentes.
- Os condutores ou cabos dos diferentes circuitos não são simultaneamente carregados com as respectivas correntes de projeto.

Nessas condições pode-se, na aplicação dos fatores de agrupamento, *deixar de computar*:

- Os condutores ou cabos cuja seção seja sensivelmente superior à correspondente corrente de projeto do circuito respectivo, por exemplo, devido ao critério de atendimento à queda de tensão; é o caso de ter-se $I_B \leq 0{,}7\ I_Z$, considerados os outros fatores de correção eventuais (por exemplo, o fator de correção de temperatura ambiente).
- Os condutores ou cabos levemente carregados, como é o caso dos circuitos de comando, sinalização e análogos.

Tabela 9.8 ■ Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes de 30 °C para linhas não-subterrâneas e de 20 °C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas

	Temperatura (°C)	Isolação	
		PVC	EPR ou XLPE
Linhas não-subterrâneas	10	1,22	1,15
	15	1,17	1,12
	20	1,12	1,08
	25	1,06	1,04
	35	0,94	0,96
	40	0,87	0,91
	45	0,79	0,87
	50	0,71	0,82
	55	0,61	0,76
	60	0,50	0,71
	65	–	0,65
	70	–	0,58
	75	–	0,50
	80	–	0,41
Linhas subterrâneas	10	1,10	1,07
	15	1,05	1,04
	25	0,95	0,96
	30	0,89	0,93
	35	0,84	0,89
	40	0,77	0,85
	45	0,71	0,80
	50	0,63	0,76
	55	0,55	0,71
	60	0,45	0,65
	65	–	0,60
	70	–	0,53
	75	–	0,46
	80	–	0,38

Tabela 9.9 ■ Fatores de correção para cabos contidos em eletrodutos enterrados no solo, com resistividades térmicas de 2,5 K.m/W, a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência *D*

Resistividade térmica (K.m\W)	1	1,5	2	3
Fator de correção	1,18	1,1	1,05	0,96

Notas:
1. Os fatores de correção dados são valores médios para as seções nominais incluídas nas Tabelas 9.4 e 9.5, com uma dispersão geralmente inferior a cinco por cento.
2. Os fatores de correção são aplicáveis a cabos em eletrodutos enterrados, a uma profundidade de até 80 cm.
3. Os fatores de correção para cabos diretamente enterrados são mais elevados para resistividades térmicas inferiores a 2,5 K.m/W e podem ser calculados pelos métodos dados na NBR 11301.

Tabela 9.10 ■ Fatores de correção aplicáveis a condutores em linhas abertas ou fechadas, agrupados em um mesmo plano e em camada única

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares											Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥ 20	
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos; em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70				36 a 37 (método C)
3	Camada única no teto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Camada única em bandeja perfurada	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				38 e 39 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

Notas:
1. Esses fatores são aplicáveis a grupos homogêneos de cabos, uniformemente carregados.
2. Quando a distância horizontal entre cabos adjacentes for superior ao dobro de seu diâmetro externo, não é necessário aplicar nenhum fator de redução.
3. O número de circuitos ou de cabos com o qual se consulta a tabela refere-se:
   - à quantidade de grupos de dois ou três condutores isolados ou cabos unipolares, cada grupo constituindo um circuito (supondo-se um só condutor por fase, isto é, sem condutores em paralelo); e/ou
   - à quantidade de cabos multipolares que compõe o agrupamento, qualquer que seja essa composição (só condutores isolados, só cabos unipolares, só cabos multipolares ou qualquer combinação).
4. Se o agrupamento for constituído, ao mesmo tempo, de cabos bipolares e tripolares, deve-se considerar o número total de cabos como o número de circuitos e, de posse do fator de agrupamento resultante, a determinação das capacidades de condução de corrente, nas tabelas 36 a 39, deve ser então efetuada:
   - na coluna de dois condutores carregados, para os cabos bipolares; e
   - na coluna de três condutores carregados, para os cabos tripolares.
5. Um agrupamento com N condutores isolados, ou N cabos unipolares, pode ser considerado composto tanto por $N/2$ circuitos com dois condutores carregados quanto por $N/3$ circuitos com três condutores carregados.
6. Os valores indicados são médios para a faixa usual de seções nominais, com dispersão geralmente inferior a cinco por cento.

Tabela 9.11 ■ Fatores de correção aplicáveis a agrupamentos que consistem em mais de uma camada de condutores: aplicar aos métodos de referência C (tabelas 9.4 e 9.5), E e F (tabelas 9.6 e 9.7)

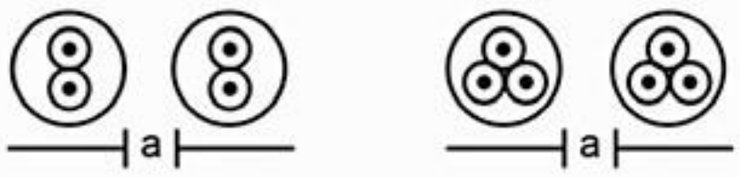
		Quantidade de circuitos trifásicos ou de cabos multipolares por camada				
		2	3	4 ou 5	6 ou 8	9 e mais
Quantidade de camadas	2	0,68	0,62	0,60	0,58	0,56
	3	0,62	0,57	0,55	0,53	0,51
	4 ou 5	0,60	0,55	0,52	0,51	0,49
	6 a 8	0,58	0,53	0,51	0,49	0,48
	9 e mais	0,56	0,51	0,49	0,48	0,46

Notas:
1. Os fatores são válidos independentemente da disposição da camada, se horizontal ou vertical.
2. Sobre condutores agrupados em uma única camada, ver Tabela 9.10 (linhas 2 a 5 da tabela).
3. Se forem necessários valores mais precisos, deve-se recorrer à ABNT NBR 11301.

Tabela 9.12 ■ Fatores de agrupamento para mais de um circuito – cabos unipolares ou cabos multipolares diretamente enterrados (método de referência D)

Número de circuitos	Distância entre cabos (a)				
	Nula	1 diâmetro de cabo	0,125 m	0,25 m	0,5 m
2	0,75	0,80	0,85	0,90	0,90
3	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
4	0,60	0,60	0,70	0,75	0,80
5	0,55	0,55	0,65	0,70	0,80
6	0,50	0,55	0,60	0,70	0,80

Cabos multipolares



Cabos unipolares

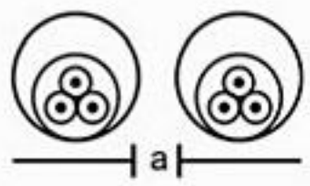


Nota:
Os valores indicados são aplicáveis para uma profundidade de 0,7 m e uma resistividade térmica do solo de 2,5 K.m/W. São valores médios para as dimensões dos cabos constantes nas Tabelas 9.4 e 9.5. Os valores médios arredondados podem apresentar erros de ± 10% em certos casos. Se forem necessários valores mais precisos, deve-se recorrer à NBR 11301 .

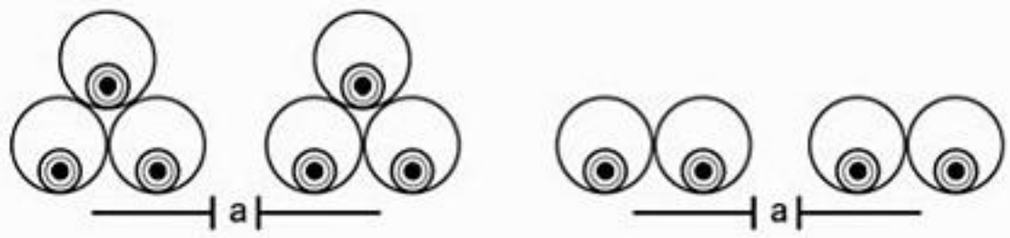
Tabela 9.13 ■ Fatores de agrupamento para mais de um circuito – cabos em eletrodutos diretamente enterrados

Cabos multipolares em eletrodutos – 1 cabo por eletroduto				
Número de circuitos	Espaçamento entre eletrodutos (a)			
	Nulo	0,25 m	0,5 m	1,0 m
2	0,85	0,90	0,95	0,90
3	0,75	0,85	0,90	0,95
4	0,70	0,80	0,85	0,90
5	0,65	0,80	0,85	0,90
6	0,60	0,80	0,80	0,80
Cabos unipolares em eletrodutos – 1 cabo por eletroduto				
Número de circuito (2 ou 3 cabos)	Espaçamento entre eletrodutos (a)			
	Nulo	0,25 m	0,5 m	1,0 m
2	0,80	0,90	0,90	0,95
3	0,70	0,80	0,85	0,90
4	0,65	0,75	0,80	0,90
5	0,60	0,70	0,80	0,90
6	0,60	0,70	0,80	0,90

Cabos multipolares



Cabos unipolares



Nota:
Os valores indicados são aplicáveis para uma profundidade de 0,7 m e uma resistividade térmica do solo de 2,5 K.m/W. São valores médios para as dimensões dos cabos constantes nas Tabelas 9.4 e 9.5. Os valores médios arredondados podem apresentar erros de ± 10% em certos casos. Se forem necessários valores mais precisos, deve-se recorrer à NBR 11301 .

9.4 Critério da capacidade de condução de corrente

Para a aplicação do critério da capacidade de condução de corrente ao dimensionamento de circuitos, é necessário conhecer:

- A corrente de projeto do circuito (I_B).
- O tipo de condutor isolado ou de cabo isolado.
- O tipo de linha elétrica, isto é, a maneira de instalar (Tabela 5.28).
- A temperatura ambiente ou do solo, no caso de linhas subterrâneas.
- A resistividade térmica do solo, no caso de linhas subterrâneas
- O número de condutores carregados.
- A proximidade de outros condutores ou cabos (isto é, as condições de agrupamento).

Quando se tem condutores isolados ou cabos isolados com isolações de PVC, EPR ou XLPE, instalados de acordo com a Tabela 5.28 do Capítulo 5 e sendo:

- A temperatura ambiente de 30 °C ou, para linhas subterrâneas, a temperatura do solo de 20 °C.
- A resistividade térmica do solo (no caso de linhas subterrâneas) igual a 2,5 K.m/W.
- O número de condutores carregados igual a dois ou três; pode-se entrar diretamente com a corrente de projeto I_B na coluna adequada das tabelas de 9.4 a 9.7 e obter a *menor seção nominal*, S_1, para a qual $I_Z \geq I_B$.

Quando se tem para o circuito condições de temperatura ambiente ou do solo, ou de resistividade térmica do solo, ou de agrupamento, diferentes daquelas a que se referem as tabelas citadas, deve-se recorrer aos *fatores de correção* da capacidade de condução de corrente, que são:

- Fator de correção da temperatura ambiente ou do solo, f_1, dado na Tabela 9.8.
- Fator de correção da resistividade térmica do solo, f_2, dado na Tabela 9.9.
- Fator de (correção de) agrupamento, f_3, dado nas tabelas 9.10 a 9.13, conforme o caso.

Utiliza-se, então, a *corrente fictícia de projeto* (I'_B), definida por:

$$I'_B = \frac{I_B}{f} \qquad (9.23)$$

onde f é o fator de correção aplicável ou, se for o caso, o produto dos fatores de correção aplicáveis, procedendo-se a seguir como descrito anteriormente.

EXEMPLO

Circuito de distribuição com as seguintes características:

- $I_B = 210$ A.
- Condutores isolados, cobre com isolação de PVC.
- Eletroduto aparente de seção circular instalado rente à parede (Tabela 5.28, método de referência B1).
- $\theta_A = 30$ °C.
- Circuito trifásico a 3 condutores

(a) Da Tabela 9.4 coluna B_1 com 3 condutores carregados

- $I_B = 210\text{ A} \rightarrow S_1 = 120\text{ mm}^2$ com $I_Z = 239$ A.

(b) A temperatura de regime permanente do condutor de 120 mm² será de:

- $\theta_R = 30 + (70 - 30)\left(\frac{210}{239}\right)^2 = 60{,}88\text{ °C}$

(c) Se $\theta_A = 45$ °C e no eletroduto houvesse mais um circuito, teríamos:

- Da Tabela 9.8 $\rightarrow f_1 = 0{,}79$.
- Da Tabela 9.10 $\rightarrow f_3 = 0{,}8$.
- o fator de correção total será $\rightarrow f = 0{,}79 \times 0{,}8 = 0{,}632$
- Da Expressão 9.23

$$I'_B = \frac{210}{0{,}632} = 332{,}27\text{ A}$$

- Da Tabela 9.4, coluna B_1 com 3 condutores carregados com $332{,}27\,A \rightarrow S_1 = 240\text{ mm}^2$.
- A capacidade de condução de corrente dos condutores de 240 mm² será obtida multiplicando-se o valor constante da Tabela 9.4, $I'_z = 370$ A, pelo fator de correção $f = 0{,}632$, isto é

$$[I'_z = 370 \times 0{,}632 = 233{,}84]$$

A valor que deve ser comparado com $I_B = 210$ A.

Note que a Tabela 9.4 foi feita para um circuito carregado, operando à temperatura ambiente de 30 °C. Nesse caso, têm-se dois circuitos trifásicos operando a uma temperatura ambiente de 45 °C, portanto a corrente fictícia (I'_B), representa a corrente que passaria em um circuito trifásico operando a uma temperatura ambiente de 30 °C, que produziria dentro do eletroduto a mesma elevação de temperatura final. Ver Figura 9.5.

A Figura 9.5 traduz bem a equivalência térmica, isto é, dois circuitos trifásicos de 240 mm² operando com 210 A a uma temperatura ambiente de 45 °C produzem o mesmo efeito térmico que um circuito trifásico de 240 mm² operando com 332,27 A a uma temperatura ambiente de 30 °C.

(d) A temperatura de regime atingida pelos condutores de 240 mm² será

- Da Expressão 9.13 $\rightarrow$

$$\theta_R = 45 + (70 - 45)\left(\frac{210}{233{,}84}\right)^2 = 65{,}16\text{ °C}$$

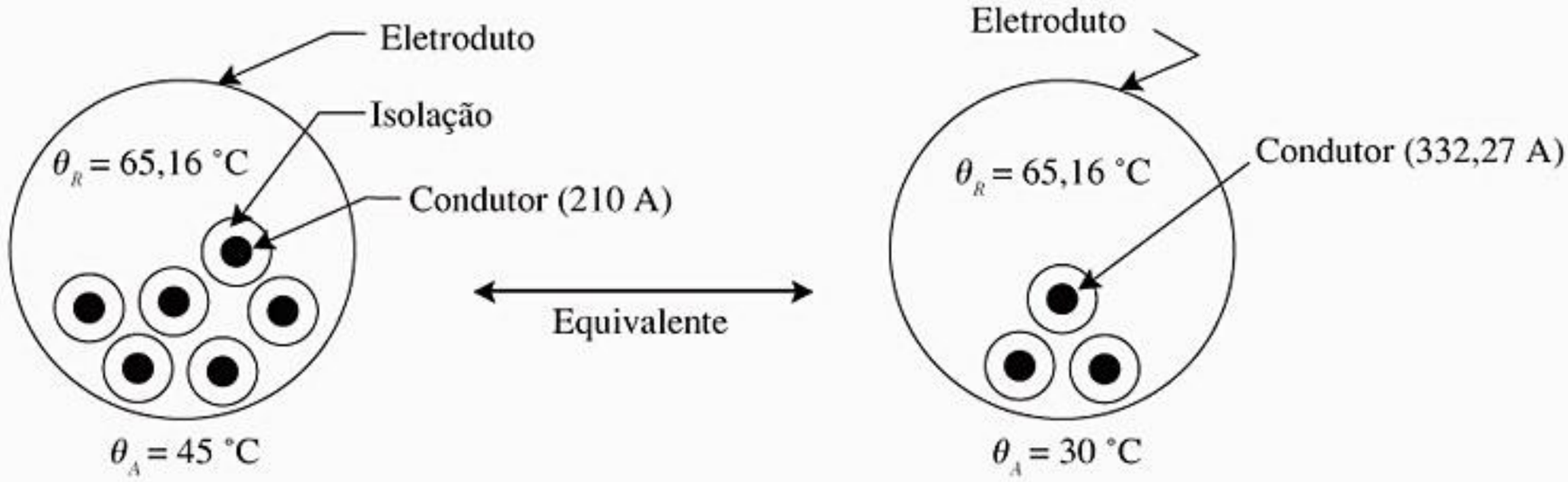


Figura 9.5 ■ Equivalência de dois circuitos carregados com um circuito carregado

EXEMPLO

Linha subterrânea com dois circuitos de distribuição, a e b, com as seguintes características:

- I_{Ba} = 123 A; I_{Bb} = 150 A.
- Cabos unipolares, cobre com isolação de EPR e cobertura de PVC.
- Eletroduto enterrado a 70 cm no solo (Tabela 5.28, método de referência D).
- θ_A = 25 °C (solo).
- Resistividade térmica do solo 1,5 K.m/W.
- Circuito a: 3*F*-*N*, alimentando carga constituída principalmente por aparelhos de iluminação com lâmpadas de descarga, ligadas entre fases e neutro
- Circuito b: 3*F*

Dentro do eletroduto, têm-se dois circuitos, um com quatro condutores carregados — circuito a — e outro com três condutores carregados — circuito b. Isso equivale a ter três circuitos no eletroduto, sendo dois circuitos com dois condutores carregados e um circuito com três condutores carregados; assim

- Circuito a: dois circuitos de dois condutores carregados cada.
- Circuito b: um circuito com três condutores carregados.
- Da Tabela 9.10 → f_3 = 0,7.

Os demais fatores são:

- Da Tabela 9.8 → f_1 = 0,96.
- Da Tabela 9.9 → f_2 = 1,1.
- O fator de correção total será → $f = 0{,}7 \times 0{,}96 \times 1{,}1 = 0{,}7392$

Para o circuito a virá:

- Da Expressão 9.23 → $I'_{Ba} = \dfrac{123}{0{,}7392} = 166{,}4$ A
- Da Tabela 9.5, coluna D com dois condutores carregados, tem-se que:

$$S_{1a} = 50 \text{ mm}^2, \text{ com}$$
$$I_{Za} = 173 \times 0{,}7392 = 127{,}88 \text{ A}$$

Para o circuito b, tem-se:

- Da Expressão 9.2 → $I'_{Bb} = \dfrac{150}{0{,}7392} = 202{,}9$ A
- Da Tabela 9.5, coluna D com 3 condutores carregados, tem-se que:

S_{1b} = 95 mm², com

$$I'_{Zb} = 211 \times 0{,}7392 = 155{,}97 \text{ A}$$

9.5 Condutores em paralelo

O uso de condutores em paralelo em vez de um único condutor, na mesma fase ou polaridade, pode representar uma solução mais prática e econômica quando se trata de transportar correntes elevadas.

Embora não haja qualquer restrição normativa, por razões práticas geralmente não são utilizados em paralelo condutores cuja seção nominal seja inferior a 50 mm² de cobre ou a 70 mm² de alumínio.

Os condutores isolados, os cabos unipolares ou as veias de cabos multipolares são reunidos eletricamente em ambas as extremidades, devendo ser tomadas medidas para garantir igual divisão de corrente entre eles. Assim:

- Os condutores devem ter a mesma constituição, a mesma seção nominal e aproximadamente o mesmo comprimento, e não devem apresentar derivações ao longo de seu percurso.
- No caso de condutores isolados ou cabos unipolares em trifólio, em formação plana ou em conduto fechado, com seção igual ou inferior a 50 mm² em cobre, ou 70 mm² em alumínio, cada grupo ou conduto fechado deve conter todas as fases ou polaridades e o respectivo neutro, se existir.
- No caso de cabos unipolares com seção superior a 50 mm² em cobre ou 70 mm² em alumínio, eles devem ser agrupados segundo configurações especiais adaptadas a cada caso, cada grupo contendo todas as fases e o respectivo neutro, se existir, sendo as configurações

definidas de modo a obter-se o maior equilíbrio possível entre as impedâncias dos condutores de cada fase.

Os condutores ligados em paralelo devem ser reunidos em tantos grupos quantos forem os condutores por fase ou polaridade, cada grupo contendo um condutor de cada fase ou polaridade. Assim, em um circuito trifásico com três fases e neutro sendo dois condutores por fase e dois para o neutro, deve-se ter *dois grupos* de condutores, cada um contendo as três fases e o neutro, podendo ser, em princípio,

- Dois grupos de quatro condutores isolados ou cabos unipolares; ou
- Dois cabos tetrapolares.

Os condutores de cada grupo deverão estar instalados nas proximidades imediatas uns dos outros, mesmo que se situem em linhas elétricas separadas. Pode-se ter, por exemplo, todos os condutores instalados no mesmo eletroduto ou em eletrodutos separados e próximos, cada conduto contendo um grupo.

EXEMPLO

Circuito de distribuição com as seguintes características:

- $I_B = 750$ A.
- Cabos unipolares de cobre com isolação e cobertura de PVC.
- Escada (leitos) para cabos; cabos contíguos (Tabela 5.28, método de referência F).
- $\theta_A = 30$ °C.
- Circuito trifásico ($3F$); três cabos unipolares por fase, totalizando 9 cabos no circuito.

Tudo se passa como se tivéssemos três circuitos trifásicos, a três condutores cada, e cada um com

$$I_B = \frac{750}{3} = 250 \text{ A}$$

- Três circuitos trifásicos contíguos depositados horizontalmente no leito (escada) $\rightarrow f_3 = 0{,}96$
- Da Expressão 9.23: $I'_B = \dfrac{250}{0{,}96} = 260{,}4$ A
- Da Tabela 9.6, letra F, coluna (6): $S_1 = 95$ mm², com

$I'_z = 275 \times 0{,}96 = 264$ A

Assim, deveremos ter, na escada (leitos) para cabos, três grupos de três cabos de 95 mm², um por fase em cada grupo.

Quando vários condutores forem conectados em paralelo, eles devem ser de mesmo material, mesma seção nominal, mesmo comprimento e mesma isolação; para garantir uma igual distribuição de corrente entre os condutores de mesma fase, é necessário também que a reatância indutiva desses condutores seja a mesma.

No caso de cabos unipolares em bandejas, escadas para cabos ou em prateleiras, recomenda-se que a distância entre os grupos de cabos (cada um com as fases *R*, *S* e *T*) seja cerca do dobro da distância entre os cabos de um grupo. Observe que a seqüência de fases nos diversos grupos é também de grande importância. Dependendo do número de grupos, recomenda-se fazer

RST *TSR* *RST* *TSR* etc.

Com esse arranjo, as reatâncias indutivas dos cabos em paralelo de uma mesma fase serão muito parecidas, diferindo, no entanto, de fase para fase. Essa diferença é menos crítica do que se fossem diferentes as reatâncias de cabos da mesma fase.

Se os cabos unipolares estiverem dispostos em diferentes níveis de bandejas, escadas para cabos ou prateleiras, os cabos de cada fase não devem ser colocados lado a lado. A distância vertical entre os níveis não deve ser inferior a 300 mm. Se o espaço for suficiente, dois grupos com seqüências de fases opostas podem ocupar o mesmo nível. Assim, deve-se ter:

RST *TSR*
RST *TSR*
RST *TSR* etc.

Com esse tipo de arranjo, também serão praticamente iguais as reatâncias indutivas dos cabos de cada fase e diferentes as reatâncias nas três fases.

Considerando um único grupo, apenas na formação em trifólio, isto é,

$$\begin{matrix} & T & \\ R & & S \end{matrix}$$

as reatâncias das fases serão iguais. Com vários grupos em trifólio, é aconselhável dispor os cabos como indicado a seguir:

$$\begin{matrix} T & T & T & T \\ R\ S & S\ R & R\ S & S\ R \end{matrix} \text{ etc.}$$

É importante observar que, no caso de diferentes níveis, não é recomendável a formação em trifólios, ainda que as reatâncias indutivas dos cabos em paralelo diferirão consideravelmente.

9.6 Transitório térmico e tempo de sobrecarga admissível

Considere-se um condutor, constituinte de um condutor isolado ou de um cabo isolado, inicialmente com uma corrente na temperatura θ_0. Ao circular por esse condutor uma nova corrente I constante e maior, antes de ser atingido o equilíbrio térmico, parte da energia térmica acumula-se no condutor ou cabo isolado, elevando a temperatura, e parte se dispersa no ambiente. Ao ser atingido o equilíbrio térmico (temperatura de regime θ_R), toda a energia produzida pelas perdas no condutor é dissipada. A Figura 9.6, apresenta a evolução da temperatura no condutor.

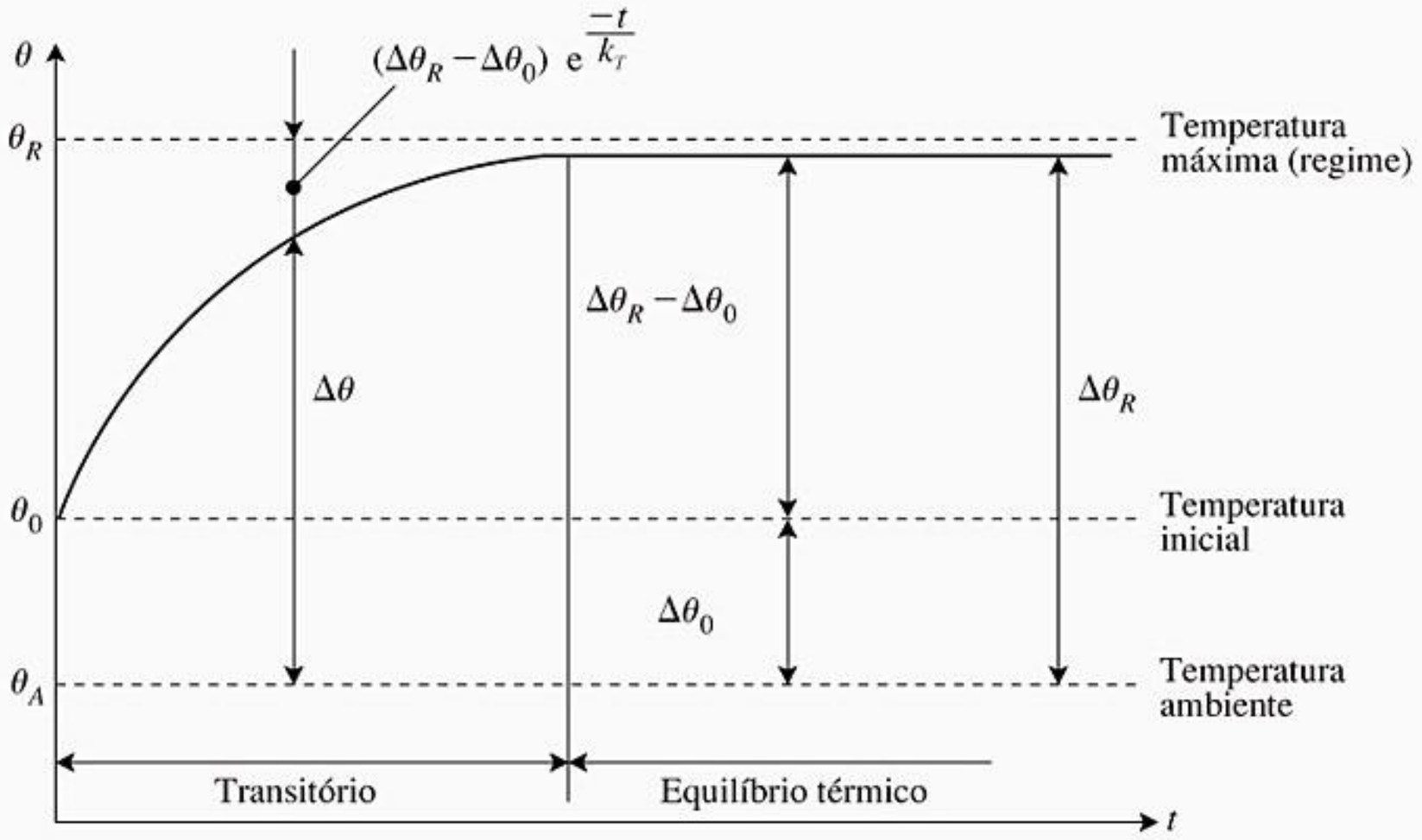


Figura 9.6 ■ Transitório e equilíbrio térmico em um condutor ou cabo isolado

A equação do transitório pode ser escrita

$$\Delta\theta = \Delta\theta_R - (\Delta\theta_R - \Delta\theta_0)e^{-\frac{t}{k_T}} \qquad (9.24)$$

onde $\Delta\theta_R = \theta_R - \theta_A$, $\Delta\theta_0 = \theta_0 - \theta_A$ e k_T é a constante de tempo.

Podemos escrever

$$e^{-\frac{t}{k_T}} = \frac{\Delta\theta_R - \Delta\theta}{\Delta\theta_R - \Delta\theta_0} \setminus e^{-\frac{t}{k_T}} = \frac{\Delta\theta_R - \Delta\theta_0}{\Delta\theta_R - \Delta\theta}$$

$$\therefore \frac{t}{k_T} = \ln \frac{\Delta\theta_R - \Delta\theta_0}{\Delta\theta_R - \Delta\theta}$$

e daí

$$t = k_T \ln \frac{\Delta\theta_R - \Delta\theta_0}{\Delta\theta_R - \Delta\theta} \qquad (9.25)$$

expressão que dá o tempo necessário para que o condutor atinja a sobretemperatura $\Delta\theta$.

Temperatura de sobrecarga

Interessa determinar o tempo necessário para que o condutor atinja determinada *temperatura de sobrecarga* θ_S. Observe que as normas de cabos fixam uma *temperatura máxima de sobrecarga* em função do material da isolação, como indica a Tabela 9.14; a operação nessas temperaturas não deve superar 100 h durante 12 meses consecutivos nem superar 500 h durante a vida do cabo.

Analisam-se dois casos separadamente: quando o transitório térmico parte da temperatura ambiente, θ_A, e quando ele parte da temperatura máxima para serviço contínuo, θ_Z. Seja a corrente I (admitida constante) definida por

$$I = n\, I_Z \qquad (9.26)$$

sendo I_Z a capacidade de condução de corrente e n a *relação de sobrecarga*

$$n = \frac{I}{I_Z} \qquad (9.27)$$

Por sua vez, a sobretemperatura $\Delta\theta$ é definida por

$$\Delta\theta = \theta - \theta_A = m\Delta\theta_Z \qquad (9.28)$$

sendo

$$\Delta\theta_Z = \theta_Z - \theta_A \qquad (9.29)$$

a máxima sobretemperatura em regime permanente e

$$m = \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_Z} \qquad (9.30)$$

a *relação de sobrecarga térmica*.

Tabela 9.14 ■ Temperaturas de sobrecarga

Material de isolação	Temperatura-limite de sobrecarga θ_s (°C)
Cloreto de polivinila (PVC)	100
Borracha etileno-propileno (EPR)	130
Polietileno reticulado (XLPE)	130

Para um condutor ou cabo isolado com isolação de PVC tem-se $\theta_Z = 70$ °C. Considerando a temperatura (máxima) de sobrecarga $\theta_S = 100$ °C (Tabela 9.14) e uma temperatura ambiente $\theta_A = 30$ °C, virá

$$\left.\begin{array}{l}\Delta\theta_Z = 70 - 30 = 40\ ^\circ\text{C} \\ \Delta\theta = 100 - 30 = 70\ ^\circ\text{C}\end{array}\right| \rightarrow m = \frac{70}{40} = 1{,}75$$

Analogamente, para isolação em EPR ou XLPE, tem-se

$$\left.\begin{array}{l}\Delta\theta_Z = 90 - 30 = 60\ ^\circ\text{C} \\ \Delta\theta = 130 - 30 = 100\ ^\circ\text{C}\end{array}\right| \rightarrow m = \frac{100}{60} = 1{,}67$$

Da Expressão 9.20 ou 9.21, lembrando que 0,158 a $S^{0,625}$ ou 0,128 a $S^{0,625}$ é constante para dado condutor ou cabo isolado e designando por h tal valor, pode-se escrever

$$I = h\sqrt{\Delta\theta_R} \qquad (9.31)$$

e também que

$$I_Z = h\sqrt{\Delta\theta_Z}$$

resultando

$$\Delta\theta_R = \frac{I^2}{h^2} \qquad (9.32)$$

$$\Delta\theta_Z = \frac{I_Z^2}{h^2} \qquad (9.33)$$

Considerando inicialmente que o transitório tenha início com o condutor na temperatura ambiente $\theta_0 = \theta_A$ e $-\ \Delta\theta_0 = 0$, pode-se escrever, então, a partir da Expressão 9.25

$$t = k_T \ln \frac{\Delta\theta_R}{\Delta\theta_R - \Delta\theta} \qquad (9.34)$$

substituindo as expressões 9.32 e 9.28 na Expressão 9.34

$$t = k_T \ln \frac{\dfrac{I^2}{h^2}}{\dfrac{I^2}{h^2} - m\Delta\theta_Z}$$

considerando a Expressão 9.33

$$t = k_T \ln \frac{\dfrac{I_Z^2}{h^2}}{\dfrac{I^2}{h^2} - m\dfrac{I_Z^2}{h_2}}$$

e considerando finalmente a Expressão 9.26, resultará

$$t = k_T \ln \frac{\dfrac{n^2 I_Z^2}{h^2}}{\dfrac{n^2 I_Z^2}{h^2} - m\dfrac{I_Z^2}{h_2}}$$

e, portanto

$$t = k_T \ln \frac{n^2}{n^2 - m} \qquad (9.35)$$

Essa expressão permite determinar, para dado condutor ou cabo isolado (isto é, tipo e seção conhecidos), o tempo necessário para atingir uma temperatura de sobrecarga prefixada, quando percorrido por uma corrente de sobrecarga, considerando inicialmente o condutor na temperatura ambiente ('partida' a frio). Observe que, para essa condição, se pode ter $m = 1$, isto é, considerar como temperatura final a temperatura máxima para serviço contínuo θ_Z.

No caso de ser a temperatura inicial igual a θ_Z, tem-se que $\Delta\theta_0 = \theta_Z - \theta_A = \Delta\theta_Z$ e um procedimento análogo ao feito anteriormente conduz à expressão

$$t = k_T \ln \frac{n^2 - 1}{n^2 - m} \qquad (9.36)$$

sendo t, para dado condutor ou cabo isolado, o tempo necessário para atingir uma temperatura de sobrecarga prefixada, quando percorrido por determinada corrente de sobrecarga, considerando inicialmente o condutor na temperatura máxima para serviço contínuo θ_Z ('partida' a quente). Pela expressão, se $m = 1$, o logaritmo será zero e também t, e, portanto, para o início do transitório é necessário que $m > 1$, ou seja, $\Delta\theta > \Delta\theta_z$.

Ver temperatura de regime, a seguir.

Considerando a Expressão 9.27, tem-se para a expressão 9.13

$$\theta_R = \theta_A + (\theta_Z - \theta_A)n^2$$

e daí

$$\theta_R = \theta_Z n^2 - \theta_A(n^2 - 1) \qquad (9.13)$$

Pretende-se determinar o valor da *constante de tempo* k_T, que representa o tempo necessário para atingir a temperatura de regime com dissipação de calor nula, isto é, em uma situação de balanço térmico igual à inicial ($t = 0$), como mostra a Figura 9.7.

A partir da Expressão 9.34, pode-se facilmente concluir que a constante de tempo representa o tempo necessário para atingir um $\Delta\theta$ de cerca de 63% de $\Delta\theta_R$. Com efeito, fazendo naquela expressão $t = k_T$, resultará que

$$\ln \frac{\Delta\theta_R}{\Delta\theta_R - \Delta\theta} = 1 \ \therefore\ \frac{\Delta\theta_R}{\Delta\theta_R - \Delta\theta} \cong 2{,}7$$

$$\therefore\ \Delta\theta \cong 0{,}63\,\Delta\theta_R$$

Vemos que, nas expressões 9.35 e 9.36, a constante de tempo k_T aparece multiplicando

$$\ln \frac{n^2}{n^2 - m} \text{ e } \ln \frac{n^2 - 1}{n^2 - m}$$

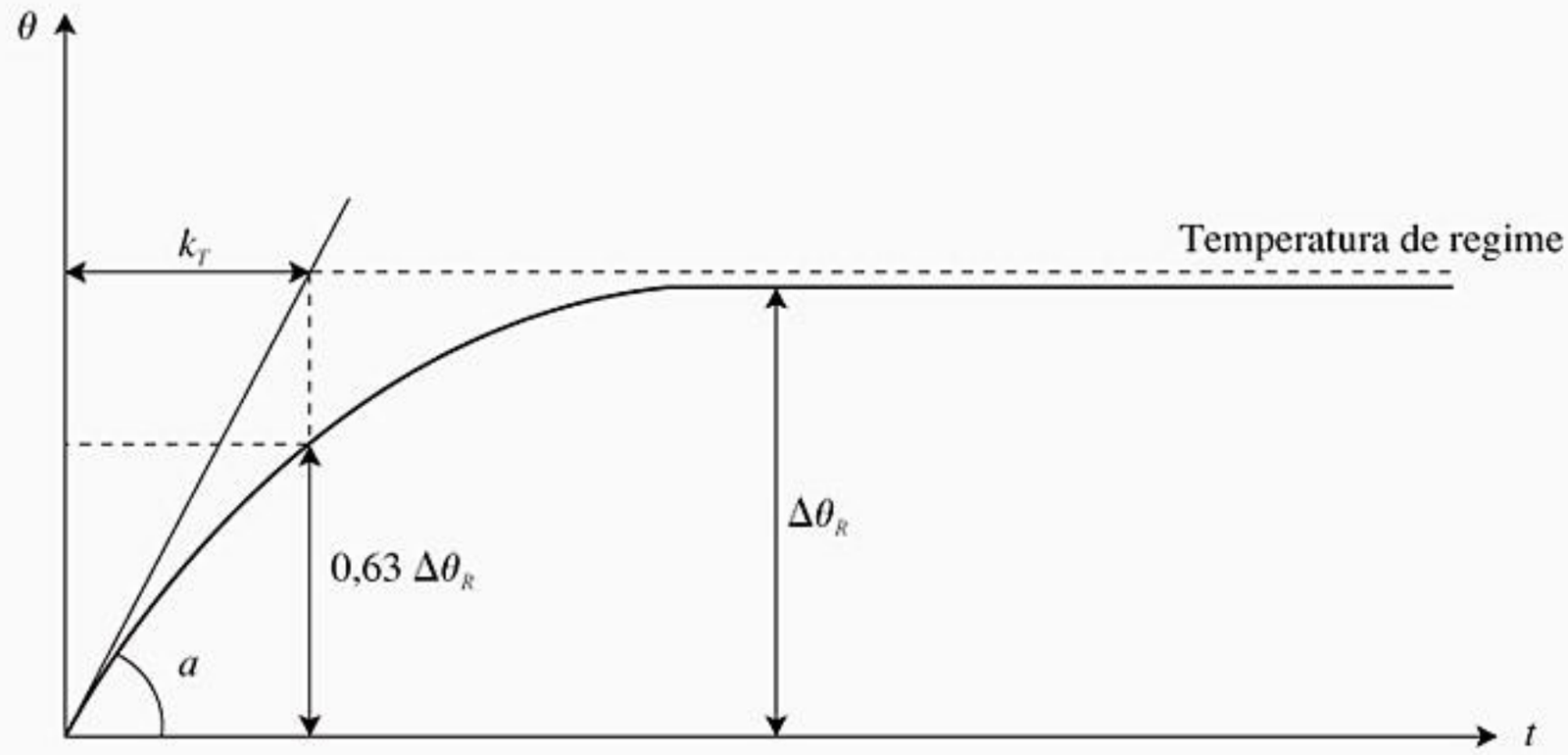


Figura 9.7 ■ Significado gráfico da constante de tempo

Isso significa que o tempo para alcançar dada temperatura de sobrecarga é diretamente proporcional à constante de tempo.

Verifica-se que, nos sistemas térmicos, a constante de tempo pode ser definida como a relação entre a capacidade térmica C e a condutância térmica K, ou seja

$$k_T = \frac{C}{K} \tag{9.37}$$

A *capacidade térmica* de uma massa representa a relação entre a quantidade de calor acumulada e a temperatura atingida, quando é nulo o calor dissipado. Pode-se escrever:

$$C = c\,\gamma\,V \tag{9.38}$$

onde

- c é o calor específico (J/g °C).
- γ é a massa específica (g/cm³).
- V é o volume (cm³).

Para um condutor de cobre isolado com PVC, que obedeça ao modelo simplificado da Figura 9.2, tem-se:

(a) Capacidade térmica do condutor de cobre, com

- $c = 0{,}393$ J/g °C
- $\gamma = 8{,}89$ g/cm³ (ou g/m × mm²)
- V = Sl (mm² × m) (S é a seção do condutor e l, o comprimento).

virá

$$C_{cu} \cong 3{,}5\,Sl \tag{9.39}$$

(b) Capacidade térmica da isolação de PVC, com

- $c = 1{,}67$ J/g °C
- $\gamma = 1{,}30$ g/cm³ (ou g/m × mm²)
- V = Al (mm² × m) (A é a área da 'coroa' isolante e l, o comprimento).

virá

$$C_{PVC} = 2{,}17\,Al \tag{9.40}$$

Da Figura 9.3, pode-se escrever

$$A = \pi(r + z)^2 - \pi r^2 = \pi(z^2 + 2rz) \tag{9.41}$$

fazendo

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 0{,}564\,S^{0{,}5} \tag{9.42}$$

e substituindo as expressões 9.3 e 9.42 na Expressão 9.41 virá

$$A = \pi[(0{,}52\,S^{0{,}25})^2 + 2(0{,}564\,S^{0{,}5} \times 0{,}52\,S^{0{,}25})] =$$

$$= \pi(0{,}27\,S^{0{,}5} + 2 \times 0{,}564\,S^{0{,}5} \times 0{,}52\,S^{0{,}25})$$

resultando

$$A = 0{,}848\,S^{0{,}5} + 1{,}84\,S^{0{,}75} \tag{9.43}$$

Por fim, substituindo a Expressão 9.43 na Expressão 9.40

$$C_{PVC} = (1{,}84\,S^{0{,}5} + 3{,}99\,S^{0{,}75})l \tag{9.44}$$

(c) Capacidade térmica total, cobre com PVC; das expressões 9.39 e 9.44

$$C = C_{cu} + C_{PVC} \cong 3{,}5\,IS + 1{,}84\,IS^{0{,}5} + 3{,}99\,IS^{0{,}75} \tag{9.45}$$

Para o condutor isolado, cobre com PVC, a constante de tempo poderá ser obtida substituindo as expressões 9.45 e 9.18 na Expressão 9.37

$$k_T \cong \frac{3{,}5\,IS + 1{,}8\,IS^{0{,}5} + 4\,IS^{0{,}75}}{0{,}5 \times 10^{-3} a^2\,IS^{0{,}25}} \quad \therefore$$

$$k_T \cong \frac{10^4}{a^2}(0{,}7\,S^{0{,}75} + 0{,}8\,S^{0{,}5} + 0{,}36\,S^{0{,}25}) \tag{9.46}$$

Percebe-se que k_T é dada em função da seção do condutor, S, e da capacidade de condução de corrente correspondente à seção unitária, a.

A Figura 9.8 mostra o diagrama de k_T em função de S, para alguns valores de a, obtido da Expressão 9.46 e,

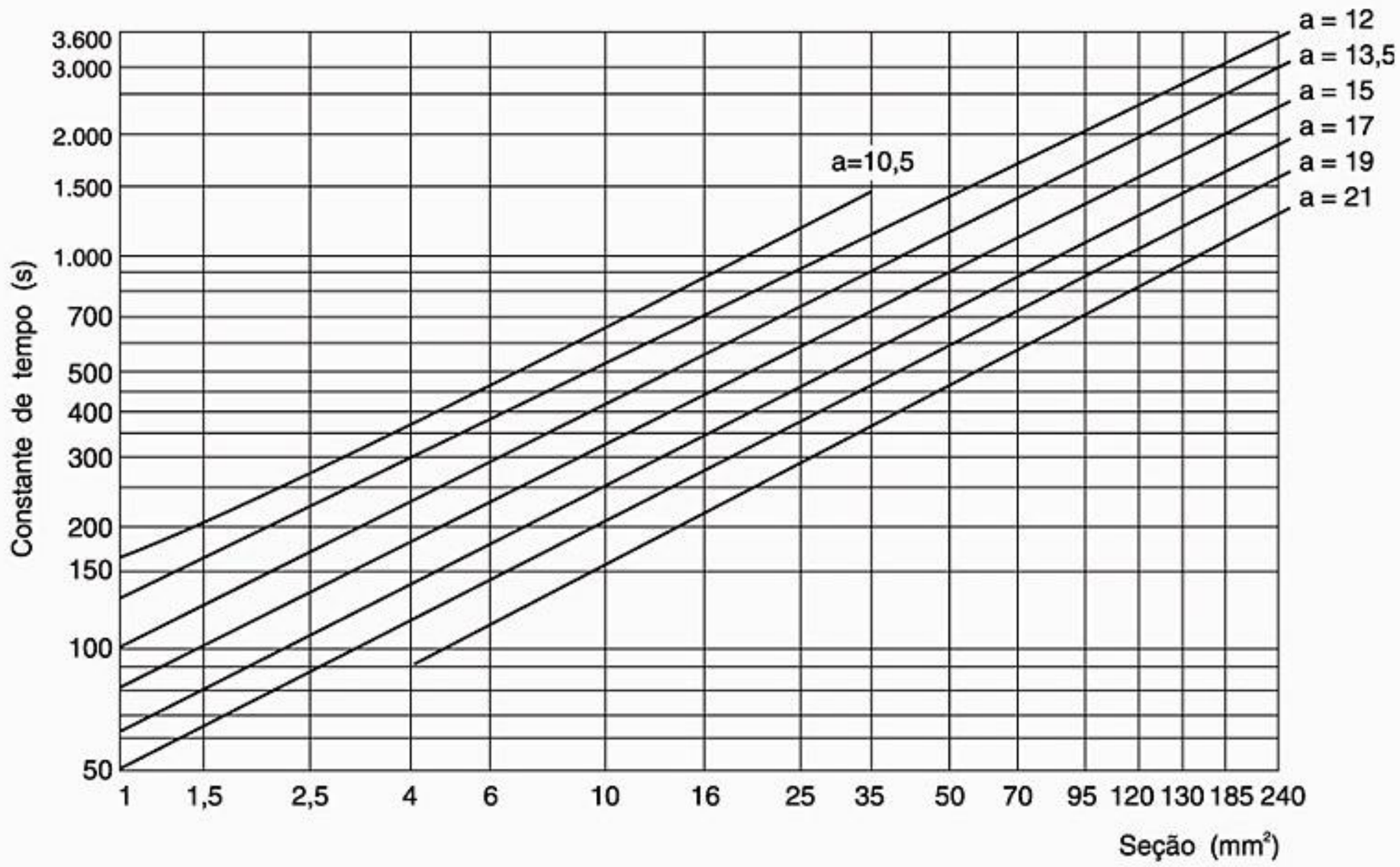


Figura 9.8 ■ Constante de tempo (k_T) em função de S, para alguns valores de a; condutores isolados Cu/PVC

portanto, válido para condutores isolados de cobre com isolação de PVC, de acordo com o modelo simplificado da Figura 9.2.

Para condutores isolados, cobre com EPR ou XLPE, tem-se a expressão

$$k_T \cong \frac{10^4}{a^2}(S^{0,75} + S^{0,5} + S^{0,25}) \qquad (9.47)$$

É importante observar que, no caso de cabos unipolares, isto é, cabos com uma cobertura isolante sobre a isolação, a capacidade térmica e a constante de tempo serão maiores e, portanto, as condições serão mais favoráveis.

Na prática, o tempo para que um condutor atinja a temperatura de regime (t_R) a partir da temperatura ambiente é de cerca de 4,6 vezes a constante de tempo. Com efeito, se, na Expressão 9.34, fazendo $\Delta\theta = 0{,}99\ \Delta\theta_R$, obtém-se

$$t_R \cong k_T\, In\, \frac{\Delta\theta_R}{\Delta\theta_R - 0{,}99\ \Delta\theta_R} = k_T\, In\, 100$$

$$\therefore\ t_R \cong 4{,}6\, k_T \qquad (9.48)$$

No caso de aquecimento a partir da temperatura máxima para serviço contínuo, o valor de $_{TR}$ dependerá da relação entre $\Delta\theta_0$ e $\Delta\theta_R$. Assim, por exemplo, para $\Delta\theta_0 = 0{,}5\ \Delta\theta_R$, virá, da Expressão 9.25, com $\Delta\theta = 0{,}99\ \Delta\theta_R$

$$t_R \cong k_T \ln \frac{\Delta\theta_R - 0{,}5\ \Delta\theta_R}{\Delta\theta_R - 0{,}99\ \Delta\theta_R} = k_T \ln 50 = 3{,}9\, k_T$$

Para $\Delta\theta_0 = 0{,}57\ \Delta\theta_R$

$$t_R \cong k_T \ln \frac{\Delta\theta_R - 0{,}57\ \Delta\theta_R}{\Delta\theta_R - 0{,}99\ \Delta\theta_R} = k_T \ln 43 = 3{,}76\, k_T$$

EXEMPLO

Seja um circuito constituído por três condutores isolados de cobre com isolação de PVC, seção de 6 mm², instalado em eletroduto embutido em alvenaria (maneira de instalar B1), sendo de 30 °C a temperatura ambiente.

(a) Pode-se obter, da Tabela 9.3, o valor do fator a (capacidade de condução de corrente de um condutor de mesmo tipo, instalado nas mesmas condições e com seção de 1 mm²)

- Tabela 9.3 (B1 com 3 condutores carregados)

$$\rightarrow a = 12\ \text{A}$$

da Tabela 9.4, obtém-se a capacidade de condução de corrente I_Z

- Tabela 9.4 (B1 com três condutores carregados)

$$\rightarrow I_Z = 36\ \text{A}$$

(valor que também poderia ser obtido da Expressão 9.10

$$\rightarrow I_Z = 12 \times 6^{0,625} \cong 36\ \text{A}$$

(b) A constante de tempo k_T pode ser obtida da Expressão 9.46

$$k_T \cong \frac{10^4}{12^2}\ (0{,}7 \times 6^{0,75} + 0{,}8 \times 6^{0,5} + 0{,}36 \times 6^{0,25}\ ) = 366\, s$$

(utilizando a Figura 9.8, obtém-se praticamente o mesmo resultado)

(c) A equação do transitório será, no caso, da utilização da Expressão 9.24

$$\Delta\theta = \Delta\theta_R - (\Delta\theta_R - \Delta\theta_0)\, e^{-\frac{t}{366}}$$

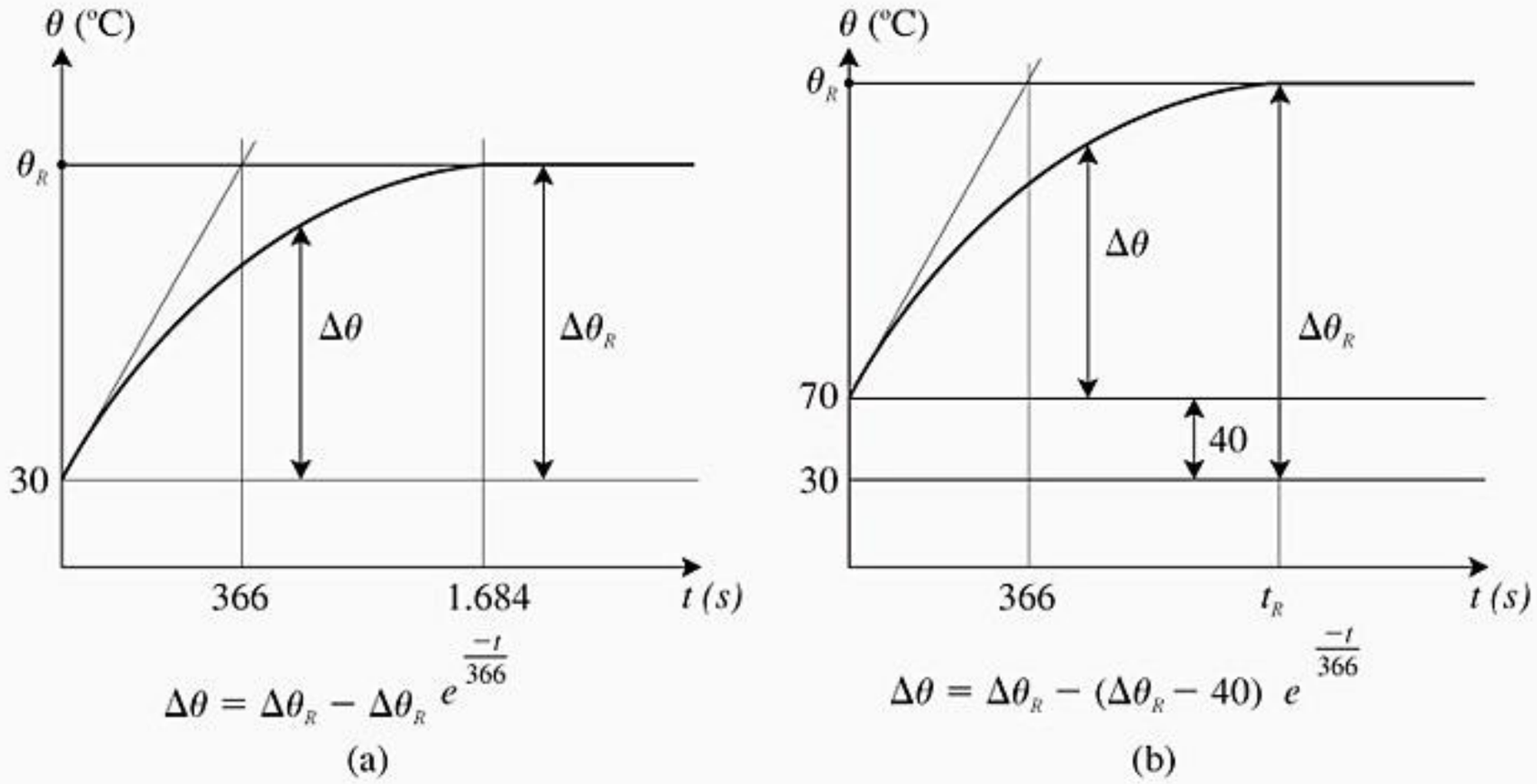


Figura 9.9 ■ Transitório e equilíbrio térmico no condutor isolado do exemplo; (a) partida a frio, (b) partida a quente

sendo

$$\Delta\theta_R = \theta_R - 30° \text{ e } \Delta\theta_0 = \theta_0 - 30°$$

Considerando partida 'a frio', isto é,

$$\theta_0 = \theta_A = 30° \text{ e, portanto, } \Delta\theta_0 = 0$$

tem-se

$$\Delta\theta = \Delta\theta_R - \Delta\theta_R\, e^{-\frac{t}{366}}$$

Nesse caso, na Expressão 9.48, a temperatura de regime será alcançada após

$$t_R \cong 4{,}6 \times 366 = 1.684\ s$$

É o que mostra a Figura 9.9 (a) Para partida "a quente", isto é, com

$\theta_0 = \theta_z = 70\ °C$ e $\Delta\theta_0 = 70 - 30 = 40\ °C$, tem-se

$$\Delta\theta = \Delta\theta_R - (\Delta\theta_R - 40)e^{-\frac{t}{366}}$$

como mostra a Figura 9.9 (b), sendo t_R função de θ_R.

(d) Circulando pelo condutor uma sobrecorrente I = 43,2 A (n = 1,2), a temperatura de regime será, da Expressão 9.13

$$\theta_R = 30 + (70 - 30)1{,}2^2 = 87{,}6\ °C$$

Calcular a temperatura que o condutor atingirá com 43,2 A após 1.000 segundos, partindo da temperatura ambiente ('a frio'). Da Expressão 9.25', com $\Delta\theta_R$ = 87,6 − 30 = 57,6 °C, tem-se

$$\Delta\theta = 57{,}6 - 57{,}6\, e^{-\frac{1.000}{366}} = 53{,}8\ °C$$

e, portanto,

$$\theta = 53{,}8 + 30 = 83{,}8\ °C$$

Partindo de θ_Z = 70 °C ('a quente'), tem-se, da Expressão 9.25"

$$\Delta\theta = 57{,}6 - (57{,}6 - 40)e^{-\frac{1.000}{366}} = 56{,}4\ °C$$

e, portanto

$$\theta = 56{,}4 + 30 = 86{,}4\ °C$$

Nesse caso, sendo

$$\Delta\theta_R = 86{,}4 - 30 = 56{,}4\ °C$$

$$\Delta\theta_0 = 40\ °C$$

a temperatura de regime será alcançada em

$$t_R \cong 366 \ln \frac{56{,}4 - 40}{56{,}4 - 0{,}99 \times 56{,}4} = 3{,}38 \times 366 = 1.237\ s$$

(e) Circulando pelo condutor uma sobrecorrente I = 52,2 A (n = 1,45), a temperatura de regime será, da Expressão 9.13

$$\theta_R = 30 + (70 - 30)\, 1{,}45^2 = 114\ °C$$

Calcular, para essa sobrecorrente, qual o tempo necessário para atingir a temperatura de sobrecarga θ_S = 100 °C, admitindo partida a frio. A relação de sobrecarga térmica, m, será pela Expressão 9.30

$$m = \frac{100 - 30}{70 - 30} = 1{,}75$$

e então, da Expressão 9.35 obtém-se

$$t = 366 \ln \frac{1{,}45^2}{1{,}45^2 - 1{,}75} = 654\ s$$

Admitindo partida a quente, virá

$$t = 366 \ln \frac{1{,}45^2 - 1}{1{,}45^2 - 1{,}75} = 417\ s$$

Para um dado condutor ou cabo isolado, em dada condição de instalação, têm-se valores fixos de k_T (determinados em função do material da isolação, da

seção e da maneira de instalar, como indicam as expressões 9.46 e 9.47 e de m (determinados em função das temperaturas de sobrecarga e máxima para serviço contínuo, ambas dependentes da isolação e da temperatura ambiente). Portanto, pode-se obter das expressões 9.35 e 9.36 as curvas $t = \mathrm{f(n)}$, que fornecem o tempo necessário para o condutor atingir uma temperatura de sobrecarga, considerando partida a frio e a quente, para os diversos valores da relação de sobrecarga. São as chamadas *curvas de sobrecarga* do condutor ou cabo isolado.

A Figura 9.10 mostra as curvas de sobrecarga de um condutor isolado ou de um cabo isolado para $k_T = 300$ s e $m = 2$.

No exemplo indicado, para uma relação de sobrecarga $n = 4$, isto é, com uma corrente de sobrecarga igual a quatro vezes a capacidade de condução de corrente, a temperatura de sobrecarga θ_S prefixada é atingida em cerca de 45 segundos, no caso de partida a frio, ou em cerca de 20 segundos, para partida a quente.

9.7 Transitório térmico rápido

Se em um condutor ou cabo isolado a sobrecorrente (curto-circuito) for da ordem de 10 a 20 vezes a respectiva capacidade de condução de corrente, o tempo necessário para atingir uma temperatura perigosa torna-se uma pequena fração da constante de tempo. Assim, por exemplo, com $n = 20$, o tempo necessário para atingir uma sobretemperatura igual ao dobro da máxima sobretemperatura em regime permanente ($\Delta\theta_Z$), isto é, $m = 2$, será, para partida a quente, da Expressão 9.36

$$t = k_T \ln \frac{20^2 - 1}{20^2 - 2} = 0{,}0025\, k_T$$

Para um tempo tão curto, onde não há dissipação de calor, o transitório térmico deve ser considerado em seu início e pode-se escrever a respeito da Figura 9.11 que

$$\frac{\Delta\theta_k}{\Delta t} = \mathrm{tg}\,\alpha = \frac{\Delta\theta_R}{k_T}$$

resultando

$$\Delta\theta_k = \frac{\Delta\theta_R \cdot \Delta t}{k_T} \qquad (9.49)$$

onde $\Delta\theta_K$ é a diferença entre dada temperatura de curto-circuito e a temperatura máxima para serviço contínuo (θ_Z), admitida como temperatura inicial.

A sobretemperatura de regime $\Delta\theta_R$ pode ser definida como a relação entre a potência desenvolvida por efeito Joule (P_J) e a condutância térmica (K), ou seja,

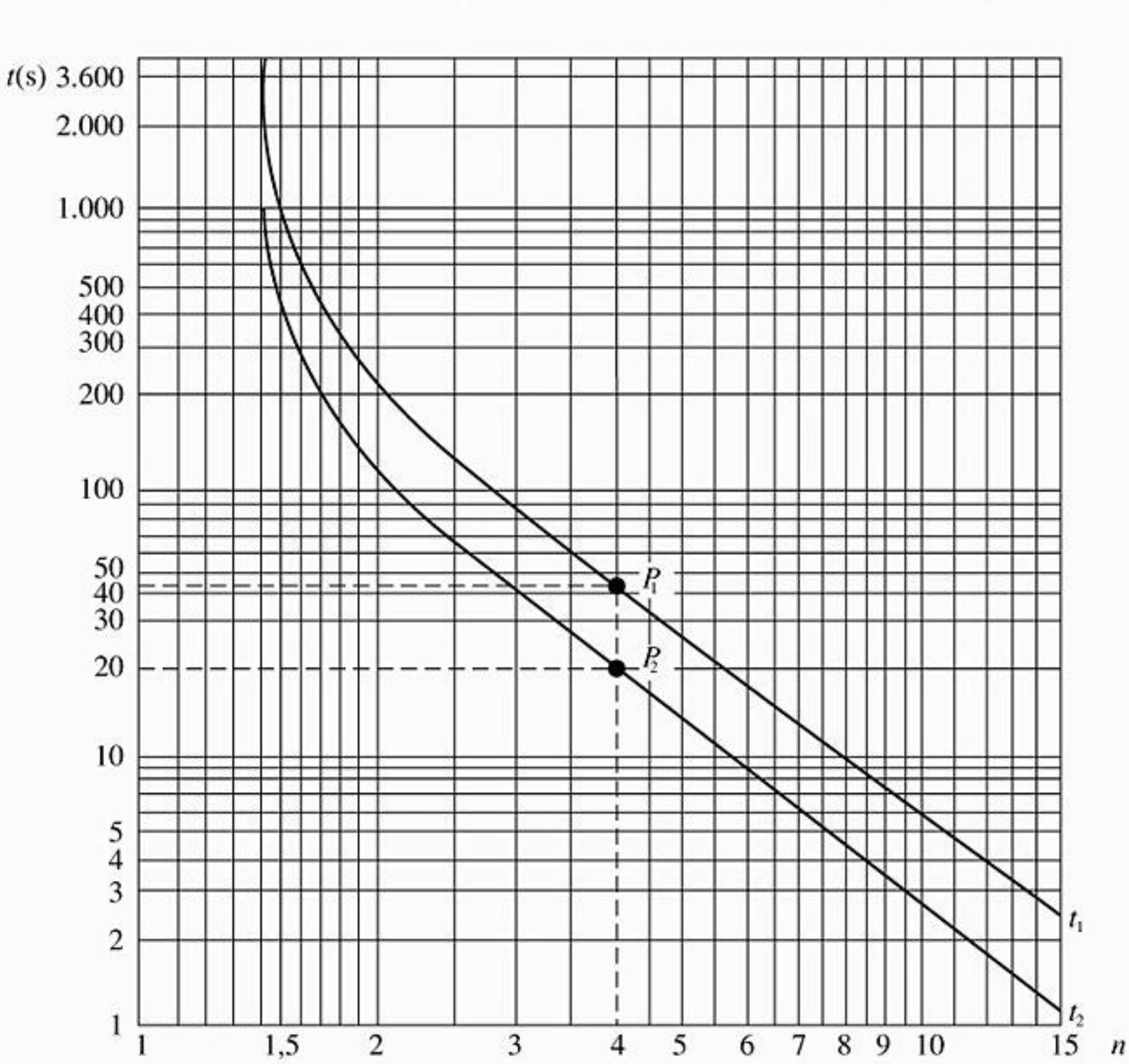


Figura 9.10 ■ Curvas $t = \mathrm{f(n)}$ para $k_T = 300$ s e $m = 2$, considerando partida a frio (t_1) e a quente (t_2)

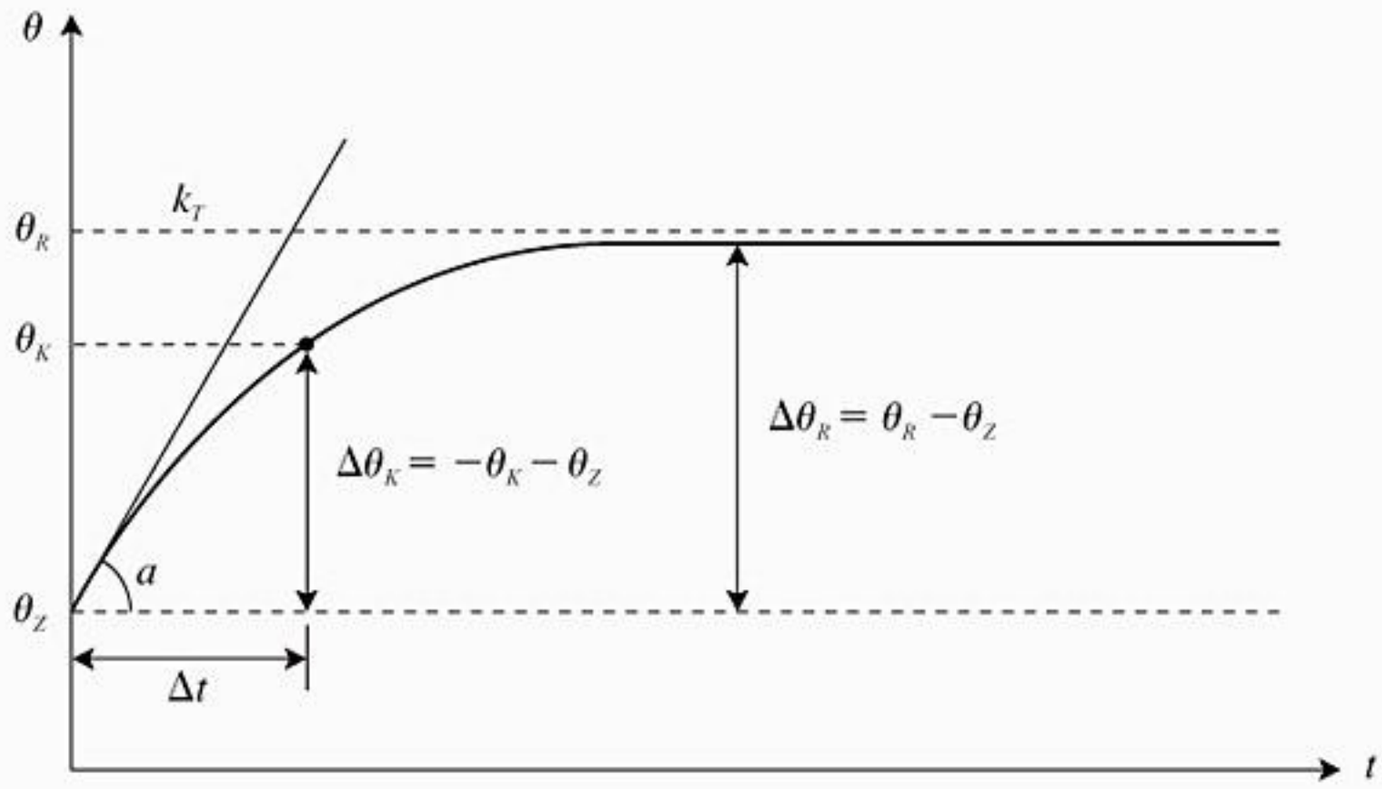


Figura 9.11 ■ Sobrelevação da temperatura para o curto-circuito

$$\Delta\theta_R = \frac{P_J}{K} \tag{9.50}$$

Substituindo a Expressão 9.50 na Expressão 9.49 e considerando o valor da capacidade térmica C, obtido da Expressão 9.37, tem-se

$$\Delta\theta_k = \frac{P_J \Delta t}{C} = \frac{E_J}{C} \tag{9.51}$$

onde E_J é a energia desenvolvida por efeito Joule. Essa expressão indica que a temperatura de curto-circuito $\Delta\theta_k$ é independente da condutância térmica K.

Pode-se admitir que o aquecimento do condutor ou cabo isolado ocorra em um intervalo de tempo tão pequeno que o calor transmitido, do condutor propriamente dito aos meios que o circundam, possa ser desprezado diante do calor armazenado. Nessas condições, toda energia térmica desenvolvida é usada para elevar a temperatura do condutor; é o *aquecimento adiabático*. Assim, pode-se escrever que

$$\Delta\theta_k = \frac{E_J}{C_c} \tag{9.52}$$

onde C_c é a capacidade térmica apenas do condutor.

A energia desenvolvida no condutor é

$$E_J = \int_0^t Ri^2 dt \tag{9.53}$$

sendo R a resistência do condutor.

Da Expressão 9.38, pode-se escrever

$$C_c = c\,\gamma\,Sl \tag{9.54}$$

onde c é o calor específico do material do condutor, γ é a sua massa específica, S é a seção do condutor, e l é o seu comprimento.

Substituindo as expressões 9.53 e 9.54 na Expressão 9.52, obtém-se

$$\int_0^t Ri^2 dt = \Delta\theta_k \cdot c\gamma Sl \tag{9.55}$$

expressão que dá a energia necessária para, em um processo adiabático, elevar a temperatura do condutor de $\Delta\theta_k$, isto é, desde a temperatura máxima para serviço contínuo, θ_Z, até uma temperatura-limite de curto-circuito θ_{cc} prefixada.

As normas de cabos e inclusive a NBR 5410 fixam os valores de θ_{cc} em função do material da isolação, como está apresentado na Tabela 9.15.

A Tabela 9.16 apresenta o resumo das temperaturas características dos condutores de cobre com isolação de PVC, EPR e XLPE.

9.8 Queda de tensão nos circuitos

Introdução

Em uma instalação elétrica, a tensão nos terminais de um equipamento de utilização, qualquer que seja ele, deve ser igual à respectiva tensão nominal, admitindo-se sempre uma pequena variação, fixada, em geral, na norma correspondente. Pode-se afirmar que, sempre que a tensão aplicada varia além dos limites prefixados ($U_N \pm \Delta U$), alguma coisa é sacrificada, seja na vida útil, perdas, seja no desempenho do equipamento. Alguns casos típicos:

- Nos motores de indução, os efeitos principais de uma tensão muito baixa são a redução do conjugado de partida e a elevação da temperatura em condições de carga plena; o primeiro é crítico em acionamentos de cargas de inércia elevada, resultando em períodos muito longos de aceleração, e o segundo reduz a vida útil da isolação do motor.

Tabela 9.15 ■ Temperaturas de curto-circuito (θ_{cc})

Material de isolação	Temperatura-limite de curto-circuito θ_{cc} (°C)
Cloreto de polivinila (PVC)	160
Borracha etileno-propileno (EPR)	250
Polietileno reticulado (XLPE)	250

Tabela 9.16 ■ Temperaturas características dos condutores

Tipos de isolação	Temperatura máxima para serviço contínuo θ_z (°C)	Temperatura-limite de sobrecarga θ_s (°C)	Temperatura-limite de um curto-circuito θ_{cc} (°C)
Cloreto de polivinila (PVC)	70	100	160
Borracha etileno-propileno (EPR)	90	130	250
Polietileno reticulado (XLPE)	90	130	250

- Nas lâmpadas incandescentes, o fluxo luminoso e a vida útil são muito afetados pela tensão aplicada; assim, uma queda de tensão de 10% reduz em cerca de 30% o fluxo luminoso emitido, enquanto uma sobretensão de 10% reduz a menos de um terço a vida útil da lâmpada.
- As lâmpadas de descarga, em geral, são menos afetadas do que as incandescentes por variações de tensão, no que diz respeito à vida útil, porém não são desprezíveis as reduções de fluxo luminoso causadas por redução da tensão aplicada, devendo-se também observar que uma tensão muito baixa pode dificultar ou impedir a partida da lâmpada.
- Quedas de tensão diferentes nas fases provocam desequilíbrio nas tensões dos circuitos trifásicos, com graves conseqüências, principalmente nos motores trifásicos de indução, onde a seqüência negativa atua freando a rotação do rotor, produzindo acentuadas perdas Joules e vibrações no eixo do rotor.

A queda de tensão deve ser calculada durante o projeto, quer em condições de funcionamento normal dos circuitos quer considerando a partida de motores, para que se possa verificar se a tensão permanecerá dentro dos limites tolerados. A Figura 9.12 dá um exemplo das quedas que ocorrem em uma instalação elétrica em operação.

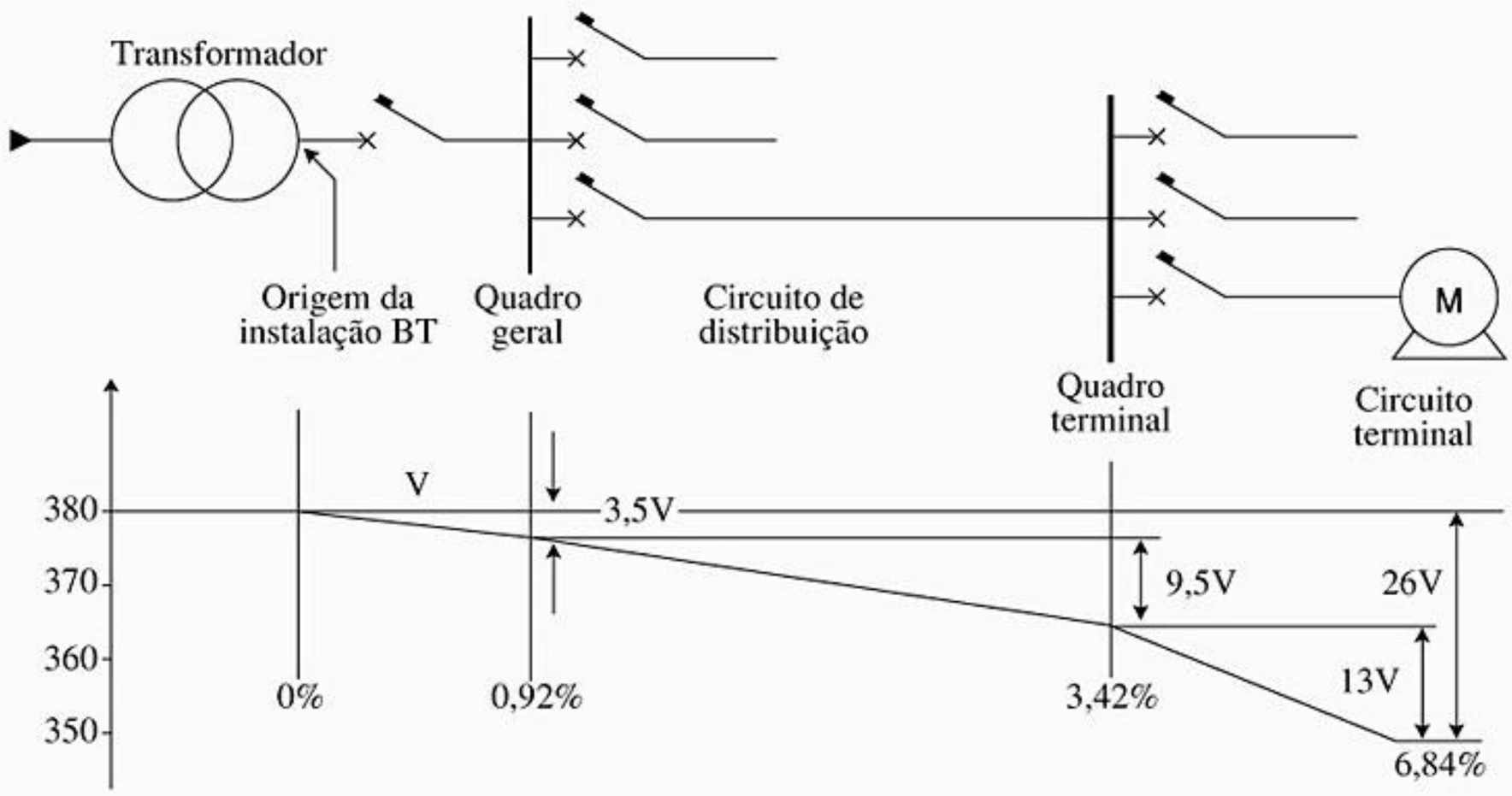


Figura 9.12 ■ Exemplo típico de queda de tensão em instalação *BT*

Cálculos de queda de tensão

A queda de tensão em um circuito com carga concentrada na extremidade (ver Figura 9.13) pode ser dada, como apresentado na Seção "Circuito com carga concentrada na extremidade", no Capítulo 2, pela expressão

$$\Delta U = t \cdot I_B l\,(r \cos \Phi + x \operatorname{sen} \Phi) \qquad (9.56)$$

onde ΔU é a queda de tensão (V), I_B é a corrente de projeto do circuito (A), cos ϕ é o fator de potência da carga, r é resistência do condutor do circuito (Ω/km), x é a reatância (Ω/km), l é o comprimento do circuito (km), e t é um fator que vale 2 para circuito monofásico e $\sqrt{3}$ para circuito trifásico.

Fazendo,

$$\overline{\Delta U} = \frac{\Delta U}{I_B \cdot l} = t(r \cos \Phi + x \operatorname{sen} \Phi)$$

onde as Tabelas 9.17 e 9.18 dão, para as diversas seções normalizadas de condutores, as quedas de tensão unitárias, $\overline{\Delta U}$ isto é

$$\overline{\Delta U} = t(r \cos \Phi + x \operatorname{sen} \Phi) \qquad (9.57)$$

considerando condutores isolados e cabos uni e multipolares de cobre, em diversos tipos de linhas elétricas, com fatores de potência 0,8 e 0,95 (que são os casos mais comuns).

No caso de um circuito com cargas distribuídas, como está apresentado na Figura 9.14, tem-se, admitindo o mesmo condutor ao longo do circuito e cargas com o mesmo fator de potência, de acordo com a Seção 2.2 (em 'Circuitos com carga distribuída'),

$$\Delta U = t(r \cos \Phi + x \operatorname{sen} \Phi) \sum_{i=1}^{n} I_i \cdot l_i \qquad (9.58)$$

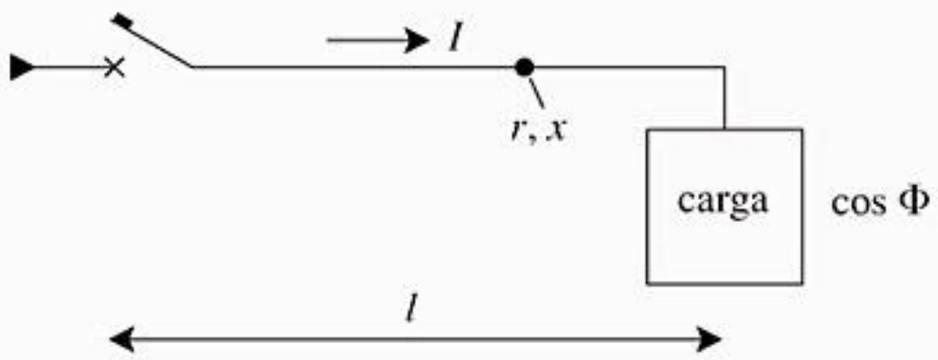


Figura 9.13 ■ Carga concentrada na extremidade do circuito

As expressões da queda de tensão em função da queda de tensão unitária, $\overline{\Delta U}$, podem ser escritas, das expressões 9.56, 9.57 e 9.58:

Para circuito com carga concentrada na extremidade

$$\Delta U = \overline{\Delta U} \times I_B \times l \qquad (9.59)$$

Para circuito com cargas distribuídas

$$\Delta U = \overline{\Delta U} \times \sum_{i=1}^{n} I_i l_i \qquad (9.60)$$

A queda de tensão percentual ($\Delta U\%$), em relação à tensão nominal do circuito (U_N), é definida por

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100 \qquad (9.61)$$

Utilizando-se as expressões 9.59 e 9.61, obtém-se a Expressão 9.62 que dá a queda de tensão unitária para um circuito com uma carga elétrica concentrada na sua extermidade.

$$\overline{\Delta U} = \frac{\Delta U\% U_N}{100 I_B l} \qquad (9.62)$$

Para cargas elétricas distribuídas ao longo do circuito de alimentação, utilizando-se as expressões 9.60 e 9.61, obtém-se a Expressão 9.63, que fornece a queda de tensão unitária.

$$\overline{\Delta U} = \frac{\Delta U\% U_N}{100 \sum_{i=1}^{n} I_i l_i} \qquad (9.63)$$

EXEMPLO

Circuito de distribuição com as seguintes características:

- I_B = 210 A.
- Condutores isolados, cobre com isolação de PVC (Superastic).
- Eletroduto circular de PVC instalação aparente (Tabela 5.28, letra $B1$).
- θ_A = 30 °C (temperatura ambiente).
- Circuito trifásico a três condutores, 220 V, com cos ϕ = 0,8.

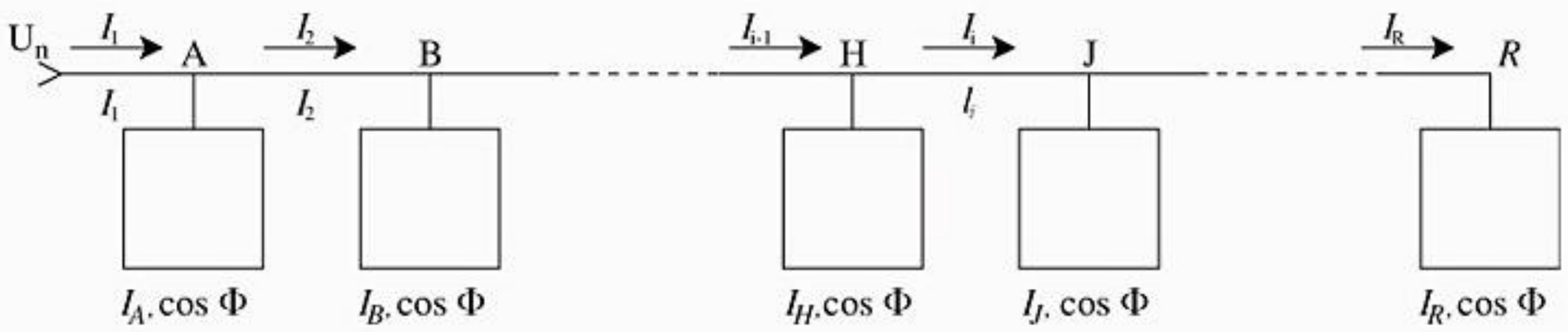


Figura 9.14 ■ Circuito com cargas distribuídas

Tabela 9.17 ■ Queda de tensão em V/A.km (Cortesia da Prysmian)

Seção nominal $(mm)^2$	Eletroduto e eletrocalha[1] (material magnético)		Eletroduto e eletrocalha[1] (material não-magnético)			
	Cabo Superastic, Cabo Superastic Super e Afumex 750 V		Cabo Superastic, Cabo Superastic Super e Afumex 750 V			
	Circuito monofásico e trifásico		Circuito monofásico		Circuito trifásico	
	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95
1,5	23	27,4	23,3	27,6	20,2	23,9
2,5	14	16,8	14,3	16,9	12,4	14,7
4	9,0	10,5	8,96	10,6	7,79	9,15
6	5,87	7,00	6,03	7,07	5,25	6,14
10	3,54	4,20	3,63	4,23	3,17	3,67
16	2,27	2,70	2,32	2,68	2,03	2,33
25	1,50	1,72	1,51	1,71	1,33	1,49
35	1,12	1,25	1,12	1,25	0,98	1,09
50	0,86	0,95	0,85	0,94	0,76	0,82
70	0,64	0,67	0,62	0,67	0,55	0,59
95	0,50	0,51	0,48	0,50	0,43	0,44
120	0,42	0,42	0,40	0,41	0,36	0,36
150	0,37	0,35	0,35	0,34	0,31	0,30
185	0,32	0,30	0,30	0,29	0,27	0,25
240	0,29	0,25	0,26	0,24	0,23	0,21
300	0,27	0,22	0,23	0,20	0,21	0,18
400	0,24	0,20	0,21	0,17	0,19	0,15
500	0,23	0,19	0,19	0,16	0,17	0,14

Notas:
1. As dimensões do eletroduto e da eletrocalha adotadas são tais que a área dos cabos não ultrapassa 40% da área interna destes.
2. Temperatura do condutor = 70 °C.

(a) Como já apresentado no primeiro exemplo da Seção 9.4, o critério da capacidade de condução de corrente resultou em uma seção de 120 mm².

(b) Da Tabela 9.17, eletroduto não magnético, circuito trifásico, cos $\phi = 0{,}8$, obtém-se

$$S = 120\ \text{mm}^2\sqrt{\Delta \text{U}} = 0{,}36\ \text{V/A}\,.\,km$$

Se o circuito tiver um comprimento $l = 100$ m, a queda de tensão será, da Expressão 9.59

$$\Delta U = 0{,}36 \times 210 \times 100 \times 10^{-3} = 7{,}56\ V$$

e da Expressão 9.61

$$\Delta U\% = \frac{7{,}56}{220}\ 100 = 3{,}43\%$$

Se quiser limitar a queda de tensão no circuito a 2%, virá da Expressão 9.62

$$\overline{\Delta U} = \frac{\frac{2 \times 220}{100}}{210 \times 100 \times 10^{-3}} = 0{,}209\ \text{V/A}\,.\,km$$

Na Tabela 9.17, considerando eletroduto não magnético, circuito trifásico, cos $\phi = 0{,}8$, obtém-se que a queda unitária mais próxima inferior é de 0,19 V/A.km, correspondendo à seção de 400 mm², que deve ser a adotada.

Em qualquer projeto elétrico, os dois critérios devem ser empregados, isto é, o critério de carga e o critério de queda de tensão; a escolha definitiva de condutor será o que tiver maior bitola.

Limites de queda de tensão estabelecidos pela NBR 5410

Em qualquer ponto de utilização da instalação, a queda de tensão verificada não deve ser superior aos

Tabela 9.18 ■ Queda de tensão em V/A. km. Temperatura no condutor = 70 °C (Cortesia da Prysmian)

Seção nominal (mm)[1]	Instalação ao ar livre[2]																	
	Cabos Sintenax, Cabos Sintenax Flex e Voltalene																	
	Cabos unipolares[3]														Cabos unipolares ou bipolares		Cabos trifásicos ou tetrapolares	
	Circuito monofásico S D						Circuito trifásico S S D						Circuito trifásico (2)		Circuito monofásico (2)		Circuito trifásico	
	S = 10 cm		S = 20 cm		S = 2D		S = 10 cm		S = 20 cm		S = 2D							
	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95
1,5	23,6	27,8	23,7	27,8	23,4	27,6	20,5	24,0	20,5	24,1	20,3	24,0	20,2	23,9	23,3	27,6	20,2	23,9
2,5	14,6	17,1	14,7	17,1	14,4	17,0	12,7	14,8	12,7	14,8	12,5	14,7	12,4	14,7	14,3	16,9	12,4	14,7
4,0	9,3	10,7	9,3	10,7	9,1	10,6	8,0	9,3	8,1	9,3	7,9	9,2	7,8	9,2	9,0	10,6	7,8	9,1
6,0	6,3	7,2	6,4	7,2	6,1	7,1	5,5	6,3	5,5	6,3	5,3	6,2	5,2	6,1	6,0	7,1	5,2	6,1
10	3,9	4,4	3,9	4,4	3,7	4,3	3,4	3,8	3,4	3,8	3,2	3,7	3,2	3,7	3,6	4,2	3,1	3,7
16	2,6	2,8	2,6	2,8	2,4	2,7	2,2	2,4	2,3	2,5	2,1	2,4	2,0	2,3	2,3	2,7	2,0	2,3
25	1,73	1,83	1,80	1,86	1,59	1,76	1,52	1,59	1,57	1,62	1,40	1,53	1,32	1,49	1,50	1,71	1,31	1,48
35	1,33	1,36	1,39	1,39	1,20	1,29	1,17	1,19	1,22	1,22	1,06	1,13	0,98	1,09	1,12	1,25	0,97	1,08
50	1,05	1,04	1,11	1,07	0,93	0,97	0,93	0,91	0,98	0,94	0,82	0,85	0,75	0,82	0,85	0,93	0,74	0,81
70	0,81	0,76	0,87	0,80	0,70	0,71	0,72	0,67	0,77	0,70	0,63	0,62	0,55	0,59	0,62	0,67	0,54	0,58
95	0,65	0,59	0,71	0,62	0,56	0,54	0,58	0,52	0,64	0,55	0,50	0,47	0,43	0,44	0,48	0,50	0,42	0,43
120	0,57	0,49	0,63	0,52	0,48	0,44	0,51	0,43	0,56	0,46	0,43	0,39	0,36	0,36	0,40	0,41	0,35	0,35
150	0,50	0,42	0,56	0,45	0,42	0,38	0,45	0,37	0,51	0,40	0,38	0,34	0,31	0,30	0,35	0,34	0,30	0,30
185	0,44	0,36	0,51	0,39	0,37	0,32	0,40	0,32	0,46	0,35	0,34	0,29	0,27	0,25	0,30	0,29	0,26	0,25
240	0,39	0,30	0,45	0,33	0,33	0,27	0,35	0,27	0,41	0,30	0,30	0,24	0,23	0,21	0,26	0,24	0,22	0,20
300	0,35	0,26	0,41	0,29	0,30	0,23	0,32	0,23	0,37	0,26	0,28	0,21	0,21	0,19	0,23	0,20	0,20	0,18
400	0,32	0,22	0,37	0,26	0,27	0,21	0,29	0,20	0,34	0,23	0,25	0,19	0,18	0,15	–	–	–	–
500	0,28	0,20	0,34	0,23	0,25	0,18	0,26	0,18	0,32	0,21	0,24	0,17	0,17	0,14	–	–	–	–
630	0,26	0,17	0,32	0,21	0,24	0,16	0,24	0,16	0,29	0,19	0,22	0,15	0,16	0,12	–	–	–	–
800	0,23	0,15	0,29	0,18	0,22	0,15	0,22	0,14	0,27	0,17	0,21	0,14	0,15	0,11	–	–	–	–
1.000	0,21	0,14	0,27	0,17	0,21	0,14	0,20	0,13	0,25	0,16	0,20	0,13	0,14	0,10	–	–	–	–

(continua)

(continuação)

Seção nominal (mm)[1]	Instalação ao ar livre[2]																	
	Cabos Eprotenax, Eprotrenax Grette e Afumex 0,6/1kV																	
	Cabos unipolares[3]														Cabos unipolares ou bipolares		Cabos trifásicos ou tetrapolares	
	Circuito monofásico						Circuito trifásico						Circuito trifásico (2)		Circuito monofásico (2)		Circuito trifásico	
	S = 10 cm		S = 20 cm		S = 2D		S = 10 cm		S = 20 cm		S = 2D							
	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95	FP = 0,8	FP = 0,95
1,5	23,8	28,0	23,9	28,0	23,6	27,9	20,7	24,2	20,7	24,3	20,5	24,1	20,4	24,1	23,5	27,8	20,3	24,1
2,5	14,9	17,4	15,0	17,5	14,7	17,3	12,9	15,1	13,0	15,1	12,8	15,0	12,7	15,0	14,6	17,3	12,7	15,0
4,0	9,4	10,9	9,5	10,9	9,2	10,8	8,2	9,5	8,2	9,5	8,0	9,4	7,9	9,3	9,1	10,8	7,9	9,3
6,0	6,4	7,3	6,4	7,3	6,2	7,2	5,5	6,3	5,6	6,3	5,4	6,2	5,3	6,2	6,1	7,1	5,3	6,2
10	3,9	4,4	4,0	4,4	3,7	4,3	3,4	3,8	3,5	3,8	3,3	3,7	3,2	3,7	3,6	4,2	3,2	3,7
16	2,58	2,83	2,64	2,86	2,42	2,74	2,25	2,46	2,31	2,48	2,12	2,39	2,05	2,35	2,34	2,70	2,03	2,34
25	1,74	1,85	1,81	1,88	1,61	1,77	1,53	1,61	1,58	1,64	1,41	1,55	1,34	1,51	1,52	1,73	1,32	1,50
35	1,34	1,37	1,40	1,41	1,21	1,30	1,18	1,20	1,23	1,23	1,06	1,14	0,99	1,10	1,15	1,26	0,98	1,09
50	1,06	1,05	1,12	1,09	0,94	0,99	0,94	0,92	0,99	0,95	0,83	0,87	0,76	0,83	0,86	0,95	0,75	0,82
70	0,81	0,77	0,88	0,80	0,70	0,71	0,72	0,68	0,78	0,70	0,63	0,63	0,56	0,59	0,63	0,67	0,54	0,58
95	0,66	0,59	0,72	0,62	0,56	0,54	0,59	0,52	0,64	0,55	0,50	0,48	0,43	0,44	0,48	0,50	0,42	0,44
120	0,57	0,49	0,63	0,53	0,48	0,45	0,51	0,44	0,56	0,46	0,43	0,40	0,36	0,36	0,40	0,41	0,35	0,35
150	0,50	0,42	0,57	0,46	0,42	0,38	0,45	0,38	0,51	0,41	0,39	0,34	0,32	0,31	0,35	0,35	0,30	0,30
185	0,44	0,36	0,51	0,39	0,38	0,32	0,40	0,32	0,46	0,35	0,34	0,29	0,27	0,26	0,30	0,29	0,26	0,25
240	0,39	0,30	0,45	0,33	0,33	0,27	0,35	0,27	0,41	0,30	0,30	0,24	0,23	0,21	0,26	0,24	0,22	0,21
300	0,35	0,26	0,41	0,29	0,30	0,24	0,32	0,24	0,37	0,26	0,28	0,21	0,21	0,18	0,23	0,20	0,20	0,18
400	0,31	0,23	0,38	0,36	0,27	0,21	0,29	0,21	0,34	0,23	0,25	0,19	0,19	0,16	–	–	–	–
500	0,28	0,20	0,34	0,23	0,25	0,18	0,26	0,18	0,32	0,21	0,24	0,17	0,17	0,14	–	–	–	–
630	0,26	0,17	0,32	0,21	0,24	0,16	0,24	0,16	0,29	0,19	0,22	0,15	0,16	0,12	–	–	–	–
800	0,23	0,15	0,29	0,18	0,22	0,15	0,22	0,14	0,27	0,17	0,21	0,14	0,15	0,11	–	–	–	–
1.000	0,21	0,14	0,27	0,17	0,21	0,14	0,21	0,13	0,25	0,16	0,20	0,13	0,14	0,10	–	–	–	–

Notas:

1. Válido para instalação em eletroduto não-magnético e diretamente enterrado.
2. Aplicável para fixação direta na parede ou teto, em calha aberta, ventilada ou fechada, em poços, em espaço de construção, em bandeja, em prateleira, em suportes sobre isoladores e em linha aérea.
3. Aplicável também aos condutores isolados Cabo Superastic, Cabo Superastic Super e Afumex 750V sobre isoladores e em linha aérea.

seguintes valores, dados em relação ao valor da tensão nominal da instalação:

(a) 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT, no caso de transformador de propriedade da(s) unidade(s) consumidora(s);
(b) 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT da empresa distribuidora de eletricidade, quando o ponto de entrega for aí localizado;
(c) 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos de ponto de entrega com fornecimento em tensão secundária de distribuição;
(d) 7%, calculados a partir dos terminais de saída do gerador, no caso de grupo gerador próprio.

Esses limites de queda de tensão são válidos quando a tensão nominal dos equipamentos de utilização previstos for coincidente com a tensão nominal da instalação. Em nenhum caso a queda de tensão nos circuitos terminais pode ser superior a 4%.

Nos casos (a), (b) e (d), quando as linhas principais da instalação tiverem um comprimento superior a 100 m, as quedas de tensão podem ser aumentadas de 0,005% por metro de linha superior a 100 m, sem que, no entanto, essa suplementação seja superior a 0,5%.

A norma admite quedas de tensão superiores às indicadas, no caso de equipamentos com correntes de partida elevadas, durante o período de partida, desde que dentro dos limites permitidos em suas respectivas normas e nas recomendações das concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Os esquemas da Figura 9.15 elucidam os casos (a) até (d) descritos anteriormente.

9.9 Seção do condutor neutro

A NBR 5410 faz considerações sobre o dimensionamento do condutor neutro em função da taxa de terceira harmônica (e suas múltiplas) presentes no circuito. Dessa forma, são consideradas três situações: taxa inferior a 15%, taxa entre 15% e 33% e taxa superior a 33%.

Por que os números 15 e 33 por cento são utilizados?

Em primeiro lugar, vamos rever a definição de taxa de distorção harmônica (THD), que é dada por $\text{THD} = 100\ I_n/I_1$, onde I_n é o valor eficaz de uma corrente harmônica de ordem "n" e I_1 é o valor eficaz da corrente fundamental. Assim, 15% refere-se ao $\text{THD}_3 = 15\%$. Por exemplo, se a corrente fundamental em um circuito é *100* A e a corrente de 3ª harmônica é 15 A, teremos um $\text{THD}_3 = 100\ I_n/I_1 = 100 \times 15 / 100 = 15\%$.

Em segundo lugar, como se sabe, as correntes de ordem 3 e seus múltiplos que circulam pelas fases somam-se algebricamente no neutro, quando este existir, obviamente.

Assim, se tivermos um circuito trifásico com neutro, onde a corrente fundamental nas fases é 100 A e a corrente de 3ª harmônica é 15 A ($\text{THD}_3 = 15\%$), a corrente no neutro será $I_{N3} = 15 + 15 + 15 = 45$ A, inferior à corrente total na fase, permitindo assim, sob certas condições indicadas a seguir, que possa ser reduzida a seção do neutro em relação à seção do condutor de fase.

Em outra situação, poderíamos ter, por exemplo, um circuito trifásico com neutro, onde a corrente fundamental nas fases é 100 A e a corrente de 3ª harmônica é 33 A ($\text{THD}_3 = 33\%$). Nesse caso, a corrente no neutro será $I_{N3} = 33 + 33 + 33 = 99$ A, valor praticamente igual à corrente total na fase, indicando assim que a seção do neutro deve ser igual à seção do condutor de fase.

E, por fim, poderíamos ter um caso em que, por exemplo, em um circuito trifásico com neutro, a corrente fundamental nas fases é 100 A e a corrente de 3ª harmônica é 50 A ($\text{THD}_3 = 50\%$). Nessa hipótese, a corrente no neutro será $I_{N3} = 50 + 50 + 50 = 150$ A, valor maior que a corrente total na fase, indicando assim que a seção do neutro deve ser maior do que a seção do condutor de fase.

O neutro pode ser menor que o condutor de fase

A norma admite que em um circuito trifásico com neutro, onde os condutores de fase tenham seção maior que 25 mm², a seção do neutro pode ser menor que a do condutor de fase, limitada aos valores da Tabela 9.19, desde que (1) o circuito seja equilibrado, (2) a taxa de 3ª harmônica e múltiplas seja menor que 15% e (3) que o neutro seja protegido contra sobrecorrentes. Ora, na prática, garantir o atendimento a essas três condições não é nada fácil e, conseqüentemente, reduzir a seção do neutro deve ser uma decisão tomada somente após uma análise muito criteriosa do caso. Note que a norma não obriga a redução do neutro, mas apenas deixa uma possibilidade para que essa redução aconteça.

Tabela 9.19 ■ Seção reduzida do condutor neutro

Taxa de 3ª harmônica e múltiplas menor que 15 por cento	Taxa de 3ª harmônica e múltiplas entre 15 por cento e 33 por cento inclusive	Taxa de 3ª harmônica e múltiplas superior a 33 por cento
O neutro pode ser menor que o fase.	O neutro pode ser igual ao fase.	O neutro pode ser maior que o fase.

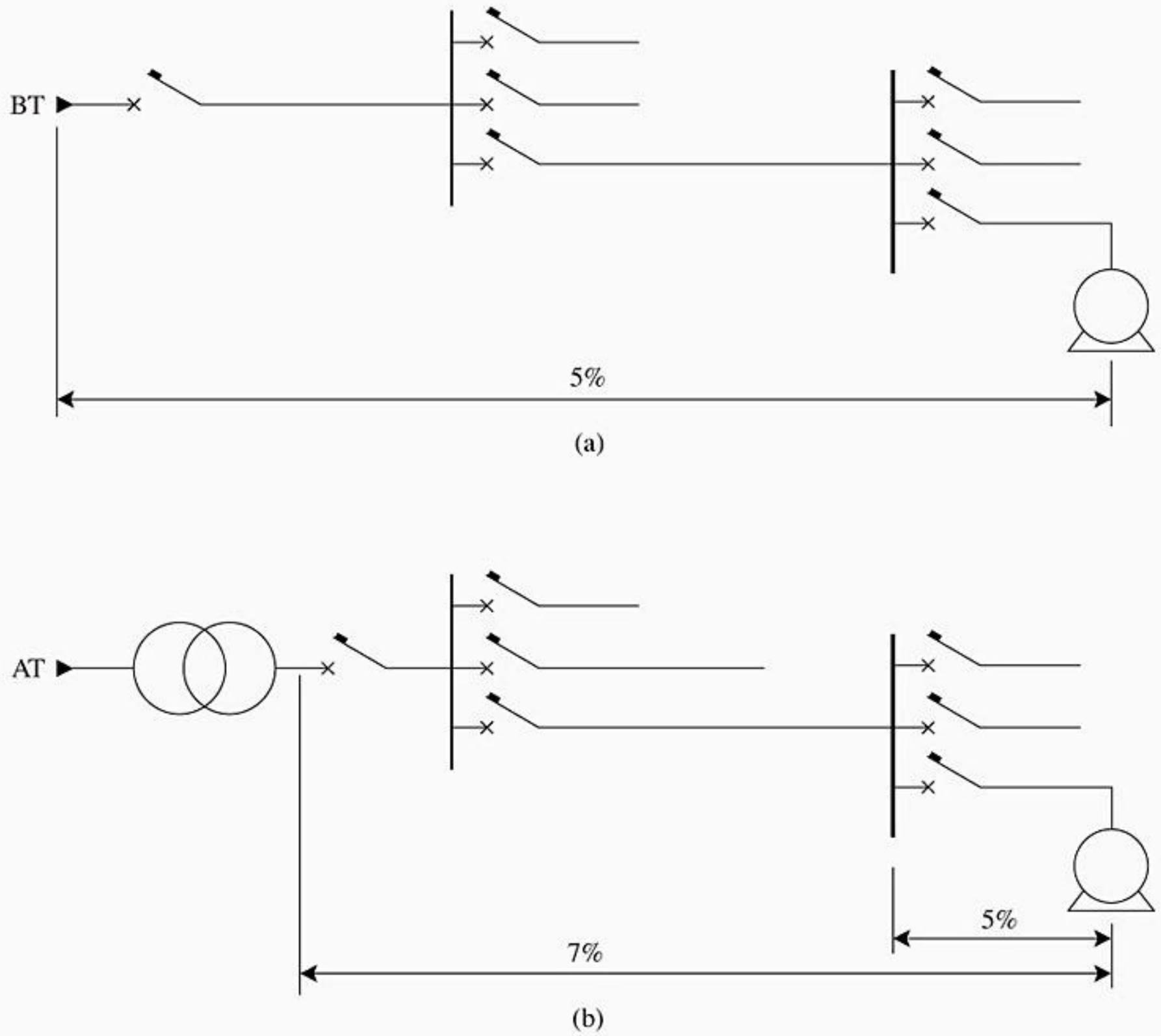


Figura 9.15 ■ Limites de queda de tensão: (a) instalação alimentada por rede de distribuição pública em baixa tensão; (b) instalação alimentada por subestação de transformação ou por transformador próprio.

EXEMPLO

Seja um transformador de 1.000 kVA, que alimenta inúmeros computadores, central telefônica e toda a sorte de equipamentos de tecnologia de informação. Tais equipamentos são grandes geradores de terceiras harmônicas, que têm uma influência significativa sobre o dimensionamento dos condutores neutros, conforme visto anteriormente.

Seja um circuito de três fases com neutro instalado sozinho no interior de uma bandeja, com temperatura ambiente de 30 °C, onde são utilizados cabos unipolares em trifólio com isolação em EPR.

As correntes máximas nos condutores de fase que estão presentes nesse circuito são de ordens 1 (fundamental), 3 (terceira harmônica), 5 (quinta) e 7 (sétima), com intensidades (valores eficazes) de, respectivamente, 773,0 A, 64,0 A, 24,8 A e 12,8 A. Nessas condições, a corrente de projeto I_B a considerar no cálculo da seção dos condutores desse circuito é calculada por:

$$I_B = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} =$$

$$\sqrt{(773{,}0)^2 + (64{,}0)^2 + (24{,}8)^2 + (12{,}8)^2} = 776{,}1 \text{ A}$$

Sendo a corrente de terceira harmônica no condutor de fase igual a 64,0 A e a corrente fundamental de fase é 773,0 A, temos que o $THD_3 = 64{,}0 / 773{,}0 \times 100\% = 8{,}3\%$.

Em circuitos trifásicos com neutro com taxas de terceiras harmônicas e suas múltiplas superiores a 15% nos condutores de fase, o circuito deve ser considerado como constituído de quatro condutores carregados e deve ser aplicado um fator de correção devido ao carregamento do neutro igual a 0,86, independentemente do método de instalação. Esse fator é aplicado sobre a capacidade de corrente válida para 3 condutores carregados. Como em nosso exemplo o THD_3 é menor do que 15%, então o circuito será considerado como apenas de três condutores carregados.

Assim, entrando com o valor de $I_B = 776{,}1$ na Tabela 9.7, coluna de três condutores carregados, método *F*, temos que a seção dos condutores de fase será $S_{fase} = 400 \text{ mm}^2$ ($I_Z = 823$ A).

Se admitirmos que esse circuito trifásico com neutro é equilibrado e que o neutro será protegido contra sobrecorrentes, uma vez que a taxa de 3ª harmônica (8,3%) é menor que 15%, então a seção do neutro pode ser menor que a do condutor de fase. Entrando na Tabela 9.20, então $S_N = 185\ mm^2$.

Assim, a especificação desse alimentador será $3 \times \#\ 400\ mm^2 + \#\ 185\ mm^2$ (o condutor de proteção teria seção de $\#\ 240\ mm^2$).

O neutro pode ser igual ao condutor de fase

Em 6.2, admite-se que, respectivamente, em um circuito trifásico com neutro e em um circuito duas fases com neutro, a seção do neutro pode ser igual a do condutor de fase desde que a taxa de terceira harmônica (e suas múltiplas) presentes no circuito seja maior ou igual a 15% e menor ou igual a 33%.

O neutro deve ser maior que a fase

Em 6.2, admite-se que em um circuito trifásico com neutro ou em um circuito duas fases com neutro, a seção do neutro pode ser maior que a do condutor de fase desde que a taxa de terceira harmônica (e suas múltiplas) presentes no circuito seja maior ou igual a 33%. Tais taxas são muito comuns em circuitos que alimentam, por exemplo, computadores e outros equipamentos de tecnologia de informação.

De acordo com o anexo F da norma, a seção do neutro nessas condições pode ser determinada calculando-se a corrente por:

$$I_N = f_h\, I_B$$

Onde I_N é a corrente no neutro, considerando a presença das harmônicas de 3ª ordem e suas múltiplas; f_h é um fator obtido na Tabela 9.21; e I_B é a corrente de projeto no condutor de fase, incluindo todas as harmônicas, calculada por:

$$I_B = \sqrt{I_2^2 + I_2^2 + ... + I_n^2}$$

A norma faz uma observação que é muito útil na prática e que resulta em um dimensionamento a favor da segurança: na falta de estimativa mais precisa da taxa de 3ª harmônica, recomenda-se a adoção dos maiores fatores da tabela, ou seja, 1,73 e 1,41, respectivamente, para circuitos trifásicos e duas fases.

EXEMPLO

Seja um *no-break* de 100 kVA, trifásico, 220/380 V, que alimenta computadores, central telefônica e toda a sorte de equipamentos de tecnologia de informação. Como sabemos, tais equipamentos são grandes geradores de terceiras harmônicas, que têm uma influência significativa sobre o dimensionamento dos condutores neutros, conforme visto anteriormente..

Seja um circuito de 3 fases com neutro instalado sozinho no interior de uma bandeja, com temperatura ambiente de 30°C, onde são utilizados cabos unipolares em trifólio com isolação em EPR.

As correntes máximas nos condutores de fase que estão presentes nesse circuito são de ordens 1 (fundamental), 3 (terceira harmônica), 5 (quinta) e 7 (sétima), com intensidades (valores eficazes) de, respectivamente, 70 A, 45 A, 28 A e 12 A (não consideraremos as demais harmônicas). Nessas condições, a corrente de projeto I_B a considerar no cálculo da seção dos condutores desse circuito é calculada por:

$$I_B = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} =$$

$$= \sqrt{(70)^2 + (45)^2 + (28)^2 + (12)^2} = 88{,}6\ A$$

Sendo a corrente de terceira harmônica no condutor de fase igual a 45 A e a corrente fundamental de fase 70 A, o $THD_3 = 45 / 70 \times 100\% = 64{,}3\%$.

Tabela 9.20 ■ Seção do condutor neutro

Seção dos condutores fase (mm^2)	Seção mínima do condutor neutro (mm^2)
S ⩽ 25	S
35	25
50	25
70	35
95	50
120	70
150	70
185	95
240	120
300	150
400	185

A norma estabelece que, em circuitos trifásicos com neutro com taxas de terceiras harmônicas e suas múltiplas superiores a 15% nos condutores de fase, o circuito deve ser considerado como constituído por quatro condutores carregados e deve ser aplicado um fator de correção devido ao carregamento do neutro igual a 0,86, independentemente do método de instalação. Esse fator é aplicado sobre a capacidade de corrente válida para três condutores carregados.

Em nosso caso, a taxa de 3ª harmônica é igual a 64,3% e, dessa forma, a corrente fictícia de projeto (I'_B) a ser utilizada para determinar a seção do condutor de fase será $I'_B = 88{,}6/0{,}86 = 103{,}0$ A. Entrando com esse valor na Tabela 9.7, coluna de 3 condutores carregados, método *F*, vemos que a seção dos condutores de fase será $S_{\text{fase}} = 25$ mm² ($I_Z = 135$ A).

Em nosso caso, uma vez que a taxa de terceira harmônica presente no circuito (64,3%) é maior do que 33%, então a seção do neutro será maior do que a do condutor de fase e o cálculo será feito de acordo com o Anexo *F* da NBR 5410.

Entrando com $\text{THD}_3 = 64{,}3\%$ na Tabela 9.21, temos $f_h = 1{,}64$.

Então, $I_{BN} = f_h\, I_B = 1{,}64 \times 88{,}6 = 145{,}3$ A.

Entrando com esse valor na Tabela 9.7, coluna de 3 condutores carregados, método *F*, vemos que a seção dos condutor neutro será $S_N = 35$ mm² ($I_Z = 169$ A)

Assim, a especificação deste alimentador será 3 × # 25 mm² + # 35 mm² (o condutor de proteção teria seção de # 16 mm²).

Tabela 9.21 ■ Fator f_h para a determinação da corrente de neutro

Taxa de 3ª harmônica (%)	f_h	
	Circuito trifásico com neutro	Circuito com duas fases e neutro
33 a 35	1,15	1,15
36 a 40	1,19	1,19
41 a 45	1,24	1,23
46 a 50	1,35	1,27
51 a 55	1,45	1,30
56 a 60	1,55	1,34
61 a 65	1,64	1,38
≥ 66	1,73	1,41

EXERCÍCIOS

1. Do que dependem os danos que uma isolação de um condutor pode sofrer?

2. O que é a *capacidade de condução de corrente* de um condutor para determinada condição de instalação e para dada temperatura ambiente?

3 Qual é a vida útil estimada de um cabo elétrico? Qual é a relação entre a diminuição da vida útil com o aumento da temperatura acima da temperatura máxima para serviço contínuo?

4. Que tipos de circuitos caracterizam 2 ou 3 condutores carregados?

5. Quais são os fatores de correção da capacidade de condução de corrente?

6. Quais são as temperaturas-limite para situações de sobrecarga para o PVC, EPR e XLPE como materiais de isolação?

7. Quais são as temperaturas-limite para situações de curto-circuito para o PVC, EPR e XLPE como materiais de isolação?

8. Quais são os efeitos de quedas de tensões diferentes, que ocasionam desequilíbrio nas tensões dos circuitos trifásicos, nos motores de trifásicos de indução?

9. Quais são os limites de queda de tensão para os diversos tipos de instalação definidos pela NBR 5410?

10. Em que casos o condutor de neutro deve ter a seção menor, igual e maior que a dos condutores de fase?

10

Cálculo de correntes de falta

10.1 Introdução[1]

Nas instalações elétricas, mesmo nas mais bem projetadas e executadas, ocorrem faltas que resultam em sobrecorrentes elevadas. Nessas condições, os dispositivos de proteção devem atuar com rapidez e segurança, isolando as faltas com o mínimo de dano às linhas e aos equipamentos alimentados e, se possível, sem alterar substancialmente o funcionamento global da instalação. Os cabos, as barras, as chaves, bem como os demais componentes, devem ser capazes de suportar, por um determinado tempo, os efeitos térmicos e mecânicos resultantes da circulação da corrente de curto-circuito.

A avaliação das correntes de falta passíveis de ocorrer em uma instalação é, a rigor, um problema bastante complexo, que depende de diversos fatores, *muitos dos quais totalmente imprevisíveis*. No caso de falta entre condutores vivos, o valor da corrente (em particular, seu valor de crista) depende, no caso de instalação de baixa tensão:

- Da impedância de toda a rede de distribuição de média e de alta tensão que alimenta o defeito.
- Do tipo e da potência da fonte ou das fontes envolvidas.
- Da impedância das linhas de baixa tensão até o local do defeito.
- Da resistência (impedância) da falta (contato geralmente mais ou menos perfeito), dependendo do arco elétrico.
- Do instante do início da falta com relação à onda senoidal da tensão aplicada (fase inicial).

Na prática, admite-se um contato direto entre os condutores vivos, isto é, um curto-circuito, além de algumas hipóteses simplificadoras que conduzem à chamada *corrente de curto-circuito presumida*, valor geralmente superior à máxima corrente de falta possível.

10.2 As fontes de correntes de falta

As correntes de freqüência industrial (50/60 Hz) que circulam durante uma falta provêm de máquinas elétricas girantes. Os capacitores de potência também podem 'produzir' correntes de falta (ou de manobra) transitórias extremamente altas, porém, geralmente de curta duração e de freqüência muito superior à industrial.

São considerados *fontes de correntes de falta* os geradores síncronos, os motores e os compensadores síncronos, os motores e os sistemas das concessionárias de energia elétrica etc. A corrente de falta produzida por uma máquina girante (gerador ou motor) é limitada pela impedância interna da máquina, que é variável com o tempo, e pela impedância existente entre a máquina e a falta.

Quando ocorre uma falta (defeito) nos terminais de um *gerador síncrono*, a corrente resultante começa com um valor elevado e, decorrido algum tempo, decresce a um valor de regime permanente.

Se o gerador continuar a ser acionado por sua máquina motriz e a ter seu campo excitado por uma fonte externa, o valor de regime da corrente de falta permanecerá o mesmo até que atue um dispositivo de proteção.

Os *motores síncronos* fornecem corrente para uma falta de modo análogo aos geradores síncronos.

1. Ver, na Seção 1.3, as definições de falta, curto-circuito, corrente de falta e corrente de curto-circuito.

Quando uma falta faz que a tensão de alimentação caia, o motor passa a receber menos potência para acionar sua carga e, ao mesmo tempo, a tensão induzida interna faz circular corrente para a falta. A inércia do motor e a carga agem como máquina motriz e, mantida a excitação do campo, o motor passa a agir como gerador, alimentando a corrente de falta. Esta diminuirá gradativamente, com o decréscimo da rotação do rotor da máquina.

A contribuição dos *motores de indução tipo gaiola* também resulta da ação da inércia do rotor após a ocorrência da falta. Nesse caso, o fluxo de campo é produzido por indução ao estator, em vez de sê-lo por bobina de campo. Como esse fluxo decai com a remoção da fonte de tensão, devido à ocorrência da falta, a contribuição desses motores desaparece rapidamente. A excitação de campo não é mantida, portanto, não aparece um valor considerável para a corrente de falta produzida, como no caso das máquinas síncronas.

Os *motores de indução do tipo anéis*, que funcionam normalmente com os anéis no rotor curto-circuitados, atuarão em uma falta de modo idêntico aos do tipo gaiola. Ocasionalmente, motores maiores, que funcionam com resistência externa nos circuitos do rotor, poderão ter desprezada sua contribuição para uma corrente de falta.

Os geradores síncronos do *sistema de transmissão ou da concessionária* constituem também uma fonte de suprimento de corrente de falta.

10.3 Análise da corrente de curto-circuito

Quando ocorre um curto-circuito em uma instalação, estabelece-se instantaneamente um percurso de baixa impedância entre a fonte (ou as fontes) e o ponto de falta, produzindo-se, então, uma corrente (de curto-circuito) bastante elevada em relação às correntes 'normais' da instalação, que pode atingir valores altíssimos em um tempo extremamente curto.

O *fator de potência de curto-circuito* (cos Φ_k) é determinado a partir da reatância indutiva e da resistência totais do percurso da corrente de curto-circuito, incluindo todos os componentes existentes entre a fonte (também considerada) e o ponto em que se dá a falta.

Assim, em um sistema em que a reatância seja muito maior que a resistência, a corrente de curto-circuito será praticamente de 90° em relação à tensão. Se o curto ocorrer no instante em que a tensão esteja passando por seu valor de crista, a corrente instantânea de curto começará de zero e traçará uma senóide simétrica em relação ao mesmo eixo da tensão, como mostra a Figura 10.1(a).

Se, no mesmo sistema, o curto ocorrer no instante em que a tensão estiver passando por zero, a corrente de curto começará de zero, porém, não poderá ter o mesmo eixo de simetria que a tensão, porque ficaria em fase com ela. A senóide da corrente deverá estar 90° atrasada em relação à da tensão, o que só poderá ocorrer se o seu eixo de simetria estiver deslocado do eixo original, como mostra a Figura 10.1(b).

Os dois casos mostrados na Figura 10.1 são extremos: o caso (a) mostra uma corrente simétrica e o caso (b), uma corrente completamente assimétrica. Se em um sistema com cos $\Phi_k = 0$ o curto acontecer em um instante em que a tensão não estiver passando nem por zero nem por seu valor de crista, sempre haverá um deslocamento do eixo da corrente, cujo valor dependerá do instante em que ocorre a falta em relação à onda de tensão.

Em sistemas onde a resistência não seja desprezível em relação à reatância, o deslocamento da senóide da corrente de curto-circuito também variará de zero até um valor máximo. No entanto, o ponto na onda de tensão no qual o curto deverá ocorrer, para que se tenha máxima assimetria, dependerá da relação entre a reatância indutiva e a resistência do sistema. A máxima assimetria será obtida quando o curto se der no instante correspondente ao ângulo (90° + Φ_k), medido a partir do ponto de tensão zero; a corrente será simétrica quando o curto ocorrer a 90° desse ponto. Como exemplo, considere um circuito

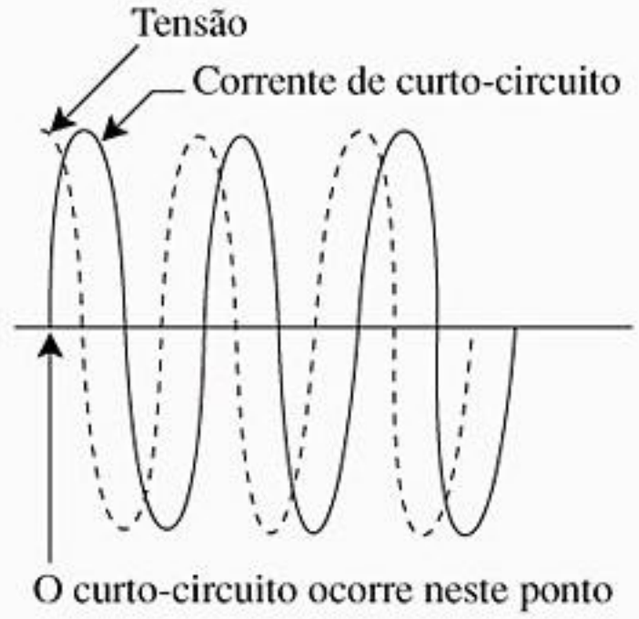


Figura 10.1 ▪ Correntes de curto-circuito em um sistema com fator de potência praticamente igual a zero; (a) corrente simétrica, (b) corrente totalmente assimétrica

cuja resistência seja igual à reatância, isto é, cuja relação entre reatância e resistência seja igual a 1. A defasagem entre tensão e corrente será $\Phi_k = 45°$ e a máxima assimetria será obtida quando o curto-circuito ocorrer a $90 + 45 = 135°$ do ponto zero da onda de tensão, como mostra a Figura 10.2.

Para simplificar a análise, considere a corrente de curto-circuito assimétrica como formada por duas componentes: uma *alternada* (senoidal) e outra *contínua*. A soma de ambas dará a corrente assimétrica real, como mostra a Figura 10.3.

É importante observar que os exemplos apresentados nas figuras 10.1 a 10.3 têm apenas a finalidade de ilustrar a análise do fenômeno. Nos circuitos reais, o componente 'contínuo' decresce rapidamente.

O valor do componente contínuo da corrente de curto-circuito depende do instante em que ocorre a falta, podendo variar de zero até um valor máximo igual ao valor de crista do componente alternado (Figura 10.3). Quando o curto não é totalmente assimétrico, o valor do componente contínuo é igual ao da corrente simétrica no instante da falta, como mostra a Figura 10.4.

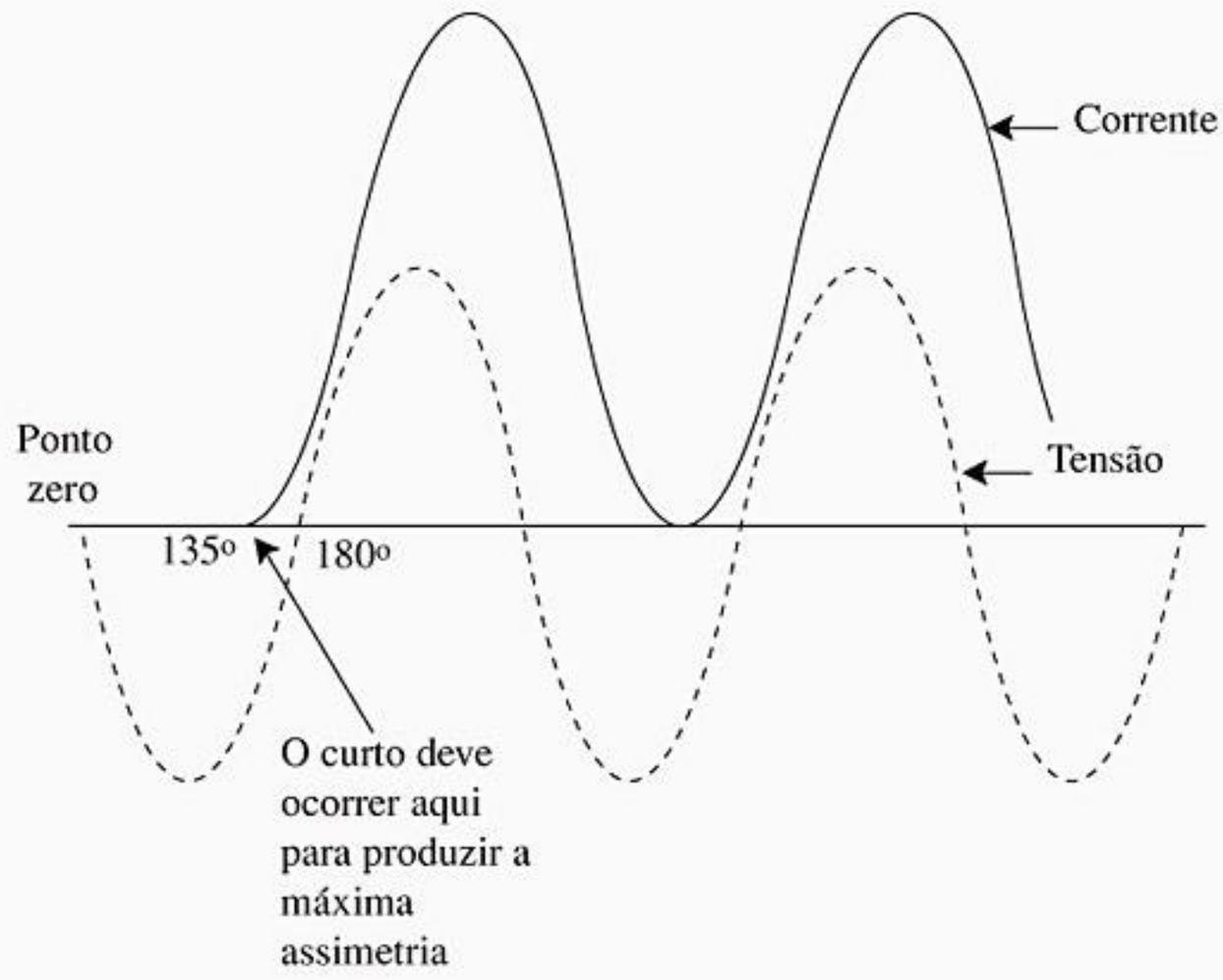


Figura 10.2 ■ Curto-circuito com máxima assimetria em um circuito com a resistência igual à reatância

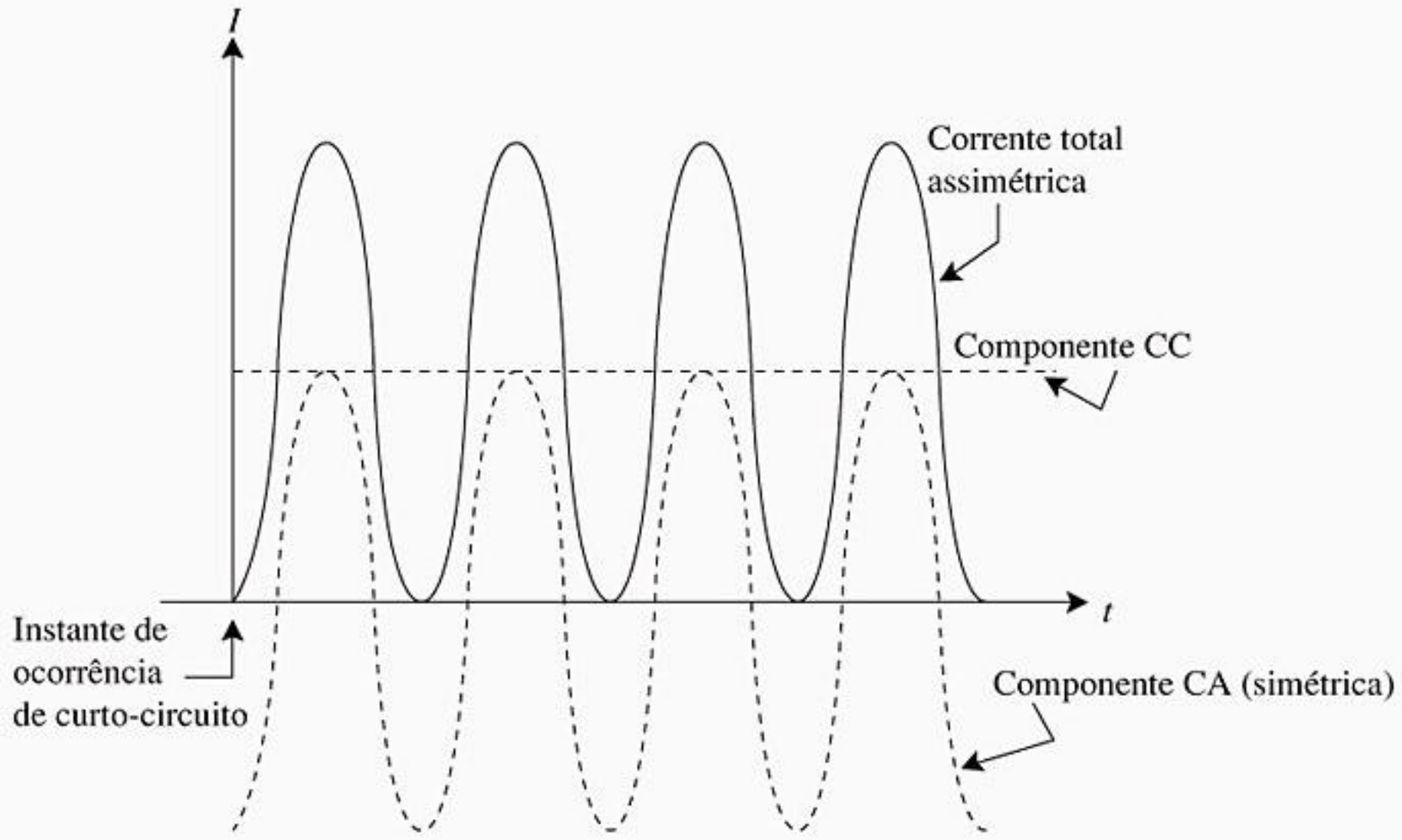


Figura 10.3 ■ Componentes alternado e contínuo de uma corrente de curto-circuito assimétrica

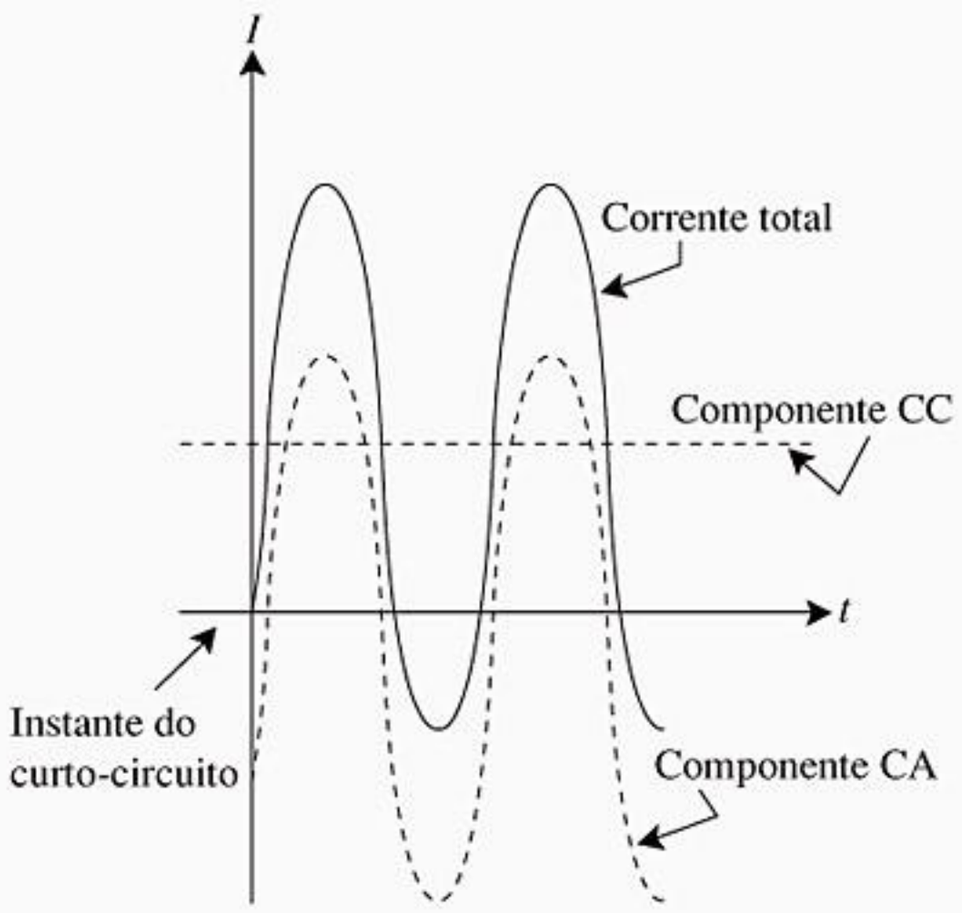


Figura 10.4 ▪ Valor do componente contínuo da corrente de curto-circuito

O componente contínuo não continua a circular com um valor constante, a menos que a resistência do circuito seja zero. Como geralmente não existe tensão contínua no sistema para manter a circulação desse componente, a energia correspondente será dissipada no circuito sob a forma de perda Joule através da resistência. Se esta for nula, o componente contínuo circulará com um valor constante até que o circuito seja interrompido. No entanto, na prática, todos os circuitos possuem resistência, e o componente contínuo — chamado 'aperiódico' — decrescerá; somando-o ao componente alternado, tem-se a *corrente assimétrica*, como mostra a Figura 10.5.

Quando se anula o componente aperiódico, tem-se uma corrente de curto-circuito simétrica.

A corrente mostrada na Figura 10.5 é, como apresentado na Seção 2.6, análoga à que circula em um circuito RL provido de uma chave (Figura 10.6), a partir do instante em que esta é fechada.

10.4 Fundamentos dos cálculos de corrente de falta

A expressão básica para o cálculo de qualquer corrente de falta é a da Lei de Ohm, sob a forma $I_F = U/Z$, onde I_F é o valor eficaz da corrente de falta, U é o valor eficaz da tensão da fonte, e Z é a impedância entre a fonte e a falta, incluindo a impedância da fonte.

A grande maioria das instalações possui várias fontes de tensão que alimentam a corrente de falta, tais como os motores e geradores que dão a sua contribuição. Um passo importante para o cálculo da corrente de curto-circuito consiste na simplificação do circuito, de modo que possa ser aplicada diretamente a equação básica.

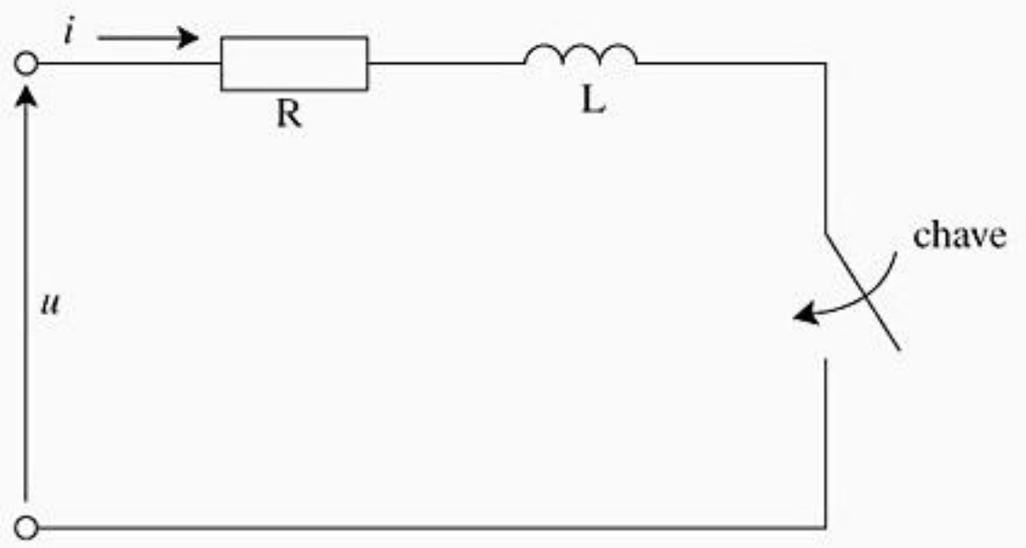


Figura 10.6 ▪ Circuito RL

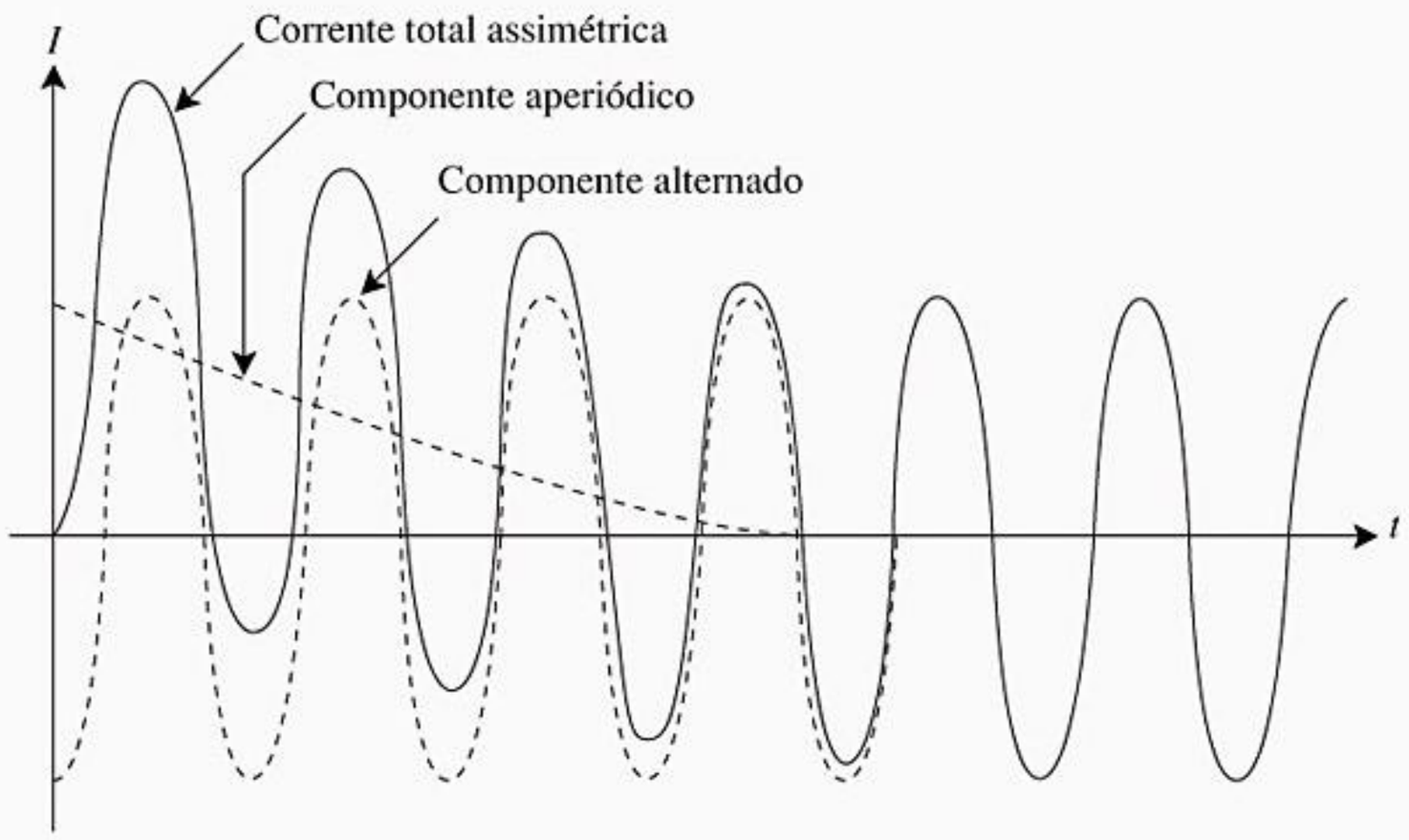


Figura 10.5 ▪ Corrente de curto-circuito assimétrica

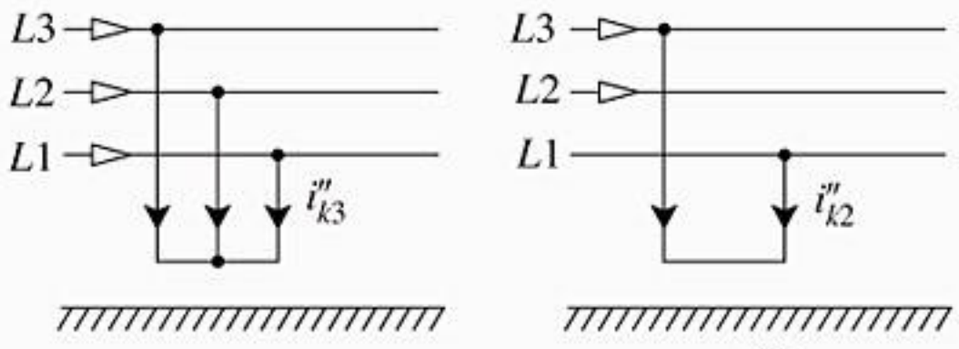


Figura 10.7 ■ Caracterização das faltas consideradas, sendo: (a) falta trifásica direta, (b) falta bifásica direta, (c) falta direta fase-terra

A complexidade das instalações e dos equipamentos atuais, bem como a falta de parâmetros, muitas vezes, tornam extremamente complicados e mesmo impossíveis os cálculos de correntes de falta mais exatos. Normalmente, no cálculo de curto-circuito, é desnecessária uma grande precisão e são usados processos aproximados que envolvem diversas hipóteses simplificadoras. São elas:

- A falta é admitida distante de qualquer gerador (fonte) e é alimentada em um único ponto por uma rede de alimentação.
- A rede de baixa tensão é radial
- Os valores da tensão de alimentação e as impedâncias dos diferentes componentes são supostos como constantes.
- As resistências de contato e as impedâncias de falta não são levadas em consideração, isto é, consideram-se faltas diretas.
- A falta é simultânea em todas as fases, se for polifásica.
- As correntes de falta não são calculadas para faltas internas em um cabo de um conjunto de cabos em paralelo.
- Não ocorrem modificações nos circuitos durante a falta; o número de fases envolvidas permanece o mesmo (por exemplo, um curto-circuito trifásico permanece trifásico durante a duração do curto).
- As capacitâncias das linhas e as admitâncias paralelas dos elementos passivos são desprezadas.
- As faltas duplas para a terra em diferentes locais não são consideradas.
- Os comutadores de derivações dos transformadores são admitidos na posição principal.
- As impedâncias de seqüência negativa são admitidas iguais às de seqüência positiva.
- A influência dos motores pode ser desprezada, desde que atendida a condição dada na expressão 10.8.

A Figura 10.7 mostra os tipos de falta considerados neste estudo.

Nos cálculos das correntes de falta nas instalações de baixa tensão, considera-se um circuito (como apresentado nas seções 10.3 e 2.6), com uma resistência (total) R_k e uma reatância (total) X_k, e calcula-se a *corrente de curto-circuito presumida*, admitindo a pior condição de assimetria, isto é, que o curto ocorra no instante em que a fase inicial da tensão aplicada tenha

$$\psi = \Phi_k \pm 90 \tag{10.1}$$

sendo Φ_k o ângulo de defasagem entre tensão e corrente, ou seja

$$\cos \Phi_k = \frac{R_k}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \tag{10.2}$$

A Figura 10.8 mostra o traçado esquemático da corrente de curto-circuito com seus componentes periódico (alternado) e aperiódico.

Pode-se definir as seguintes correntes:

- *Corrente de curto-circuito (falta direta) simétrica inicial* (I''_k) – valor eficaz do componente alternado da corrente de curto-circuito (falta direta) presumida no instante da ocorrência da falta, admitindo que a impedância ($R_k + jX_k$) mantenha seu valor inicial.
- *Corrente de curto-circuito (falta direta) permanente* (I_k) – valor eficaz da corrente de curto-circuito (falta direta) presumida, que se mantém após a cessação dos fenômenos transitórios.

Admitindo-se falta distante do gerador

$$I_k = I''_k \tag{10.3}$$

pretende-se calcular (ver Figura 10.7):

- I_{k3}: corrente de curto-circuito trifásico permanente.
- I_{k2}: corrente de curto-circuito bifásico permanente.
- I_{k1}: corrente de falta direta fase-terra permanente.

O *valor de crista* da corrente de curto-circuito (falta direta) presumida, i_p, é definido como o valor instantâneo máximo possível da corrente presumida. Depende da relação R/X (ou X/R), sendo dado por:

$$I_p = \lambda\sqrt{2}\, I''_k \;\; = \lambda\sqrt{2} I_k \tag{10.4}$$

sendo

$$\lambda \cong 1{,}02 + 0{,}9\, e^{-3R/X} \tag{10.5}$$

Observe que, quanto maior o valor de R/X, ou quanto menor o valor de X/R (lembrar que R e X são parâmetros característicos do circuito, desde a fonte até a falta), menor λ, isto é, menor a assimetria da corrente.

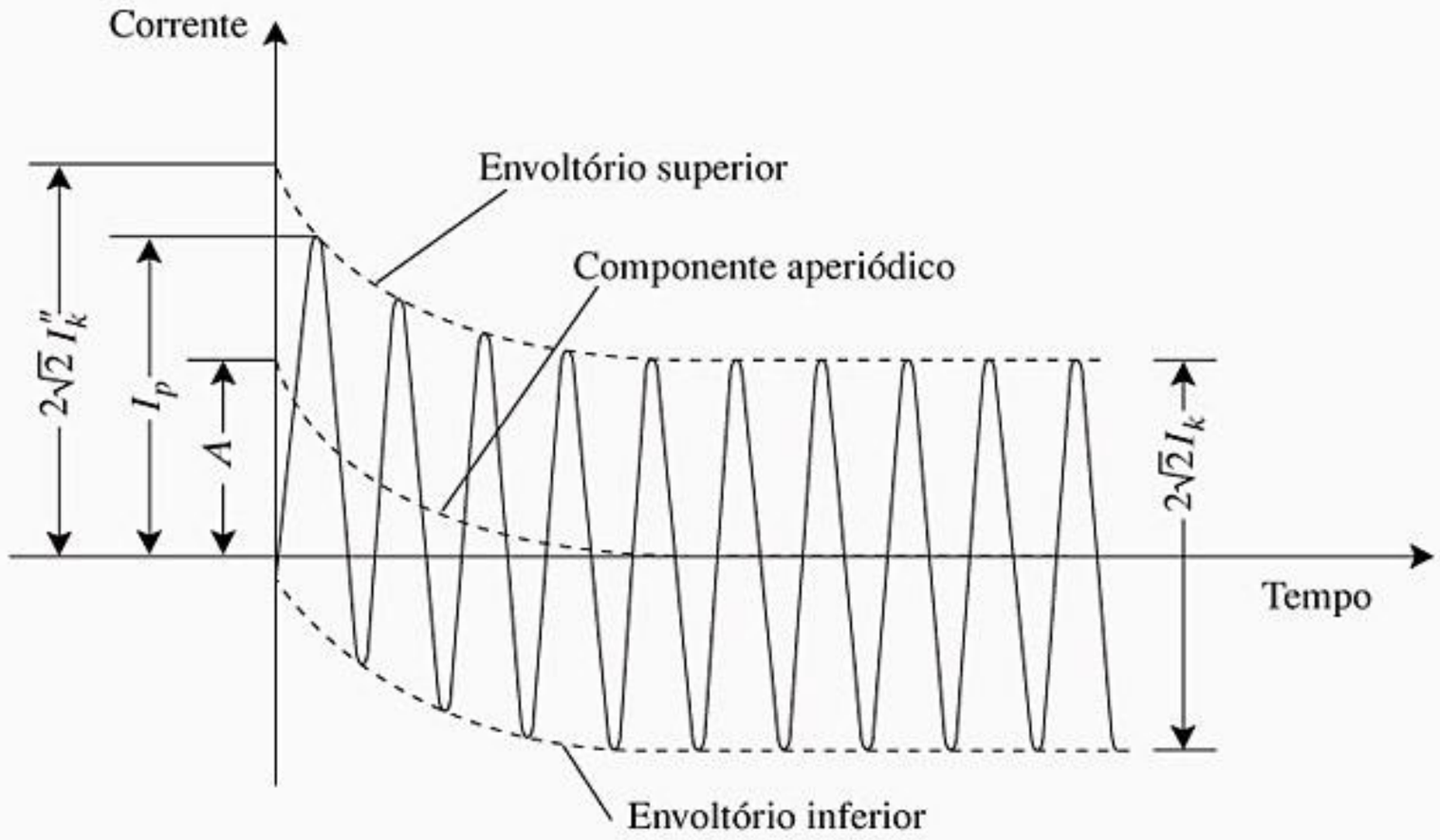


Figura 10.8 ■ Corrente de curto-circuito presumida relativa a uma falta distante do gerador

A Figura 10.9 indica os valores de λ em função de R/X e de X/R.

A Tabela 10.1 apresenta os valores de λ e de $\lambda\sqrt{2}$ em função de X/R ($X/R = \text{tg}\,\Phi_k$), indicando também o valor correspondente de cos Φ_k; são utilizados valores típicos de X/R.

Nos cálculos das correntes de curto-circuito (ou de falta direta) em sistemas de baixa tensão, são consideradas as seguintes impedâncias para os diversos componentes:

- *Impedância de curto-circuito de seqüência positiva* ($\dot{Z}_1$) – razão da tensão de fase para a corrente de curto-circuito da fase correspondente em um componente alimentado por um sistema de tensões de seqüência positiva. (Ver Seção 2.4.)
- *Impedância de curto-circuito de seqüência negativa* ($\dot{Z}_2$) – razão da tensão de fase para a corrente de curto-circuito da fase correspondente em um componente alimentado por um sistema de tensões de seqüência negativa. (Ver Seção 2.4.)
- *Impedância de curto-circuito de seqüência zero* ($\dot{Z}_3$) – razão da tensão de fase para a corrente de curto-circuito de uma fase de um componente alimentado por uma fonte de tensão alternada monofásica, quando os três condutores de fase estão em paralelo para a corrente de saída e um quarto condutor *e/ou* a terra funciona como condutor comum de retorno. (Ver Seção 2.4.)

Considerando faltas distantes dos geradores, pode-se admitir que $\dot{Z}_2 = \dot{Z}_1$.

Nos cálculos, são consideradas as impedâncias de curto-circuito $\dot{Z}_1$ e $\dot{Z}_0$ vistas do ponto em que ocorre a falta (ver Figura 10.10), definidas por:

$$\dot{Z}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \qquad (10.6)$$

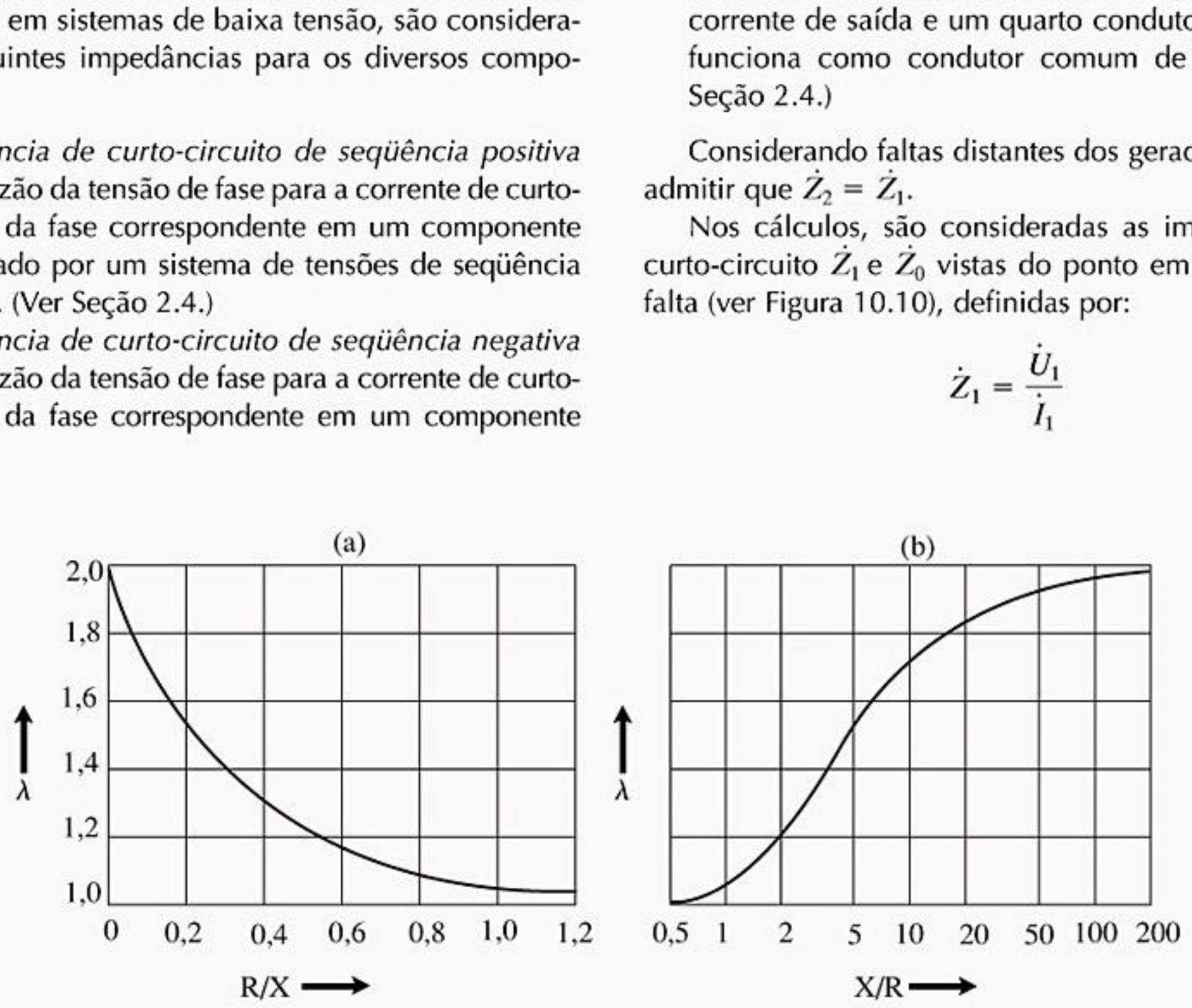


Figura 10.9 ■ Fator λ em função de (a) R/X e de (b) X/R

Tabela 10.1 ■ Valores de λ e de $\lambda\sqrt{2}$ em função de $\cos \Phi_k$ e de X/R

X/R	$\cos \Phi_k$	λ	$\sqrt{2}\,I$
∞	0	2,00	2,83
9,95	0,10	1,75	2,47
8,27	0,12	1,70	2,41
6,59	0,15	1,64	2,32
3,18	0,30	1,40	1,98
1,98	0,45	1,23	1,75
1,33	0,60	1,12	1,59
0,88	0,75	1,05	1,49
0	1,00	1,00	1,41

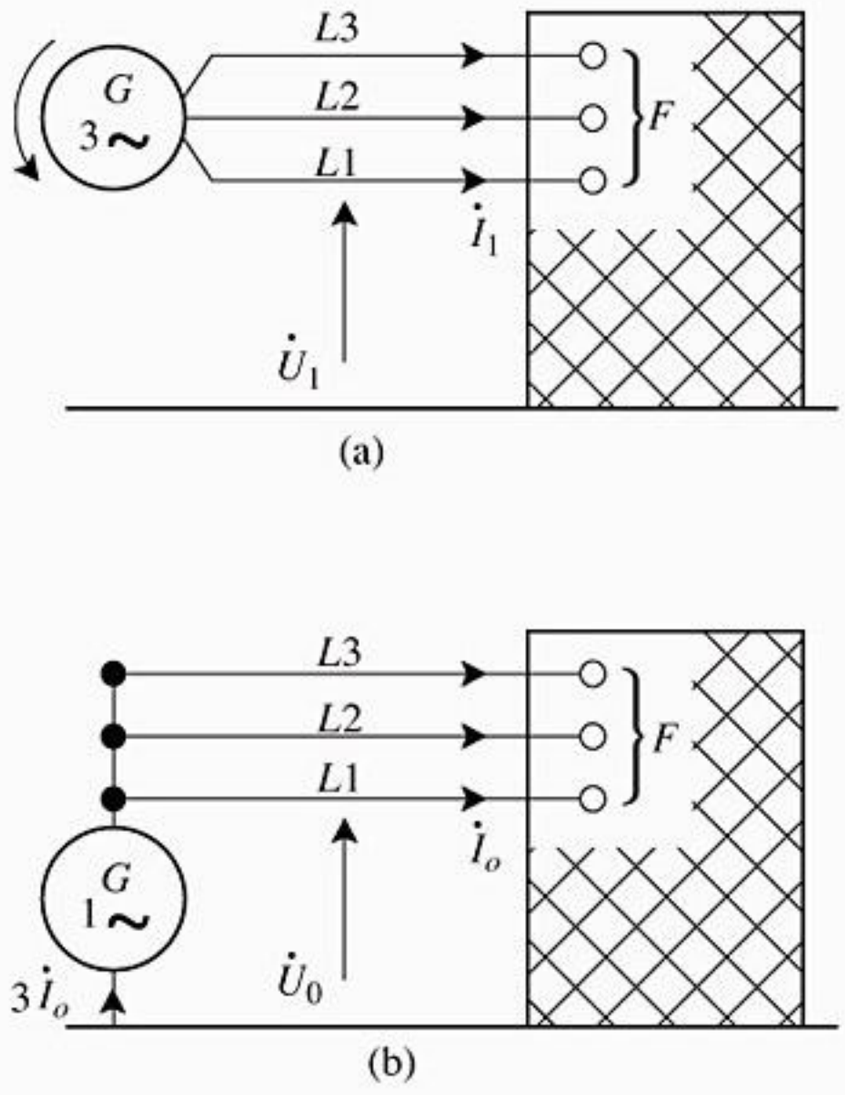


Figura 10.10 ■ Circuitos para a obtenção das impedâncias de curtos-circuitos de seqüência positiva e de seqüência zero

$$\dot{Z}_0 = \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} \qquad (10.7)$$

A fonte de tensão a considerar nos cálculos, isto é, a fonte que alimenta o circuito RL, é chamada *fonte equivalente de tensão*, definida como uma fonte ideal que aplica no local em que ocorre a falta, uma tensão (de fase) de seqüência positiva igual a $cU_N/\sqrt{3}$, onde c é o *fator de tensão* e U_N é a tensão nominal do sistema.

O fator c cujos valores são apresentados na Tabela 10.2, é introduzido para levar em conta:

- As variações de tensão no tempo e no espaço.
- As mudanças de derivação dos transformadores.
- O fato de não terem sido consideradas as reatâncias capacitivas.

A tensão $cU_N/\sqrt{3}$ é considerada a única ativa do sistema, sendo nulas todas as demais fontes, isto é, a rede de alimentação, os motores assíncronos e os motores síncronos. O fator c, como mostra a tabela, depende da tensão do sistema e de ser a corrente de falta máxima ou a corrente de falta mínima.

A corrente de curto-circuito presumida, no caso de um curto trifásico, é calculada a partir do circuito (RL) equivalente, mostrado, por exemplo, na Figura 10.11, onde são consideradas, no caso mais geral, as seguintes impedâncias:

- Rede de alta tensão (valor referido ao lado da baixa tensão)

$$\dot{Z}_{QT} = R_{QT} + jX_{QT}$$

Tabela 10.2 ■ Valores do fator de tensão c

Tensões nominais	Fator de tensão para cálculo de	
	Corrente de curto-circuito máxima $c_{máx}$	Corrente de curto-circuito mínima $c_{mín}$
Baixa tensão		
■ 230/400 V	1,00	0,95
■ outros valores	1,05	1,00
Alta tensão	1,10	1,00

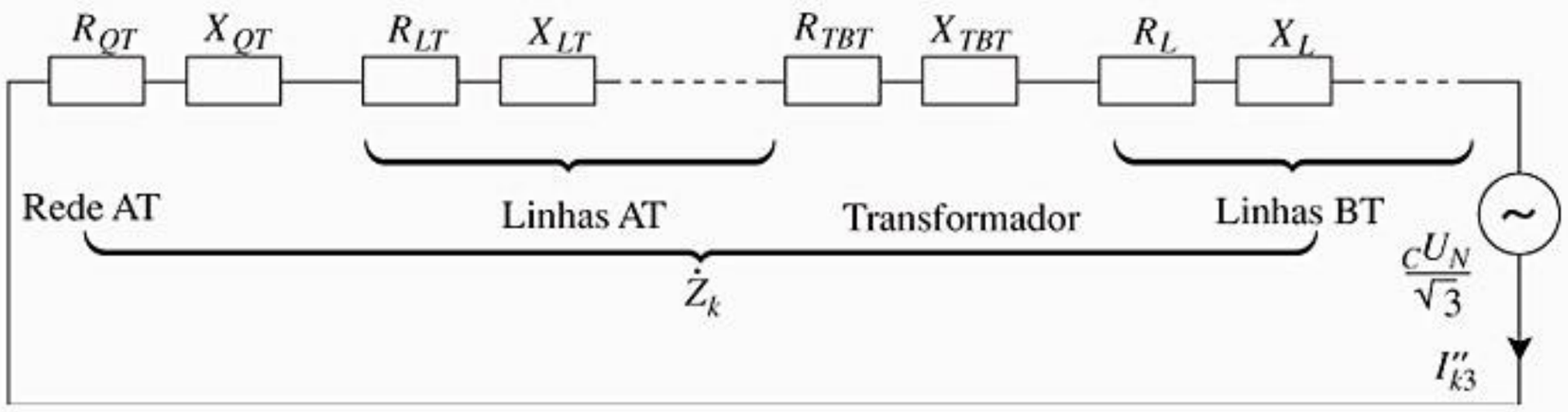


Figura 10.11 ▪ Circuito equivalente para o cálculo de corrente de curto-circuito trifásico presumida

- Linha de alta tensão (valor referido ao lado da baixa tensão)

$$\dot{Z}_{LT} = R_{LT} + jX_{LT}$$

- Transformador (valor referido ao lado da baixa tensão)

$$\dot{Z}_{TBT} = R_{TBT} + jX_{TBT}$$

- Linha de baixa tensão

$$\dot{Z}_L = R_L + jX_L$$

A contribuição dos motores assíncronos à corrente de curto-circuito I''_k será desprezível se

$$\sum I_M \leq 0{,}01\, I''_k \qquad (10.8)$$

sendo ΣI_M o somatório das correntes nominais dos motores ligados diretamente (sem 'intermediação' de transformadores) à rede onde ocorre a falta, e I''_k, a corrente de curto-circuito simétrica inicial na ausência de motores.

10.5 Impedância de curto-circuito

A Figura 10.12 mostra um sistema elétrico alimentado através de um transformador, onde ocorre uma falta F no lado de baixa tensão.

Se for conhecida a corrente de curto-circuito 3Φ simétrica inicial I''_{kQ} da *rede de alta* tensão, ao nível do barramento Q, o módulo da impedância equivalente de curto-circuito de seqüência positiva Z_Q dessa rede no ponto Q é dado por

$$Z_Q(\text{m}\Omega) = \frac{c_Q \cdot U_{NQ}(\text{kV}) \times 10^3}{\sqrt{3}\, I''_{kQ}\,(\text{kA})} \qquad (10.9)$$

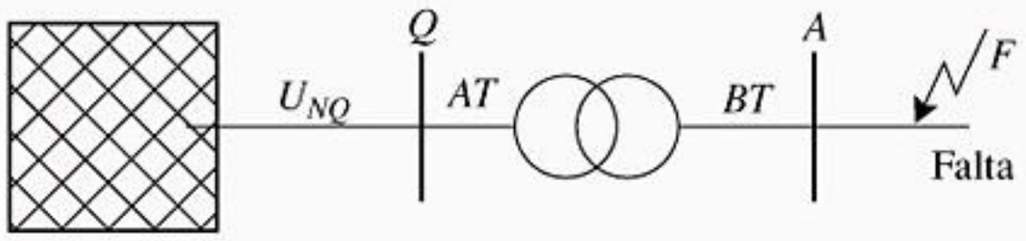


Figura 10.12 ▪ Diagrama unifilar de um sistema elétrico

sendo c_Q o fator de tensão relativo ao barramento Q (Tabela 10.2) e U_{NQ} a tensão nominal da rede.

Para o cálculo das correntes de curto-circuito máxima e mínima no sistema são utilizados na Expressão 10.9 os valores $I''_{k\text{máx}}$ e $I''_{k\text{mín}}$, respectivamente. Se $I''_{k\text{mín}}$ não for conhecido, o valor de Z_Q a considerar pode ser o mesmo utilizado para calcular a corrente de curto-circuito máxima.

Quando não se conhece o valor preciso da resistência R_Q nem o da reatância X_Q, o que é muito comum, pode-se utilizar as expressões:

$$X_Q = 0{,}995\, Z_Q \qquad (10.10)$$

e

$$R_Q = 0{,}1\, X_Q \qquad (10.11)$$

Normalmente, não é necessário conhecer a impedância de seqüência zero da rede de alta tensão, uma vez que a maior parte dos transformadores 'desacopla' os sistemas de seqüência zero de alta e de baixa tensão, que é o caso, por exemplo, do transformador delta e estrela aterrada.

Se a impedância da rede no ponto de ligação da alimentação (ponto Q) é dada sob a forma de potência aparente de curto-circuito, S''_{kQ}, a tensão U_Q que determina S''_{kQ} é geralmente especificada. Nessas condições, a impedância equivalente que representa a rede elétrica será dada por:

$$Z_Q(\text{k}\Omega) = \frac{[\,U_Q(\text{kV})]^2}{S''_{kQ}(\text{MVA})} \times 10^3 \qquad (10.12)$$

Quando não é fornecido o valor da corrente de curto-circuito simétrica inicial da rede no ponto de entrega (ou, o que dá no mesmo, a potência aparente de curto-circuito), pode-se utilizar para I''_{kQ} o valor da capacidade de interrupção mínima do disjuntor de proteção da entrada, geralmente fixado pelas concessionárias.

A impedância de curto-circuito de seqüência positiva dos *transformadores* a dois enrolamentos separados $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_T = R_T + jX_T$ é calculada, a partir de suas características nominais.

O módulo da impedância referida ao lado da baixa, Z_{TBT}, é obtido em função da tensão de curto-circuito

nominal, U_{kN}, da tensão nominal da baixa, $U_{NT,\,BT}$, e da potência aparente nominal S_{NT}, isto é

$$Z_{TBT}(\text{m}\Omega) = \frac{u_{kN}(\%)}{100} \cdot \frac{[U_{NT,\,BT}(\text{V})]^2}{S_{NT}(\text{kVA})} \qquad (10.13)$$

Por sua vez, a resistência R_{TBT} pode ser obtida em função de $U_{NT,\,BT}$, de S_{NT} e da queda de tensão resistiva nominal, U_{RN}, isto é

$$R_{TBT}(\text{m}\Omega) = \frac{u_{RN}(\%)}{100} \cdot \frac{[U_{NT,\,BT}(\text{V})]^2}{S_{NT}(\text{kVA})} \qquad (10.14)$$

ou a partir das perdas no cobre, P_{kN}, e da corrente nominal de baixa tensão $I_{NT,\,BT}$, sendo

$$R_{TBT}(\text{m}\Omega) = \frac{P_{kN}(\text{W})}{3[I_{NT,\,BT}(\text{A})]^2} \times 10^3 \qquad (10.15)$$

Para as reatâncias, $X_{T,\,BT}$, tem-se:

$$X_{TBT} = \sqrt{Z_{TBT}^2 - R_{TBT}^2} \qquad (10.16)$$

A Tabela 10.3 apresenta as potências nominais e os respectivos valores de tensão de curto-circuito nominal e de perdas no cobre típicos de transformadores de potências fabricados no Brasil.

A série de normas NBR 5356 considera como 'valores típicos', 4,0% até 630 kVA, inclusive, e 5,0% até 1.250 kVA.

A impedância de curto-circuito de seqüência zero Z_{0T} dos transformadores, do lado da baixa, pode ser obtida do fabricante ou determinada pelas relações X_{0T}/X_{TBT} e R_{0T}/R_{TBT}.

As impedâncias $\dot{Z}_{1L}$ e $\dot{Z}_{0L}$ das *linhas elétricas* podem ser obtidas de normas *e/ou* de catálogos de fabricantes. A impedância de curto-circuito de seqüência positiva $\dot{Z}_{1L} = \dot{Z}_L = R_L + jX_L$ é determinada a partir da resistência por unidade de comprimento R''_L (a 20 °C para o cálculo das correntes de falta máximas e uma temperatura mais elevada para o cálculo das correntes de falta mínimas) e da reatância por unidade de comprimento X''_L (para as linhas de alta tensão, usa-se as designações $\overline{R}'_L$ e $\overline{X}'_L$ para diferenciar.

Pode-se escrever para uma linha de alta tensão:

$$R_L(\text{m}\Omega) = l(\text{m}) \times \overline{R}'_L(\text{m}\Omega/\text{m}) \qquad (10.17)$$

e

$$X_L(\text{m}\Omega) = l(\text{m}) \times \overline{X}'_L \qquad (10.18)$$

Os valores de $\overline{R}'_L$ e de $\overline{X}'_L$ (geralmente dados em $\Omega/\text{km} = \text{m}\Omega/\text{m}$ são obtidos de catálogos de fabricantes.

Para uma linha de baixa tensão, tem-se:

$$R_L(\text{m}\Omega) = l(\text{m}) \times R'_L(\text{m}\Omega/\text{m}) \qquad (10.19)$$

e

$$X_L(\text{m}\Omega) = l(\text{m}) \times X'_L(\text{m}\Omega/\text{m}) \qquad (10.20)$$

Os valores de R_{1L} e de X_{1L} podem ser obtidos, para os casos mais comuns, na Tabela 10.4, e, em casos especiais, X_{2L} pode ser calculado.

A impedância de curto-circuito de seqüência zero, $\dot{Z}_{0L}$, depende do percurso de retorno da corrente e pode ser determinada, seja com o auxílio das relações R_{0L}/R_L e X_{0L}/X_L, seja por medida ou por cálculo.

Para calcular a corrente de curto-circuito em baixa tensão, todas as impedâncias do lado da alta devem ser referidas ao lado da baixa tensão. Isso é feito por meio da relação de transformação nominal, t_N, definida pela razão da tensão nominal de alta do transformador, $U_{NT,\,AT}$, para a respectiva tensão nominal de baixa, $U_{NT,\,BT}$, isto é

$$t_N = \frac{U_{NT,\,AT}}{U_{NT,\,BT}} \qquad (10.21)$$

Tabela 10.3 ■ Valores típicos de transformadores nacionais (dados fornecidos por fabricantes)

Potência nominal (kVA)	Tensão de curto-circuito[1] (%)	Perdas no cobre (W)
15	3,5	340
30	3,5	570
45	3,5	780
75	3,5	1.140
112,5	3,5	1.500
150	3,5	1.910
225	4,5	2.700
300	4,5	3.360
500	5,0	6.800
750	5,0	12.650
1.000	5,0	14.550

Nota:
1. A NBR 5356 considera como 'valores típicos', 4,0% até 630 kVA, inclusive, e 5,0% até 1.250 kVA.

Tabela 10.4 ■ Valores da resistência e da reatância de condutores de cobre (utilizáveis nos cálculos de curto-circuito)

Seção nominal (mm²)	Resistência (mΩ/m)	Reatância indutiva	
		Condutores isolados (mΩ/m)	Cabos unipolares (mΩ/m)
1,5	12,1	0,1236	0,1585
2,5	7,41	0,1202	0,1459
4	4,61	0,1130	0,1430
6	3,08	0,1068	0,1335
10	1,83	0,1090	0,1262
16	1,15	0,1036	0,1175
25	0,727	0,1020	0,1146
35	0,524	0,0980	0,1095
50	0,387	0,0974	0,1090
70	0,268	0,0963	0,1038
95	0,193	0,0945	0,1024
120	0,153	0,0933	0,0993
150	0,124	0,0915	0,0990
185	0,0991	0,0916	0,0986
240	0,0754	0,0911	0,0976
300	0,0601	0,0918	0,0968

Notas:

1. Resistências máximas a 20 °C segundo a NBR NM 280, considerando-se condutores Classe II.
2. Reatâncias indutivas calculadas considerando-se cabos dispostos em trifólio.
3. Valores válidos para condutores isolados Superastic e cabos unipolares Sintenax AF.

As impedâncias do lado AT referidas à BT podem ser obtidas como indica a Expressão 10.22.

$$Z_{AT,t} = \frac{1}{t_N^2} Z_{AT} \qquad (10.22)$$

(o índice t indica os valores referidos à BT).

10.6 Cálculo das correntes de falta presumidas

Expressão das correntes

No caso de um *curto-circuito trifásico*, a solução é extremamente simples, uma vez que é de um circuito trifásico equilibrado e que, portanto, pode ser resolvido pelos métodos tradicionais. Na Figura 10.11, a corrente simétrica inicial, I''_{k3}, é igual à corrente permanente, I_{k3}, considerando-se que a falta é distante do gerador, e vale

$$I''_{k3} = I_{k3} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}\, Z_k} \qquad (10.23)$$

onde c é o fator de tensão (Tabela 10.2), U_N é a tensão nominal (de linha) do sistema de baixa tensão e Z_k é a impedância total vista do ponto em que ocorre a falta.

Nesse caso, para correntes de curto-circuito cuja localização está distante do gerador, a corrente de curto-circuito trifásico permanente, I_{k3}, é a maior das correntes de falta presumida, sendo a mais utilizada e, também, a mais fácil de se obter.

Para um *curto-circuito bifásico*, a obtenção da corrente é feita recorrendo-se aos componentes simétricos (ver Seção 2.4). Sua expressão, considerando-se $Z_1 = Z_2 = Z_k$, será

$$I''_{k2} = I_{k2} = \frac{cU_N}{2\, Z_k} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3} \qquad (10.24)$$

No caso de *falta direta fase-terra*, também recorrendo aos componentes simétricos, obtém-se

$$I''_{k1} = I_{k1} = \frac{\sqrt{3}\, cU_N}{|\, 2\dot{Z}_1 + \dot{Z}_0|} \qquad (10.25)$$

onde $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_k$ é a impedância de curto-circuito total de seqüência positiva e $\dot{Z}_0$ a de seqüência zero.

A impedância $\dot{Z}_0$ equivale a $\dot{Z}_1 + 3\dot{Z}_N$ (caso de retorno pelo neutro) ou, no caso mais geral, $\dot{Z}_1 + 3\,\dot{Z}_{PE}$, sendo $\dot{Z}_{PE}$ a impedância do condutor de proteção.

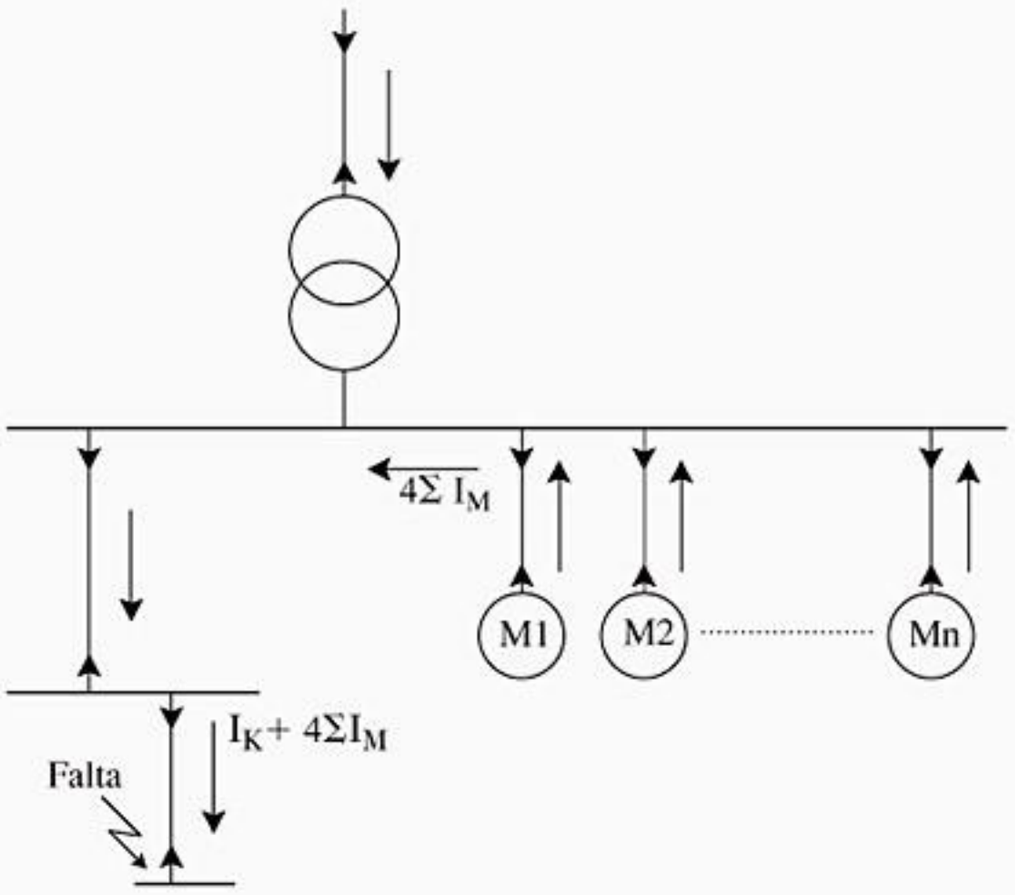


Figura 10.13 ■ Aplicação da contribuição dos motores nas correntes de curto-circuito

Assim, chamando de U_0 à tensão de fase, $U_N/\sqrt{3}$, tem-se da Expressão 10.25

$$I''_{k1} = I_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{3}\, U_0}{|3\dot{Z}_1 + 3\dot{Z}_{PE}|}$$

e daí

$$I''_{k1} = I_{k1} = \frac{cU_0}{|\dot{Z}_1 + \dot{Z}_{PE}|} \qquad (10.26)$$

expressão absolutamente análoga (com exceção do fator c, que é quase sempre igual a 1) à Expressão 8.1, onde $Z_S = |\dot{Z}_1 + \dot{Z}_{PE}|$.

Influência dos motores

Quando a condição dada na Expressão 10.8 não for atendida, será necessário considerar a contribuição dos motores (de indução) à corrente de curto-circuito presumida.

Na realidade, a influência efetiva dos motores de indução ligados diretamente à rede onde ocorre a falta é praticamente impossível de ser determinada com exatidão. Para a maior parte dos sistemas de baixa tensão, é suficiente considerar uma contribuição I_{kM} dada por

$$I_{kM} = 4 \sum I_M \qquad (10.27)$$

onde ΣI_M é a soma das corrente nominais dos motores a ser somada à corrente presumida (sem os motores). A Figura 10.13 demonstra esse procedimento.

EXEMPLO

Calcular as correntes de curto-circuito presumidas máximas nos pontos indicados por F1, F2, F3 e F4 no esquema unifilar da Figura 10.14. São dados:

- Rede AT

  $U_{nQ} = 13{,}8$ kV
  $I''_{kQmax} = 15$ kA; obtém-se $c_Q = 1{,}1$ (Tabela 10.2)

- Linha L1

  $l = 1{,}7$ km
  cabos unipolares Sintenax 12/20 kV, 3 × 1 × 150 mm², com
  $R'_L = 0{,}151$ Ω/km (mΩ/m)
  $X'_L = 0{,}132$ Ω/km (mΩ/m)

- Transformador T1

  $S_{NT} = 400$ kVA
  $U_{NT,AT} = 13{,}8$ kV
  $U_{NT,BT} = 380$ V
  $u_{kN} = 4\%$
  $u_{RN} = 1{,}15\%$

- Linha L2

  $l = 5$ m
  cabos unipolares Sintenax AF, 2 × (4 × 1 × 240 mm²); obtém-se (Tabela 10.4)
  $R'_L = 0{,}0754$ mΩ/m
  $X'_L = 0{,}0976$ mΩ/m

  Linha L3
  $l = 20$ m
  cabos unipolares Sintenax AF, 4 × 1 × 70 mm²; obtém-se (Tabela 10.4)
  $R'_L = 0{,}268$ mΩ/m
  $X'_L = 0{,}1038$ mΩ/m

- Linha 4

  $l = 10$ m
  cabos Superastic, AF, 5 × 1 × 6 mm²); obtém-se (Tabela 10.4)
  $R'_L = 3{,}08$ mΩ/m
  $X'_L = 0{,}1068$ mΩ/m

- Motor M1

  $P_{M1} = 20$ kW
  $\cos \Phi_1 = 0{,}85$
  $\eta_1 = 0{,}93$

- Motor M2

  $P_{M2} = 40$ kW
  $\cos \Phi_2 = 0{,}85$
  $\eta_2 = 0{,}93$

- Admitir chave S1 aberta.

(1) O cálculo das impedâncias de seqüência positiva ao lado da alta tensão é apresentado na Tabela 10.5.

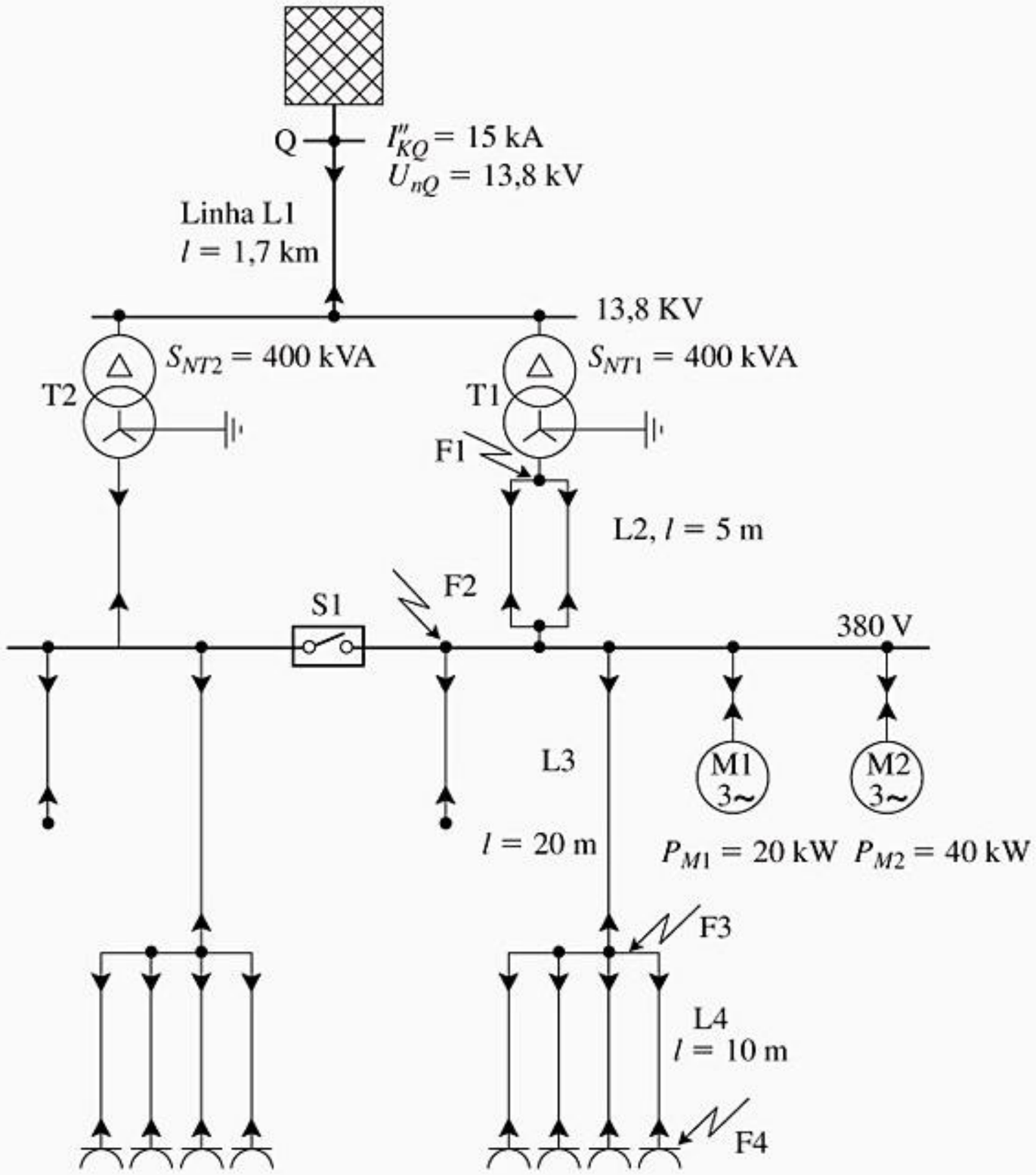


Figura 10.14 ■ Diagrama unifilar do exemplo citado no exemplo anterior

Tabela 10.5 ■ Cálculo das impedâncias de seqüência positiva do lado da alta tensão (correntes de curto-circuito presumidas máximas)

U_{NQ} = 13,8 kV		$I''_{kQ\text{máx}}$ = 15 kA	c_Q = 1,1		
Componente	**Expressão**	**Cálculo**	***R***	***X***	***Z***
			mΩ	**mΩ**	**mΩ**
Rede	$Z_Q = cQ \dfrac{U_{NQ}}{\sqrt{3}\, I_{kQ\text{máx}}} \times 10^3$	$Z_Q = \dfrac{1{,}1 \times 13{,}8 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 15}$			584,3
	$X_Q = 0{,}995 Z_Q$	$X_Q = 0{,}995 \times 584{,}3$		581,4	
	$R_Q = 0{,}1\, X_Q$	$R_Q = 0{,}1 \times 581{,}4$	58,1		
Linha 1	$R_L = l\, \overline{R}'_L$	$R_L = 1.700 \times 0{,}151$	256,7		
	$X_L = l\, \overline{X}'_L$	$X_L = 1.700 \times 0{,}132$		224,4	
$\sum \dot{Z}_{AT}$	$\sum R_{AT}$		314,8		
	$\sum X_{AT}$			805,8	

(*Continua*)

(Continuação)

Componente	Expressão	Cálculo	*R* mΩ	*X* mΩ	*Z* mΩ
Relação de transformação	$t_N = \frac{U_{NT,AT}}{U_{NT,BT}}$	$t_N = \frac{13,8}{0,38} = 36,3$			
$\sum \dot{Z}_{ATt}$	$\sum R_{ATt} = \frac{1}{t_N^2} \sum R_{AT}$	$\sum R_{ATt} = \frac{1}{36,3^2} \times 314,8$	0,239		
	$\sum X_{ATt} = \frac{1}{t_N^2} \sum X_{AT}$	$\sum X_{ATt} = \frac{1}{36,3^2} \times 805,8$		0,612	

(2) O cálculo das impedâncias de seqüência positiva do transformador referidas à baixa tensão é apresentado na Tabela 10.6.

(3) O cálculo das impedâncias de seqüência positiva ao lado da baixa tensão é apresentado na Tabela 10.7.

Tabela 10.6 ■ Cálculo das impedâncias de seqüência positiva dos transformadores referidas à baixa tensão (correntes de curto-circuito presumidas máximas)

Transformador	Expressão	Cálculo	*R* mΩ	*X* mΩ	*Z* mΩ
T1	$Z_{TBT} = \frac{u_{kN}}{100} \cdot \frac{U_{NT,BT}^2}{S_{NT}}$	$Z_{TBT} = \frac{4}{100} \times \frac{380^2}{400}$			14,44
	$R_{TBT} = \frac{u_{RN}}{100} \cdot \frac{U_{NT,BT}^2}{S_{NT}}$	$R_{TBT} = \frac{1,15}{100} \times \frac{380^2}{400}$	4,15		
	$R_{TBT} = \frac{P_{kN}}{3\, I_{NT,BT}^2} \times 10^3$	–			
	$X_{TBT} = \sqrt{Z_{TBT}^2 - R_{TBT}^2}$	$X_{TBT} = \sqrt{14,44^2 - 4,15^2}$		13,83	

Tabela 10.7 ■ Cálculo das impedâncias de seqüência ao lado da baixa tensão (correntes de curto-circuito presumidas máximas)

Componente	Expressão	Cálculo	*R* mΩ	*X* mΩ
Linha L2 (dois cabos em paralelo por fase)	$R_L = lR'_L$	$R_L = \frac{1}{2} \times 5 \times 0,0754$	0,188	
	$X_L = lX'_L$	$X_L = \frac{1}{2} \times 5 \times 0,0976$		0,244
Linha L3	$R_L = lR'_L$	$R_L = 20 \times 0,268$	5,36	
	$X_L = lX'_L$	$X_L = 20 \times 0,1038$		2,076

(Continua)

(*Continuação*)

Componente	Expressão	Cálculo	R	X
			mΩ	mΩ
Linha L4	$R_L = lR'_L$	$R_L = 10 \times 3{,}08$	30,8	
	$X_L = lX'_L$	$X_L = 10 \times 0{,}1068$		1,068

(4) O cálculo das correntes de curto-circuito presumidas máximas é apresentado na Tabela 10.8.

(5) Avaliação da influência dos motores

$$I_{M1} = \frac{20}{\sqrt{3} \times 0{,}85 \times 0{,}93 \times 380} = 0{,}0384 \text{ kA}$$

$$I_{M2} = \frac{40}{\sqrt{3} \times 0{,}85 \times 0{,}93 \times 380} = 0{,}0769 \text{ kA}$$

$$\Sigma I_M = 0{,}1153 \text{ kA}$$

$$-\text{F2} \quad I''_k = 14{,}262 \text{ kA} \qquad 0{,}01\, I''_k = 0{,}14 \text{ kA}$$

$$0{,}1153 < 0{,}14$$

Portanto, analisando a Figura 10.14, pode-se desprezar a influência dos motores em F2 e, conseqüentemente, em F3 e em F4. Em F1, não há influência dos motores.

Cálculos simplificados

Nos cálculos de curto-circuito em sistemas de baixa tensão, é muito comum que o trecho a montante do transformador (linhas e rede de alta tensão) possua uma potência de curto-circuito infinita ($S''_{kQ} \to \infty$), ou seja, com uma impedância de curto-circuito, Z_Q, igual a zero (ver Figura 10.15).

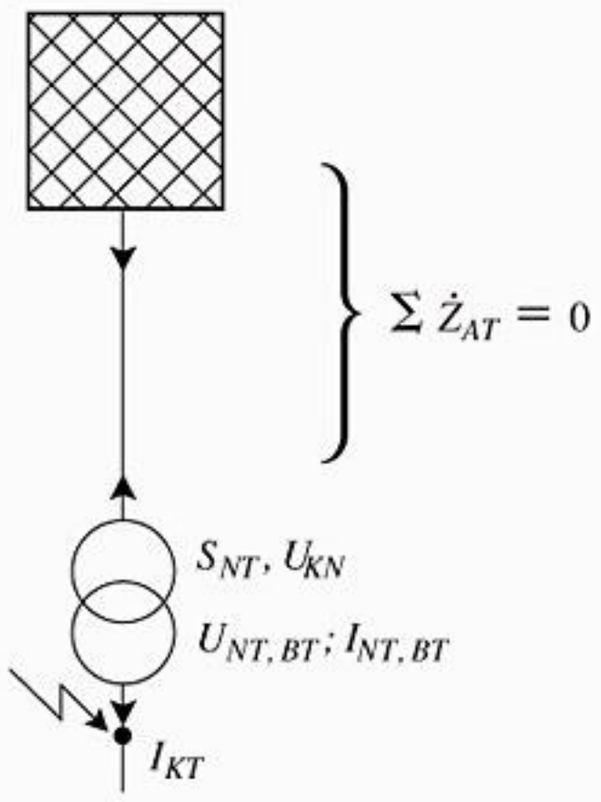


Figura 10.15 ▪ Barra de AT considerada barra infinita

Nessas condições, o valor inicial da corrente presumida a considerar é o da corrente de curto-circuito permanente no secundário do transformador, I_{kT}, que pode ser obtido das expressões 10.23 e 10.13. Assim, fazendo $c = 1$, $U_N = U_{NT,BT}$ e $Z_k = Z_{TBT}$, virá

$$I_{kT} = \frac{U_{NT,BT}}{\sqrt{3}\, Z_{TBT}} \tag{10.28}$$

substituindo a Expressão 10.13 na Expressão 10.28 chega-se a

$$I_{kT} = \frac{U_{NT,BT}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{100}{u_{kN\%}} \cdot \frac{S_{NT}}{U^2_{NT,BT}} =$$

$$= \frac{100}{u_{kN\%}} \cdot \frac{S_{NT}}{\sqrt{3}\, U_{NT,BT}} = \frac{100}{u_{kN\%}} \cdot I_{NT,BT}$$

que pode ser escrita

$$I_{kT}(kA) = \frac{100}{u_{kn}(\%)} \cdot \frac{S_{NT}(\text{kVA})}{\sqrt{3}\, U_{NT,BT}(\text{V})}$$

$$= \frac{100}{u_{kn}(\%)} \cdot I_{NT,BT}(\text{kA}) \tag{10.29}$$

onde u_{kN} é a tensão de curto-circuito nominal do transformador, S_{NT}, sua potência nominal, $U_{NT,BT}$, sua tensão nominal de baixa e $I_{NT,BT}$, sua corrente nominal de baixa.

É muito interessante observar a Tabela 10.9, preparada por Celso Pereira Mendes, que mostra, na prática, para as situações mais comuns, a influência da potência de curto-circuito da rede de alta sobre a corrente de curto-circuito simétrica inicial, incluindo a contribuição dos motores (considerando o caso totalmente desfavorável de carga 100% motriz).

Considere o esquema mostrado na Figura 10.16, onde I_{k0} é a corrente de curto-circuito trifásico presumida no ponto F_0 e I_k é o valor correspondente ao ponto I. O trecho entre F_0 e F é constituído por um circuito trifásico de comprimento l, condutores de seção S, resistência R e reatância X.

Chamando $\dot{Z}_{k0} = R_{k0} + jX_{k0}$ à impedância a montante de F_0, pode-se escrever para I_{k0}, da Expressão 10.23, fazendo $c = 1$ e observando que

Tabela 10.8 ■ Cálculo das correntes de curto-circuito presumidas máximas (curtos trifásicos e bifásicos)

Coluna / Linha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Componente	Impedância de curto-circuito			Correntes de curto-circuito máximas (curto trifásico)				Correntes de curto-circuito máximas (curto bifásico)		Local da falta
		R_k	X_k	$Z_K = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$	$I'_k = I_k = \frac{c\,U_N}{\sqrt{3}\,Z_k}$	$\frac{R_k}{X_k}$	λ	$i_p = \lambda\sqrt{2}\,I''_k$	$I''_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2}\,I''_K$	$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2}\,i_p$	
		mΩ	mΩ	mΩ	kA	–	–	kA	kA	kA	
1	$\sum \dot{Z}_{ATi}$	0,239	0,612								
2	T1BT	4,15	13,83								
3	1 + 2	4,389	14,442	15,094	14,535	0,304	1,381	28,38	12,59	24,57	F1
4	L2	0,188	0,244								
5	3 + 4	4,577	14,686	15,383	14,262	0,312	1,372	27,67	12,35	23,96	F2
6	L3	5,36	2,076								
7	5 + 6	9,937	16,762	19,486	11,259	0,593	1,171	18,64	9,75	16,14	F3
8	L4	30,8	1,068								
9	7 + 8	40,737	17,83	44,468	4,934	2,285	1,021	7,12	4,27	6,17	F4

$u_N = 380$ V; $c = 1{,}00$

Tabela 10.9 ■ Influência da potência de curto-circuito da rede primária (S_{KQ}) sobre a corrente simétrica inicial (I_{KT}) no secundário de um transformador (a coluna (ΣI_K) inclui a contribuição dos motores (I_{KM}), assumindo-se carga 100% motriz

U_{nT} = 220 V					U_{nT} = 380 V					U_{nT} = 460 V				
S_nT (kVA)	S'_{kQ} (MVA)	I'_{KT} (kA)	I'_{KM} (kA)	ΣI_k (kA)	S_nT (kVA)	S'_{kQ} (MVA)	I'_{kT} (kA)	I'_{kM} (kA)	ΣI_k (kA)	S_nT (kVA)	S'_{kQ} (MVA)	I'_{kT} (kA)	I'_{kM} (kA)	ΣI_k (kA)
300	50	16,9		20,1	300	50	9,8		11,6	500	50	12,3		14,8
	100			21,4		100	10,5		12,3		100	13,8		16,3
u_k = 4%	150	18,7	3,2	20,9	u_k = 4%	150	10,8	1,8	12,6	u_k = 4%	150	14,4	2,5	16,9
	250	19,0		21,2		250	11,0		12,8		250	14,9		17,4
	500	19,4		22,6		500	11,2		13,0		500	15,2		17,7
	∞	19,7		22,9		∞	11,4		13,2		∞	15,7		18,2
500	50	25,8		31,1	500	50	14,9		17,9	750	50	14,1		17,9
	100	28,9		34,2		100	16,7		19,7		100	16,1		19,9
u_k = 4%	150	30,1	5,3	35,4	u_k = 4%	150	17,4	3,0	20,4	u_k = 4%	150	16,9	3,8	20,7
	250	31,1		36,4		250	18,0		21,0		250	17,7		21,5
	500	31,9		37,2		500	18,5		21,5		500	18,2		22,0
	∞	32,8		38,1		∞	19,0		22,0		∞	18,8		22,6
750	50	29,6		37,5	750	50	17,1		21,6	1.000	50	17,4		22,4
	100	33,8		41,7		100	19,6		24,1		100	20,6		25,6
u_k = 5%	150	35,5	7,9	43,4	u_k = 5%	150	20,5	4,5	25,0	u_k = 5%	150	21,9	5,0	26,9
	250	36,9		44,8		250	21,4		25,9		250	23,0		28,0
	500	38,1		46,0		500	22,0		26,5		500	24,0		29,0
	∞	39,3		47,2		∞	22,8		27,3		∞	25,1		30,1
1.000	50	36,5		47,0	1.000	50	21,1		27,1	1.500	50	20,2		27,7
	100	43,0		53,5		100	24,9		30,9		100	24,6		32,1
u_k = 5%	150	45,8	10,5	56,3	u_k = 5%	150	26,5	6,0	32,5	u_k = 5%	150	26,5	7,5	34,0
	250	48,3		58,8		250	27,9		33,9		250	28,2		35,7
	500	50,3		60,8		500	29,1		35,1		500	29,7		37,2
	∞	52,5		63,0		∞	30,4		36,4		∞	31,3		38,8
					1.500	50	24,5		33,5	2.000	50	24,1		34,1
						100	29,8		38,8		100	30,6		40,6
					u_k = 6%	150	32,1	9,0	41,1	u_k = 6%	150	33,6	10,0	43,6
						250	34,2		43,2		250	36,5		46,5
						500	36,0		45,0		500	38,9		48,9
						∞	38,0		47,0		∞	41,8		51,8

Fonte: Mendes, CLP, Correntes de curto-circuito em redes industriais

$$\frac{U_N}{\sqrt{3}} = U_0$$

$$I_{k0} = \frac{U_0}{Z_{k0}} = \sqrt{R_{k0}^2 + X_{k0}^2} \qquad (10.30)$$

Analogamente para I_k virá, desprezando a reatância X (o que, em princípio, pode ser feito para seções até 50 mm²)

$$I_k = \frac{U_0}{\sqrt{(R_{k0} + R)^2 + X_{k0}^2}} \qquad (10.31)$$

e desenvolvendo o denominador

$$I_k = \frac{U_0}{\sqrt{R_{k0}^2 + X_{k0}^2 + R^2 + 2RR_{k0}}} \qquad (10.32)$$

Da Expressão 10.30, obtém-se

$$R_{k0}^2 + X_{k0}^2 = \frac{U_0^2}{I_{k0}^2} \qquad (10.33)$$

O fator de potência cos Φ_{k0} pode ser escrito, considerando a Expressão 10.30

$$\cos \Phi_{k0} = \frac{R_{k0}}{Z_{k0}} = I_{k0}\frac{R_{k0}}{U_0} \qquad (10.34)$$

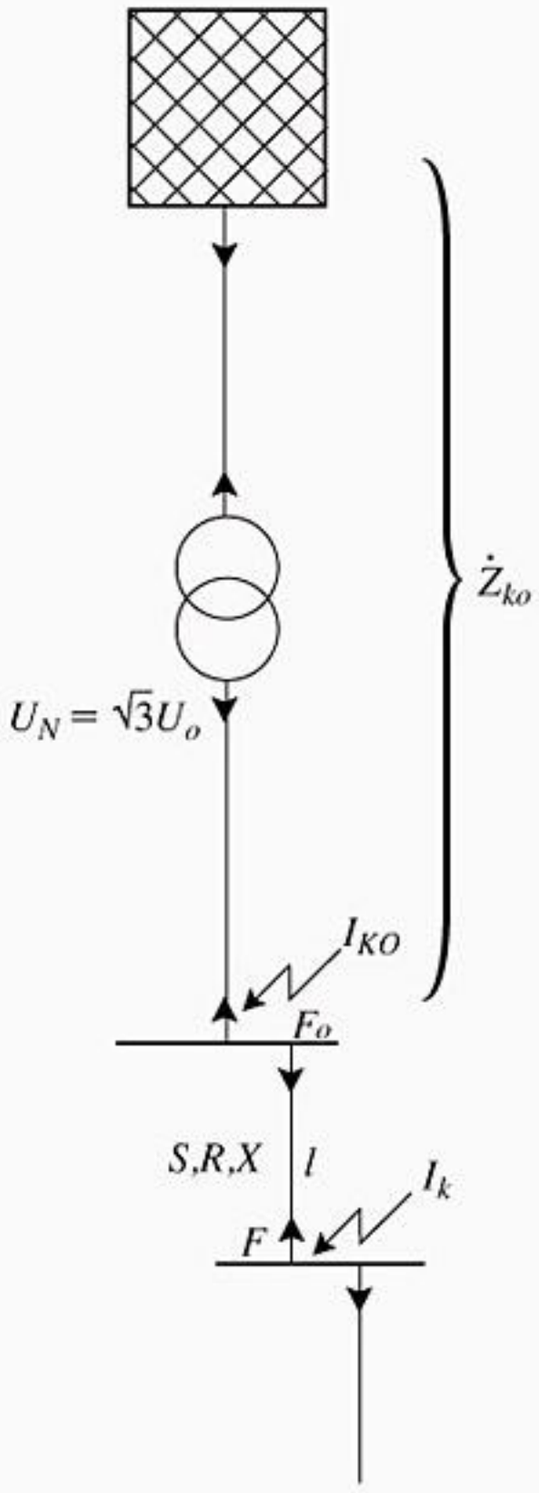


Figura 10.16 ■ Esquema unifilar

e daí

$$R_{k0} = \frac{U_0 \cos \Phi_{k0}}{I_{k0}} \qquad (10.35)$$

Acrescentando, na Expressão 10.32, a resistência R em função da resistividade ρ, do comprimento l e da seção S e, considerando as expressões 10.33, 10.34 e 10.35, obtém-se

$$I_k = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{U_0^2}{I_{k0}^2} + \frac{2U_0 \rho \cos \Phi_{k0} l}{I_{k0} S} + \frac{\rho^2 l^2}{S^2}}} \qquad (10.36)$$

Essa expressão permite calcular, para circuitos trifásicos, a corrente de curto-circuito trifásico presumida em um ponto, I_k, partindo da corrente de curto-circuito trifásico presumida inicial (a montante), I_{k0}, e considerando condutores de seção até 50 mm². A corrente I_{k0} pode ser, por exemplo, a corrente de curto-circuito no secundário de um transformador e I_k, a corrente de curto-circuito presumida no barramento de um quadro de distribuição imediatamente a jusante. Logicamente, a expressão pode ser aplicada sucessivamente.

A aplicação desse método aproximado é feita, tradicionalmente, considerando-se os condutores a uma temperatura de cerca de 95 °C. Assim, para condutores de cobre, ρ = 22,4 mΩ.mm²/m, e circuitos com tensões 220/380 V (U_o = 220 V) virá, da Expressão 10.36:

$$I_k = \frac{22}{\sqrt{\frac{484}{I_{k0}^2} + \frac{100 \cos \Phi_{k0} l}{I_{k0} S} + \frac{5l^2}{S^2}}} \qquad (10.37)$$

e para circuitos com tensões 127/220 V (U_o = 127 V)

$$I_k = \frac{12{,}7}{\sqrt{\frac{162}{I_{k0}^2} + \frac{57 \cos \Phi_{k0} l}{I_{k0} S} + \frac{5l^2}{S^2}}} \qquad (10.38)$$

O fator de potência cos Φ_{ko} é dado em função de I_{k0}, na Tabela 10.10:

Dobrando o valor do comprimento l, a Expressão 10.37 é aplicável a circuitos monofásicos de 220 V e a Expressão 10.33 a circuitos monofásicos de 127 V.

As expressões 10.37 e 10.38 dão origem aos gráficos das figuras 10.17 e 10.18, respectivamente.

EXEMPLO

Circuito de distribuição trifásico, 380 V, condutores de cobre, seção 16 mm², comprimento 20 m, corrente de curto-circuito presumida no início da linha 15 kA, fator de potência correspondente de 0,3. Deseja-se determinar o valor da corrente de curto-circuito presumida na extremidade da linha.

Tabela 10.10 ■ Fator de potência em função de I_{k0}

I_{k0} (kA)	1,5 a 3	3,1 a 4,5	4,6 a 6	6,1 a 10	10,1 a 20	Maior que 20
cos Φ_{k0}	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	0,25

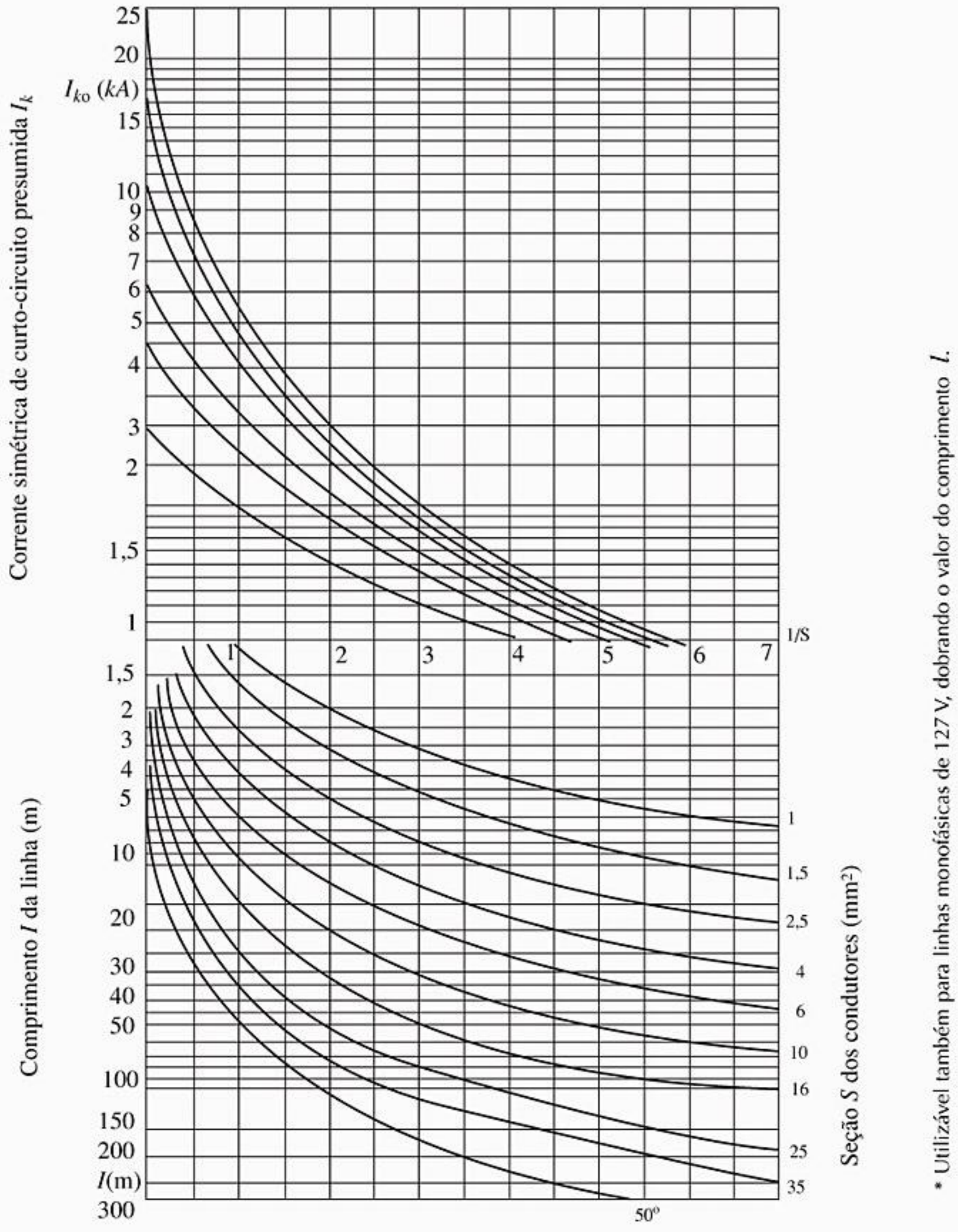


Figura 10.17 ■ Diagrama para a determinação rápida da corrente de curto-circuito presumida (Cortesia da Bticino)

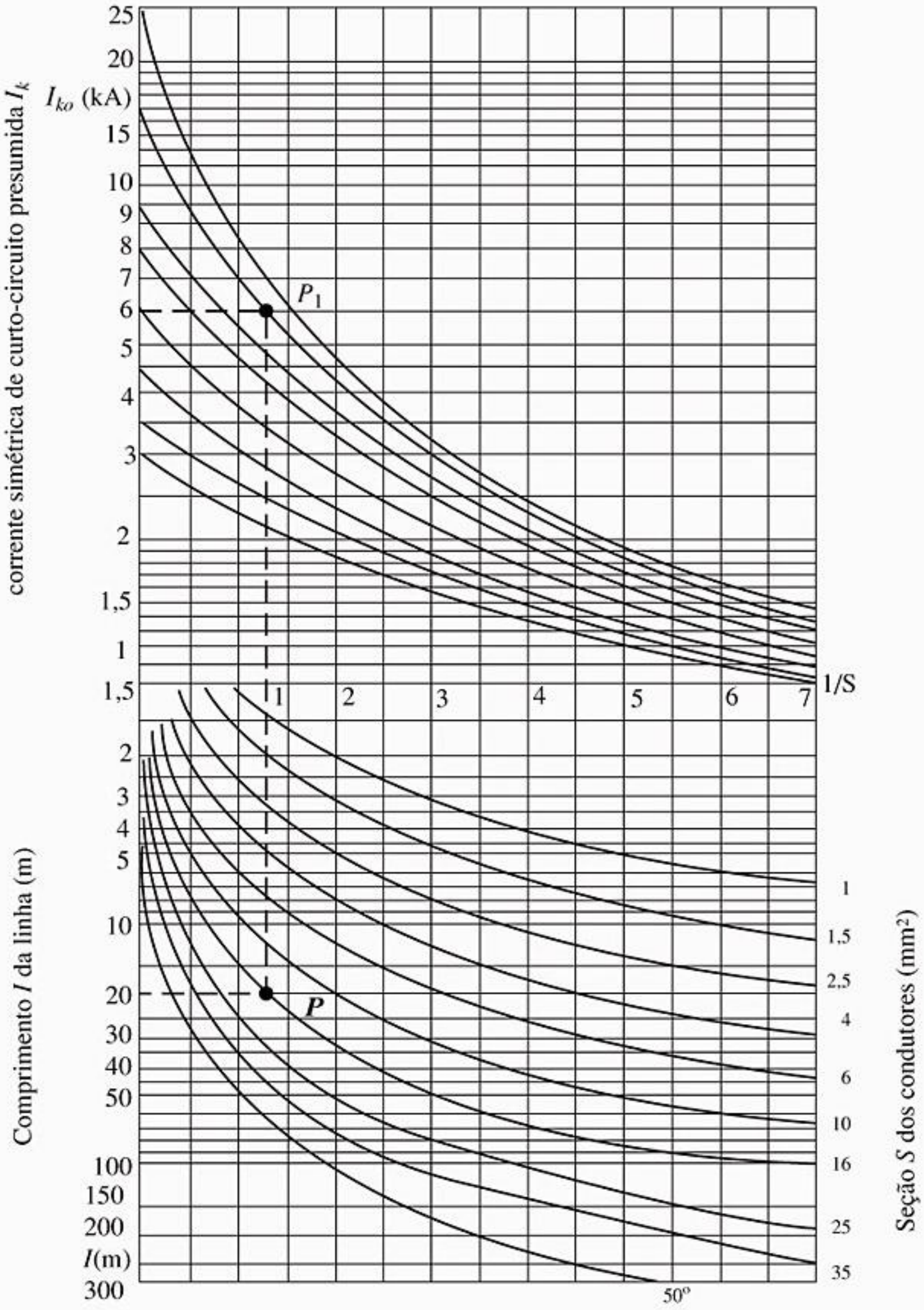
(a) Pela Expressão 10.37

$$I_k = \frac{22}{\sqrt{\frac{484}{15^2} + \frac{100 \times 0{,}3 \times 20}{15 \times 16} + 5 \times \frac{20^2}{16^2}}} =$$

6,2 kA

(b) Pelo gráfico da Figura 10.18

- Determina-se o ponto P, interseção da curva de 16 mm² com a ordenada 20 m.
- A vertical levantada a partir de P encontra a curva de I_{k0} = 15 kA no ponto P_1.
- A ordenada de P_1 é o valor procurado, ou seja 6 kA.



*Utilizável também para linhas monofásicas de 220 V, dobrando o valor do comprimento l

Figura 10.18 ■ Diagrama para a determinação rápida da corrente de curto-circuito presumida (Cortesia da Bticino)

Corrente de curto-circuito presumida mínima

No estudo da coordenação entre dispositivos de proteção apenas contra curtos-circuitos e condutores, muitas vezes é necessário conhecer o valor da corrente de *curto-circuito presumida mínima* ($I_{kmín}$), na extremidade do circuito (lado da carga).

Para avaliar essa corrente, são feitas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Só é considerado o circuito em questão, sendo desprezados todos os componentes a montante de sua origem, isto é, do ponto de aplicação do dispositivo de proteção.
- A tensão na origem do circuito, quando ocorre a falta, é considerada igual a 80% da tensão nominal do circuito.
- A resistência (resistividade) dos condutores do circuito, devido ao aumento de temperatura provocado pela falta, é majorada de 50%; adota-se para o cobre $\rho = 0{,}027.\Omega.mm^2/m$ e para o alumínio $\rho = 0{,}043\ \Omega.mm^2/m$.
- Para seções até 120 mm², despreza-se a reatância; para 150 mm², aumenta-se de 15% a resistência; para 185 mm², de 20%; e para 240 mm², de 25%.

- O curto-circuito é sempre entre dois condutores, fase-fase ou fase-neutro.

  A expressão utilizada é:

$$I_{kmín} = \frac{0{,}8\ US}{r\rho 2\ l} \qquad (10.39)$$

onde

- U é a tensão nominal entre fase e neutro, se o circuito possuir neutro distribuído, ou entre fases no caso contrário, em V.
- S é a seção dos condutores, em mm².
- r é um fator que vale

r	$S(mm^2)$
1,00	≤ 120
1,15	150
1,20	185
1,25	240

- ρ é a resistividade igual a 0,027 Ω.mm²/m para o cobre e 0,043 Ω.mm²/m para o alumínio.
- l é o comprimento do circuito (m).
- Se a seção do condutor neutro for a metade da dos condutores de fase, o valor de $I_{kmín}$ obtido pela Expressão 10.39 deve ser multiplicado por 0,67.

EXEMPLO

No exemplo apresentado na Figura 10.14, calcule a corrente de curto-circuito presumida mínima nos pontos F3 e F4, utilizando a Expressão 10.39.

F3____linha L3__3F + N, U = 220 V, S = 70 mm², cobre, l = 20 m

$$I_{kmín} = \frac{0{,}8 \times 220 \times 70}{1 \times 0{,}027 \times 2 \times 20} = 11.407\ A = 11{,}4\ kA$$

F4____linha L4__3F + N + PE, U = 220 V, S = 6 mm², cobre, l = 10 m

$$I_{kmín} = \frac{0{,}8 \times 220 \times 6}{1 \times 0{,}027 \times 2 \times 10} = 1.956\ A = 1{,}96\ kA$$

EXERCÍCIOS

1. O valor da corrente de crista de falta em instalações de baixa tensão depende de quais parâmetros?

2. Quais fontes de correntes de faltas são consideradas as principais?

3. Como é determinado o fator de potência de curto-circuito?

4. Qual é a definição da corrente de curto-circuito simétrica inicial (I''_k)?

5. Qual é a definição da corrente de curto-circuito simétrica permanente (I_k)?

6. Defina valor de crista da corrente de curto-circuito.

7. Quais são as impedâncias consideradas para os diversos componentes nos cálculos das correntes de curto-circuito em sistemas de baixa tensão?

8. Em que situação deve ser considerada a contribuição dos motores assíncronos à corrente de curto-circuito?

9. Qual é a relação entre as correntes de curto-circuito bifásica (I''_{k2}) e a fase-terra (I''_{k1}) com a corrente de curto-circuito trifásica (I''_{k3})?

10. Quando temos impedância de neutro (Z_n), a impedância Z_0 é acrescida de que valor?



11 Proteção contra sobrecorrentes

11.1 Caracterização das sobrecorrentes

Nas instalações elétricas, as *sobrecorrentes* são tradicionalmente divididas em dois tipos: *correntes de sobrecarga*, que ocorrem em um circuito sem que haja falta, e *correntes de curto-circuito*, que resultam de falta direta entre condutores vivos. É comum considerar-se as primeiras como de pequena intensidade e as outras como de grande intensidade, o que nem sempre corresponde à realidade.

As partidas de muitos equipamentos de utilização dão lugar a sobrecorrentes por vezes elevadas, caracterizadas como *correntes de sobrecarga transitórias*, que não devem, logicamente, provocar a atuação dos dispositivos de proteção. Pode-se citar:

- As correntes de partida de motores de indução, que podem ser da ordem de sete vezes a corrente nominal, porém, com duração limitada a uns poucos segundos. Tais sobrecorrentes somente serão danosas aos condutores no caso de se repetirem em intervalos de tempo tão curtos que não permitam seu resfriamento. Nesse caso, haverá necessidade de aumentar a seção dos condutores, considerando uma corrente de projeto adequadamente majorada em relação à corrente nominal. É o que ocorre no acionamento de elevadores, monta-cargas etc.
- As lâmpadas de descarga, especialmente as de alta pressão, que apresentam sobrecorrentes de partida de duas ou três vezes a corrente nominal, por alguns minutos. No entanto, como geralmente tais partidas não são repetitivas, não trazem nenhum risco aos condutores.
- As lâmpadas incandescentes, que apresentam correntes de partida extremamente elevadas (cerca de 12 vezes a corrente nominal). No entanto, o tempo de partida é de alguns milésimos de segundos e, portanto, não ocorrem solicitações térmicas significativas nos condutores.

A má avaliação da simultaneidade de funcionamento dos equipamentos de utilização de um setor de uma instalação, isto é, a adoção de fatores de demanda mais baixos que os reais, pode provocar *correntes de sobrecarga* no circuito de distribuição que alimenta o setor. Geralmente, tais sobrecorrentes são de 10 por cento a 20 por cento superiores às capacidades de condução de corrente dos condutores, sendo particularmente perigosas pela dificuldade em controlá-las. É fácil verificar que tais níveis de sobrecorrentes elevam a temperatura dos condutores de 10 °C a 15 °C acima da temperatura máxima para serviço contínuo, contribuindo para a re-dução da vida útil dos condutores isolados e dos cabos isolados.

As *faltas* ocorrem quando partes sob potenciais diferentes, uma das quais aterrada, entram em contato, diretamente ou por meio de uma impedância (de contato), devido às falhas nas isolações. Uma *corrente de falta para terra* de um equipamento de utilização pode dar origem, quando somada à corrente do circuito, a uma sobrecorrente, geralmente de pequena intensidade, nem sempre interrompida em tempo adequado. Por outro lado, as faltas não-diretas entre condutores vivos de linhas ou de equipamentos de utilização quase sempre evoluem para faltas diretas, dando origem, portanto, a *correntes de curto-circuito*.

É importante notar que, em uma instalação, pode-se ter ainda:

- Correntes de sobrecarga provocadas pela substituição de equipamentos de utilização previstos ou já instalados por outros de maior potência ou pela inclusão de novos equipamentos de utilização, o que só se resolve com o redimensionamento ou separação do circuito.
- Correntes de sobrecarga provocadas por motores sobrecarregados, isto é, que estejam acionando cargas excessivas para sua potência nominal.
- Correntes de curto-circuito provocadas por erros de ligação (por exemplo, durante uma manutenção) ou mesmo pela ligação de um equipamento de utilização que esteja em curto.

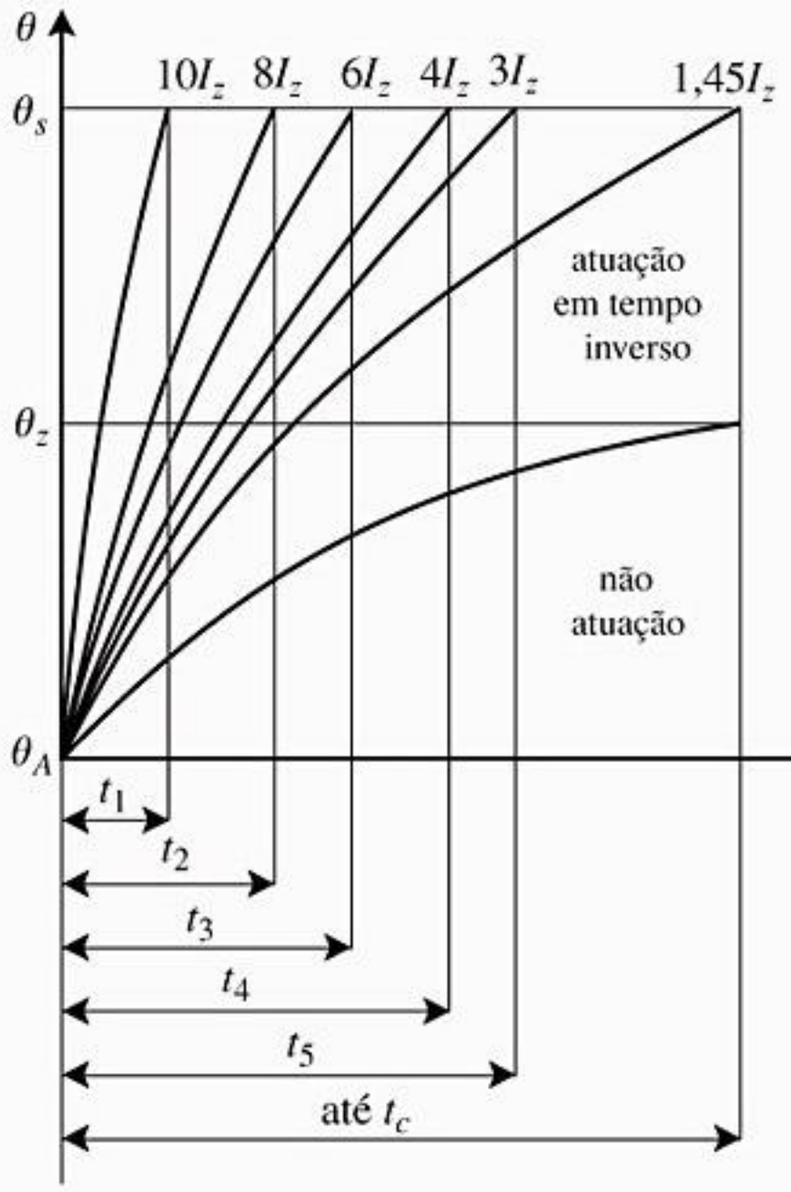
Para finalizar, deve-se observar que, embora na maioria dos casos as correntes de curto-circuito sejam de intensidade superior à das correntes de sobrecarga, há situações em que pode ocorrer exatamente o contrário. Assim, por exemplo, enquanto motores de indução, quando sobrecarregados, podem absorver correntes (de sobrecarga) muito elevadas, curtos-circuitos nas extremidades de linhas muito longas com resistência de contato considerável podem dar origem a correntes (de curto-circuito) muito baixas.

11.2 Limitação da duração de uma corrente de sobrecarga

Como apresentado no Capítulo 9, na Expressão 9.13, a temperatura final assumida por um condutor aumenta com o quadrado da corrente que circula por ele. Do ponto de vista dos efeitos térmicos produzidos, as correntes de sobrecarga de pequena intensidade e as de grande intensidade podem ser consideradas separadamente.

Uma corrente de sobrecarga é considerada de pequena intensidade quando a temperatura de regime atingida não for superior à temperatura (máxima) de sobrecarga θ_s (ver Tabela 9.16). Tais correntes não devem tornar-se permanentes para não comprometer a vida da isolação, mas podem ser suportadas por tempos relativamente longos, acima de uma hora. Pode-se dizer, fazendo referência à NBR 5410, que são consideradas de pequena intensidade correntes de sobrecarga de até 1,45 vez a capacidade de condução de corrente do condutor ou cabo isolado.

Se a corrente de sobrecarga for de grande intensidade, a temperatura de regime assume valores excessivamente elevados, que comprometem não só a durabilidade da isolação, como também sua integridade física e química. Assim, por exemplo, com uma corrente de sobrecarga de $2I_z$, um condutor com isolação de PVC atinge uma temperatura da ordem de 190 °C, que provoca a rápida destruição da isolação, possibilitando, como conseqüência, uma falta. Nessas condições, é necessário que o circuito seja interrompido em um tempo tanto menor quanto maior a corrente de sobrecarga, como ilustra a Figura 11.1.



- Os tempos de atuação t_1, t_2, t_3 etc. devem ser tanto menores quanto maior for a relação de sobrecarga n.
- Para $n = 1{,}45$, admite-se um tempo de atuação no máximo igual ao tempo convencional (t_c) do dispositivo.

Figura 11.1 ■ Atuação a tempo inverso

A partir desse conceito são obtidas as chamadas *curvas-limites de sobrecarga* apresentadas na Seção 9.6.

Assim, para dado condutor ou cabo isolado, em dada condição de instalação, existem duas curvas $t = f(n)$, tempo em função da relação de sobrecarga, que dão o tempo necessário para o condutor atingir uma temperatura de sobrecarga prefixada θ_s (ver Figura 9.10); a primeira válida para a hipótese do início da sobrecarga com o cabo na temperatura ambiente (partida a frio) e a segunda, acentuadamente mais baixa, válida para o início da sobrecarga com o cabo na temperatura máxima para serviço contínuo (partida a quente). As duas curvas delimitam a *zona de atuação ideal* de um dispositivo de proteção; se a curva do dispositivo estiver abaixo das duas curvas de sobrecarga, não se aproveita plenamente a possibilidade de o condutor, ou cabo isolado, suportar sobrecargas transitórias; se estiver acima das curvas de sobrecarga, o condutor atingirá e superará a temperatura θ_s sem que o dispositivo de proteção atue (em tempo hábil). A Figura 11.2 mostra a condição ideal. Observe que a curva de atuação indicada para o dispositivo é a que corresponde à pior condição, isto é, a curva tempo máximo de atuação-corrente.

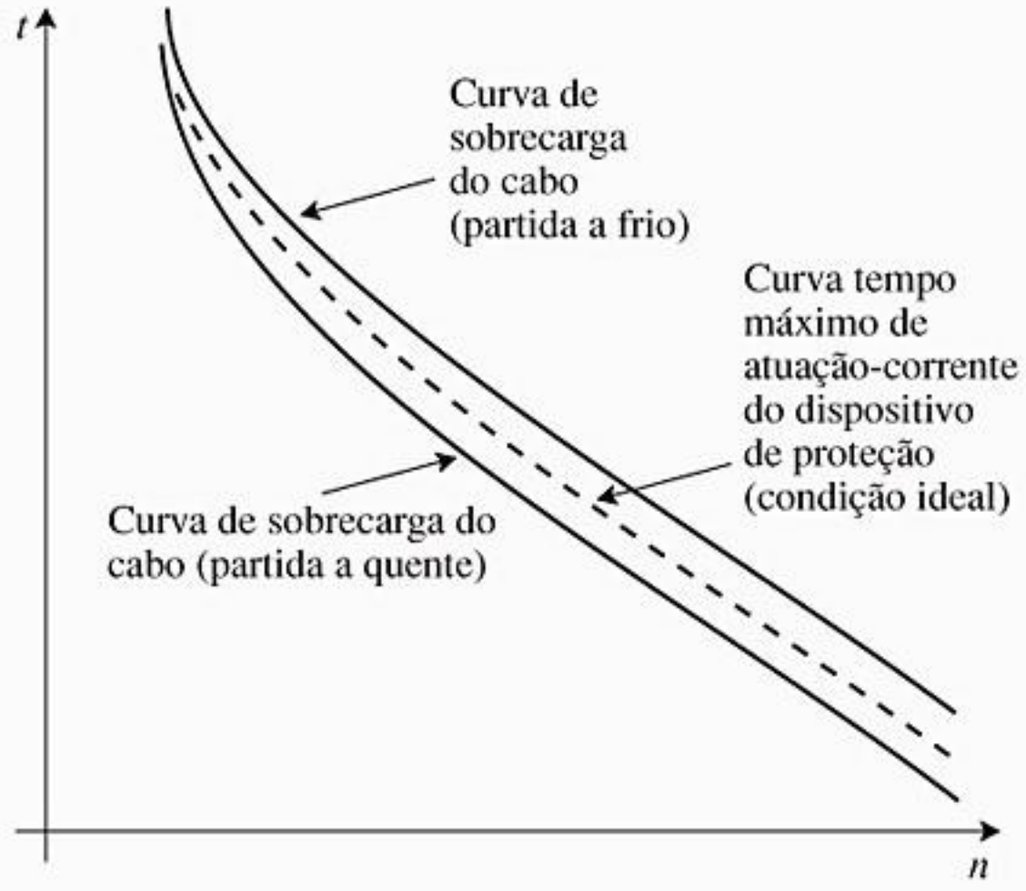


Figura 11.2 ■ Curvas-limite de sobrecarga e curva de atuação ideal de um dispositivo de proteção contra sobrecargas

Nas figuras 11.3(a) e 11.3(b), são mostradas duas situações bastante comuns:

- O dispositivo de proteção contra corrente de sobrecarga só protege a partir de determinado valor da relação de sobrecarga (ver Figura 11.3(a)).
- O dispositivo de proteção contra correntes de sobrecarga só protege até determinado valor da relação de sobrecarga (ver Figura 11.3(b));

11.3 A integral de Joule

Conceituação

A integral de Joule (I^2t) é uma grandeza que assume uma importância fundamental no estudo de fenômenos relacionados com pulso de corrente não senoidais de curta duração, como os criados por dispositivos de seccionamento a estado sólido e por dispositivos de proteção a sobrecorrente do tipo limitador (fusíveis e disjuntores). Em particular, I^2t é uma ferramenta de grande utilidade no trabalho com problemas térmicos resultantes da circulação de correntes de valor elevado e de curta duração, como as de falta direta em circuitos elétricos, no que concerne ao aquecimento dos condutores e à atuação das proteções.

Quando as sobrecorrentes assumem valores muito elevados, como no caso de curtos-circuitos, temperaturas da ordem de centenas de graus são atingidas pelos condutores em tempos muito pequenos, freqüentemente da ordem de centésimos de segundos. Para tempos tão curtos não é viável considerar constante o valor eficaz da corrente, como no caso de correntes de sobrecarga.

De fato, seja pela forma de onda da corrente, seja pelo efeito da indutância da linha, nos primeiros ciclos da corrente de falta direta, seus efeitos não devem ser avaliados pelo valor eficaz. Assim, para o estudo dos efeitos térmicos dessa corrente, considerando tempos extremamente pequenos, não se pode separar a grandeza *corrente* da grandeza *tempo*, sendo necessário considerá-las em conjunto no produto integral

$$\int_0^t [i(t)]^2 \cdot \, dt = I^2t \qquad (11.1)$$

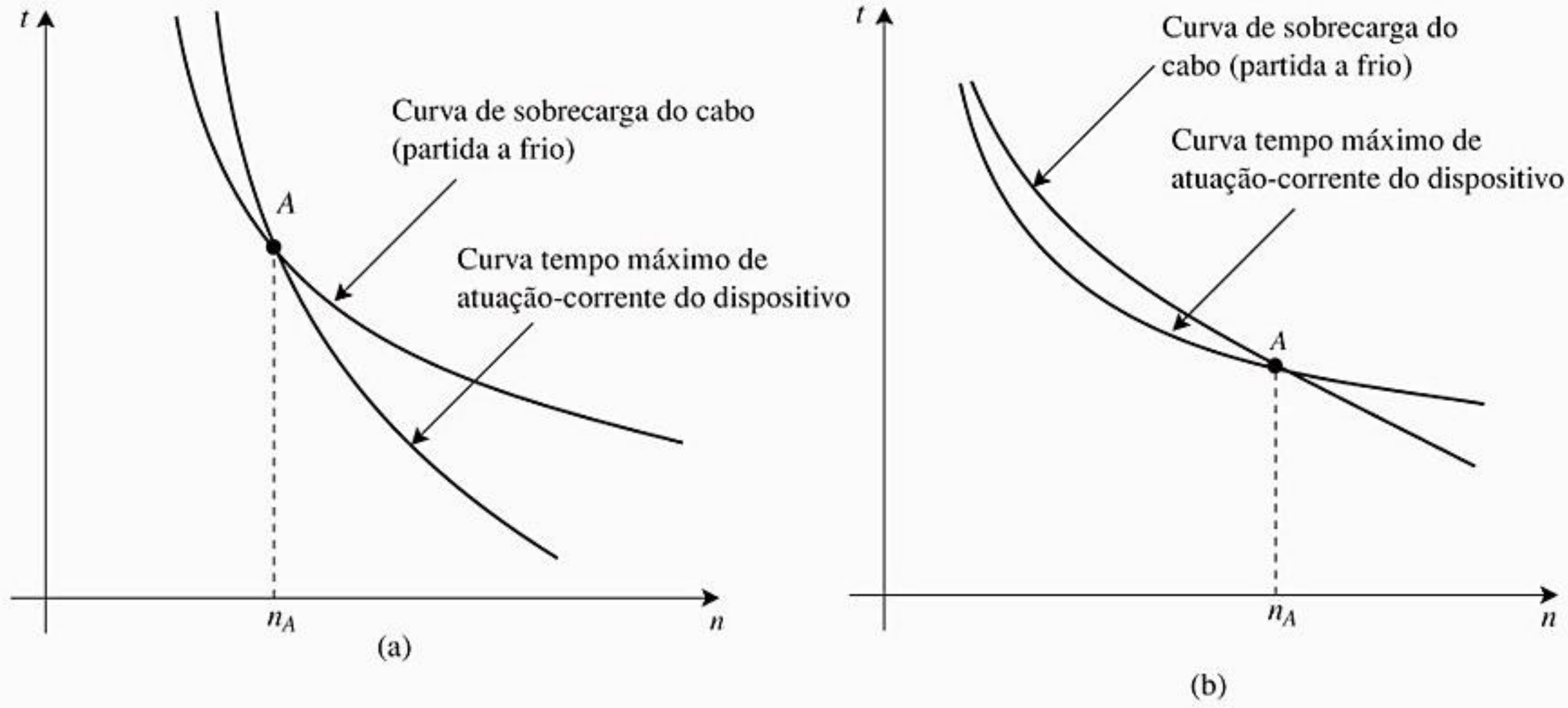


Figura 11.3 ■ Proteção de condutor contra correntes de sobrecarga: (a) dispositivo só protege a partir de n_A; (b) dispositivo só protege até n_A

A respeito da integral de Joule (I^2t), diz o *Buff Book* do IEEE (*Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems* – Std 242 –): "O conceito de I^2t foi introduzido para suplementar o conceito de corrente simétrica porque representa os esforços térmicos e magnéticos reais impostos a um componente conduzindo uma corrente de curto-circuito nos primeiros ciclos. A grandeza I^2t representa

$$\int i^2\,dt$$

a integral do quadrado da corrente durante o intervalo de tempo considerado. Valores nominais de I^2t estão sendo aplicados cada vez mais a equipamentos elétricos, e alguns dispositivos de proteção são coordenados também com base em I^2t, em vez de considerar-se somente a máxima corrente de curto-circuito."

Essa grandeza é proporcional à área compreendida entre a curva $i^2 = f(t)$ e o eixo das abcissas, como mostra a Figura 11.4.

A integral de Joule pode ser calculável ou mensurável caso a caso, em ensaio de curto-circuito. Observe que, há algum tempo, a integral de Joule não constituía nenhum problema para o projetista, e sim apenas para o fabricante de dispositivos de proteção. Hoje, tal grandeza é bastante utilizada na análise da coordenação entre condutores e dispositivos de proteção contra sobrecorrentes.

No estudo da proteção dos condutores contra sobrecorrentes, é muito importante dispor das curvas $i^2 = f(I)$, integral de Joule, em função da corrente para os condutores e para os dispositivos de proteção.

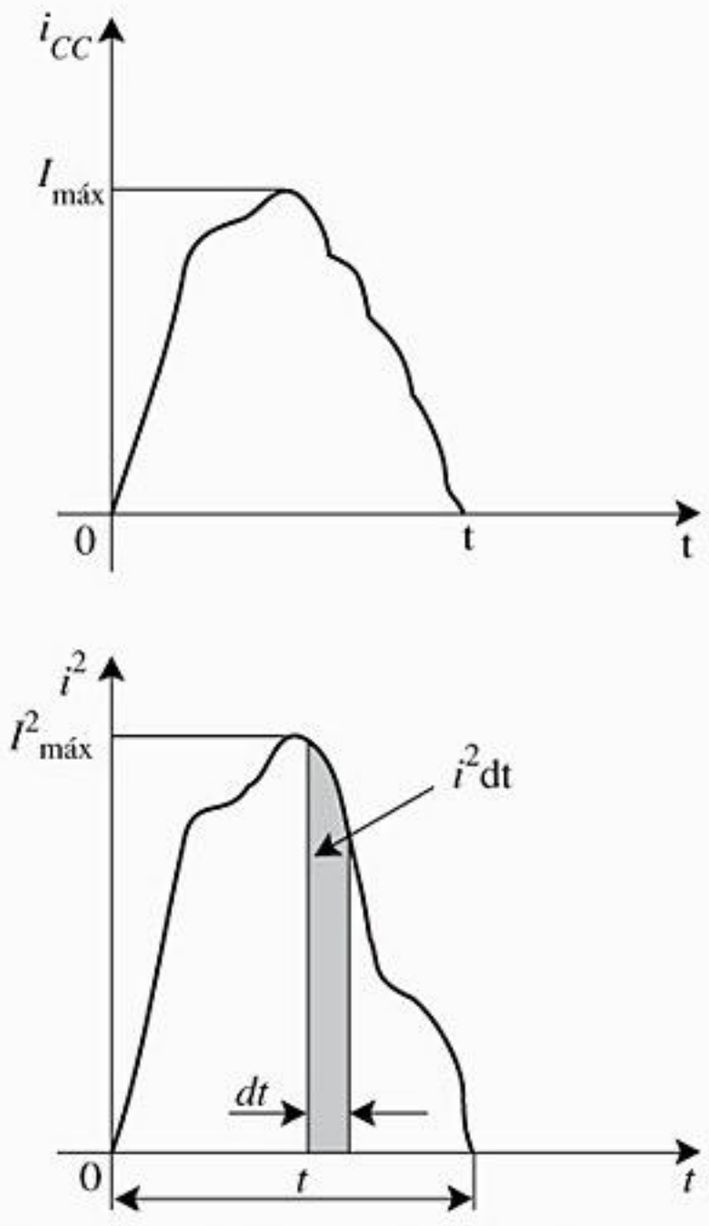


Figura 11.4 ▪ Interpretação da integral de Joule

Integral de Joule dos condutores

Nos cabos de baixa tensão, as faltas de origem interna geralmente não são causadas pela tensão aplicada. Neles, a espessura da isolação, por razões exclusivamente mecânicas, é sempre bastante superior à que seria necessária para garantir a rigidez dielétrica diante das (modestas) tensões aplicadas.

Nos condutores isolados, bem como nos cabos uni e multipolares de baixa tensão, em linhas elétricas fixas, as faltas, geralmente, são causadas por problemas termomecânicos, ou seja, pelas solicitações mecânicas a que o cabo é submetido durante seu funcionamento (movimento do(s) condutor(es) provocado por seu aquecimento e resfriamento) associadas a uma temperatura superior à temperatura ambiente.

Na isolação de um condutor ou cabo isolado, o material isolante que a compõe possui uma 'vida útil convencional', ao fim da qual suas características mecânicas estarão bastante prejudicadas. É importante observar que, nessas condições, a isolação ainda poderia suportar a baixa tensão do circuito (normalmente as propriedades elétricas não decaem como as mecânicas), desde que o cabo não esteja submetido a qualquer movimento. Na prática, isso não é possível, ainda que, mesmo em linhas fixas, exista movimentação graças à dilatação térmica dos componentes do cabo.

A *curva de vida convencional* de um material isolante fornece o correspondente tempo de vida útil, para cada temperatura de funcionamento, admitindo-se continuamente mantida. A curva *A* da Figura 11.5 mostra a curva de vida convencional de uma isolação de PVC, como a utilizada nos condutores isolados que atendem à NBR NM 247-3.

A temperatura de 70°C é a *temperatura máxima para serviço contínuo* dos cabos com isolação de PVC. Com essa temperatura, a isolação e, conseqüentemente, o cabo têm uma vida útil estimada de cerca de 20 anos. Assim como em muitas instalações, os cabos funcionam com temperaturas inferiores à máxima admissível, em razão, por exemplo, de limitar a queda de tensão. Para que a vida útil dos cabos ultrapasse os 20 anos, não devem ser submetidos à carga máxima durante as 24 horas do dia (como em locais residenciais, comerciais etc.)

Por outro lado, a vida dos cabos pode ser bastante reduzida por solicitações anormais que ocorrem com freqüência nas instalações. É, por exemplo, o caso de:

- Elevada temperatura dos condutores nos pontos de conexão com dispositivos de proteção; mesmo em serviço normal, essa temperatura pode ser superior à temperatura máxima para serviço contínuo característica da isolação.
- Concentração de esforços de compressão sobre a isolação, em alguns pontos de um circuito, provocada pela dilatação térmica do condutor.

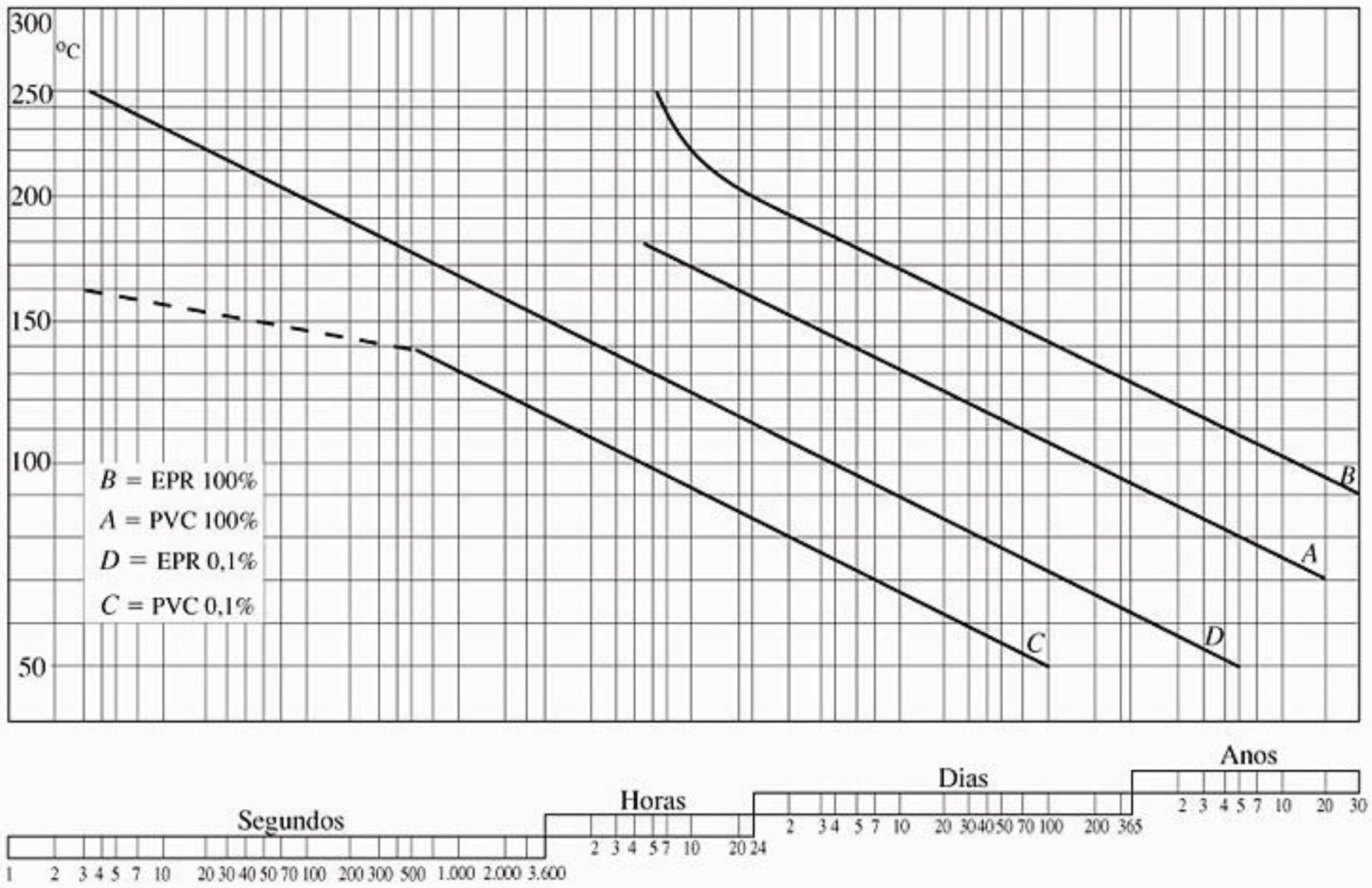


Figura 11.5 ■ Curvas de vida útil relativas às isolações de PVC e EPR

- Sobretemperaturas verificadas nos condutores, causadas por sobrecorrentes.

A isolação de PVC apresenta uma vida útil bem inferior aos 20 anos para temperaturas superiores a 70 °C, tanto menor quanto maior a temperatura. Assim, por exemplo, com funcionamento permanente a 100 °C (*temperatura de sobrecarga*) sua duração é de cerca de 200 dias (Figura 11.5). Logicamente, a temperatura de 100 °C em um condutor ou cabo isolado só é admissível em condições de sobrecorrente por um tempo sensivelmente inferior a 200 dias, devendo o cabo conservar boa parte de sua vida útil para assegurar o funcionamento a 70 °C.

Geralmente, admite-se que, para cada sobrecorrente, um cabo possa permanecer exposto à correspondente sobretemperatura por um tempo igual a 1/1.000 de sua vida útil, de modo que, mesmo ocorrendo certo número de sobrecorrentes ao longo da vida do cabo, elas não provoquem uma redução sensível de sua vida útil.

De acordo com essa consideração, a duração do funcionamento admissível para cada sobretemperatura (e para cada ocorrência) é representada, para o PVC, pela curva *C* da Figura 11.5, na qual cada temperatura corresponde a uma duração de 1/1.000 da indicada na curva A. Assim, por exemplo, tome-se a temperatura de 80 °C:

- Funcionando continuamente com seu condutor a 80 °C, um cabo pode durar até, aproximadamente, seis anos (2.190 dias) (curva *A*).
- Uma sobrecorrente que eleve a temperatura do condutor a 80 °C deverá ter uma duração máxima de cerca de dois dias (2.190/1.000) (curva *C*).

A hipótese de o cabo perder, a cada ocorrência de sobrecorrente, 1/1.000 de sua vida útil é arbitrária e, sem dúvida, está a favor da segurança, não influenciando decisivamente; no entanto, na escolha da proteção do cabo contra as sobrecorrentes.

Na Figura 11.5, a curva *A* e a curva *C*, da sobretemperatura admissível durante a ocorrência de uma sobrecorrente, são cortadas em correspondência à temperatura de 160 °C (Tabela 9.17), que é a *temperatura de curto-circuito* característica do PVC, na qual a mistura isolante sofre um amolecimento de tal ordem que a mais leve solicitação de compressão aplicada pode determinar a completa destruição da camada isolante.

Desse modo, para determinado cabo, com um tipo de isolação, para cada sobretemperatura e, portanto, para cada sobrecorrente, há determinado tempo admissível. Nessas condições, a cada sobrecorrente, corresponde uma 'energia específica' I^2t, que pode 'passar' pelo cabo. É possível, portanto, traçar uma curva $(I^2t) = f(I)$, isto é, integral de Joule admitida pelo cabo, em função da corrente que circula pelo cabo. A Figura 11.6 mostra uma curva típica, na qual:

- O trecho assintótico vertical corresponde a um valor de corrente igual à capacidade de condução de corrente (Iz) do cabo, fazendo que o condutor atinja sua temperatura máxima para serviço contínuo (θ_Z) o que, como vimos, corresponde um valor de I^2t praticamente infinito.
- O trecho assintótico horizontal corresponde aos valores de corrente para os quais o aquecimento do condutor

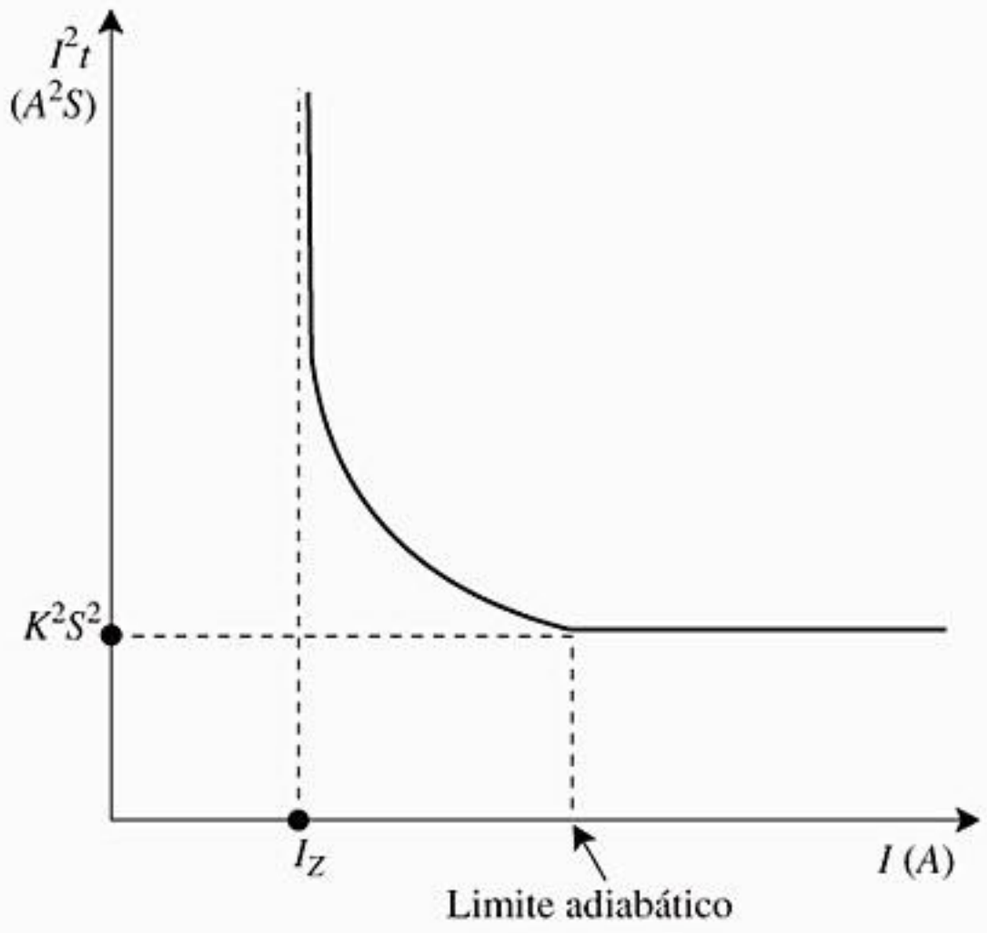


Figura 11.6 ▪ Curva $(I^2t) = f(I)$ típica de um cabo

é adiabático, isto é, sem troca de calor entre condutor e isolação, $I^2t = cte$.

- A região entre as duas assíntotas é obtida pelo critério de redução de 1/1.000 da vida do cabo para cada sobrecorrente.

A energia necessária para elevar a temperatura do condutor desde a temperatura máxima para serviço contínuo, θ_Z, até a temperatura de curto-circuito, θ_k, em um processo adiabático, pode ser expressa por

$$\int_0^t Ri^2dt = (\theta_k - \theta_z)c\gamma Sl \qquad (11.2)$$

onde i é o valor instantâneo da corrente, t é o tempo em que ela circula, R é a resistência do condutor, c é o calor específico do material do condutor, γ é sua massa específica, S é a seção do condutor e l seu comprimento.

A resistência R não é, logicamente, independente da temperatura e, portanto, não pode ser colocada fora da integral. No entanto, sendo fixos os dois limites de variação dessa grandeza, isto é, para θ_Z e para θ_k, a Expressão 11.2 pode ser escrita

$$R_{EQ}\int_0^t i^2dt = (\theta_k - \theta_z)c\gamma Sl \qquad (11.3)$$

A existência de limites prefixados de temperatura inicial e final permite que a resistência seja tratada como um valor constante R_{EQ}, ou que a resistividade seja considerada constante e igual a ρ_{EQ} (valores correspondentes a uma temperatura intermediária). Pode-se escrever que

$$R_{EQ} = \rho_{EQ}\frac{l}{S} \qquad (11.4)$$

substituindo a Expressão 11.4 na Expressão 11.3 virá, isolando a integral de Joule

$$\int_0^t i^2dt = \frac{(\theta_k - \theta_z)}{\rho_{EQ}}c\gamma S^2 \qquad (11.5)$$

fazendo

$$\frac{(\theta_k - \theta_z)}{\rho_{EQ}}c\gamma = K^2 \qquad (11.6)$$

(não confundir K com condutância térmica) virá, da Expressão 11.5

$$\int_0^t i^2dt = K^2S^2 \qquad (11.7)$$

expressão que dá a integral de Joule necessária para, em um processo adiabático, elevar a temperatura do condutor desde a temperatura máxima para serviço contínuo, θ_Z, até uma temperatura de curto-circuito, $\theta_k = \theta_{cc}$, prefixada (160 °C, para isolação de PVC, e 250 °C, para isolação de EPR ou XLPE).

Os valores de K apresentados na NBR 5410 não são obtidos da Expressão 11.6 e sim de outra mais exata, indicada a seguir, em que aparecem o coeficiente de temperatura e a resistividade do metal do condutor a 20 °C, respectivamente, α_{20} e ρ_{20}.

$$K = \sqrt{\frac{c\left(\frac{1}{\alpha_{20}} + 20\right)}{\rho_{20}} ln \frac{\frac{1}{\alpha_{20}} + \theta_k}{\frac{1}{\alpha_{20}} + \theta_z}} \qquad (11.8)$$

A Tabela 11.1 dá os valores de K e os demais valores utilizados em sua obtenção pela Expressão 11.8.

A Expressão 11.7 permite que se calcule a integral de Joule correspondente à elevação da temperatura do condutor de θ_Z a θ_k, admitindo processo adiabático. É o que mostra a Tabela 11.2.

Assim, a curva $(I^2t) = f(I)$ de um condutor isolado ou de um cabo isolado dá os valores máximos da integral de Joule que o condutor ou cabo deixa passar sem danificar-se, isto é, sem que o respectivo condutor atinja uma temperatura perigosa e nela permaneça por um tempo suficiente para danificar a isolação:

Tabela 11.1 ▪ Obtenção dos valores de K dados na NBR 5410

Metal	$1/\alpha_{20}$	c (J/°C mm³)	ρ_{20} (Ω . mm)	Isolação	$\theta_k = \theta_{CC}$ (° C)	K
Cobre	234,5	$3{,}45 \times 10^{-3}$	$17{,}241 \times 10^{-6}$	PVC EPR/XLPE	160 250	115 135
Alumínio	228	$2{,}5 \times 10^{-3}$	$28{,}264 \times 10^{-6}$	PVC EPR/XLPE	234,5	74 87

Tabela 11.2 ■ Valores da integral de Joule (I^2t) para aquecimento adiabático dos condutores de θ_Z a θ_k; condutores de cobre

Seção (mm²)	Integral de Joule ($A^2s \times 10^3$)	
	Isolação de PVC	Isolação de EPR ou XLPE
1,5	29,7	46
2,5	82,6	127
4	211,6	327
6	476,1	736
10	1.322,5	2.045
16	3.385	5.235
25	8.265,6	12.781
35	16.200	25.050
50	35.062	51.123
70	64.802	100.200
95	119.355	184.552
120	190.440	294.466
150	297.562	460.103
185	452.625	699.867
240	761.760	1.177.862

- Para correntes inferiores ou iguais à respectiva capacidade de condução de corrente (I_Z) o condutor deixa passar um valor de (I^2t) que tende a infinito (indeterminado).
- O valor de (I^2t) vai decrescendo até que a corrente assuma determinado valor, chamado 'limite adiabático'.

A Figura 11.7 mostra as curvas $(I^2t) = f(I)$ para condutores e cabos isolados de cobre, considerando linhas elétricas tipo B (Tabela 5.28), com dois condutores carregados, indicando aproximadamente os 'limites adiabáticos'.

É importante observar que pequenas alterações nos valores das capacidades de condução de corrente praticamente não alteram as curvas. Nessas condições, em princípio, as curvas apresentadas podem ser consideradas válidas para todos os tipos de linha elétrica.

Por exemplo, um condutor isolado Cu/PVC de seção nominal de 10 mm² (Figura 11.7(a)) a uma corrente de 200 A possuirá uma energia de aproximadamente 4×10^6 A²s, significando que uma corrente de valor eficaz constante de 200 A pode circular pelo condutor por um tempo máximo de

$$t \cong \frac{4 \times 10^6}{200^2} = 100\,\text{s}$$

Por outro lado, para esse condutor, verifica-se que o limite adiabático é de cerca de 1.030 A e que, a partir daí, a energia máxima que o condutor deixa passar é de $1.322{,}5 \times 10^3$ A²s. Assim, por exemplo, uma corrente de valor eficaz constante de 2.000 A poderá circular por um tempo máximo de

$$t \cong \frac{1.322{,}5 \times 10^3}{2.000^2} = 0{,}33\,\text{s}$$

No caso de correntes de curto-circuito cujo valor eficaz possa ser considerado constante (por exemplo, curtos-circuitos de duração superior a 0,1 s = 6 ciclos), pode-se escrever da Expressão 11.7

$$\int_0^t i^2 dt = \int_0^t I^2 dt = I^2 \int_0^t dt = I^2 t = K^2 S^2 \quad (11.9)$$

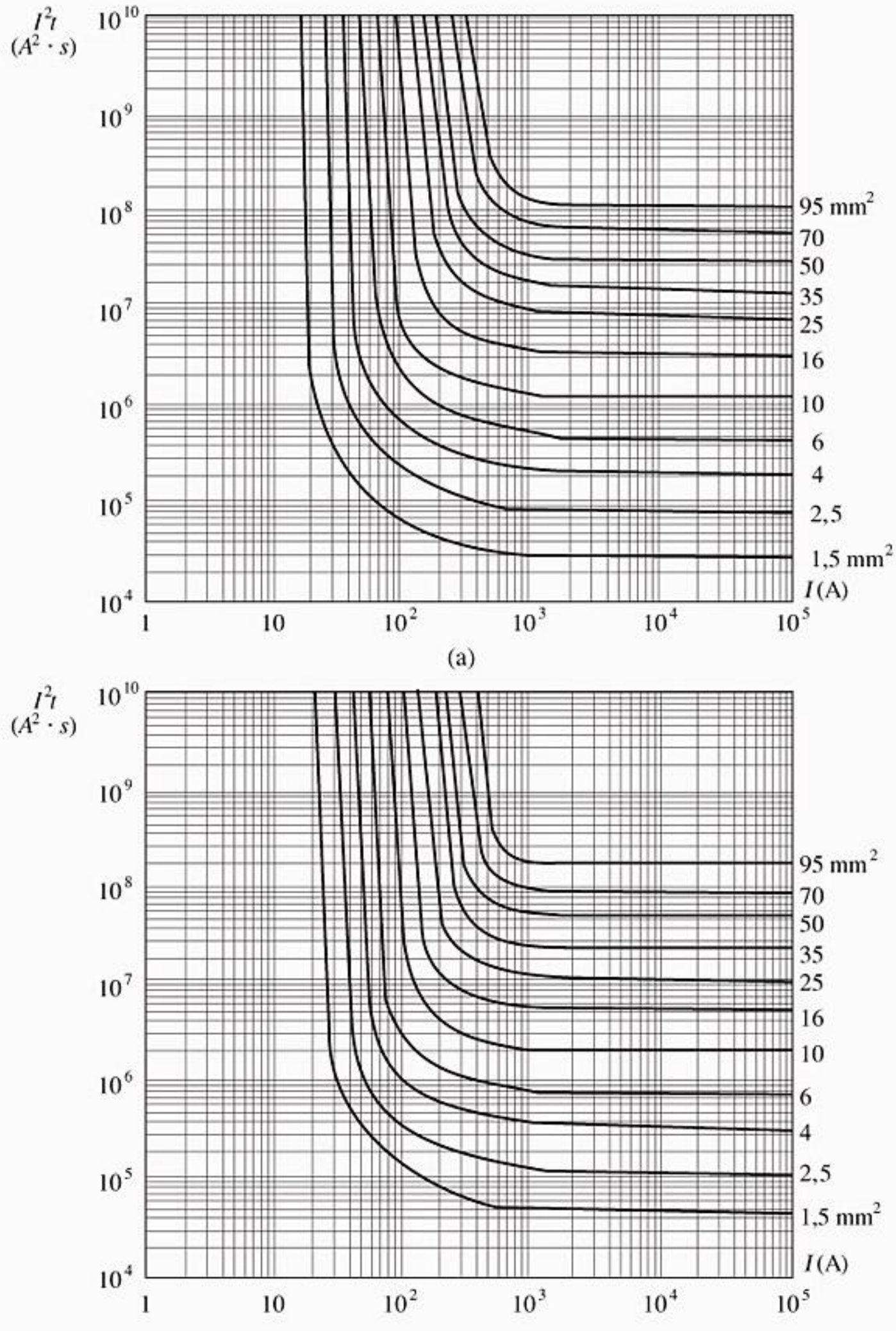
e daí

$$I = KS \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (11.10)$$

expressão da qual resultam as curvas $I = f(s)$, tendo t como parâmetro, como as curvas mostradas na Figura 11.8 referentes aos cabos Sintenax da Prysmian.

A integral de Joule dos disjuntores termomagnéticos

A característica $(I^2t) = f(I)$ dos disjuntores termomagnéticos representa o valor máximo da integral de Joule onde o dispositivo deixa passar, em função do valor eficaz da corrente que por ele circula. A curva característica é mostrada na Figura 11.9, onde se destacam quatro regiões:



$A^2 \cdot s \times 10^3$	I_Z (A)	Limite adiabático (A)	$A^2 \cdot s \times 10^3$	I_Z (A)	Limite adiabático (A)
119.355	232	1.200	184.552	306	1.050
64.802	142	1.100	100.200	254	1.050
35.062	151	1.100	51.123	198	1.050
16.200	125	1.100	25.050	164	1.050
8.265,6	101	1.100	12.781	133	1.050
3.855,6	76	1.050	5.235	100	1.050
1.322,5	57	1.030	2.045	74	1.100
476,1	41	1.030	736	54	1.100
211,6	32	1.100	327	42	1.100
82,6	24	900	127	31	1.100
29,7	17,5	900	46	23	1.100

Figura 11.7 ▪ Curvas $(I^2t) = f(I)$ para condutores e cabos isolados de cobre, com isolação de PVC (a) e EPR ou XLPE (b), considerando a maneira de instalar B e dois condutores carregados (Cortesia da Bticino)

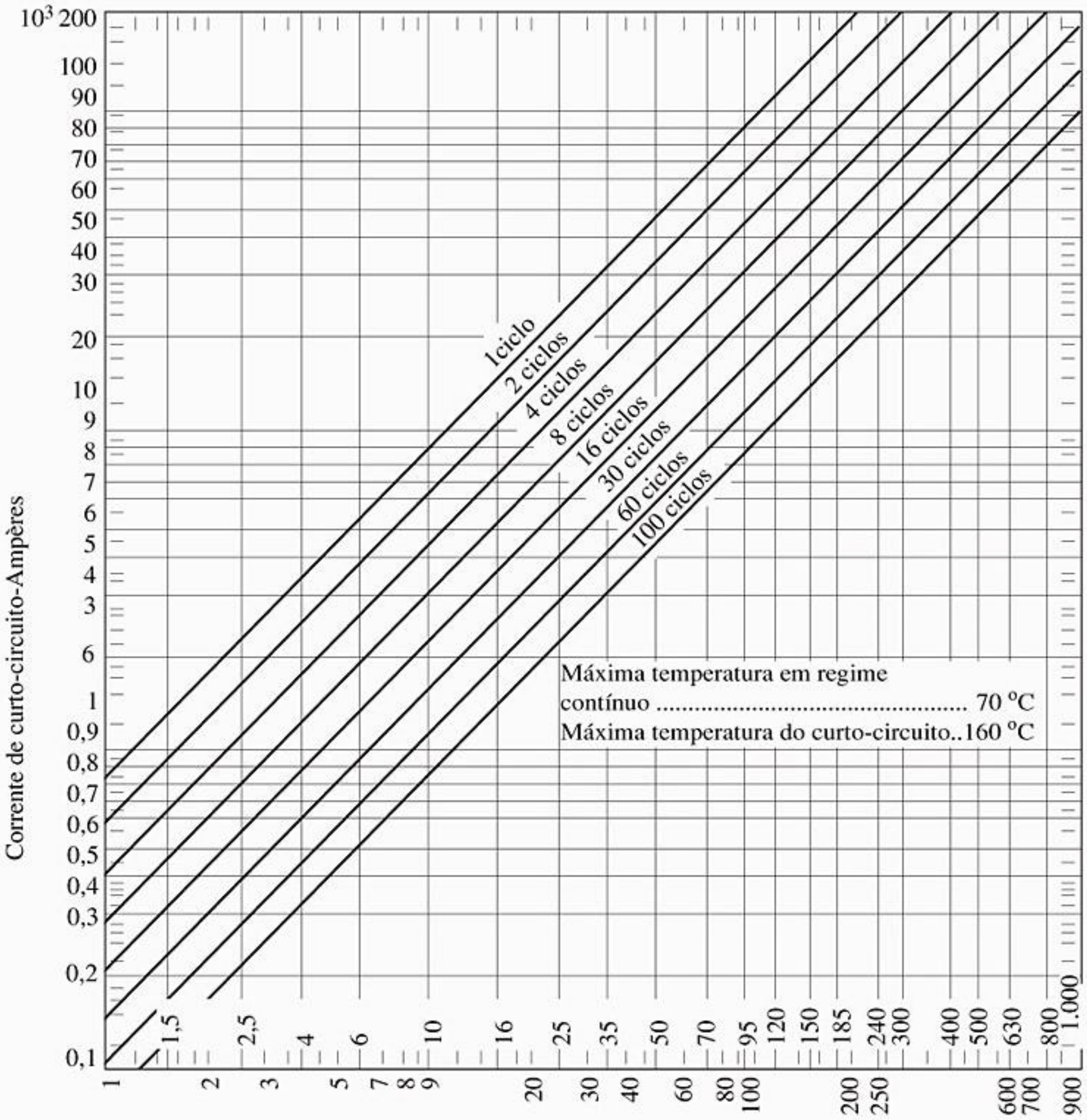


Figura 11.8 ■ Curvas de corrente de curto-circuito em função das seções, com o tempo (em ciclos) como parâmetro para os cabos Sintenax 0,6/1 kV da Prysmian

- Região (I): correntes $I \leq I_N$, sendo I_N a corrente nominal do disjuntor — não existe limitação.
- Região (II): corrente $I_N < I \leq I_M$, sendo I_M o limiar de atuação magnética — os tempos de atuação são relativamente longos (atua o disparador térmico); a curva pode ser obtida da característica tempo-corrente do disjuntor.
- Região (III): corrente $I_M < I \leq I_{CN}$, sendo I_{CN} a capacidade de interrupção nominal; os tempos de atuação são curtos (atua o disparador eletromagnético); a integral de Joule aumenta com a corrente; a curva pode ser obtida a partir de um ensaio de curto-circuito com o fator de potência igual ao indicado pela norma do disjuntor para a determinação de I_{CN}.
- Região (IV): correntes $I > I_{CN}$ — o disjuntor não deve ser utilizado.

Para os *disjuntores rápidos*, sendo praticamente fixo o tempo máximo de atuação (da ordem de 13 minutos), a integral de Joule é, aproximadamente, proporcional ao quadrado da corrente na região (III). Nessas condições, no diagrama (escala logarítmica), a característica aparece sensivelmente retilínea. Assim, aceita essa simplificação, bastará um único valor de I^2t, correspondente a dada corrente, para que possam ser calculados todos os outros valores compreendidos entre o limiar de atuação magnética e a capacidade de interrupção. A título de ilustração, a Figura 11.10 apresenta as curvas $(I^2t) = f(I)$ de alguns disjuntores tipo rápido.

Para os *disjuntores limitadores*, cujas curvas $(I^2t) = f(I)$ estão na Figura 11.11, a integral de Joule na região III não é nem aproximadamente proporcional a I^2 e a característica é curva. Nesse caso, não é possível nenhum cálculo, devendo os valores ser obtidos diretamente da característica.

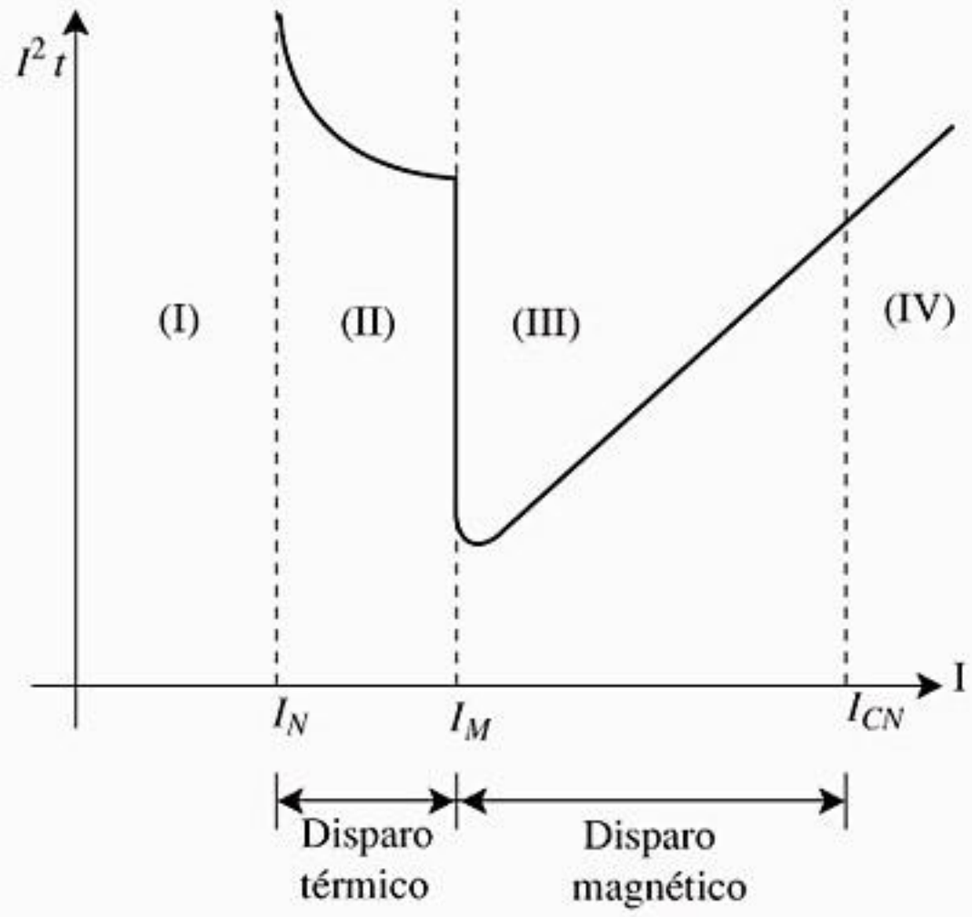


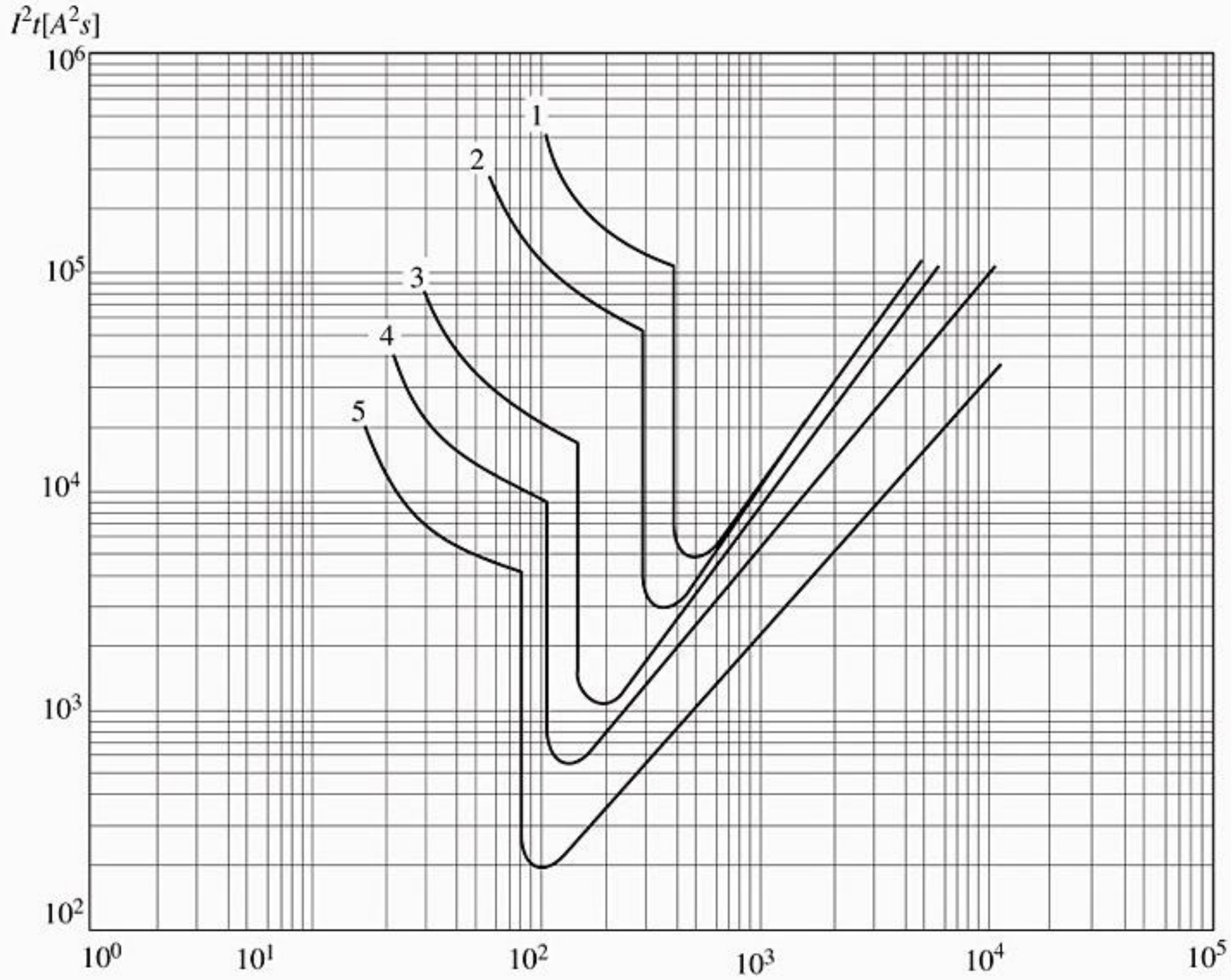
Figura 11.9 ▪ Característica $(I^2t) = f(I)$ típica de um disjuntor termomagnético

A Figura 11.12 mostra a ação de um disjuntor limitador de corrente por meio de um oscilograma: a corrente de curto-circuito presumida, que teria um valor de crista de 8,5 kA, fica limitada a 3,2 kA (crista); a integral de Joule desenvolvida no processo, que seria de 360.000 A^2s, fica limitada a 45.000 A^2s.

As características $(I^2t) = f(I)$ dos disjuntores, como as apresentadas nas figuras 11.10 e 11.11 são obtidas por meio de ensaios de curto-circuito, e, para todos os valores de correntes de prova, é necessário obter os oscilogramas e calcular a integral de Joule. Na Figura 11.13, é reproduzido o oscilograma da interrupção de uma corrente de curto-circuito.

A integral de Joule dos fusíveis

Durante um curto-circuito, os fusíveis comportam-se de modo totalmente distinto dos disjuntores. Diferentemente destes, que são reutilizados após a atuação, o que se exige dos fusíveis é apenas que não ofereçam perigo na interrupção. Por outro lado, o tempo de pré-arco —



Legenda:
1 - Disjuntor rápido 3P 50 A 380 V~
2 - Disjuntor rápido 3P 35 A 380 V~
3 - Disjuntor rápido 3P 20 A 380 V~
4 - Disjuntor rápido 2P 15 A 220 V~
5 - Disjuntor rápido 1P 10 A 110 V~

Figura 11.10 ▪ Curvas $(I^2t) = f(I)$ de disjuntores rápidos; disparo térmico com partida a quente (70 °C)

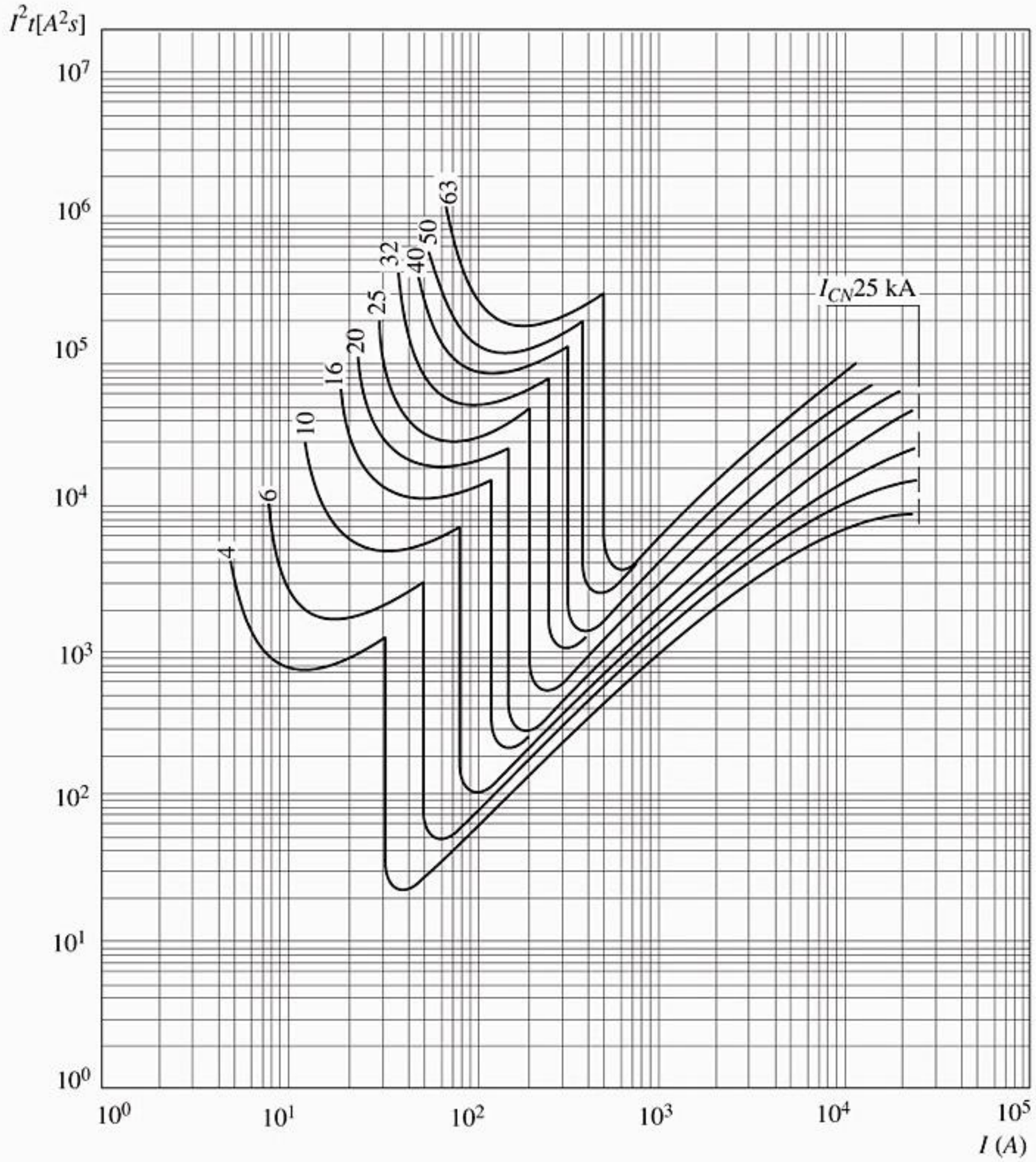


Figura 11.11 ■ Curvas $(I^2t) = f(I)$ de disjuntores limitadores; disparo térmico com partida a quente (70 °C)

que é praticamente fixo nos disjuntores rápidos —, nos fusíveis, além de certos limites de sobrecorrente, pode ser considerado, com alguma aproximação, inversamente proporcional ao quadrado da corrente, razão pela qual exercem um forte poder de limitação sobre os valores de crista das correntes de curto-circuito. Por isso, é relativamente fácil obter capacidade de interrupção elevada. Na grande maioria dos casos, os fusíveis atendem às condições mais críticas, sendo quase sempre dispensável a determinação da corrente de curto-circuito presumida no ponto de aplicação do dispositivo.

No caso dos fusíveis, há que se considerar: a integral de Joule *de fusão*, isto é, a integral de Joule que o fusível deixa passar entre os limites do tempo de fusão; a *de arco*, que é a integral de Joule que o fusível deixa passar entre os limites do tempo de arco; e a *de interrupção*, que é a que o fusível deixa passar entre os limites do tempo de interrupção. Essa última corresponde, para dado valor de corrente, à soma das outras duas.

No que diz respeito à proteção dos condutores, a característica $(I^2t) = f(I)$ que interessa é a de *interrupção*, ou seja, a que dá o valor máximo da energia específica que o fusível deixa passar, em função do valor eficaz da corrente que por ele circula. Seu aspecto é mostrado na Figura 11.14.

Como se pode verificar pela forma das curvas, o problema da limitação da integral de Joule praticamente inexiste para valores elevados de corrente.

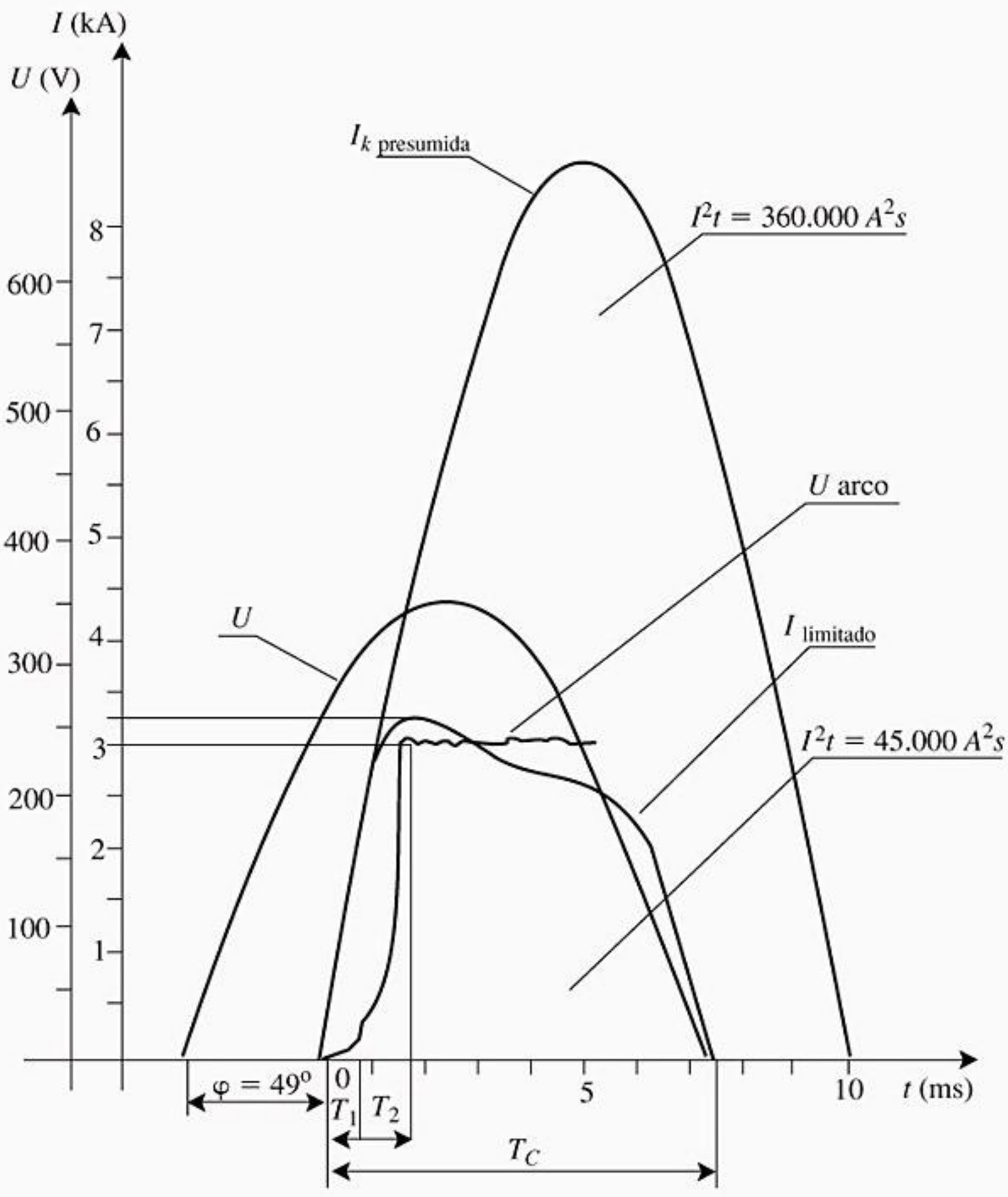


Figura 11.12 ■ Ação de um disjuntor limitador de corrente

As atuais normas de dispositivos fusíveis definem as 'características I^2t de fusão e de interrupção', isto é, as curvas $(I^2t) = f(I)$, e recomendam que os fabricantes forneçam:

- A característica I^2t de fusão, para tempos inferiores a 0,1 s até o tempo correspondente à capacidade de interrupção nominal.
- A característica I^2t de interrupção, tendo a tensão como parâmetro, para tempos inferiores a 0,1 s.

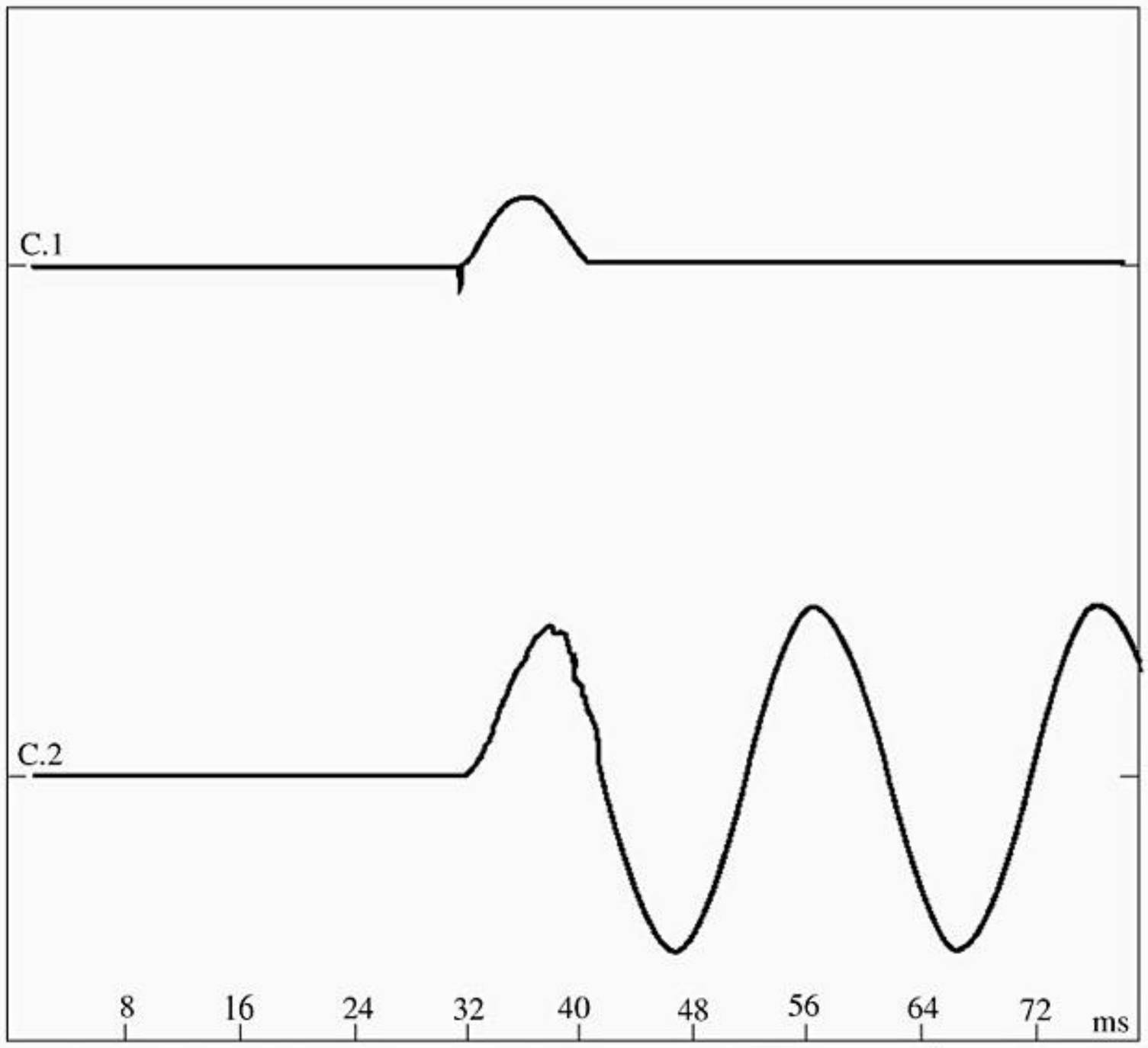
São também apresentadas tabelas que dão, para o valor de corrente nominal, os valores de 'I^2t de fusão mínimo' e de 'I^2t de interrupção máximo', ambos considerando um tempo de 0,1 s, muito importantes para o estabelecimento da seletividade entre fusíveis.

Os fabricantes costumam fornecer, para cada valor de corrente nominal, um gráfico, com uma das formas apresentadas na Figura 11.15, dando os valores de I^2t de fusão, de arco e de interrupção em condições especificadas.

Tais gráficos são utilizados principalmente para a verificação da seletividade entre fusíveis. A Figura 11.16 apresenta os valores de I^2t para alguns fusíveis gG.

11.4 Critérios gerais da proteção contra sobrecorrentes

Os condutores vivos de um circuito devem ser protegidos contra sobrecorrentes, isto é, contra correntes de sobrecarga e contra correntes de curto-circuito. Excetua-se o caso em que os condutores sejam alimentados por uma fonte cuja impedância (interna) seja tal que a máxima corrente que possa ser fornecida seja inferior à capacidade de condução dos condutores; é o caso de certos transformadores de solda, de alguns tipos de geradores termoelétricos e de certos transformadores para dispositivos sonoros.



Max corrente de curto-circuito	(C.1)	.	2.598	Â
Max tensão de retorno	(C.2)	.	334	V̂
Max tensão de arco	(C.3)	.	305	V̂
Ângulo de inserção		.	3	grau
Tempo total de extinção		.	9,4	ms
Tempo de pré-arco		.	2,1	ms
Potência do arco		.	696	kW
Energia do arco		.	2.884	J
Energia específica de pré-arco		.	1.040	A^2s
Energia específica de arco		.	26.101	A^2s
Energia específica total		.	27.141	A^2s
		escala (C.1): 256 A/mm		escala (C.2): 13 V/mm

Figura 11.13 ■ Oscilograma

É importante observar que as prescrições da NBR 5410 se referem *exclusivamente à proteção dos condutores*, o que não garante, necessariamente, a proteção dos equipamentos ligados aos circuitos.

As sobrecorrentes em um circuito devem ser interrompidas antes que possam provocar efeitos térmicos ou mecânicos prejudiciais aos condutores ou cabos isolados, às ligações, aos terminais ou às vizinhanças da linha.

Pode-se definir um dispositivo de proteção ideal como aquele que:

- Não intervenha para correntes inferiores ou iguais à capacidade de condução de corrente I_Z do condutor.
- Intervenha sempre, embora em um tempo longo, com correntes de sobrecarga até 1,45 I_Z.
- Intervenha em tempos decrescentes, desde uma ou mais horas até uns poucos segundos, para correntes de sobrecarga compreendidas entre 1,45 e 6 ou 7 I_Z.
- Intervenha em tempos brevíssimos no caso de correntes de curto-circuito.

A Figura 11.17 mostra a característica de atuação ideal de um dispositivo, comparada com as características reais de disjuntores termomagnéticos e de fusíveis de uso geral.

Com esse gráfico, pode-se verificar que os disjuntores termomagnéticos estão próximos da condição ideal no

campo das sobrecorrentes consideradas como correntes de sobrecarga, assim como para correntes de curto-circuito não excessivamente elevadas; os fusíveis comportam-se bem no caso de correntes de curto-circuito elevadas e não tão bem no caso de correntes de sobrecarga, principalmente nas menos intensas.

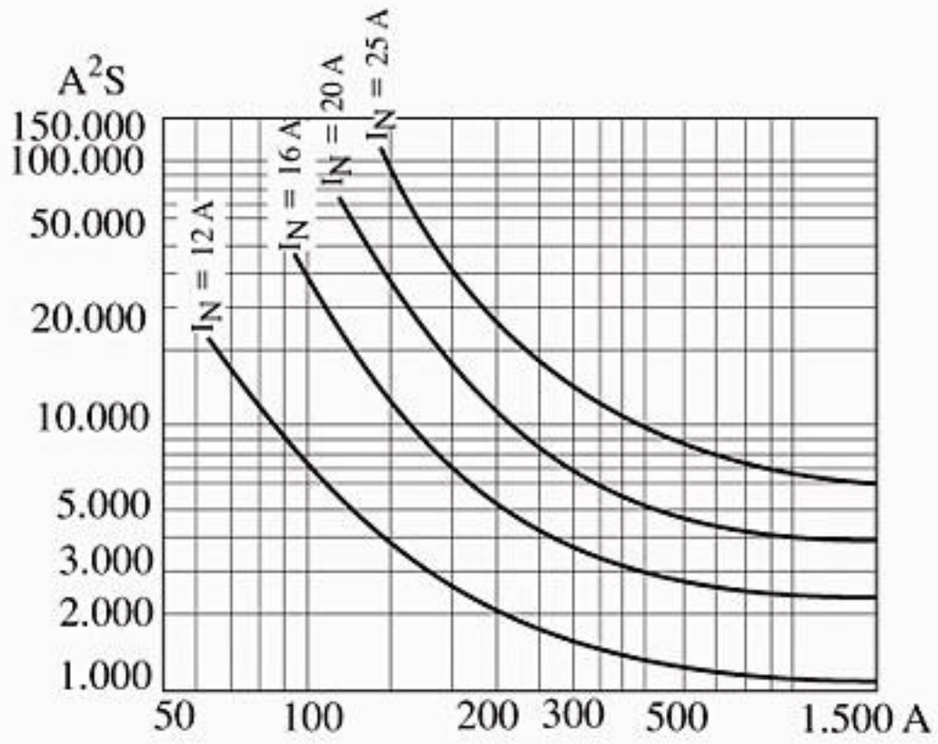


Figura 11.14 ■ Características I^2t de interrupção para alguns fusíveis tipo gG (Cortesia da Bticino)

Assim, a escolha dos dispositivos de proteção exige a verificação acurada do comportamento dos fusíveis com correntes de sobrecarga e do comportamento dos disjuntores termomagnéticos com correntes de curto-circuito.

Proteção simultânea contra sobrecarga e curto-circuito

Para a *proteção simultânea contra correntes de sobrecargas e contra correntes de curto-circuito*, um dispositivo deve poder interromper qualquer sobrecorrente inferior ou igual à corrente de curto-circuito presumida em seu ponto de instalação. A NBR 5410 admite o uso de:

- Disjuntores conforme RTQ da Portaria Inmetro 243/2006, NBR IEC 60947-2, NBR NM 60898 ou IEC 61009-2.1.
- Dispositivos fusíveis tipo gG, conforme NBR IEC 60269-1 e NBR IEC 60269-2 ou NBR IEC 60269-3.
- Disjuntores associados a dispositivos fusíveis, conforme NBR IEC 60947-2 ou NBR NM 60898.

Proteção apenas contra sobrecarga

Os dispositivos que garantem a proteção apenas contra correntes de sobrecarga devem possuir uma característica de atuação a tempo inverso (como os disjuntores e os dispositivos fusíveis com fusíveis de uso geral), podendo ter uma capacidade de interrupção inferior à corrente de curto-circuito presumida no ponto de aplicação do dispositivo. Observe que não é possível proteger um circuito contra correntes de sobrecarga com dispositivos de atuação instantânea, uma vez que estes não permitiriam a absorção de correntes de partida.

Proteção apenas contra curto-circuito

Os dispositivos que garantem apenas a proteção contra correntes de curto-circuito podem ser utilizados quando a proteção contra correntes de sobrecarga não for necessária ou quando for realizada por outros meios. A NBR 5410 admite o uso de:

- Disjuntores conforme RTQ da Portaria Inmetro 243/2006, NBR IEC 60947-2, NBR NM 60898 ou IEC 61009-2.1;
- Dispositivos fusíveis com fusíveis tipo gG, gM ou aM, conforme NBR IEC 60269-1 e NBR IEC 60269-2 ou NBR IEC 60269-3.

Tais dispositivos devem, logicamente, ter condições de interromper qualquer corrente de curto-circuito inferior ou igual à corrente de curto-circuito presumida em seu ponto de instalação.

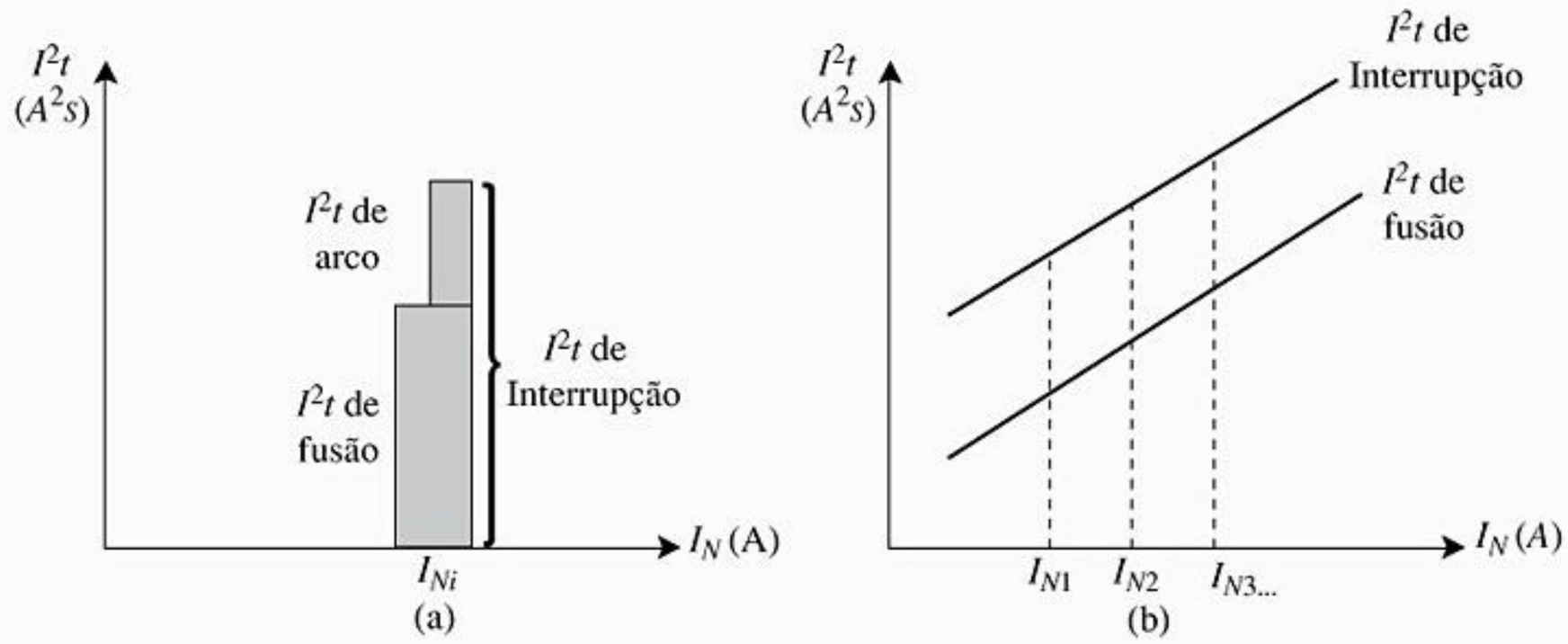


Figura 11.15 ■ Tipos de gráficos I^2t apresentados pelos fabricantes de fusíveis

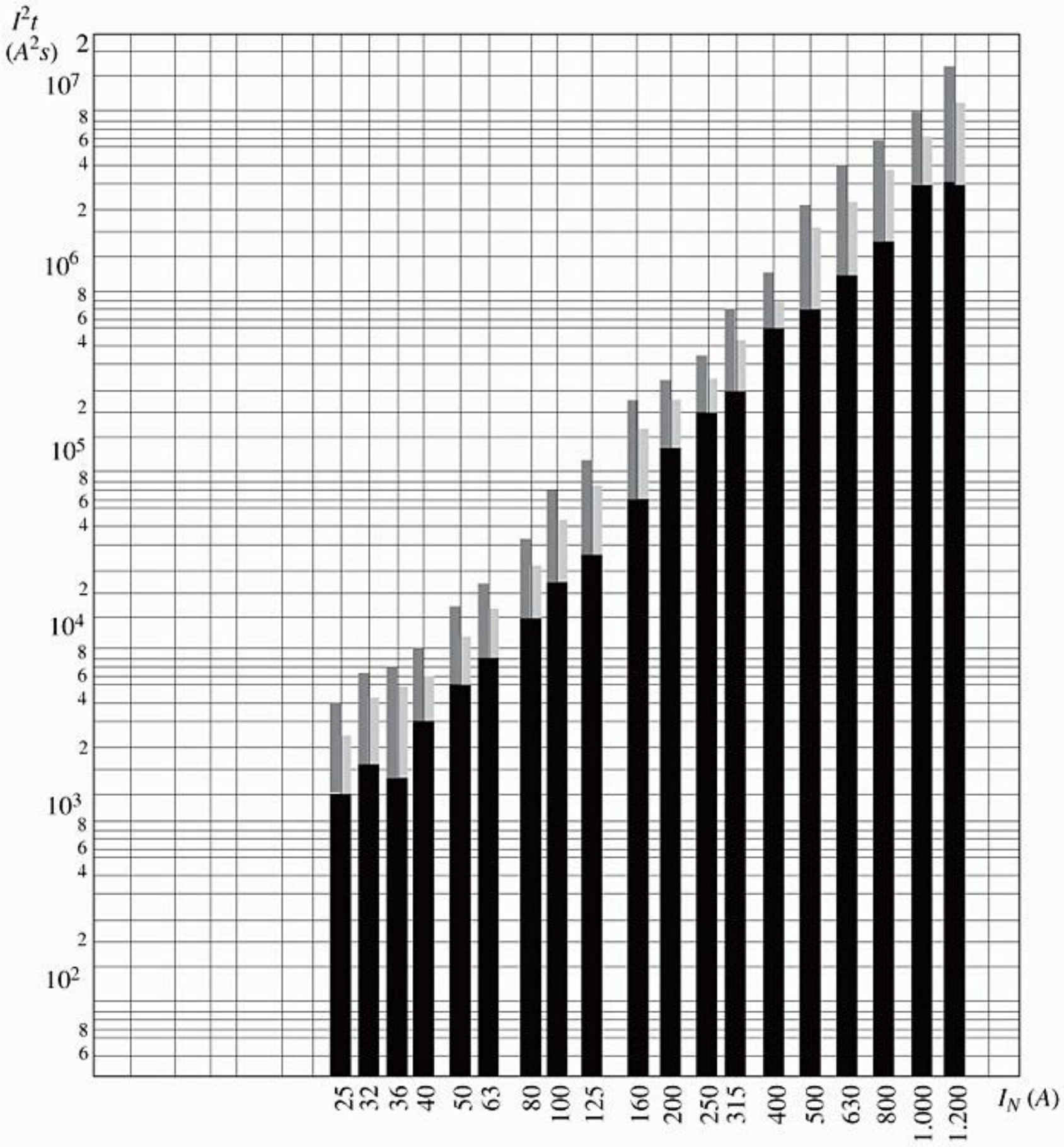


Figura 11.16 ■ Valores de (I^2t) para fusíveis gG (Cortesia da Legrand)

11.5 Proteção contra correntes de sobrecarga

O dispositivo destinado a proteger os condutores vivos de um circuito contra correntes de sobrecarga ou contra qualquer falta capaz de produzir sobrecorrentes na 'faixa' das correntes de sobrecarga deve estar adequadamente coordenado com os condutores. Para isso, a NBR 5410 impõe três condições.

Em primeiro lugar, a corrente nominal do dispositivo de proteção (I_N) ou, no caso de dispositivo ajustável, a corrente de ajuste (também designada por I_N), não deve ser inferior à corrente de projeto do circuito (I_B), isto é:

$$I_B \leq I_N \qquad (11.11)$$

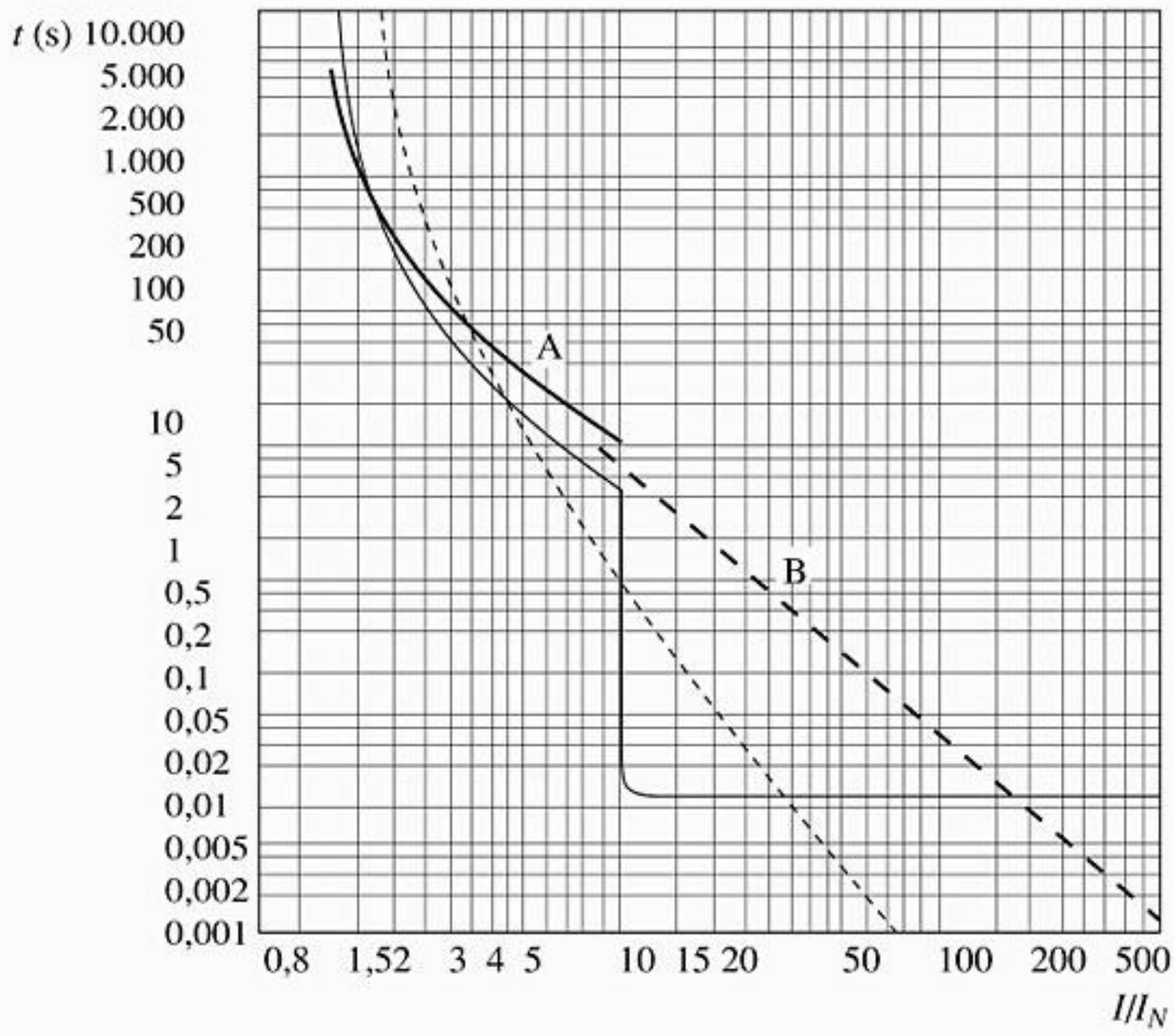
evitando, assim, a atuação do dispositivo durante o funcionamento normal do circuito.

A segunda condição impõe que a corrente nominal (ou de ajuste) do dispositivo de proteção não seja superior à capacidade de condução de corrente (I_Z) dos condutores ou dos cabos do circuito, ou seja

$$I_N \leq I_Z \qquad (11.12)$$

o que significa que o dispositivo deve ficar 'sobrecarregado' quando ocorrer uma sobrecarga no circuito. Agrupando as expressões 11.11 e 11.12, tem-se:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$



Legenda:

A ——— Atuação ideal para correntes de sobrecarga

B – – – – Atuação ideal para correntes de curto-circuito

——— Característica típica de disjuntor termomagnético

------- Característica típica de fusível de uso geral (Tipo gG)

Figura 11.17 ■ Característica de atuação ideal comparada com as características de atuação típicas de disjuntores termomagnéticos e fusíveis de uso geral

A última condição diz que o dispositivo de proteção deve atuar com segurança (dentro do tempo convencional, t_c, fixado pela norma respectiva) para sobrecorrentes não superiores a 1,45 I_Z, o que pode ser escrito:

$$I_2 \leq 1{,}45\, I_Z \qquad (11.13)$$

sendo I_2 a corrente convencional de atuação para disjuntores ou a corrente convencional de fusão para fusíveis (tabelas 6.1 e 6.2). O condutor, na pior das hipóteses, deverá suportar uma sobrecorrente correspondente a $n = 1{,}45$ por um tempo igual ao tempo convencional do dispositivo de proteção. É o caso de $I_2 = 1{,}45\, I_Z$.

As condições dadas pelas expressões 11.11, 11.12 e 11.13 são representadas na Figura 11.18.

Observe que, nas expressões 11.12 e 11.13, I_Z é a capacidade de condução de corrente do condutor ou cabo, *considerando as condições reais de instalação*.

A corrente convencional de fusão ou de atuação dos dispositivos de proteção (fusíveis ou disjuntores) pode ser posta em função da respectiva corrente nominal, ou seja,

$$I_2 = I_a \text{ (ou } I_f) = \alpha I_N$$

sendo α o fator indicado na Tabela 6.1. Assim a condição dada na Expressão 11.13 pode ser escrita

$$\alpha I_N \leq 1{,}45\, I_Z \qquad (11.14)$$

Quando percorrido por uma sobrecorrente constante $I = 1{,}45\, I_Z$ (isto é, $n = 1{,}45$), o condutor atingirá uma temperatura de regime que pode ser calculada pela Expressão 9.13 (considerando $\theta_A = 30$ °C, ou seja):

$$\theta_R = \theta_A + (\theta_z - \theta_A)\left(\frac{I}{I_z}\right)^2$$

- Para isolação de PVC

$$\theta_R = 1{,}45^2 \times 70 - (1{,}45^2 - 1)\, 30 = 114\,^{\circ}\text{C}$$

- Para isolação EPR/XLPE

$$\theta_R = 1{,}45^2 \times 90 - (1{,}45^2 - 1)\, 30 = 156\,^{\circ}\text{C}$$

A temperatura de sobrecarga, θ_S (Tabela 9.16), que vale 100 °C para isolação de PVC, e 130 °C no caso de EPR ou XLPE, ser alcançada, portanto, ainda no período

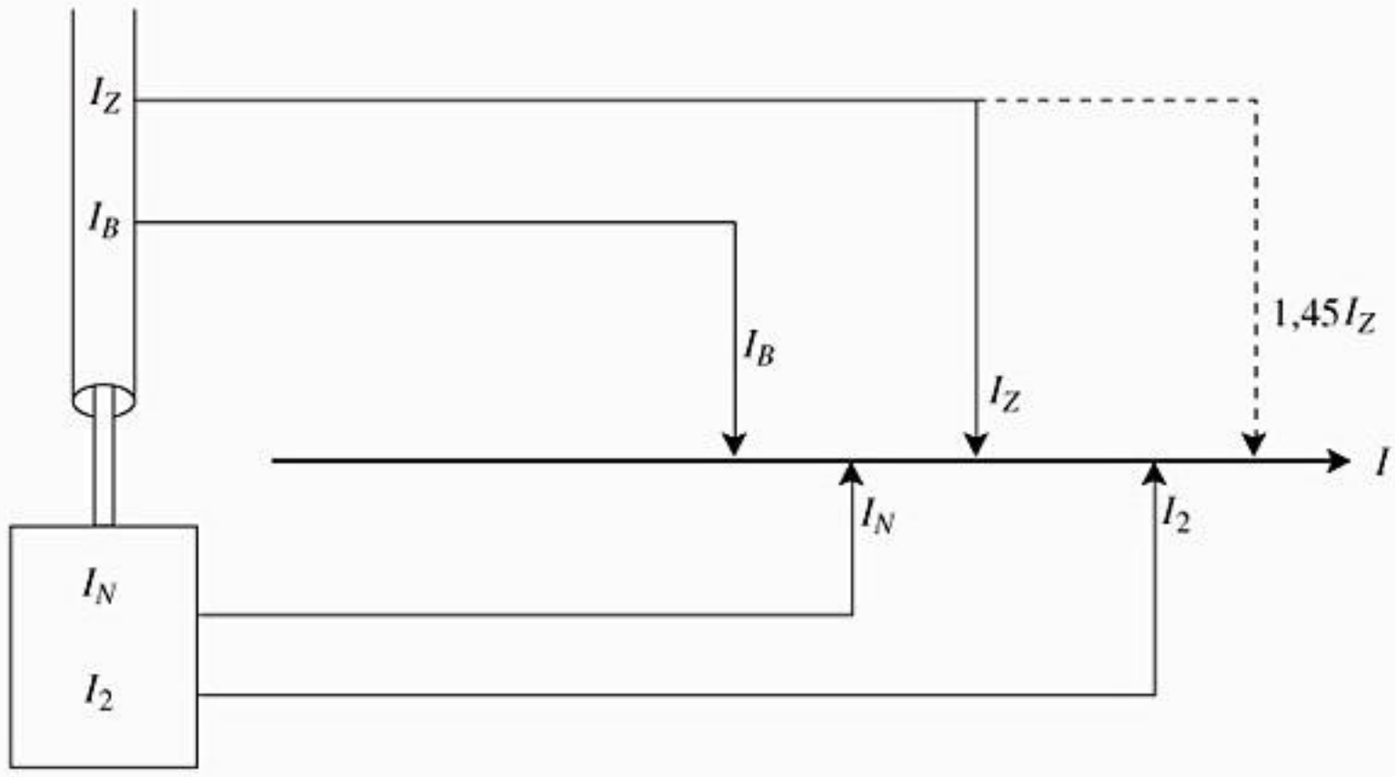


Figura 11.18 ■ Condições de coordenação entre condutores e dispositivos de proteção contra sobrecargas, de acordo com a NBR 5410

transitório. O tempo correspondente pode ser calculado pelas expressões 9.35 e 9.36, valendo:

- Partindo de θ_A

$$t_{S1} = k_T \ln \frac{1{,}45^2}{1{,}45^2 - m} = k_T \ln \frac{2{,}1}{2{,}1 - m} \qquad (11.15)$$

- Partindo de θ_Z

$$t_{S2} = k_T \ln \frac{1{,}45^2 - 1}{1{,}45^2 - m} = k_T \ln \frac{1{,}1}{2{,}1 - m} \qquad (11.16)$$

sendo k_T a constante de tempo e m a relação de sobrecarga térmica dada por

$$m = \frac{\theta_S - \theta_A}{\theta_Z - \theta_A}$$

Como apresentado na Seção 9.6, m vale 1,75 para isolação de PVC e 1,67 para EPR/XLPE, assim:

- Para PVC

$$t_{S1} = k_T \ln \frac{2{,}1}{2{,}1 - 1{,}75} = 1{,}79\,k_T \qquad (11.17)$$

$$t_{S2} = k_T \ln \frac{1{,}1}{2{,}1 - 1{,}75} = 1{,}15\,k_T \qquad (11.18)$$

- Para EPR/XLPE

$$t_{S1} = k_T \ln \frac{2{,}1}{2{,}1 - 1{,}67} = 1{,}58\,k_T \qquad (11.19)$$

$$t_{S2} = k_T \ln \frac{1{,}1}{2{,}1 - 1{,}67} = 0{,}94\,k_T \qquad (11.20)$$

Para as temperaturas de regime correspondentes a $n = 1{,}45$, isto é, 114 °C para PVC e 156 °C para EPR/XLPE, tem-se:

- Para PVC

$$m = \frac{114 - 30}{70 - 30} = 2{,}1$$

- Para EPR/XLPE

$$m = \frac{156 - 30}{90 - 30} = 2{,}1$$

O cálculo aproximado do tempo para atingir a temperatura de regime a partir de θ_Z já foi apresentado anteriormente.

O tempo aproximado para atingir a temperatura de regime a partir do θ_A, é obtido pela Expressão 9.25; isto é

$$t_{R1} = k_T \ln\left(\frac{84}{84 - 83{,}16}\right) = 4{,}6\,k_T$$

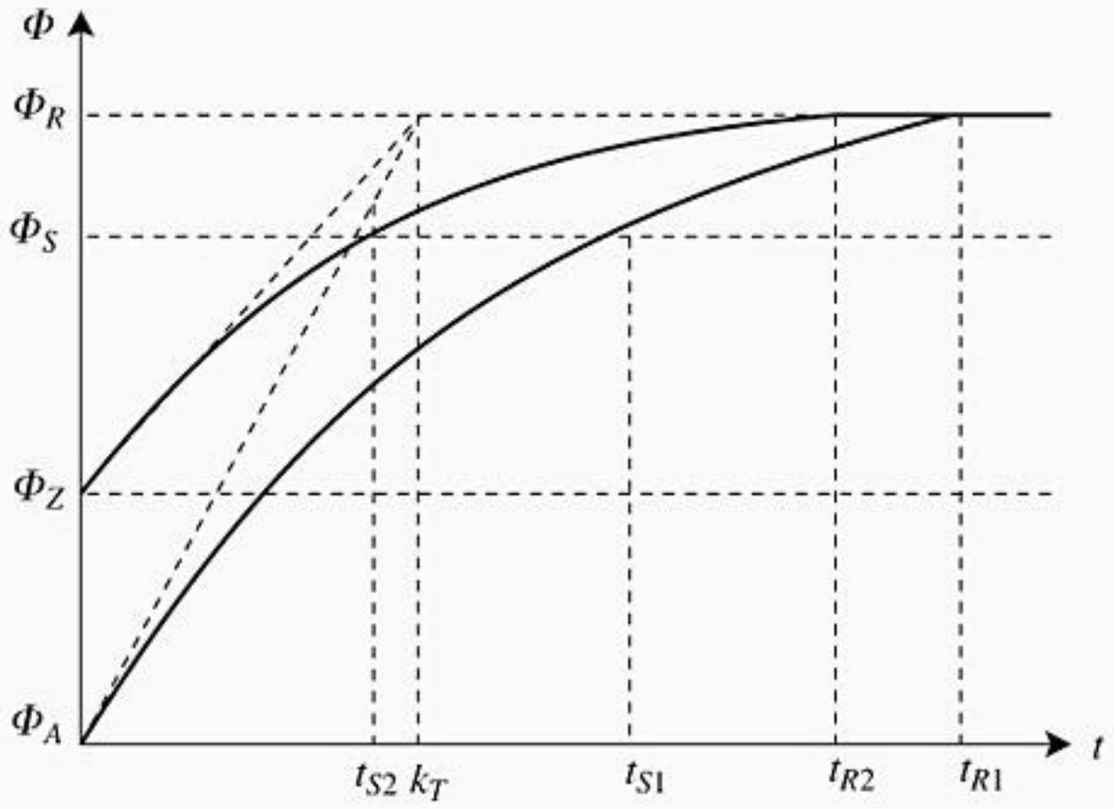
O valor anterior é o mesmo para PVC, EPR ou XLPE. Todos os valores e análise estão resumidamente apresentados na Figura 11.19

O cálculo aproximado do tempo para atingir a temperatura de regime a partir de θ_Z é obtido utilizando-se a Expressão 9.25:

$$t = k_T \ln \frac{\Delta\theta_R - \Delta\theta_0}{\Delta\theta_R - \Delta\theta}$$

- PVC
  - $\Delta\theta_R = 114 - 30 = 84$ °C
  - $\Delta\theta_0 = 70 - 30 = 40$ °C
  - $\Delta\theta = 0{,}99 \times 84 = 83{,}16$ °C
  - $t_{R_2} \cong k_T \ln \frac{84 - 40}{84 - 83{,}16} = 3{,}95\,k_T$
- EPR/XLPE
  - $\Delta\theta_R = 156 - 30 = 126$ °C
  - $\Delta\theta_0 = 90 - 30 = 60$ °C
  - $\Delta\theta = 0{,}99 \times 126 = 124{,}74$ °C
  - $t_{R_2} \cong k_T \ln \frac{126 - 60}{126 - 124{,}74} = 3{,}95\,k_T$

	PVC	EPR ou XLPE
θ_R	114 °C	156 °C
θ_S	100 °C	130 °C
θ_Z	70 °C	90 °C



	t_{S2}	t_{S1}	t_{R2}	t_{R1}
PVC	1,15 k_T	1,79 k_T	3,95 k_T	4,6 k_T
EPR ou XLPE	0,94 k_T	1,58 k_T		

Figura 11.19 ■ Aquecimento de um condutor com $I = 1{,}45\ I_Z$

EXEMPLO

(a) Seja um condutor isolado, Cu/PVC, de 1,5 mm², de um circuito com dois condutores carregados instalado em um eletroduto embutido em parede de alvenaria:

- Da Tabela 5.28, tem-se letra B_1 e, da Tabela 9.4, obtém-se $I_Z = 17{,}5$ A.
- Da Tabela 9.3, obtém-se $a = 13{,}5$ A.
- Da Expressão 9.46

$$k_T \cong \frac{10^4}{13{,}5^2}(0{,}7 \cdot 10^{0{,}75} + 0{,}8 \cdot 10^{0{,}5} + 0{,}36 \cdot 10^{0{,}25}) =$$

$$= 394 \text{ s}$$

Com uma corrente de sobrecarga $I = 1{,}45$; $I_Z = 1{,}45 \times 17{,}5 = 25{,}4$ A, a temperatura de sobrecarga $\theta_s = 100$ °C ($m = 1{,}75$) será atingida em um tempo

- partindo de $\theta_A = 30$ °C, da Expressão 11.17

$$t_{S1} = 1{,}79\ k_T = 1{,}79 \cdot 130 = 232{,}7 \text{ s}$$

- partindo de $\theta_Z = 70$ °C, da Expressão 9.18

$$t_{S2} = 1{,}15\ k_T = 150 \text{ s}$$

Permanecendo essa corrente, a temperatura de regime de 114 °C será atingida em um tempo de (ver o quadro cinza na página 351)

- partindo de $\theta_A = 30$ °C ___

$$t_{R1} \cong 4{,}6 \times 130 = 598 \text{ s}$$

- partindo de $\theta_Z = 70$ °C ___

$$t_{R2} \cong 3{,}95 \times 130 = 514 \text{ s}$$

(b) Para um condutor isolado, Cu/PVC, de 10 mm², nas mesmas condições:

- $I_Z = 57$ A
- $a = 13{,}5$ A

$$k_T \cong \frac{10^4}{13{,}5^2}(0{,}7 \cdot 10^{0{,}75} + 0{,}8 \cdot 10^{0{,}5} + 0{,}36 \cdot 10^{0{,}25}) =$$

$$= 130 \text{ s}$$

Com $I = 1{,}45\ I_Z = 1{,}45 \times 57 \cong 83$ A virá:

- $t_{S1} \cong 1{,}79\ k_T = 705$ s
- $t_{S1} \cong 1{,}15\ k_T = 453$ s
- $t_{R1} \cong 4{,}6 \times 394 = 1{,}812$ s
- $t_{R2} \cong 3{,}95 \times 394 = 1{,}556$ s

Curvas-limites de sobrecarga

Considerando as três condições da NBR 5410, podem-se definir as *curvas-limites de sobrecarga* (ver seção 11.2) a partir das expressões 9.35 e 9.36, adotando para m o valor arredondado 2. Tem-se, portanto:

- Para partida a frio (θ_A)

$$t = k_T \ln \frac{n^2}{n^2 - 2} \qquad (11.21)$$

Para partida a quente (θ_Z)

$$t = k_T \ln \frac{n^2 - 1}{n^2 - 2} \qquad (11.22)$$

Essas curvas delimitam a *zona de atuação ideal* do dispositivo de proteção contra correntes de sobrecarga, considerando as temperaturas 'de sobrecarga' de 110 °C para isolação de PVC e 150 °C para isolação de EPR ou XLPE.[1] A Figura 11.20 mostra três conjuntos dessas curvas.

Quando o tempo convencional do dispositivo de proteção for superior ao tempo necessário para o condutor atingir a temperatura de regime, o condutor poderá permanecer nessa temperatura durante certo tempo, o que constitui uma condição bastante crítica. É o caso dos condutores de pequena seção (até 10 mm²), como foi

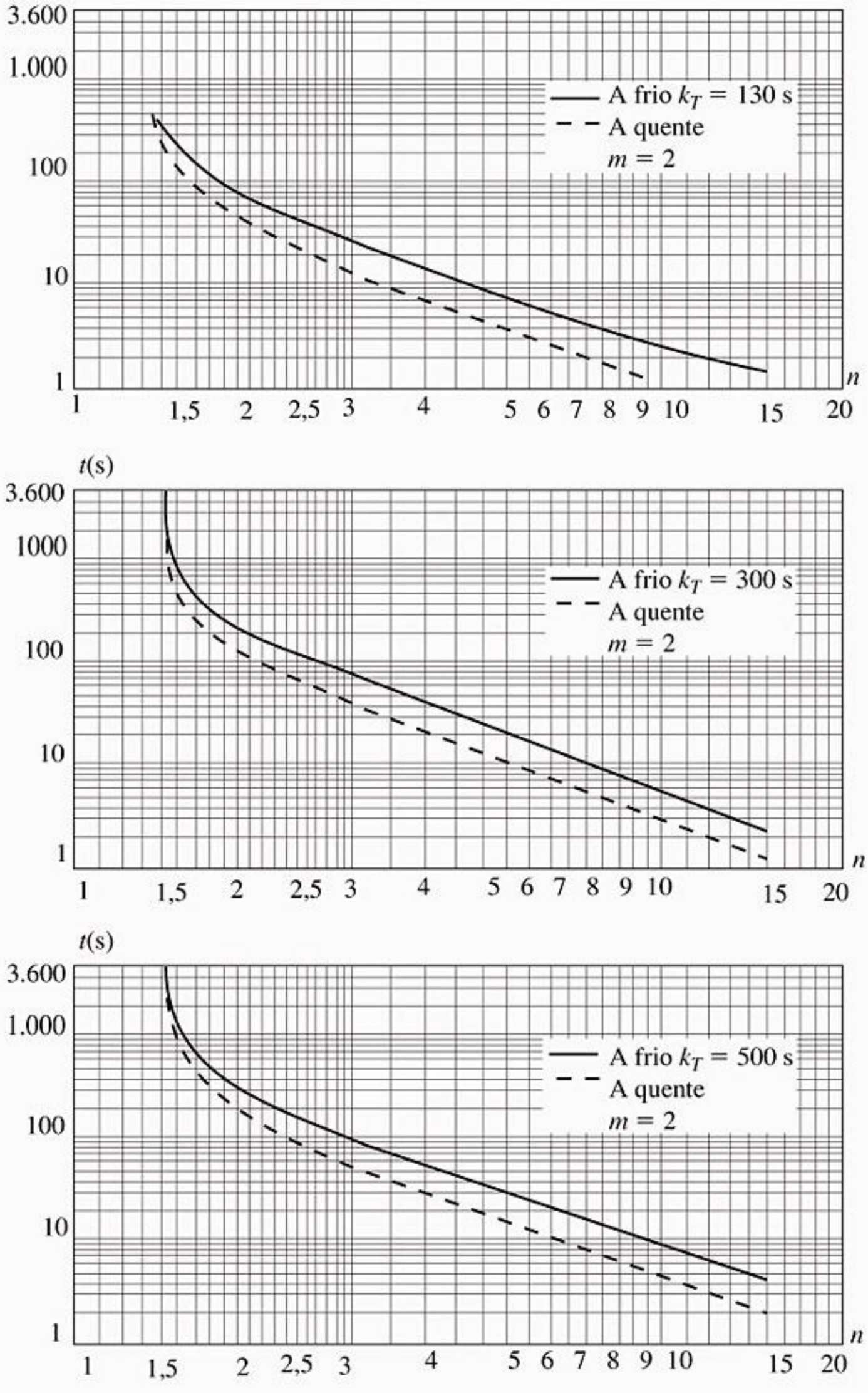


Figura 11.20 ■ Curva-limite de sobrecarga nas condições da NBR 5410 para $m = 2$ e $k_T = 130$, 300 e 500 segundos

1. Temperaturas correspondentes a $m = 2$.

mostrado no exemplo anterior. Tais condutores são, em geral, protegidos contra correntes de sobrecarga por dispositivos para os quais o tempo convencional é de uma hora (ver tabelas 6.2 e 6.3). Assim, nas condições do exemplo citado, um condutor de 1,5 mm² poderá permanecer a 114 °C por 3.600 – 598 = 3.002 segundos (partida a frio) ou 3.600 – 514 = 3.086 segundos (partida a quente); para um condutor de 10 mm² os tempos serão de 3.600 – 1.812 = 1.788 s e 3.600 – 1.556 = 2.044 s, respectivamente.

Na Tabela 6.3, Capítulo 6, verifica-se que, para os disjuntores, o fator α (que multiplica a corrente nominal para obter a corrente convencional de atuação) vale 1,30, 1,35 ou 1,45. Nessas condições, basta escolher um dispositivo com corrente nominal I_N não superior à capacidade de condução de corrente do condutor (I_Z), para garantir que a corrente convencional de atuação do disjuntor (I_2) não seja superior a $1{,}45I_Z$.

Em outras palavras, para os disjuntores, tendo em vista os valores de α, a condição dada na Expressão 11.12 é mais crítica que a dada na Expressão 11.13 ou 11.14; atendendo a condição das expressões 11.12, 11.13 ou 11.14 estará automaticamente atendida.

É evidente que, quanto maior a faixa entre I_B e I_Z, mais fácil é encontrar o disjuntor com corrente nominal adequada à proteção do circuito, que satisfaça as expressões 11.12 e 11.13.

Os disjuntores termomagnéticos em caixa moldada, como apresentados na Seção 6.4, podem ser mais ou menos sensíveis à temperatura do local em que estão instalados; esta é geralmente superior (caso de quadros de distribuição) à temperatura ambiente externa. Os fabricantes, além de indicar a corrente nominal do disjuntor na temperatura de referência (geralmente 20 ou 40 °C), devem também indicar:

- Fatores a aplicar para temperaturas diferentes da de referência.
- Correntes nominais em diversas temperaturas.

É importante observar que, para os disjuntores termomagnéticos em caixa moldada, a corrente nominal a considerar na aplicação das Expressões 11.11 e 11.12 *é a correspondente à temperatura no local da instalação do disjuntor.*

Para os fusíveis, o fator pode variar de 1,6 a 2,1 (ver Tabela 6.2). Nessas condições, é fácil verificar que não basta escolher um dispositivo com corrente nominal não superior à capacidade de condução de corrente do condutor. Com efeito, da Expressão 11.14, tem-se que:

$$I_N \leq \frac{1{,}45}{\alpha} I_z$$

o que leva a concluir que o limite superior da corrente nominal do fusível deverá estar contido na faixa de 69% a 91% de I_Z.

Quando forem previstas pequenas correntes de sobrecarga, para garantir uma atuação tão logo a corrente supere a capacidade de condução do condutor, deve-se escolher fusíveis com corrente nominal não superior a 55 por cento a 60 por cento de I_Z, o que significa desfrutar apenas 55 por cento a 60 por cento do condutor de cobre instalado. Esse problema assume notável importância econômica em instalações de médio e grande portes, nas quais, desejando-se proteger os circuitos contra pequenas correntes de sobrecarga, se gasta seguramente mais cobre do que se economiza em dispositivos de proteção.

EXEMPLO

Circuito com condutores isolados, Cu/PVC, contido em eletroduto embutido em parede de alvenaria, com dois condutores carregados, corrente de projeto I_B = 28 A. A temperatura ambiente considerada é de 30 °C e é previsto outro circuito no mesmo eletroduto.

(a) Critério da capacidade de condução de corrente:
- Da Tabela 9.10, obtém-se, para dois circuitos compartilhando o mesmo eletroduto, o fator f_3 = 0,8;
- A corrente fictícia de projeto será

$$I'_B = \frac{28}{0{,}8} = 35 \text{ A}$$

- Da Tabela 5.27, obtém-se a letra B_1 e, da Tabela 9.4, tem-se a seção de 6 mm², para a qual a capacidade de condução de corrente real será, no caso

$$I_z = 41 \times 0{,}8 = 32{,}8 \text{ A}$$

(b) Proteção contra correntes de sobrecarga feita com disjuntor termomagnético em caixa moldada cujas correntes nominais são referidas a 40 °C.

Deverão ser atendidas as condições dadas pelas expressões 11.11 e 11.12. Assim, considerando igual a 40 °C (30 °C + 10 °C) a temperatura no quadro de distribuição onde está instalado o disjuntor, tem-se:

- Da Expressão 11.11

$$28 \leq I_N$$

na qual o menor disjuntor escolhido é com I_N =30A.

- Da Expressão 11.12

$$30 < 32{,}8 \text{ A}$$

atendendo, portanto, à segunda condição prevista pela NBR 5410.

(c) Proteção contra correntes de sobrecarga feita com dispositivo fusível gG.

Deverão ser atendidas as condições dadas pelas expressões 11.11 e 11.14:

- Da Expresão 11.11

$$28 \leq I_N$$

escolhendo-se fusíveis gG com $I_N = 35$ A.

- Da Tabela 6.1, obtém-se, para o fusível de 35 A, $\alpha = 1{,}6$.
- Para o condutor de 6 mm², virá

$$1{,}6 \times 35 > 1{,}45 \times 32{,}8$$

não atendendo à condição da Expressão 11.12.

Utilizando um condutor de 10 mm², virá:

$$1{,}6 \times 35 < 1{,}45 \times 45{,}6$$

o que atende à condição da Expressão 11.12.

A Tabela 11.3 permite efetuar um dimensionamento rápido de circuitos protegidos por disjuntores termomagnéticos em caixa moldada, sem levar em consideração a queda de tensão. Considerando condutores de cobre com isolação de PVC nas condições indicadas, pode-se:

Tabela 11.3 ■ Condutores e cabos com isolação de PVC/70 °C, temperatura ambiente de 30 °C, temperatura máxima no local de instalação dos disjuntores de 40 °C (Cortesia da Bticino)

Seção nominal (mm²)	Corrente nominal máxima dos disjuntores				
	2 condutores carregados	3 condutores carregados	4 condutores carregados (2 circuitos com 2 condutores cada)	6 condutores carregados	
				(3 circuitos com 2 condutores cada)	(2 circuitos com 3 condutores cada)
Método de referência (letra B da Tabela 5.27)					
Cobre					
1,5	15	15	10	10	10
2,5	20	20	15	15	15
4	30	25	25	20	20
6	40	35	30	25	25
10	50	50	40	40	40
16	70	60	60	50	50
25	100	70	70	70	70
35	100	100	100	70	70
50	100	100	100	100	100
Alumínio					
35	90	70	70	60	60
50	100	100	90	70	70
Método de referência (letra C da Tabela 5.27)					
Cobre					
1,5	15	15	15	10	10
2,5	25	20	20	15	15
4	35	30	25	25	25
6	40	40	35	30	30
10	60	50	50	40	40
16	70	70	60	60	60
25	100	90	90	70	70
35	100	100	100	90	90
50	100	100	100	100	100
Alumínio					
35	100	90	70	70	70
50	100	100	100	70	70

- Obter a corrente nominal máxima do disjuntor para proteger um circuito com condutores de dada seção.
- Obter o disjuntor e a seção dos condutores, conhecendo a corrente de projeto.

EXEMPLOS

(aplicações da Tabela 11.3)

- Circuito com condutores Cu/PVC de 6 mm², maneira de instalar B_1, três condutores carregados, temperatura ambiente de 30 °C: o disjuntor a utilizar na proteção contra sobrecargas será de 35 A.
- Do exemplo anterior, se $I_B = 28$ A, circuito em eletroduto embutido em parede de alvenaria, dois circuitos com dois condutores carregados, $\theta_A = 30$ °C:
  - na parte correspondente à maneira de instalar B_1, toma-se a coluna de dois circuitos com dois condutores carregados e escolhe-se o valor mais próximo (superior) de 28 A; obtém-se, assim, 30 A, que corresponde a I_N do disjuntor;
  - na linha correspondente a $I_N = 30$ A, obtém-se a seção $S = 6$ mm².

  (os mesmos valores obtidos na parte (b) do exemplo anterior).

11.6 Localização dos dispositivos de proteção contra correntes de sobrecargas

Como regra, pode-se dizer que todo circuito, *desde que sujeito a correntes de sobrecarga*, deve ser protegido por um dispositivo adequado instalado em série no circuito a montante da carga.

Tendo em vista que os dispositivos de proteção contra correntes de sobrecarga destinam-se à proteção dos condutores, recomenda-se, em princípio, sua localização no ponto em que uma "mudança" venha a provocar uma *redução na capacidade de condução de corrente dos condutores*. Tal "mudança" pode ser:

- Uma *troca (redução) de seção*.
- Uma *alteração na natureza dos condutores*, por exemplo, a passagem de um conjunto de barras para um conjunto de condutores isolados, como nos quadros de distribuição.
- Uma *alteração no modo de instalação*, por exemplo, a passagem de uma linha aérea para uma linha em eletroduto.
- Uma *mudança de constituição dos condutores*, isto é, uma mudança do tipo de material usado como condutor, por exemplo, de cobre para alumínio, ou do tipo de isolação, por exemplo, de EPR para PVC.

Na maioria das vezes, o ponto em que ocorre a mudança é a *origem do circuito*.

Admite-se *deslocar* o ponto de aplicação do dispositivo de proteção ao longo do circuito protegido, se a parte da linha compreendida entre a troca de seção — de natureza, de modo de instalação ou de constituição — e o dispositivo de proteção não possuir qualquer derivação nem tomada de corrente e atender a uma das duas condições a seguir:

- Estar adequadamente protegida contra curtos-circuitos.
- Seu comprimento não exceder a 3 m, ser instalada de modo a reduzir ao mínimo o risco de curto-circuito e não estar situada nas proximidades de materiais combustíveis.

11.7 Omissão da proteção contra sobrecargas

A NBR 5410 *permite omitir a proteção contra correntes de sobrecarga*, desde que os circuitos não estejam situados em locais que apresentem riscos de incêndio (BE2) ou de explosão (BE3), ou que sejam sujeitos a prescrições particulares, nos seguintes casos:

(a) Em uma linha situada a jusante de uma troca de seção, de natureza, de modo de instalação ou de constituição, e efetivamente protegida contra correntes de sobrecarga por um dispositivo de proteção localizado a montante.

(b) Em uma linha que não seja suscetível de ser percorrida por correntes de sobrecarga, desde que essa linha esteja adequadamente protegida contra correntes de curtos-circuitos e não possua derivações ou tomadas de corrente.

(c) Nas instalações de telecomunicação, de comando, de sinalização e análogas.

O caso (a) ocorre, por exemplo, quando um circuito é protegido contra correntes de sobrecarga, com condutores cuja seção S_I tenha sido determinada pelo critério da queda de tensão ou quando há uma derivação cujos condutores têm uma seção S_{II}, devidamente coordenada com o dispositivo de proteção a montante. Nesses casos a linha de instalação está adequadamente protegida, como mostra a Figura 11.21(a).

O caso (b) ocorre:

- Quando o circuito alimenta exclusivamente equipamentos que já estejam individualmente protegidos contra correntes de sobrecarga, como é o caso de motores protegidos por relés térmicos, ou que não possam dar origem a correntes de sobrecarga, caso de aquecedores de água, radiadores, fogões elétricos etc., e de motores cuja corrente de rotor travado não seja superior à capacidade de condução de corrente dos condutores (ver Figura 11.21(b1)).

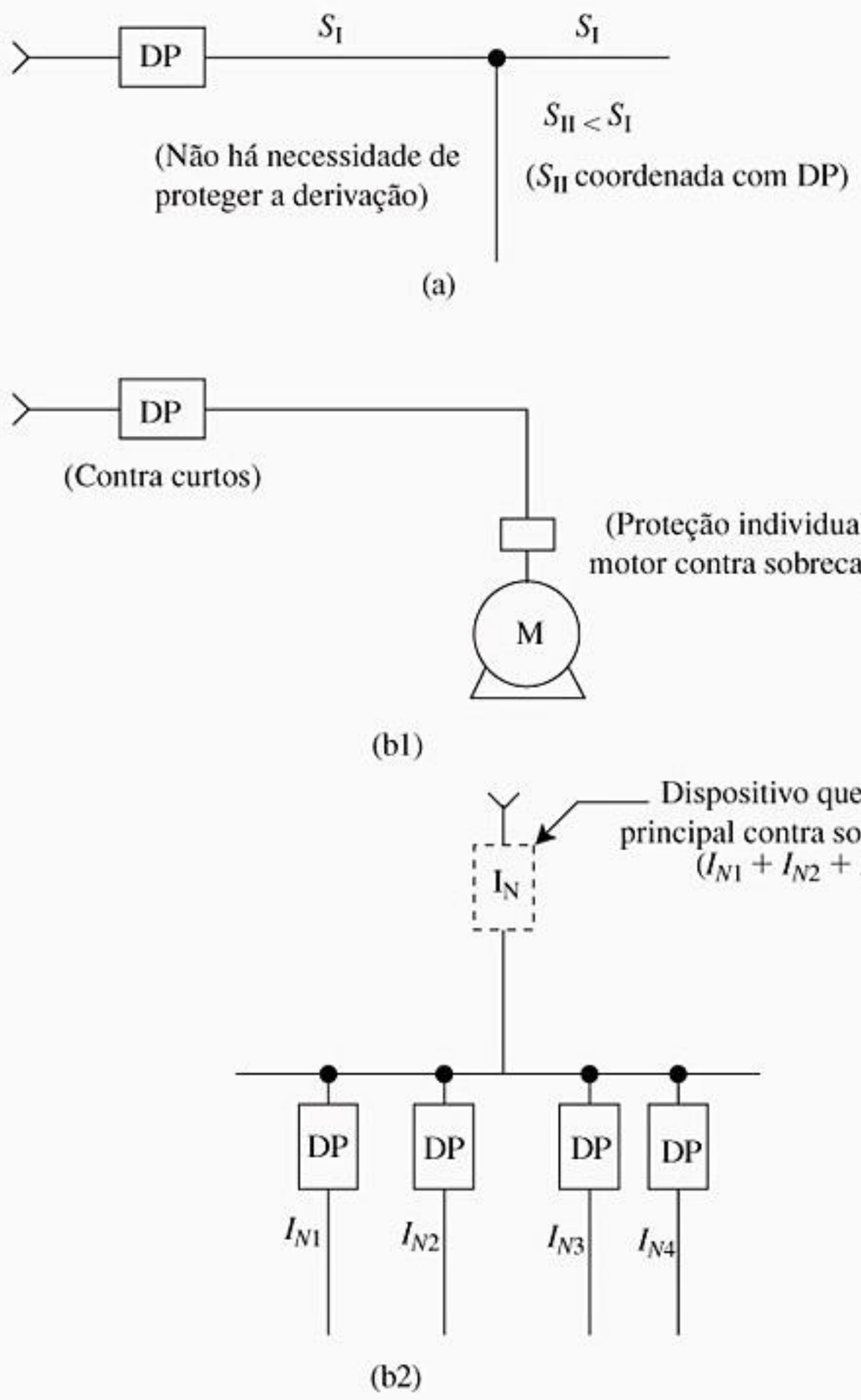


Figura 11.21 ■ Exemplos de omissão da proteção contra sobrecargas

- No caso de um circuito principal que alimente vários circuitos protegidos individualmente contra correntes de sobrecarga, quando a soma das correntes nominais dos dispositivos de proteção dos circuitos for inferior à corrente nominal do dispositivo que protegeria o circuito principal (ver Figura 11.21(b2)). Por outro lado, a norma *recomenda a omissão da proteção contra sobrecargas*, por razões de segurança, quando a abertura inesperada do circuito puder causar perigos. É o caso típico de:
  - Circuitos de excitação de máquinas rotativas.
  - Circuitos de alimentação de eletroímãs para elevação de cargas.
  - Circuitos secundários de transformadores de corrente.

  Nesses casos, pode ser útil a previsão de um dispositivo de sinalização de correntes de sobrecarga.

  É importante observar que nos esquemas IT só poderão ser deslocados ou omitidos os dispositivos de proteção contra correntes de sobrecarga no caso de circuitos protegidos por dispositivo a corrente diferencial-residual ou em que todos os componentes, incluindo linhas elétricas, sejam de Classe II ou possuam isolação equivalente. Em um esquema IT, a corrente de falta resultante de duas falhas de isolamento em dois circuitos diferentes pode ter uma intensidade inferior à da corrente de curto-circuito presumida mínima em um dos circuitos. Nessa situação, o tempo de interrupção dessa corrente pode ser suficientemente longo e pode danificar os condutores de um dos circuitos.

EXEMPLOS

Circuitos protegidos por disjuntores que atendem ao RTQ da Portaria Inmetro 243/2006.

(a) Na Figura 11.22, a derivação com $I_Z = 42$ A já está protegida pelo disjuntor geral com $I_N = 40$ A; da Expressão 11.12, tem-se que $40 < 42$ A.

(b) Na Figura 11.23:

- Os circuitos derivados em B, C e D estão adequadamente protegidos contra correntes de sobrecarga pelos disjuntores indicados.
- Os trechos AB, BC e CD do circuito principal, de seções diferentes, já estão protegidos pelos disjuntores das derivações.

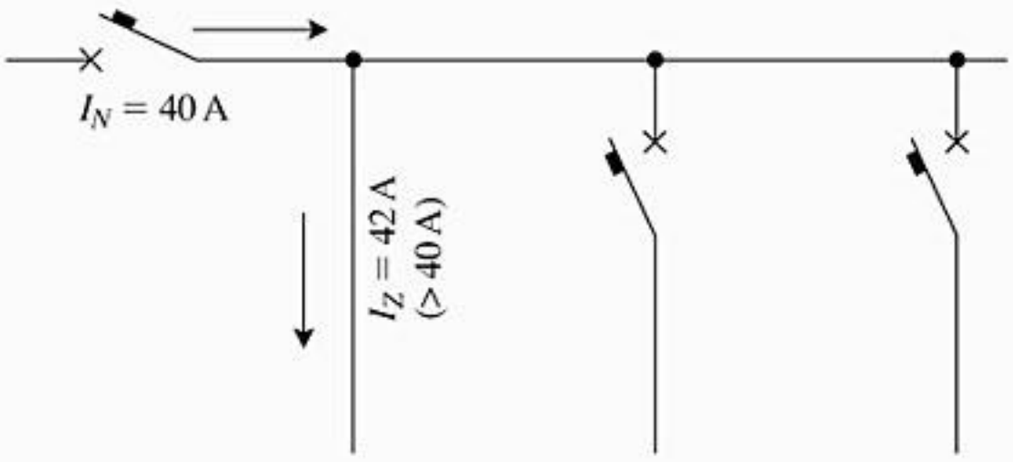


Figura 11.22 ▪ Diagrama do item (a)

11.8 Proteção contra correntes de curto-circuito

Condições gerais

No estudo da proteção contra correntes de curto-circuito, devem, em princípio, ser determinadas as correntes de curto-circuito presumidas simétricas em todos os pontos julgados necessários. Essa determinação pode ser feita por um dos métodos apresentados no Capítulo 10.

O dispositivo destinado a proteger os condutores vivos de um circuito deve estar adequadamente coordenado com os condutores. Para isso, a NBR 5410 impõe duas condições:

(a) Que a capacidade de interrupção nominal do dispositivo (I_{CN}) seja, no mínimo, igual à corrente de curto-circuito presumida simétrica (I_k) no ponto de aplicação do dispositivo, isto é

$$I_{CN} \geq I_k \qquad (11.23)$$

(b) Que o tempo de interrupção de toda corrente resultante de um curto-circuito, que se produza em um ponto qualquer do circuito, não seja superior ao tempo necessário para aquecer os condutores até a temperatura-limite de curto-circuito, θ_{cc} (ver Tabela 9.15).

Figura 11.23 ▪ Diagrama do item (b)

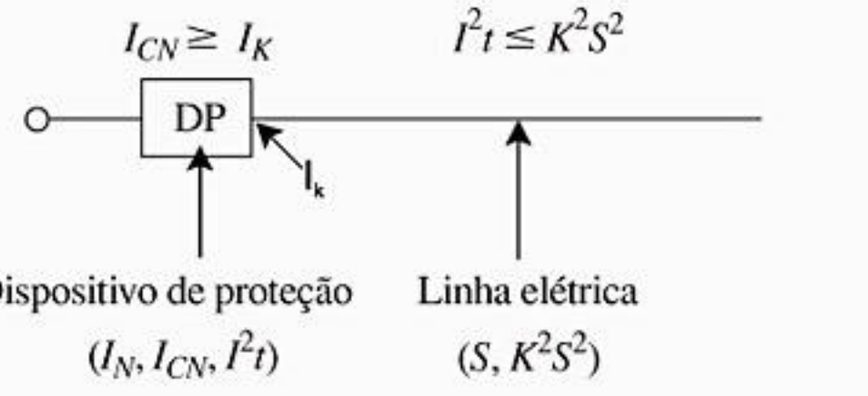


Figura 11.24 ▪ Condições de proteção contra correntes de curto-circuito

Em outras palavras, a integral de Joule que o dispositivo deixa passar, $I^2t = \int_0^t i^2 dt$, não deve ser superior à integral de Joule (K^2S^2) necessária ao aquecimento do condutor desde a temperatura máxima para serviço contínuo θ_Z) até a temperatura de curto-circuito. Pode-se escrever

$$\int_0^t i^2 dt \leq K^2S^2 \qquad (11.24)$$

Para curtos-circuitos de qualquer duração, onde a assimetria da corrente não seja significativa, bem como para curtos-circuitos assimétricos de duração na faixa de 0,1 a 5 segundos, a condição pode ser escrita

$$I_k^2 \cdot t \leq K^2S^2 \qquad (11.25)$$

onde I_k é a corrente de curto-circuito presumida simétrica e t, sua duração.

A Figura 11.24 ilustra as condições dadas nas Expressões 11.23 e 11.24.

Condição específica: capacidade de interrupção menor do que a corrente de curto-circuito presumida

A NBR 5410 admite, como exceção, que seja instalado em dado ponto um dispositivo de proteção cuja

capacidade de interrupção nominal seja inferior à corrente de curto-circuito presumida simétrica no ponto, desde que, a montante, seja instalado outro dispositivo com a capacidade de interrupção necessária. As características dos dois dispositivos devem ser coordenadas de tal maneira que a energia que o dispositivo situado a montante deixa passar não seja superior à que podem suportar, sem danos, o dispositivo e as linhas situadas a jusante. É o que mostra a Figura 11.25: a integral de Joule do dispositivo situado a montante, $(I^2t)_1$, não deve ser superior à linha por ele protegida, $K^2S_1^2$ nem à do dispositivo a jusante, $(I^2t)_2$, nem a das linhas a jusante, $K^2S_2^2$.

Uso de disjuntores

Quando a proteção contra correntes de curtos-circuitos for realizada por disjuntores, exige-se, essencialmente, que o disjuntor possua uma capacidade de interrupção nominal não inferior à corrente de curto-circuito presumida simétrica no ponto de aplicação e que o dispositivo atue em um tempo suficientemente breve para evitar que a integral de Joule supere o valor suportável pelo cabo.

Para atender à primeira condição, no caso de disjuntores instalados em quadros próximos ao ponto de entrega de energia ou à cabine primária, é necessária uma cuidadosa avaliação de I_k pelo método analítico. Nesse caso, o disjuntor (geral) deverá possuir uma capacidade de interrupção nominal elevada (geralmente acima de 10 a 20 kA). Em geral, os disjuntores divisionários também deverão possuir capacidades de interrupções elevadas (as mesmas do disjuntor geral). No entanto, os disjuntores divisionários poderão até possuir capacidades de interrupção inferiores aos respectivos I_k', bastando para isso que a energia que o disjuntor geral deixa passar não seja superior à suportável sem danos pelos disjuntores divisionários e pelos cabos instalados a jusante. Logicamente, essa condição exige estudos de coordenação acurados.

Para a proteção de quadros de distribuição de setores, de andares ou de apartamentos, basta avaliar a corrente de curto-circuito presumida simétrica por um dos métodos simplificados apresentados na Seção 10.6.

Para que haja coordenação entre o dispositivo de proteção contra correntes de curto-circuito e o condutor protegido, é necessário que:

A corrente I_α, correspondente à interseção da curva de atuação do disjuntor (limite superior da zona de atuação) com a curva do tempo em função da corrente de curto-circuito dos condutores, seja igual ou inferior à corrente de curto-circuito presumida mínima (ver em "Corrente de curto-circuito presumida mínima", Capítulo 10, Seção 10.6) I_{kmin}, como mostra a Figura 11.26. Isso garante a atuação do disjuntor mesmo nas condições mínimas de curto-circuito.

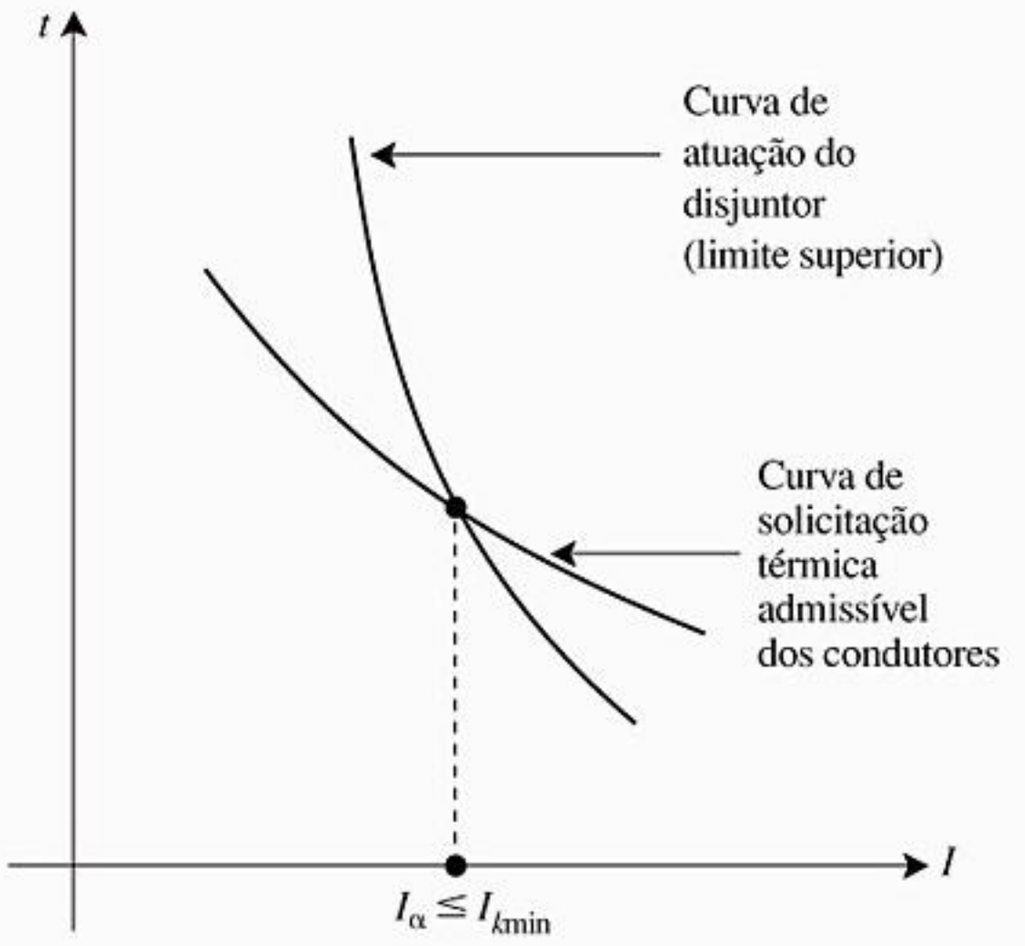


Figura 11.26 ■ Limite inferior da corrente de curto-circuito presumida mínima

A corrente I_β, correspondente à interseção das curvas $I^2t = f(I)$ do disjuntor e do condutor (ver figuras 11.6 e 11.9), deve ser no mínimo igual à corrente de curto-circuito presumida simétrica no ponto de instalação do disjuntor, como mostra a Figura 11.27.

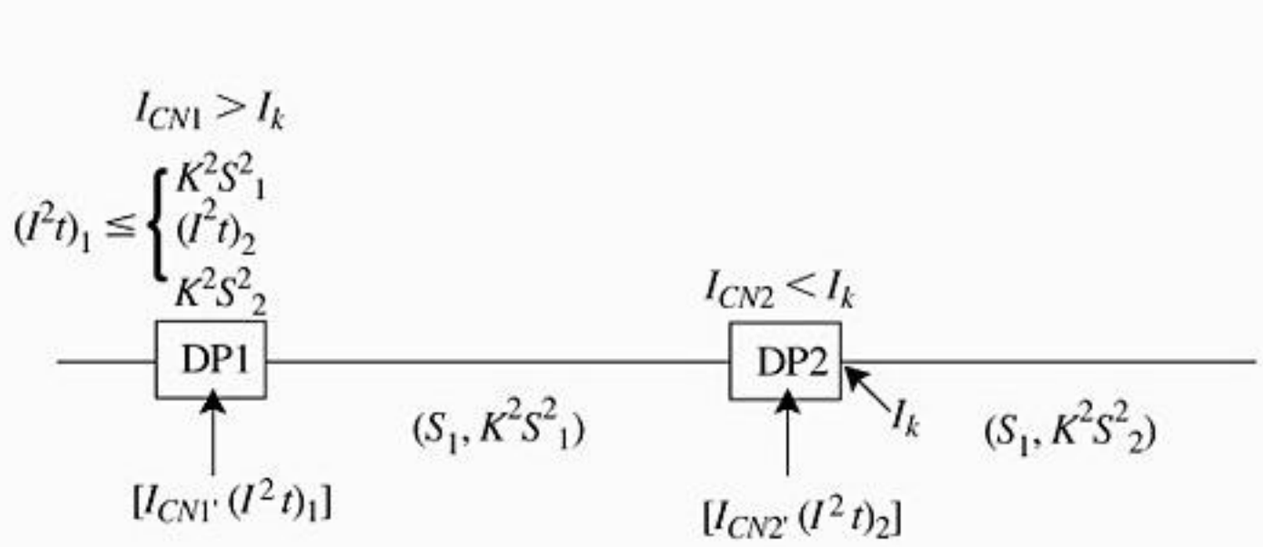


Figura 11.25 ■ Condições para instalar um dispositivo cuja capacidade de interrupção nominal seja inferior à corrente de curto-circuito presumida no ponto de instalação

A citada curva do tempo em função da corrente de curto-circuito dos condutores nada mais é que a curva obtida da expressão

$$I_k^2\, t = K^2 S^2$$

ou seja

$$t = \frac{K^2 S^2}{I_k^2}$$

As curvas $(I^2t) = f(I)$ podem ser utilizadas também na verificação da proteção em condições mínimas de curto-circuito, bem como na proteção contra correntes de sobrecarga, como mostrado na Figura 11.28.

O disjuntor D1 protege o condutor de seção S para correntes de curto-circuito compreendidas entre I_M e I_N; o disjuntor D2 protege o condutor de seção S contra correntes de sobrecarga e contra correntes de curto-circuito até I_R.

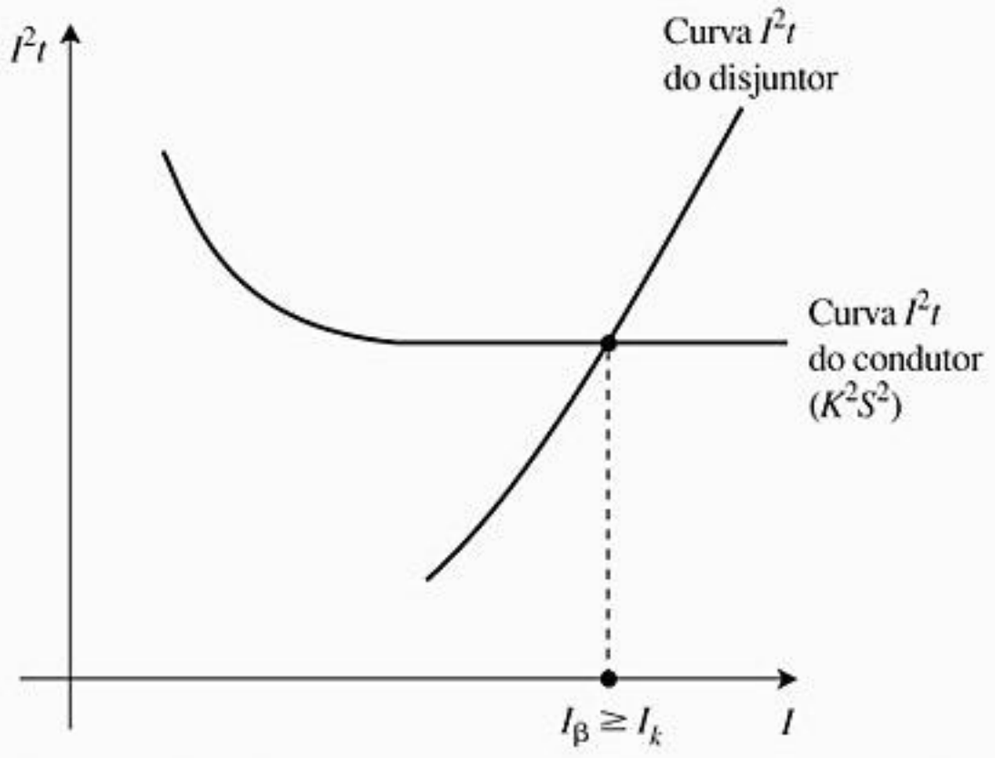


Figura 11.27 ▪ Limite superior da corrente de curto-circuito presumida simétrica

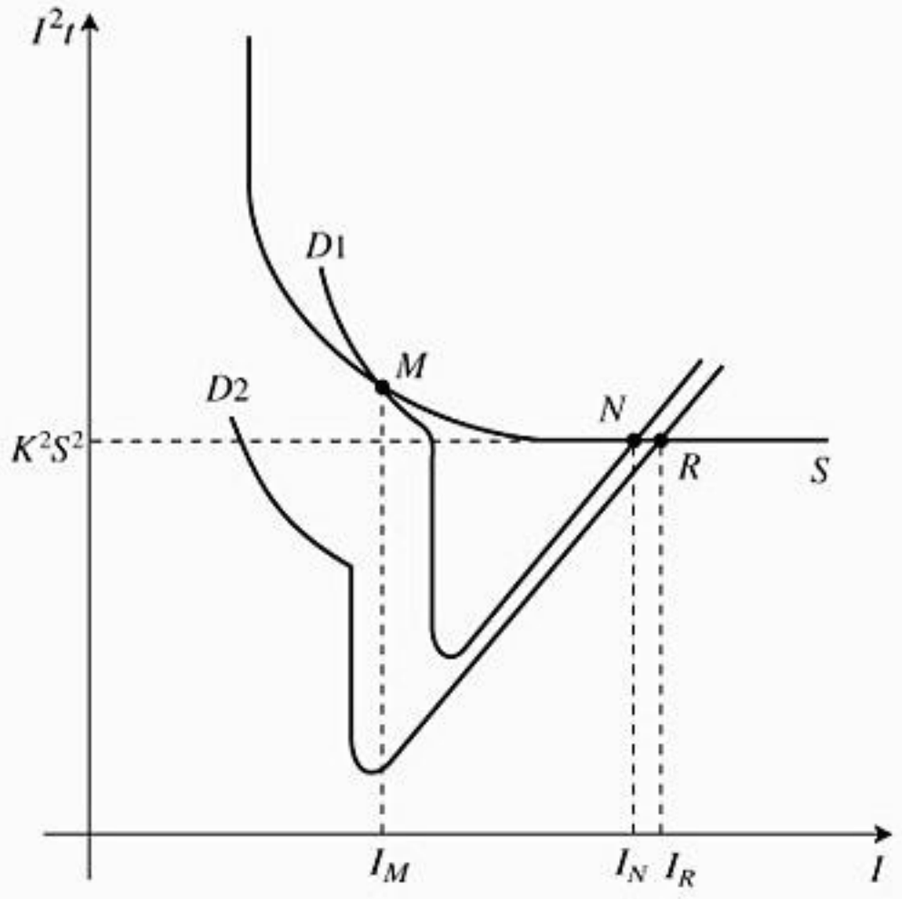


Figura 11.28 ▪ Aplicações das curvas $(I^2t) = f(I)$ dos disjuntores

Uso de fusíveis

Devido à sua elevada capacidade de interrupção, os fusíveis[2] não criam problemas de interrupção para correntes de curto-circuito elevadas. Na maioria dos casos, é dispensável a verificação da corrente de curto-circuito presumida simétrica no ponto de aplicação.

No que concerne à integral de Joule, verifica-se que, ao contrário do que ocorre com os disjuntores, I^2t aumenta com a diminuição da sobrecorrente. Nessas condições, o fusível apresenta um comportamento crítico para pequenas correntes de curto-circuito; isto é, ele poderá não atuar em um tempo suficiente, permitindo o aquecimento excessivo do condutor.

Se o fusível for dimensionado para proteger o condutor também contra correntes de sobrecarga, não existirão correntes críticas e, na prática, não haverá necessidade de verificar a integral de Joule. Se, no entanto, o fusível for superdimensionado em relação à capacidade de condução de corrente do condutor, devem ser verificadas as condições de proteção no caso de corrente de curto-circuito mínima.

A corrente I_α, correspondente à interseção da curva de atuação do fusível (limite superior da zona de atuação) com a curva do tempo em função da corrente de curto-circuito do condutor, deve ser igual ou inferior à corrente de curto-circuito presumida mínima, I_{kmin}, como indica a Figura 11.29.

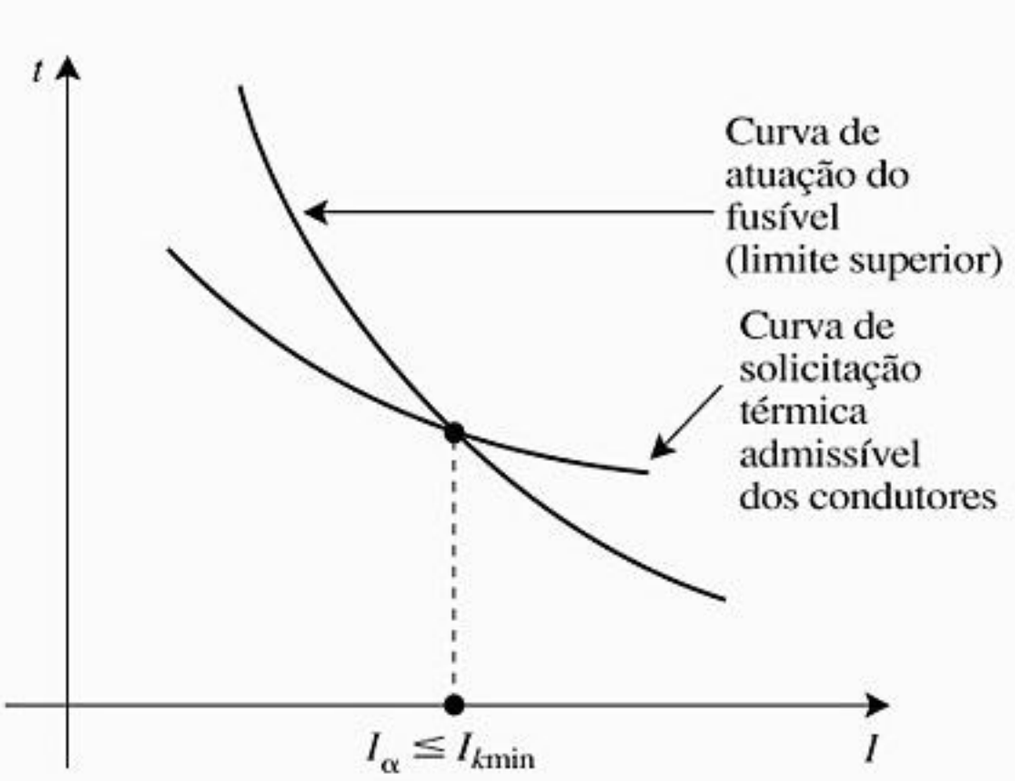


Figura 11.29 ▪ Limite inferior da corrente de curto-circuito presumida mínima

11.9 Localização dos dispositivos de proteção contra correntes de curto-circuito

Os dispositivos de proteção contra correntes de curto-circuito destinam-se à proteção dos condutores.

2. Considere-se aqui apenas os fusíveis que atendem à série de normas NBR IEC 60269.

Por essa razão, recomenda-se, em princípio, sua localização no ponto em que uma 'mudança' provoque uma redução do valor da capacidade de condução de corrente dos condutores, ponto este que, geralmente, é a origem do circuito (ver Seção 11.6).

A NBR 5410 admite que o ponto de aplicação do dispositivo seja *deslocado* em relação ao ponto em que ocorre a citada mudança em duas situações:

(a) Quando outro dispositivo de proteção situado a montante proteger adequadamente os condutores contra corrente de curto-circuito (como mostra a Figura 11.30).

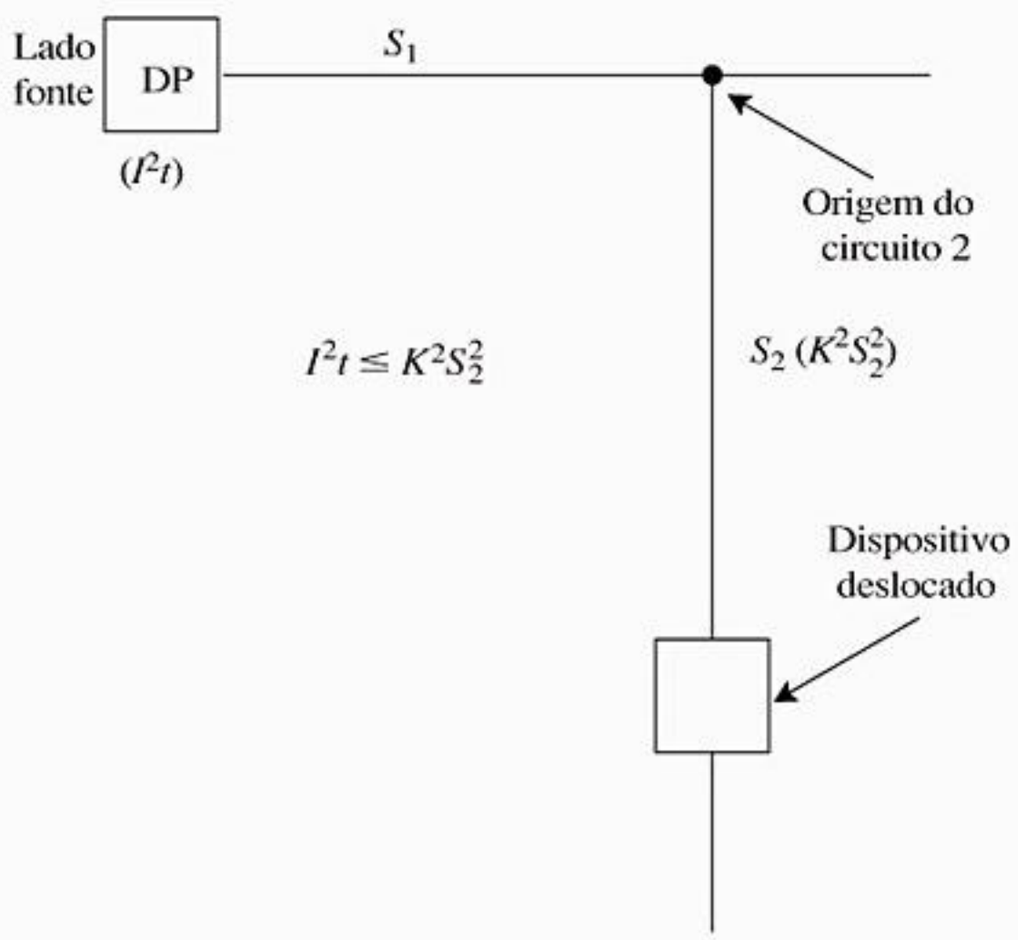


Figura 11.30 ■ Exemplo de situação em que se pode deslocar o dispositivo de proteção contra correntes de curto-circuito

(b) Quando a parte da linha compreendida entre o ponto em que ocorre a mudança e o dispositivo atender, simultaneamente, às três seguintes condições:
- Seu comprimento não exceda a 3 m.
- Esteja instalada de modo a reduzir ao mínimo os riscos de curto-circuito (por exemplo, reforçando as proteções da linha contra influências externas).
- Não esteja localizada próxima de materiais combustíveis.

11.10 Omissão da proteção contra curtos-circuitos

A NBR 5410 *permite omitir a proteção contra correntes de curto-circuito,* desde que a linha seja instalada de modo a reduzir ao mínimo o risco de curto-circuito e não esteja situada nas proximidades de materiais combustíveis, nos seguintes casos:

- Em linhas ligando geradores, transformadores, retificadores ou baterias aos quadros de comando respectivos, estando os dispositivos de proteção situados nesses quadros.
- Em circuitos cujo desligamento possa trazer perigos para a instalação correspondente, tais como os secundários de transformadores de corrente, os de excitação de máquinas rotativas e os circuitos de alimentação de eletroímãs para elevação de cargas.

Em alguns circuitos de medição, conforme caso a caso.

11.11 Proteção dos condutores de fase

Como regra da NBR 5410, a detecção de sobrecorrentes deve ser prevista em todos os condutores de fase e deve provocar o seccionamento do condutor em que a sobrecorrente for detectada, não precisando, necessariamente, provocar o seccionamento dos outros condutores vivos (ver figuras 11.31 e 11.32).

Porém, existem exceções a essa regra. A primeira acontece nos casos em que o seccionamento de uma só fase pode causar perigo, por exemplo, em motores trifásicos, caso em que devem ser tomadas precauções apropriadas, para que todos os condutores de fase sejam seccionados simultaneamente.

Outra exceção é o caso de locais de habitação, onde a norma prescreve que todo *circuito terminal* deve ser protegido contra sobrecorrentes por dispositivo que assegure o seccionamento simultâneo de todos os condutores de fase. Isso significa que o dispositivo de proteção deve ser multipolar, quando o circuito for constituído de mais de uma fase. Dessa forma, dispositivos unipolares montados lado a lado, apenas com suas alavancas de manobra acopladas, não são considerados dispositivos multipolares; portanto, essa montagem não é permitida pela norma.

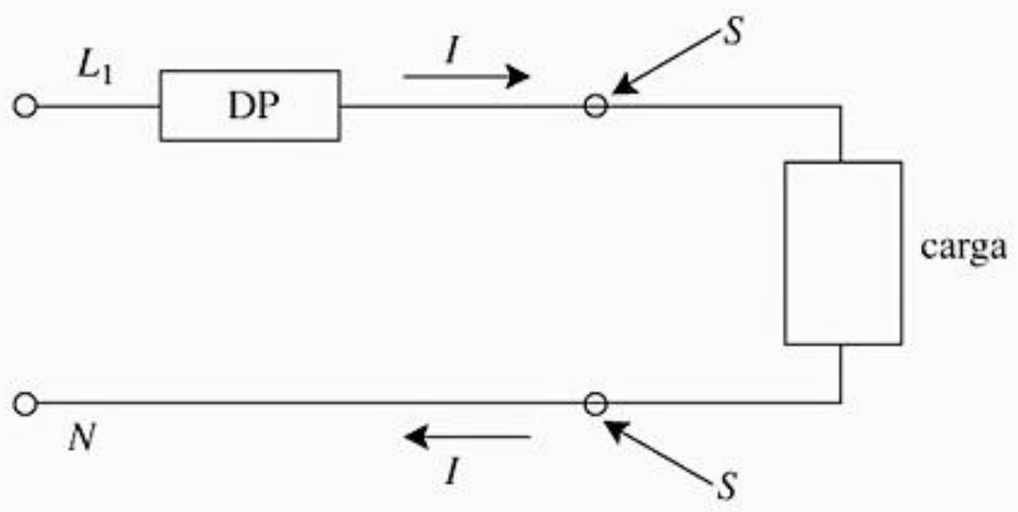


Figura 11.31 ■ Proteção só em um condutor

11.12 Proteção do condutor neutro

As condições de proteção contra sobrecorrentes do condutor neutro dependem do esquema de aterramento utilizado na instalação, conforme será visto a seguir.

Esquemas TT e TN

Seção do condutor neutro igual ou maior que a seção dos condutores de fase

Quando a seção do condutor neutro for pelo menos igual ou equivalente à dos condutores de fase, *não será necessário* prever detecção de sobrecorrente no condutor neutro nem dispositivo de seccionamento nesse condutor (ver figuras 11.31 e 11.32).

Seção do condutor neutro menor que a seção dos condutores de fase

Como regra, quando a seção do condutor neutro for inferior à dos condutores de fase e escolhida de acordo com os valores mínimos especificados na Tabela 9.22 (Capítulo 9), *será necessário* prever detecção de sobrecorrente no condutor neutro, adequada à seção desse condutor. Essa detecção deve provocar o seccionamento dos condutores de fase, mas não necessariamente do condutor neutro.

Admite-se *omitir a detecção de sobrecorrente* no condutor neutro, se as duas condições seguintes forem atendidas simultaneamente:

- O condutor neutro estiver protegido contra curtos-circuitos pelo dispositivo de proteção dos condutores de fase do circuito. Isso deve ser verificado pelo estudo de proteção contra curtos-circuitos e depende da corrente de curto-circuito presumida e das características dos dispositivos de proteção dos condutores de fase escolhidos.
- A corrente máxima suscetível de percorrer o condutor neutro em serviço normal for claramente inferior ao valor da capacidade de condução de corrente desse condutor. Isso pode ser conseguido se a potência transportada pelo circuito for distribuída tão uniformemente quanto possível entre as diferentes fases, por exemplo, se a soma das potências absorvidas pelos equipamentos de utilização alimentados entre cada fase e o neutro for muito inferior à potência total transportada pelo circuito em questão. Embora a NBR 5410 não especifique, pode-se considerar que, se a soma das potências dos equipamentos for da ordem de 10 por cento da potência total do circuito, essa condição estará satisfeita.

Caso de ocorrência de dupla falta em esquema TN ou TT

Em certas condições, em uma instalação com esquema TN ou TT, se preexistir uma falta entre o condutor neutro de um circuito e a terra, a corrente de falta resultante de uma segunda falta, envolvendo o condutor de fase de outro circuito (da mesma instalação), poderá percorrer aquele condutor neutro, produzindo uma sobrecorrente (ver Figura 11.33).

Na primeira falta, Figura 11.33, o condutor neutro N_A ficará em paralelo com o aterramento, sem maiores consequências.

Na ocorrência da segunda falta no equipamento B, que caracteriza um curto-circuito bifásico à terra, a corrente de falta ($Ia + I_b$) passará pelo condutor neutro, por ter menor impedância que a resistência do aterramento ($R_E + R_F$); portanto, a corrente I_t é muito pequena e pode ser desconsiderada. Esse curto-circuito fará atuar os dois dispositivos de proteção A e B. Dependendo do ajuste, os dispositivos de proteção não operam no mesmo tempo; eles podem abrir um mais rápido que o outro, voltando o circuito a ficar com uma falta.

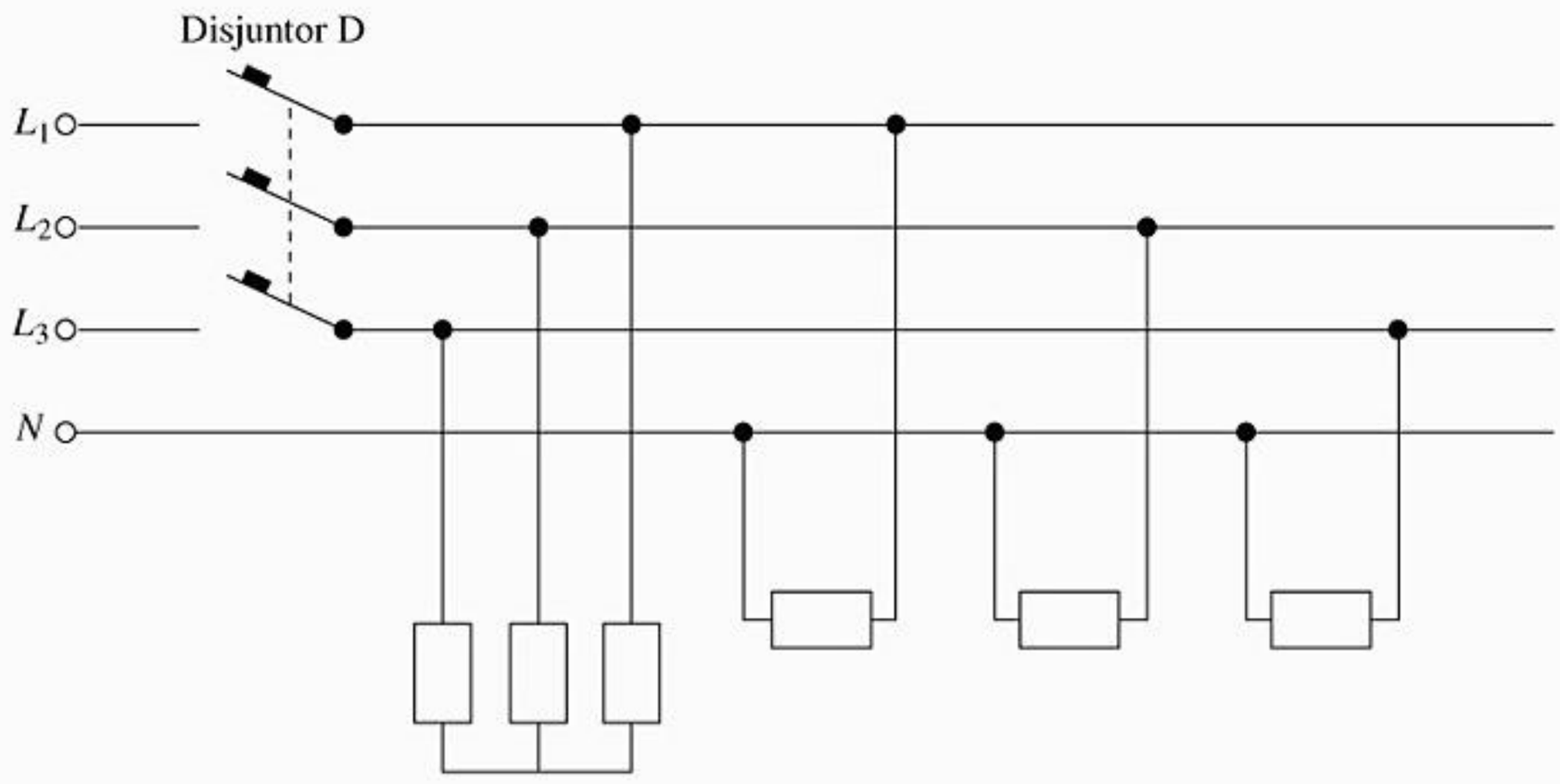


Figura 11.32 ■ Proteção nos condutores de fase

Esquema IT

Em um esquema IT, a presença simultânea de duas faltas na instalação pode dar origem a uma sobrecorrente no condutor neutro, se sua seção for inferior à do condutor fase de outro circuito em que ocorra a segunda falta. Nessas instalações, deve-se considerar, como foi apresentado na Seção 8.4, que uma primeira falta terá como única conseqüência a de fixar o potencial de um ponto da instalação, não provocando a atuação de nenhum dispositivo de proteção. A Figura 11.34 indica essa situação.

Uma primeira falta envolve o neutro e a massa no circuito B, sendo esse condutor de seção S_B; uma segunda falta ocorre entre um condutor fase e a massa do circuito A, sendo S_A a seção desse condutor.

Estando as massas A e B interligadas por um condutor de proteção, a corrente passará inteiramente pela falta em B e, conseqüentemente, pelo condutor neutro do circuito. Pode ocorrer que S_B seja muito inferior a S_A e que a corrente de falta seja uma sobrecorrente no neutro. Nesse caso, o condutor neutro deve ser protegido contra sobrecorrentes.

Assim, prescreve a NBR 5410 que, em um esquema IT, quando o neutro for distribuído, *deve ser prevista a detecção de sobrecorrentes e o seccionamento* no condutor neutro de todos os circuitos, devendo ser seccionados todos os condutores vivos de cada circuito, inclusive o neutro. No entanto, isso não será necessário se:

- O neutro considerado estiver efetivamente protegido contra correntes de curto-circuito por um dispositivo de proteção situado a montante.
- O circuito considerado estiver protegido por um dispositivo a corrente diferencial-residual cuja corrente diferencial-residual nominal de atuação seja, no máximo, igual a 15 por cento da capacidade de condução de corrente do respectivo condutor neutro. Tal dispositivo deve seccionar todos os condutores vivos do circuito, inclusive o neutro.

  Essa segunda solução pode ser realizada também se o dispositivo DR for colocado a montante dos circuitos terminais, por exemplo, na origem da instalação, e se a sua corrente diferencial-residual nominal de atuação for igual ou inferior a 15 por cento da capacidade de condução de corrente do condutor neutro de menor seção da instalação.

  Uma terceira solução, expressamente recomendada pela norma, consiste em *não distribuir o condutor neutro*, alimentando entre fases todos os equipamentos de utilização.

11.13 Coordenação seletiva da proteção contra sobrecorrentes

Conceitos gerais

Quando dois ou mais dispositivos de proteção contra sobrecorrentes forem instalados em série, na grande maioria dos casos, suas características de atuação devem ser escolhidas de modo a que, no caso de circulação de uma sobrecorrente no circuito situado mais a jusante (provocada, por exemplo, por uma falta), só atue o dispositivo que protege esse circuito.

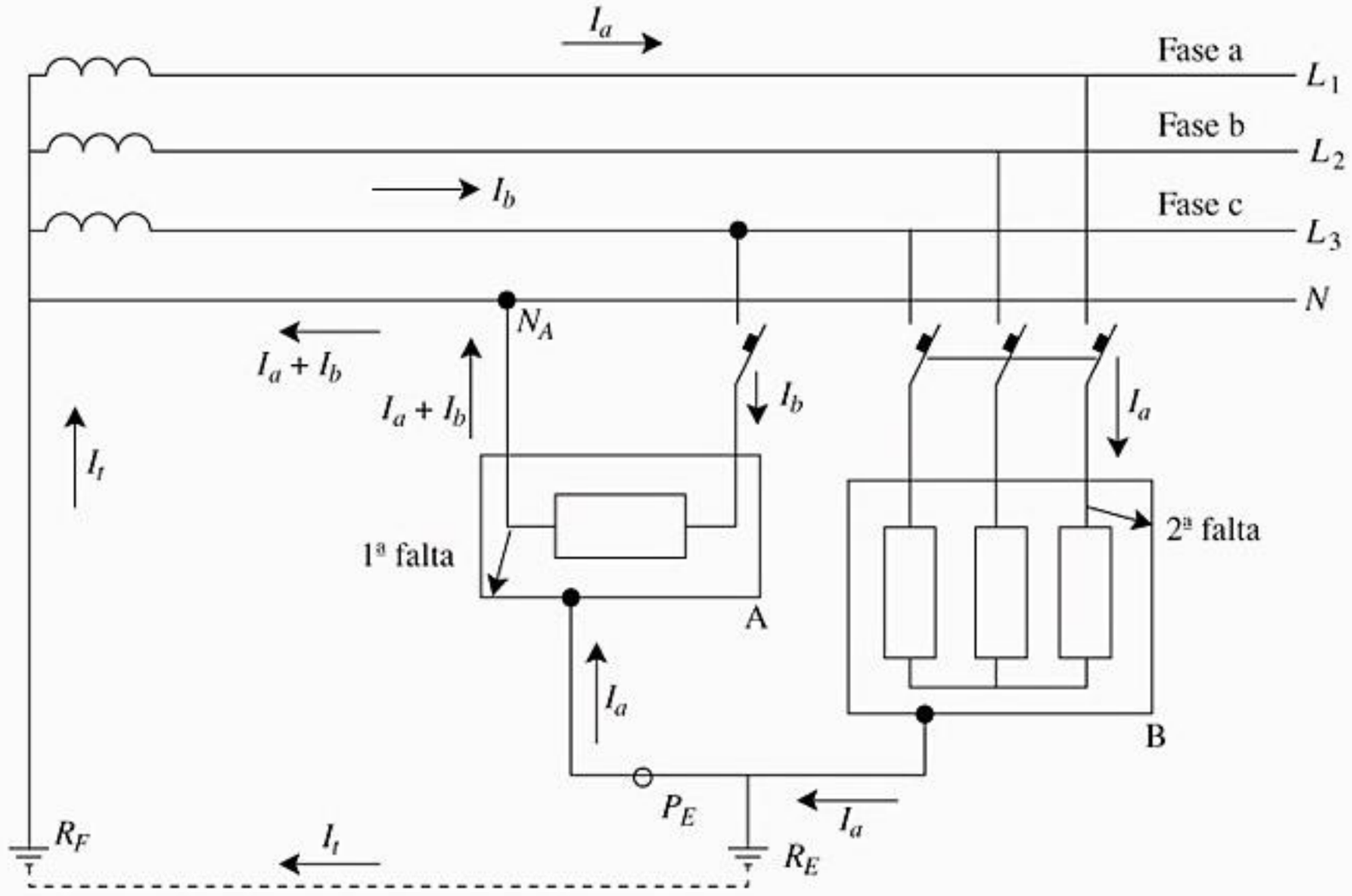


Figura 11.33 ■ Se preexiste uma falta neutro-terra em A, o aparecimento de uma segunda falta em B provoca a circulação no condutor N_A (neutro) de uma corrente cuja intensidade poderá ser superior à sua capacidade de condução de corrente, principalmente se sua seção for inferior à dos condutores do circuito B

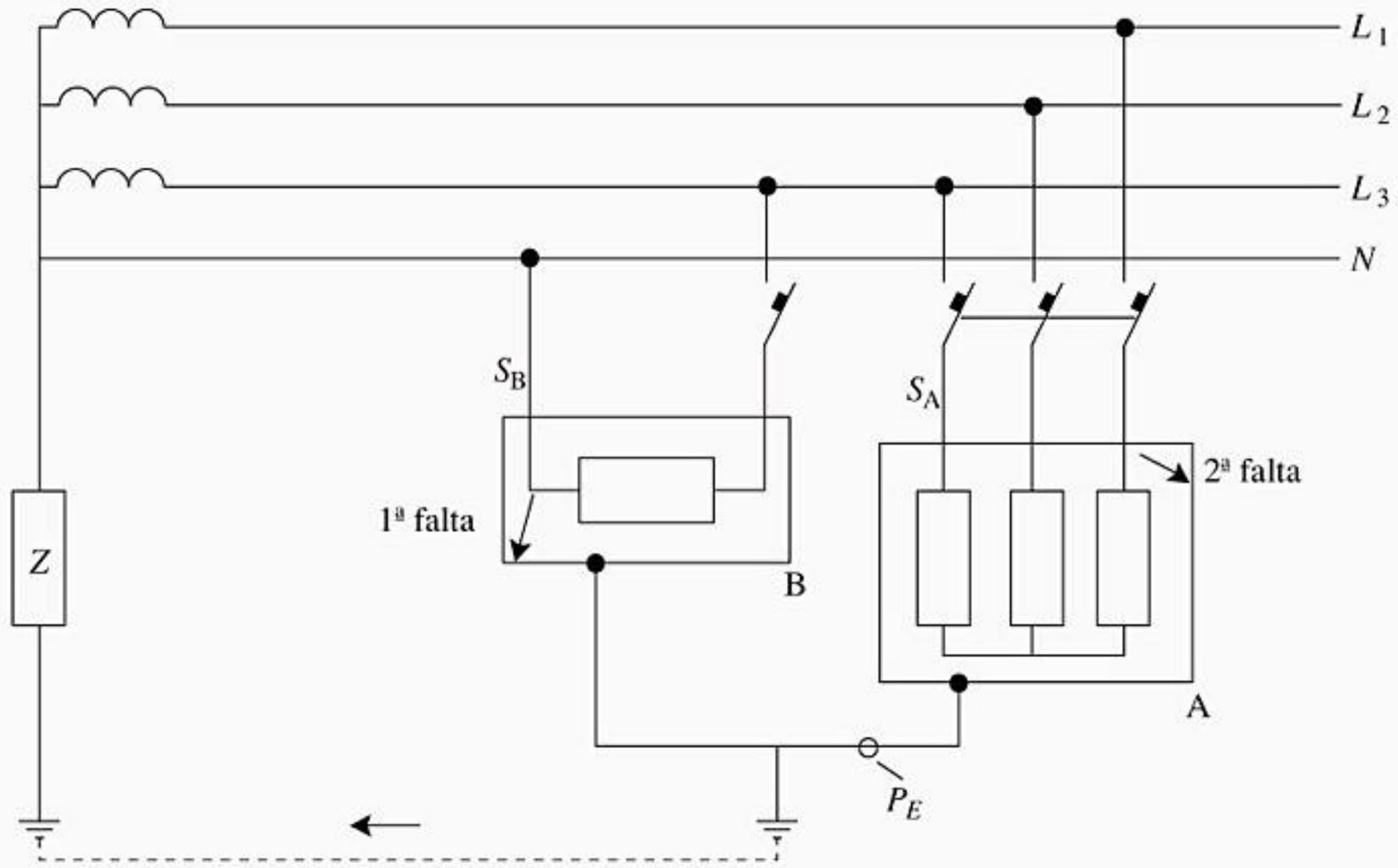


Figura 11.34 ▪ Dupla falta no esquema IT

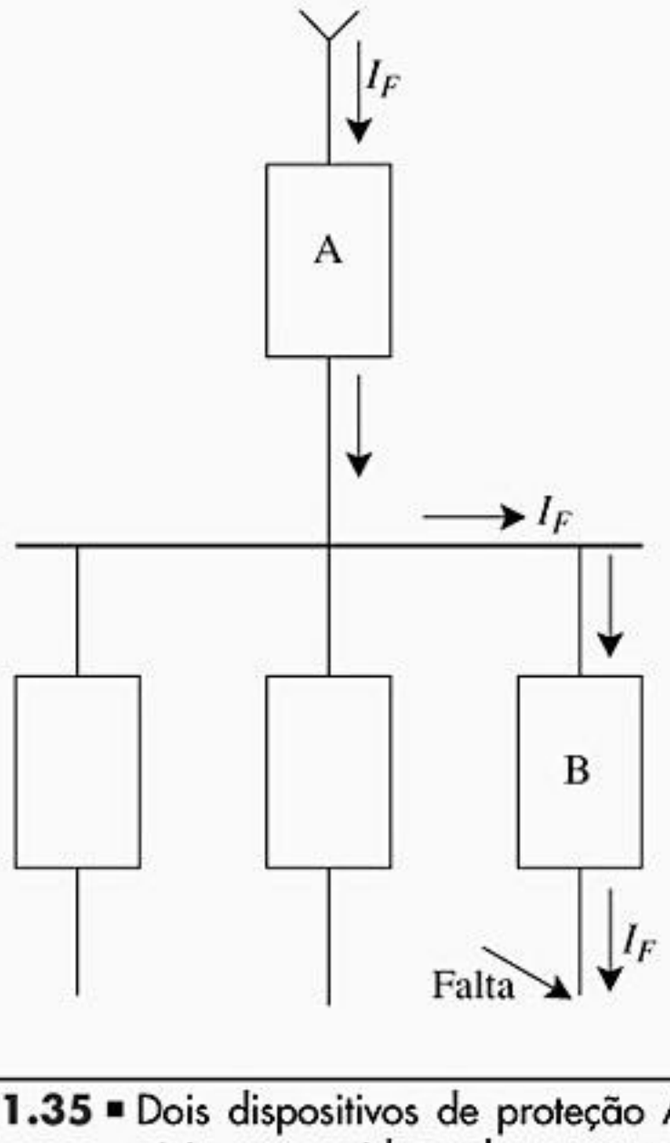


Figura 11.35 ▪ Dois dispositivos de proteção A e B, em série, percorridos pela mesma corrente de falta

Assim, com referência à Figura 11.35, um dispositivo B é seletivo em relação a outro A, instalado a montante, se só atua esse dispositivo, para uma gama de sobrecorrentes produzidas a jusante de B.

A seletividade será *total* se a gama de sobrecorrentes estender-se até a máxima corrente de curto-circuito presumida no ponto de aplicação do dispositivo B. Será *parcial* se for limitada a uma sobrecorrente inferior àquele valor, devendo ser indicada essa sobrecorrente-limite.

Seletividade entre fusíveis

Dois *fusíveis* colocados em série são, em princípio, considerados seletivos quando suas características (curvas) tempo-corrente não se interceptam e mantêm entre si um distanciamento (de tempo) adequado. No entanto, no caso de corrente de falta elevada (geralmente em correntes de curto-circuito), essa condição pode não bastar.

Para garantir uma seletividade total entre dois fusíveis gG, é necessário que a corrente nominal do fusível a montante seja, no mínimo, igual a 1,6 vez a corrente nominal do fusível a jusante, isto é,

$$I_{NA} \times 1{,}6\, I_{NB} \qquad (11.26)$$

Assim, por exemplo, um fusível gG de 63 A só será seletivo com outro de, no mínimo,

$$63 \times 1{,}6 = 100{,}8 \rightarrow 100 \text{ A}$$

É necessário, muitas vezes, garantir que o fusível instalado a montante não tenha iniciado o processo de fusão do elemento fusível, o que poderia provocar uma atuação intempestiva. Para isso, é necessário que a integral de Joule de interrupção do fusível instalado a jusante seja inferior à integral de Joule de fusão do fusível instalado a montante, como está ilustrado na Figura 11.36.

Para os fusíveis tipo D (que são também gG), na faixa de 6 a 10 A, a relação entre as correntes nominais é 2, ou seja,

$$I_{NA} = 2\, I_{NB} \qquad (11.27)$$

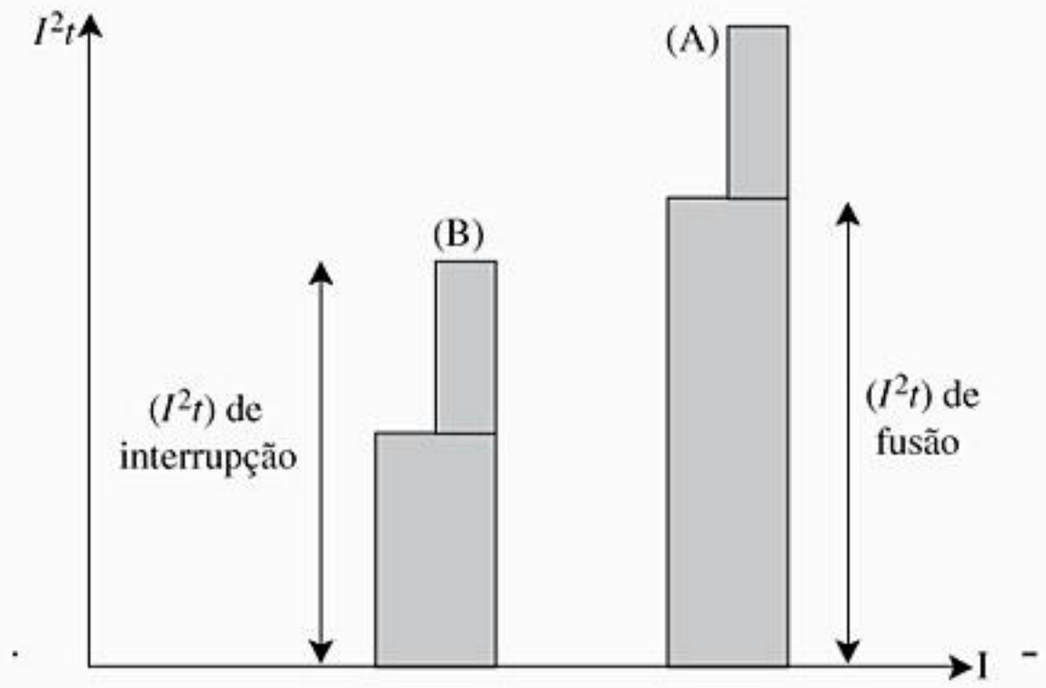


Figura 11.36 ■ Condição de seletividade total entre fusíveis

Seletividade entre disjuntores

Nas instalações de baixa tensão é muito comum a existência de diversos disjuntores em série, como mostra a Figura 11.37.

Nessas condições, é necessário que, em caso de sobrecorrente, só atue o disjuntor que protege o circuito onde teve origem a sobrecorrente. Em outras palavras, para que o disjuntor C seja seletivo em relação ao disjuntor B, e B em relação ao disjuntor A, é preciso que, ocorrendo uma sobrecorrente a jusante de C, só atue o disjuntor C e, verificando-se uma falta entre C e B, só atue o disjuntor B.

Observe que, considerando os trechos a e b como circuitos de distribuição e o trecho c como circuito terminal, apenas nesse último poderá ter origem uma corrente de sobrecarga; nos outros dois as sobrecorrentes só poderão provir de faltas (curtos-circuitos ou faltas para terra).

É importante distinguir as condições de seletividade para correntes de sobrecarga (pequenas sobrecorrentes) da seletividade para correntes de curto-circuito (sobrecorrentes elevadas).

No primeiro caso, é suficiente que o disjuntor a montante possua uma característica tempo-corrente mais alta que a do disjuntor a jusante e que ambas não se interceptem, como está ilustrado na Figura. 11.37, para os disjuntores A e B. No exemplo, o *limite de seletividade* é 1.000 A.

Para os disjuntores termomagnéticos, tendo em vista a forma de suas características tempo-corrente, para garantir a seletividade em toda a gama de pequenas sobrecorrentes, isto é, na região de atuação do disparador térmico, verifica-se que a corrente nominal (ou de ajuste) do disjuntor a jusante, I_{NB}, não deve ser em princípio superior a 40 por cento da corrente nominal (ou de ajuste) do disjuntor imediatamente a montante, I_{NA}, ou seja

$$I_{NB} \leq 0{,}4\, I_{NA}$$

isto é

$$I_{NA} = 2{,}5\, I_{NB} \qquad (11.28)$$

sendo a seletividade limitada ao valor inferior do limiar de atuação magnética do disjuntor a montante.

A Tabela 11.4 mostra a seletividade entre disjuntores termomagnéticos usuais, considerando sobrecorrentes de pequena intensidade.

Quanto à seletividade para sobrecorrentes elevadas (como as de curto-circuito), é necessário que o disjuntor a montante possua um tempo de disparo relativamente superior ao do disjuntor a jusante.

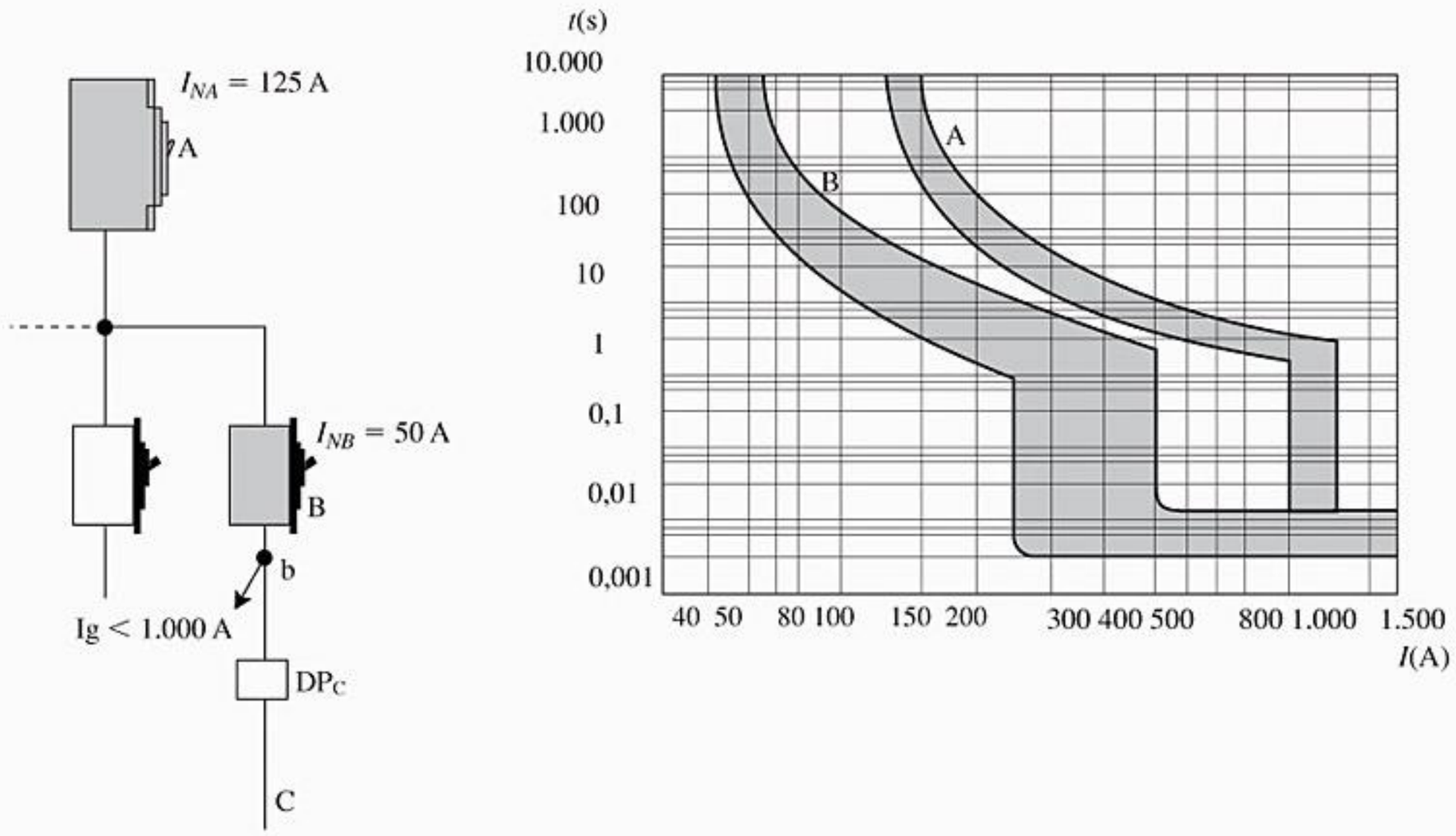


Figura 11.37 ■ Seletividade entre disjuntores

Tabela 11.4 ■ Seletividade parcial entre disjuntores termomagnéticos usuais

Disjuntor a montante I_N (A) (indicado o limite de seletividade) / Disjuntor a jusante I_N (A)	15 (75 A)	20 (100 A)	25 (125 A)	30 (150 A)	35 (175 A)	40 (200 A)	50 (250 A)	60 (300 A)	70 (350 A)	90 (450 A)	100 (500 A)
6	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
10			■	■	■	■	■	■	■	■	■
15						■	■	■	■	■	■
20							■	■	■	■	■
25									■	■	■
30									■	■	■
35									■	■	■
40											■

■ Seletivo até o limite indicado para o disjuntor a montante ($5I_N$ do disjuntor a montante)

□ Não-seletivo

Apenas os disjuntores lentos possuem um tempo de disparo suficientemente retardado (de 60 a 100 minutos) em relação aos disjuntores rápidos e podem garantir a seletividade até mesmo para sobrecorrentes muitíssimo elevadas. Eles são dispositivos de porte maior, com correntes nominais na faixa de 600 a 1.000 A, indicados apenas para a proteção de linhas de grande seção *e/ou* para a proteção geral de uma instalação ou de um setor.

Os pequenos disjuntores limitadores de corrente, se instalados a jusante de disjuntores rápidos de maior porte, podem garantir, em geral, uma seletividade bastante razoável, uma vez que atuam antes que as correntes de curto-circuito atinjam valores elevados. No entanto, as reais condições de seletividade para sobrecorrentes de alto valor só podem ser avaliadas a partir da análise das características (curvas) dos dispositivos, fornecidas pelos fabricantes.

Por sua vez, os pequenos disjuntores rápidos só são seletivos para sobrecorrentes inferiores a cerca de dez vezes a corrente nominal do disjuntor instalado a montante.

De modo geral, pode-se dizer que, tratando-se de disjuntores termomagnéticos, existem grandes possibilidades de ter atuação seletiva se, a montante dos pequenos disjuntores de 25 a 32 A, forem instalados disjuntores de 80 a 100 A e, por sua vez, a montante desses, forem instalados dispositivos com correntes nominais (ou de ajuste) não inferiores a 250 A. Nessas condições, as correntes de curto-circuito de menor intensidade agirão sobre os disparadores eletromagnéticos dos disjuntores menores e sobre os disparadores térmicos dos maiores.

Do exposto, pode-se tirar uma *regra prática* para a subdivisão dos circuitos de uma instalação utilizando disjuntores: *a corrente de operação do disjuntor a montante deve ser, pelo menos, o triplo da corrente de operação do disjuntor a jusante.*

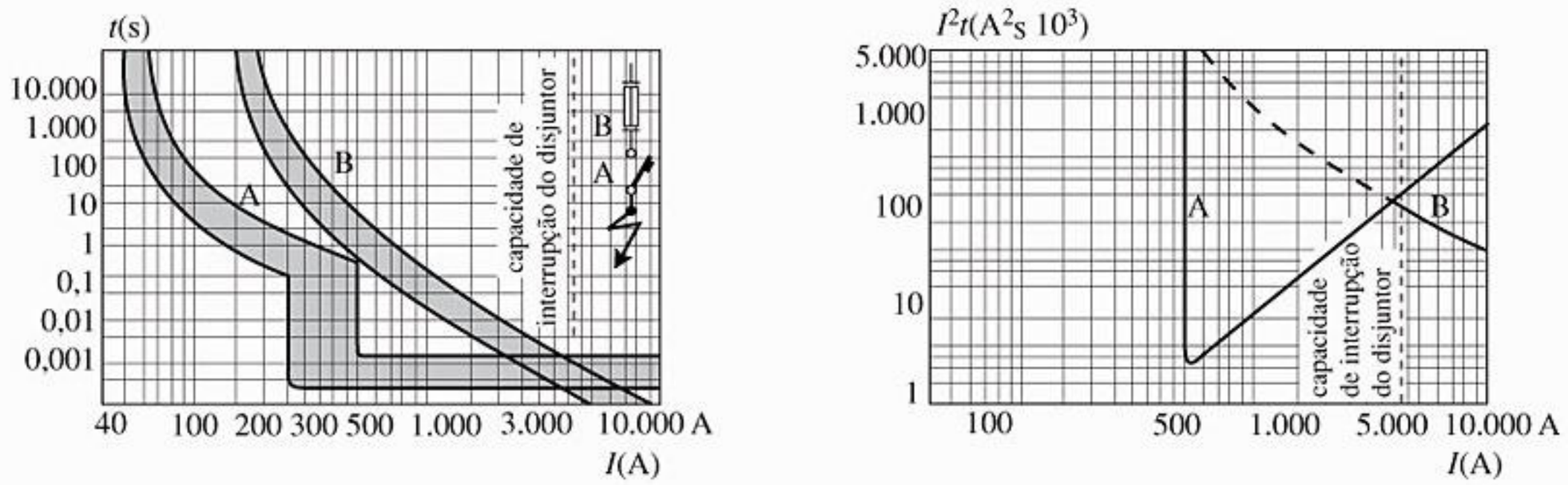


Figura 11.38 ■ Condições para a proteção de retaguarda com fusível a montante e disjuntor a jusante

Coordenação entre disjuntor e fusível

Um caso particular muito importante é o da coordenação entre disjuntor termomagnético (geralmente em caixa moldada) e fusível a montante, quando a capacidade de interrupção nominal do disjuntor é inferior à corrente de curto-circuito presumida no ponto de aplicação do disjuntor. Assim, caberá ao fusível a função de atuar no caso de sobrecorrentes superiores à capacidade de interrupção do disjuntor, deixando a esse último a tarefa de interromper todas as sobrecorrentes inferiores. Na prática, o disjuntor atuará na grande maioria dos casos e o fusível se constituirá apenas em um 'dispositivo de segurança' para garantir a integridade do disjuntor. É a chamada *proteção de retaguarda* (*backup*).

Esse tipo de coordenação deve satisfazer a duas condições, como está indicado na Figura 11.38:

- As características tempo-corrente dos dois dispositivos somente devem cruzar-se em uma região o mais próximo possível (mas não superior) à capacidade de interrupção do disjuntor, permanecendo, no restante, a característica do fusível acima do disjuntor.
- A integral de Joule de interrupção do fusível deve ser inferior à do disjuntor, após a capacidade de interrupção do disjuntor.

Geralmente, para dado tipo de disjuntor, a cada valor de corrente nominal existe uma faixa de valores de correntes nominais de determinado tipo de fusível, para os quais é garantida a proteção de retaguarda. Com valores inferiores ao mínimo, há o risco de atuação do fusível para sobrecorrentes de pequena intensidade; com valores superiores ao máximo, não haverá proteção de retaguarda até um sobrecorrente igual à capacidade de interrupção do fusível.

A Tabela 11.5 trata da proteção de retaguarda exercida por fusíveis gG sobre disjuntores termomagnéticos usuais.

Tabela 11.5 ■ Proteção de retaguarda — fusíveis gG e disjuntores termomagnéticos usuais

Disjuntor a jusante I_N (A) \ Fusível gG a montante I_N (A)		20	25	32	40	50	63	80	100
6	1P	■	■	■	■	■	■		
	2P	■	■	■	■	■	■		
	3P	■	■	■	■	■	■		
10	1P			■	■	■	■		
	2P			■	■	■	■		
	3P			■	■	■	■		
15	1P				■	■	■	■	
	2P				■	■	■	■	
	3P				■	■	■	■	
20	1P					■	■	■	
	2P					■	■	■	
	3P					■	■	■	■
25	1P						■	■	
	2P						■	■	
	3P						■	■	■
30	1P							■	
	2P							■	
	3P							■	■
35	1P							■	
	2P							■	
	3P							■	■

■ Protege □ Não protege

(continua)

(continuação)

Disjuntor a jusante I_N (A) \ Fusível gG a montante I_N (A)		20	25	32	40	50	63	80	100
40	1P								
	2P								
	3P								
50	1P								
	2P								
	3P								
60	1P								
	2P								
	3P								
70	1P								
	2P								
	3P								
90	1P								
	2P								
	3P								
100	1P								
	2P								
	3P								

Protege — Não protege

EXERCÍCIOS

1. Quais são os dois tipos possíveis de sobrecorrente?

2. Qual é a vida estimada de um condutor com cobertura de PVC para serviço contiínuo a 70 °C?

3. Quais são os limites de temperatura para correntes de curto-circuito em cabos de cobertura de PVC e cabos de cobertura de EPR e XLPE?

4. Quais são os limites de temperatura para correntes de sobrecarga em cabos de cobertura de PVC e cabos de cobertura de EPR e XLPE?

5. Em quais condições que um dispositivo de proteção ideal não deve intervir e em quais ele deve intervir?

6. Quais condições podem provocar *redução na capacidade de condução de corrente dos condutores* que definem o ponto da localização dos dispositivos de proteção contra correntes de sobrecarga?

7. Em que casos a NBR 5410 *permite omitir a proteção contra correntes de sobrecarga* desde que os circuitos não estejam situados em locais que apresentem riscos de incêndio (BE2) ou de explosão (BE3), ou que sejam sujeitos a prescrições particulares?

8. Em uma situação de curto-circuito em que são utilizados disjuntores como dispositivos de proteção, exige-se essencialmente que eles possuam quais características?

9. Das afirmações a seguir, indique quais são corretas, no caso de dois *fusíveis* colocados em série e considerados seletivos:

(a) As suas características (curvas) tempo-corrente não se interceptam e mantêm entre si um distanciamento (de tempo) adequado.

(b) É necessário que a integral de Joule de interrupção do fusível instalado a jusante seja inferior à integral de Joule de fusão do fusível instalado a montante.

(c) Entre dois fusíveis gG, é necessário que a corrente nominal do fusível a montante seja, no mínimo, igual a 1,6 vez a corrente nominal do fusível a jusante.

10. Quão superior deve ser o ajuste da corrente nominal do disparador térmico do disjuntor (I_{NA}) a jusante em relação ao do disjuntor imediatamente a montante (I_{NB})?

12

Proteções contra sobretensões

Por Eng. Jobson Modena

12.1 Aspectos gerais

As sobretensões que podem ocorrer em uma instalação elétrica de baixa tensão são classificadas, de acordo com sua origem, em:

- Sobretensões transitórias

As sobretensões transitórias são aquelas originadas principalmente das descargas atmosféricas e manobras.

As sobretensões provenientes das descargas atmosféricas, que incidem diretamente nas edificações, em redes aéreas de alimentação da instalação ou muito próximo a elas, produzem tensões conduzidas e induzidas com impulsos caracterizados por seu valor de crista, na prática, são as sobretensões que podem causar danos mais freqüentes às instalações, aos equipamentos por elas servidos e a seus usuários.

As sobretensões de manobra não dependem, em geral, da intensidade da corrente seccionada. Decorrem do seccionamento rápido (brusco) de corrente em um circuito de indutância elevada; é o caso, por exemplo, dos curtos-circuitos caracterizados por baixos fatores de potência. O valor da sobretensão é tanto maior quanto menor for o tempo real de seccionamento e pode chegar a quatro ou cinco vezes a tensão nominal para tempos inferiores a 1 ms, como os obtidos com disjuntores de abertura rápida ou pela atuação de dispositivos fusíveis.

- Sobretensões temporárias

Temos como exemplos de fontes de sobretensões temporárias a falha de isolamento para outra instalação de tensão mais elevada e a perda do condutor neutro em esquemas TN e TT.

As sobretensões causadas por falhas do isolamento em instalação de tensão mais elevada para outra têm lugar: quando ocorre uma falta para terra no lado da instalação de tensão mais elevada; quando um condutor do circuito nessa tensão acidentalmente entra em contato com outro do circuito de baixa tensão; ou, ainda, quando ocorre um defeito no transformador (contato entre enrolamentos de alta e de baixa tensão ou, o que é mais comum, contato entre enrolamento de alta tensão e carcaça). São consideradas sobretensões à freqüência industrial (60 Hz) e caracterizam-se por seu valor eficaz.

Para caracterizar o comportamento dos componentes da instalação diante das sobretensões, define-se um nível de isolamento que se baseia na suportabilidade às tensões em freqüência industrial e de impulso.

A suportabilidade à sobretensão em freqüência industrial durante um minuto, que está relacionada com o comportamento dos componentes contra sobretensões devidas a faltas entre instalações de tensões diferentes, é a tensão normalizada do ensaio de rigidez dielétrica a que são submetidos todos os componentes, de um modo geral.

A suportabilidade à sobretensão impulsiva está relacionada à coordenação de isolamento em baixa tensão. Essa coordenação tem como referência a IEC 60664-1, e os valores, apresentados em quatro categorias distintas, constam também da Tabela 31 da NBR 5410 (Tabela 12.1).

12.2 Sobretensões devidas às descargas atmosféricas (surtos de tensão)

No caso dos *surtos de tensão,* deve-se considerar, separadamente, a proteção das redes de distribuição em baixa tensão que alimentam edificações, as edificações propriamente ditas e suas instalações elétricas internas.

Tabela 12.1 ■ Suportabilidade a impulso exigível dos componentes da instalação (Tabela 31 da NBR 5410)

Tensão nominal da instalação V		Tensão de impulso suportável requerida kV			
		Categoria de produto			
Sistemas trifásicos	Sistemas monofásicos com neutro	Produto a ser utilizado na entrada da instalação	Produto a ser utilizado em circuitos de distribuição e circuitos terminais	Equipamentos de utilização	Produtos especialmente protegidos
		Categoria de suportabilidade a impulsos			
		IV	III	II	I
120/208 127/220	115-230 120-240 127-254	4	2,5	1,5	0,8
220/380 230/400 277/480	–	6	4	2,5	1,5
400/690	–	8	6	4	2,5

Nota:
Para componentes associados a linhas de sinal utilizados na entrada da instalação (categoria IV de suportabilidade), a tensão de impulso suportável mínima é de 1500 V (ver IEC 61663-2).

Para as redes subterrâneas, em região onde o índice ceráunico seja menor que 25, a NBR 5410 dispensa a utilização de proteção. Para as redes aéreas, situadas em região com índice ceráunico maior que 25, e para locais onde haja incidência direta de raios na instalação ou muito próximo a ela, a proteção deve ser realizada.

Basicamente, a necessidade da proteção contra surtos deve prever as seguintes situações:

- Surtos induzidos ou indiretos

Quando as descargas atmosféricas atingem as linhas de transmissão e distribuição de energia e incidem diretamente em árvores, estruturas ou no solo, as ondas eletromagnéticas originadas pela corrente elétrica que circula no canal da descarga atmosférica se propagam pelo meio (geralmente o ar), induzindo corrente elétrica nos condutores metálicos que estiverem em seu raio de alcance. Estima-se essa distância da ordem de 1 a 3 km.

Manobras na rede elétrica de energia, como chaveamento para abertura ou fechamento de circuitos elétricos de transmissão e distribuição, também geram impulsos de tensão na rede elétrica. Esses impulsos são chamados 'surto de manobra' e, do ponto de vista da proteção, seus efeitos devem ser tratados e, portanto, atenuados, da mesma forma que os efeitos indiretos causados pelos raios.

- Surtos conduzidos ou diretos

Quando uma descarga atmosférica incide diretamente sobre um componente da instalação, sobre a edificação ou sobre pontos muito próximos a eles, todos os elementos metálicos ali existentes e o eletrodo de aterramento ficam, por frações de segundo, submetidos a níveis diferentes de tensão. Essas diferenças de tensão vão gerar correntes de surto que circularão por diversos pontos da estrutura, inclusive, e, no nosso caso, principalmente pela instalação elétrica.

Podem ocorrer, ainda, diferenças de tensão entre eletrodos de aterramento de estruturas diferentes; por exemplo, o eletrodo do prédio e o(s) eletrodo(s) de aterramento do(s) serviço(s) público(s) (concessionárias de energia, TV a cabo, telefonia etc.). Quando chega à terra, por incidência direta ou através de condutores aterrados, a corrente elétrica das descargas atmosféricas flui pelo solo. Ao encontrar resistência (oposição) à sua passagem, dá origem a linhas de tensão assimétricas e com intensidades diferentes. Essas linhas têm ponto de origem no local de incidência da corrente na terra e podem manter valor significativo, embora decrescente, a distâncias que variam conforme as influências do solo e outros elementos enterrados. As diferenças de tensão no solo podem gerar correntes circulantes indesejáveis em muitos componentes que tenham suas partes condutoras de

eletricidade integradas a duas ou mais dessas linhas com tensões diferentes.

Se uma instalação elétrica de energia e de sinal (dados, voz, vídeo etc.) possui vários eletrodos de aterramento diferentes e independentes, haverá circulação dessas correntes indesejáveis entre os equipamentos servidos pela instalação, o que pode causar danos significativos ou até definitivos a eles. Assim, não é concebível a existência de eletrodos de aterramento distintos para servir componentes diferentes de uma instalação na mesma edificação.

Proteção contra surtos

Conceitos preestabelecidos de que somente a instalação de pára-raios de linha ou de dispositivo de proteção contra surto (DPS) seria medida suficiente para a proteção contra surtos de tensão induzem a utilização indevida desses componentes e fazem com que a proteção resulte inócua.

As condições mínimas para proteção da instalação elétrica, segundo a NBR 5410 e a NBR 5419, são a existência de um eletrodo de aterramento eficiente, a garantia das ligações equipotenciais locais de uma menor diferença de tensões entre os componentes envolvidos — aqui incluída a instalação de pára-raios de linha e de DPS do tipo comutador de tensão —, bem como a diminuição das tensões induzidas que adentram a instalação, realizadas por meio de DPS do tipo atenuador de tensão.

Nessa linha de pensamento, os parâmetros considerados ao se iniciar a verificação das condições das instalações elétricas para determinação da necessidade de proteção contra surtos, bem como os resultados do roteiro mostrado a seguir, deverão fornecer as condições necessárias para que o projetista defina se a proteção a ser instalada será contra surtos conduzidos ou induzidos.

Devem ser considerados:

- A probabilidade de danos a essas instalações, causados por impacto direto de descargas atmosféricas (raios).
- O índice ceráunico da região (T_d) e a forma como os condutores alimentadores, de energia e de sinal, adentram na edificação.

Com a ajuda do mapa isoceráunico, como o mostrado na Figura 12.1, que mostra o número médio de dias com ocorrência de trovoadas em uma região por ano, apresentado na NBR 5419, há como obter dados iniciais para essa análise.

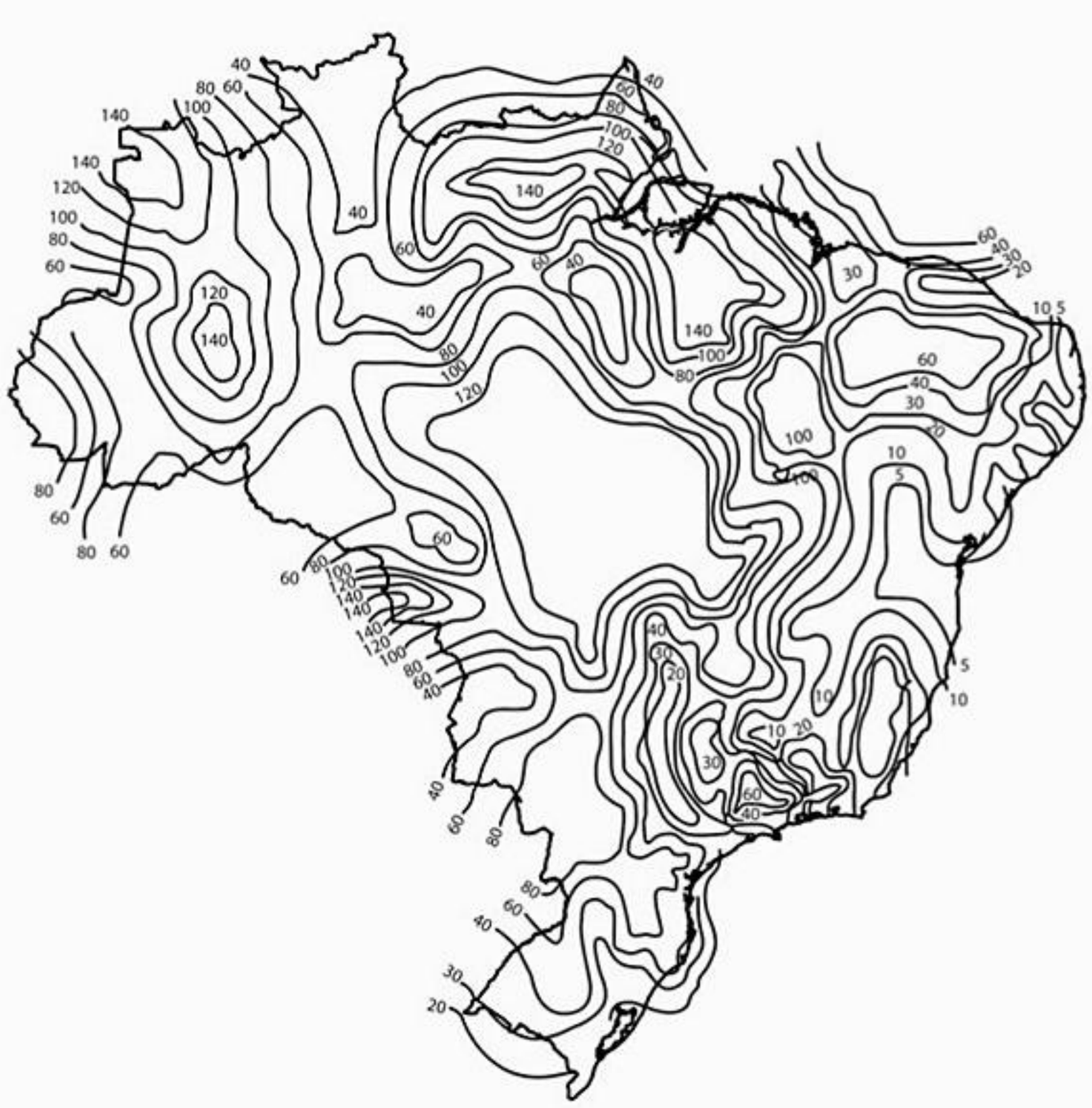


Figura 12.1 ■ Mapa isoceráunico do Brasil (fonte: NBR 5419:2005)

Parâmetros da edificação

C = comprimento
L = largura
A = altura

Densidade anual de descargas atmosféricas para a terra (N_g)

$$N_g = 0{,}04 \times T_d^{1{,}25} \qquad (12.1)$$

Sendo:

N_g o número de descargas atmosféricas por km² por ano na região.

Área de exposição da estrutura (A_e)

$$A_e = CL + 2CA + 2LA + \pi A^2 \ (\text{m}^2) \qquad (12.2)$$

Freqüência média anual previsível de descargas atmosféricas sobre a estrutura (N_d)

$$N_d = N_g \times A_e \times 10^{-6} \qquad (12.3)$$

À freqüência média anual previsível de descargas atmosféricas sobre a estrutura (N_d) são aplicadas os valores das Tabelas B.1 a B.5 da NBR 5419 (Tabelas 12.2, 12.3, 12.4, 12.5, e 12.6), apresentadas a seguir, e obtém-se a avaliação geral de risco (N_{dc}):

Freqüência admissível de danos (Ndc)

$$N_{dc} = N_d \times A \times B \times C \times D \times E \qquad (12.4)$$

- $N_{dc} \geq 10^{-3}$ (um dano a cada mil anos): freqüência de danos, causados por impacto direto na edificação, considerada inaceitável pela NBR 5419.
  Com isso, entende-se que, probabilisticamente, haverá dano na edificação ou estrutura por incidência direta de descarga atmosférica a cada, pelo menos, mil anos. A NBR 5419 determina a instalação do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) no local estudado.

Embora a correlação 'necessidade da existência de SPDA × condição para proteção da instalação contra surtos conduzidos' seja considerada tecnicamente viável, é importante desenvolver o cálculo da análise de risco toda vez que se estudar a necessidade da aplicação de DPS na instalação elétrica, independentemente do projeto do SPDA, principalmente se o estudo para determinar a necessidade da proteção contra surtos conduzidos for desenvolvido em época diferente da instalação do SPDA. Se as condições de influências externas ou a situação da

Tabela 12.2 ■ Fator A: Tipo de ocupação da estrutura (Tabela B.1 da NBR 5419)

Tipo de ocupação	Fator A
Casas e outras estruturas de porte equivalente	0,3
Casas e outras estruturas de porte equivalente com antena externa	0,7
Fábricas, oficinas e laboratórios	1,0
Edifícios de escritórios, hotéis e apartamentos e outros edifícios residenciais não incluídos a seguir	1,2
Locais de afluência de público (por exemplo: igrejas, pavilhões, teatros, museus, exposição, lojas de departamento, correios, estações e aeroportos, estádios de esportes)	1,3
Escolas, hospitais, creches e outras instituições, estruturas de múltiplas atividades	1,7

Tabela 12.3 ■ Fator B: Tipo de construção da estrutura (Tabela B.2 da NBR 5419)

Tipo de construção	Fator B
Estrutura de aço revestida, com cobertura não-metálica[1]	0,2
Estrutura de concreto armado, com cobertura não-metálica	0,4
Estrutura de aço revestida, ou de concreto armado, com cobertura metálica	0,8
Estrutura de alvenaria ou concreto simples, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha	1,0
Estrutura de madeira, ou revestida de madeira, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha	1,4
Estrutura de madeira, alvenaria ou concreto simples, com cobertura metálica	1,7
Qualquer estrutura com teto de palha	2,0

1. Estruturas de metal aparente que sejam contínuas até o nível do solo estão excluídas desta tabela, porque requerem apenas um subsistema de aterramento.

Tabela 12.4 ■ Fator C: Conteúdo de estrutura (Tabela B.3 da NBR 5419)

Conteúdo da estrutura ou efeitos indiretos	Fator C
Residências comuns, edifícios de escritórios, fábricas e oficinas que não contenham objetos de valor ou particularmente suscetíveis a danos	0,3
Estruturas industriais e agrícolas contendo objetos particularmente suscetíveis a danos[1]	0,8
Subestação de energia elétrica, usinas de gás, centrais telefônicas, estações de rádio	1,0
Indústrias estratégicas, monumentos antigos e prédios históricos, museus, galerias de arte e outras estruturas com objetos de valor especial	1,3
Escolas, hospitais, creches e outras instituições, locais de afluência de público	1,7
Nota: 1. Instalação de alto valor ou materiais vulneráveis a incêndios e às suas conseqüências.	

Tabela 12.5 ■ Fator D: Localização da estrutura (Tabela B.4 da NBR 5419)

Localização	Fator D
Estrutura localizada em uma grande área contendo estruturas ou árvores da mesma altura ou mais altas (por exemplo: em grandes cidades ou em floresta)	0,4
Estrutura localizada em uma área contendo poucas estruturas ou árvores de altura similar	1,0
Estrutura complementar isolada ou que ultrapassa no mínimo duas vezes a altura de estrutura ou árvores próximas	2,0
Indústrias estratégicas, monumentos antigos e prédios históricos, museus, galerias de arte e outras estruturas com objetos de valor especial	1,3

Tabela 12.6 ■ Fator E: Topografia da região (Tabela B.5 da NBR 5419)

Topografia	Fator E
Planície	0,3
Elevações moderadas, colinas	0,1
Montanhas entre 300 m e 900 m	1,3
Montanhas acima de 900 m	1,7

edificação tiverem-se alterado favoravelmente, estaremos superdimensionando a proteção contra surtos. Por exemplo: construção de edificações mais altas, que melhoram as condições de proteção da edificação no local; reformas na própria edificação; algum outro fator que tornou aquele SPDA desnecessário, embora ele não tenha sido desinstalado.

- $N_{dc} \leq 10^{-5}$ (um dano a cada 100 mil anos): freqüência de danos considerada aceitável pela NBR 5419. Com isso, entende-se que, probabilisticamente, somente haverá uma incidência direta de raio a cada 100 mil anos na edificação. Nessas condições, deve-se verificar o índice ceráunico da região ($T_d > 25$) e a configuração da instalação da rede (aérea), para, assim, determinar a necessidade da instalação da proteção para surtos induzidos.

O intervalo compreendido por $10^{-5} \leq N_{dc} < 10^{-3}$ é mencionado na NBR 5419 como sendo motivo de estudo individualizado (caso a caso) em função da ocupação, utilização, construção e localização da edificação, da instalação e seus componentes. Portanto, a necessidade e o tipo de proteção contra surtos dependerão de decisão simultânea tomada quanto à instalação ou não do SPDA no local.

Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS)

Segundo a NBR IEC 61643-1, o DPS é um dispositivo destinado a limitar as sobretensões transitórias (chamado atenuador de tensão ou supressor de surto) ou a desviar correntes de surto (chamado comutador de tensão ou curto-circuitante).

Para uma correta análise e comparação de produtos por parte do projetista, os fabricantes devem fornecer as seguintes informações dos DPS:

- Nome do fabricante ou marca comercial e modelo.
- Método de montagem ou modo de proteção, preferencialmente acompanhado de croqui orientativo de posicionamento na instalação.
- Tensão máxima de operação contínua U_C, que é a tensão nominal do DPS (um valor para cada modo de proteção), e freqüência nominal.
- Classificação de ensaio (classe I, II ou III) e parâmetros de descarga.
- Corrente máxima $I_{MÁX}$ (kA), parâmetro da onda em que o DPS foi ensaiado.
- Corrente de impulso I_{IMP} (kA) e carga Q (A.s), para o DPS classe I (valor para cada modo de proteção).
- Corrente de descarga nominal I_N (kA) para o DPS classe II (valor para cada modo de proteção).
- Nível de proteção de tensão U_P (valor para cada modo de proteção).
- Suportabilidade a sobretensões temporárias.
- Suportabilidade a correntes de curto-circuito no ponto de instalação.

Parâmetros mínimos que devem constar dos dados de placa do DPS, bem como das especificações de projeto:

- DPS Classe I: U_C, U_P, $I_{MÁX}$, I_{IMP}, Q e curva 'T_1/T_2' de ensaio;
- DPS Classe II: U_C, U_P, $I_{MÁX}$, I_N e curva 'T_1/T_2' de ensaio;
- DPS Classe III: U_C, U_P, U_{OC}, $I_{MÁX}$, I_N.

Tipos de DPS

- DPS comutador de tensão ou curto-circuitante
  Dispositivo que tem a propriedade de mudar bruscamente o valor de sua impedância, de muito alto para praticamente desprezível, em função do aparecimento de um impulso de tensão em seus terminais.
- DPS atenuador de tensão ou supressor de surto
  Dispositivo que tem a propriedade de mudar paulatinamente o valor de sua impedância, de muito alto para praticamente desprezível, quando aparece um impulso de tensão em seus terminais.
- DPS combinado
  Incorpora no mesmo dispositivo as propriedades dos DPSs comutadores e dos atenuadores de tensão.

Características dos DPSs

- Nível de proteção de tensão do DPS (U_P): valor que é caracterizado pela limitação de tensão do DPS entre seus terminais.
- Tensão residual do DPS (U_{RES}): valor do pico da tensão entre os terminais do DPS devido à passagem da corrente de descarga gerada pela atuação do DPS.
- Tensão de operação contínua do DPS (U_C): máxima tensão que pode ser aplicada continuadamente ao modo de proteção do DPS sem comprometer seu funcionamento. É a tensão nominal do DPS.
- Modo de proteção do DPS: cada possibilidade de ligação de um DPS na instalação (entre: fase / fase, fase / neutro, fase / terra, neutro / terra e outras combinações).
- Corrente máxima do DPS ($I_{MÁX}$): valor de crista de um impulso utilizado na forma de onda tempo × corrente para ensaio do DPS.
- Corrente nominal do DPS (I_N): fração do valor de crista de um impulso cuja forma de onda tempo × corrente representa o mais fielmente possível o impulso gerado pelos surtos induzidos. É utilizada para ensaio e classificação de DPS classe II. A NBR IEC 61643-1 utiliza o parâmetro I_N também para determinar a vida útil do DPS. Ele deve suportar, pelo menos, 15 a 20 surtos com o valor de I_N.
- Corrente de impulso do DPS (I_{IMP}): fração do valor de crista ($I_{MÁX}$) de um impulso cuja forma de onda tempo × corrente representa o mais fielmente possível o primeiro golpe de uma descarga atmosférica. Esta é utilizada para ensaio e classificação de DPS classe I. Outro parâmetro importante a ser considerado na classificação deste DPS é a carga (Q), em Ampére por segundo; dessa forma, pode-se conhecer a energia que o DPS suportará ao dissipar a corrente impulsiva.

Classificação dos DPS

Segundo a NBR IEC 61643-1, um DPS é classificado conforme as especificações de construção do fabricante e, principalmente, a função dos parâmetros de ensaio a que é submetido:

- Classe I
  DPS ensaiado em condições de corrente que melhor simule o primeiro golpe da descarga atmosférica, I_{IMP} (kA) sob carga Q (A.s) (surtos conduzidos). A literatura internacional adota como onda que melhor simula o impulso para este tipo de ensaio aquela que tem tempo de frente (T_1) de 10 µs ao atingir 90% da corrente máxima do ensaio e tempo de cauda (T_2) de 350 µs para atingir 50% da mesma corrente. Daí, curva 10/350.
- Classe II
  DPS ensaiado em condições de correntes que melhor simulem os golpes subseqüentes das descargas atmosféricas e as condições de influências indiretas nas instalações, I_N (surtos induzidos). Têm tempo de frente de 8 µs e de cauda de 20 µs. Daí, curva 8/20.

- Classe III
  Por ser um dispositivo atenuador de ajuste de tensão, utilizado em níveis internos de proteção, este DPS é ensaiado com forma de onda combinada, isto é, com um 'gerador combo', circuito aberto. Aplica-se no DPS um impulso de tensão (U_{OC}) de 1,2/50 µs e um impulso de corrente (I_N) de 8/20 µs em curto-circuito. Dessa relação de valores aplicados (V, I), obtém-se um resultado conhecido como impedância fictícia (Z_f), que não pode ultrapassar 2 Ω.

Definidas as classificações dos DPSs, conhecendo sua forma de operação e aplicação, há como desenvolver as seguintes associações de conceitos:

- Riscos de danos provenientes dos efeitos indiretos gerados pelas descargas atmosféricas nas linhas de alimentação que adentrem a edificação "surtos induzidos" DPS Classe II instalado no primeiro nível de proteção.

A proteção contra riscos indiretos deve ser feita, basicamente, com DPS de característica de *atenuador de tensão* (supressores de surto) ou *combinado*. Vale lembrar que esse tipo de proteção também é eficaz para os efeitos dos surtos de tensão causados por manobras na rede.

- Riscos de danos provenientes do impacto direto das descargas atmosféricas no SPDA, em outros componentes da instalação ou muito próximo a ela "surtos conduzidos" DPS Classe I instalado no primeiro nível de proteção.

A proteção contra riscos diretos deve ser feita, basicamente, com DPS com característica de *comutador de tensão* (descarregador de corrente) ou *combinado*, minimizando o surto por meio do escoamento de uma parcela da corrente impulsiva diretamente para a terra *e/ou* para os condutores de alimentação da instalação (concessionárias e redes de serviços públicos), dependendo do esquema de aterramento no local.

Seleção dos DPS

A correta seleção de um DPS depende da definição dos seguintes parâmetros:

- Tensão de operação contínua do DPS (U_C). A determinação do valor de U_C depende do conhecimento do modo de proteção e do esquema de aterramento da instalação, para aplicá-los de forma direta à Tabela 12.7.

EXEMPLO

- Tensão da instalação: 220 / 380 V.
- Esquema de aterramento empregado: TN-C.
- Modo de instalação do DPS: Entre os condutores de Fase e PEN.

$$U_C = 1{,}1 \times 220 = 242\ (\text{V}) \qquad (12.5)$$

A especificação do DPS deve ser no valor comercialmente disponível de U_C imediatamente superior ao calculado. Para esse caso, 250 ou 255 V são opções tecnicamente viáveis.

Corrente de impulso (I_{IMP}) para DPS classe I e nominal (I_N) para DPS classes II

A NBR 5410 fornece parâmetros mínimos para a especificação do conjunto de DPS no primeiro nível de proteção da instalação e determina um estudo de necessidade de proteção nos demais níveis, baseado nos valores de suportabilidade a tensões impulsivas.

Entretanto, os dados que constam da IEC 62305-4 fornecem os valores das correntes de primeiro raio para as condições de correntes de impulso conduzidas, em função do nível de proteção atribuído ao SPDA a ser instalado no local. Esses valores permitem dimensionar com maior precisão a corrente I_{IMP} para o DPS classe I.

Tabela 12.7 ■ Valor mínimo de U_c exigível do DPS, em função do esquema de aterramento (Tabela 49 da NBR 5410)

DPS conectado entre (modo de instalação)				Esquema de aterramento				
Fase	Neutro	PE	PEN	TT	TN-C	TN-S	IT com neutro distribuído	IT sem neutro distribuído
X	X			1,1 Uo		1,1 Uo	1,1 Uo	
X		X		1,1 Uo		1,1 Uo	$\sqrt{3}$ Uo	U
X			X		1,1 Uo			
	X	X		Uo		Uo	Uo	

Notas:
1. Ausência de indicação significa que a conexão considerada não se aplica ao esquema de aterramento.
2. Uo é a tensão fase – neutro.
3. U é a tensão entre fases.
4. Os valores adequados de U_c podem ser significativamente superiores aos valores mínimos da tabela.

Tabela 12.8 ■ Exemplos de classificação de estruturas (Tabela B.6 da NBR 5419)

Classificação da estrutura	Tipo da estrutura	Efeitos das descargas atmosféricas	Nível de proteção
Estruturas comuns[1]	Residências	Perfuração da isolação de instalações elétricas, incêndio e danos materiais. Danos normalmente limitados a objetos no ponto de impacto ou no caminho do raio.	III
	Fazendas e estabelecimentos agropecuários	Risco direto de incêndio e tensões de passo perigosas. Risco indireto devido à interrupção de energia e risco de vida para animais devido à perda de controles eletrônicos, ventilação, suprimento de alimentação e outros.	III ou IV[2]
	Teatros, escolas, lojas de departamentos, áreas esportivas e igrejas	Danos às instalações elétricas (p. ex.: iluminação) e possibilidade de pânico. Falha do sistema de alarme contra incêndio, causando atraso no socorro .	II
	Bancos, companhias comerciais e outros	Como acima, além de efeitos indiretos com a perda de comunicações, falhas dos computadores e perda de dados.	II
	Hospitais, casas de repouso e prisões	Como para escolas, além de efeitos indiretos para pessoas em tratamento intensivo e dificuldade de resgate de pessoas imobilizadas.	II
	Indústrias	Efeitos indiretos conforme o conteúdo das estruturas, variando de danos pequenos a prejuízos inaceitáveis e perda de produção.	III
	Museus, locais arqueológicos	Perda de patrimônio cultural insubstituível.	II
Estruturas com risco confinado	Estações de telecomunicação, usinas elétricas, indústrias	Interrupção inaceitável de serviços públicos por período breve ou longo. Risco indireto para as imediações devido a incêndios, outros com risco de incêndio.	I
Estruturas com risco para os arredores	Refinarias, postos de combustível, fábricas de fogos, fábricas de munição	Risco de incêndio e explosão para a instalação e seus arredores.	I
Estruturas com risco para o meio ambiente	Indústrias químicas, usinas nucleares, laboratórios bioquímicos	Risco de incêndio de falhas de operação, com conseqüências perigosas para o local e para o meio ambiente.	I

Notas:

1. Equipamentos de tecnologia da informação (ETI) podem ser instalados em todos os tipos de estruturas, inclusive estruturas comuns. É impraticável a proteção total contra danos causados pelos raios dentro dessas estruturas; não obstante, devem ser tomadas medidas (conforme a ABNT NBR 5410) de modo a limitar os prejuízos a níveis aceitáveis.
2. Estruturas de madeira: nível III; estruturas nível IV. Estruturas contendo produtos agrícolas potencialmente combustíveis (pós de grãos) sujeitos a exploração são considerados com risco para arredores.

Tabela 12.9 ■ Parâmetros para a corrente de simulação da primeira descarga atmosférica

Parâmetros de corrente		Nível de proteção para o SPDA		
		I	II	III e IV
Corrente de pico	(kA)	200	150	100
Tempo de frente (T_1)	(μs)	10	10	10
Tempo de 50% da cauda (T_2)	(μs)	350	350	350
Carga para condições de primeiro raio (Q_s)[1]	(C)	100	75	50
Energia específica (W/R)[2]	(MJ/Ω)	10	5,6	2,5

Notas:
1. Desde que parte substancial da carga total (Q_s) estiver contida no primeiro raio.
2. Desde que parte substancial da energia específica (W/R) estiver contida no primeiro raio.

A NBR 5419 define os níveis de proteção, considerando: estrutura, utilização, localização, topologia e outros (Tabela 12.8).

Para os casos de dano provocados por impacto direto na instalação, devem ser considerados os seguintes parâmetros:

- Nível I: 200 kA (10/350) μs
- Nível II: 150 kA (10/350) μs
- Níveis III e IV: 100 kA (10/350) μs

A IEC 62305-4 convenciona que a corrente elétrica da descarga atmosférica se divide ao longo do SPDA, sendo que, ao chegar ao solo, metade dessa corrente se dispersa nele e a outra metade retorna para a instalação, em função da diferença de tensão que aparece entre os aterramentos da edificação e da fonte de alimentação.

Conforme explicado no parágrafo anterior, é fácil notar que, somente com o SPDA instalado, os níveis de corrente e a tensão dos surtos que circulam na instalação elétrica desprovida de DPS aumentam descontroladamente no momento da ocorrência da descarga atmosférica, fator que eleva a probabilidade da ocorrência de danos à instalação. Então, pode-se concluir que: *SPDA não protege a instalação elétrica, tampouco seus componentes, dos danos causados por surtos de tensão.*

Retomando o dimensionamento de I_{IMP}, o SPDA, embora passando a maior parte de sua 'vida' sem conduzir corrente elétrica, deve, por definição, estar eletricamente vinculado à instalação elétrica através do barramento de eqüipotencialização principal (BEP), tornando-se parte integrante dessa instalação. Assim, ao se calcular a proteção local contra impacto direto de descargas atmosféricas, pode-se estimar o valor da corrente atribuído ao primeiro nível de proteção para aquela edificação e dividir esse número pela quantidade de condutores metálicos que a adentram.

EXEMPLO

Para a edificação de uma indústria que esteja em situação de risco confinado (nível I de proteção) e seja alimentada por uma rede trifásica com esquema de aterramento TN-C:

- Corrente da descarga atmosférica:

$$I = 200\,\text{kA}, (10/350)\,\mu\text{s}$$

- Corrente do surto conduzido ao interior da instalação:

$$I_{\text{SURTO}} = I/2 = 100\,\text{kA}, (10/350)\,\mu\text{s (na instalação)}$$

- Número de condutores metálicos, externos, que adentram na edificação:

$$N = 4\ (3\ \text{fases} + \text{PEN})$$

- Corrente de surto imposta a cada condutor:

$$I_{\text{SURTO COND}} = I_{\text{SURTO}}/N = 100/4 = 25\,\text{kA}$$

A corrente I_{IMP} especificada para o DPS deve ter valor comercialmente encontrado imediatamente superior a $I_{\text{SURTO COND}}$.

A NBR 5410 estabelece limites mínimos de corrente para cada situação:

- I_{IMP}= 12,5 kA, por modo de proteção.
- I_{IMP} = 25 kA para DPS de neutro em ligações monofásicas. Tanto para I_{IMP} quanto para I_N, o DPS de neutro é assim denominado por ter características de suportabilidade diferentes dos DPS utilizados em outros modos de ligação.
- I_{IMP} = 50 kA para DPS de neutro em ligações trifásicas.

Se o estudo visa à proteção contra surtos induzidos e seu foco é minimizar surtos já atenuados pela impedância das linhas ou por DPS classe I instalado a montante, os valores de I_N podem ser calculados pelo método do nível de exposição a sobretensões indiretas, provenientes das descargas atmosféricas.

$$F = T_d\,(1{,}6 + 2L_{BT} + \delta) \qquad (12.6)$$

Quadro 12.1 ■ Posicionamento, situação e topologia da linha aérea e da edificação

$\delta = 0$ – Para linha aérea e edificação completamente envolvidas por outras estruturas
$\delta = 0{,}5$ – Para linha aérea e edificação com algumas estruturas próximas ou em situação desconhecida
$\delta = 0{,}75$ – Para linha aérea e edificação em terreno plano ou descampado
$\delta = 1$ – Para linha aérea e edificação sobre morro, em presença de água superficial e área mosa

Sendo:

- F: Nível de exposição a surtos provenientes das descargas atmosféricas
- T_d: Índice ceráunico
- L_{BT}: Comprimento, em km, da linha aérea de alimentação da instalação
- δ: Posicionamento, situação e topologia da linha aérea e da edificação (ver Quadro 12.1).

Comparando o resultado obtido com os padrões estabelecidos a seguir, tem-se uma referência para o valor I_N:

$$F \leq 40 \rightarrow I_N = 5\,\text{kA}$$

$$40 < F \leq 80 \rightarrow I_N = 10\,\text{kA}$$

$$F > 70 \rightarrow I_N = 20\,\text{kA}$$

As correntes nominais mínimas normalizadas são:

- $I_N = 5$ kA, por modo de proteção.
- $I_N = 10$ kA para DPS de neutro em ligações monofásicas.
- $I_N = 20$ kA para DPS de neutro em ligações trifásicas.

É importante ressaltar que, no caso de instalar DPS classe II no primeiro nível de proteção da instalação, é prudente que I_N tenha valores maiores do que aqueles que constam da NBR 5410. Essa afirmação tem o objetivo de garantir a efetiva coordenação e a proteção do conjunto (DPS Instalação), pois a vida útil do DPS classe II, construído com componente(s) semicondutor(es), tipicamente varistor(es), está diretamente ligada a I_N. Então, quanto maior I_N, maior será a vida útil provável do DPS.

Outro fator de grande importância é a relação custo × benefício: a diferença de valor entre um DPS com corrente nominal $I_N = 10$ kA e outro com $I_N = 20$ kA é muito pequena, se considerarmos as mesmas condições de exposição e atuação. Então, os parâmetros determinantes nessa comparação serão o valor da mão-de-obra para instalação do DPS, o provável tempo de parada para troca dos dispositivos e o número de trocas.

Coordenação de proteção

Determinação do nível de proteção de tensão (U_P)

Um trecho da Tabela 12.1, particularizado na Tabela 12.10, permite exemplificar como definir o valor U_P para um DPS e, ainda, entender o conceito do estabelecimento dos níveis de proteção.

Ao se considerar que cada segmento contido em uma instalação elétrica deve ter sua característica de suportabilidade a impulso previamente definida, pode-se estabelecer que o nível de proteção está localizado no ponto em que há alteração dessa categoria. No caso da rede externa, quando para proteção de surtos conduzidos, o primeiro nível de proteção está localizado exatamente no ponto onde os condutores adentram a edificação, o segundo nível de proteção está localizado onde se inicia a distribuição dos circuitos — geralmente, o quadro de distribuição principal (QDP) —, o terceiro nível está junto de outros quadros secundários (QDS), e assim sucessivamente. Se a proteção visar a mitigar os surtos induzidos, o primeiro nível de proteção estará situado diretamente no QDP, o segundo nível no QDS etc.

Em geral, não há linearidade espacial na determinação dos níveis de proteção. Uma edificação terá tantos primeiros níveis de proteção quantos locais em que conjuntos de condutores metálicos a adentrarem, bem como poderá ter mais de um determinado nível de proteção

Tabela 12.10 ■ Caso particular da Tabela 12.1 quanto à suportabilidade a surtos

Tensão nominal da instalação (V)	Tensão de impulso suportável requerida kV			
	Categoria de produto			
Sistemas trifásicos	Produto a ser utilizado na entrada da instalação	Produto a ser utilizado em circuitos de distribuição e circuitos terminais	Equipamentos de utilização	Produtos especialmente protegidos
	Categoria de suportabilidade a impulsos			
	IV	III	II	I
220/380	6	4	2,5	1,5

(segundo, terceiro, etc.) repetido, dependendo da localização dos circuitos, componentes e equipamentos a serem protegidos.

Como o nível de proteção deve obedecer às tensões impulsivas normalizadas, e a característica de U_p em um DPS é determinada pela tensão que aparecerá em seus terminais a jusante do ponto onde este estiver instalado, deduz-se que o DPS deve ter U_p igual à categoria de suportabilidade a impulso subseqüente ao seu ponto de instalação (ver Figura 12.2).

A NBR 5410 determina que, quando for instalado um único conjunto de DPS, no primeiro nível de proteção da instalação, este deve possuir U_p compatível com a categoria II para qualquer tensão ou sistema de distribuição.

Os conceitos de nível de proteção da instalação e classe do DPS não devem estar diretamente atrelados, por exemplo:

- O DPS classe I sempre deve ser instalado no primeiro nível de proteção da instalação, quando o objetivo for o da proteção contra surtos conduzidos.
- O DPS classe II também pode ser instalado no primeiro nível de proteção da instalação, quando o objetivo for o da proteção contra surtos induzidos, ou no segundo e demais níveis de proteção da instalação, quando o objetivo for proteger contra surtos conduzidos e houver um DPS classe I já instalado no primeiro nível de proteção.
- O DPS classe III funciona como 'atenuador local' que praticamente restabelece as condições normais de tensão. Comparado como um 'ajuste fino' na proteção, está sempre instalado nos últimos níveis de proteção, ou seja, exatamente antes do equipamento, algumas vezes embutido nele.

Para a coordenação por tempo, considera-se que cada DPS tem um tempo de resposta (atuação) em função dos componentes que foram utilizados em sua construção. Geralmente, adota-se a seguinte correlação: DPSs com maior capacidade de dissipação de energia levam mais tempo para 'sentir' o surto. Essa característica exige que o projetista coordene adequadamente os dispositivos na instalação, para que o DPS mais robusto sempre atue primeiro.

Para que haja coordenação efetiva, os fabricantes adotam distâncias mínimas de condutores entre os níveis de proteção. Quando não existe essa distância mínima recomendada, há necessidade da inserção no circuito de um elemento que 'atrase' o surto, geralmente indutores ou termistores, a fim de fazer com que o DPS instalado no primeiro nível de proteção 'sinta' o surto e atue antes do DPS instalado no segundo nível de proteção, e assim sucessivamente.

Posicionamento dos DPS no primeiro nível de proteção da instalação

Seguindo a classificação das influências externas e análise de riscos, a NBR 5410 divide em duas as possibilidades de instalação do conjunto de DPS no primeiro nível de proteção:

- Proteção contra surtos induzidos na linha externa de alimentação ou contra surtos causados por manobra. Os DPSs devem ser instalados junto do ponto de entrada da linha na edificação ou no QDP, localizado o mais próximo possível do ponto de entrada. Simplificando: para a proteção contra surtos conduzidos, é correto instalar os DPSs sempre no QDP.

Categoria de suportabilidade a impulsos			
IV	**III**	**II**	**I**
6	**4**	**2,5**	**2,5**

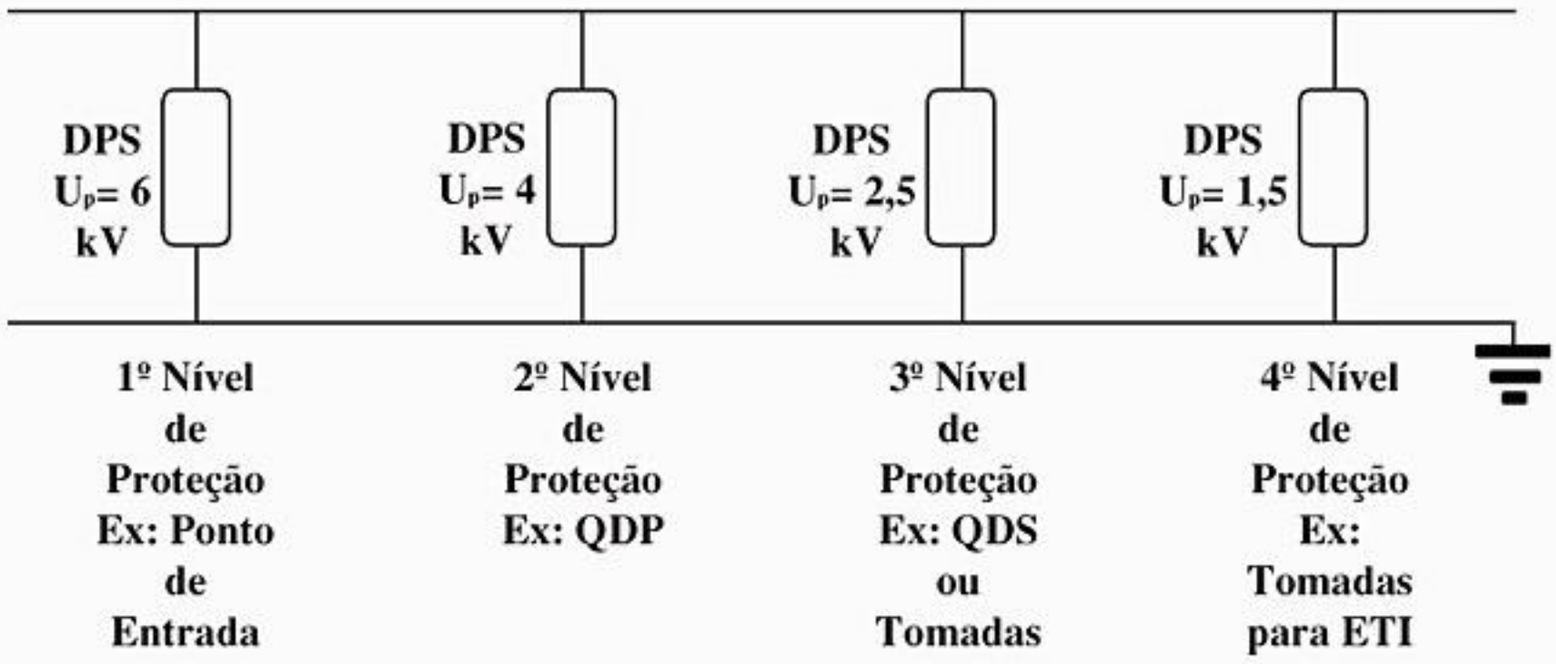


Figura 12.2 ■ Determinação de U_p e coordenação a suportabilidade de tensão impulsiva

- Proteção contra sobretensões provocadas por descargas atmosféricas diretas sobre a edificação ou próximo a ela, surtos conduzidos. Os DPSs devem ser instalados unicamente no ponto de entrada da linha na edificação. O ponto de entrada da instalação na edificação é definido pela NBR 5410 como o ponto em que o condutor penetra (adentra) a edificação. Vale salientar que nem sempre o QDP está posicionado nesse local. Assim, medidas devem ser estudadas para que se cumpra essa determinação.

É admitida apenas uma exceção: quando há edificações de uso individual, atendidas pela rede pública de distribuição em baixa tensão, a barra PE utilizada na caixa da medição deve ser interligada ao BEP, e essa caixa de medição não deve distar mais de dez metros do ponto de entrada da instalação na edificação. Nessas condições, os DPSs podem ser instalados junto do barramento na caixa de medição.

Condutores de conexão entre DPS e instalação

O comprimento dos condutores para a conexão do DPS deve ser o mais curto possível, sem curvas ou laços. No primeiro nível de proteção, o comprimento total do condutor de ligação não deve exceder 0,5 m. A justificativa dada para a coordenação por tempo pode ser utilizada para explicar essa prescrição. Se, nas condições de instalação o DPS, for posicionado no quadro de modo a existir excesso de condutores — as famosas 'folgas' —, poderão ocorrer as seguintes situações de mau funcionamento:

- Excesso de cabo a montante do DPS. Atraso no tempo de atuação do dispositivo, fazendo com que uma parcela maior de surto passe para o próximo nível de proteção ou para a instalação.
- Excesso de cabo a jusante do DPS. Dificuldade na dissipação da corrente do surto, elevando a energia dissipada (calor) no DPS e chegando, em situação extrema, a explodir o dispositivo.

A seção nominal mínima do condutor para interligação do DPS à instalação deve seguir as seguintes prescrições:

- Proteção contra surtos induzidos. No mínimo 4 mm^2 em cobre ou equivalente.
- Proteção contra surtos conduzidos. No mínimo 16 mm^2 em cobre ou equivalente.

Obrigatoriedade de proteção contra sobrecorrentes

Por atingir o final de sua vida útil ou por falha interna, há a possibilidade de o DPS entrar em curto-circuito permanentemente, criando uma falta à terra naquele ponto do circuito. Prevendo esse tipo de situação, a NBR 5410 prescreve que o circuito do DPS deverá ser provido de proteção contra curto-circuito instalada a montante. As alternativas de arranjos para instalação desses dispositivos podem permitir, na hipótese de falha do DPS, priorizar a continuidade do serviço ou a continuidade da proteção. Então, os dispositivos de proteção contra sobrecorrentes podem estar posicionados:

- Em série com a linha de conexão do DPS — esse dispositivo de proteção também pode ser um desligador interno que, eventualmente, integre o dispositivo, mas não deve ser confundido com o dispositivo desligador automático instalado nos DPSs à base de varistores para prevenir as falhas causadas por correntes de avalanche. Essa ligação assegura continuidade de serviço, mas significa ausência de proteção contra qualquer novo surto que venha a ocorrer antes da troca do DPS.
- No circuito ao qual está conectado o DPS — corresponde, geralmente, ao próprio dispositivo de proteção contra sobrecorrentes do circuito. Afeta a continuidade do serviço, uma vez que a atuação do dispositivo de proteção, devido à falha do DPS, interrompe a alimentação do circuito. Cuidados especiais com a coordenação devem ser considerados.
- Em uma repetição da primeira situação, com redundância da proteção. Embora de maior custo, essa alternativa minimiza a possibilidade de perda de proteção contra surto em caso de dano em um dos DPSs. Para essa situação, os dispositivos devem ter as mesmas características técnicas.

O dispositivo de proteção contra sobrecorrentes a ser instalado deve possuir corrente nominal compatível à indicada pelo fabricante do DPS. A capacidade de interrupção deve ser superior ou igual à corrente de curto-circuito presumida naquele ponto.

A seção nominal dos condutores destinados à conexão do dispositivo de proteção contra sobrecorrentes especificamente previsto para eliminar um curto-circuito aos condutores de fase do circuito deve ser dimensionada, levando em conta a máxima corrente de curto-circuito possível no local. Essa recomendação também deve levar em consideração a seção mínima estipulada para esses condutores.

Coordenação entre DPS e dispositivos DR

Devem ser respeitadas as seguintes condições:

- Para prevenir desligamentos intempestivos do DR causados por correntes de fuga inerentes ao DPS, especificamente aqueles que utilizem componentes semicondutores, o DPS deve ser instalado a montante do dispositivo DR.
- Quando, por qualquer razão, o DPS for posicionado a jusante do dispositivo DR, seja ele instantâneo ou tem-

porizado, também deve possuir imunidade a correntes de surto de, no mínimo, 3 kA (8/20). DR tipo 'S'.

12.3 Sobretensões causadas por falhas da isolação para outra instalação de tensão mais elevada[1]

Considera-se, aqui, o caso de instalações elétricas de baixa tensão alimentadas a partir de subestações de transformação de responsabilidade do consumidor, ou seja, locais (p. ex., industriais) que possuem subestação própria *e/ou* circuitos de distribuição em alta tensão.

O contato acidental entre condutores vivos de alta e de baixa tensão, bem como o contato entre os enrolamentos de alta e de baixa tensão em um transformador com defeito, faz com que o mesmo potencial (ou praticamente o mesmo) apareça em ambos os circuitos, de alta e de baixa tensão, através do ponto de contato. Se a instalação de baixa tensão não tiver seu neutro diretamente aterrado (esquema IT), seu potencial atingirá o da instalação de alta tensão. No entanto, se a instalação de baixa tensão tiver seu neutro diretamente aterrado (esquema TN ou TT), embora possa circular uma corrente elevada a partir do circuito de alta tensão, o potencial atingido na instalação de baixa tensão será muito menor.

São extremamente raros os defeitos em transformadores que dêem origem a contatos entre enrolamentos de alta e de baixa tensão. Por sua vez, é mais provável ocorrer o rompimento de um condutor de alta tensão e seu contato com um condutor de baixa tensão nas linhas aéreas de distribuição, o que não é muito comum nas instalações de consumidores. Nessas instalações, geralmente, os circuitos de alta e de baixa tensão estão contidos em condutos separados, por exemplo, bandejas ou escadas para cabos superpostos, ou, ainda, em eletrodutos. Dificilmente, os condutores de AT e BT compartilham o mesmo conduto (p. ex., a mesma bandeja).

É recomendado que os condutores de baixa tensão não utilizem os mesmos condutos que os condutores de alta tensão, a não ser que sejam tomadas medidas para evitar que os condutores de baixa tensão sejam submetidos a uma tensão superior à sua tensão nominal, mesmo no caso de falha da isolação dos condutores de alta tensão, o que pode ser conseguido, por exemplo, por meio de uma barreira que separe os dois circuitos.

Para as instalações com esquema IT, recomenda-se ligar um limitador de sobretensões na origem da instalação, entre o eletrodo de aterramento (das massas) da instalação e o ponto neutro ou um condutor de fase.

A seguir, apresenta-se o caso da ocorrência de uma falta para terra na instalação de alta tensão ocorrida por causa de um condutor rompido e caído ao solo ou pelo contato acidental da fase-carcaça no interior do transformador.

Se as massas da instalação de baixa tensão estiverem ligadas ao eletrodo de aterramento da subestação (ver Figura 12.3), situação muito comum, a falta para terra na alta tensão poderá levar as massas do lado da baixa tensão a potenciais perigosos, isto é, poderão surgir tensões de contato perigosas.

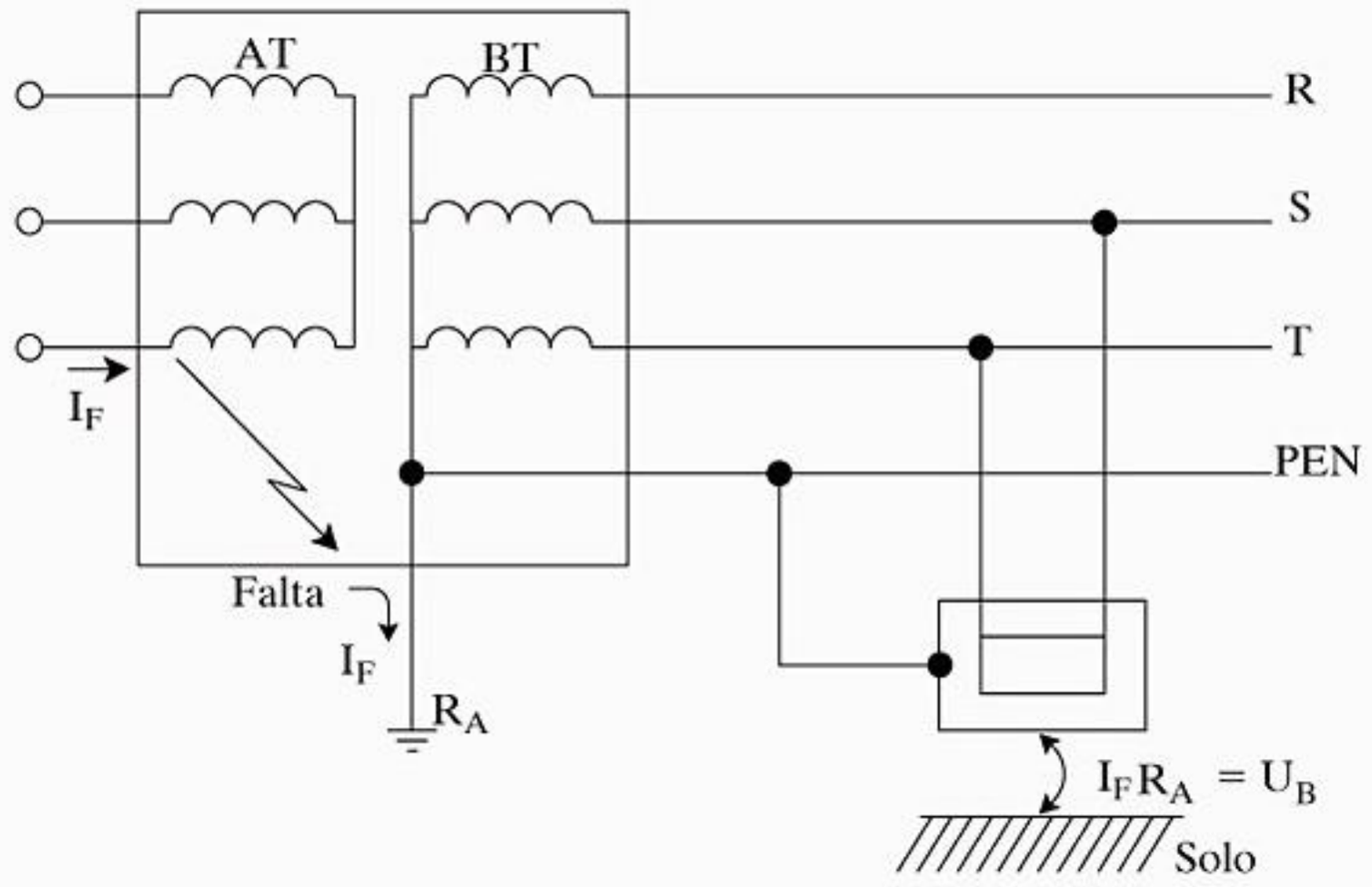


Figura 12.3 ■ Falta para terra na AT: esquema TN com massas interligadas

1. Colaboração do Eng. Gilberto José Capeletto.

Nesse caso, a condição de proteção pode ser escrita

$$R_A \leq \frac{U_B}{I_F} \qquad (12.7)$$

sendo R_A a resistência de aterramento da subestação (Ω), U_B a tensão de contato presumida correspondente ao tempo de atuação da proteção da rede de alta tensão ou, caso o tempo não seja conhecido, a tensão de contato limite ($U_B = U_L$), e I_F a corrente máxima de falta para terra na instalação de alta (AT), valor a ser fornecido pela concessionária de energia elétrica.

Por exemplo, se o tempo de atuação da proteção for 0,03 s, U_B = 580 V (admitindo Situação 1) e se a corrente de falta for I_F = 500 A, a resistência de aterramento deverá ser

$$R_A \leq \frac{580}{500} = 1{,}16\,\Omega$$

Se as massas da instalação de baixa tensão não forem interligadas ao eletrodo de aterramento da subestação (ver figuras 12.4 e 12.5), enfatiza-se a necessidade de evitar, no caso de falta para terra no sistema de alta tensão, o surgimento de tensões superiores à tensão suportável à freqüência industrial:

- De qualquer dos equipamentos ligados à instalação de baixa tensão, se o neutro for ligado ao eletrodo de aterramento da subestação (ver Figura 12.4).
- Somente dos equipamentos de baixa tensão ligados ao eletrodo de aterramento da subestação (geralmente, equipamentos BT da própria subestação), se o neutro for ligado ao eletrodo das massas ou a outro eletrodo independente (ver Figura 12.5).

Para atender a essas prescrições, basta que

$$R_A \leq \frac{U_t}{I_F} \qquad (12.8)$$

sendo U_t a menor tensão suportável à freqüência industrial dos equipamentos de baixa tensão (da instalação ou da subestação, conforme o caso).

No que tange às medidas de proteção contra os efeitos provocados por falta para terra na instalação de alta tensão, utiliza-se o conceito da eqüipotencialidade.

Devido à impossibilidade prática de ser conseguida a eqüipotencialidade em sua expressão máxima, a topologia de potenciais deve ser a mais plana possível em toda a região da instalação (ver Figura 12.6). Para garantir a segurança das pessoas contra tensões de transferência, deve-se obedecer à expressão

$$U_{máx}\,(x, y) - U_{mín}\,(x, y) \leq U_B(t) \qquad (12.9)$$

onde:

- (x, y) indica todos os pontos da região onde poderão ser encontradas massas de equipamento.
- $U_{MÁX}$ (x, y) é a maior tensão em relação à terra que aparece na região (x, y) quando de uma falta fase-terra.
- $U_{MÍN}$ (x, y) é a menor tensão em relação à terra que aparece por ocasião de uma falta fase-terra.
- U_B(t) é a tensão máxima de contato permitida.
- (t) é o tempo máximo de operação da proteção para a corrente de falta fase-terra, no local, sendo que o valor da corrente de falta deve ser fornecido pela concessionária.

Além dessa precaução, deve ser garantida a segurança, no que se refere às tensões de passo, pela expressão

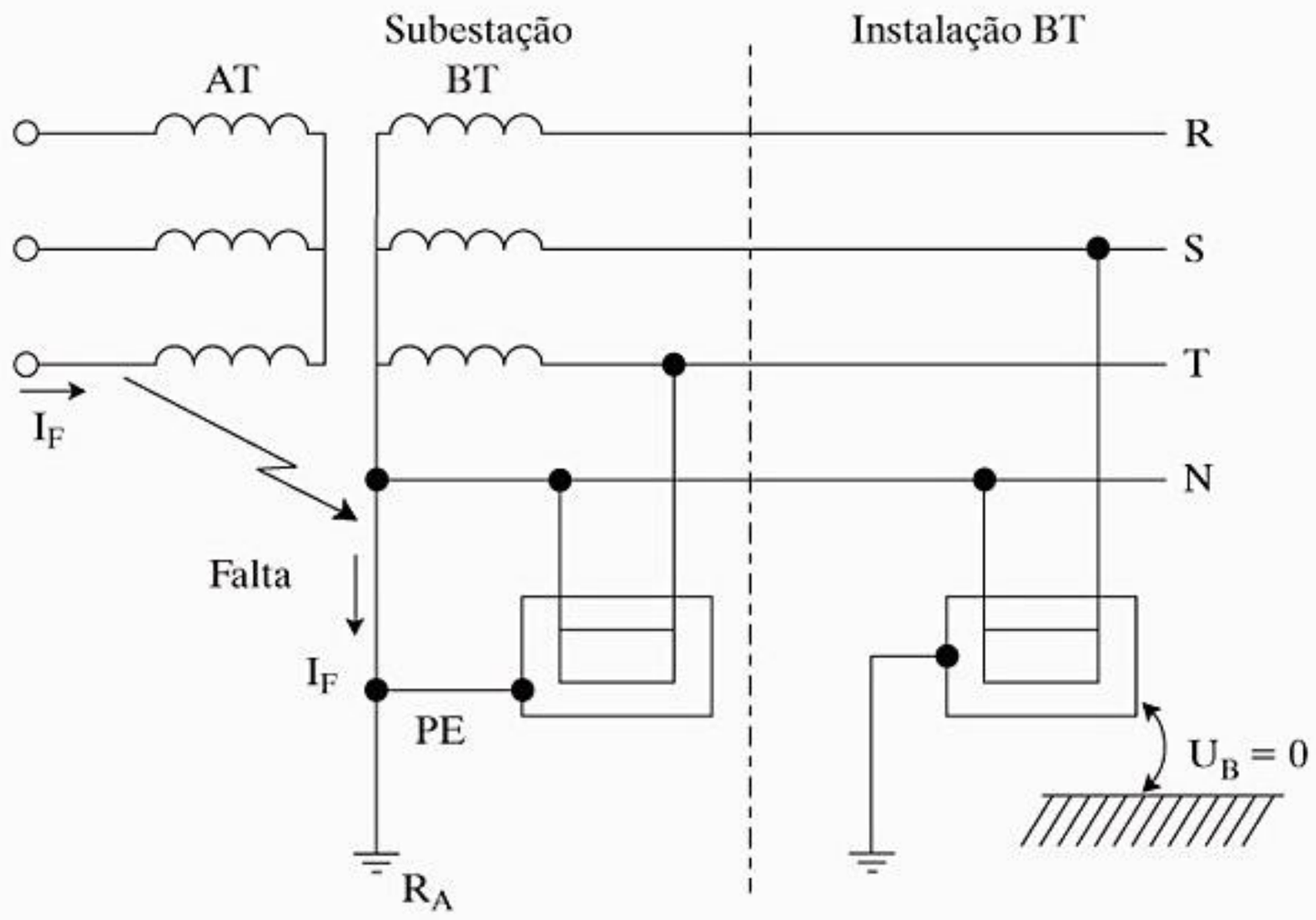


Figura 12.4 ■ Falta para terra na AT: esquema TN com massas não interligadas e neutro ligado ao eletrodo da subestação

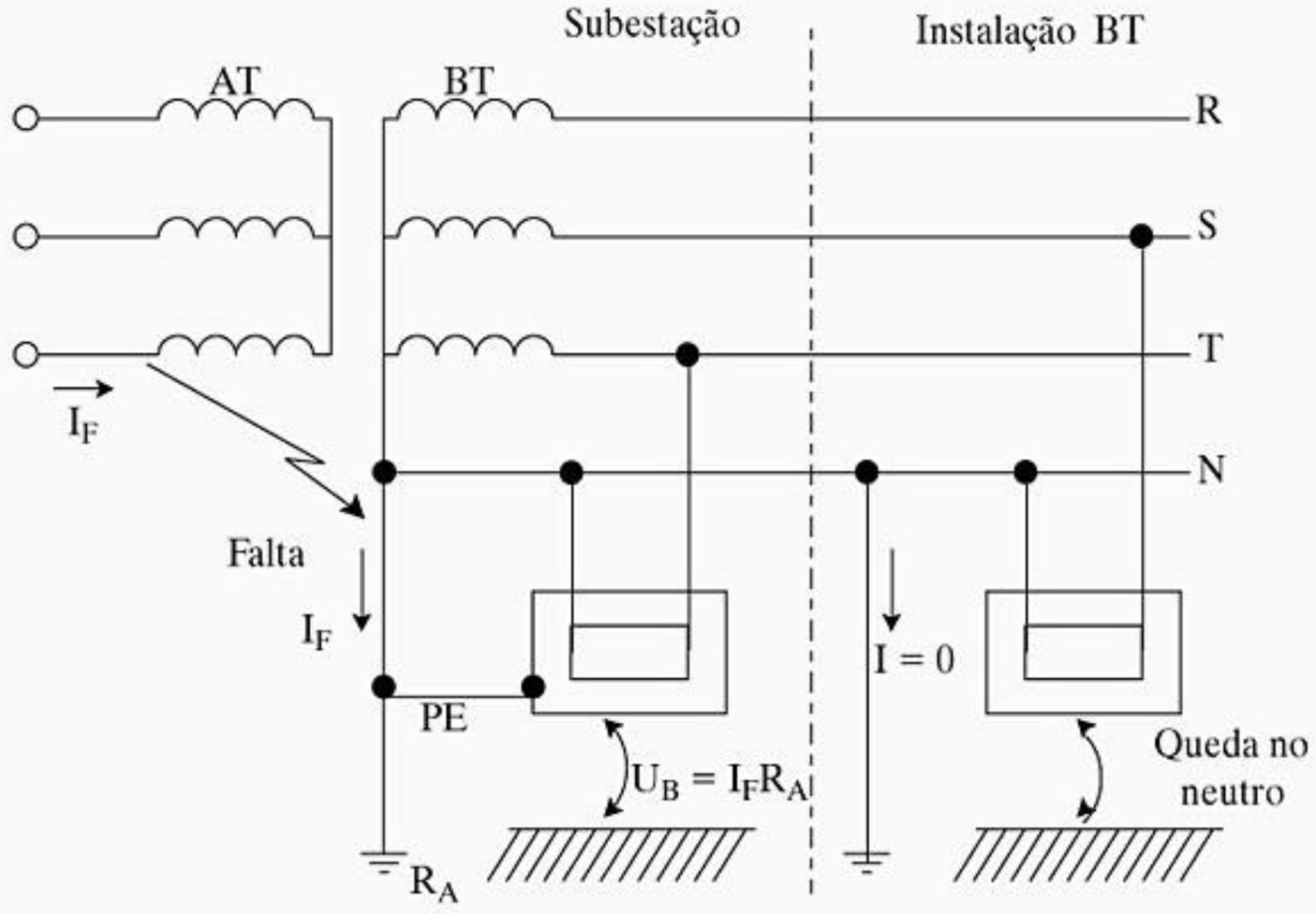
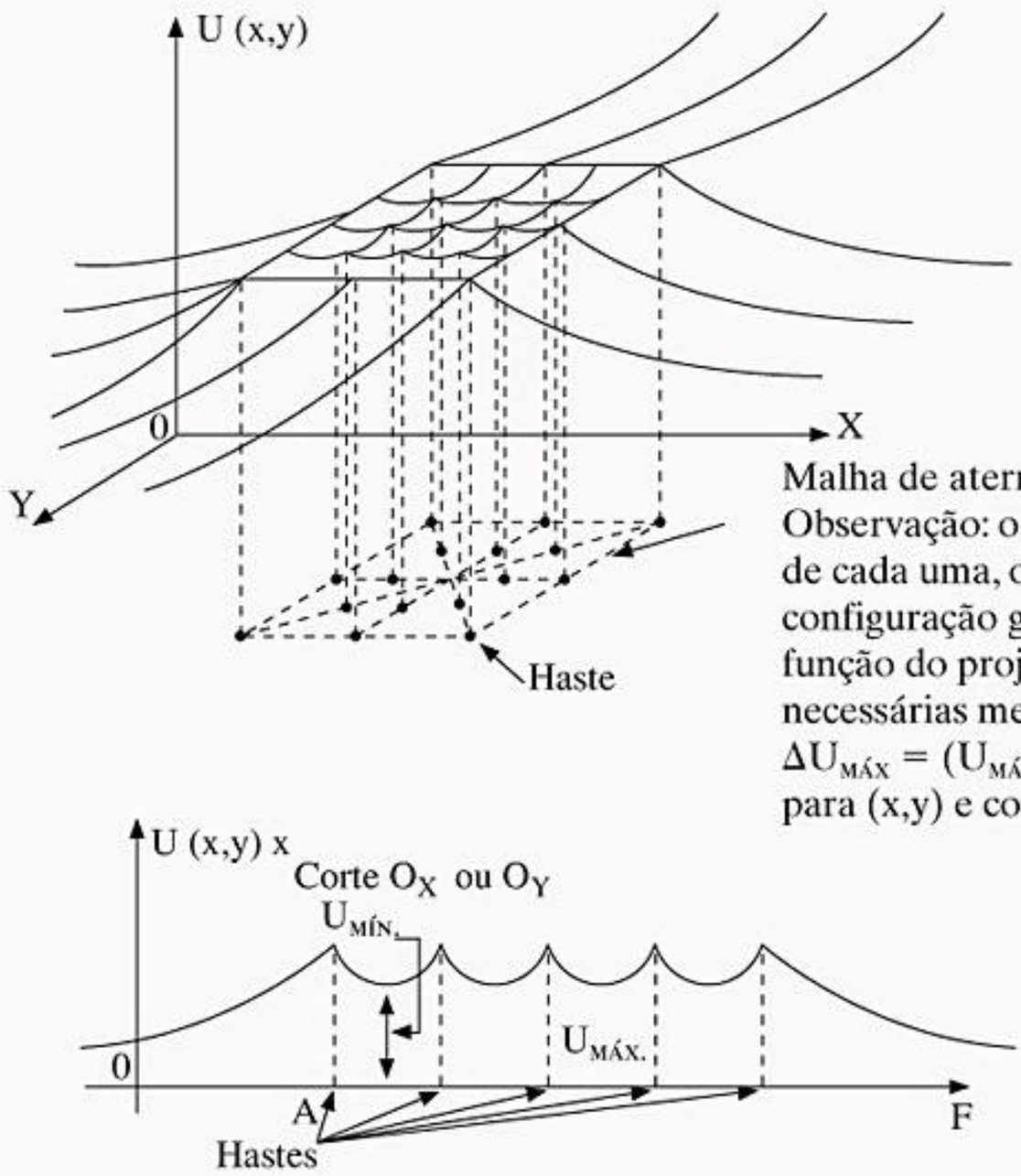


Figura 12.5 ■ Falta para terra na AT: esquema TN com massas não interligadas e neutro ligado ao eletrodo independente

$$U(x, y) \text{ passo} \leq U_c(t) \qquad (12.10)$$

onde:

- U (x, y) passo é a tensão máxima de passo permitida para qualquer ponto (x, y) do local.
- $U_c(t)$ é a tensão limite de segurança para o tempo máximo 't' de abertura da proteção, para a corrente de falta fase-terra no local. O valor da corrente de falta deve ser fornecido pela concessionária.

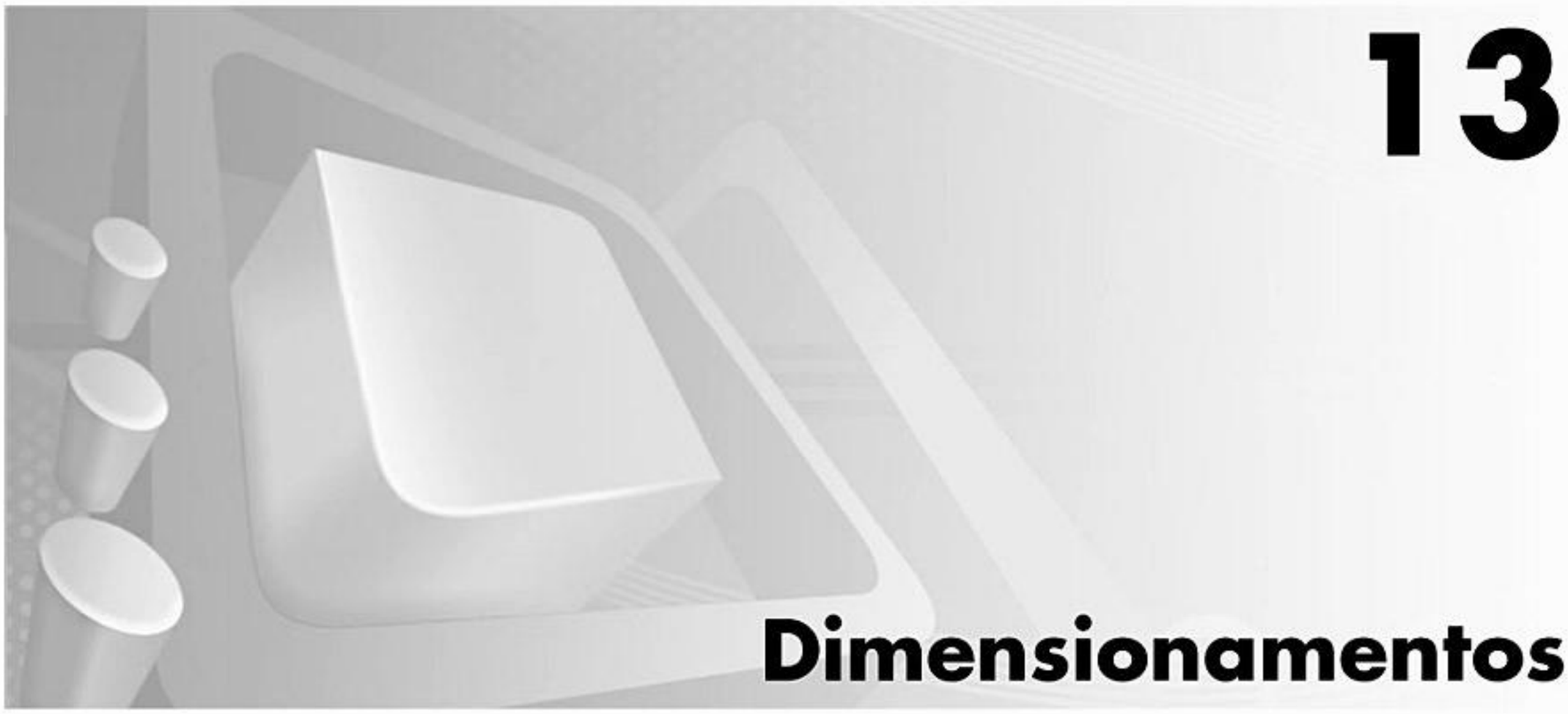


Malha de aterramento
Observação: o número de hastes, a pronfundidade de cada uma, o afastamento entre elas e sua configuração geográfica são logicamente função do projeto e dos ajustes após as necessárias medições dos potenciais.
$\Delta U_{MÁX} = (U_{MÁX.}(x,y) - U_{MÍN.}(x,y))$
para (x,y) e corrente na malha I_M no ponto X.

Figura 12.6 ■ Planificação da topologia de potenciais

EXERCÍCIOS

1. Apresente dois exemplos de causas de sobretensões transitórias.
2. Quais são as quatro categorias de produtos dos quais se exige a suportabilidade a impulso em instalações de baixa tensão, como descrito da NBR5410?
3. Quais situações de surtos devem ser previstas para definir a necessidade da proteção?
4. Quais são as condições mínimas para proteção da instalação elétrica, segundo as NBR 5410 e NBR 5419?
5. Quais são os fatores que devem ser considerados para que o projetista defina se a proteção a ser instalada será contra surtos conduzidos ou induzidos?
6. Quais são os fatores que influenciam no cálculo da freqüência admissível de danos?
7. Segundo a norma NBR IEC 61643-1, o que é um DPS?
8. Quais são os três tipos de DPS?
9. Quais as possíveis situações de mau funcionamento se, nas condições de instalação, o DPS for posicionado no quadro de modo a existir excesso de condutores, as famosas 'folgas'?
10. Quais são as seções nominais mínimas do condutor, para interligação do DPS à instalação contra surtos induzidos e conduzidos?



13

Dimensionamentos

13.1 Circuitos de motores

Introdução

Vimos antertiormente que as características que diferenciam os equipamentos a motor das demais cargas e também os dois grandes grupos em que podem ser divididas tais cargas: *industriais e similares* e *residenciais e comerciais*. Agora, o assunto é o dimensionamento dos circuitos terminais e de distribuição que alimentam as cargas, de acordo com as prescrições da NBR 5410, quais sejam:

(a) Cargas industriais e similares:
- Motores de indução de gaiola trifásicos de potência não superior a 150 kW (200 CV), com características normalizados conforme a NBR 7094.
- Cargas acionadas em regime S_1 e com características de partida conforme especificadas na NBR 7094.

(b) Cargas residenciais e comerciais:
- Motores de potência nominal não superior a 1,5 kW (2 CV), constituindo parte integrante de aparelhos eletrodomésticos e eletroprofissionais.

Os equipamentos a motor não devem, durante sua partida, causar perturbações inaceitáveis na rede de distribuição, na instalação propriamente dita e nos demais equipamentos. É necessário consultar sempre as concessionárias para a partida direta de motores com potência acima de 3,7 kW (5 CV), em instalações alimentadas por rede pública em baixa tensão. Por outro lado, durante a partida, a queda de tensão nos demais pontos de utilização da instalação não deve ultrapassar os valores indicados pela NBR 5410 e apresentados na Seção "Limites de queda de tensão estabelecidos pela NBR 5410", no Capítulo 9.

Basicamente, existem três configurações clássicas para a ligação de equipamentos a motor. São elas:

(a) Circuitos terminais individuais, um para cada motor, partindo de um quadro de distribuição (p. ex., um CCM); eventualmente, poderão partir, do quadro, circuitos terminais para outras cargas; é a *configuração mais comum* (Figura 13.1(a)).

(b) Circuitos de distribuição com derivações em pontos determinados e com circuitos terminais individuais (um por motor), podendo também existir derivações para outras cargas; caso típico de instalação com barramento blindado (Figura 13.1(b)).

(c) Circuito terminal único que serve a vários motores e, eventualmente, a outras cargas; caso típico de motores de pequeno porte (Figura 13.1(c)).

A Figura 13.2 indica os diversos componentes dos circuitos de equipamentos a motor, no caso mais geral:

- *Condutores do circuito terminal*: condutores que vão desde o QD, na configuração (1), ou desde o circuito de distribuição, na configuração (2), até o motor.
- *Dispositivo de proteção do circuito terminal*: dispositivo com a função de proteger os condutores do circuito terminal, o dispositivo de comando e o motor contra correntes de curto-circuito; geralmente, dispositivo fusível (Figura 13.3).
- *Dispositivo de seccionamento*: destina-se a desligar o circuito terminal, o dispositivo de comando e o motor; geralmente, são usados seccionadores, interruptores ou dispositivos que atuam sobre contatores e que possam ser travados na posição aberta (Figura 13.3).

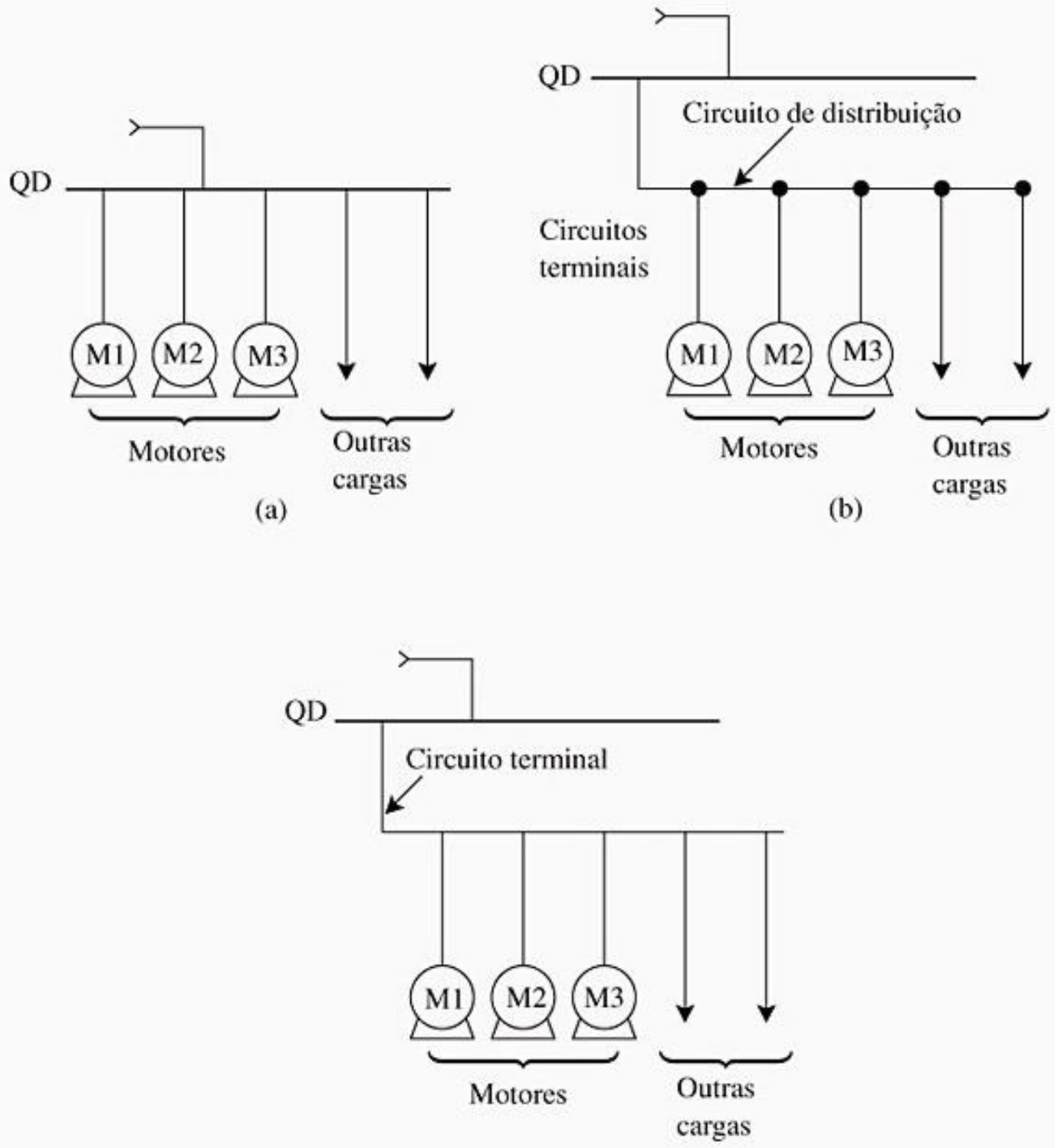


Figura 13.1 ▪ Configurações de circuitos de motores: (a) circuitos terminais individuais; (b) circuito de distribuição com derivações; (c) circuito terminal com derivações

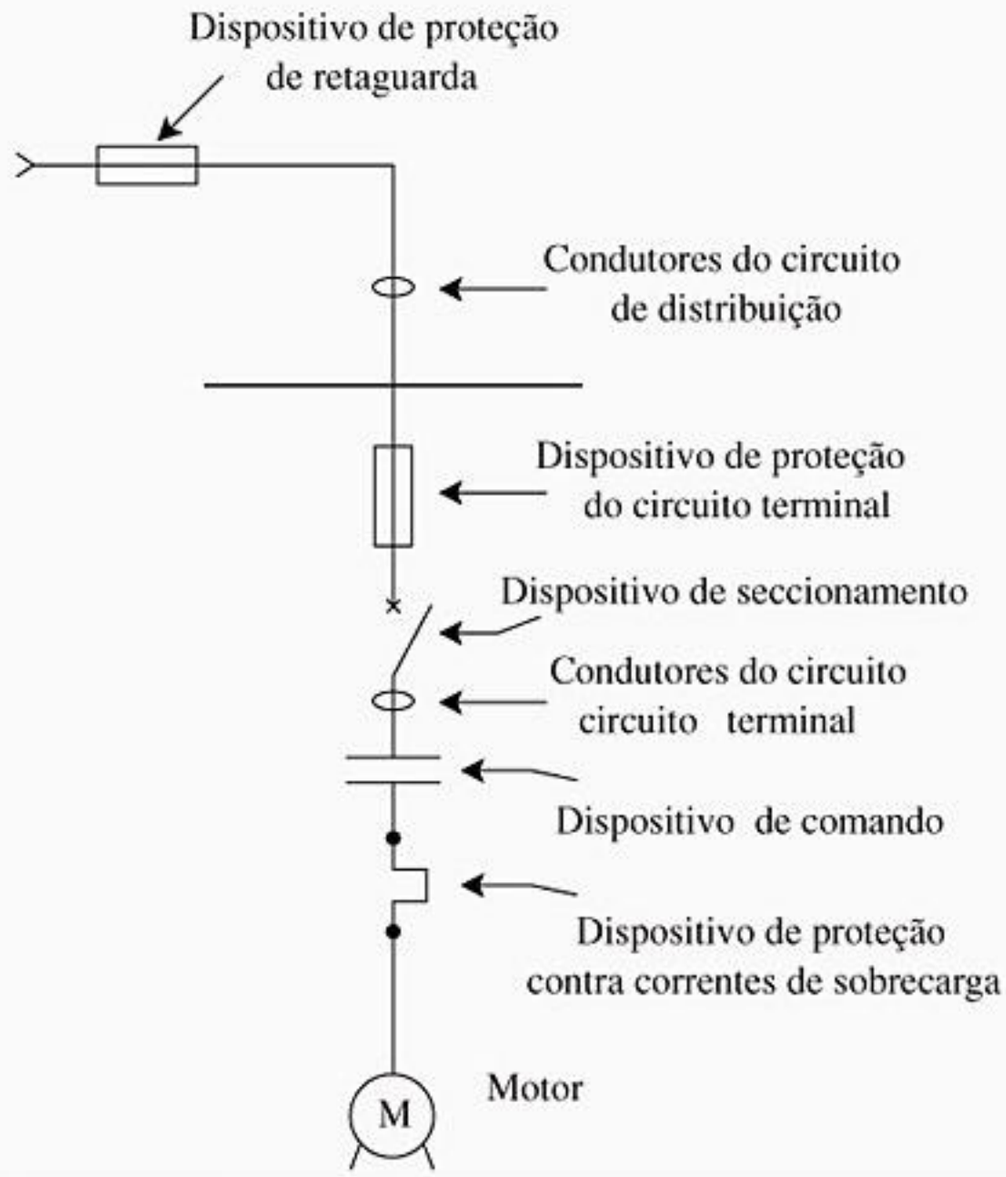


Figura 13.2 ▪ Componentes de circuito de motor

- *Dispositivo de comando*: dispositivo cuja finalidade principal é partir e parar o motor; geralmente, um contator (Figura 13.4).
- *Dispositivo de proteção do motor*: dispositivo destinado a proteger o motor contra correntes de sobrecarga; geralmente, um relé bimetálico (Figura 13.5).
- *Condutores do circuito de distribuição*: condutores que alimentam o quadro de distribuição, na configuração (1), ou diretamente os circuitos terminais, na configuração (2).
- *Proteção de retaguarda*: dispositivo que protege o circuito de distribuição contra corrente de curto-circuito; geralmente, dispositivo fusível.

Partida de motores trifásicos de gaiola

Partida direta

Sempre que possível, a partida de um motor trifásico de gaiola deve ser direta, isto é, feita a plena tensão, por meio de um dispositivo de comando — geralmente, um contator. Existem conjuntos pré-montados para a partida direta de motores, que reúnem no mesmo invólucro:

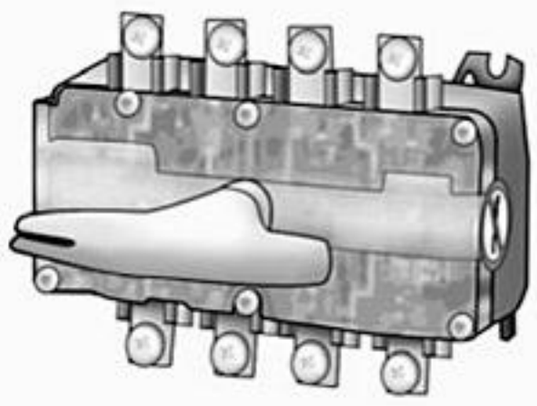


Figura 13.3 ■ Chave seccionadora

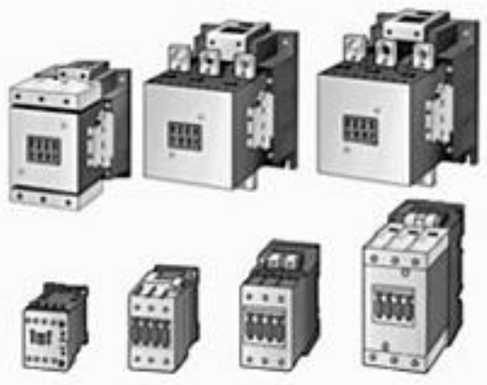


Figura 13.4 ■ Contator



Figura 13.5 ■ Relé bimetálico



Figura 13.6 ■ Chave de partida direta de motores

- Dispositivo de comando (p. ex., contator tripolar).
- Dispositivo de proteção contra correntes de sobrecarga (p. ex., relé bimetálico).
- Proteção do circuito terminal contra correntes de curtos-circuitos (p. ex., dispositivo fusível).

Um desses dispositivos é mostrado na Figura 13.6.

Partida indireta

Caso a partida direta não seja possível, quer por imposição da concessionária (que, no caso de instalações de baixa tensão, costuma exigir que motores acima de 5 CV partam com tensão reduzida), quer por exigências da própria instalação, podem-se usar sistemas de partida indireta com tensão reduzida, com o objetivo de diminuir a corrente de partida.

Em alguns casos, ainda, pode ser necessária uma partida mais suave, como é o caso de esteiras transportadoras, redutores, teares etc. Nesses casos, utilizam-se muito: partida com chave estrela-triângulo e com chave compensadora e sistemas de partida suave (*soft-starter*).

Chave estrela-triângulo

Para a partida com *chave estrela-triângulo*, é fundamental que o motor possa trabalhar com ligação em dupla tensão, por exemplo, 220/380 V, 380/660 V ou 440/760 V; os motores devem ter, no mínimo, seis bornes de ligação.

A partida estrela-triângulo pode ser usada quando a curva de conjugados de motor for suficientemente elevada para garantir a aceleração da máquina com a corrente reduzida.

Na ligação estrela, a corrente fica reduzida em cerca de 25% a 33% da corrente de partida na ligação-triângulo; a curva do conjugado também é reduzida na mesma proporção. Por esse motivo, sempre que for necessária uma partida estrela-triângulo, deverá ser usado um motor com conjugado elevado.

A Figura 13.7 apresenta uma chave estrela-triângulo automática.

Na Figura 13.8(*a*), tem-se um motor com alto conjugado resistente (CR). Se a partida for em estrela, o motor acelera a carga até a velocidade n, aproximadamente 85% da rotação nominal; então a chave deverá permutar para a ligação em triângulo. Nesse caso, a corrente —

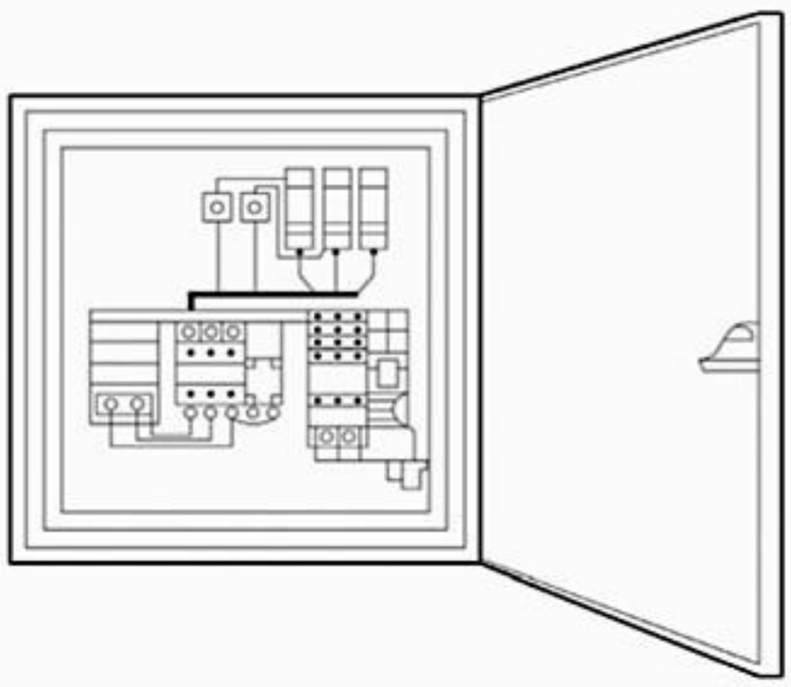


Figura 13.7 ▪ Chave estrela-triângulo automática

que era aproximadamente a nominal, ou seja, 100 por cento — salta para 320 por cento, o que não é vantajoso, pois, na partida em Y, a corrente era somente de 190 por cento.

Na Figura 13.8(b), vê-se o motor com as mesmas características, porém o conjugado resistente da carga é bem menor. Na ligação Y, o motor acelera a carga até 95 por cento da rotação nominal. Quando a chave é ligada em Δ, a corrente, que era aproximadamente 50 por cento, sobe para 170 por cento, ou seja, praticamente igual à da partida em Y. Aqui, a ligação estrela-triângulo apresenta vantagem, porque, se a ligação do motor fosse direta, a corrente de partida seria de 600 por cento.

Geralmente, a chave estrela-triângulo somente deve ser empregada em partidas em vazio ou com carga parcial; ou a carga (total) só poderá ser aplicada depois de ter sido atingida a rotação nominal,.

A Figura 13.9 mostra esquematicamente a ligação estrela-triângulo em um motor, para um circuito de 220 V; nota-se que, durante a partida, a tensão é reduzida para 127 V.

Chave compensadora

A *chave compensadora* pode ser usada para a partida de motores sob carga. Ela reduz a corrente de partida, porém deixa o motor com um conjugado suficiente para a partida e aceleração.

A tensão na chave compensadora é reduzida por meio de um autotransformador que possui, normalmente, *taps* de 50 por cento, 65 por cento e 80 por cento da tensão nominal.

A Figura 13.10 mostra uma chave compensadora automática, equipada com autotransformador, dispositivo fusível para a proteção do circuito terminal, dispositivo fusível para a proteção do circuito de comando, três contatores e um relé térmico.

O Quadro 13.1, trata das vantagens e desvantagens entre a chave estrela-triângulo e as chaves compensadoras automáticas.

Sistema de partida suave (*soft-starter*)

Soft-starter é um dispositivo eletrônico formado por uma ponte de tiristores (SCR) que controlam a corrente de partida de motores de corrente alternada trifásica. Pela variação do ângulo de disparo dos SCRs da ponte, consegue-se variação da tensão eficaz aplicada nos terminais motor. Assim, pode-se controlar a corrente de partida do

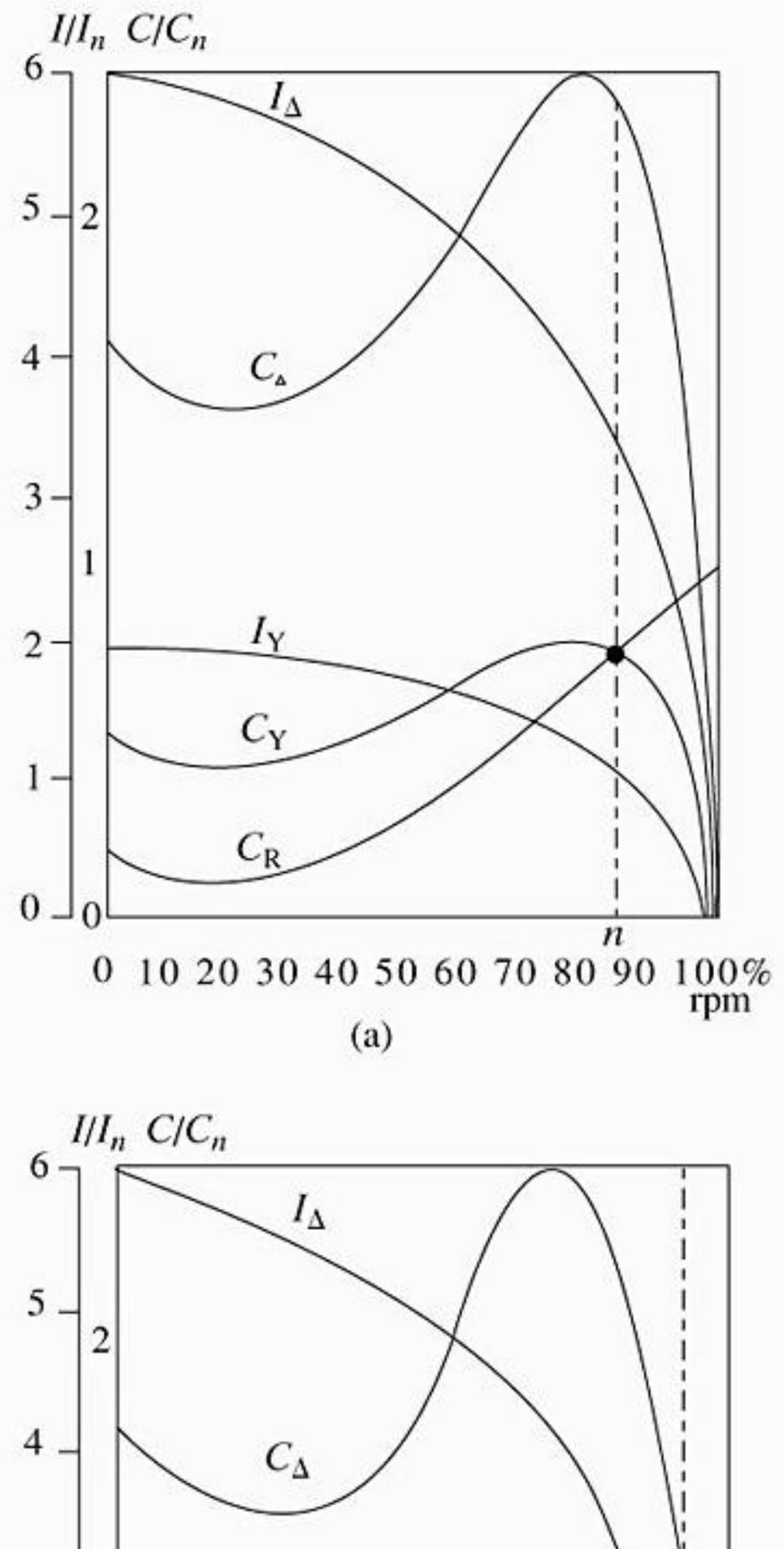


Figura 13.8 ▪ Curvas de conjugado e de corrente de dois motores; I_Δ = corrente em triângulo; I_Y = corrente em estrela; C_Δ = conjugado em triângulo; C_Y = conjugado em estrela; C/C_n = relação entre o conjugado do motor e o conjugado nominal; C_R = conjugado resistente

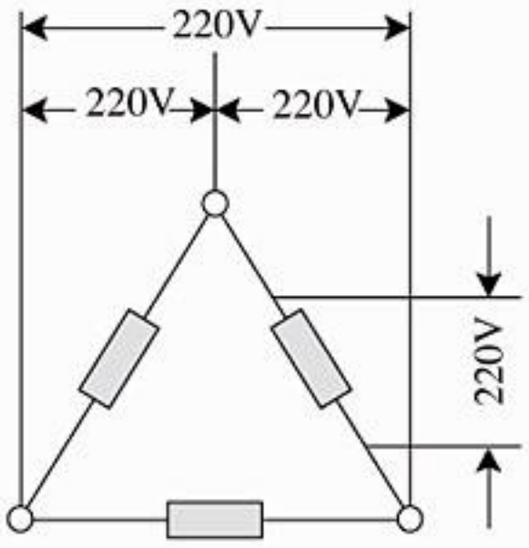


Figura 13.9 ■ Esquema de tensões na ligação Y

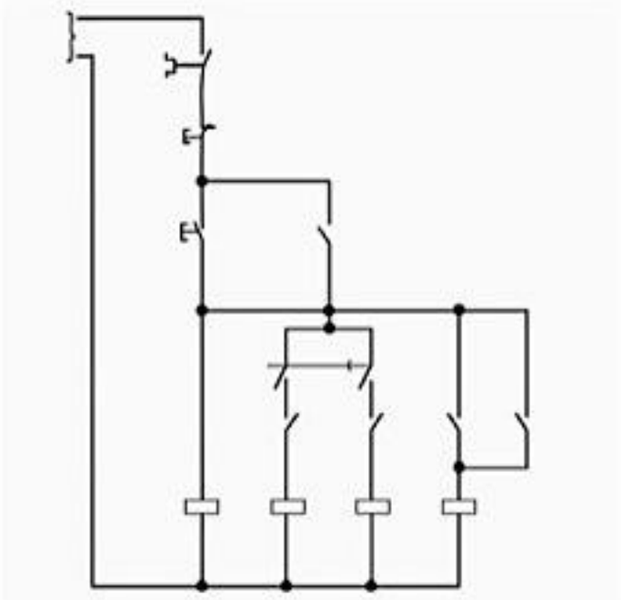


Figura 13.10 ■ Chave compensadora automática

motor, proporcionando uma "partida suave", de forma a não provocar quedas de tensão bruscas na rede de alimentação, como ocorre em partidas diretas. Com o *soft-starter*, consegue-se, também, menores quedas de tensão do que com as chaves estrela-triângulo e compensadoras.

O *soft-starter* funciona, geralmente, com uma tecnologia chamada *by-pass*, na qual, após a partida do motor, liga-se um contator que substitui os módulos de tiristores, evitando assim o sobreaquecimento deles, aumentando sua vida útil.

Quadro 13.1 ■ Vantagens e desvantagens entre chaves estrela-triângulo e compensadoras automáticas

I. Estrela-triângulo (automática)

Vantagens:

- A chave estrela-triângulo é muito utilizada devido a seu custo reduzido.
- Não tem limites quanto ao seu número de manobras.
- Os componentes ocupam pouco espaço.
- A corrente de partida fica reduzida em aproximadamente 1/3.

Desvantagens:

- A chave só pode ser aplicada a motores cujos seis bornes ou terminais das bobinas sejam acessíveis.
- A tensão da rede deve coincidir com a tensão em triângulo do motor.
- Com a corrente de partida reduzida para aproximadamente 1/3 da corrente nominal, reduz-se também o momento (conjugado) de partida para 1/3.
- Caso o motor não atinja pelo menos 90% de sua velocidade nominal, o pico de corrente na comutação de estrela para triângulo será quase como se fosse uma partida direta, o que prejudica os contatos dos contatores e não traz nenhuma vantagem para a rede elétrica.

II. Chave compensadora (automática)

Vantagens:

- No *tap* de 65%, a corrente de linha é aproximadamente igual à da chave estrela-triângulo; entretanto, na passagem de tensão reduzida para a tensão da rede, o motor não é desligado, e o segundo pico é bem reduzido, visto que o autotransformador por curto tempo se torna uma reatância.
- É possível a variação do *tap* de 65% para 80% ou até para 90% da tensão da rede, a fim de que o motor possa partir satisfatoriamente. Isso quer dizer que sua aplicação é própria para partida de bombas, ventiladores ou outras máquinas que demoram para atingir a velocidade nominal.

Desvantagens:

- A grande desvantagem é a limitação de sua freqüência de manobras. Na chave compensadora automática, é sempre necessário saber a freqüência de manobra para determinar-se o autotransformador.
- A chave compensadora é bem mais cara que a chave estrela-triângulo, devido ao autotransformador.
- Devido ao tamanho do autotransformador, a construção torna-se volumosa, necessitando de quadros maiores (painéis), o que eleva o seu preço.

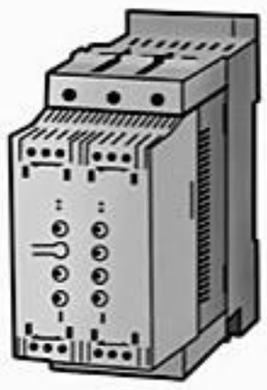


Figura 13.11 ▪ *Soft-starter*

As principais aplicações de *soft-starters* incluem: bombas centrífugas, ventiladores, exaustores, sopradores, compressores de ar, misturadores, aeradores, centrífugas, serras e plainas, transportadores de carga, escadas rolantes, esteiras de bagagem etc.

A Figura 13.11 mostra um exemplo de *soft-starter*.

Dimensionamento dos condutores

Capacidade de condução de corrente

Nas aplicações normais, os condutores do circuito terminal, que servem a um único motor, devem ter uma capacidade de condução de corrente (I_Z) não inferior à corrente nominal do motor (I_M) multiplicada pelo *fator de serviço* (f_S), se existir.

$$I_Z \geq f_S \cdot I_M \qquad (13.1)$$

O *fator de serviço* de um motor é um multiplicador que pode ser aplicado à potência que este pode fornecer sob tensão e freqüência nominais, sem comprometer o limite de elevação de temperatura do enrolamento.

Quando um motor possuir característica nominal com mais de uma potência *e/ou* velocidade, o condutor a ser escolhido deverá ser o que resulte em maior seção, ao serem consideradas individualmente cada potência e velocidade.

Os condutores que alimentam dois ou mais motores e, em alguns casos, outras cargas, devem ter capacidade de condução de corrente não inferior à soma das capacidades determinadas para cada motor mais as correntes nominais das outras cargas eventualmente alimentadas pelo mesmo circuito. Isso se aplica, em princípio, às três configurações apresentadas na Figura 13.1. Assim, considerando um circuito que alimenta n equipamentos a motor e m cargas de outro tipo, chamando de I_{Mi} a corrente nominal de um motor genérico, de f_{si} ao correspondente fator de serviço e de I_{Nj} à corrente nominal de uma carga genérica de outro tipo, pode-se escrever:

$$I_Z \geq \left[\sum_{i=1}^{n} f_{si} \geq I_{Mi} + \sum_{j=1}^{m} I_{Nj} \right] \qquad (13.2)$$

No caso de circuitos de distribuição que alimentam vários motores e, eventualmente, outras cargas, é possível, em alguns casos, aplicar fatores de demanda específicos. É importante observar que a escolha desses fatores deve ser precedida de uma *análise minuciosa* da situação, levando em consideração, entre outras coisas, o número de motores e, se for o caso, de outras cargas em funcionamento simultâneo, bem como o número de partidas simultâneas dos motores.

Queda de tensão

No dimensionamento dos circuitos (terminais e de distribuição) que alimentam motores, é importante considerar que as quedas de tensão nos terminais dos motores e nos demais pontos de utilização não devem ultrapassar os valores indicados na Seção 9.8 (em 'Limites de queda de tensão estabelecidos pela NBR 5410').

Por outro lado, durante a partida de um motor, a queda de tensão nos terminais do dispositivo de partida não deve ultrapassar 10 por cento da tensão nominal do motor, observados os limites dados na seção recém-citada, para os demais pontos de utilização da instalação.

O cálculo da queda de tensão durante a partida do motor deve ser efetuado considerando a *corrente de rotor bloqueado* e, na falta de um valor mais preciso, pode ser considerado um fator de potência igual a 0,3 (Figura 13.12).

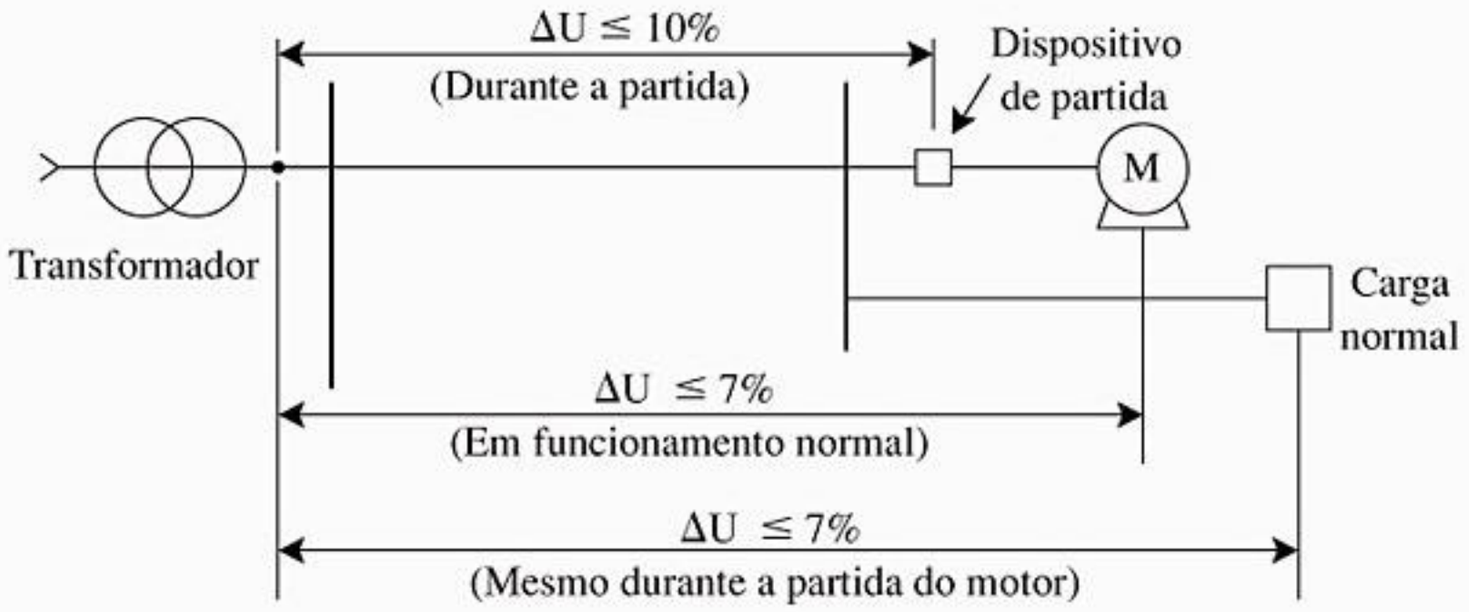


Figura 13.12 ▪ Limites de queda de tensão em instalação de motores e cargas normais

Corrente de rotor bloqueado é a máxima corrente absorvida pelo motor com o rotor travado (velocidade zero) sob tensão e freqüência nominais.

Nota: a expressão 'máxima' decorre da possibilidade de a corrente absorvida variar com a posição angular do rotor.

Corrente de partida é a corrente absorvida pelo motor durante a partida, sob tensão e freqüência nominais.

Nota: O termo 'partida' diz respeito ao funcionamento do motor acelerando, no intervalo de velocidades que vão de zero até a velocidade determinada pela condição de carga do motor. Portanto, a rigor, a corrente de partida tem, durante esse intervalo, valor variável decrescente, que vai do valor inicial, correspondente ao valor do rotor bloqueado, até o valor determinado pela condição de carga em regime permanente do motor.

Na prática, o termo 'corrente de partida' é empregado como sinônimo de 'corrente de rotor bloqueado.

Deve-se observar que, em casos específicos, a queda de tensão nos terminais do dispositivo de partida do motor pode ser superior a 10% da tensão nominal, levando-se em consideração o tempo de aceleração devido à menor tensão nos terminais.

Proteções

Proteção contra correntes de sobrecarga

A proteção contra correntes de sobrecarga dos circuitos que alimentam motores pode ser provida por dispositivos de proteção integrados ao motor, sensíveis à temperatura dos enrolamentos (Figura 13.13), ou por dispositivos de proteção externos ao motor, sensíveis à corrente do respectivo circuito.

A Figura 13.13 mostra um dispositivo de proteção contra sobrecargas integrante do motor. Esse dispositivo é colocado dentro da carcaça do motor, em série com o enrolamento, e contém um disco bimetálico com dois contatos, por meio dos quais o circuito fica normalmente fechado. Se ocorrer uma sobrecarga no motor e sua temperatura subir a um dado valor, o disco passa para a posição 'aberto' e abre o circuito. O dispositivo ainda inclui uma bobina de aquecimento em série com o enrolamento do motor, que faz com que o disco se aqueça mais rapidamente no caso de uma súbita e severa sobrecarga. Uma vez aberto o circuito, o dispositivo, após o resfriamento do motor, fecha automaticamente e parte o motor. Esse tipo de dispositivo é muito utilizado em geladeira, *freezer*, compressor etc. Em algumas aplicações isso pode não ser desejável, e, nesses casos, o dispositivo é projetado de modo que, uma vez aberto, o contator do motor seja desarmado, deixando o circuito do motor desenergizado. Para que o motor entre novamente em operação, o dispositivo deve ser ativado manualmente (por meio de um botão), a fim de que volte à posição 'fechado'. O motor e o dispositivo integrante devem ser ensaiados em conjunto e, segundo o NEC, sua atuação deve ocorrer com uma corrente que não exceda as seguintes percentagens da corrente nominal do motor:

- Motor com corrente nominal não superior a 9 A: 170%.
- Motor com corrente nominal de 9,1 a 20 A (inclusive): 156%.
- Motor com corrente nominal acima de 20 A: 140%.

Quando for utilizado um dispositivo independente, sensível à corrente absorvida pelo motor, este deve ter corrente nominal igual à corrente nominal do motor multiplicada pelo fator de serviço, se existir, ou possuir uma faixa de ajuste que abranja tal valor. Como a série de correntes nominais dos dispositivos apresenta incrementos discretos, admite-se, na prática, uma diferença de até 12% entre as duas correntes.

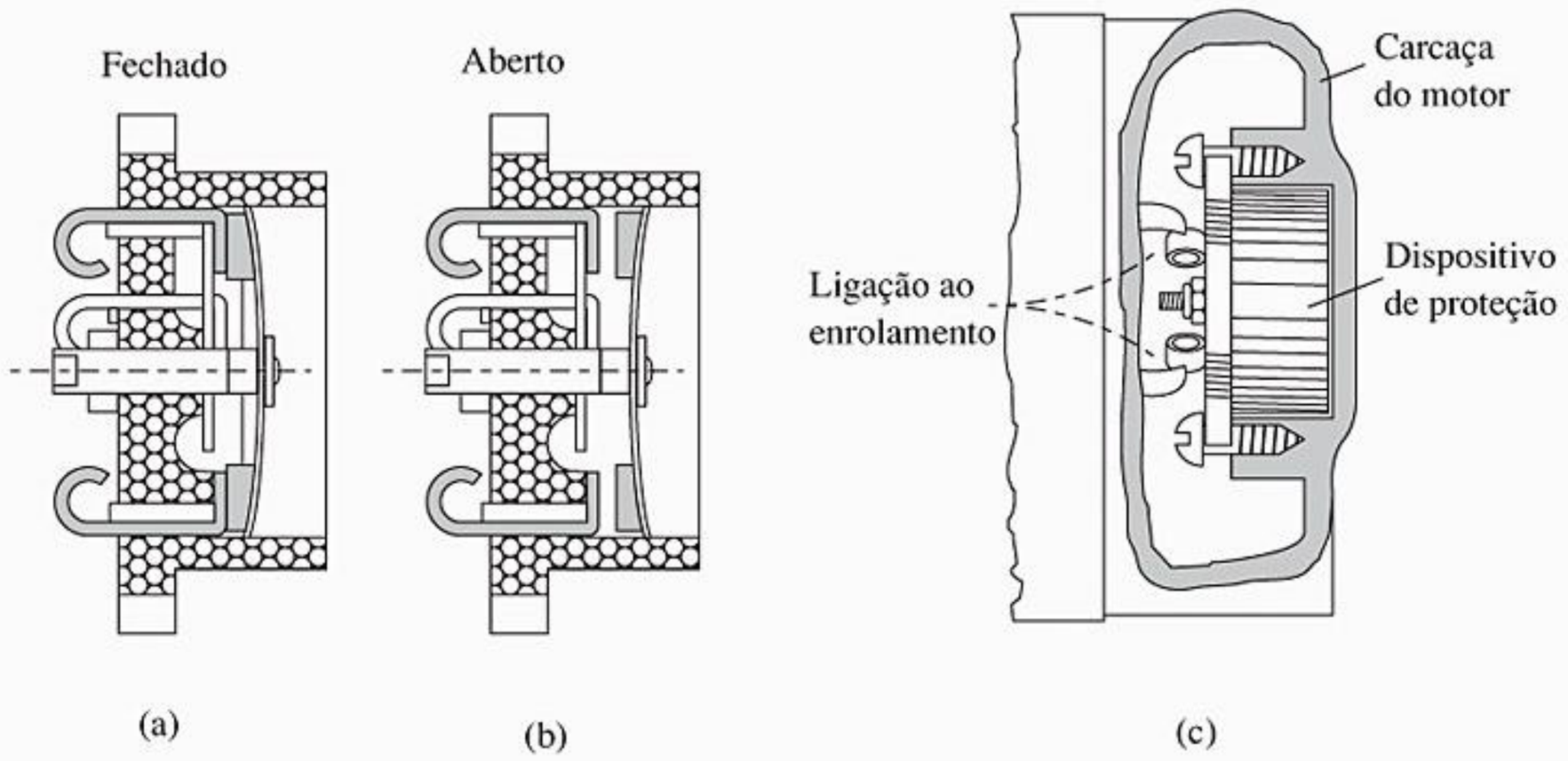


Figura 13.13 ■ Dispositivo de proteção contra correntes de sobrecarga integrante do motor: (a) posição 'fechado'; (b) posição 'aberto'; (c) montagem do dispositivo

Os relés térmicos bimetálicos são os dispositivos (independentes) mais utilizados na proteção de motores contra correntes de sobrecarga, sendo, geralmente, acoplados a contatores. As tabelas de escolha dos relés bimetálicos apresentadas pelos fabricantes costumam trazer as seguintes informações:

- As potências máximas de motores protegidos.
- As faixas de corrente de ajuste do relé de sobrecarga.
- As correntes nominais máximas de fusíveis que protejam contra correntes de curto-circuito.

Assim, por exemplo, um relé Siemens tipo 3RU11 26-4CB0 protege contra correntes de sobrecarga motores de 7,5 CV em 220 V ($I_M = 21$ A); sua faixa de ajuste é de 17 a 22 A, e o maior fusível recomendado é de 32 A.

Motores de potência nominal não superior a 0,5 CV, integrantes de aparelhos eletrodomésticos e eletroprofissionais, podem ser considerados protegidos contra correntes de sobrecarga quando utilizado um dispositivo de proteção do circuito terminal escolhido de acordo com as regras apresentadas na Seção 11.5.

Proteção contra correntes de curto-circuito

Conforme a NBR 5410, quando os condutores dos circuitos que alimentam motores forem protegidos contra correntes de sobrecarga por dispositivos que se limitem a essa proteção, como relés térmicos, a proteção contra correntes de curto-circuito pode ser assegurada por dispositivo de proteção exclusivamente contra curtos-circuitos.

Os dispositivos que protegem exclusivamente contra curtos-circuitos podem ser:

- Disjuntores equipados apenas com disparadores de sobrecorrente instantâneos: recomenda-se, na prática, que a corrente de disparo magnético seja maior que a corrente de rotor bloqueado do motor, porém não superior a 12 vezes a corrente nominal do motor.
- Dispositivos fusíveis com característica gM ou aM: recomenda-se que, para aplicações normais, a corrente nominal dos fusíveis não seja superior ao valor obtido multiplicando-se a corrente de rotor bloqueado do motor pelo fator indicado na Tabela 13.1 (elaborada a partir das características tempo-corrente dos fusíveis gM). Quando o valor obtido não corresponder a um valor padronizado, podem ser utilizados fusíveis de corrente nominal imediatamente superior.

Deve-se observar que, para motores de indução fabricados conforme a NBR 7094, pode ser adotado, para corrente de rotor bloqueado, o valor máximo admissível indicado na norma.

No caso de um circuito terminal que alimenta mais de um motor e, eventualmente, outras cargas, deve-se observar o seguinte:

- Os motores devem ser protegidos *individualmente* contra correntes de sobrecarga.
- A proteção contra correntes de curto-circuito pode ser realizada utilizando-se um dos dois equipamentos a seguir:
  - Um dispositivo de proteção capaz de proteger os condutores da derivação do motor de menor corrente nominal e que não atue indevidamente sob qualquer condição de carga normal do circuito;
  - Uma proteção individual na derivação de cada motor, o que é recomendado para motores de potência superior a 0,37 kW (0,5 CV).

No entanto, convém observar que a solução para que um único circuito terminal contenha vários motores só se justifica, na prática, quando os motores são de pequeno porte. Por outro lado, é sempre preferível que cargas de outra natureza sejam alimentadas por outros circuitos terminais.

13.2 Circuitos que não contêm motores

Apresentação

O dimensionamento de um circuito de uma instalação de baixa tensão, circuito de distribuição ou circuito terminal consiste na determinação da seção dos condutores, na escolha da(s) proteção(ões) contra sobrecorrentes e, eventualmente, no dimensionamento do conduto que conterá os condutores.

No caso mais geral, devem ser cumpridas as seguintes etapas:

(a) Escolha do tipo de linha elétrica (ver Tabela 5.27), o que inclui a escolha da maneira de instalar, propriamente dita, do tipo de conduto e do tipo de condutor.
(b) Determinação da corrente de projeto do circuito.
(c) Aplicação do critério da capacidade de condução de corrente.

Tabela 13.1 ■ Fator para a determinação da corrente nominal máxima de fusíveis tipo 'gM'

Corrente de rotor bloqueado I_P (A)	Fator
$I_P \leq 40$	0,5
$40 < I_P \leq 500$	0,4
$500 < I_P$	0,3

(d) Aplicação do critério da queda de tensão.
(e) Escolha do dispositivo de proteção contra correntes de sobrecarga e determinação da seção dos condutores que atendam às condições pertinentes de coordenação (critério da proteção contra correntes de sobrecarga).
(f) Escolha do dispositivo de proteção contra correntes de curto-circuito e determinação da seção dos condutores que atendam às condições pertinentes de coordenação (critério da proteção contra correntes de curto-circuito).
(g) Verificação das condições de proteção contra contatos indiretos, no caso de circuitos em instalações TN ou IT (critério de proteção contra contato indiretos).

A chamada *seção técnica* dos condutores do circuito será a seção normalizada que atenda a todos os critérios, de 3 a 7, quando aplicáveis, correspondendo, portanto, à maior das seções determinadas por esses critérios. A seção técnica poderá, eventualmente, ser aumentada para atender ao 'critério econômico'; é a *seção econômica* que assume grande importância, tendo em vista as necessidades crescentes de conservação de energia elétrica.

Os critérios anteriormente enumerados já foram apresentados e analisados em outros capítulos, conforme indicado na Tabela 13.2. Trata-se aqui de metodizar sua aplicação a partir das considerações já enunciadas e, quando for o caso, introduzir novas tabelas.

Cálculos preliminares: potências e correntes

Expressões[1]

Seja a representação simbólica do dispositivo de utilização do circuito da Figura 13.14.

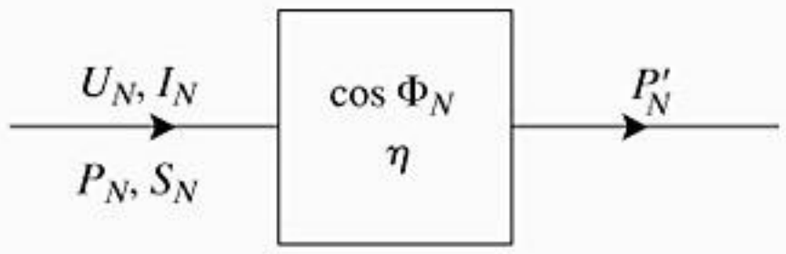


Figura 13.14 ■ Carga genérica

- Carga (caso geral)

$$I_N = \frac{P'_N}{\eta\, t\, U_N \cos \Phi_N} = \frac{P_N}{t\, U_N \cos \Phi_N} = \frac{S_N}{t\, U_N} \qquad (13.3)$$

- Carga com u (≤ 1)

$$P_T = uP_N \qquad (13.4)$$

$$S_T = uS_N \qquad (13.5)$$

$$I_T = \frac{P_T}{tU_N \cos \Phi_N} = \frac{S_T}{tU_N} \qquad (13.6)$$

- Conjunto de p cargas de mesmo tipo

$$P_{inst} = \sum_{i=1}^{p} P_{N,i} \qquad (13.7)$$

$$P_{inst} = \sum_{i=1}^{p} P_{T,i} \qquad (13.8)$$

P'_N (*W*) = potência nominal de saída;

$$t = \begin{cases} 1 \rightarrow \text{carga monofásica} \\ \sqrt{3} \rightarrow \text{carga trifásica} \end{cases}$$

U_N (V) = tensão (de linha) nominal, para circuito trifásico e tensão de fase, para circuito monofásico
η = rendimento
$\cos \Phi_N$ = fator de potência nominal
P_N (W) = potência nominal de entrada
S_N (VA) = potência aparente nominal de entrada
I_N (A) = corrente nominal
u = fator de utilização
P_T (W) = potência de trabalho
S_T (VA) = potência aparente de trabalho
I_T(A) = corrente de trabalho
P_{inst} (W) = potência instalada

Observação: O *fator de utilização* pode ser usado com certos equipamentos, por exemplo, máquinas de grande

Tabela 13.2 ■ Localização dos critérios de dimensionamento de circuitos

Critério	Capítulo	Seções
Capacidade de condução de corrente	9	9.4
Queda de tensão	9	9.8
Proteção contra correntes de sobrecarga	11	11.5
Proteção contra correntes de curto-circuito	11	11.8
Proteção contra contatos indiretos	8	8.1

1. Ver Seções 1.6 e 4.3.

porte com vários motores de funcionamento não-simultâneo, e no caso de tomadas de corrente, em determinadas aplicações. A *potência de trabalho* corresponde à potência máxima.

EXEMPLO 1

Potência aparente de trabalho de tomada de corrente monofásica, com corrente nominal $I_N = 10$ A, ligada em circuito com tensão nominal $U_N = 127\ V$ e fator de utilização $u = 0{,}472$.

Das expressões 13.3 e 13.5:

$$S_T = u\ t\ U_N\ I_N = 0{,}472 \times 1 \times 127 \times 10 \cong 660\ VA$$

EXEMPLO 2

Fator de utilização de uma tomada de corrente trifásica, com corrente nominal $I_N = 16\ A$, ligada em circuito com tensão nominal $U_N = 220\ V$, com potência de trabalho $S_T = 1$ kVA.

Das expressões EQ 13.3 e 13.5:

$$u = \frac{S_T}{tU_NI_N} = \frac{10^3}{\sqrt{3} \times 220 \times 16} = 0{,}164$$

Pontos de distribuição e circuitos de distribuição

Expressões

Seja o ponto de distribuição de circuito apresentado na Figura 13.15. (Ver Seção 4.3.)

$$P_A = \sum_{i=1}^{n} P_{inst,i} \cdot g_i + \sum_{j=1}^{m} P_{N,j} \qquad (13.9)$$

$$Q_A = \sum_{i=1}^{n} P_{inst,i} \cdot g_i \operatorname{tg} \Phi_i + \sum_{j=1}^{m} P_{N,j} \operatorname{tg} \Phi_j \qquad (13.10)$$

$$S_A = \sqrt{P_A^2 + Q_A^2} \qquad (13.11)$$

$$\cos \Phi = \frac{P_A}{S_A} \qquad (13.12)$$

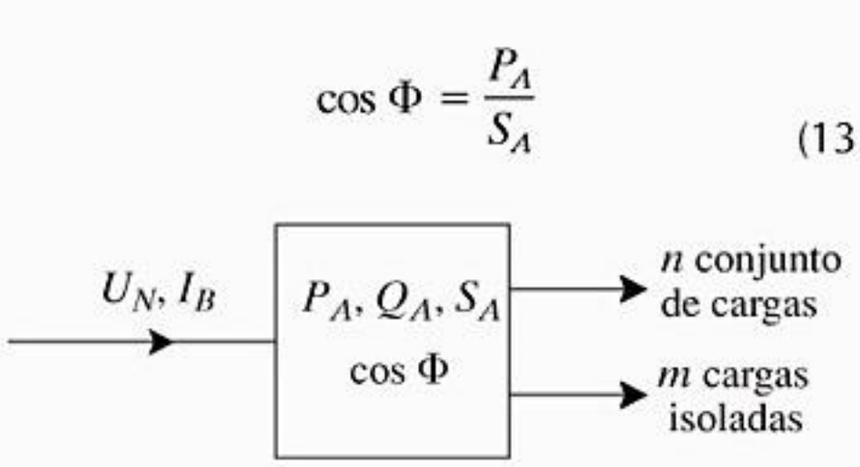


Figura 13.15 ■ Ponto de distribuição

$$I_B = \frac{P_A}{t\ U_N \cos \Phi} = \frac{S_A}{t\ U_N} \qquad (13.13)$$

$$t = \begin{cases} 1 & \rightarrow \text{FN, 2F, 2FN;} \\ \sqrt{3} & \rightarrow \text{2F, 2FN;} \end{cases}$$

I_B (A) = corrente de projeto;
P_A (W) = potência ativa de alimentação;
Q_A (var) = potência de alimentação reativa;
S_A (VA) = potência de alimentação aparente;
g = fator de demanda.

Nas expressões 13.9 e 13.13 podem ser usadas, quando for o caso, as potências de trabalho.

EXEMPLO 3

Potência instalada do quadro de distribuição de um apartamento, alimentado com $U_N = 220$ V (2 FN), contendo:

- Conjuntos de cargas:
  - Iluminação: 7 pontos com $S_N = 100$ VA, cos $\Phi = 1$, $g = 0{,}7$
  - Tomadas: 8 pontos com $S_T = 100$ VA, cos $\Phi = 0{,}8$, $g = 0{,}3$
    5 Pontos com $S_T = 600$ VA, cos $\Phi = 0{,}8$, g = 0,3
- Cargas isoladas:
  - Lavadora de pratos com $S_N = 2.640$ VA, cos $\Phi = 0{,}8$
  - Chuveiro com $P_N = 4.000$ W, cos $\Phi = 1$
- Da Expressão 13.9: $P_A = [(7 \times 100 \times 1 \times 0{,}7) + (8 \times 100 \times 0{,}8 \times 0{,}3) + (5 \times 600 \times 0{,}8 \times 0{,}3)] + [(2.640 \times 0{,}8) + 4.000] = 7.514$ W
- Da Expressão 13.10: $Q_A = [(7 \times 100 \times 1 \times 0{,}7 \times 0) + (8 \times 100 \times 0{,}8 \times 0{,}3 \times 0{,}75) + (5 \times 600 \times 0{,}8 \times 0{,}3 \times 0{,}75)] + [(2.640 \times 0{,}8 \times 0{,}75) + 4.000 \times 0] = 2.268$ var
- Da Expressão 13.11:

  9 $S_A = \sqrt{7.514^2 + 2.268^2} = 7.849$ VA

- Da Expressão 13.12:

$$\cos \Phi = \frac{7.514}{7.849} = 0{,}957$$

EXEMPLO 4

Corrente de projeto do circuito de distribuição que alimenta o quadro do Exemplo (3).

- Da Expressão 13.13:

$$I_B = \frac{7.514}{1 \times 220 \times 0{,}957} = 35{,}7\ A$$

Corrente de projeto de circuito terminal

Expressões

A corrente de projeto do circuito terminal (ver Figura 13.16) pode ser calculada pela Expressão 13.14. (Ver Seção 4.3).

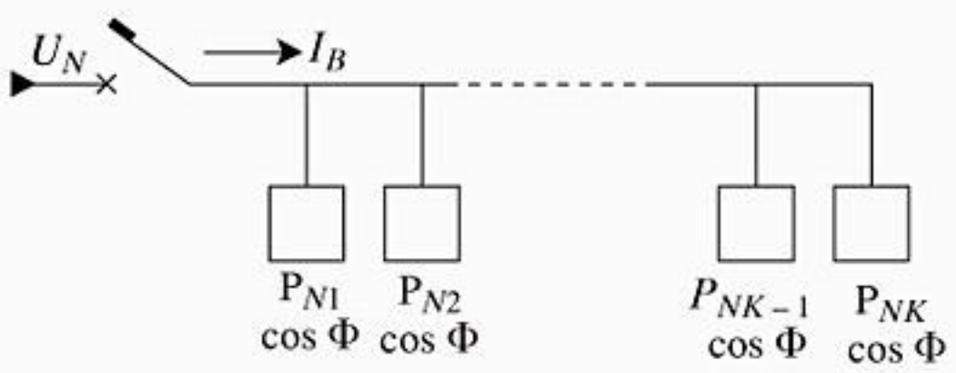


Figura 13.16 ■ Circuito terminal

$$I_B = \frac{\sum_{i=1}^{k} P_{N,i}}{t\, U_N \cos \Phi} = \frac{\sum_{i=1}^{k} S_{N,i}}{t\, U_N} \qquad (13.14)$$

Observação: Para circuitos terminais com uma única carga ($k = 1$), tem-se que $I_B = I_N$ (ou I_T, quando for o caso).

EXEMPLO 5

Corrente de projeto de circuito terminal (FN) de tomadas, alimentado com $U_N = 127$ V, contendo três tomadas com potência de trabalho $S_T = 600$ VA e outras três com $S_T = 100$ VA.

■ Da Expressão 13.14:

$$I_B = \frac{(3 \times 600 + 3 \times 100)}{1 \times 127} = 16{,}5\ A$$

EXEMPLO 6

Corrente de projeto de circuito terminal alimentando um motor de gaiola trifásico com P_N = 15 CV, U_N = 220 V, η = 0,8 e cos ϕ = 0,85.

Da Expressão 13.9:

$$I_N = \frac{15 \times 736}{0{,}8 \times \sqrt{3} \times 220 \times 0{,}85} = 42{,}6\ A = I_B$$

Critério da capacidade de condução de corrente

Expressões

$$I_Z = a\, S^{0{,}625} \qquad (13.15)$$

$$f_1 = \sqrt{\frac{\theta_Z - \theta_A}{\theta_Z - \bar{\theta}_A}} \qquad (13.16)$$

$$f = f_1 \times f_2 \times f_3 \qquad (13.17)$$

$$I_Z = f \times \bar{I}_Z \qquad (13.18)$$

$$I'_B = \frac{I_B}{f} \qquad (13.19)$$

I_Z (A) = capacidade de condução de corrente do condutor;

a (A) = capacidade de condução de corrente do condutor de seção unitária ($S = 1$ mm²);

S (mm²) = seção nominal do condutor;

θ_Z (°C) = temperatura máxima para serviço contínuo do condutor/cabo isolado, valendo 70 °C para isolação em PVC e 90 °C para isolação em EPR/XLPE;

θ_A (°C) = temperatura ambiente;

$\bar{\theta}_A$ (°C) = temperatura ambiente de referência, valendo 20 °C para linhas subterrâneas e 30 °C para os demais cabos;

f_1 = fator de correção para temperatura ambiente;

f_2 = fator de correção para resistividade térmica do solo;

f_3 = fator de agrupamento;

f = fator global de correção;

I'_B (A) = corrente fictícia de projeto do circuito;

$\bar{I}_Z$ (A) capacidade de condução de corrente do condutor nas condições especificadas nas tabelas.

Observação: A Expressão 13.15 é aproximada e não deve ser aplicada a cabos em linhas subterrâneas.

Tabelas

Tipos de linhas elétricas de baixa tensão (de acordo com NBR 5410): Tabela 5.27.

Valores do coeficiente a para linhas tipos A, B, C, D, E e F: Tabela 9.3.

Capacidade de condução de corrente para linhas tipo A, B, C e D.

- Isolação de PVC: Tabela 9.4.
- Isolação de EPR/XLPE: Tabela 9.5.

Capacidades de condução de corrente para linhas tipo E, F e G.

- Isolação de PVC: Tabela 9.6.
- Isolação de EPR/XLPE: Tabela 9.7.

Fatores de correção para temperatura ambiente: Tabela 9.8.

Fatores de correção para resistividade térmica: Tabela 9.9.

Fatores de agrupamento, tabelas 9.10, 9.11, 9.12 e 9.13.

- Casos particulares de instalação em bancos de eletrodutos: Tabela 13.3.
- Seções mínimas dos condutores: Tabelas 13.4.

Dados básicos

- Tipo de linha (de acordo com a Tabela 5.27).
- Tipo de condutor/cabo isolado:
  - Cobre ou alumínio.
  - Isolação (temperatura máxima para serviço contínuo, θ_Z (°C)).
- Número de condutores carregados do circuito, de acordo com as tabelas 9.4, 9.5, 9.6 e 9.7.
- Temperatura ambiente, θ_A (°C).
- Resistividade térmica do solo, (K·m/W) – para a linha D.
- Agrupamentos de circuitos ou cabos multipolares na linha (ou número de condutores fase e neutro da linha, no caso de condutores em paralelo).
- Corrente de projeto, I_B (A).

EXEMPLO 7

Capacidade de condução de corrente de condutor isolado, Cu/PVC, S = 16 mm² de um circuito com 3 condutores carregados instalado em eletroduto embutido em alvenaria, θ_A = 30 °C.

Tabela 13.3 ■ Fatores de agrupamento aplicáveis a casos particulares de bancos de eletrodutos (Cortesia da Prysmian)

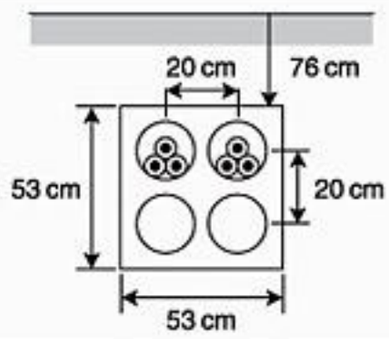
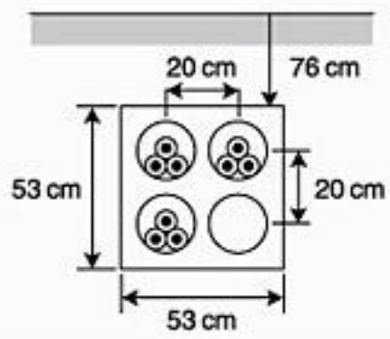
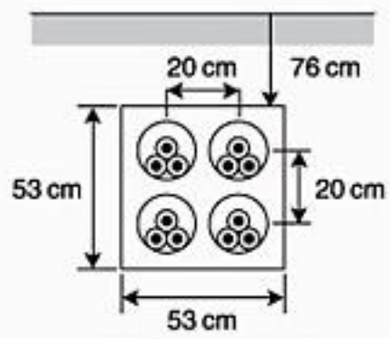
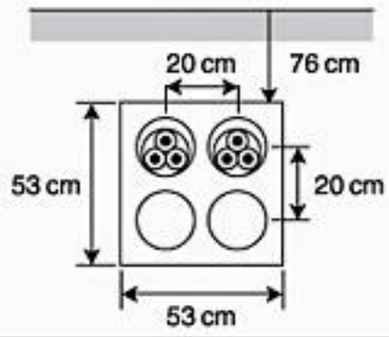
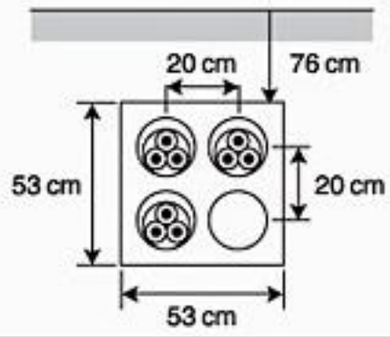
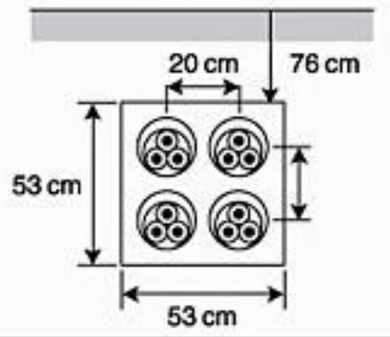
Multiplicar pelos valores da coluna D/3cc da Tabela 9.4 ou da Tabela 9.5			
Até seção 95 mm²	0,91	0,85	0,79
Acima de 95 mm²	0,88	0,81	0,73
Multiplicar pelos valores da coluna D/3cc da Tabela 9.4 ou da Tabela 9.5			
Até seção 95 mm²	0,91	0,85	0,79
Acima de 95 mm²	0,88	0,81	0,73

Tabela 13.4 ■ Seções mínimas dos condutores segundo a NBR 5410

Tipo de instalação		Utilização do circuito	Seção mínima do condutor (mm²) – material
Instalações fixas em geral	Cabos isolados	Circuitos de iluminação	1,5 Cu 16 A*l*
		Circuitos de força	2,5 Cu 16 A*l*
		Circuitos de sinalização e circuitos de controle	0,5 Cu
	Condutores nus	Circuitos de força	10 Cu 16 A*l*
		Circuitos de sinalização e circuitos de controle	4 Cu
Ligações flexíveis feitas com cabos isolados		Para um equipamento específico	Como especificado na norma do equipamento
		Para qualquer outra especificação	0,75 Cu
		Circuitos a extrabaixa tensão para aplicações especiais	0,75 Cu

Notas:
1. Em circuitos de sinalização e controle destinados a equipamentos eletrônicos são admitidas seções de até 0,1 mm².
2. Em cabos multipolares flexíveis contendo sete ou mais veias são admitidas seções de até 0,1 mm².
3. Os circuitos de tomadas de corrente são considerados circuitos de força.

- Da Tabela 5.27 → linha tipo 7, letra B1.
- Da Tabela 9.3 → PVC, B/3 cc – a = 12 A.
- Da Expressão 13.15 → $I_Z = 12 \times 16^{0,625} = 68$ A.
- Da Tabela 9.4 → 16 mm², $B1/3$ cc – $I_Z = 68$ A.

EXEMPLO 8

Fator de correção aplicável a condutores/cabos isolados com isolação em EPR com temperatura ambiente de 45 °C, linha não subterrânea.

- Da Expressão 13.16:

$$f_1 = \sqrt{\frac{90 - 45}{90 - 30}} = 0{,}866$$

- Da Tabela 9.8: $f_1 = 0{,}87$

EXEMPLO 9

Seções dos circuitos (I), (II) e (III), constituídos por condutores isolados, Cu/PVC, instalados em um mesmo eletroduto aparente de seção circular sobre parede, com temperatura ambiente 40 °C, sendo:

- Circuito (I) → 3F
  Corrente de projeto → $I_{BI} = 85$ A
- Circuito (II) → 3F–N (circuito não-equilibrado)
  Corrente de projeto → $I_{BII} = 100$ A
- Circuito (III) → 2F
  Corrente de projeto → $I_{BIII} = 90$ A

(a) Fatores de correção

Da Tabela 9.8 → $f_1 = 0{,}87$

Da Tabela 9.10 → 4 circuitos (o circuito III é considerado igual a 2 circuitos com 2 condutores carregados cada) → $f_3 = 0{,}65$

Da Expressão 13.17 → $f = 0{,}87 \times 0{,}65 = 0{,}566$

(b) Seções

- Circuito (I)

  Da Expressão 13.19 $I'_{BI} = \dfrac{85}{0{,}566} \cong 150$ A

  Da Tabela 9.4 → $B1/3$ cc – $S = 70$ mm²
  $(\bar{I}_{ZI} = 171\ A)$
  Da Expressão 13.18 → $I_{ZI} = 0{,}566 \times 171 = 96{,}8$ A

- Circuito (II)

  Da Expressão 13.19 → $I'_{BII} = \dfrac{100}{0{,}566} \cong 177$ A

  Da Tabela 9.4 → B1/2 cc – S = 70 mm²
  $\bar{I}_{ZII} = 192$ A
  Da Expressão 13.18 → $I_{ZII} = 0{,}566 \times 192 = 109$ A

- Circuito (III)

  Da Expressão 13.19 → $I'_{BIII} = \dfrac{90}{0{,}566} = 159$ A

  Da Tabela 9.4 → B1/2 cc – S = 70 mm²
  $\bar{I}_{ZIII} = 192$ A
  Da Expressão 13.18 → $I_{ZIII} = 0{,}566 \times 192 \cong 109$ A

EXEMPLO 10

Seção de circuito trifásico destinado a transportar $I_B = 850$ A, utilizando cabos unipolares de cobre com isolação de EPR, três cabos por fase, considerando duas possibilidades: cabos em trifólio (cada trifólio com as três fases), com separação de dois diâmetros externos de cabo entre os trifólios, sobre escada para cabos (horizontais) ou banco de eletrodutos subterrâneo com três eletrodutos ocupados, em cada um as três fases, de acordo com as dimensões indicadas na Tabela 13.3.

- 1ª opção (com $\theta_A = 30$ °C):
  - Da Tabela 9.14, linha 14 → $f_3 = 1{,}0$
  - Da Expressão 13.19: $I'_B = \dfrac{850}{3 \times 1{,}0} \cong 283$ A
  - Da Tabela 9.7: coluna 5 – S = 95 mm² ($I_z = 328$ A)
  - Da Expressão 13.18: $I_Z = 1{,}0 \times 328 = 328$ A
- 2ª opção (com $\theta_A = 20$ °C):
  - Da Tabela 13.3: $f_3 = 0{,}81$
  - Da Expressão 13.19: $I'_B = \dfrac{850}{3 \times 0{,}81} = 349{,}79$ A
  - Da Tabela 9.5: D/3 cc, coluna 13 – S = 240 mm²
    $I_Z = 351$ A
  - Da Expressão 9.18: $I_Z = 0{,}81 \times 351 \cong 284$ A

Critério da queda de tensão

Expressões (ver Seção 9.8)

Queda de tensão para carga concentrada (ver Figura 13.17).

$$\Delta U = t\, I_B\, l \times 10^{-3} (r \cos \Phi + x \operatorname{sen} \Phi) \quad (13.20)$$

$$\Delta U = I_B\, l\, \Delta U^* \times 10^{-3} \quad (13.21)$$

$$\Delta U^*_M = \frac{\Delta U_M}{I_B\, l \times 10^{-3}} \quad (13.22)$$

Queda de tensão considerando cargas distribuídas (ver Figura 13.18).

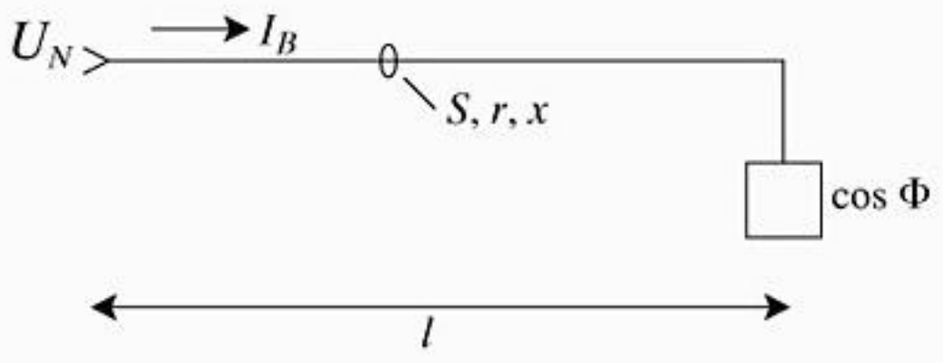


Figura 13.17 ■ Carga concentrada no final do circuito

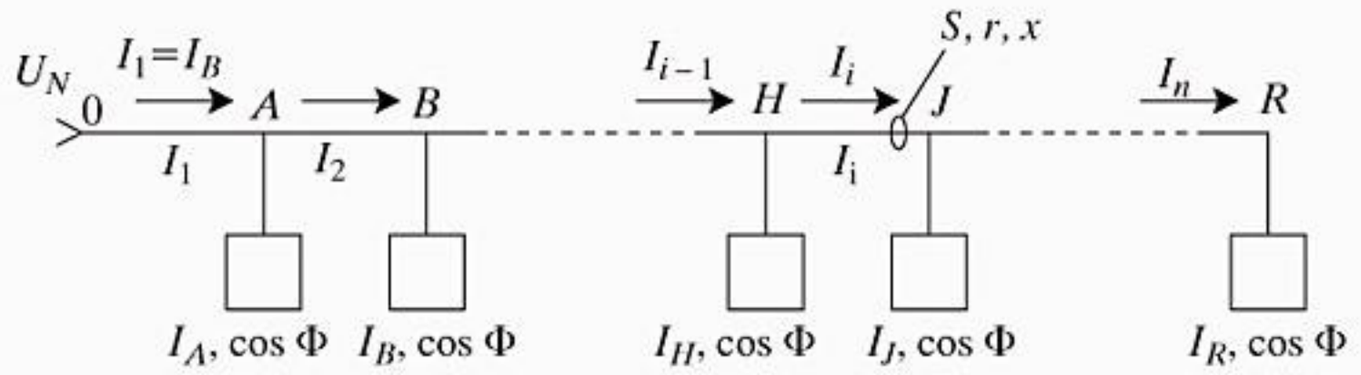


Figura 13.18 ■ Cargas distribuídas no circuito

$$\Delta U = t \times 10^{-3} (r \cos \Phi + x \operatorname{sen} \Phi) \sum_{i=1}^{n} I_i l_i \quad (13.23)$$

$$\Delta U = \Delta U^* \times 10^{-3} \sum_{i=1}^{n} I_i l_i \quad (13.24)$$

$$\Delta U_M^* = \frac{\Delta U_M}{10^{-3} \times \sum_{i=1}^{n} I_i l_i} \quad (13.25)$$

$$\theta_R = \theta_A + (\theta_Z - \theta_A)\left(\frac{I_B}{I_Z}\right)^2 \quad (13.26)$$

$$r = r_{20}(1 + \alpha_{20}\Delta\theta) = r_{20}[1 + \alpha_{20}(\theta_R - 20)] \quad (13.27)$$

$$x = 2\pi f \times 10^{-3}\left(k + 0{,}46 \log \frac{2S_M}{d_c}\right) \quad (13.28)$$

ΔU(V) = queda de tensão do circuito;
l(m) = comprimento do circuito ou do trecho;
r(Ω/km) = resistência dos condutores na temperatura de regime;
x(Ω/km) = reatância do circuito;
ΔU^* (V/A.km) = queda de tensão unitária;
ΔU_M (V) = queda de tensão máxima;
r_{20}(Ω/km) = resistência dos condutores a 20 °C;
α (°C^{-1}) = coeficiente de temperatura;
θ_R (°C) = temperatura de regime dos condutores;
f(Hz) = freqüência;
k = fator usado no cálculo da reatância;
S_M (mm) = distância média geométrica;
dc (mm) = diâmetro do condutor;
$\overline{\Delta U}$(V/A.km) = queda de tensão unitária tabelada.

Tabelas

- Resistências máximas a 20 °C:
  - Condutores de cobre: Tabelas 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12.
  - Condutores de alumínio: Tabelas 5.13, 5.14 e 5.15.
- Quedas de tensão unitária para condutores isolados Cabo Superastic, Cabo Superastic Super e Afumex 750V, linhas tipo A, B e C, fatores de potência 0,8 e 0,95: Tabela 9.19.
- Quedas de tensão unitárias para cabos Sintenax, Sintenax Flex, Voltalene, Eprotenax, Eprotenax Gsette e Afumex 0,6/1 kV, linhas tipo E, F e G, fatores de potência 0,8 e 0,95: Tabela 9.20.
- Valores do fator k para o cálculo da reatância indutiva, x(Ω/km): Tabela 5.17.
- Distâncias médias geométricas para algumas disposições de cabos em circuitos trifásicos, S_M: Tabela 5.18.
- Valores de $(1 + \alpha_{20}\,\Delta\theta)$: Tabela 13.5.

Dados básicos

- Tipo de linha (Tabela 5.28).
- Tipo de condutor:
  - Condutor isolado, cabo unipolar ou cabo tri/tetrapolar.
  - Cobre ou alumínio.
  - Isolação: PVC ou EPR/XLPE.
- Disposição dos condutores ou cabos isolados.
- Tipo de circuito:
  - Monofásico ($t = 1$).
  - Trifásico ($t = 3$).
- Temperatura ambiente, θ_A (°C).
- Para circuitos com carga na extremidade:
  - Corrente de projeto, I_B(A).
  - Comprimento do circuito, l(m).
- Para circuitos com carga distribuída:
  - Correntes nos trechos entre derivações I_i(A).
  - Distância da origem do circuito à primeira derivação e distâncias entre derivações, l_i(m).
- Fator de potência do circuito, cos Φ.
- Tensão nominal do circuito, U_N(V).

EXEMPLO 11

Queda de tensão em circuito trifásico de distribuição, $U_N = 220$ V, constituído por condutores (cabos) isolados, Cu/PVC, com $S = 25\text{mm}^2$, corrente de projeto $I_B = 75$ A, contidos em eletroduto circular não magnético aparente sobre parede, sendo de 60 m o comprimento do circuito e cos $\Phi = 0{,}8$.

- Da Tabela 5.27 e da Tabela 9.4 → B1/3 cc – $I_Z = 89$ A.
- Da Expressão 13.26 →

$$\theta_R = 30 + (70 - 30)\left(\frac{75}{89}\right)^2 = 58{,}4\ ^\circ\text{C}$$

Tabela 13.5 ■ Valores de $(1 + \alpha_{20}\,\Delta\theta)$

Temperatura no condutor – °C	Fator $(1 + \alpha_{20}\,\Delta\theta)$	
	Cobre	Alumínio
20	1,00	1,00
25	1,0196	1,0202
30	1,0393	1,0403
35	1,0590	1,0604
40	1,0786	1,0806
45	1,0982	1,101
50	1,118	1,121
55	1,138	1,141
60	1,157	1,161
65	1,177	1,182
70	1,196	1,204
75	1,216	1,225
80	1,236	1,245
85	1,225	1,265
90	1,275	1,285
95	1,293	1,305
100	1,314	1,325

- Da Tabela 5.8 → $r_{20} = 0{,}727\ \Omega$/km.
- Da Expressão 13.27 → $r = 0{,}727\ [1 + 0{,}004\ (58{,}4 - 20)] = 0{,}838\ \Omega$/km.
- Do catálogo Prysmian (cabo Superastic):
  - $S = 25$ mm².
  - Diâmetro externo : $D_e = 8{,}50$ mm.
  - Diâmetro do condutor sete fios: $d_c = 5{,}85$ mm.
- Da Tabela 5.18, admitindo disposição em trifólio: $S_M = D_e = 8{,}50$ mm.
- Da Tabela 5.17: $k = 0{,}0642$ mH/km.
- Da Expressão 13.28.

$$x = 2\pi \times 60 \times 10^{-3}\left(0{,}0642 + 0{,}46 \log \frac{2 \times 8{,}50}{5{,}85}\right) = 0{,}105\ \Omega/\text{km}$$

- Da Expressão 13.20

$$\Delta U = \sqrt{3} \times 75 \times 60 \times 10^{-3}\,(0{,}838 \times 0{,}8 + 0{,}105 \times 0{,}6) = 5{,}22\ \text{V ou } 2{,}37\%$$

- Da Tabela 9.19 → $\overline{\Delta U} = 1{,}33$ V/A.km.
- Da Expressão 13.21 →

$$\Delta U = 75 \times 60 \times 1{,}33 \times 10^{-3} = 5{,}99\ \text{V}$$

EXEMPLO 12

Dimensionamento de circuito terminal de iluminação em indústria, com as seguintes características:

- Cabos Sintenax unipolares de cobre com isolação de PVC em bandeja perfurada; na maior parte do percurso existem quatro circuitos na bandeja, formando uma camada de cabos contíguos.
- Circuito monofásico.
- $\theta_A = 30$ °C.
- Circuito contendo dez aparelhos de iluminação a vapor de mercúrio, cada um com $P_N = 400$ W, $\eta = 0{,}87$ e $\cos \Phi = 0{,}8$.
- Disposição das cargas/distâncias: Figura 13.19.

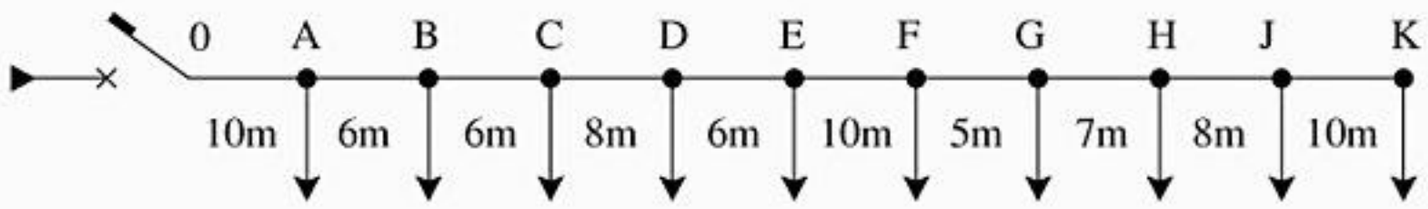


Figura 13.19 ■ Circuito com lâmpadas de vapor de mercúrio distribuídas

Tabela 13.6 ■ Quedas de tensão nos trechos da Figura 13.19

Trecho	I_i [A]	l_i [m]	$I_i \cdot l_i$ [A.m]
OA	26,1	10	261,00
AB	23,49	6	140,94
BC	20,88	6	125,28
CD	18,27	8	146,16
DE	15,66	6	93,96
EF	13,05	10	130,50
FG	10,44	5	52,20
GH	7,83	7	54,81
HJ	5,22	8	41,76
JK	2,61	10	26,10
		$\Sigma I_i\, l_i$	1.072,71

■ $U_N = 220$ V.

(a) Correntes de cada carga e de projeto; seção.

■ Da Expressão 13.3:

$$I_N = \frac{400}{0{,}87 \times 1 \times 220 \times 0{,}8} = 2{,}61 \text{ A}$$

■ $I_B = 10 \times 2{,}61 = 26{,}1$ A.

■ Da Tabela 9.10: quatro circuitos: $f_3 = 0{,}77$.

■ Da Expressão 13.19: $I'_B = \dfrac{26{,}1}{0{,}77} = 33{,}8$ A.

■ Da Tabela 5.28, letra F, e da Tabela 9.6, coluna 4, tem-se que: $S = 4\text{mm}^2$.

(b) Queda de tensão.

■ Pela Tabela 9.20, o valor da queda de tensão unitária é

$$\Delta U = \Delta U^* = 9{,}0 \text{ V/A.km}$$

$$\sum_{i=1}^{10} I_i l_i$$

■ Da Expressão 13.24:

$$\rightarrow \Delta U = 9{,}0 \times 10^{-3} \times 1.072{,}71 = 9{,}65 \text{ V} = 4{,}38\%$$

EXEMPLO 13

Circuito de distribuição que alimenta o quadro de distribuição do apartamento do Exemplo 3, sendo:

■ Condutores isolados, Cu/PVC, em eletroduto circular não magnético embutido em parede de alvenaria.
■ Circuito monofásico, 2F–N, 127/220 V.
■ $\theta_A = 30$ °C.
■ $P_A = 7.514$ W; cos 0 = 0,95.

Determinar a seção mínima como o comprimento máximo do circuito para que a queda de tensão não ultrapasse 3%:

■ Da Expressão 13.13: $I_B = \dfrac{7514}{220 \times 0{,}95} = 35{,}9$ A.

■ Da Tabela 9.4: $B1/3$ cc $\rightarrow S = 6$ mm^2 ($I_Z = \bar{I}_Z = 36$ A).

■ Da Tabela 9.19: $\overline{\Delta U} = \Delta U^* = 7{,}07$ V/A.km.

■ Da Expressão 13.22: com

$$\Delta U = \Delta U_M = 0{,}03 \times 220 = 6{,}6 \text{ V}$$

$$l = \frac{6{,}6}{35{,}9 \times 7{,}07 \times 10^{-3}} = 26 \text{ m}$$

EXEMPLO 14

Cálculo das quedas de tensão no sistema elétrico apresentado na Figura 13.20.

(a) Admitir que as potências e os fatores de potência permaneçam constantes e também que a tensão na origem da instalação tenha o valor nominal.

(b) Trecho $\overline{0A}$:

■ Da Expressão 13.13 $\rightarrow I_{B1} = \dfrac{700 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380} = 1.064$ A

■ Da Expressão 13.21, com

$$\Delta U^* = \overline{\Delta U} = 0{,}091 \text{ V/A.km} \rightarrow \Delta U_1 = 1.064$$
$$\times 15 \times 0{,}091 \times 10^{-3} = 1{,}45 \text{ V ou } 0{,}38\%$$

■ Portanto, $U_A = 380 - 1{,}45 = 378{,}6$ V.

(c) Trecho $\overline{AB}$:

■ $I_{B2} = \dfrac{350 \times 10^3}{2 \times \sqrt{3} \times 378{,}6} = 266{,}9$ A.

■ Da Expressão 13.21, com

$$\Delta U^* = \overline{\Delta U} = 0{,}23 \text{ V/A.km} \rightarrow \Delta U_2 = 266{,}9 \times 150$$
$$\times 0{,}23 \times 10^{-3} = 9{,}21 \text{ V}$$

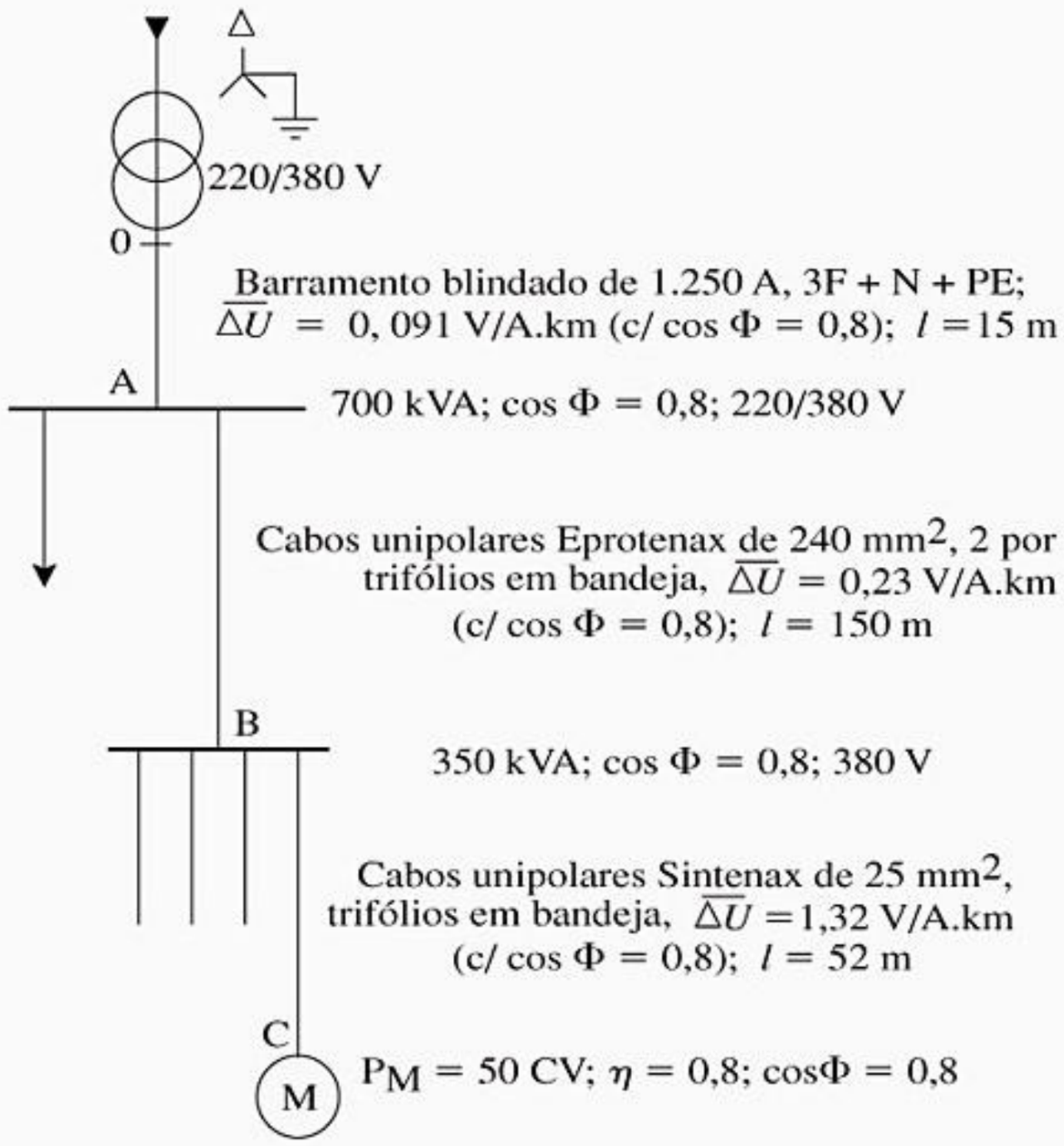


Figura 13.20 ▪ Circuito do Exemplo 14

▪ Portanto, $U_B = 378{,}6 - 9{,}21 = 369{,}4$ V.

(d) Trecho BC:

▪ $I_{B3} = \dfrac{50 \times 736}{\sqrt{3} \times 369{,}4 \times 0{,}8 \times 0{,}8} = 89{,}9$ A.

▪ Da Expressão 13.21, com

$$\Delta U^* = \overline{\Delta U} = 1{,}32 \text{ V/A.km} \rightarrow \Delta U_3 = 89{,}9 \times 52 \times 1{,}32 \times 10^{-3} = 6{,}17 \text{ V}.$$

▪ Portanto, $U_C = 369{,}4 - 6{,}17 = 363{,}2$ V.

(e) A queda total será

$$\Delta U_{oc} = 380 - 363{,}2 = 16{,}8 \text{ V} = 4{,}4\%$$

Critério da proteção contra correntes de sobrecarga

Expressões

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \qquad (13.29)$$

$$I_2 \leq 1{,}45\, I_Z \qquad (13.30)$$

$$I_N \leq \frac{1{,}45}{\alpha} I_Z \qquad (13.31)$$

I_N(A) = corrente nominal ou de ajuste do dispositivo de proteção;

I_2(A) = corrente convencional de atuação (ou de fusão, no caso de fusíveis) do dispositivo de proteção

$$\alpha = \frac{I_2}{I_N}$$

Observações:

- Para disjuntores termomagnéticos, o valor I_N deve referir-se à temperatura prevista para o local da instalação do dispositivo.
- Para disjuntores termomagnéticos com $I_2 \leq 1{,}45\, I_N$ a condição dada na Expressão 13.29 é suficiente.

Tabelas e gráficos

- Correntes convencionais de não fusão e de fusão para fusíveis de baixa tensão (ver Tabela 6.2).
- Correntes convencionais de atuação, de não atuação e tempos convencionais para disjuntores termomagnéticos de acordo com o RTQ da Portaria 243 do Inmetro, a NBR NM 60898 e a NBR IEC 60947-2 (ver Tabela 6.3).
- Tabela para a escolha de disjuntores em função da seção nominal dos condutores e do número de condutores carregados na linha elétrica, para linhas tipo B e C: Tabela 11.3.

EXEMPLO 15

Determinação da corrente nominal de um disjuntor termomagnético em caixa moldada destinado a proteger contra correntes de sobrecarga, um circuito constituído por três condutores isolados, Cu/PVC, de 4 mm², contidos em um eletroduto circular embutido em alvenaria. Admite-se que a temperatura ambiente no local da instalação seja de 30 °C e que não ultrapasse os 40 °C no quadro onde será instalado o disjuntor.

- Da Tabela 5.27, letra B1 e Tabela 9.4: $I_Z = 28$ A.

Utilizando disjuntor com $I_2 \leq 1{,}45\ I_N$:

- Da Expressão 13.29: $I_N \leq 28\ \text{A} \rightarrow I_N = 25$ A.

Utilizando disjuntor com $I_N = 25$ A:

- Da Tabela 6.1: $\alpha = 1{,}75$.
- Da Expressão 13.31: $25 > \dfrac{1{,}45}{1{,}75} \times 28 \rightarrow$ não atende a Expressão 13.31.

Utilizando disjuntor com $I_N = 20$ A ($\alpha = 1{,}75$), da Expressão 13.31:

$$20 < \frac{1{,}45}{1{,}75} \times 28 \rightarrow \text{atende a Expressão 13.31.}$$

Com o gráfico da Figura 13.21 (disjuntor com $I_2 \leq 1{,}45\ I_N$):

- Da Tabela 9.3: $a = 12$ A.
- Da Figura 13.21, entrando com $S = 4$ mm² e $a = 12$, obtém-se o ponto P; a horizontal tirada de P encontra o eixo vertical em um ponto entre os valores 25 a 32 A; escolhe-se o mais baixo menor que I_Z, isto é, $I_N = 25$ A.

EXEMPLO 16

Determinação da corrente nominal de fusível *gI* destinado a proteger contra correntes de sobrecarga um circuito constituído por um cabo tripolar, Cu/EPR/PVC, de 10 mm², instalado sobre parede.

- Da Tabela 5.28, letra C e Tabela 9.5: $I_Z = 71$ A.
- Da Expressão 13.29: $I_N \leq 71\ \text{A} \rightarrow I_N = 63$ A.
- Da Tabela 6.1: $\alpha = 1{,}6$.
- Da Expressão 13.31: $\rightarrow 63 < \dfrac{1{,}45}{1{,}6} \times 71 \rightarrow$ atende a Expressão 13.31.

Recorrendo à Figura 13.22:

- Da Tabela 9.3: $a = 17$ A.
- Da Figura 13.22: $I_N = 63$ A.

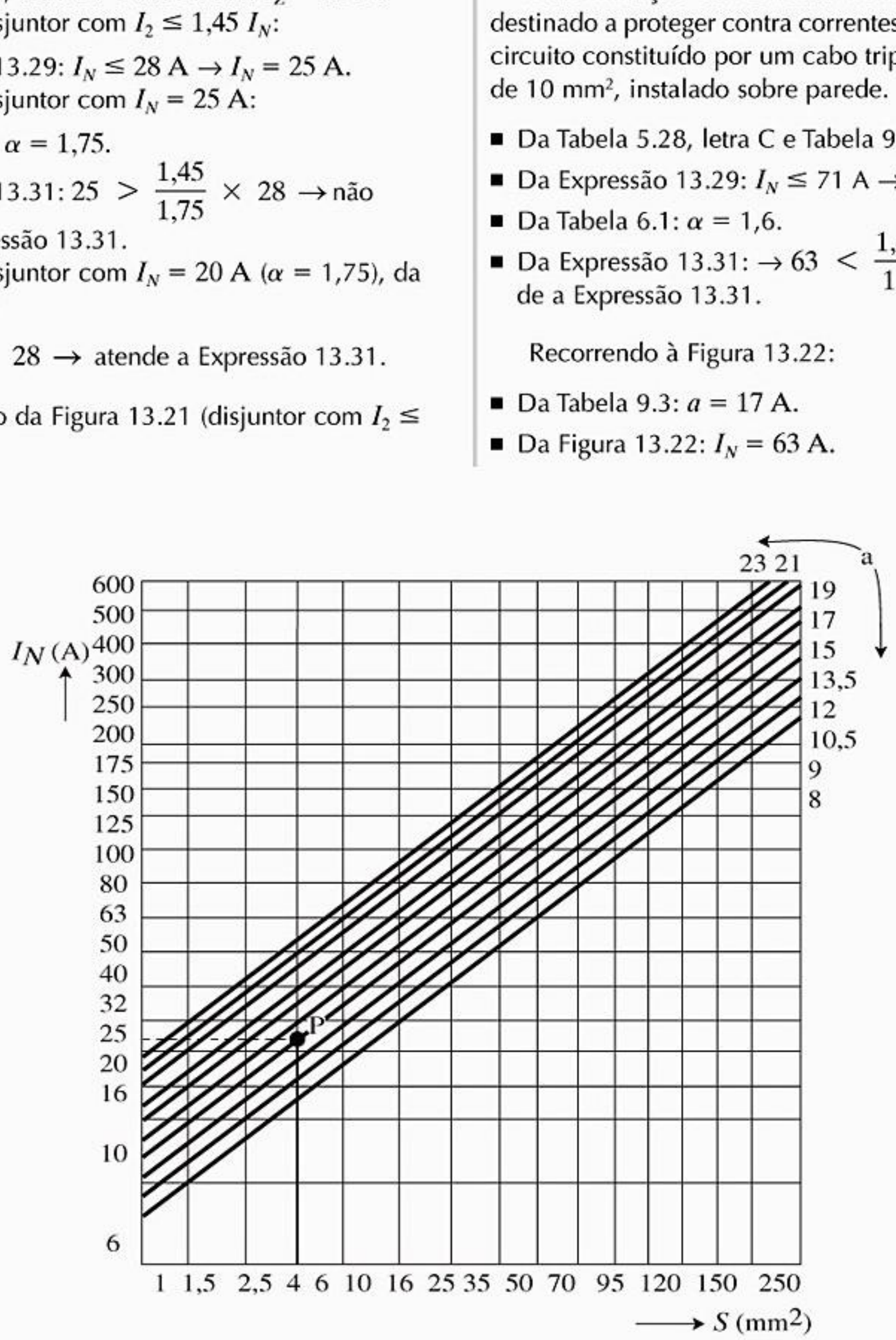


Figura 13.21 ■ Gráfico para a obtenção da corrente nominal de disjuntores termomagnéticos com $I_2 \leq 1{,}45\ I_N$, em função da seção nominal dos condutores e do fator 'a' (Tabela 9.3) (Cortesia da Bticino)

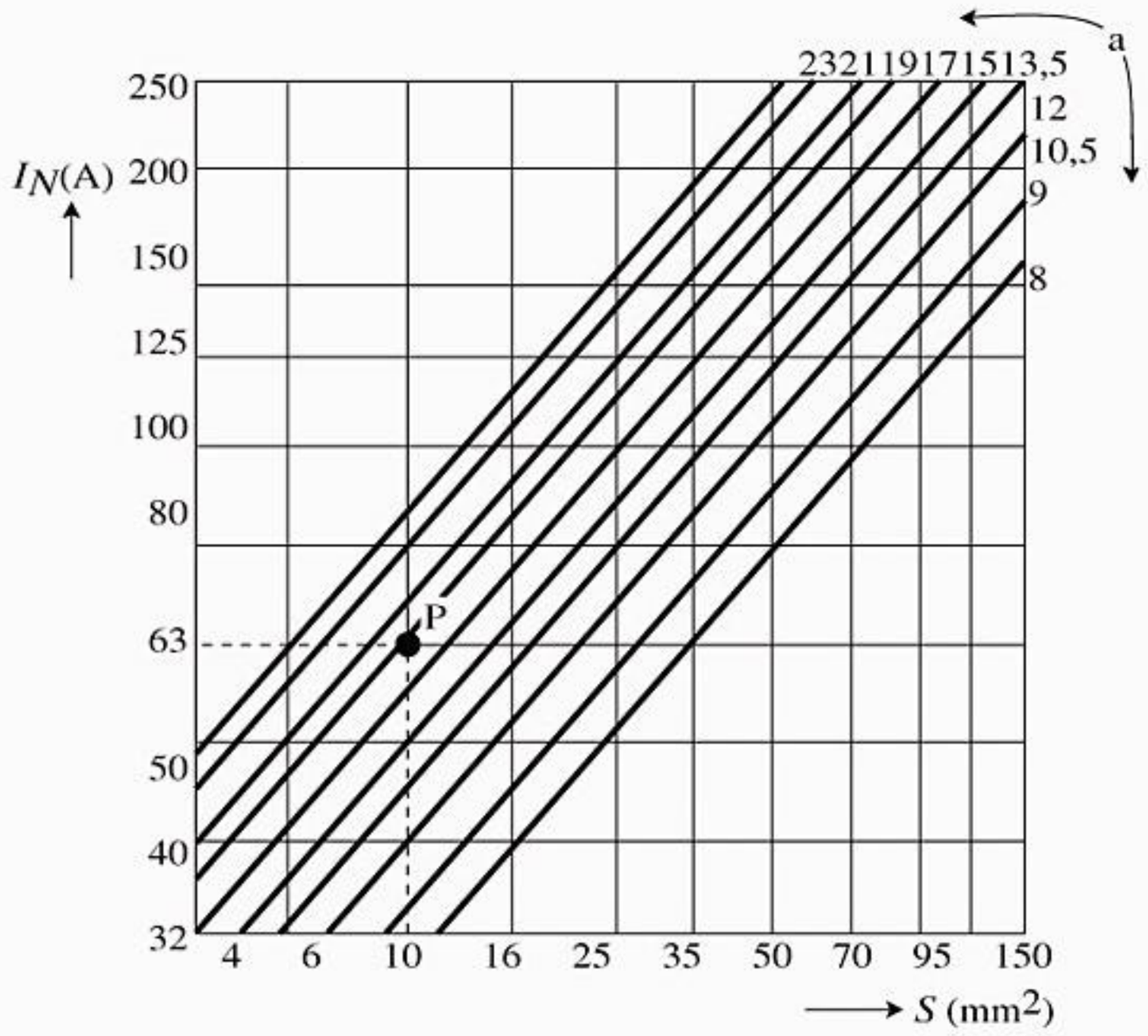


Figura 13.22 ■ Gráfico para a obtenção da corrente nominal de fusíveis tipo gI (com $I_N \geq 32$ A), em função da seção nominal dos condutores e do fator 'a' (Tabela 9.3) (Cortesia da Bticino)

EXEMPLO 17

Determinação da corrente nominal de um disjuntor termomagnético em caixa moldada, conforme a NBR NM 60898, destinado a proteger contra correntes de sobrecarga o circuito do Exemplo 5, constituído por três condutores isolados, Cu/PVC, contidos em um eletroduto circular embutido em alvenaria, no qual existe outro circuito também a dois condutores. Admitir, para a linha, a temperatura ambiente de 30 °C e, para o quadro, a temperatura de 40 °C.

- Do Exemplo 5: $I_B = 16{,}5$ A
- Da Tabela 9.10: $f_3 = 0{,}8$
- Da Expressão 13.19: $I'_B = \dfrac{16{,}5}{0{,}8} = 20{,}6$ A
- Da Tabela 9.4 $S = 2{,}5$ mm² – $I_Z = 21$ A
- Da Expressão 13:18 $I_Z = 0{,}8 \times 21 = 16{,}8$ A

Utilizando:

- A Expressão 13.29: $16{,}5 \leq I_N \leq 16{,}8$ A – não existe disjuntor que atenda a Expressão 13.29; sendo assim, deve-se passar para outro condutor com seção imediatamente superior.
- Passando para $S = 4$ mm², da Tabela 9.4: $I_Z = 28$ A.
- Da Expressão 13.18: $\overline{I_Z} = 0{,}8 \times 28 = 22{,}4$ A.
- Da Expressão 13.29: $16{,}5 \leq I_N \leq 22{,}4$ A; $I_N = 20$ A.

Utilizando a Figura 13.21:

- Da Tabela 9.3: $a = 12$.
- Valor corrigido: $a = 0{,}8 \times 12 = 9{,}6$.
- Entrando na Figura 13.21 com $a = 9{,}6$ e $S = 4$ mm², obtém-se $I_N = 20$ A.

Critério da proteção contra correntes de curto-circuito

Expressões

Na Figura 13.23, apresenta-se uma linha com as correntes de curtos-circuitos nos extremos.

A Figura 13.24 apresenta uma linha com a carga elétrica concentrada no final e sendo protegida por um dispositivo de proteção (DP) no início.

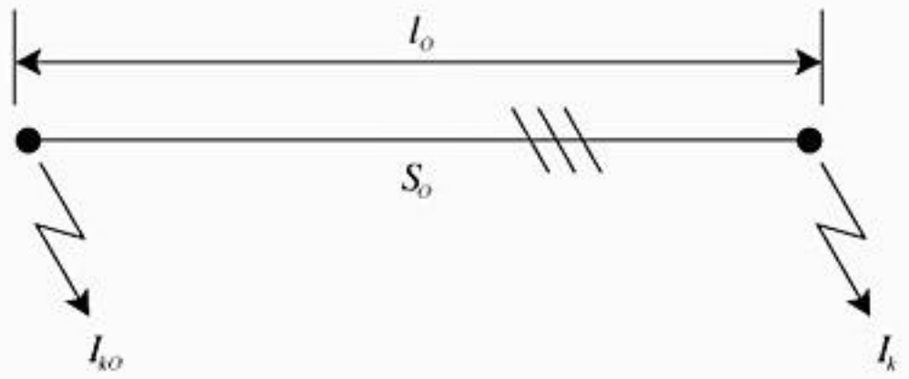


Figura 13.23 ■ Correntes de curtos-circuitos nos extremos de uma linha elétrica

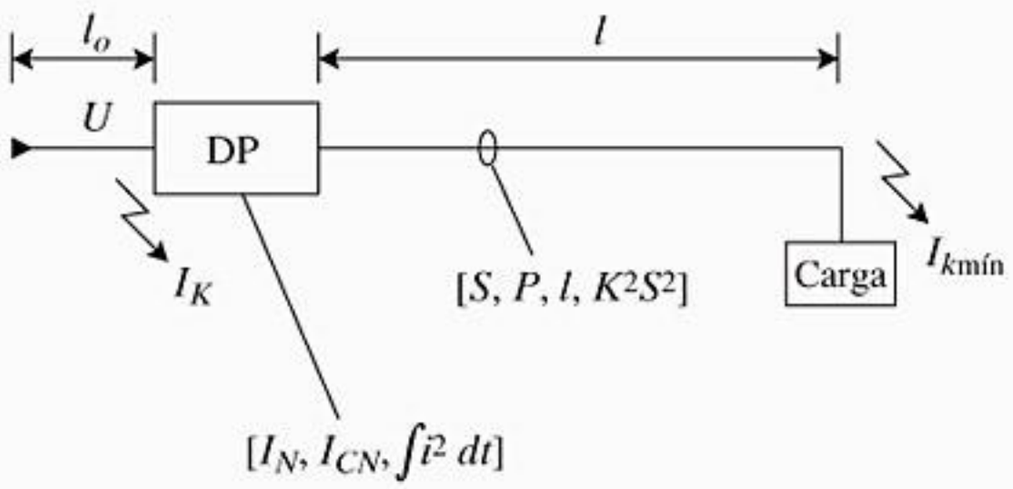


Figura 13.24 ▪ Dispositivo de proteção (DP) no início da linha elétrica

$$I_k = \frac{22}{\sqrt{\frac{484}{I_{k0}^2} + \frac{100 \cos \Phi_{k0}\, l_0}{I_{k0}\, S_0} + \frac{5\, l_0^2}{S_0^2}}} \quad (13.32)$$

$$I_k = \frac{12{,}7}{\sqrt{\frac{162}{I_{k0}^2} + \frac{57 \cos \Phi_{k0}\, l_0}{I_{k0}\, S_0} + 5\frac{l_0^2}{S_0^2}}} \quad (13.33)$$

$$I_{CN} \geq I_k \quad (13.34)$$

$$\int_0^t i^2 \cdot dt \leq K^2S^2 \quad (13.35)$$

$$I_k^2 \cdot t \leq K^2S^2 \quad (13.36)$$

$$I_{kmín} = \frac{0{,}8\, US}{r\, \rho\, 2l} \quad (13.37)$$

$$l_{máx} = \frac{0{,}8US}{2r\rho I_\alpha} \quad (13.38)$$

$$t_{máx} = \frac{4r^2\rho^2K^2l^2}{0{,}64U^2} \quad (13.39)$$

I_k(kA) = corrente de curto-circuito presumida no ponto de aplicação do dispositivo de proteção;
I_{ko}(kA) = corrente de curto-circuito presumida num ponto a montante do ponto de aplicação do dispositivo;
$\cos \Phi_{ko}$ = fator de potência de curto-circuito no ponto correspondente a I_{ko};
S_o(mm²) = seção dos condutores a montante do ponto de aplicação do dispositivo de proteção;
l_o(m) = comprimento do circuito a montante do ponto de aplicação;
I_{CN}(kA) = capacidade de interrupção nominal do dispositivo de proteção;
$\int_0^t i^2 \cdot dt$ = integral de Joule do dispositivo de proteção ($A^2 \cdot s$);

$$K = \begin{cases} 115 \text{ para condutores de cobre com isolação em PVC;} \\ 135 \text{ para condutores de cobre com isolação em EPR ou XLPE;} \end{cases}$$

S(mm²) = seção nominal dos condutores a proteger;
l(m) = comprimento do circuito a proteger;
ρ(Ω.mm²/m) = resistividade (0,027 para o cobre);
$I_{kmín}$(A) = corrente de curto-circuito presumida mínima (no ponto extremo do circuito);

$$r = \begin{cases} 1{,}00 \text{ para } S \leq 120 \text{ mm}^2; \\ 1{,}15 \text{ para } S = 150 \text{ mm}^2; \\ 1{,}20 \text{ para } S = 185 \text{ mm}^2; \\ 1{,}25 \text{ para } S = 240 \text{ mm}^2; \end{cases}$$

U(V) = tensão nominal do circuito a proteger; se o circuito possuir neutro será a tensão entre fase e neutro;
I_α(A) = corrente correspondente à interseção entre a curva $t = f(I)$ dos condutores e a curva de atuação (limite superior) do dispositivo de proteção;
$l_{máx}$(m) = comprimento máximo do circuito protegido pelo dispositivo de proteção;
$t_{máx}$(s) = tempo máximo de atuação do dispositivo de proteção.

Observação:

- As expressões 13.32 e 13.33 são aplicáveis para $S \leq 50$ mm²; a Expressão 13.32 aplica-se a circuitos com 220/380 V, e a Expressão 13.33, a circuitos com 127/220 V.
- A Expressão 13.36 aplica-se a curtos-circuitos nos quais a assimetria da corrente não seja significativa, qualquer que seja a duração do curto, e para curtos-circuitos assimétricos com duração entre 0,1 e 5 segundos.
- Quando o dispositivo de proteção está devidamente coordenado com os condutores quanto à proteção contra correntes de sobrecarga, não é necessário certificar a condição dada pela Expressão 13.35 ou pela Expressão 13.36.
- Geralmente, para os fusíveis, não é necessário verificar a condição dada pela Expressão 13.35 ou pela Expressão 13.36, bastando verificar-se a condição dada pela Expressão 13.39.
- No caso de circuito trifásico com seção de neutro igual a $S/2$, a corrente $I_{kmín}$ dada pela Expressão 13.37 deve ser multiplicada por 0,67.

Tabelas e gráficos

- Diagramas para a obtenção rápida da corrente de curto-circuito presumida (correspondente às expressões 13.32 e 13.33: figuras 10.17 e 10.18.
- Valores de I^2t de condutores de cobre: Tabela 11.2.
- Curvas $(I^2t) = f(I)$ para condutores de cobre: Figura 11.7.

- Curvas $(I^2t) = f(I)$ para disjuntores:
  - Disjuntores rápidos: Figura 11.10.
  - Disjuntores limitadores: Figura 11.11.
- Fator para a determinação da corrente nominal máxima de fusíveis tipo 'gG': Tabela 13.1.
- Zonas tempo-corrente para fusíveis tipo 'gG': figuras 6.14 e 6.15.
- Características tempo-corrente de disjuntores:
  - conforme NBR NM 60898: Figura 6.23.
- Relação entre I_{ko} e cos Φ_{ko}: Tabela 10.10.
- Características nominais de disjuntores: conforme 6.4.4.
- Fator para a determinação da corrente nominal máxima de fusíveis gG na proteção de motores contra correntes do curto-circuito: Tabela 13.1.

EXEMPLO 18

Verificação da aplicabilidade de um disjuntor bipolar NBR NM 60898 de 36 A na situação mostrada na Figura 13.25.

- A corrente no ponto de aplicação do disjuntor será, da Expressão 13.32, considerando o valor de cos Φ_{ko} obtido da Tabela 10.10

$$I_k = \frac{22}{\sqrt{\frac{484}{12^2} + \frac{100 \times 0{,}3 \times 65}{12 \times 10} + 5\frac{65^2}{10^2}}} = 1{,}44 \text{ kA}$$

- Escolhemos um disjuntor que apresenta, em 220 V, $I_{CN} = 5$ kA (conforme 6.4.4), atendendo, portanto, à condição dada pela Expressão 13.34, pois

$$5 > 1{,}44 \text{ kA}$$

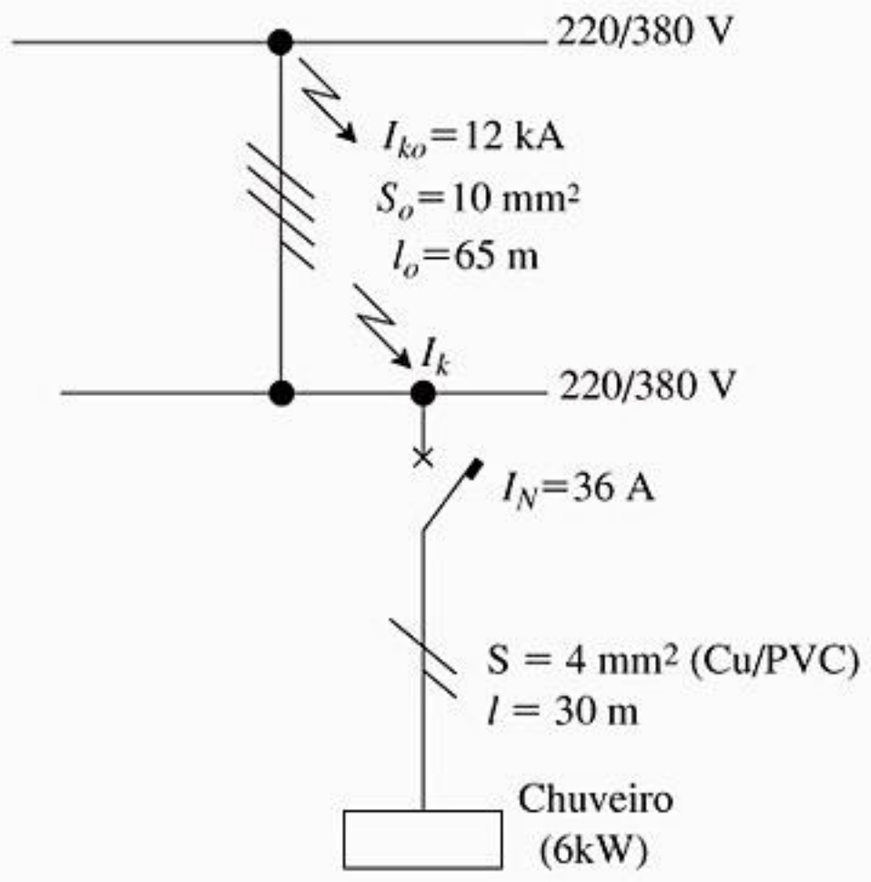


Figura 13.25 ■ Diagrama do circuito do Exemplo 18

- Na Figura 13.26, verifica-se que o disjuntor NBR NM 60898 de 36 A cumpre a condição da Expressão 13.35, com efeito

para $S = 4 \text{ mm}^2 \rightarrow K^2S^2 = 211.600\ A^2s$ e

para $I_N = 36 \text{ A} \rightarrow \int_0^t i^2dt \cong 12.000\ A^2s$

(*d*) A corrente de curto-circuito presumida mínima será, da Expressão 13.37

$$I_{kmín} = \frac{0{,}8 \times 220 \times 4}{1 \times 0{,}027 \times 2 \times 30} \cong 435 \text{ A}$$

(*e*) Na Figura 13.25, verifica-se que o disjuntor também protege os condutores no caso de $I_{kmín}$; com efeito

$$(I^2t)_{disj} \cong 3.500\ A^2s$$

$$(I^2t)_{cond} \cong 30.000\ A^2s$$

Pode-se, também, verificar a condição de proteção para $I_{kmín}$ de outra maneira, como mostrado a seguir.

(*f*) O tempo máximo de atuação do dispositivo será, da Expressão 13.39

$$t_{máx} = \frac{4 \times 1 \times 0{,}027^2 \times 115^2 \times 30^2}{0{,}64 \times 220^2} = 1{,}12 \text{ s}$$

(g) Entrando na curva característica do disjuntor (ver Figura 6.23) com $I_{kmín}/I_N = \frac{435}{36} \cong 12$, a atuação dá-se entre 0,005 e 0,02 segundos (0,02 < 1,12 s).

EXEMPLO 19

Verificação da aplicabilidade de um dispositivo fusível com fusíveis gG na proteção contra correntes de curto-circuito no circuito indicado na Figura 13.27.

- A condição dada na Expressão 13.34 é atendida, posto que 20 > 7 kA.
- A condição dada na Expressão 13.35, pode ser omitida.
- A corrente de curto-circuito presumida mínima será, da Expressão 13.37

$$I_{kmín} = \frac{0{,}8 \times 380 \times 2{,}5}{1 \times 0{,}027 \times 2 \times 25} \cong 563 \text{ A}$$

- O tempo máximo de atuação do fusível será, da Expressão 13.39

$$t_{máx} = \frac{4 \times 1 \times 0{,}027^2 \times 115^2 \times 25^2}{0{,}64 \times 380^2} = 0{,}26 \text{ s}$$

- Na Figura 6.15, verificamos que, para $I_{kmín} = 563$ A, o fusível de $I_N = 32$ A atuará em um tempo máximo de 0,02 s < 0,26 s, atendendo a condição.

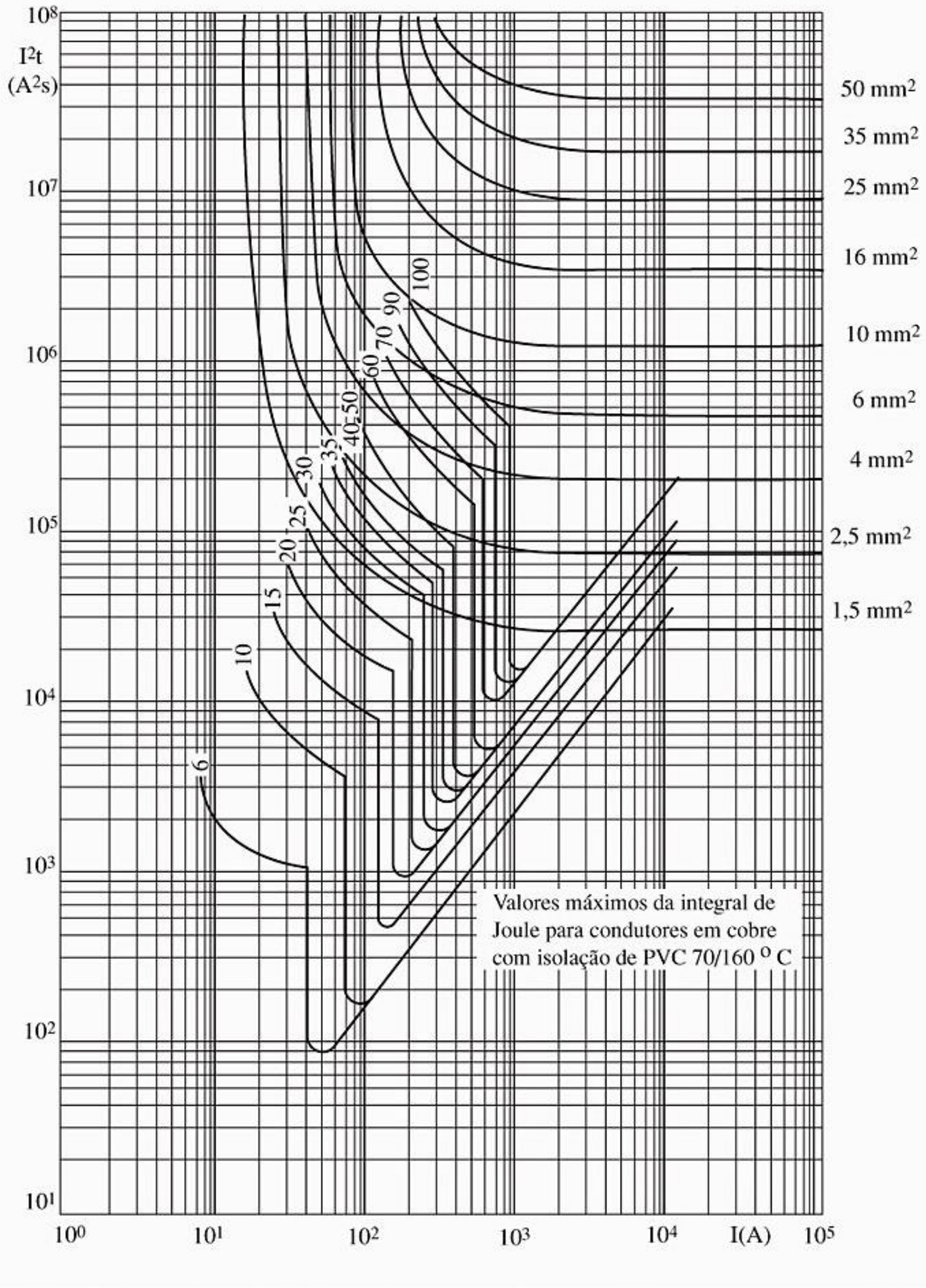


Figura 13.26 ■ Característica de atuação térmica a quente (θ_o = 70 °C) I_k = corrente de curto-circuito presumida simétrica (valor eficaz em A) I^2t = integral de Joule em A^2s (Cortesia da Bticino)

■ Na Tabela 13.1 verifica-se que, para $I_P = 76$ A, a corrente nominal máxima de fusível gG, que proteje o motor contra correntes de curto-circuito será

$$I_N = 0{,}4 \times 76 = 30{,}4 \text{ A}$$

o que mostra que o fusível (previamente) escolhido de $I_N = 32$ A atende a condição.

Seções dos condutores neutro e de proteção

Os condutores neutros devem ser dimensionados conforme Seção 9.9, e os condutores de proteção, conforme Seção 8.7.

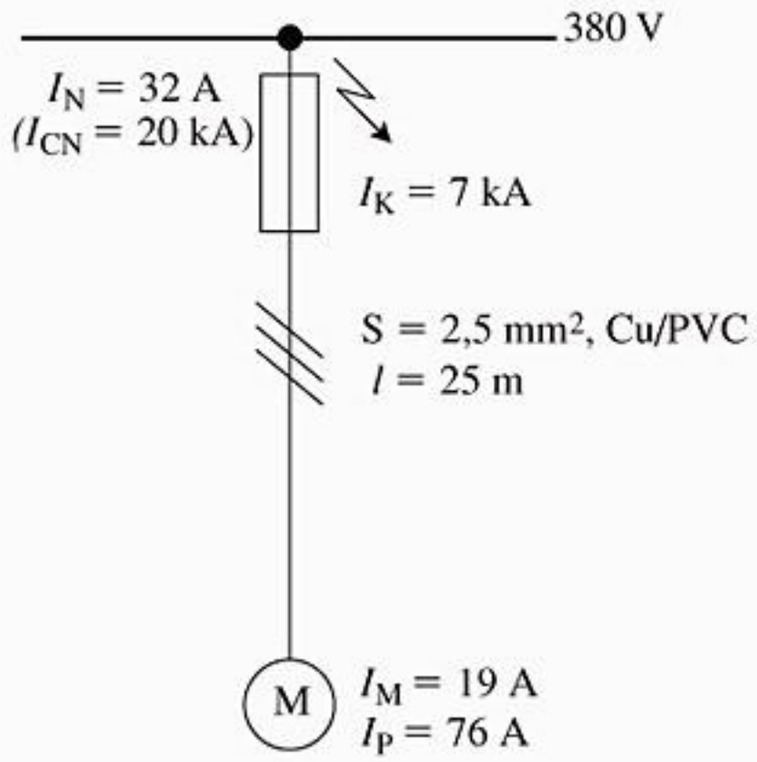


Figura 13.27 ■ Circuito do Exemplo 19

EXEMPLO 20

Alimentação de quadro de distribuição de administração de prédio; circuito 3F-N, 127/220 V. Cargas indicadas a seguir. Admitir condutores isolados, Cu/PVC, em eletroduto circular embutido em alvenaria e queda de tensão desprezível. Considerar, ainda, que a taxa de 3ª harmônica e múltiplas é menor que 15% e que o neutro é protegido contra sobrecorrentes (ver Seção 9.9).

- A potência de alimentação (admitindo fatores de demanda iguais à unidade) será

$$P_A = 3.280 + 2.840 + 2.920 + 12.000 + 12.000 + 10.200 = 43.240 \text{ W}$$

- Em nenhuma fase se tem potência superior a 10% de P_A, isto é, 4.324 W, ligada ao neutro (P = P1 + P2 + P3 + P12 + P23 + P31). Ver Figura 13.28.
- A corrente de projeto será, da Expressão 13.13, admitindo-se cos $\Phi = 0{,}95$.

$$I_B = \frac{43.240}{\sqrt{3} \times 220 \times 0{,}95} = 119{,}5 \text{ A}$$

- Desprezando a queda de tensão, tem-se para os condutores fase, da Tabela 9.4, B_1/3 cc: $S = 50$ mm².
- A Tabela 9.22 indica, nesse caso, para o condutor neutro, a *seção mínima* de 25 mm².
- A pior condição para o neutro é estarem ligadas *apenas* as cargas de L_1 (maior carga total).

Nessas condições, a corrente de neutro seria de

$$I_N = \frac{3.280}{1 \times 127 \times 1} = 25{,}8 \text{ A}$$

e, da Tabela 9.4 (B1/2 cc), verifica-se que seria suficiente uma seção de 4 mm², inferior à seção mínima que será a adotada, ou seja, $S_N = 25$ mm².

Tabela 13.7 ■ Tabela de cargas

	Potências (W)					
	$L_1 - N$	$L_2 - N$	$L_3 - N$	$L_1 - L_2$	$L_2 - L_3$	$L_1 - L_3$
Iluminação da escada[1]	600	–	–	–	–	–
Iluminação do hall[1]	–	920	–	–	–	–
Iluminação do salão[1]	–	–	720	–	–	–
Iluminação do WC, vestiário, copa e cozinha[1]	1.000	–	-	–	–	–
Iluminação externa[1]	–	1.200		–	–	–
Iluminação do jardim[1]	–	-	1.400	–	–	–
Tomadas da escada	–	240	-	–	–	–
Tomadas do hall	–	480	-	–	–	–
Tomadas do salão	–	–	800	–	–	–
Tomadas do WC, vestiário, copa e cozinha	1.680	–	-	–	–	–
Chuveiro	–	–	-	6.000	–	–
Chuveiro	–	–	-	–	6.000	–
Chuveiro	–	–	-	–	–	6.000
Chuveiro	–	–	-	6.000	–	–
Chuveiro	–	–	-	–	6.000	–
Torneiras	–	–	-	–	–	4.200
TOTAIS	3.280	2.840	2.920	12.000	12.000	10.200

Nota:
1. Iluminação incandescente.

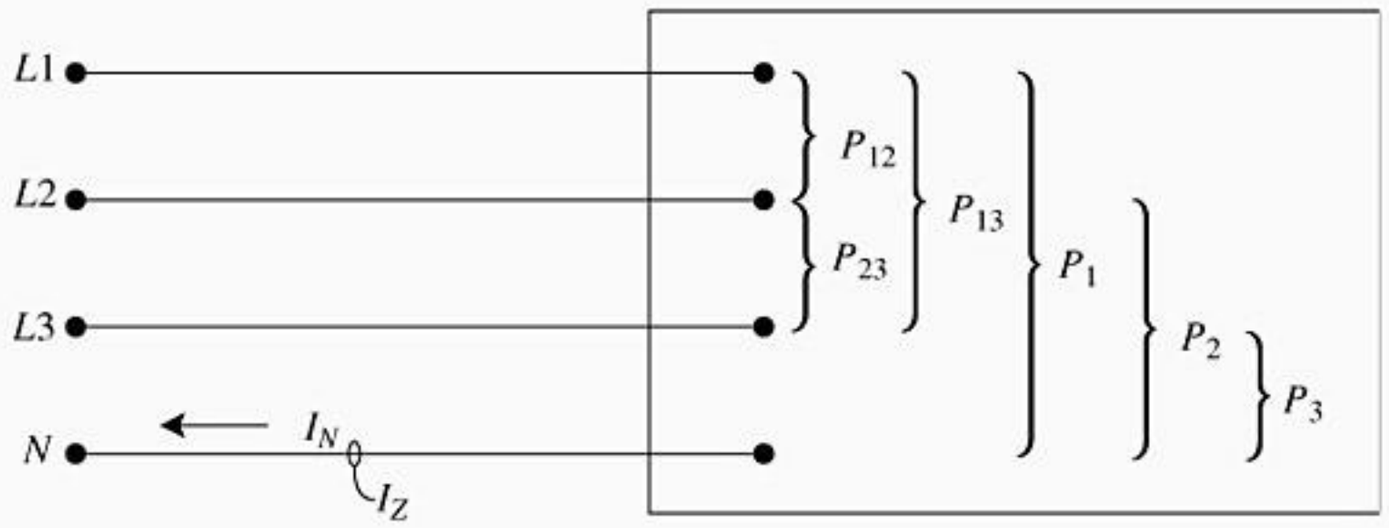


Figura 13.28 ■ Representação simbólica da carga

- Da Tabela 8.7, verifica-se que, para o condutor de proteção, a seção mínima será de $S_{PE} = 25\ mm^2$
- Na hipótese de utilizar um condutor PEN (3F-PEN), sua seção, que deverá atender tanto às condições de neutro como às condições de condutor de proteção, será logicamente $S_{PEN} = 25\ mm^2$.

Critério da proteção contra contatos indiretos

Expressões

A Figura 13.29 apresenta um circuito genérico com carga no terminal.

- Esquema TN:

$$l_{máx} = \frac{cU_0}{\rho I_a(1+m)} S_L \qquad (13.40)$$

$$U_B = cU_0 \frac{m}{1+m} \qquad (13.41)$$

- Esquema IT:
  - Sem neutro distribuído

$$l_{máx} = 0{,}5\sqrt{3}\,\frac{cU_0}{\rho\, I_a(1+m)} S_L \qquad (13.42)$$

$$U_B = 0{,}5\sqrt{3}\,\frac{c\,U_0}{1+m} \qquad (13.43)$$

  - Com neutro distribuído

$$l_{máx} = 0{,}5\,\frac{cU_0}{\rho\, I_a(1+m)} S_L \qquad (13.44)$$

$$U_B = 0{,}5\,\frac{cU_0}{1+m} \qquad (13.45)$$

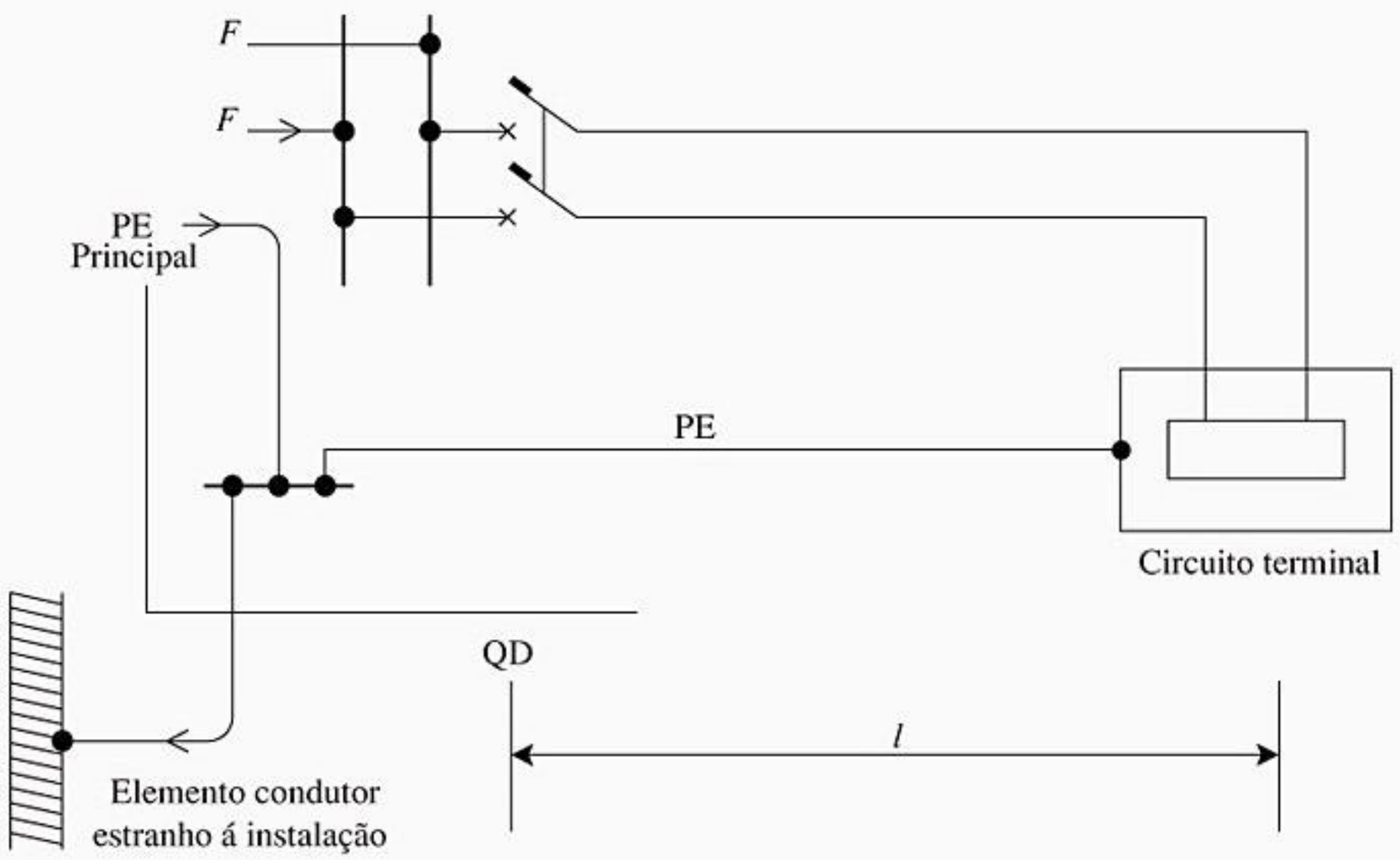


Figura 13.29 ■ Circuito genérico com condutor de proteção PE

l(m) = comprimento do circuito terminal;
$l_{máx}$(m) = comprimento máximo do circuito terminal;
U(V) = tensão de linha;
U_o(V) = $U/\sqrt{3}$;
S_L(mm²) = seção dos condutores vivos;
S_{PE}(mm²) = seção do condutor de proteção;
$m = S_L/S_{PE}$;
c = fator que pode variar de 0,6 a 1, geralmente igual a 0,8;
U_B(V) = tensão de contato presumida;
ρ (Ω.mm²/m) = resistividade do condutor; para o cobre, igual a 0,0255 Ω.mm²/m;
I_a(A) = corrente que assegura a atuação do dispositivo de proteção em um tempo t que pode ser:

- Igual a 5 s quando o circuito se enquadra na situação 1 e só alimenta equipamentos fixos.
- Obtido da curva de segurança nos demais casos.

Tabelas e gráficos

- Tabela 8.2.
- Comprimentos máximos de circuitos terminais protegidos por disjuntores termomagnéticos contra contatos indiretos no esquema TN: Tabela 8.4.

EXEMPLO 21

Circuito terminal de iluminação industrial, monofásico, FN, esquema TN, Situação 2, com:

- $I_B = 31{,}3$ A.
- Cabos unipolares Cu/PVC/PVC de 6 mm² em bandeja; agrupamento com outros circuitos tal que $I_Z = 34{,}5$ A.
- $U_N = U_o = 127$ V.
- Proteção contra sobrecorrentes com disjuntor de $I_N = 32$ A.
- $l = 54$ m.

(a) Da Tabela 8.7 → $S_{PE} = 6$ mm² e, portanto, m = 1.
(b) Da Expressão 13.41 adotando

$$c = 0{,}8 \rightarrow U_B = 0{,}8 \times 127 \times \frac{1}{1+1} = 50{,}8 \text{ V}$$

(o mesmo valor pode ser obtido na Tabela 8.3).
(c) $U_o = 127$ V e $t = 0{,}35$ s (ver Tabela 8.2).
(d) Da curva do disjuntor (Figura 6.23), entrando com $t = 0{,}35$ s, obtém-se $I_a = 7{,}2 \times 32 = 230{,}4$ A.
(e) Da Expressão 13.40, tem-se

$$l_{máx} = \frac{0{,}8 \times 127}{0{,}0225 \times 230{,}4 \times 2} \times 6 = 58{,}7 \text{ m}$$

(f) Nessas condições, sendo $l = 54$ m, o circuito está protegido contra contatos indiretos pelo disjuntor.

13.3 Critério econômico para dimensionamento das linhas elétricas

Introdução

A aplicação dos critérios usuais de dimensionamento dos cabos de potência constituintes das linhas elétricas de média e de baixa tensão resulta na mínima seção nominal admissível, isto é, na menor seção nominal que atende a todos os critérios técnicos utilizados. É a chamada *seção técnica* (S_T). Ao conduzir uma corrente, os cabos de uma linha consomem parte da energia transportada. São, principalmente, as perdas Joule, inversamente proporcionais à seção dos cabos. A seção técnica, que reduz ao mínimo o investimento inicial, representado pelo custo dos cabos e por sua instalação (incluindo os condutos ou outros elementos empregados), não considera o custo das perdas de energia ao longo da vida útil da instalação, que podem ser bastante significativos.

Atualmente, o uso racional da energia – a conservação de energia – é uma obrigação universal, seja do ponto de vista puramente econômico, seja envolvendo também o aspecto ecológico, o aspecto da capacidade de geração ou transmissão de energia. Por outro lado, estão sendo utilizados, hoje em dia, na fabricação dos cabos, materiais isolantes com temperaturas de serviço mais elevadas, como é o caso do EPR e do XLPE, cuja temperatura máxima para serviço contínuo é de 90 °C, o que significa maiores perdas Joule. Nessas condições, considerando também os custos crescentes da energia elétrica, deve-se observar, além dos critérios tradicionais, o lado econômico no dimensionamento dos cabos. Trata-se de reduzir ao mínimo não apenas o custo inicial, e sim a soma deste com o custo das perdas de energia durante sua vida útil. A escolha de uma seção superior à seção técnica significa redução de perdas, para uma dada quantidade de energia a ser transmitida, podendo constituir-se na solução mais adequada.

Quando, no projeto de um circuito, for previsto seu funcionamento em regime contínuo, com uma corrente que não apresente grandes variações e quando predominar no dimensionamento (técnico) o critério da capacidade de condução de corrente, a adoção de uma seção nominal superior à seção técnica, obtida a partir de um procedimento consistente, certamente resultará em redução de custos. Isso pode não ser verdade quando, no dimensionamento técnico, predominar outro critério (por exemplo, o da queda de tensão), ou seja, quando a seção técnica for superior à que atenderia apenas às exigências do aquecimento normal dos condutores, ou quando a corrente apresentar variações consideráveis ao longo de um período de trabalho da linha elétrica.

O chamado *critério econômico* tem sido aplicado, embora com freqüência bem inferior à desejável, quase

exclusivamente a sistemas de distribuição em média tensão, resultando, geralmente, em economia de energia e em reduções de custo bastante significativas. Em sistemas de baixa tensão, o uso desse critério pode ser bastante vantajoso em instalações industriais, comerciais e institucionais, considerando principalmente circuitos de distribuição com seções iguais ou superiores a 25 mm².

É importante acrescentar que o dimensionamento dos cabos de potência de um circuito pelo critério econômico, admitindo que a seção obtida seja superior à seção técnica, traz algumas vantagens adicionais, como o aumento da vida útil dos cabos e seu melhor comportamento diante das sobrecorrentes e das quedas de tensão.

No estudo que se segue, foi utilizado o documento IEC 60287-3-2: Electric cables – Calculation of the current rating – Part 3: Sections on operating conditions – Section 2: Economic optimization of power cable size.

Equacionamento básico

Considere uma linha elétrica constituída por condutores isolados por cabos unipolares ou multipolares e com custo total C, incluindo a compra e a instalação dos cabos, bem como sua operação durante uma vida (econômica) de N anos. Considerando-se valores referidos à data da instalação (ver Quadro 13.4) e expressos em uma dada unidade monetária u, pode-se escrever:

$$C = C_I + C_J \tag{13.46}$$

onde:

- C_I é o custo do comprimento instalado de linha (u).
- C_J é o custo das perdas Joule durante uma vida de N anos, em valores atuais (u).

Diz o citado documento IEC:

"A fim de combinar os custos de compra e instalação com os das perdas de energia que ocorrem durante a vida econômica de um cabo, é necessário demonstrá-los em valores econômicos comparáveis, isto é, em valores referidos à mesma época. É conveniente utilizar a data de compra da instalação como referência chamando-a de 'atual'. Os custos 'futuros' das perdas de energia são então convertidos a seus equivalentes valores atuais."

O custo C_J pode ser dividido em duas partes, uma correspondendo às perdas de energia consumida (kWh), C_{JE}, e outra correspondendo à capacidade adicional de fornecimento para prover tais perdas (kW), C_{JD}, isto é

$$C_J = C_{JE} + C_{JD} \tag{13.47}$$

As perdas de energia durante o primeiro ano (p_{E1}), em kWh, serão dadas por:

$$p_{E1} = I_M^2 \cdot \overline{R} \cdot l \cdot n \cdot H \times 10^3 \tag{13.48}$$

onde:

- I_M é a máxima corrente (valor eficaz) prevista para circular por um condutor-fase do circuito, durante o primeiro ano (A).
- $\overline{R}$ é a resistência em corrente alternada de um condutor-fase por unidade de comprimento (Ω/km).
- l é o comprimento da linha (km).
- n é o número de condutores-fase da linha, ou seja, no caso mais geral, o produto do número de fases pelo número de condutores por fase.
- H é o número de horas por ano em que deve circular a corrente I_M para produzir as mesmas perdas que a corrente real (de valor eficaz) variável, $I(t)$ (h/ano).

A resistência $\overline{R}$ deve ser considerada a uma temperatura (θ_m) inferior à temperatura máxima para serviço contínuo (θ_z), admitindo que a seção econômica seja inferior à determinada considerando apenas o aquecimento normal. Considera-se, em princípio, chamando de θ_A a temperatura ambiente, que:

$$\theta_m = \frac{\theta_Z - \theta_A}{3} + \theta_A \tag{13.49}$$

Por sua vez, o tempo H é definido pela expressão

$$H = \int_0^{8.760} \frac{I(t)^2}{I_M^2}\, dt = \frac{1}{I_M^2} \int_0^{8.760} I(t)^2 . dt \tag{13.50}$$

O custo das perdas de energia no primeiro ano (C_{JE1}) será, da Expressão 13.48

$$C_{JE1} = I_M^2 \cdot \overline{R} \cdot l \cdot n \cdot H \cdot e \times 10^{-3} \tag{13.51}$$

sendo o custo da energia (u/kWh).

O custo da capacidade adicional para prover as perdas será, no primeiro ano

$$C_{JD1} = I_M^2 \cdot R \cdot l \cdot n \cdot d \times 10^{-3} \tag{13.52}$$

onde d é o custo da demanda (u/kW.ano).

Assim, das expressões 13.51 e 13.52, o custo total das perdas no primeiro ano será

$$C_{J1} = I_M^2 \cdot R \cdot l \cdot n\,(H \cdot e + d) \times \frac{10^{-3}}{1 + \dfrac{t}{100}} \tag{13.53}$$

considerando os custos pagos ao final do ano e convertidos a valores atuais, sendo t (em %) a taxa anual de juros, não incluídos os efeitos da inflação.

Para os N anos, o custo total em valores atuais será

$$C_J = I_M^2 \cdot R \cdot l \cdot n(H \cdot e + d) \times \frac{Q \times 10^{-3}}{1 + \dfrac{t}{100}} \tag{13.54}$$

sendo Q um coeficiente que leva em consideração o aumento de carga, a, o aumento do custo de energia, b, (a e b em %, sendo que b não considera o efeito da inflação) e a taxa de juros, valendo

$$Q = \sum_{j=1}^{N} r^j - 1 = \frac{1 - r^N}{1 - r} \qquad (13.55)$$

sendo

$$r = \frac{\left(1 + \frac{a}{100}\right)^2 \left(1 + \frac{b}{100}\right)}{1 + \frac{t}{100}} \qquad (13.56)$$

Fazendo, para simplificar a Expressão 13.54

$$M = n(H \cdot e + d) \times \frac{Q}{1 + \frac{t}{100}} \qquad (13.57)$$

assim, obtém-se

$$C_J = I_M^2 \cdot \overline{R} \cdot l \cdot M \times 10^{-3} \qquad (13.58)$$

Pode-se escrever para o custo total C, da Expressão 13.46 e da Expressão 13.58

$$C = C_l + I_M^2 \cdot \overline{R} \cdot l \cdot M \times 10^{-3} \qquad (13.59)$$

A seção econômica, S_E, para os cabos da linha elétrica considerada será a seção S que minimiza a função

$$y = C_l(S) + I_M^2 \cdot \overline{R}(S) \cdot l \cdot M \times 10^{-3} \qquad (13.60)$$

onde $C_l(S)$ e $\overline{R}(S)$ são expressos em função da seção dos cabos.

Adotando um modelo linear para o custo inicial e considerando o tipo de cabo e a instalação, pode-se escrever

$$C_l(S) = l(F + GS) \qquad (13.61)$$

sendo

- G o componente variável do custo relacionado com a seção do cabo (u/km.mm²).
- F o componente constante do custo, não afetado pela seção do cabo (u/km).

O componente variável G pode ser escrito sob a forma

$$G = \frac{P_2 - P_1}{S_2 - S_1} \qquad (13.62)$$

sendo P_1 e P_2 os custos, em u/km, dos cabos da linha, de seções S_1 e S_2, respectivamente, e de sua instalação (aí incluindo o custo dos condutores *e/ou* outros elementos utilizados).

Por sua vez, a resistência $\overline{R}(S)$ pode ser dada pela expressão

$$\overline{R}(S) = \frac{1}{S} \cdot \rho_{20} \cdot B\,[1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)] \qquad (13.63)$$

sendo

$$B = (1 + y_s + y_p)(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \qquad (13.64)$$

e

- ρ_{20} a resistividade do metal condutor a 20 °C, considerando-se valores de 18,35 Ω.mm²/km para o cobre e de 30,3 Ω.mm²/km para o alumínio, valores um pouco superiores aos reais, adotados pela IEC para permitir o cálculo da resistência dos condutores diretamente a partir da seção nominal (e não a partir da seção real).
- α_{20} o coeficiente de temperatura a 20 °C, de valor 3,93 × 10⁻³ °C⁻¹ para o cobre e 4,03 × 10⁻³ °C⁻¹ para o alumínio.
- y_s e y_p fatores relacionados com os efeitos pelicular e de proximidade.
- λ_1 e λ_2 fatores de perda na blindagem e na armação do cabo.

O valor da seção econômica, S_E, em mm², será obtido derivando a Expressão 13.60 e igualando a zero. Obtém-se, considerando as expressões 13.61 e 13.63

$$S_E = \sqrt{\frac{1}{G} \times I_M^2 \cdot M \cdot \rho_{20} \cdot B[1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)] \times 10^{-3}} \qquad (13.65)$$

Cada seção de um cabo possui uma 'faixa econômica' de correntes para uma dada condição de instalação. O limite superior de corrente para uma dada seção é o limite de corrente para a seção imediatamente superior. Assim, considerando a Expressão 13.59, pode-se escrever

$$I_M = \sqrt{\frac{C_l - C_{l1}}{M \cdot (\overline{R}_1 - \overline{R})} \times 10^3} \qquad (13.66)$$

$$I_M = \sqrt{\frac{C_{l2} - C_l}{M \cdot (\overline{R} - \overline{R}_2)} \times 10^3} \qquad (13.67)$$

onde o custo total C_l e a resistência $\overline{R}$ correspondem à seção considerada, C_{l1} e $\overline{R}_1$ à seção imediatamente inferior, e C_{l2} e $\overline{R}_2$, à seção imediatamente superior.

A Tabela 13.8 apresenta o conjunto das variáveis apresentadas no cálculo, com as respectivas unidades, relacionadas com a versão apresentada.

Tabela 13.8 ■ Conjunto de variáveis utilizadas no trabalho

Significado	Símbolo	Unidade	IEC		Observações
			Símbolo	Unidade	
Custo total	C	u	CT	u	–
Custo do comprimento instalado de linha	C_I	u	CI	u	–
Custo das perdas Joule durante N anos	C_J	u	CJ	u	Índice/correspondente ao 1º ano
Custo das perdas de energia	C_{JE}	u	–	–	Idem
Custo correspondente à demanda	C_{JD}	u	–	–	Idem
Perdas de energia	p_E	kWh	–	–	Idem
Corrente máxima durante o 1o ano	I_M	A	$I_{máx}$	A	–
Resistência CA de um condutor por unidade de comprimento	$\bar{R}$	Ω/km	R	Ω/m	–
Comprimento da linha	l	km	l	m	–
Número e condutores-fase pior ciruito	–	–	N_p	–	–
Número de circuitos com a mesma corrente	–	–	N_c	–	–
Número de condutores-fase da linha	n	–	–	–	$n = N_p \times N_c$
Tempo de operação com perda máxima	H	h	T	h	–
Temperatura de operação do condutor	θ_m	°C	θ_m	°C	–
Temperatura máxima para serviço contínuo	θ_z	°C	–	–	–
Temperatura ambiente	θ_A	°C	θ_a	°C	–
Corrente variável (valor eficaz)	$I(t)$	A	$I(t)$	A	–
Custo de energia	e	u/kWh	P	u/Wh	–
Custo anual de demanda	d	u/W.ano	D	u/W.ano	–
Variável auxiliar	Q	–	Q	–	Definida em (9)
Taxa anual de juros	t	%	i	%	–
Variável auxiliar	r	–	r	–	Definida em (11)
Aumento anual de carga	a	%	a	%	–
Aumento anual de energia	b	%	b	%	–
Variável auxiliar	M	u/kW	F	u/W	–
Componente variável do custo relacionado com a seção do cabo	G	u/m.mm^2	A	–	–
Componente o custo não afetado pela seção do cabo	F	u	C	u	–
Preço dos cabos da linha e respectiva instalação	P	u/km	–	–	–
Resistividade	ρ	Ω.mm^2/km	ρ	Ω.m	–
Coeficiente de temperatura	α	°C^{-1}	α	°C^{-1}	–
Seção nominal	S	mm^2	S	mm^2	Índice E para a seção econômica Definida por (19)
Variável auxiliar	B	–	B	–	
Fatores de perdas dos condutores	ys, yp	–	ys, yp	–	
Fatores de perdas na blindagem e na armação dos cabos	λ_1, λ_2	–	λ_1, λ_2	–	

Tabela 13.9 ■ Preços dos cabos e de sua instalação

Seção nominal (mm^2)	Custo inicial (u/m)		
	Cabo	Instalação	Total
25	10,62	17,23	27,85
35	11,65	17,33	28,98
50	13,19	17,49	30,68
70	15,24	17,71	32,95
95	17,81	17,97	35,78
120	20,37	18,24	38,61
150	23,45	18,55	42,00
185	27,04	18,92	45,98
240	32,69	19,51	52,20
300	38,85	20,14	58,99
400	49,11	21,20	70,31

EXEMPLO 22

Linha trifásica subterrânea constituída por um cabo tripolar de cobre com isolação de EPR, 6/10 kV, sendo dados:

- Comprimento da linha: $l = 500$ m $= 0{,}5$ km.
- Corrente máxima no primeiro ano: $I_M = 160$ A.
- Temperatura ambiente: $\theta_A = 20$ °C.
- Preços dos cabos e de sua instalação (valores fictícios) (em u/m): na Tabela 13.9.
- Vida econômica considerada para o cabo: $N = 30$ anos.
- Tempo de operação com perda máxima: $H = 2.250$ h/ano.
- Custo da energia ao fim do primeiro ano: $e = 60{,}9 \times 10^{-3}$ u/kWh.
- Custo da demanda: $d = 3{,}0$ u/kW ano.
- Aumento anual de carga: $a = 0{,}5\%$ ano.
- Aumento anual do custo da energia: $b = 2{,}0\%$.
- Taxa anual de juros: $t = 5{,}0\%$.

(a) Cálculo das grandezas auxiliares:

- Da Expressão 13.56

$$r = \frac{\left(1 + \frac{0{,}5}{100}\right)\left(1 + \frac{2}{200}\right)}{1 + \frac{5}{100}} = 0{,}98117$$

- Da Expressão 13.55

$$Q = \frac{1 - 0{,}98117^{30}}{1 - 0{,}98117} = 23{,}081$$

- Da Expressão 13.57

$$M = 3(2.250 \times 60{,}9 \times 10^{-3} + 3) \times \frac{23{,}081}{1 + \frac{5}{100}}$$

$$= 9.234{,}04 \text{ u/kW}$$

(b) Cálculo das 'faixas econômicas' das diversas seções nominais:

- Da Expressão 13.49

$$\theta_m = \frac{90 - 20}{3} + 20 = 43{,}3\ ^\circ\text{C}$$

- Da Expressão 13.63

$$\overline{R}(S) = \frac{l}{S} \times 18{,}35 \times 1{,}023[1 + 3{,}93 \times 10^{-3}(43{,}3 - 20)]$$

$$= \frac{1}{S} \times 20{,}491$$

- Das expressões 13.66 e 13.67, utilizando os valores de $\overline{R}(S)$ e os custos fictícios anteriormente indicados, obtêm-se as faixas de correntes indicadas na Tabela 13.10.

Para a corrente indicada de 160 A, a seção indicada será, pela Tabela 13.8, de 185 mm^2.

(c) Cálculo pela Expressão 13.65:

- Da Expressão 13.62, considerando as seções 150 e 185 mm^2, obtém-se

$$G = \frac{(45{,}96 - 42{,}00) \times 10^3}{185 - 150} = 113{,}14 \text{ u/km.mm}^2$$

- Da Expressão 13.65

$$S_E = \sqrt{\frac{1}{113{,}14} \times 160^2 \times 9234 \times 18{,}35 \times 1{,}023[1 + 3{,}93 \times 10^{-3}(43{,}3 - 20) \times 10^{-3}]}$$

$$S_E = 207 \text{ mm}^2$$

Tabela 13.10 ■ Vários valores de *S* e seus custos

S (mm²)	$\overline{R}$ (Ω/km)	Custo total (u/km)	Faixa de correntes (A)	
25	0,820	$27{,}85 \times 10^3$	–	22,8
35	0,585	$28{,}98 \times 10^3$	22,8	32,4
50	0,410	$30{,}68 \times 10^3$	32,4	45,8
70	0,293	$32{,}95 \times 10^3$	45,8	63,1
95	0,216	$35{,}78 \times 10^3$	63,1	82,5
120	0,171	$38{,}61 \times 10^3$	82,5	104
150	0,137	$42{,}00 \times 10^3$	104	128
185	0,111	$45{,}96 \times 10^3$	128	161
240	0,085	$52{,}20 \times 10^3$	161	208
300	0,068	$58{,}99 \times 10^3$	208	269
400	0,051	$70{,}31 \times 10^3$	269	–

A seção a ser escolhida é de 185 mm², valor padronizado mais próximo de 207 mm².

Cálculos simplificados

O cálculo da seção econômica, usando-se a Expressão 13.65, que é, basicamente, a indicada pela IEC 60287-3-2, envolve um grande número de variáveis, e sua aplicação é um tanto complicada. Assim, com vistas principalmente à utilização do critério em linhas de baixa tensão, é conveniente obter-se uma expressão mais simples, que apresente uma precisão razoável.

Considerando algumas hipóteses simplificadoras:

(a) O custo da instalação (incluindo o custo dos condutos *e/ou* de outros elementos utilizados) é constante, independentemente da seção dos cabos usados, o que, na prática, é bem próximo da realidade; assim, na aplicação da Expressão 13.62 ou da Expressão 13.68, esse custo desaparece na subtração $P_2 - P_1$.

(b) Para simplificar a expressão final, considera-se o parâmetro G', definido por

$$G' = \frac{G}{n} = \frac{P_2 - P_1}{n(S_2 - S_1)} \qquad (13.68)$$

(c) As perdas devidas aos efeitos pelicular e de proximidade, bem como as devidas às perdas nas blindagens e armações, são desprezadas, o que é bastante razoável, mesmo para os cabos de média tensão até 630 mm² operando na freqüência de 50 ou 60 Hz; assim, tem-se $B = 1$.

(d) O custo anual da demanda é desprezado, isto é, $d = 0$, o que se justifica pelo fato de ser, normalmente, $He \geq d$, na Expressão 13.57, sendo que, mesmo que isso não ocorra o impacto de considerar $d = 0$ não trará grandes alterações na Expressão 13.65, o que pode ser facilmente demonstrado.

(e) A temperatura de serviço é considerada $\theta_m = 50$ °C, valor bastante razoável, uma vez que, como pode ser visto pela aplicação da Expressão 13.49, corresponde a cabos com $\theta_Z = 90$ °C e ambiente de $\theta_A = 30$ °C.

(f) O crescimento anual de carga, geralmente situado na faixa de 0,5 a 5 por cento, é considerado como $a = 1{,}5$ por cento.

(g) O aumento anual no custo da energia elétrica (sem considerar o efeito da inflação), geralmente na faixa de 2 a 12 por cento, é considerado nulo, isto é, $b = 0$.

(h) A taxa anual de juros, geralmente na faixa de 5 a 12 por cento (sem considerar os efeitos da inflação), é considerada como $t = 10$ por cento.

(i) O tempo de operação com perda máxima calculado por

$$H = \frac{\text{consumo anual previsto (kWh/ano)}}{\text{demanda correspondente à carga máxima (kW)}} \qquad (13.69)$$

(j) A corrente máxima durante o primeiro ano é igual à corrente de projeto, ou seja $I_M = I_B$.

A partir dessas hipóteses, temos:

- Da Expressão 13.56

$$r = \frac{\left(1 + \frac{1{,}5}{100}\right)^2 \times 1}{1 + \frac{10}{100}} = 0{,}937 \qquad (13.70)$$

- Da Expressão 13.55

$$Q = \frac{1 - 0{,}937^N}{1 - 0{,}937} = \frac{1 - 0{,}937^N}{0{,}063} \qquad (13.71)$$

- Da Expressão 13.54

$$M = n \cdot H \cdot e \frac{1 - 0{,}937^N}{0{,}063} \times \frac{1}{1 + \frac{10}{100}}$$

$$= n \cdot H \cdot e \frac{1 - 0{,}937^N}{0{,}0698} \qquad (13.72)$$

■ Da Expressão 13.65, levando em conta as expressões 13.68 e 13.72

$$S_E = I_B \sqrt{\frac{1}{G'} \times H \cdot e \frac{1 - 0{,}937^N}{0{,}0698} \times \rho_{20}(1 - 30\,\alpha_{20}) \times 10^{-3}} \tag{13.73}$$

Para o cobre, tem-se

$$S_E = I_B \sqrt{\frac{1}{G'} H\, e\, (1 - 0{,}937^N) \times 294{,}44 \times 10^{-3}}$$

e daí

$$S_E = \frac{I_B}{1{,}84} \sqrt{\frac{H \cdot e\,(1 - 0{,}037^N)}{G'}} \tag{13.74}$$

fazendo

$$C_H = \frac{2{,}66}{\sqrt{H}} \tag{13.75}$$

e

$$C_N = \frac{0{,}69}{\sqrt{1 - 0{,}937^N}} \tag{13.76}$$

virá, da Expressão 13.74

$$S_E = \frac{I_B}{C_H \cdot C_N} \sqrt{\frac{e}{G'}} \tag{13.77}$$

Chega-se à mesma expressão para o alumínio, com o mesmo valor de C_N e com

$$C_H = \frac{2{,}07}{\sqrt{H}} \tag{13.78}$$

Exemplo 23

Circuito de distribuição trifásico constituído por 3 cabos unipolares Cu/PVC/PVC, sendo dados:

- Corrente de projeto: $I_B = 143$ A.
- Temperatura ambiente: $\theta_A = 30$ °C.
- Custo da energia elétrica: $e =$ US$ 36×10^{-3}/kWh.
- Tempo anual com perda máxima: $H = 2.250$ h/ano.
- Vida útil considerada para o cabo: $N = 20$ anos.
- Preços dos cabos e valores de G' (da Expressão 13.68): estão na Tabela 13.11.

(a) Cálculo das grandezas auxiliares

■ Da Expressão 13.72

$$M = 3 \times 2.250 \times 36 \times 10^{-3} \times \frac{1 - 0{,}937^{20}}{0{,}0698} = 2.534 \text{ US\$/kW}$$

■ Da Expressão 13.75

$$C_H = \frac{2{,}66}{\sqrt{2.250}} = 0{,}056$$

■ Da Expressão 13.76

$$C_N = \frac{\sqrt{0{,}69}}{\sqrt{1 - 0{,}937^{20}}} = 0{,}809$$

(b) Cálculo da seção econômica

■ Da Expressão 13.77, adotando para G′ o valor médio 117 US$/mm².km

$$S_E = \frac{143}{0{,}056 \times 0{,}809} \sqrt{\frac{36 \times 10^{-3}}{117}} = 55{,}4 \text{ mm}^2$$

o que leva a uma seção de 50 mm²

(c) Cálculo da faixa econômica para 50 mm²

■ S = 50 mm² → S1 = 35 mm² e S2 = 70 mm²

Tabela 13.11 ■ Preços dos cabos e valores de G′

Seção (mm²)	Preço do cabo US$/km	Preço da linha[1] US$/km	$G' = \frac{P_2 - P_1}{3(S_2 - S_1)}$ US$/mm².km
25	3.169	9.507	–
35	4.308	12.924	114
50	5.969	17.907	111
70	8.256	24.768	114
95	11.209	33.627	118
120	13.976	41.928	111
150	17.470	52.410	116
185	21.546	64.638	116
240	28.964	86.892	135

Nota:
1. Três cabos.

- Da Expressão 13.63, com B = 1 e $\theta_m = 50$ °C

$$\overline{R}(S) = \frac{1}{S} \times 18{,}45[1 + 3{,}93 \times 10^{-3}(50 - 30)] = \frac{1}{S} \times 19{,}8$$

- para $S1 = 35$ mm² $\rightarrow \overline{R}_1 = 0{,}566\ \Omega$/km;
- para $S = 50$ mm² $\rightarrow \overline{R} = 0{,}396\ \Omega$/km;
- para $S = 70$ mm² $\rightarrow \overline{R}_2 = 0{,}283\ \Omega$/km;
- Das expressões 13.66 e 13.67 e da Tabela 13.9
- Limite inferior de I_B

$$I_B = \sqrt{\frac{17.907 - 12.924}{2.534(0{,}566 - 0{,}396)} \times 10^3} = 108\ \text{A}$$

- Limite superior de I_B

$$I_B = \sqrt{\frac{24.768 - 17.907}{2.534(0{,}396 - 0{,}283)} \times 10^3} = 155\ A$$

É preciso utilizar o cabo com $S = 70$ mm², que tem $I_B = 143\ \text{A} < I_Z = 171\ \text{A}$.

EXERCÍCIOS

1. Quais são as características das cargas industriais e similares consideradas na NBR 5410 para dimensionamento dos circuitos terminais?

2. Quais são as características das cargas residenciais e comerciais consideradas na NBR 5410 para dimensionamento dos circuitos terminais?

3. Quais são as três configurações clássicas para a ligação de equipamentos a motor?

4. No caso de partida de motores mais suaves, quais são os três métodos de partida mais utilizados?

5. Quais são as vantagens e desvantagens da chave estrela-triângulo?

6. Quais são as vantagens e desvantagens da chave compensadora?

7. Qual é o limite da queda de tensão nos terminais do dispositivo de partida durante a partida de um motor?

8. Quais são os dispositivos específicos para proteção contra curto-circuito?

9. Quais são as etapas para o dimensionamento de um circuito de uma instalação de baixa tensão, circuito de distribuição ou circuito terminal, incluindo a determinação da seção dos condutores, a escolha da(s) proteção(ões) contra sobrecorrentes e, eventualmente, o dimensionamento do conduto que conterá os condutores?

10. Quais são os critérios para escolha da proteção contra correntes de sobrecarga e contra correntes de curto-circuito de disjuntores de baixa tensão?

14

Compensação da energia reativa

Por Eng. José Starosta

14.1 Introdução

Com o advento da automação industrial, surgiu a necessidade do controle preciso da operação das cargas presentes não só nas indústrias, mas também nas instalações elétricas de prédios e centros comerciais, em centros de processamento de dados e mesmo nas instalações residenciais. O tratamento do tema relativo à compensação de energia reativa, que até anos atrás podia considerar uma condição de fontes constantes alimentando cargas com perfis 'comportados' e com características praticamente lineares, deve ser expandido em abordagens que considerem necessariamente:

- Comportamento da carga na instalação (variação e curva de carga).
- Característica de não-linearidade da carga e seu conteúdo harmônico.
- Possíveis fontes distintas que alimentarão as mesmas cargas.
- Impacto da compensação reativa na instalação.
- Regulamentação tarifária e cobrança da energia reativa excedente pelas concessionárias de energia.
- Impactos na eficiência energética e custos operacionais.
- Impactos na qualidade de energia e aspectos relativos à produtividade.

A injeção de reativos é uma valiosa ferramenta para melhorar a regulação de tensão e a eficiência de equipamentos, bem como para reduzir as perdas e as correntes elétricas nos circuitos de instalações industriais e comerciais de grande porte. Não basta o simples tratamento de questões relativas ao dimensionamento de capacitores, de forma a injetar energia reativa de acordo com aquela consumida pela carga; outras características da instalação também devem ser consideradas.

Historicamente, e muito antes da proliferação de cargas não-lineares nas instalações e também do início da regulamentação da cobrança dessa energia reativa (excedente) pelas concessionárias de energia, os capacitores já vinham sendo aplicados para melhorar a regulação de tensão das instalações. A correta aplicação de capacitores em uma instalação elétrica impõe significativo incremento na qualidade de energia de alimentação das cargas, com importantes conseqüências na produtividade, aumento da capacidade, redução de perdas elétricas e redução de investimentos em infra-estrutura. O tema, sempre discutido, é relacionado à estreita relação da energia reativa (fornecida pelos capacitores) com a qualidade de energia fornecida às cargas da instalação.

> As perdas em processos industriais relativas a problemas com consumo de energia reativa e qualidade de energia tendem a ser mais importantes e consideráveis que as próprias cobranças de excedente de energia reativa (multas) pelas concessionárias devidas ao baixo fator de potência que este consumo de reativos possa causar.

Tal condição pode ser entendida como a necessidade de se adequar a tensão de fornecimento (regulação, balanceamento, ausência de afundamentos, controle da distorção harmônica, entre outras), sob pena de perdas no processo de produção.

A popularização do uso dos capacitores pelos consumidores ocorreu em maiores proporções justamente quando as concessionárias passaram a multar os consu-

midores que apresentassem valores médios mensais de fator de potência menores que um valor fixo definido, inicialmente de 85 por cento.

A mudança desse valor para 92 por cento ocorreu juntamente com a mudança do período de medição para média horária, conseguindo-se assim um grau bem maior de sofisticação de avaliação, graças aos medidores eletrônicos que chegavam ao mercado. Essa mudança, que ocorreu no Brasil na primeira metade da década de 1990, seguiu uma tendência mundial e trouxe a necessidade de ajuste fino da injeção de reativos, pois diversas instalações que estavam incólumes ao critério anterior passaram a ser consideradas na cobrança da multa.

O que se observou, então, foi uma verdadeira corrida pela adequação do fator de potência aos novos níveis e padrões estipulados. Consumidores desavisados assistiam às falhas de seus capacitores, e nem sempre descobriam as causas e as soluções para os problemas.

Entre outras mudanças, o que era tratado como "multa por fator de potência" passou a ser tratado como "tarifação de energia reativa excedente" ou outras terminologias similares. Muitas dessas expressões ainda não foram absorvidas até hoje pelos consumidores, que pagam as contas de energia sem as entender e analisar adequadamente, em todos os seus aspectos.

Alguns consumidores consideram o 'faturamento de energia reativa' como uma cobrança normal, tal qual a energia ativa, sem a mínima idéia de seu potencial em 'gerar' sua própria energia reativa com a correta aplicação de capacitores. Outros consumidores ainda absorvem tais custos, pois consideram equivocadamente a inexistência de tecnologia para adequação do fator de potência e compensação reativa da instalação. Cansados de observar sistemas simplesmente explodirem, com fortes implicações na produção, eles se permitem arcar com os custos de uma energia mais cara, a fim de preservar a capacidade de produção.

Por outro lado, nem todas as concessionárias alertam e orientam seus consumidores para a situação, informando sobre a possibilidade de evitar o faturamento adicional de forma adequada e, ainda, com ganhos técnicos.

É muito importante observar que, para a escolha da metodologia e do projeto de compensação de energia reativa, o perfil de carga da instalação deve ser considerado cuidadosamente, pois a simples análise do fator de potência médio induzirá, na maioria dos casos, à escolha de solução inadequada. Esse perfil de carga pode ser obtido com o uso de instrumento adequado pelo próprio consumidor, ou, em muitos casos, pode ser solicitado às concessionárias, que geralmente cobram por esse serviço.

Outra discussão pertinente refere-se à própria legislação, que sempre utiliza o termo *fator de potência*, sem nenhuma referência às componentes harmônicas. Como a definição do fator de potência incorpora não só as componentes de 60 Hz, mas também as outras freqüências eventualmente presentes no sistema, os novos medidores eletrônicos implementados para atender à portaria (atual ANEEL 456) de energia reativa podem considerar, indiretamente, o incremento do 'consumo de energia reativa' na presença de cargas distorcidas. Isto é, as cargas distorcidas consideradas pelo novo sistema de medição acabam por reduzir o fator de potência em relação ao conceito anteriormente empregado no uso dos medidores eletromecânicos, ou mesmo de eletrônicos de primeira geração, nos quais somente a componente fundamental (60 Hz) era considerada.

14.2 Aspectos conceituais

Definições

Em qualquer instalação alimentada em corrente alternada, a energia elétrica absorvida pela carga pode ser decomposta em:

- *Energia ativa,* medida em kWh, transformada em energia mecânica, em calor ou em outra modalidade. A relação entre a energia ativa consumida em um intervalo de tempo e esse próprio período é definida como a *demanda média*, ou simplesmente a *demanda de energia ativa*, ou, ainda, a *potência ativa* desse intervalo (medida em kW). A potência ativa ou demanda costuma ser representada pela letra P.
- *Energia reativa,* medida em kvarh, necessária à excitação magnética dos equipamentos indutivos (motores, transformadores etc.). Analogamente, a *demanda de energia ativa*, que é obtida pela relação entre a energia reativa e o período em que foi consumida, define a demanda de energia reativa, ou *potência reativa média* do intervalo (medida em kvar). A potência reativa é representada pela letra Q.

A *potência aparente,* medida em kVA (quilo volt ampère), é representada pela letra S, sendo definida como o produto das correntes e tensões eficazes:

$$S = U_L \times I_L \qquad (14.1)$$

onde:

- U_L = tensão de linha;
- I_L = corrente de linha.

Em um sistema trifásico,

$$S = \sqrt{3} \times U_L \times I_L \qquad (14.2)$$

O *fator de potência* é definido pela relação das potências ativa e aparente:

$$FP = \frac{P}{S} \qquad (14.3)$$

Cargas lineares

Uma carga é *linear* quando a corrente elétrica do circuito que a alimenta não possui outras componentes (harmônicas) de freqüência além de 60 Hz. Neste caso, pode-se considerar a potência aparente como o resultado da composição de um modelo vetorial das potências ativa e reativa, conforme representado nas Expressões 14.4 e 14.5 e na Figura 14.1, conhecida como triângulo das potências.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \tag{14.4}$$

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \tag{14.5}$$

Pode-se ainda, neste caso, equacionar o fator de potência como o co-seno do ângulo Φ formado pelas duas variáveis (P e S):

$$FP = \cos \Phi \tag{14.6}$$

Cargas não-lineares

Na maioria dos casos das instalações atuais, a carga é *não-linear*, e o modelo anteriormente exposto torna-se impreciso, na medida em que a corrente de carga possui, além de sua componente em 60 Hz, outras freqüências múltiplas de 60 Hz (harmônicas de corrente). Nesse caso, a corrente eficaz do circuito torna-se diferente (maior) da corrente em 60 Hz (corrente fundamental) e, conseqüentemente, a potência aparente também será diferente (maior).

A corrente eficaz (rms) que considera as componentes harmônicas é definida como:

$$I_{rms} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} I_{hi}^2\right)} \tag{14.7}$$

Tetraedro *versus* triângulo das potências

A potência aparente de um sistema não-linear é maior que a potência aparente de um sistema com cargas lineares. O modelo do triângulo das potências (Figura 14.1) passa a não ser compatível com a nova realidade, pois, na presença de cargas não-lineares, a potência aparente deverá contemplar também as correntes harmônicas.

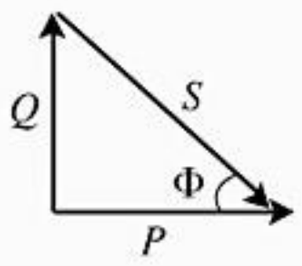


Figura 14.1 ■ Triângulo das potências (válido apenas para cargas lineares)

Um modelo interessante e de fácil compreensão, adotado por alguns autores, modifica o modelo do triângulo das potências para o do *"tetraedro das potências"*, e uma nova variável chamada de *"potência de distorção"* passa a ser inserida nesse contexto. Essa "potência de distorção", simbolizada pela letra D, guarda uma relação física com perdas e, matematicamente, é o acréscimo (relação não-linear) da potência aparente quando existem componentes harmônicas na carga. A medida de D é o kVAD (kVA de distorção).

O tetraedro é representado conforme mostra a Figura 14.2, e a nova relação entre as variáveis é apresentada nas expressões 14.8 a 14.14:

$$S'^2 = P^2 + Q^2 \tag{14.8}$$

$$S^2 = S'^2 + D^2 \tag{14.9}$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \tag{14.10}$$

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2 + D^2)} \tag{14.11}$$

Como o fator de potência é definido como a relação entre as potências ativa e aparente, ou seja, $FP = P/S$, temos:

$$P = S' \times \cos \Phi \tag{14.12}$$

$$S = S'/\cos \lambda \tag{14.13}$$

$$FP = (S' \times \cos \Phi)/(S'/\cos \lambda)$$

$$= (\cos \Phi \times \cos \lambda) \tag{14.14}$$

Portanto, com a multiplicação por um novo fator menor que 1 ($\cos \lambda$), o fator de potência — que no regime de carga linear era definido como o $\cos \Phi$ — assume um novo valor, reduzindo assim o fator de potência relativo ao regime linear. Essa conclusão confirma a expectativa de um menor fator de potência do sistema devido às cargas não-lineares.

O $\cos \Phi$, ou fator de potência em 60 Hz, também é tratado por DPF ou *fator de potência de deslocamento*.

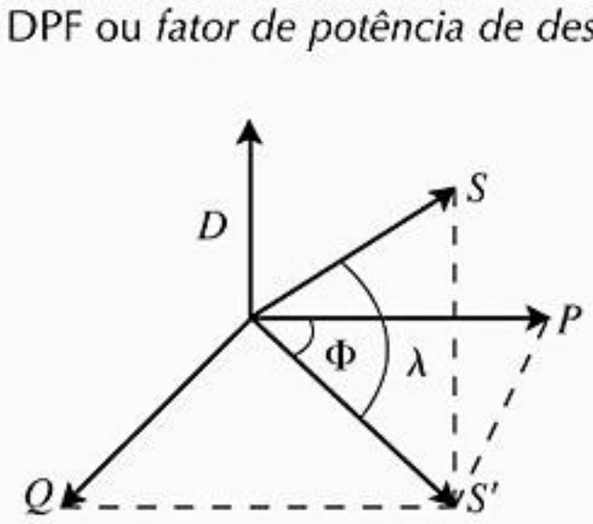


Figura 14.2 ■ Representação do "tetraedro de potências"

14.3 Razões do baixo fator de potência e comportamento das instalações

O baixo fator de potência das instalações pode advir de diversas causas, sendo estas as principais:

- *Motores de indução operando em vazio ou sobrecarregados*: tais motores consomem praticamente a mesma energia reativa, quer operando em vazio, quer operando à plena carga. A energia ativa, entretanto, é diretamente proporcional à carga mecânica aplicada ao eixo do motor. Nessas condições, quanto menor a carga, menor a energia ativa consumida e menor o fator de potência.
- *Transformadores operando em vazio ou com pequenas cargas*: analogamente aos motores, os transformadores, quando superdimensionados para a carga que devem alimentar, consomem uma quantidade de energia reativa relativamente grande, se comparada à energia ativa, dando origem a um fator de potência baixo.
- *Lâmpadas de descarga*: as lâmpadas de descarga (vapor de mercúrio, vapor de sódio, fluorescentes etc.) necessitam do auxílio de um reator para funcionar. Os reatores magnéticos, como os motores e os transformadores, possuem bobinas que consomem energia reativa, contribuindo para a redução do fator de potência. O uso de reatores compensados (com alto fator de potência) pode contornar o problema. Os reatores eletrônicos, de boa procedência e especificação, apresentam um bom comportamento relativo ao fator de potência, alguns até próximos de 100%.
- *Grande quantidade de motores de pequena potência*: a grande quantidade de motores de pequena potência provoca, muitas vezes, um baixo fator de potência, pois o correto dimensionamento de tais motores em função das máquinas a eles acopladas pode apresentar dificuldades.
- *Tensão acima da nominal*: a potência reativa é, aproximadamente, proporcional ao quadrado da tensão aplicada; já no caso dos motores de indução, a potência ativa só depende, praticamente, da carga mecânica aplicada ao eixo do motor. Assim, quanto maior a tensão aplicada aos motores, maior a energia reativa consumida e menor o fator de potência.

De modo geral, o comportamento do fator de potência nas instalações elétricas varia conforme a atividade e o tipo das cargas. Instalações residenciais, que outrora possuíam comportamento com fator de potência próximo da unidade, em função da maciça presença de chuveiros elétricos e lâmpadas incandescentes (cargas resistivas), tiveram essa condição *alterada* ao longo do tempo, graças à presença de, por exemplo, sistemas de controle de potência no próprio chuveiro (que podem reduzir o fator de potência) e sistemas de iluminação fluorescentes também com baixo fator de potência (notadamente as lâmpadas fluorescentes compactas). As bombas, elevadores e sistemas de ar condicionado, também presentes nas instalações prediais (de uso residencial), são cargas que merecem atenção do ponto de vista de baixo fator de potência.

Nos prédios comerciais, como edifícios de escritórios e corporativos, *shoppings centers*, hospitais, agências bancárias, supermercados e centros de processamento de dados (*data centers*), devido à forte presença de cargas de sistemas de resfriamento e ar condicionado, bombas, sistemas de transporte vertical (elevadores, escadas rolantes, monta cargas), iluminações fluorescentes, UPSs (*Uninterruptible Power Supply*), cargas de tecnologia de informação e outras, o fator de potência merece atenção, pois essas cargas possuem forte característica indutiva.

Nas indústrias, a situação não é diferente. Há alto consumo de energia reativa pelas cargas típicas industriais, como as injetoras, extrusoras, fornos de indução ou a arco, sistemas de solda, prensas, guindastes, monta-cargas e ponte rolantes, bombas, compressores, ventiladores, tornos, retíficas, sistemas de galvanoplastia e eletrólise, entre tantos outros.

14.4 Compensação da energia reativa

Princípio

A elevação, ou adequação, do fator de potência é realizada com a instalação de sistemas de compensação de energia reativa compostos por capacitores, também chamado de *bancos de capacitores*, em ligação em paralelo (tipo *shunt*) conectado no mesmo ponto da carga ou por motores síncronos superexcitados. A determinação da potência reativa dessa instalação adicional pode ser feita com o auxílio das expressões utilizadas nas definições do 'triângulo ou tetraedro das potências'.

A resposta ao problema é definir quanto de potência reativa (Q) injetar, de modo a compensar a potência reativa consumida pela carga. A convenção de sinal adotada para a potência reativa, considera a potência consumida pela carga com sinal positivo e aquela injetada pelos capacitores com sinal negativo.

Outra possibilidade de injeção de energia reativa é o uso de motores síncronos superexcitados, que possuem a possibilidade de injetar maior volume de energia reativa que seu consumo próprio e podem ser um bom recurso nas instalações industriais de grande porte.

Análise de compensação reativa com carga linear

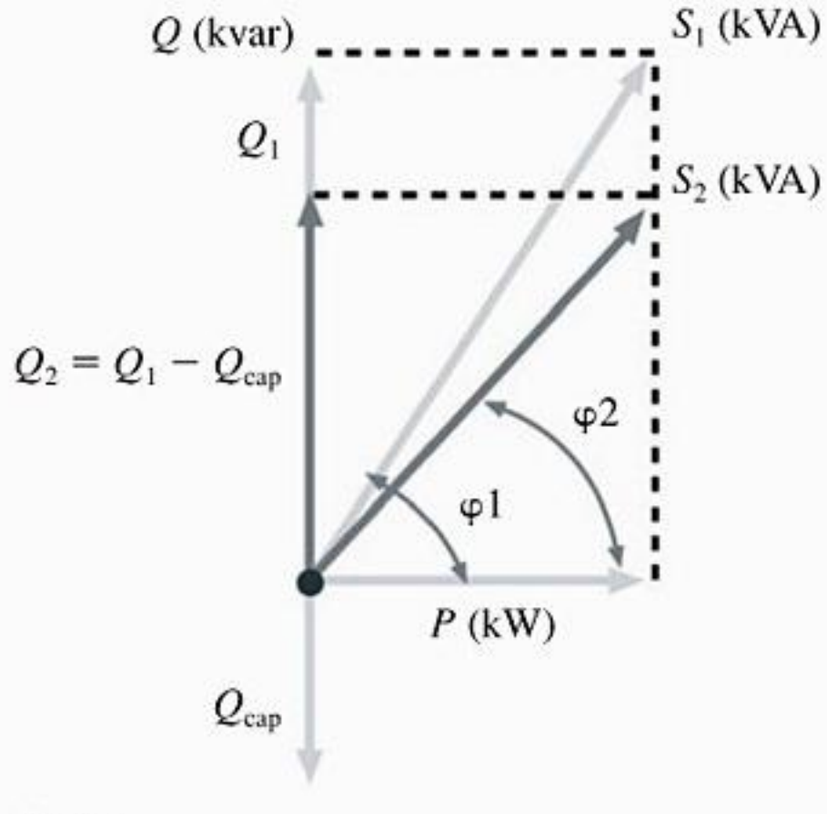
Numa análise simplificada, com a inexistência de correntes harmônicas, onde $\lambda = 0$ (do modelo do tetraedro de potências), pode-se calcular o valor do reativo consumido diretamente pela Expressão 14.15 (do triângulo das potências da Figura 14.3):

$$Q = P \times tg\,\Phi \text{ ou } Q = \sqrt{(S^2 - P^2)} \qquad (14.15)$$

A injeção de energia reativa será mais eficiente à medida que o ângulo de fase Φ se aproxime de zero e, por conseqüência, toda a potência reativa seja compensada.

A redução da corrente eficaz e da potência aparente será, nesse caso, proporcional ao incremento do fator de potência, conforme a Figura 14.3, somente aplicável em situações em que a carga seja linear.

O modelo clássico de compensação reativa representado na Figura 14.3 ilustra uma potência reativa Q_1 consumida pela carga linear, a potência reativa injetada pelos capacitores Q_{cap} e a potência reativa resultante $Q_2 = (Q_1 - Q_{cap})$. Nessa situação, espera-se que Q_2 seja menor que Q_1 (apesar de, eventualmente, poder ser maior) e, como conseqüência, ocorra uma redução da potência aparente de S_1 para S_2 e uma redução do ângulo Φ_1 para Φ_2. O fator de potência final (FP_2) será maior que o original (FP_1).



Onde:

- Q_1 e S_1 são as potências reativa e aparente da compensação de reativos;
- Φ_1 é o ângulo de fase antes da compensação de reativos;
- Q_2 e S_2 são as potências reativa e aparente após a compensação;
- Φ_2 é o ângulo de fase após a compensação de reativos;
- Q_{cap} é a potência reativa injetada pelos capacitores;
- $Q_1 - Q_{cap} = Q_2$.

Figura 14.3 ■ Esquema de compensação reativa em regime de carga linear

Portanto, o método para obter-se aumento do fator de potência, com redução da potência aparente e redução da potência reativa (Q) consumida, é a injeção da energia reativa fornecida por capacitores de potência.

É importante notar que essa definição considera uma situação instantânea de carga, ou uma carga sem variação. A rigor, a análise deve ser estendida a todas as condições típicas de carga — máximas, mínimas, médias etc.

EXEMPLO

Uma instalação apresenta uma carga típica (potência ativa) de 200 kW, relativa a um grupo de motores com carga constante e com acionamento direto, podendo-se desprezar as componentes harmônicas da corrente de carga. Sabendo-se que o fator de potência da carga é de 80 por cento, determinar qual a injeção reativa necessária para elevar o fator de potência para 95 por cento.

Temos:

$P = 200$ kW

$FP_1 = 0{,}80$

$FP_2 = 0{,}95$

Então:

$$S_1 = \frac{P}{FP_1} = \frac{200}{0{,}8} = 250 \text{ kVA}$$

$$Q_1 = \sqrt{(S1^2 - P^2)} = \sqrt{(250^2 - 200^2)} = 150 \text{ kvar}$$

$$S_2 = \frac{P}{FP_2} = 210 \text{ kVA}$$

$$Q_2 = \sqrt{(S2^2 - P^2)} = \sqrt{(210^2 - 200^2)} = 64 \text{ kvar}$$

$$Q_{cap} = Q_1 - Q_2 = 150 - 64 = 86 \text{ kvar}$$

A injeção de 86 kvar reduzirá a potência aparente do circuito de 250 kVA para 210 kVA com a conseqüente redução da corrente. E o fator de potência será elevado de 80 por cento para 95 por cento.

Análise de compensação reativa com carga não-linear

As questões matemáticas das estimativas e cálculos associados que objetivam definir quanto de potência reativa injetar tornam-se de importância limitada na medida em que a carga a ser compensada apresenta *comportamento variável* ao longo do tempo e contém, por sua própria característica operacional, *correntes harmônicas* (característica de não-linearidade). A solução a ser implantada deverá garantir adequada operação da instalação durante todo ciclo de carga. Os capacitores deverão compensar a carga em todos os seus ciclos de operação, sem causar efeitos paralelos como sobretensões e ressonâncias.

Os novos valores do fator de potência corrigido e da nova potência aparente dependerão também do conteúdo harmônico da carga. Em última analise, o fator de potência total está relacionado diretamente aos valores da potência de distorção, potência aparente, potência aparente relativa à componente fundamental e do ângulo λ.

Devido à característica de variação da carga ao longo da operação da instalação, a injeção de reativos deve acompanhar essa variação, a fim de manter o fator de potência adequado em todos os instantes.

EXEMPLO

Num caso similar ao exemplo anterior, porém com carga que possua os mesmos 250 kVA relativos apenas à corrente fundamental (60 Hz) e 270 kVA relativos a valores eficazes que representam a soma da corrente fundamental com correntes em outras freqüências harmônicas, o modelo a ser utilizado com o auxílio do tetraedro de potências será o apresentado a seguir.

Temos:

$P = 200$ kW

$S = 270$ kVA

$S' = 250$ kVA

Então:

$$S = \frac{S'}{\cos\lambda}$$

$$\cos\lambda = \frac{250}{270} = 0{,}93$$

$$Q = \sqrt{(S'^2 - P^2)} = \sqrt{(250^2 - 200^2)} = 150 \text{ kvar}$$

$$\cos\Phi = \frac{P}{S'} = \frac{200}{250} = 0{,}80$$

$$D = \sqrt{(S^2 - (S'^2)} = \sqrt{(270^2 - 250^2)} = 101 \text{ kVAD}$$

$$FP = \cos\Phi \times \cos\lambda = 0{,}93 \times 0{,}80 = 0{,}74$$

A injeção de 150 kvar reduzirá a potência reativa a zero e levará o cos Φ a 100%. No entanto, caso as harmônicas não sejam filtradas, o máximo fator de potência passível de ser obtido será 93 por cento. À medida que as harmônicas venham a ser filtradas, com a redução de 'D', a potência aparente S tenderá a atingir a potência ativa P.

Caso a injeção dos 150 kvar fosse efetuada com filtro sintonizado nas freqüências harmônicas (ou parte delas) presentes, o ângulo λ seria sensivelmente reduzido e, conseqüentemente, cos λ tenderia a 100 por cento.

Conclui-se que, em função do conteúdo harmônico de uma carga, a obtenção do fator de potência próximo da unidade requer um tratamento especial, não somente injetando energia reativa, mas também filtrando algumas harmônicas presentes.

14.5 Métodos de compensação

Generalidades

A compensação da energia reativa em uma instalação deve ser analisada com o devido cuidado, evitando-se soluções imediatistas, que podem conduzir a resultados técnicos *e/ou* econômicos não satisfatórios. É necessário critério e experiência para efetuar uma compensação adequada, analisando cada caso, uma vez que não há uma solução padronizada.

Em princípio, a elevação do fator de potência pode ser obtida com:

- O aumento do consumo de energia ativa.
- A utilização de máquinas síncronas.
- A utilização de capacitores.

Independentemente do método a ser utilizado, o fator de potência ideal, tanto para a instalação (isto é, para o consumidor) como para a concessionária, seria o unitário, o que significaria a inexistência de potência reativa na instalação.

Caso o objetivo da compensação reativa seja unicamente a isenção do pagamento da energia reativa excedente para a concessionária, pode-se adotar o fator de potência final em valores da ordem de 95 por cento, uma vez que a atual legislação considera o valor limite de 92 por cento. Considerar, ainda, que, durante a madrugada (0h00 às 6h00), a legislação limita não mais o fator de potência indutivo, mas o capacitivo, isto é, a injeção exagerada de energia reativa nesse período incorrerá em fator de potência capacitivo, tratado também como 'negativo'. Conforme a portaria ANEEL 456 (ver Quadro 14.2), o fator de potência capacitivo nesse período estará sujeito aos mesmos modelos de cobranças de excedente, como o são os indutivos durante os outros períodos do dia (6h00 às 24h00). Portanto, a solução escolhida — injeção de energia reativa — deve ser considerada também para o período da madrugada, eventualmente, com o desligamento dos capacitores.

Caso a injeção de energia reativa esteja considerando a necessidade de melhorar a regulação de tensão ou, ainda, tenha como objetivo a liberação de carga em um determinado transformador, o valor de fator de potência a ser obtido de 100% não pode ser considerado como exagero, e sua aplicação tem sido muito comum, principalmente na busca pela qualidade de energia e eficiência energética nas instalações elétricas.

A qualidade de energia de uma instalação está intimamente relacionada com a regulação de tensão; a redução de perdas é proporcional ao quadrado da redução da corrente elétrica, e o aumento da capacidade da instalação é proporcional à redução da potência aparente. As Expressões 14.16 e 14.17 quantificam os ganhos devido à redução de perdas ('Δp') e aumento da capaci-

dade ('Δcap') de uma instalação com potências aparentes S_1 e S_2 (antes e depois da compensação) e fator de potência FP_1 corrigido para FP_2.

$$\Delta p\% = \left[1 - \left(\frac{FP_1}{FP_2}\right)^2\right] \times 100\% \quad \text{e} \qquad (14.16)$$

$$\Delta cap\% = \left[1 - \frac{FP_1}{FP_2}\right] \times 100\% \qquad (14.17)$$

Os aspectos relacionados à regulação de tensão podem ser observados na Figura 14.6, no comportamento da tensão durante o consumo instantâneo de potência reativa, sem e com a operação de compensação de energia reativa adequada.

Aumento do consumo de energia ativa

O *aumento do consumo de energia ativa* pode ser conseguido pela adição ou transferência de novas cargas com alto fator de potência. Tem muito pouca aplicação prática, mas não deixa de ser uma solução possível, além de poder comprometer critérios de eficiência energética da instalação.

Assim, por exemplo, não é conveniente substituir um forno a óleo por um forno elétrico à resistência (cujo fator de potência é praticamente igual a 100%) apenas para aumentar o fator de potência. No entanto, se a indústria possuir dois fornos, um elétrico e outro a óleo, funcionando alternadamente, ampliar os períodos de uso do forno elétrico pode ser uma boa opção para corrigir o fator de potência da indústria, desde que se tenha benefício econômico.

Máquinas síncronas

As *máquinas síncronas* também podem funcionar como 'geradores' de potência reativa, seja acionando cargas mecânicas, seja funcionando em vazio (nesse caso, chamadas de 'compensadores síncronos'). Essa propriedade é controlada pela excitação. Quando subexcitados, eles não geram potência reativa suficiente para suprir suas próprias necessidades e, conseqüentemente, devem receber do sistema uma potência reativa adicional. Quando superexcitados (funcionamento normal), suprem suas próprias necessidades de reativos e também fornecem reativos ao sistema.

É preciso considerar que a utilização desse método nem sempre é compensadora, sob o ponto de vista econômico, sendo somente recomendada quando são acionadas cargas mecânicas de grande porte, com potências superiores a 200 CV (caso, por exemplo, de grandes compressores) e funcionando por períodos longos (superiores a 8 horas por dia). Nesses casos, o motor síncrono exercerá a dupla função de acionar a carga e aumentar o fator de potência da instalação.

Capacitores

O método dos *capacitores* é o mais utilizado nas instalações industriais, sendo, em geral, o mais econômico e o que permite maior flexibilidade de aplicação. Os capacitores usados, chamados de 'capacitores de potência', são caracterizados por sua potência nominal (ver Quadro 14.1), sendo fabricados em unidades monofásicas e trifásicas, para alta e baixa tensão, com valores padronizados de potência, tensão e freqüência, ligados internamente normalmente em delta e com potências de até 50 kvar em baixa tensão. Os capacitores de alta tensão são monofásicos com potências não superiores a 100 kvar e, em suas aplicações, são ligados externamente em estrela.

Na maior parte das aplicações, os capacitores são utilizados em bancos (trifásicos), montados com unidades trifásicas ou monofásicas (caso de alta tensão), o que permite a obtenção de potências relativamente elevadas, além de uma maior flexibilidade de instalação e de manutenção. Projetos de aplicação de capacitores em baixa tensão em tensões superiores (por exemplo, 480 V) costumam ser mais econômicos.

Localização dos capacitores e forma de injeção de reativos

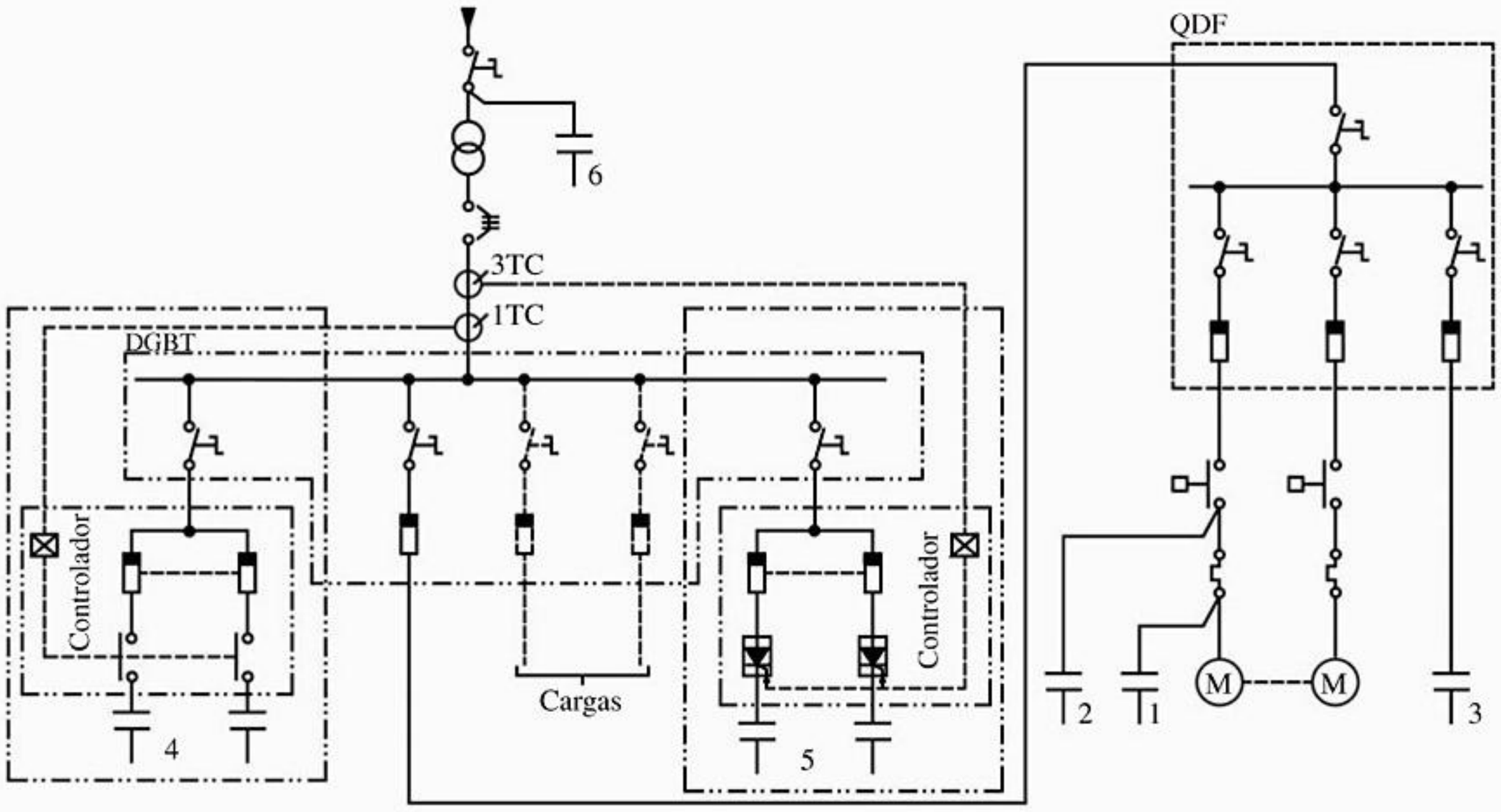
Para a análise da localização dos capacitores em uma instalação, deve-se ter sempre presente que as vantagens relativas ao seu uso apenas se aplicam à parte da instalação situada a montante de seu ponto de ligação. A Figura 14.4 indica alguns pontos onde os capacitores são normalmente inseridos.

No caso da *compensação individual*, isto é, da ligação de capacitores diretamente aos bornes de ligação dos motores ou dispositivos de manobra, devem ser tomadas algumas precauções em relação ao regime da corrente de partida do motor. Além disso, a corrente do capacitor (ou do banco) deve ser inferior à corrente de magnetização do motor — a potência do capacitor (com tensão nominal) não deve ser superior a 90 por cento da potência absorvida pelo motor em vazio.

A Tabela 14.1 indica a potência máxima dos capacitores ligados a motores.

A *localização dos capacitores no quadro de distribuição principal* proporciona uma compensação global à instalação. Nesse caso, ocorre a liberação da carga no transformador, porém não há redução de perdas nos diversos circuitos, visto que por eles circulará a corrente reativa original. É a solução indicada para instalações mais simples, em que não existem conjuntos de cargas muito diferentes entre si.

Esse tipo de ligação pode proporcionar uma economia apreciável, pela aplicação de fatores de demanda convenientes, desde que se leve em conta, no dimensionamento dos capacitores, a diversidade entre os diferen-



Possibilidade de localização dos capacitores (bancos) em uma instalação elétrica

Figura 14.4 ▪ Possibilidades de localização dos capacitores (bancos) em uma instalação elétrica

tes circuitos de distribuição (principais) que partem do quadro geral.

Haverá necessidade, nesse caso, de instalar-se um dispositivo de manobra que permita desligar os capacitores quando a instalação cessar suas atividades diárias. Do contrário, poderão ocorrer sobretensões indesejáveis na instalação, além das já citadas cobranças de reativos capacitivos no período da madrugada.

A *localização dos capacitores em um quadro de distribuição divisionário* representa uma solução intermediária entre as duas anteriores, sendo indicada quando um ou mais dos circuitos de distribuição principais alimentam quadros em que estão ligadas muitas cargas de pequeno porte, para as quais não se justifica a compensação individual.

Quadro 14.1 ▪ Capacitores

Capacitor é um dispositivo elétrico utilizado para introduzir capacitância em um circuito. É constituido por um sistema de condutores e dielétricos que têm a propriedade de armazenar energia elétrica quando submetidos a um campo elétrico.

Um capacitor é caracterizado por:

- *Capacitância nominal*: valor da capacitância atribuído pelo fabricante (μF).
- *Tensão nominal*: valor eficaz da tensão senoidal entre os seus terminais, para a qual um capacitor é projetado (V, kV).
- *Corrente nominal*: valor eficaz da corrente correspondente à sua potência nominal, quando aplicada ao capacitor a sua tensão nominal sob freqüência nominal (A).
- *Potência nominal*: potência reativa sob tensão e freqüência nominais, para a qual o capacitor é projetado (kvar).

Carga de um capacitor é a acumulação de cargas elétricas no dispositivo, resultando em elevação da tensão entre suas placas; por extensão, o termo também significa o valor de carga elétrica acumulada.

Os capacitores possuem um dispositivo de descarga que é um dispositivo elétrico (basicamente, um resistor) ligado entre os terminais do capacitor ou a ele incorporado, ou ligado entre os condutores de alimentação, para reduzir praticamente a zero a tensão entre os seus terminais, quando o capacitor é desligado da fonte de alimentação.

Um banco de capacitores é um conjunto de capacitores de potência, estruturas de suporte e com os necessários dispositvos de manobra, controle e proteção, montados de modo a constituir um equipamento completo.

Tabela 14.1 ■ Potência máxima dos capacitores ligados a motores

Potência do motor (CV)	Velocidade síncrona do motor em rotações por minuto (rpm)					
	3.600	1.800	1.200	900	720	600
	kvar	kvar	kvar	kvar	kvar	kvar
5	2	2	2	3	4	4,5
7,5	2,5	2,5	3	4	5,5	6
10	3	3	3,5	5	6,5	7,5
15	4	4	5	6,5	8	9,5
20	5	5	6,5	7,5	9	12
25	6	6	7,5	9	11	14
30	7	7	9	10	12	16
40	9	9	11	12	15	20
50	12	11	13	15	19	24
60	14	14	15	18	22	27
75	17	16	18	21	26	32,5
100	22	21	25	27	32,5	40
125	27	26	30	32,5	40	47,5
150	32,5	30	35	37,5	47,5	52,5
200	40	37,5	42,5	47,5	60	65
250	50	45	52,5	57,5	70	77,5
300	57,5	52,5	60	65	80	87,5
400	70	65	75	85	95	105
500	77,5	72,5	82,5	97,5	107,5	115

Essa solução, com a utilização de fatores de demanda adequados, pode proporcionar uma economia razoável (embora, geralmente, menor que a do caso anterior). Com ela, haverá, além da liberação de carga no transformador, a redução de perda nos circuitos de distribuição que alimentam quadros onde estejam ligados os capacitores.

A *localização dos capacitores no lado da média ou alta tensão* é uma solução usada em instalações de grande porte em que grandes volumes de energia reativa são compensados próximos à entrada da concessionária. Apesar de economicamente interessante, essa solução não proporciona liberação de capacidade no transformador nem redução de perdas, além de exigir a utilização de um dispositivo de manobra e proteção de alta tensão para os capacitores, muito embora o preço por kvar dos capacitores seja menor para tensões mais elevadas. Necessariamente, essa instalação somente é viabilizada quando a medição de energia pela concessionária é feita em alta tensão a montante do banco de capacitores. Geralmente, essa solução só é utilizada em instalações de grande porte, com várias subestações transformadoras. Nessas condições, a diversidade entre as subestações pode resultar em economia na quantidade de capacitores a instalar.

Em instalações que possuam equipamentos cujas potências absorvidas sejam variáveis e extremamente variáveis e cujas variações possam levar o fator de potência a valores indesejáveis, justifica-se a utilização da *compensação automática*, aplicada globalmente ou a setores da instalação, conforme o caso.

A forma de ligação dos capacitores nos diversos pontos da instalação definirá como a injeção da energia reativa será efetuada. Os capacitores podem ser constituídos por células (ou bancos) fixas(os), automáticas(os) (com manobra eletromecânica ou estática) ou semi-automáticas(os), conforme descrito a seguir.

(a) Banco fixo:

Os capacitores são instalados junto das cargas, ligados diretamente aos barramentos, podendo ainda ser instalados no primário das instalações alimentadas em média ou alta tensão. A injeção de energia reativa é fixa, independe da carga e tem como principais características:

- Baixo custo.
- Impossibilidade de controle.

- Possibilidade de sobretensões devido a sobrecompensações em período de baixa carga.
- Possibilidade de pagamento da tarifação de energia reativa no período da madrugada (reativo capacitivo).

(b) Banco semi-automático

Os capacitores são instalados e inseridos no sistema simultaneamente com a carga, podendo ser ligados (e alimentados) no mesmo dispositivo de manobra desta. Essa configuração possui as seguintes características principais:

- Aumento do investimento inicial, devido à necessidade de associar cada carga a um respectivo capacitor. Quanto maior for a diversidade operacional das cargas, mais capacitores serão necessários ao sistema.
- Nem sempre o dispositivo de manobra da carga permite fisicamente a ligação dos capacitores, sendo às vezes necessário dotá-los de dispositivo de manobra independente, comandando pelo dispositivo de operação da carga (alimentação da bobina do contator do capacitor por contato auxiliar do contator da carga, aumentando os custos).
- Problemas operacionais e defeitos devidos a ligamentos consecutivos ou 'repiques de contatores' sem que os capacitores tenham sido descarregados.
- Queimas de dispositivos de acionamentos estáticos a semicondutores na manobra dos capacitores (inversores de freqüência e *soft-starters*).

(c) Banco automático

O sistema foi concebido para atendimento a cargas variáveis e pode ser entendido, sob aspecto de controle, como uma evolução das outras configurações.

Os capacitores são montados em bancos centralizados manobrados em grupos por contatores distintos. O acionamento desses contatores é feito por meio de um controlador eletrônico dedicado, que recebe informações da corrente da carga pelo transformador de corrente instalado na entrada do quadro geral da instalação. Com essa informação e com o ajuste do fator de potência desejado, o controlador manobra os capacitores conforme lógica programável e interface com o usuário.

A aplicação desse sistema em cargas com perfil sem muita variação é uma solução bastante empregada e deve estar vinculada a alguns cuidados:

- Transitórios na rede causados pela manobra dos capacitores, podendo causar interferências em outras cargas e redução da vida dos capacitores.
- Efeito de sobretensão, devido à sobrecompensação de reativo, uma vez que a resposta do sistema pode ser lenta. Os capacitores podem levar dezenas de segundos até serem desligados após o desligamento da carga. Nesse período, a sobrecompensação pode comprometer as outras cargas que continuam operando no sistema.
- Cuidados quando aplicados em conjunto a dispositivos de acionamentos estáticos (inversores de freqüência e *soft-starters*).

(d) Compensação estática de energia reativa ou compensação de energia reativa em 'tempo real'

Um *banco automático de capacitores* é constituído por unidades que poderão ser ligadas ou desligadas em função do fator de potência detectado, fornecendo, portanto, uma quantidade variável de potência reativa em função das necessidades de instalação ou do setor alimentado.

Instalações elétricas com cargas extremamente variáveis (soldas, prensas, elevadores, guindastes, injetoras e outras) merecem cuidados especiais, uma vez que a injeção de energia reativa deve ser efetuada da mesma forma que é consumida. Bancos automáticos convencionais não possuem velocidade para tal, sendo necessário que os capacitores sejam manobrados por elementos estáticos. Essa é a chamada *'compensação estática de energia reativa – tempo real',* que possibilita a manobra de capacitores em período de até 1 ciclo (16,7 milissegundos).

A Figura 14.5 ilustra um equipamento de compensação de energia reativa (demonstração) de potência nominal de 300 kvar. Podem-se verificar, na parte inferior, os capacitores, na parte intermediária do painel, os reatores anti-ressonantes, e na parte superior, a entrada dos cabos, dispositivos fusíveis e bornes de ligação. Na parte superior, frontal, encontram-se os elementos estáticos de manobra e o controlador — este último recebe as informações da carga por transformadores de corrente instalados convenientemente.

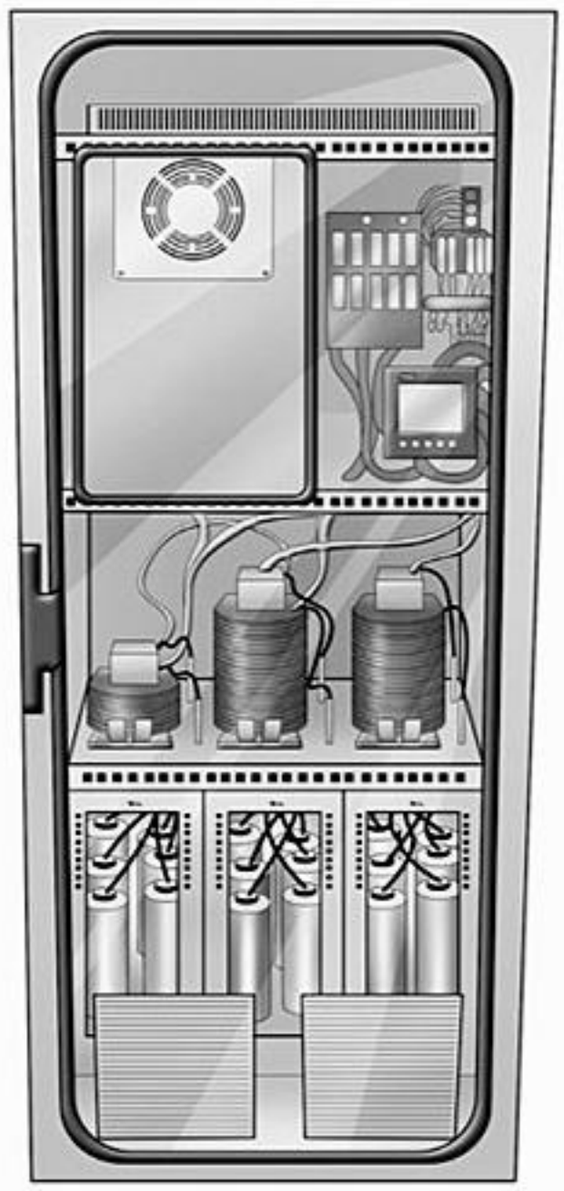


Figura 14.5 ■ Compensador estático de energia reativa (Fonte: Elspec Ltd.)

As restrições apontadas nos modelos apresentados podem ser minoradas com a injeção de energia reativa com a aplicação de elementos estáticos de manobra de capacitores (ou conjuntos de reator e capacitor), também chamada de compensação em tempo real devido à rápida comutação dos componentes. Essa é outra forma de compensação do fator de potência, notadamente quando o ciclo da carga é muito rápido e a especificação dos sistemas não é adequada.

As principais características do sistema de compensação estática são:

- Tempos de manobra desde 16,7 milissegundos, aplicados em cargas 'rápidas', tais como prensas, sistemas de solda a ponto, fornos a arco, guindastes, elevadores, sistemas de geração eólica, injetoras, equipamentos para indústria gráfica e de papel, equipamentos eletromédicos, centrífugas para indústria de açúcar e outras cargas que, apesar de tratadas como 'especiais', estão cada vez mais presentes em todos os processos.
- Isenção de transientes de manobra: a característica conhecida como *zero crossing* da manobra estática permite compensação reativa com isenção de transiente de manobra.
- Possibilidade de compensação reativa monofásica: cargas ligadas entre duas fases ou entre fase e neutro, tais como soldas a ponto, podem ter sua energia reativa compensada com a inserção de capacitores ligados da mesma forma que as cargas, promovendo injeção reativa adequada.
- Eficiência na regulação de tensão: quanto mais rápida for a compensação, melhor será a regulação de tensão.
- Equivalência entre as potências ativa e aparente: pode-se assumir que a potência aparente (kVA) e a potência ativa (kW) serão iguais durante todo o tempo de operação da carga, desde que o compensador reativo seja dimensionado para tal.
- Compensação de *flicker*: a compensação instantânea de energia reativa confere ao sistema competência para compensar o *flicker* (cintilação) causado por afundamentos de tensão provocados, em geral, por cargas que consomem consideráveis quantidades de energia reativa em curtos intervalos de tempo e em ciclos repetitivos.

A Figura 14.6 ilustra o comportamento da tensão antes e depois da compensação estática de energia reativa em um sistema industrial de solda a ponto. Observa-se, ainda, a sensível redução de corrente e a conseqüente redução das perdas elétricas.

A Figura 14.7 ilustra o comportamento da tensão em função do consumo de potência reativa da carga (elevador em prédio comercial, alimentado por gerador), causando o efeito do *flicker* (cintilação) em valores superiores aos limites estabelecidos pelas normas aplicáveis.

Cuidados com a compensação reativa em instalações com sistemas *backup* por geradores

Geradores de *backup* ou de emergência, cada vez mais presentes nas instalações comerciais, possuem restrição na alimentação de cargas capacitivas. Essa constatação pode ser observada na chamada curva de capabilidade, típica dos geradores de *backup*. O fato é que a carga pode tornar-se capacitiva por alguns instantes durante a manobra (desligamento) das cargas indutivas não acompanhadas pelos bancos de capacitores. Nessa situação, os geradores enxergam a carga com fator de potência capacitivo, causando alteração na excitação e, conseqüentemente, atuação da proteção com desligamento.

Sistemas rápidos de compensação, típicos da compensação estática, possibilitam alteração do fator de potência de referência do controle quando a fonte é alterada para o gerador, melhorando, inclusive, o desempenho da carga, mesmo quando alimentada pelo gerador. Cuidados adicionais devem ser tomados, considerando-se a mudança da impedância da fonte (rede-gerador), como comentado na Seção 14.6.

A outra possibilidade é desligar o sistema de compensação reativa quando os geradores assumem a carga.

14.6 Aspectos da carga — presença de harmônicas e regime de operação

Compensação de energia reativa na presença de cargas não-lineares — ressonância harmônica

Capacitores de potência ligados em uma rede elétrica indutiva podem ser modelados, com boa aproximação, por um circuito LC com uma freqüência de ressonância. Por outro lado, as cargas não-lineares presentes nas instalações possuem espectro harmônico típico do seu controle e acionamento. As cargas industriais acionadas por conversores de 6 pulsos, por exemplo, possuem componentes harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª, 13ª e outras ordens com menores intensidades. Os conversores de 12 pulsos possuem correntes de alimentação a partir da 11ª harmônica. As cargas monofásicas, tais como os computadores e cargas de iluminação, possuem componentes harmônicas desde a 3ª harmônica.

Se a freqüência de ressonância formada pelo conjunto das impedâncias da rede e dos capacitores ficar próxima da freqüência de uma das correntes típicas do espectro harmônico da carga, haverá o fenômeno da ressonância. Como conseqüência da ressonância, correntes harmônicas circularão pelos capacitores, causando ainda acréscimo de corrente na rede de alimentação e sobretensões exageradas.

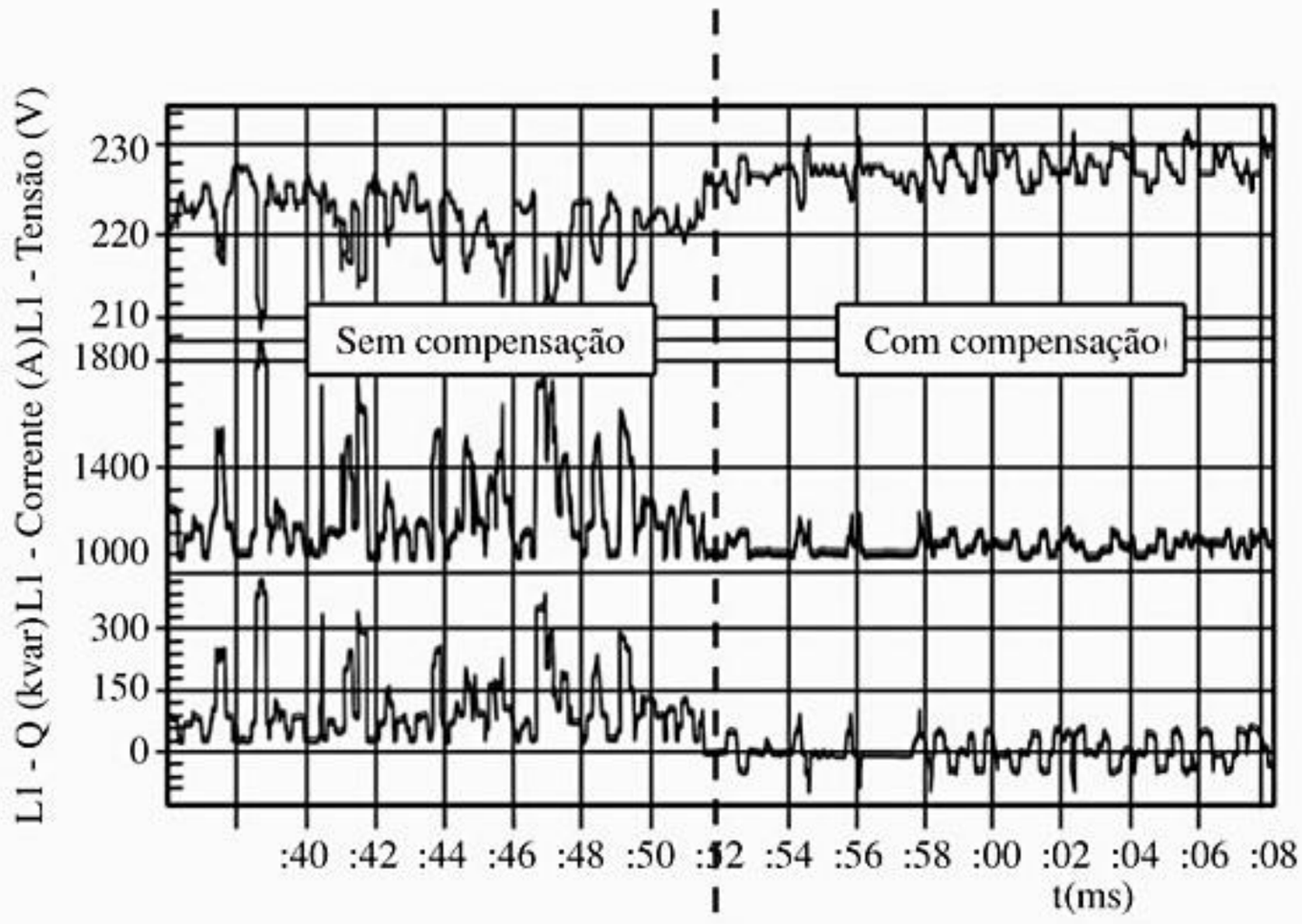


Figura 14.6 ■ Compensação estática tempo real em sistemas de solda a ponto (Fonte: Elspec Ltd.)

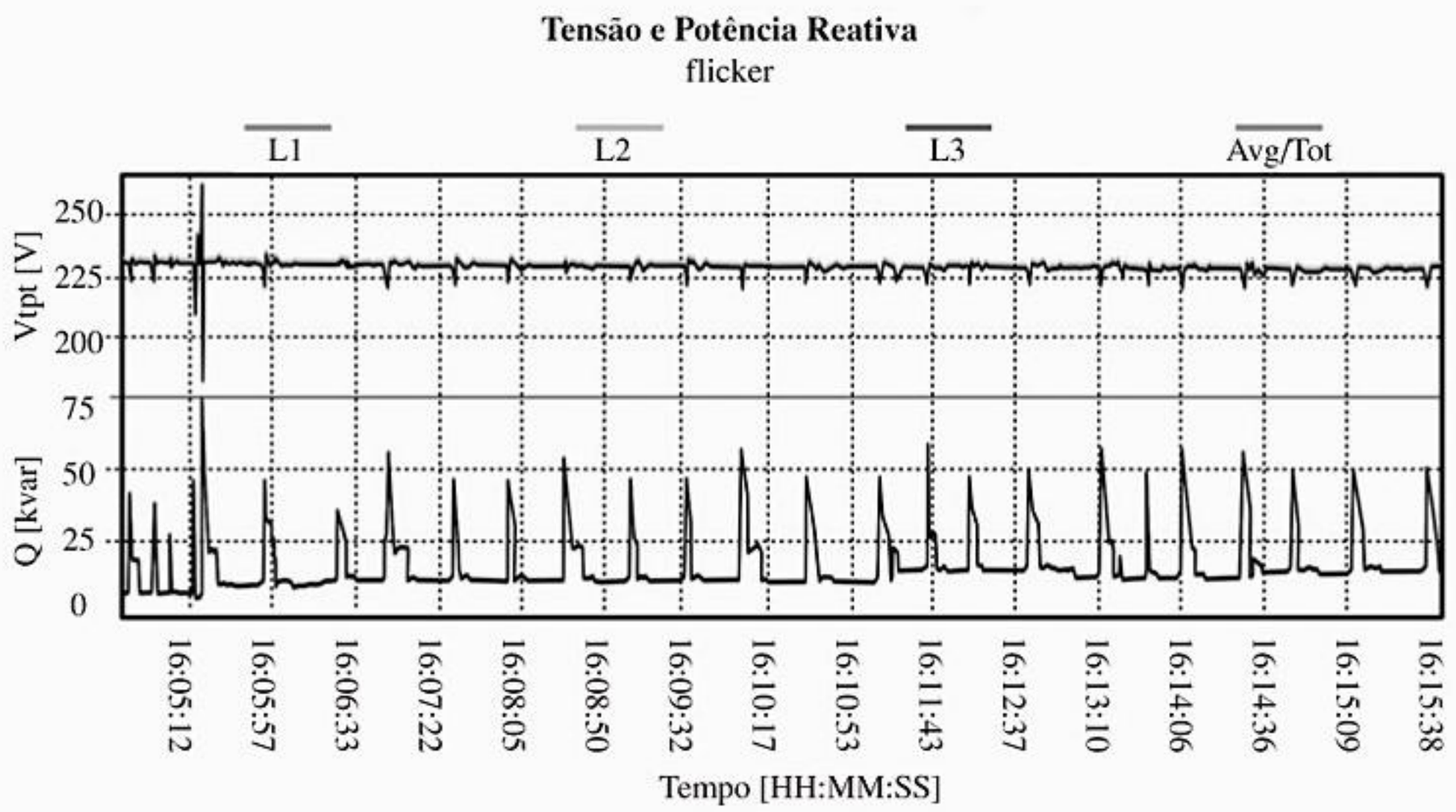


Figura 14.7 ■ Registro de *flicker*, causado por consumo instantâneo de energia reativa (Fonte: Ação Engenharia e Instalações.)

Na situação de ressonância, todos os componentes da rede (fonte, carga e capacitores) correm riscos de danos irreversíveis, sendo a situação mais favorável, aquela em que os capacitores são desconectados do circuito, quer pela atuação do dispositivo de proteção (dos capacitores) ou mesmo pela queima dos próprios capacitores.

Essa freqüência *de ressonância* pode ser calculada por:

$$hr = \sqrt{\frac{P_{cc}}{kvar}}$$

$$fr = \frac{1}{2\pi}\sqrt{LC} \qquad (14.18)$$

onde:

- *fr* é a freqüência de ressonância;
- *L* é a indutância equivalente da rede no local onde os capacitores são conectados;
- *C* é a capacitância total dos capacitores;
  hr é a ordem harmônica de ressonância;
- P_{cc} é a potência de curto-circuito trifásico na barra em que os capacitores são instalados;
- kvar é a potência dos capacitores em operação.
- A solução para os casos em que possa existir ressonância é a inserção de reatores anti-ressonantes em série com os capacitores, aumentando, desse modo,

Quadro 14.2 ▪ Resolução ANEEL 456

A resolução ANEEL 456 de 2000, em seu artigo 64, determina o modelo dessa cobrança de energia reativa. A resolução 456 está disponível no *site* da ANEEL: www.aneel.gov.br.
Conceitualmente, o modelo aplicado na cobrança considera a necessidade da medição das energias ativas e reativas, sejam indutivas ou capacitivas, consumidas em cada intervalo de integração de uma hora. A cada um desses intervalos de integração, calcula-se o fator de potência médio, comparando-o ao 'Fator de potência de referência', estabelecido em 0,92.
Se em determinado intervalo de medição (a cada hora) o fator de potência registrado for menor que 0,92, caberá ao consumidor o pagamento de um valor adicional, que será proporcional à energia consumida naquele intervalo e à relação entre o fator de potência de referência (0,92) e aquele medido.

assim a impedância do ramo de ligação do capacitor à instalação. A compensação de energia reativa das cargas atualmente empregadas em instalações industriais e complexos comerciais *não pode ser feita* sem a consideração da inserção desses reatores em série com os capacitores, sob pena de queima precoce, além de outras anomalias possíveis.

A Figura 14.8 representa o modelo elétrico de capacitores que são instalados na presença de cargas que contenham harmônicas.

A Figura 14.9 representa o mesmo modelo da Figura 14.8, mas após a inserção de reator no ramo do capacitor.

Definição do reator anti-ressonante a inserir no ramo de compensação

A técnica da anti-ressonância ou dessintonia é obtida com a escolha do reator a ser instalado em série com o capacitor, de forma que a impedância total do próprio conjunto *LC* e a rede em paralelo apresentem comportamento que não venha a ser alterado pela presença das harmônicas da carga com a conseqüente ressonância.

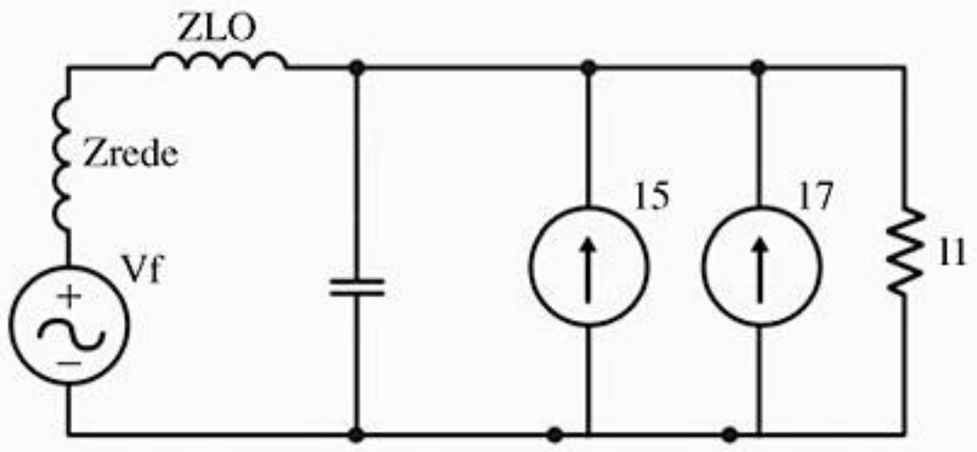


Figura 14.8 ▪ Modelo elétrico de capacitor instalado em rede com harmônicas

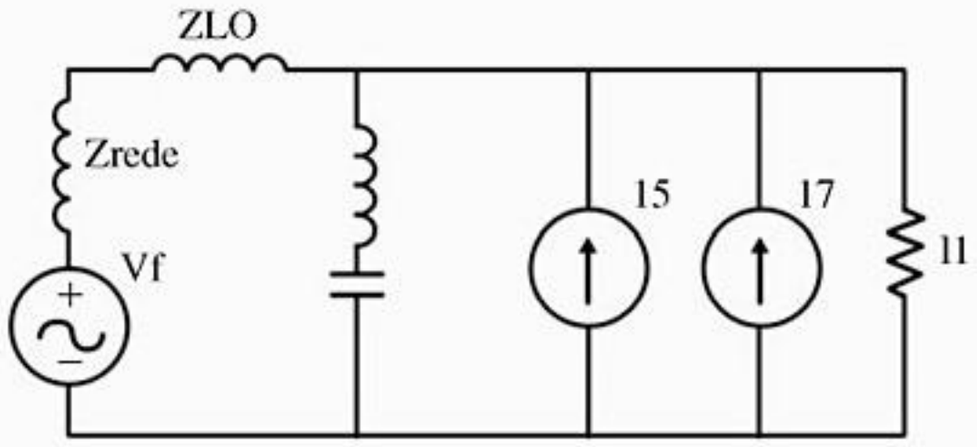


Figura 14.9 ▪ Modelo elétrico de conjunto capacitor/reator inserido em rede com harmônicas

Como a maioria das cargas industriais possui espectro de harmônicas típico, é possível especificar o reator para cada tipo de instalação, sem que em cada caso seja necessário calcular reatores específicos, os quais agregariam ainda mais custos aos sistemas de compensação de energia reativa. Assim, os fabricantes padronizam a impedância dos reatores em função dos capacitores a que serão interligados (Tabela 14.2).

A convenção adotada para o dimensionamento do reator é relacionar a impedância do reator à do capacitor (na freqüência fundamental), em que ele será conectado em série. A relação das duas impedâncias, em valores percentuais, definirá a especificação do reator.

$$p\% = \frac{Z_L}{Z_c} \tag{14.19}$$

$$p\% = \frac{\omega L}{\left(\frac{1}{\omega C}\right)} = \omega^2 \times LC \tag{14.20}$$

Para avaliar-se a sintonia do filtro, tem-se:

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{p\%}{LC}\right)} \tag{14.21}$$

Além disso, deve-se atentar para a elevação da tensão no capacitor quando associado em série com um reator. Dessa forma, os capacitores aplicados em sistemas anti-ressonantes deverão ser sobredimensionados em tensão, conforme a regra:

$$U_{\text{cap}} \geq \frac{U_{\text{rede}}}{1 - p\%} \tag{14.22}$$

Portanto, capacitores preexistentes em uma instalação, especificados apenas de acordo com a tensão nominal do sistema, não poderão ser reaproveitados na construção de um novo sistema anti-ressonante para a mesma instalação.

EXEMPLO

Capacitor trifásico de 40 kvar — 480V, com impedância total trifásica de 5,76 Ω e capacitância total de 462 μF (3 × 154 μF). Para a instalação de capacitor de forma anti-ressonante com reator de $p = 7$ por cento em rede 440 V, teremos a seguinte situação:

- Valor do reator: $Z_L = 7\ \% \times Z_C$; $Z_L = 0{,}40\ \Omega$; $L_{total} = 1{,}07$ mH
- Tensão no capacitor em tensão nominal da rede:

$$U_c = \frac{440}{(1-0{,}07)} = 473\,\text{V}$$

- Impedância total do ramo: $Z = -\text{j}\,5{,}76\ \Omega + \text{j}\,0{,}4\ \Omega = -\text{j}\,5{,}36\ \Omega$
- Potência reativa injetada: $Q = \frac{U^2}{Z} = \frac{440^2}{5{,}36} = 36\,\text{kvar}$

Notas:

- O valor da tensão de operação do capacitor (473 V) deve ser comparado à tensão nominal da rede (480 V). Caso a rede apresente uma sobretensão de, por exemplo, 5 por cento, o valor da tensão de operação atingirá 496 V, 3 por cento acima da tensão nominal do capacitor. Eventos repetidos dessa natureza contribuem para o desgaste prematuro do capacitor.
- Caso esse mesmo capacitor seja instalado com reator de $p = 14$ por cento, observa-se que a tensão de operação atingirá, em rede 440 V, o valor de 511 V, portanto acima dos 480 V nominais do capacitor. Nesse caso, será necessário especificar o capacitor com tensão nominal maior, por exemplo, 525 V.
- A instalação do capacitor com potência reativa nominal (Q_{nom}) e com tensão nominal (U_{nom}), sem reator anti-ressonante em uma rede com tensão de (U_{op}), sendo $U_{op} < U_{nom}$, reduzirá a injeção nominal de potência reativa na relação quadrática das tensões:

A potência reativa injetada (Q_{inj}) será:

$$Q_{inj} = Q_{nom} \times \left(\frac{U_{op}}{U_{nom}}\right)^2 \qquad (14.23)$$

Neste exemplo:

$$Q_{inj} = 40 \times \left(\frac{440}{480}\right)^2 = 33\,\text{kvar}$$

(redução de 16 por cento da potência reativa nominal)

Sistemas ressonantes — filtro sintonizado

Outra possibilidade de aplicação de reatores em série com os capacitores está relacionada ao uso de filtros passivos sintonizados em determinadas freqüências.

Ao contrário da solução anterior, quando o ramo *LC* tem sua impedância elevada para todas as freqüências, evitando a circulação das correntes harmônicas pelos capacitores, a situação sintonizada ou ressonante considera a circulação das harmônicas pelo conjunto. Essa situação deve considerar, necessariamente, outro aspecto construtivo do conjunto, uma vez que o caminho de menor impedância será justamente o ramo *LC*. Nesse caso, o filtro passivo terá dupla função: injetar energia reativa e filtrar harmônicas.

Cada fabricante tem suas técnicas próprias para dimensionar o filtro, mas, em geral, o que se faz é garantir que boa parte (e não 100%) das correntes harmônicas circule pelo filtro. Assim, um filtro de 5ª harmônica é sintonizado em 282 Hz (ou em 4,7H), pouco abaixo dos 300 Hz (5H), que seria a freqüência de sintonia.

Caso seja utilizado o mesmo capacitor do exemplo anterior para um filtro sintonizado próximo da 5ª harmônica (4,7H), o valor do reator será $p = 4{,}5$ por cento (conforme expressão (14.19). Então:

- Valor do reator: $Z_L = 4{,}5\% \times Z_c$;

$$Z_L = 4{,}5\% \times 5{,}76\Omega = 0{,}26\Omega$$
$$L_{TOTAL} = 0{,}69\ \text{mH}$$

- Tensão fundamental no capacitor em tensão nominal da rede: $U_c = \frac{440}{(1\ -\ 0{,}045)} = 461$ V
- Impedância total do ramo: $Z = -\text{j}\,5{,}76\ \Omega + \text{j}0{,}26\ \Omega$ $Z = -\text{j}\,5{,}50\ \Omega$
- Potência reativa injetada:

$$Q = \frac{U^2}{Z} = \frac{440^2}{5{,}50} = 35{,}2\,\text{kvar}$$

Tabela 14.2 ▪ Reatores típicos anti-ressonantes de mercado (fonte: Elspec Ltd.)

Impedância do reator em relação à do capacitor ($p\%$)	Freqüência de sintonia	Harmônica
7	227 Hz	H 3,78
6	245 Hz	H 4,08
14	160 Hz	H 2,67
5,67	252 Hz	H 4,2

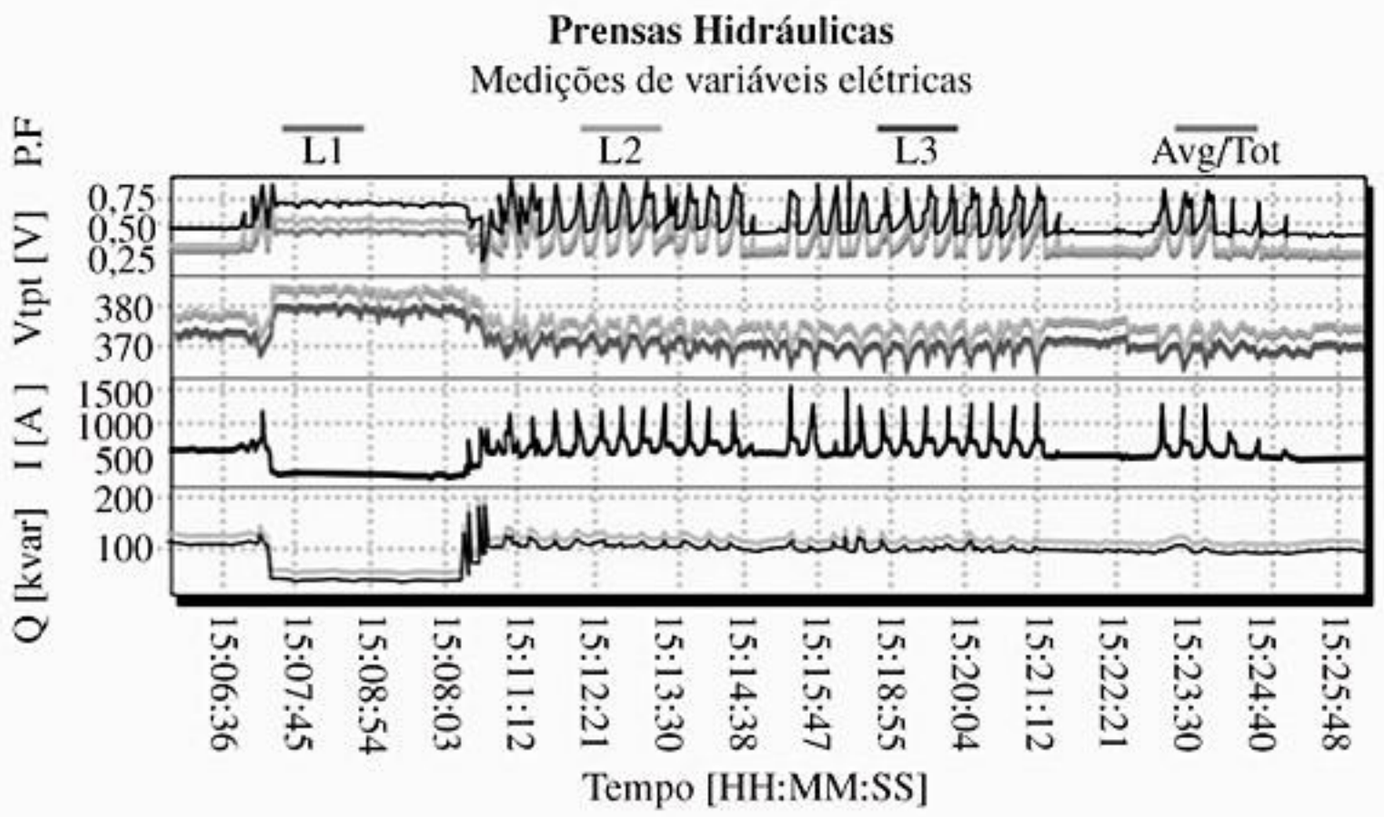


Figura 14.10 ■ Comportamento das variáveis elétricas de transformador que alimenta prensas com consumo instantâneo de energia reativa — periodo de integração: 1 ciclo (Fonte: Ação Engenharia e Instalações Ltda.)

- As correntes harmônicas previstas no filtro em função das cargas distorcidas deverão ser somadas à corrente de componente fundamental. Caso a carga não-linear ligada a esse circuito contenha em seu conteúdo 50 A de corrente harmônica de quinta ordem (I_5) e considerando-se que a relação de impedâncias em 300 Hz da rede e do circuito do filtro seja tal que o filtro absorva 70% dessa corrente, então a corrente total prevista no filtro será:

$$I_{\text{filtro}} = \sqrt{(I_1 + I_5)^2} = 60\,\text{A}$$

Alguns autores efetuam a soma algébrica no cálculo estimado da corrente do filtro, chegando, nesse caso, a 83 A. Essa diferença de critério é até justificável, pois outras correntes presentes e não consideradas poderão ser absorvidas pelo filtro.

Em função dessas correntes harmônicas previstas, surgirão tensões harmônicas adicionais nos capacitores que deverão também ser consideradas no cálculo da tensão rms total e especificação dos capacitores.

Os componentes do filtro deverão ser especificados em corrente e tensão, conforme a expectativa da operação, uma vez que a circulação das correntes harmônicas pelo filtro vai elevar a temperatura operacional e a tensão nos componentes.

Com a injeção reativa em sistema ressonante, além da redução da energia reativa, também a potência de distorção será reduzida, isto é, tanto o ângulo Φ como o λ serão reduzidos.

Regime da carga

Além da não linearidade, as cargas de uma instalação não operam em regime constante. Com isso, a avaliação do fator de potência e das outras variáveis elétricas deve ser, necessariamente, efetuada, com registros convenientes ao longo de um período, de forma que seu comportamento possa ser compreendido da forma também mais apropriada. O período de observação deve ser suficiente para que se observe o comportamento da carga em todas as situações. Uma intervenção em uma instalação elétrica baseada em observações pontuais, incompletas ou incorretas poderá incorrer em sérios danos às cargas e fontes. A Figura 14.10 ilustra o comportamento real de um transformador que alimenta prensas em indústria automotiva, ao longo do tempo.

Outras variáveis importantes, considerando-se o aspecto das medições para o diagnóstico da solução, são a taxa de aquisição dos instrumentos (pelo menos 256 a 1.024 amostras por ciclo) e o tempo de integração para as variáveis elétricas; ou ainda, cargas rápidas possuem comportamento de operação que podem atingir valores menores que 300 milissegundos. Caso o período de integração do instrumento não seja adequado, o resultado das medições simplesmente não representará a real solução, e a solução será prejudicada.

Normalmente, a medição para análise da operação de cargas extremamente variáveis deve considerar período de integração de 1 ciclo.

EXERCÍCIOS

1. Quais são as funções da injeção de reativos na rede elétrica?

2. Quais são as principais causas do baixo fator de potência das instalações?

3. Qual a definição do tetraedro de potência para cargas não-lineares?

4. Qual a expressão que permite determinar o valor da potência reativa do banco de capacitores para realizar a correção do fator de potência em função da potência ativa da carga e dos valores dos ângulos entre tensão e corrente, antes e depois da correção?
5. Quais são os métodos para aumentar o fator de potência?
6. Quais são as principais características das instalações de bancos de capacitores fixos?
7. Quais são as principais características das instalações de bancos de capacitores semi-automáticos?
8. Quais são os principais cuidados que devem ser tomados em instalações de bancos de capacitores automáticos acionados por contatores?
9. Quais as principais características do sistema de compensação estática?
10. Quais são as soluções para os casos em que possa existir ressonância devido ao fato de a freqüência de ressonância formada pelo conjunto das impedâncias da rede e dos capacitores ficar próxima da freqüência de uma das correntes típicas do espectro harmônico da carga?



15

Instalações de segurança e de reserva

15.1 Introdução

De modo geral, qualquer instalação elétrica está sujeita a ter problemas em sua alimentação de energia elétrica. Variações de tensão, de freqüência ou mesmo interrupções no fornecimento de energia podem ocorrer, seja no sistema da concessionária que alimenta a instalação, seja na própria instalação, pelas causas mais diversas.

O sistema da concessionária pode ser afetado por descargas atmosféricas, vendavais, acidentes, como o choque de veículos com postes, falhas em equipamentos, manobras etc. Internamente à instalação, curtos-circuitos e faltas em geral, sobrecargas temporárias, desequilíbrios de fase, falhas humanas, falta de fase, incêndios e outros acidentes podem comprometer a alimentação de energia da instalação como um todo ou de um ou mais de seus setores.

Atualmente, a continuidade no fornecimento de energia elétrica e, em certos casos, a 'qualidade' de energia fornecida são de vital importância para inúmeras atividades e situações.

Nos prédios de grande altura (BD2), nos prédios de alta densidade de ocupação (BD3) (lojas de departamentos, supermercados, cinemas, teatros, casas de shows etc.) e nos hospitais e hotéis (BD4), no caso de falta de energia elétrica, certos serviços essenciais à segurança das pessoas devem ser restabelecidos rapidamente. É o caso da iluminação das rotas de fuga em condições de perigo, dos sistemas de detecção e alarme de incêndio, das bombas de água para combate ao fogo etc. Para os hospitais, deve-se acrescentar que, em certos setores, como nos centros cirúrgicos, nas unidades de terapia intensiva etc., os tempos de interrupção toleráveis são extremamente curtos.

Na indústria, tanto no setor de utilidades como no de produção propriamente dita, a falta de energia elétrica pode significar grandes prejuízos na produção e mesmo perda de equipamentos. Por outro lado, com a sofisticação dos processos, dos controles e da instrumentação, são cada vez menores os tempos admitidos para a falta de alimentação elétrica.

Para os modernos equipamentos eletrônicos e para os computadores utilizados atualmente nas mais diversas atividades comerciais e industriais, torna-se crítica a necessidade de um fornecimento de energia elétrica contínuo, confiável e de alta qualidade. Muitas instalações exigem uma energia ininterrupta, virtualmente livre de variações de tensão e de freqüência, de surtos e de transitórios.

Nessas condições, é fácil entender a grande importância dada aos sistemas auxiliares de fornecimento de energia elétrica, fontes e circuitos, que devem ser acionados quando da falha na alimentação normal de uma instalação. São as alimentações e instalações *de segurança* e *de reserva*.

Hoje em dia, as principais normas de instalações elétricas tratam do assunto com bastante destaque, como é o caso do NEC norte-americano, da norma francesa NFC15-100, da IEC60364 e da NBR 5410.

Acrescente-se que as instalações de segurança são hoje objeto de rigorosas exigências das autoridades em diversos países, inclusive no Brasil, exigências essas que, geralmente, variam em função das características dos prédios e de sua ocupação.

15.2 Conceitos básicos

Sistema de alimentação de segurança

Pode-se definir *sistema de alimentação elétrica para serviços de segurança* como um sistema de alimentação elétrica previsto para manter o funcionamento de equipamentos e instalações essenciais à segurança das pessoas e à salubridade e/ou exigido pela legislação para evitar danos significativos ao meio ambiente ou a outros materiais.

São exemplos de serviços de segurança: a iluminação de segurança (iluminação de emergência), as bombas de incêndio, os elevadores para brigada de incêndio e bombeiros, os sistemas de alarme, como os de incêndio, fumaça, CO e intrusão, os sistemas de exaustão de fumaça, os equipamentos médicos essenciais.

As instalações de segurança também devem observar, no que for pertinente, a legislação referente a edificações, os códigos de segurança contra incêndio e pânico e outros códigos de segurança aos quais a edificação e/ou as atividades nela desenvolvidas possam estar sujeitas.

Um sistema de alimentação de segurança é constituído por uma fonte, por circuitos, chamados de *circuitos de segurança*, que vão até os terminais dos equipamentos de utilização e, em certos casos, incluem os próprios equipamentos alimentados.

A fonte deve possuir capacidade, confiabilidade e disponibilidade adequadas para permitir o funcionamento simultâneo de todos os equipamentos por ela servidos, durante o tempo necessário à eliminação do problema.

No caso de falha da alimentação normal, os circuitos de segurança devem ser alimentados com a necessária rapidez e por um tempo suficiente, para evitar riscos à segurança das pessoas.

As instalações de segurança são utilizadas de um modo geral, mas principalmente para garantir uma iluminância tal que permita uma evacuação segura e fácil das pessoas, em situações de emergência, em prédios de altura considerável *e/ou* que sejam ocupados por grande número de pessoas, sejam eles comerciais, institucionais, industriais ou mesmo residenciais; trata-se da *iluminação de segurança, também chamada de iluminação de emergência.*

Sistema de alimentação elétrica de reserva

Os *sistemas de alimentação elétrica de reserva,* opcionais, são previstos para manter o funcionamento da instalação ou de partes da instalação no caso de interrupção da alimentação normal, por razões outras que a segurança das pessoas. São casos nos quais a interrupção da alimentação elétrica pode causar situações de desconforto ou prejudicar atividades comerciais e industriais, como, por exemplo, equipamentos de processamento de dados, comunicação, ar-condicionado, equipamentos industriais etc.

15.3 Fontes de segurança e de reserva

Nas instalações de segurança e de reserva, podem ser usados como fontes:

- baterias;
- geradores independentes da alimentação normal;
- ramais separados da rede de distribuição, efetivamente independentes da alimentação normal;
- sistemas especiais.

As baterias são utilizadas, em princípio, na alimentação de equipamentos à corrente contínua; no entanto, quando combinadas com inversores (CC/CA), podem alimentar equipamentos à corrente alternada. São utilizadas, sobretudo, na alimentação de iluminação de segurança.

Os geradores são usados como fonte de segurança ou de reserva em instalações de maior potência, sendo previstos para serviços de longa duração. Na grande maioria das aplicações, os geradores são de baixa tensão, podendo ser de alta tensão em certos casos especiais de instalações de potência muito elevada.

Uma instalação de segurança ou de reserva pode ser alimentada por um ramal da rede de distribuição da concessionária, física e eletricamente separado do ramal normal de alimentação da instalação total, de modo a minimizar as possibilidades de interrupções simultâneas. As entradas dos dois ramais devem ser separadas, e sua alimentação deve provir de transformadores separados ou mesmo de subestações diferentes.

Certas instalações de segurança e de reserva necessitam de fontes especiais, os chamados *sistemas de energia ininterrupta*, também designados pela sigla UPS (*Uninterruptible Power Supply*), que geralmente incluem retificador, bateria de acumuladores e inversor. Tais sistemas podem ser bastante complexos e são utilizados em algumas áreas de hospitais, como centros cirúrgicos, UTIs etc., e em setores de controle de vôo em aeroportos, como centros de processamento de dados.

As fontes de segurança e as de reserva devem ser adequadamente selecionadas em função do serviço a que se destinam e das características dos equipamentos de utilização a serem alimentados, uma vez que deverão manter a alimentação pelo tempo necessário à eliminação do problema surgido com a fonte normal.

Devem ser instaladas como equipamentos fixos, em locais acessíveis apenas a pessoas advertidas (BA4) ou qualificadas (BA5), e de tal modo que não sejam afeta-

das por falha de fonte normal. Observe que o local de instalação das fontes deve ser suficientemente ventilado, de maneira a evitar que gases ou fumos delas provenientes possam penetrar em áreas ocupadas por pessoas.

Uma fonte de segurança só pode ser utilizada para outros serviços que não os de segurança se isso não comprometer sua disponibilidade para os serviços de segurança. Em um equipamento alimentado por dois circuitos distintos (normal e segurança), uma falta em um dos circuitos não deve prejudicar a proteção contra choques elétricos nem o funcionamento correto do outro circuito. Além disso, qualquer falta ou perturbação que venha a ocorrer em circuito não destinado a alimentar serviços de segurança não deve provocar a abertura de nenhum circuito que alimente serviços de segurança. Em situações de emergência, e quando o serviço de segurança envolvido assim exigir, pode ser necessário o desligamento automático de cargas não vinculadas a serviços de segurança.

15.4 Classificação das alimentações de segurança

As alimentações das instalações de segurança, segundo a NBR 5410, podem ser:

- Não-automáticas: quando sua ligação é realizada por um operador.
- Automáticas: quando sua ligação não depende da intervenção de um operador.

Preferencialmente, as instalações de segurança devem ser alimentadas automaticamente.

As alimentações automáticas podem ser classificadas em função da duração da comutação, como:

- Sem interrupção: quando a alimentação pode ser garantida de modo contínuo, nas condições especificadas durante o período de transição, por exemplo, no que diz respeito às variações de tensão e freqüência.
- Com interrupção muito breve: quando a alimentação fica indisponível em até 0,15 segundo.
- Com interrupção breve: quando a alimentação fica indisponível em até 0,5 segundo.
- Com interrupção média: quando a alimentação fica indisponível em, no máximo, 15 segundos.
- Com interrupção longa: quando o tempo de comutação é superior a 15 segundos.

Para os serviços de segurança destinados a funcionar em condições de incêndio (bomba de incêndio, iluminação de emergência etc.), deve-se selecionar uma fonte de segurança que possa manter a alimentação pelo tempo adequado, e todos os componentes do sistema devem apresentar adequada resistência ao fogo, seja construtivamente, seja por meio de disposições equivalentes quando de sua instalação.

15.5 Circuitos de segurança

Generalidades

Nas instalações de segurança, os circuitos, tanto os de distribuição quanto os terminais, são independentes dos circuitos 'normais' da instalação. Isso significa que nenhuma falta, intervenção ou modificação em circuito não pertencente aos serviços de segurança deve afetar o funcionamento do(s) circuito(s) dos serviços de segurança. Para tanto, pode ser necessário separar os circuitos dos serviços de segurança dos demais circuitos, mediante materiais resistentes ao fogo, condutos e/ou percursos distintos.

No caso de equipamentos alimentados individualmente por baterias autônomas, a alimentação para carga da bateria autônoma não precisa ser independente da alimentação de outros circuitos. Entende-se por bateria autônoma o conjunto constituído de bateria isenta de manutenção, carregador e dispositivo de teste.

Os circuitos de segurança podem, em princípio, ser instalados de todas as maneiras normalizadas, obedecendo a todas as prescrições relativas aos circuitos normais de uma instalação. Seus componentes devem ser dispostos de modo a facilitar os ensaios, a inspeção e a manutenção periódicos.

As linhas elétricas com circuitos de serviços de segurança não devem atravessar locais com riscos de incêndio (BE2), a menos que elas sejam resistentes ao fogo. As linhas não devem atravessar, em nenhuma hipótese, locais com riscos de explosão (BE3).

Cabos para circuitos de segurança

Os cabos elétricos devem ser considerados componentes críticos de uma instalação de segurança, uma vez que são os responsáveis pela detecção e sinalização (alimentando detectores de fogo e fumaça, alarmes etc.), bem como pelo acionamento dos equipamentos de segurança (bombas de incêndio, iluminação de segurança etc.).

Os cabos para circuitos de segurança (ver Seção 5.8, em "Cabos para circuitos de segurança") devem suportar os efeitos da exposição ao fogo por um tempo adequado sem perder suas propriedades elétricas.

Proteções

No que diz respeito às proteções contra contatos indiretos, as instalações de segurança devem atender ao esquema IT, isto é, não deve haver seccionamento quando ocorrer uma primeira falta fase-massa. No entanto, devem ser utilizados dispositivos de controle de falha do isolamento que produzam uma indicação sonora e visual por ocasião da primeira falta.

Os circuitos de segurança, sejam eles de distribuição ou terminais, devem ser protegidos contra corrente de curto-circuito. No entanto, tendo em vista principalmente as características dos cabos e a natureza do serviço, a proteção contra correntes de sobrecarga pode ser omitida, por exemplo, se a perda da alimentação representar um perigo maior.

Os dispositivos de proteção contra sobrecorrente devem ser selecionados e instalados de modo a evitar que a sobrecorrente em um circuito prejudique o funcionamento correto dos demais circuitos dos serviços de segurança.

A proteção contra curtos-circuitos deve ser sempre garantida, exceto nos casos dispensados pela legislação.

No que se refere à proteção contra choques elétricos, a parte da instalação representada pelos serviços de segurança (fontes, linhas e equipamentos alimentados) deve ser, preferencialmente, objeto de medida que não implique seccionamento automático da alimentação na ocorrência de uma falta. Se os serviços de segurança forem concebidos, eletricamente, como um esquema IT, o conjunto deve ser provido de dispositivo supervisor de isolamento (DSI).

Os dispositivos de proteção, manobra e controle, incluindo os controles da iluminação de emergência, devem ser claramente identificados e acessíveis apenas a pessoas advertidas ou qualificadas (BA4 ou BA5).

EXERCÍCIOS

1. Em quais tipos de prédios o restabelecimento de energia de serviços essenciais à segurança das pessoas deve ser feito, no caso de falta de energia elétrica?

2. Em quais setores dos hospitais os tempos de interrupção toleráveis são extremamente curtos?

3. Quais são as principais normas de instalações elétricas que tratam de instalações de segurança e de reserva?

4. Qual é a definição de sistema de alimentação elétrica para serviços de segurança?

5. Apresente alguns exemplos de serviços de segurança.

6. Que elementos compõem uma instalação de serviços de segurança?

7. Quais fontes podem ser utilizadas em instalações de segurança e de reserva?

8. Como podem ser classificadas as alimentações automáticas, em função da duração da comutação?

9. Que tipos de locais as linhas elétricas com circuitos de serviços de segurança não devem atravessar?

10. Quanto às proteções contra contatos indiretos, as instalações de segurança devem atender a qual esquema de aterramento?



16

Luminotécnica

16.1 Fundamentos[1]

Radiação é a emissão ou transporte de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas (ou de partículas) que atravessam o vácuo a uma velocidade próxima a 300×10^3 km/s. Quando a radiação atravessa um meio material (por exemplo, ar ou vidro), a velocidade de propagação é reduzida em função do índice de propagação do meio.

Para cada tipo de onda, a velocidade de propagação (c) é igual ao produto do comprimento de onda (λ) pela freqüência (f), isto é

$$c = \lambda \cdot f \qquad (16.1)$$

O fluxo (ou potência) radiante é a potência emitida, transferida ou recebida em forma de radiação, sendo medido em W.

A luz (ou 'radiação visível') pode ser definida como a radiação eletromagnética capaz de produzir uma sensação visual. É a radiação eletromagnética compreendida em uma faixa de comprimentos de onda cujos limites, ainda não perfeitamente definidos, são geralmente considerados entre 380 e 400 nanômetros (nm), como limite inferior, e 760 e 780 nanômetros, como limite superior.

O espectro visível pode ser dividido em um certo número de faixas de comprimento de onda, cada uma causando no olho humano uma impressão de cor. São elas:

- 380 a 436 nm: violeta;
- 436 a 495 nm: azul;
- 495 a 566 nm: verde;
- 566 a 589 nm: amarelo;
- 589 a 627 nm: laranja;
- 627 a 780 nm: vermelho.

As radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda imediatamente inferiores ao da cor violeta e superiores ao do vermelho do espectro visível são chamadas, respectivamente, de radiações ultravioleta e infravermelha.[2] Geralmente, suas faixas são consideradas iguais a:

- Ultravioleta: de 100 a 400 nm.
- Infravermelha: de 780 nm a 1.000 nm.

Fluxo luminoso (Φ) é uma grandeza derivada do fluxo radiante pela avaliação da radiação, de acordo com a sua ação sobre um receptor seletivo, cuja sensibilidade espectral é definida pelas curvas de eficácia espectral padrão CIE (Comissão Internacional de Iluminação). É entendido como a quantidade total de luz emitida por segundo por uma fonte luminosa, sendo medido em lumens (lm). Um lúmen (1 lm) corresponde à quantidade de luz produzida em 1 segundo por uma radiação eletromagnética com $\lambda = 555$ nm e fluxo radiante de 1/680 W.

Eficácia luminosa (de uma radiação) é a razão do fluxo luminoso para o fluxo radiante correspondente. O termo 'eficácia' foi adotado para indicar a qualidade de uma radiação de ser eficaz quanto à possibilidade de produzir uma sensação luminosa, não devendo ser confundida com eficiência. A eficiência para as lâmpadas (elétric-

1. Definições de acordo com a NBR 5461.

2. Os prefixos "ultra" e "infra" estão relacionados à freqüência.

as) é dada pela razão do fluxo luminoso produzido para a potência elétrica consumida, sendo indicada em lm/W.

A intensidade luminosa (I) de uma fonte em uma direção dada é o limite da razão do fluxo luminoso no interior de um ângulo sólido[3] cujo eixo é a direção considerada para esse ângulo sólido quando tende para zero (Figura 16.1). É medida em candelas (cd), sendo que 1 cd corresponde à intensidade luminosa de uma fonte esférica com emissão uniforme em todas as direções, que emite um fluxo total de 12,56 lm. Pode-se escrever:

$$I = \lim_{\Delta\Omega \to 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} = \frac{d\Phi}{d\Omega} \qquad (16.2)$$

A iluminância ou iluminamento (E) é o limite da razão do fluxo luminoso recebido por uma superfície, em torno de um ponto considerado, para a área dessa superfície (Figura 16.1). É medida em lux (lx), observando-se que 1 lx é a iluminância de uma superfície de 1 m² sobre a qual incide um fluxo luminoso de 1 lm. Pode-se escrever:

$$E = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} = \frac{d\Phi}{dS} \qquad (16.3)$$

A iluminância (iluminamento) de ambientes de trabalho costuma ser definida em termos de iluminância média no plano de trabalho (Em), sendo este um plano horizontal imaginário acima do piso, com uma altura variando de 0,75 a 1 m, cobrindo a área total. A iluminância média é calculada por

$$E_m = \frac{\Phi_T}{S} \cdot \eta \cdot d \qquad (16.4)$$

onde Φ_T é o fluxo luminoso total emitido pelas lâmpadas (lm), S é a área do plano de trabalho (m²), η é o "fator de utilização" e d é o "fator de depreciação". A Tabela 16.1 apresenta, em função do tipo de atividade, os valores recomendados de iluminamento (médio), de acordo com a NBR 5413.

Uma luminária é um aparelho que distribui, direciona, filtra ou converte a luz emitida por uma ou mais lâmpadas e que contém todos os dispositivos necessários para fixar e proteger essas lâmpadas e para ligá-las ao circuito de alimentação.

São considerados requisitos básicos de uma luminária:

- Proporcionar suporte e conexão elétrica para a(s) lâmpada(s).
- Controlar e distribuir o fluxo luminoso proveniente da(s) lâmpada(s).
- Manter a temperatura de operação da(s) lâmpada(s) dentro de limites prefixados.
- Permitir uma instalação fácil da(s) lâmpada(s) e de outros equipamentos (se for o caso).
- Permitir fácil manutenção.
- Ser adequada ao ambiente, quanto a aparência e influências externas.
- Se metálica, permitir fácil ligação do condutor de proteção.
- Absorver o mínimo de fluxo luminoso produzido pela(s) lâmpada(s).

O termo "aparelho de iluminação" é muitas vezes usado como sinônimo de "luminária".

Uma parte do fluxo luminoso emitido por uma lâmpada é absorvida pela luminária e não contribui para a iluminação do ambiente. O fluxo restante é irradiado parcialmente para cima e parcialmente para baixo, ou seja, por cima e por baixo do nível de um plano horizontal que passa pelo centro da luminária, como mostra a Figura 16.2. A parte da luz irradiada diretamente para o plano de trabalho é a que mais contribui para o iluminamento. Apenas uma parte da luz irradiada para o teto e paredes atinge esse plano, muitas vezes, após várias reflexões. O fator de utilização (η) é a razão do fluxo útil,

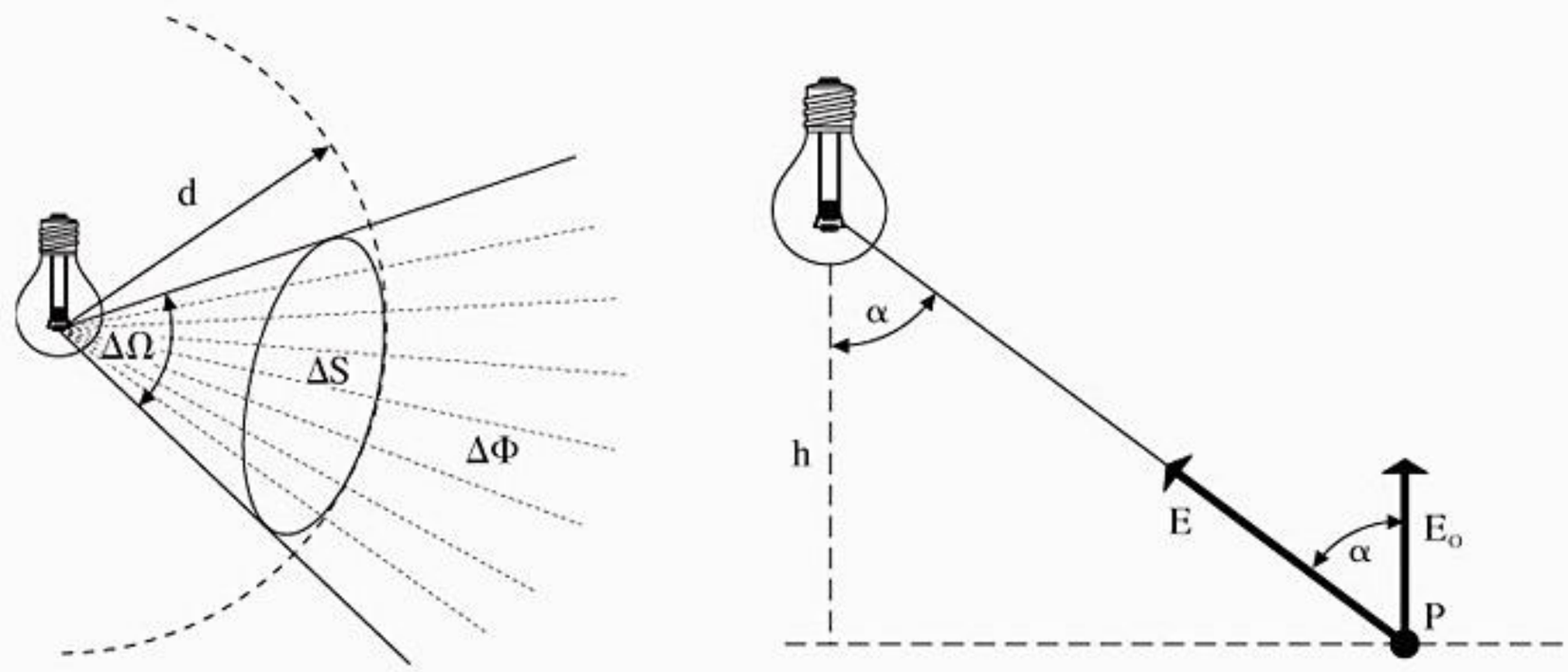


Figura 16.1 ■ Intensidade luminosa e iluminância (Cortesia da Bticino)

3. Ângulo sólido é o ângulo subentendido no centro de uma esfera por uma área na sua superfície.

Tabela 16.1 ■ Iluminâncias recomendadas pela NBR 5413

Atividade	Iluminâncias (lx)
Mínimo para ambientes de trabalho	150
Tarefas visuais simples e variadas	250 a 500
Observações contínuas de detalhes médios e finos (trabalho normal)	500 a 1.000
Tarefas visuais contínuas e precisas (tabalho fino, por exemplo, desenho)	1.000 a 2.000
Trabalho muito fino (iluminação local, por exemplo, conserto de relógios)	Acima de 2.000

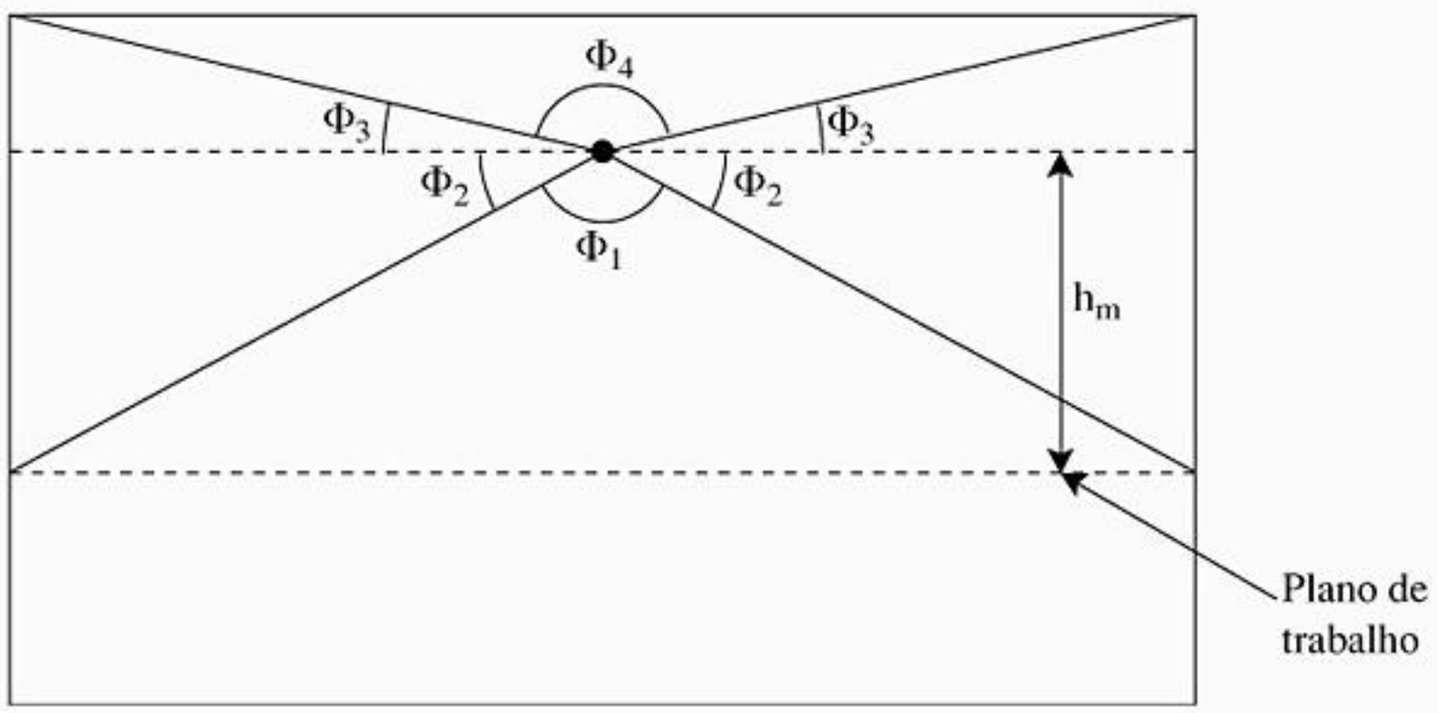


Figura 16.2 ■ Distribuição do fluxo luminoso da lâmpada, sendo Φ_1 a parte que incide diretamente no plano de trabalho, Φ_2 a que incide sobre a parede por baixo da luminária, Φ_3 a que incide sobre a parede por cima da luminária e Φ_4 a parte do fluxo que incide sobre o teto

isto é, aquele que incide efetivamente sobre o plano de trabalho, para o fluxo total emitido.

O fator de utilização depende:

- Da distribuição de luz da luminária.
- Do rendimento da luminária, entendido como a razão do fluxo emitido para a soma dos fluxos (individuais) das lâmpadas.
- Da reflexão do teto, paredes e plano de trabalho (ou piso).
- Do fator do local (K), função das dimensões do ambiente e definido por

$$K = \frac{l \cdot b}{h_m(l + b)} \qquad (16.5)$$

Onde:

- l = comprimento do local;
- b = largura do local;
- h_m = altura de montagem da luminária (distância da fonte de luz ao plano de trabalho) (ver Figura 16.2);
- Da distribuição das luminárias no ambiente.

O fator de depreciação (d) pode ser definido como a razão do iluminamento médio no plano de trabalho, após um certo período de uso da iluminação, para o iluminamento médio obtido nas mesmas condições, com a instalação nova. Esse fator leva em consideração o fato de que, com o decorrer do tempo, haverá acumulação de poeira nos aparelhos de iluminação, o teto e as paredes ficarão sujos, e as lâmpadas fornecerão menor quantidade de luz. Alguns desses problemas podem ser eliminados ou amenizados por meio de manutenção periódica, sendo que, na prática, podem ser adotados os valores indicados na Tabela 16.2. Os fabricantes fornecem, para cada conjunto de luminárias, os fatores de utilização e depreciação.

16.2 Tipos de lâmpadas[4]

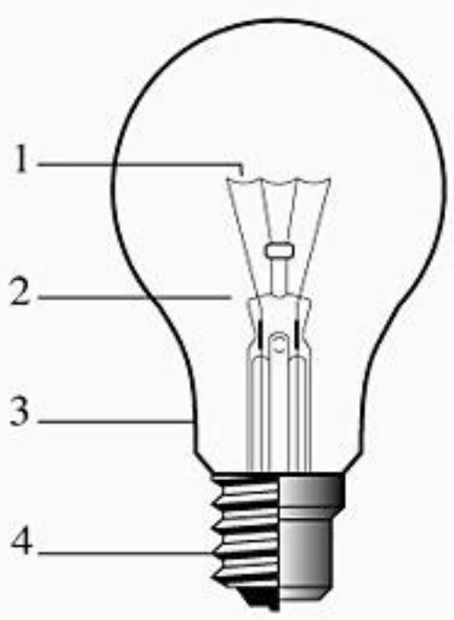
Lâmpadas incandescentes

As principais partes de uma lâmpada incandescente são o filamento, o bulbo, o gás e a base, como mostra a Figura 16.3.

4. Com base na publicação *Noções básicas de iluminação* da Philips Iluminação.

Tabela 16.2 ■ Valores usuais do fator de depreciação

Tipo de ambiente	Período de manutenção (h)		
	2.500	5.000	7.500
Limpo	0,95	0,91	0,88
Normal	0,91	0,85	0,80
Sujo	0,80	0,66	0,57



Partes principais de uma lâmpada incandescente:
1 - Filamento
2 - Gás
3 - Bulbo
4 - Base

Figura 16.3 ■ Lâmpada incandescente

Quanto maior a temperatura do filamento, maior a proporção da energia radiada na região visível do espectro e maior a eficácia da lâmpada. O filamento usado nas lâmpadas incandescentes modernas é feito de tungstênio, que tem um ponto elevado de fusão e um ponto baixo de evaporação. Assim, permite temperaturas maiores de operação e, conseqüentemente, maior eficácia do que seria obtida com outros metais.

Um aumento da eficácia é obtido espiralando-se o filamento. O filamento duplamente espiralado (o que aumenta ainda mais a eficácia e diminui, ao mesmo tempo, o tamanho do filamento) é usado em muitos tipos de lâmpadas incandescentes. Um filamento espiralado apresenta uma superfície efetiva menor para o gás, e a perda de calor por condução e convecção é reduzida.

O filamento de uma lâmpada incandescente é colocado em um invólucro de vidro selado, chamado de bulbo, que pode ser transparente ou ter acabamento argenta (leitoso). As lâmpadas com acabamento argenta proporcionam uma boa distribuição do fluxo luminoso, atenuando as sombras e o ofuscamento.

O bulbo é disponível em uma grande variedade de formas.

A evaporação do filamento é reduzida enchendo-se o bulbo com um gás inerte; conseqüentemente, a temperatura de funcionamento do filamento poderá ser maior. Nitrogênio e argônio são os gases mais comumente usados. Criptônio é um gás inerte que causa menor perda por condução e convecção, porém, por causa do seu preço, até agora só é usado em algumas lâmpadas especiais.

A base serve para conectar a lâmpada ao receptáculo. Para iluminação geral, existem bases de rosca e bases baionetas. Essas bases são identificadas pela letra E (Edson) e B (baioneta) na referência do tipo, seguidas por um número que indica o diâmetro da base em milímetros. O material da base é, geralmente, latão, alumínio ou níquel.

As lâmpadas incandescentes espelhadas têm um espelho sobre a parte da superfície interna do bulbo. Esse refletor interno, não está sujeito a corrosão ou a contaminação de quaisquer espécies; conseqüentemente, custos de manutenção são evitados e uma alta eficiência é mantida durante a ida da lâmpada.

A alta temperatura do filamento em uma lâmpada incandescente normal causa a evaporação de partículas de tungstênio, que se condensam na parede do bulbo, resultando no escurecimento. As lâmpadas halógenas contêm halogênio (isto é, iodo, flúor e bromo) adicionado ao gás normal e funcionam sob o princípio do ciclo de halogênio regenerativo, para evitar o escurecimento.

Nessas lâmpadas, a temperatura do bulbo é suficientemente elevada para evitar a condensação. O tungstênio evaporado combina com o halogênio para formar um componente tungstênio-halogênio, em forma de gás. Esse gás, por força das correntes de convenções, aproxima-se do filamento, é decomposto pela alta temperatura e volta ao filamento. Esse ciclo recebe o nome de ciclo regenerativo.

O invólucro tubular da lâmpada é feito de quartzo especial, resistente às altas temperaturas necessárias ao funcionamento do ciclo de halogênio. São muito menores em tamanho que as lâmpadas incandescentes normais, sendo usadas, principalmente, em instalações com projetores de diversos tipos e como fonte de luz para automóveis.

As lâmpadas incandescentes com refletor dicróico combinam os benefícios de uma lâmpada halógena com a vantagem de um refletor multifacetado. Este, recoberto com uma película constituída por um filtro químico (dicróico), permite a reflexão da luz visível e a transmissão, para a parte de trás da lâmpada, de mais de 50% da radiação infravermelha, resultando em um facho de luz mais frio.

Lâmpadas de descarga

Aspectos gerais

A luz de uma lâmpada de descarga não é, como no caso da lâmpada incandescente, produzida pelo aquecimento de um filamento, mas por uma contínua descarga

elétrica em um gás ou vapor ionizado, às vezes em combinação com a luminescência de fósforos, que são excitados pela radiação da descarga. Lâmpadas de descarga geralmente não podem ser operadas sem um dispositivo de limitação da corrente, ou reator, ligado no circuito da lâmpada.

As partes principais de uma lâmpada de descarga, como a lâmpada de mercúrio de alta pressão, são mostradas na Figura 16.4.

O tubo no qual a descarga elétrica se manifesta tem, geralmente, a forma cilíndrica. Em lâmpadas fluorescentes tubulares (ou mercúrio de baixa pressão), esse tubo é feito de vidro alcalino-silicato transparente. Em lâmpadas de mercúrio de alta pressão, é usado quartzo ou sílica. Nas lâmpadas de sódio de baixa pressão, é usado um tubo de vidro alcalino forrado internamente com vidro borosilicato resistente ao sódio; para sódio de alta pressão, o material usado é o óxido de alumínio sintetizado e transluzente.

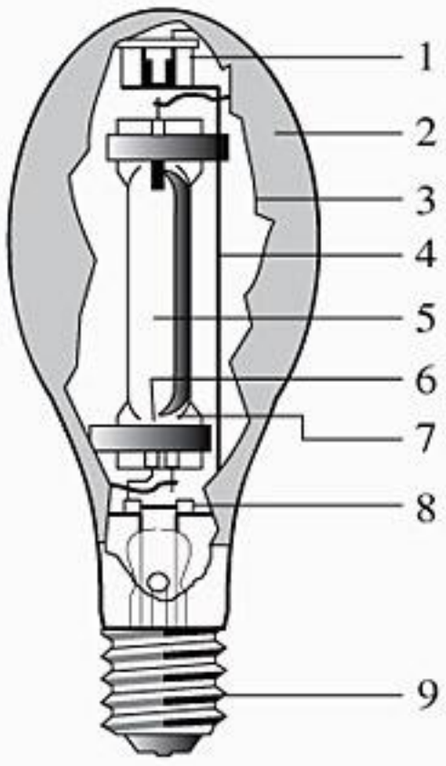
Os eletrodos geralmente são feitos de tungstênio, espiralados em forma de colméia, dependendo do tipo de lâmpada. Em todos os casos, contêm um material emissivo para facilitar a emissão de elétrons. O eletrodo é eletricamente ligado à base da lâmpada através de uma ligação hermética.

A base pode ser do tipo rosca ou baioneta, servindo para ligar a lâmpada ao receptáculo.

Exceto no caso da lâmpada fluorescente tubular, o tubo de descarga é colocado em um bulbo externo. Esse bulbo serve para proteger o tubo de descarga contra influências externas. Para essa finalidade, ele é preenchido com um gás inerte (nitrogênio) ou é mantido a vácuo. O bulbo poderá ser internamente coberto com uma camada difusa ou com uma camada de fósforo para melhorar a reprodução de cor. Ele absorve a radiação ultravioleta emitida por diversos tipos de lâmpadas. Algumas formas típicas de bulbos são apresentadas na Figura 16.5.

As lâmpadas de descarga são operadas juntamente com um reator, cuja principal função é limitar a corrente na lâmpada ao valor recomendado. Na maioria das vezes, o reator é uma combinação de uma indutância e de capacitores.

Um starter ou ignitor é usado para iniciar a descarga. Sozinho ou em combinação com o reator, ele fornece pulsos de tensão, que facilitam a ionização do caminho da descarga e provocam a partida da lâmpada.



Lâmpada a vapor de mercúrio de alta pressão:
1- Mola de suporte
2- Bulbo externo de vidro duro, forma ovóide
3- Camada interna de fósforo
4- Fio de entrada/suporte
5- Tubo de descarga de quartzo
6- Eletrodo auxiliar
7- Eletrodo principal
8- Resistor de partida
9- Base de rosca

Figura 16.4 ■ Lâmpada a vapor de mercúrio de alta pressão

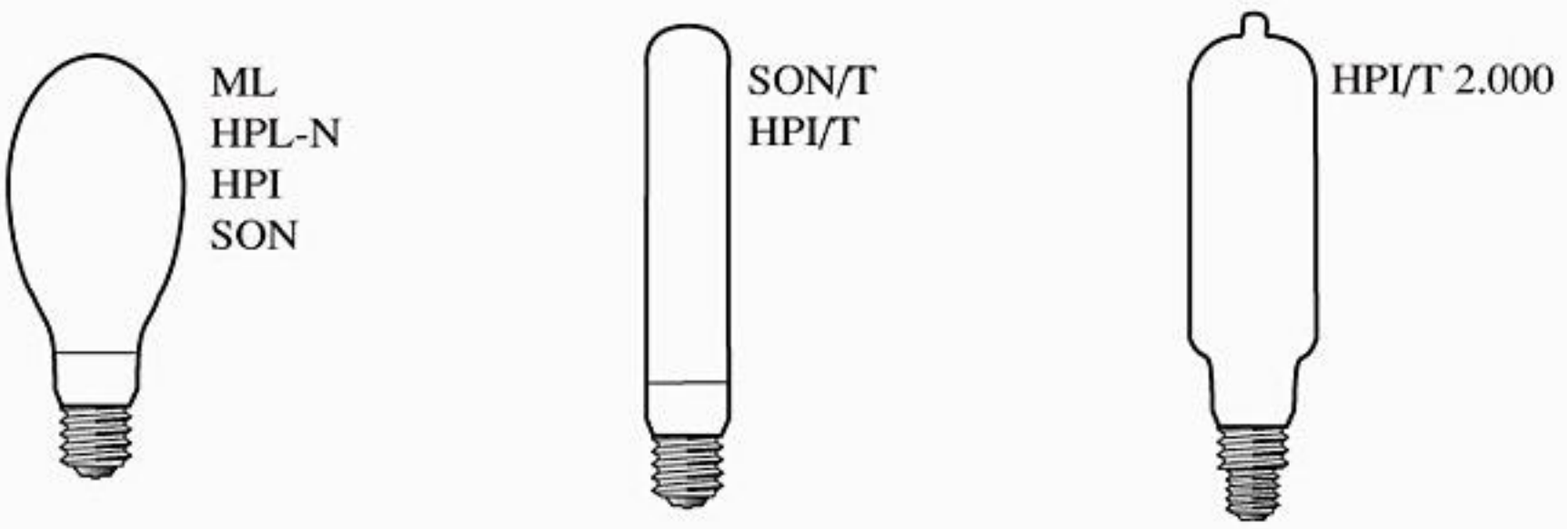


Figura 16.5 ■ Formas típicas de bulbos de lâmpadas de descarga

A ignição é seguida pela estabilização do gás ou vapor, que poderá demorar alguns minutos, dependendo do tipo de lâmpada. Durante esse tempo, o fluxo luminoso aumenta com o aumento do consumo, até a lâmpada atingir seu valor nominal.

Lâmpadas fluorescentes têm um tempo de estabilização menor, sendo esse tempo maior para lâmpadas de alta pressão.

A descarga forma um espectro de linhas múltiplas, cuja composição é determinada pelo gás associado à sua pressão. A lâmpada de sódio de baixa pressão, com somente uma linha de ressonância, é um exemplo extremo de uma fonte de luz monocromática. Um exemplo oposto é a lâmpada de mercúrio de alta pressão com aditivos de diversos metais e terras raras, cujo espectro de linhas múltiplas abrange completamente a faixa visível, tendo melhor reprodução de cores.

O atual conhecimento do mecanismo de percepção da cor e o avanço da tecnologia de pós fluorescentes foram um avanço para conseguir-se uma boa reprodução de cor. Uma reprodução de cor é combinada com a alta eficácia pela aplicação de pós fluorescentes especiais, os quais contêm certos tipos de elementos de terras raras e proporcionam um pico de radiação com comprimento de onda bem definido.

Lâmpadas fluorescentes tubulares

A lâmpada fluorescente é uma lâmpada de descarga de baixa pressão, na qual a luz é predominantemente produzida por pós fluorescentes ativados pela energia ultravioleta da descarga.

A lâmpada, geralmente em forma de um bulbo tubular longo, com um eletrodo em cada extremidade, contém vapor de mercúrio sob baixa pressão, com uma pequena quantidade de gás inerte para facilitar a partida. A superfície interna do bulbo é coberta com um pó fluorescente ou fósforo, cuja composição determina a quantidade e a cor da luz emitida (ver Figura 16.6).

As lâmpadas fluorescentes tubulares são produzidas na faixa de 15 até 110 W e em duas modalidades, com e sem starter (ignição de partida da lâmpada).

Na lâmpada de partida instantânea, a ignição depende exclusivamente da aplicação de uma alta tensão sobre a lâmpada, sendo essa tensão fornecida pelo reator. Atualmente, os reatores eletrônicos produzem uma freqüência elevada, facilitando a partida da lâmpada.

Lâmpadas fluorescentes compactas

A lâmpada fluorescente compacta, como mostra a Figura 16.7, possui uma única base e é formada de tubos finos fluorescentes. Podem possuir reator e base já incorporados aos tubos fluorescentes ou não incorporados; nesse caso, é necessário o uso de equipamentos auxiliares de partida separados da lâmpada.

As lâmpadas compactas possuem as boas características de cor das lâmpadas incandescentes, porém com um consumo consideravelmente menor de energia. Essas qualidades tornam a lâmpada compacta adequada para um grande número de aplicações, especialmente quando se deseja criar uma atmosfera agradável, como em residências, hotéis, restaurantes, museus e teatros, sem perder as vantagens das lâmpadas fluorescentes.

A lâmpada está disponível em versões de 5 até 55 W.

Lâmpadas a vapor de mercúrio

As lâmpadas a vapor de mercúrio são disponíveis na faixa de 80 até 1.000 W. Além de um reator, não há necessidade de dispositivos de controle especiais. A ignição costuma ser obtida por um eletrodo auxiliar montado ao lado de um eletrodo principal, porém, ligado ao

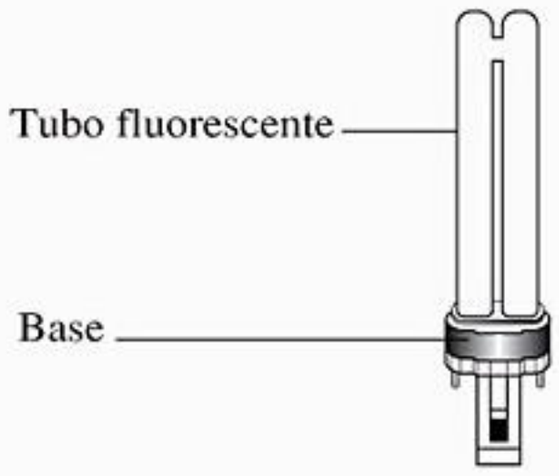


Figura 16.7 ▪ Lâmpada fluorescente compacta

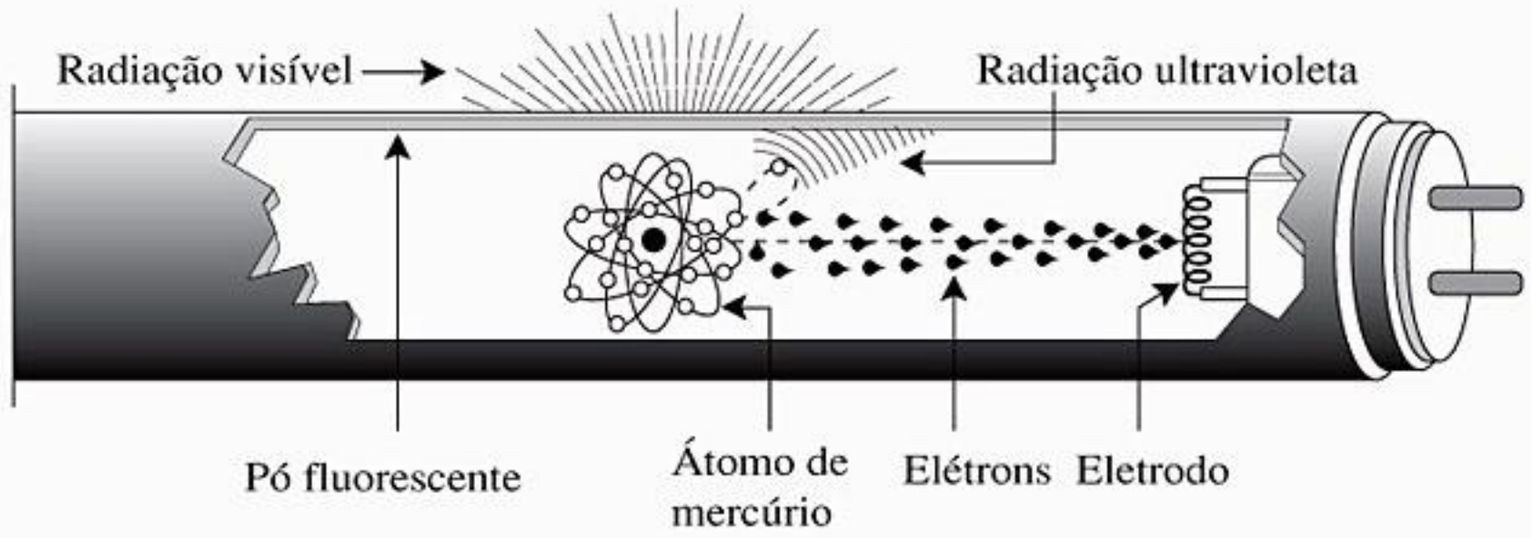


Figura 16.6 ▪ Lâmpada fluorescente

outro eletrodo por meio de um resistor. Na energização da lâmpada, manifesta-se uma luminescência entre o eletrodo principal e o auxiliar, provocando a formação de uma quantidade de íons e elétrons suficiente para iniciar a descarga. A luminescência é limitada pelo resistor. Após a ignição, a corrente flui entre os eletrodos principais.

O bulbo externo geralmente contém um gás inerte (sob pressão atmosférica, quando a lâmpada está em operação), que estabiliza a lâmpada, mantendo uma temperatura praticamente constante sobre a faixa normal das condições ambientais.

A lâmpada de mercúrio de alta pressão tem a aparência branco-azulada, com uma emissão de radiações na região visível nos comprimentos de onda de amarelo, verde e azul, faltando, porém, a radiação vermelha. O arco de mercúrio puro tem aparência e reprodução de cor pobres, porém, emite uma quantidade significativa de sua energia na região ultravioleta do espectro. Usando-se uma camada de fósforo na parede interna do invólucro, que será incitado pela energia ultravioleta, produz um componente vermelho que melhora a reprodução de cor e a cor aparente.

Lâmpadas a vapor metálico

A lâmpada a vapor metálico, muito similar em construção à lâmpada de mercúrio, contém aditivos de iodeto, como índio, tálio e sódio, para melhorar a sua eficácia e a reprodução de cor.

São identificadas pelas letras HPI (bulbo ovóide com camada difusa) e HPI/T (claro, tubular). É especialmente usada na iluminação de campos para a prática de esportes e em outras áreas similares, como centros de cidades.

Na sua forma mais compacta, essas lâmpadas são usadas em diversas aplicações, sendo disponíveis na faixa de 400 a 2.000 W.

Lâmpadas de luz mista

A lâmpada de luz mista consiste em um bulbo preenchido com gás, cuja parede interna é revestida com um fósforo, contendo um tubo de descarga ligado em série com um filamento de tungstênio.

Na lâmpada de luz mista (série ML), assim como na lâmpada de mercúrio HPL-N, da qual é derivada, a radiação ultravioleta da descarga de mercúrio é convertida em radiação visível pela camada de fósforo. Somada a essa radiação visível pela camada de fósforo está a radiação visível do próprio tubo de descarga, bem como a luz de cor quente do filamento incandescente. A radiação das duas fontes mistura-se harmoniosamente, passando através da camada de fósforo, para fornecer uma luz branca difusa com uma aparência de cor agradável.

O filamento age como um reator para a descarga, estabilizando, assim, a corrente da lâmpada. Tais lâmpadas poderão ser ligadas diretamente à rede. Isso significa que as instalações de iluminação existentes, quando usam lâmpadas incandescentes, podem substituí-las facilmente por lâmpadas de luz mista, pois estas têm praticamente duas vezes a eficiência e quase seis vezes a vida daquelas, sem o custo extra em termos de reatores, fiação ou luminárias.

Lâmpadas de sódio de alta pressão

O tubo de descarga em uma lâmpada de sódio de alta pressão contém um excesso de sódio, para dar condições de saturação do vapor quando a lâmpada está funcionando (a uma pressão entre 13 e 26 kN/m^2) e para permitir absorção interna na superfície. Também é usado um excesso de mercúrio para proporcionar um gás de proteção, e o xênon é incluído sob baixa pressão para facilitar a ignição e limitar a condução do calor do arco de descarga para a parede do tubo. O tubo de descarga, feito de óxido de alumínio sinterizado, para resistir à intensa atividade química do vapor de sódio à temperatura de operação de 700 °C, é colocado em um invólucro de vidro duro a vácuo.

As lâmpadas de sódio de alta pressão irradiam energia sobre uma grande parte do espectro visível.

Em comparação com as lâmpadas de sódio de baixa pressão, elas proporcionam uma reprodução de cor razoavelmente boa. São disponíveis com eficiência luminosa de cerca de 150 lm/W e uma temperatura de cor de aproximadamente 2.100 K.

As lâmpadas de sódio de alta pressão, com sua elevada eficiência luminosa e propriedade de cor agradável, são usadas em escala sempre crescente para todos os tipos de iluminação externa e para iluminação industrial de grande altura. Os tipos SON e SON-H têm um bulbo elíptico com uma camada difusora na parede interna; o invólucro da lâmpada SON/T é claro e de forma tubular.

A título de exemplo, as Tabelas 16.3 e 16.4 apresentam as características genéricas das lâmpadas Philips.

LED

LED é a sigla em inglês para Light Emitting Diode, ou Diodo Emissor de Luz.

Trata-se de um diodo semicondutor (junção P-N) que, quando energizado, emite luz visível, por isso LED (Diodo Emissor de Luz).

O processo de emissão de luz pela aplicação de uma fonte elétrica de energia é chamado eletroluminescência. Em qualquer junção P-N polarizada diretamente, dentro da estrutura, próximo à junção, ocorrem recombinações de lacunas e elétrons. Essa recombinação exige que a energia possuída por esse elétron, que até então era livre, seja liberada, o que ocorre na forma de calor ou fótons de luz. Como a recombinação ocorre mais facilmente no nível de energia mais próximo da banda de condução, podem-se escolher adequadamente as impurezas para a

Tabela 16.3 ■ Principais características das lâmpadas Philips para iluminação comercial e de escritórios

Tabela Geral de Lâmpadas							
Código comercial	Cor	Potência (w)	Base	Temperatura de cor (K)	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência luminosa (lm/W)	Índice de reprodução de cor (IRC)
Fluorescentes TL5							
TL5 - 14 W - HE/830	83	14	G5	3.000	1.350	96	85
TL5 - 14 W - HE/840	84	14	G5	4.000	1.350	96	85
TL5 - 14 W - HE/850	85	14	G5	5.000	1.350	96	85
TL5 - 28 W - HE/830	83	28	G5	3.000	2.900	103	85
TL5 - 28 W - HE/840	84	28	G5	4.000	2.900	103	85
TL5 - 28 W - HE/850	85	28	G5	5.000	2.900	103	85
TL5 - 49 W - HO/840	84	49	G5	4.000	4.900	100	85
TL5 - 54 W - HO/840	84	54	G5	4.000	5.000	92	85
Fluorescentes TLDRS Série 80							
TLDRS 16 W-S83-25	83	16	G13	3.000	1.200	75	85
TLDRS 16 W-S84-25	84	16	G13	4.000	1.200	75	85
TLDRS 16 W-S85-25	85	16	G13	5.000	1.150	71	85
TLDRS 32 W-S83-25	83	32	G13	3.000	2.700	84	85
TLDRS 32 W-S84-25	84	32	G13	4.000	2.700	84	85
TLDRS 32 W-S85-25	85	32	G13	5.000	2.600	81	85
TLD 18 W-830	83	18	G13	3.000	1.350	75	85
TLD 36 W-830	83	36	G13	3.000	3.350	93	85
TLD 18 W-840	84	18	G13	4.000	1.350	75	85
TLD 36 W-840	84	36	G13	4.000	3.350	93	85
TLD 58 W-840	84	58	G13	4.000	5.500	89	85
Fluorescentes TLD Série 90							
TLD 18 W/930	93	18	G13	3.000	940	52	95
TLD 18 W/940	94	18	G13	3.800	1.000	55	95
TLD 18 W/965	965	18	G13	6.500	1.050	58	95
TLD 36 W/930	93	36	G13	3.000	2.250	62	95
TLD 36 W/940	94	36	G13	3.800	2.400	66	95
TLD 36 W/965	965	36	G13	6.500	2.300	63	95
TLD 58 W/965	965	58	G13	6.500	3.700	63	95
Fluorescentes TLTRS Série 80							
TLTRS 20 W-S84-25	84	20	G13	4.000	1.350	67	85
TLTRS 20 W-S85-25	85	20	G13	5.000	1.300	65	85
TLTRS 40 W-S84-25	84	40	G13	4.000	3.250	81	85
TLTRS 40 W-S85-25	85	40	G13	5.000	3.150	78	85
TLTRS 110 W-S84	84	110	DCE	4.000	9.500	86	85
TLTRS 110 W-S85	85	110	DCE	5.000	9.500	86	85
Fluorescentes Compactas PL-C							
PL-C/2P 13 W/827	827	13	GX23	2.700	860	66	82
PL-C/2P 13 W/840	84	13	GX23	4.100	860	66	82
PL-C/2P 18 W/827	827	18	GX24D-2	2.700	1.200	67	82
PL-C/2P 18 W/840	84	18	GX24D-2	4.000	1.200	67	82
PL-C/2P 26 W/827	827	26	GX24D-3	2.700	1.800	69	82
PL-C/2P 26 W/840	84	26	GX24D-3	4.000	1.800	69	82

(continua)

(continuação)

Código comercial	Cor	Potência (w)	Base	Temperatura de cor (K)	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência luminosa (lm/W)	Índice de reprodução de cor (IRC)
Fluorescentes Compactas PL-T							
PL-T/4P 18W/827	827	18	GX24Q-2	2.700	1.200	66	82
PL-T/4P 18W/840	84	18	GX24Q-2	4.000	1.200	66	82
PL-T/4P 26W/827	827	26	GX24Q-3	2.700	1.800	69	82
PL-T/4P 26W/840	84	26	GX24Q-3	4.000	1.800	69	82
PL-T/4P 32W/827	827	32	GX24Q-3	2.700	2.400	75	82
PL-T/4P 32W/840	84	32	GX24Q-3	4.000	2.400	75	82
PL-T/4P 42W/827	827	42	GX24Q-4	2.700	3.200	76	82
PL-T/4P 42W/840	84	42	GX24Q-4	4.000	3.200	76	82
Fluorescentes Compactas PL-L							
PL-L/4P 36W/827	827	36	2G11	2.700	2.900	80	82
PL-L/4P 36W/840	84	36	2G11	4.000	2.900	80	82
PL-L/4P 55W830HF	827	55	2G11	2.700	4.800	87	82
PL-L/4P 55W840HF	84	55	2G11	4.000	4.800	87	82
Fluorescentes Compactas PL-S							
PL-S/2P 9W/827	827	9	G23	2.700	600	66	82
PL-S/2P 9W/840	84	9	G23	4.000	600	66	82
PL-S/2P 11W/827	827	11	G23	2.700	900	81	82
PL-S/2P 11W/840	84	11	G23	4.000	900	81	82
PL-S/2P 13W/827	827	13	GX23	2.700	810	62	82
PL-S/2P 13W/840	84	13	GX23	4.000	810	62	82
Código Comercial	Tensão (V)	Potência (W)	Base	Temperatura de cor (K)	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência luminosa (lm/W)	Índice de reprodução de cor (IRC)
Fluorescentes Compactas Integradas							
PL-ELET-15W-230V	230-240V	15	E27	2.700	900	60	82
PLE/T-15W-230V-D	230-240V	15	E27	6.500	820	53	78
PL-ELET-15W-120V	120-127V	15	E27	2.700	900	60	82
PLE/T-15W-120V-D	120-127V	15	E27	6.500	820	53	78
PL-ELET-20W-230V	230-240V	20	E27	2.700	1.200	60	82
PLE/T-20W-230V-D	230-240V	20	E27	6.500	1.100	55	78
PL-ELET-20W-120V	120-127V	20	E27	2.700	1.200	60	82
PLE/T-20W-120V-D	120-127V	20	E27	6.500	1.100	55	78
PL-ELET-23W-230V	230-240V	23	E27	2.700	1.500	65	82
PLE/T-23W-230V-D	230-240V	23	E27	6.500	1.410	59	78
PL-ELET-23W-120V	120-127V	23	E27	2.700	1.500	65	82
PLE/T-23W-120V-D	120-127V	23	E27	6.500	1.410	59	78
Mastercolour CDM-TC							
CDM-TC 35W/830	83	35	G8,5	3.000	3.300	94	81
Mastercolour CDM-T							
CDM-T 35W/830	83	35	G12	3.000	3.400	97	81
CDM-T 70W/830	83	70	G12	3.000	6.600	94	83
CDM-T 70W/942	942	70	G12	4.200	6.400	91	92
CDM-T 150W/830	83	150	G12	3.000	14.000	93	85
CDM-T 150W/942	942	150	G12	4.200	12.700	84	96

(continua)

(continuação)

Código Comercial	Cor	Potência (W)	Base	Temperatura de cor (K)	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência luminosa (lm/W)	Índice de reprodução de cor (IRC)
MastercolourCDM-TD							
CDM-TD 70W/830	83	70	RX7S	3.000	6.100	87	82
CDM-TD 70W/942	942	70	RX7S	4.200	5.800	82	92
CDM-TD 150W/830	83	150	RX7S-24	3.000	12.500	83	85
CDM-TD 150W/942	942	150	RX7S-24	4.200	12.000	80	96
Mastercolour CDM-ET							
CDM-ET 70W/830	83	72	E27	3.000	5.900	82	83
CDM-ET 150W/830	83	147	E40	3.000	13.000	88	85
Mastercolour CDM-TT							
CDM-TT 70W/830	83	72	E27	3.000	6.300	87	83
CDM-TT150W/830	83	148	E40	3.000	13.500	91	85

Código Comercial	Cor	Potência (W)	Base	Temperatura de cor (K)	Máxima intensidade luminosa (cd)	Índice de reprodução de cor (IRC)
Mastercolour CDM-R						
CDMR 35WPAR20L10G	83	38	E27	3.000	23.000	81
CDMR 35WPAR20L30G	83	38	E27	3.000	5.000	81
CDMR 35WPAR30L10G	83	38	E27	3.000	44.000	81
CDMR 35WPAR30L30G	83	38	E27	3.000	7.400	81
CDMR 70WPAR30L10G	83	73	E27	3.000	69.000	83
CDMR 70WPAR30L40G	83	73	E27	3.000	10.000	83

Código Comercial	Tensão (V)	Potência (W)	Base	Abertura de Facho	Temperatura de cor (K)	Máxima intensidade luminosa (cd)	Índice de reprodução de cor (IRC)
Halógenas Dicróica BRILLIANTline							
DIC12V 20W-10-F	12	20	GU 5.3	10°	3.100	5.000	100
DIC12V 20W-36-F	12	20	GU 5.3	36°	3.100	780	100
DIC12V 20W-60-F	12	20	GU 5.3	60°	3.100	350	100
DIC12V 50W-10-F	12	50	GU 5.3	10°	3.200	13.000	100
DIC12V 50W-36-F	12	50	GU 5.3	36°	3.200	2.200	100
DIC12V 50W-60-F	12	50	GU 5.3	60°	3.200	1.100	100
Halógenas ALUline							
ALR111-12V50-8G	12	50	G53	8°	3.000	23.000	100
ALR111-12V75-8G	12	75	G53	8°	3.000	30.000	100
ALR111-12V100-8G	12	100	G53	8°	3.000	48.000	100
ALR111-12V50-24G	12	50	G53	24°	3.000	4.000	100
ALR111-12V75-24G	12	75	G53	24°	3.000	5.300	100
ALR111-12V100-24G	12	100	G53	24°	3.000	8.500	100

Tabela 16.4 ■ Principais características das lâmpadas Philips para iluminação industrial (continuação)

Tabela Geral de Lâmpadas						
Código comercial	Potência (w)	Base	Temperatura de cor (K)	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência luminosa (lm/W)	Índice de reprodução de cor (IRC)
Lâmpada de vapor metálico						
HPI Plus Ovóide com reator de mercúrio						
HPI Plus 250 WBU	256	E40	4.200	19.000	76	69
HPI Plus 400 WBU	400	E40	4.200	35.000	87	69
HPI Plus 400 WBUS	400	E40	4.200	35.000	87	69
HPI Plus 400 WBUP	400	E40	4.200	35.000	87	69
HPI Plus ovóide com reator de sódio						
HPI Plus 250 WBU	302	E40	3.800	25.500	102	69
HPI Plus 400 WBU	454	E40	3.800	42.500	106	69
HPI Plus 400 WBU	454	E40	3.800	42.500	106	69
HPI Plus 400 WBU	454	E40	3.800	42.500	93	69
HPI-T Plus tubular com reator de mercúrio						
HPI-T Plus 250 W	250	E40	4.500	19.000	76	65
HPI-T Plus 400 W	400	E40	4.300	35.000	87	65
HPI-T 1.000 W	985	E40	4.500	85.000	85	65
HPI-T 2.000 W/220V	1.960/220V	E40	4.900	189.000	94	65
HPI-T 2.000 W/380V	1.930/380V	E40	4.300	183.000	91	65
HPI-T Plus tubular com reator de sódio						
HPI-T Plus 250 W	250	E40	3.800	23.000	92	65
HPI-T Plus 400 W	400	E40	3.800	38.000	95	65
Lâmpada de vapor de mercúrio						
HPL-N						
HPL N 80 W	80	E27	4.300	3.700	48	48
HPL N 125 W	125	E27	4.100	6.200	46	46
HPL N 250 W	250	E40	4.100	12.700	40	40
HPL N 400 W	400	E40	3.900	22.000	40	40
HPL N 700 W	700	E40	3.900	40.000	45	45
HPL N 1.000 W	1.000	E40	3.900	58.000	45	45
Lâmpada de vapor de sódio						
SON						
SON 70 W-E	70	E27	1.950	5.600	80	25
SON 150 W-E	147	E40	1.950	14.500	97	25
SON 250 W-E	250	E40	1.950	27.00	108	25
SON 400 W-E	400	E40	1.950	48.000	120	25
SON-H						
SON H 220 W	220	E40	2.000	20.000	91	25
SON H 350 W	350	E40	2.000	34.000	97	25
SON-T						
SON-T 150 W-RE	150	E40	1.950	15.000	100	25
SON-T 250 W-RE	250	E40	1.950	28.000	112	25
SON-T 400 W-RE	400	E40	1.950	48.000	120	25

confecção dos LEDs, de modo a exibirem bandas adequadas para a emissão da cor de luz desejada (comprimento de onda específico).

A luz emitida não é monocromática, mas a banda colorida é relativamente estreita. A cor, portanto, dependente do cristal e da impureza de dopagem com que o componente é fabricado. O LED que utiliza o arseneto de gálio emite radiações infravermelhas. Dopando-se com fósforo, a emissão pode ser vermelha ou amarela, de acordo com a concentração. Utilizando-se fosfeto de gálio com dopagem de nitrogênio, a luz emitida pode ser verde ou amarela. Com o uso de outros materiais, conseguem-se fabricar LEDs que emitem luz azul, violeta e até ultravioleta. Existem também os LEDs brancos, que são geralmente emissores de cor azul, revestidos com uma camada de fósforo do mesmo tipo usado nas lâmpadas fluorescentes, o qual absorve a luz azul e emite a luz branca. Há ainda os LEDs brancos chamados RGB, que são formados por três 'chips', um vermelho (R de red), um verde (G de green) e um azul (B de blue).

Em geral, os LEDs operam com nível de tensão de 1,6 a 3,3 V, sendo compatíveis com os circuitos de estado sólido. É interessante notar que a tensão é dependente do comprimento da onda emitida. Assim, os LEDs infravermelhos geralmente funcionam com menos de 1,5 V, os vermelhos, com 1,7 V, os amarelos, com 1,7 V ou 2,0 V, os verdes entre 2,0 V e 3,0 V, enquanto os LEDs azuis, violeta e ultravioleta em geral precisam de mais de 3,V. A potência de um LED está na faixa típica de 10 a 150 mW, com um tempo de vida útil de 100.000 ou mais horas.

Os LEDs têm muitas vantagens sobre lâmpadas incandescentes convencionais. Uma delas é que eles não têm um filamento que se queime e então duram muito mais tempo. Além disso, seus pequenos bulbos de plástico tornam-nos muito mais duráveis. Eles também cabem mais facilmente nos modernos circuitos eletrônicos. Mas a principal vantagem é a eficiência. Em uma lâmpada incandescente convencional, o processo de produção de luz envolve a geração de muito calor (o filamento deve ser aquecido), enquanto os LEDs geram pouco calor. Uma percentagem muito mais alta de energia elétrica está indo diretamente para a geração de luz, o que diminui a demanda de eletricidade consideravelmente.

16.3 Cálculos práticos de iluminação interior[5]

Nos cálculos de iluminação interna, deve ser seguido o seguinte roteiro:

(a) Escolha criteriosa do tipo de lâmpada e luminária adequado ao local.
(b) Escolha do iluminamento (E), utilizando, por exemplo, a Tabela 16.1 ou os valores recomendados pela norma NBR 5413 ou pela NR 15.
(c) Cálculo do fator do local (K), a partir da Expressão 16.5.
(d) Determinação do fator de utilização (η), com o auxílio dos valores fornecidos pelo fabricante, ou pela Tabela 16.6. Atenção: as luminárias indicadas na Tabela 16.6 são apenas exemplos para fins didáticos; nos casos reais, o projetista deverá consultar o fabricante para saber os valores reais das luminárias consideradas no projeto.

As refletâncias são indicadas por três algarismos, correspondendo a teto-paredes-piso (ver Tabela 16.5).

Caso o valor de K calculado em (III) não corresponda a nenhum valor constante da Tabela 16.6, adota-se o mais próximo.

(e) Determinação do fator de depreciação (d), por exemplo, utilizando a Tabela 16.2 ou valores fornecidos pelo fabricante.
(f) Cálculo do fluxo total (Φ_T), sendo, da Expressão 16.4

$$\Phi_T = \frac{SE}{\eta d} \tag{16.6}$$

(g) Determinação do número de luminárias através de

$$N = \frac{\phi_T}{\phi} \tag{16.7}$$

Sendo Φ(lm) o fluxo de cada luminária.

(h) Distribuição das luminárias: o espaçamento entre as luminárias depende de sua altura em relação ao plano de trabalho (h_m) e da sua distribuição de luz; esse valor situa-se, geralmente, entre 1 e 1,5 vezes a

Tabela 16.5 ■ Refletâncias

Índice	Reflexão (%)	Significado
1	10	Superfície média
3	30	Superfície média
5	50	Superfície clara
7	70	Superfície branca

5. Com base na publicação *Cálculo de Iluminação Interna* da Philips Iluminação.

altura de h_m, em ambas as direções; o espaçamento até as paredes deve corresponder, aproximadamente, à metade desse valor.

EXEMPLO

Iluminação de escritório com 18 m de comprimento, 8 m de largura e 3 m de altura (pé direito), com luminárias Philips TCS 029, com duas lâmpadas fluorescentes de 32 W, Branca Comfort.

(a) Aparelho de iluminação:

- Luminária TCS 029.
- Duas lâmpadas TLDRS 32/64 (Tabela 16.4)

$$= 2 \times 2.500 = 5.000 \text{ lm}$$

(b) Da Tabela 16.1, adota-se $E = 500\ lx$.

(c) Tem-se:

$l = 18$ m;

$b = 9$ m;

$h_m = 2{,}2$ m (luminária no teto e mesas a 0,8 m).

Da Expressão 16.5: K =

$$\frac{18 \times 9}{2{,}2\ (18\ +\ 9)} \cong 2{,}7.$$

(d) Entra-se nas Tabelas 16.6 com $K = 2{,}5$ e considera-se para o local 551, obtendo $\eta = 0{,}53$.

(e) Da Tabela 16.2, considerando ambiente normal e manutenção a cada 5.000 h, obtém-se $d = 0{,}85$.

(f) Da Expressão 16.6:

$$\phi_T = \frac{(18 \times 9) \times 500}{0{,}53 \times 0{,}85} \cong 179.800\ lm$$

(g) Da Expressão 16.7:

$$N = \frac{179.800}{5.000} \cong 36 \text{ luminárias}$$

(h) Ver Figura 16.8, para fazer a distribuição de luminárias.

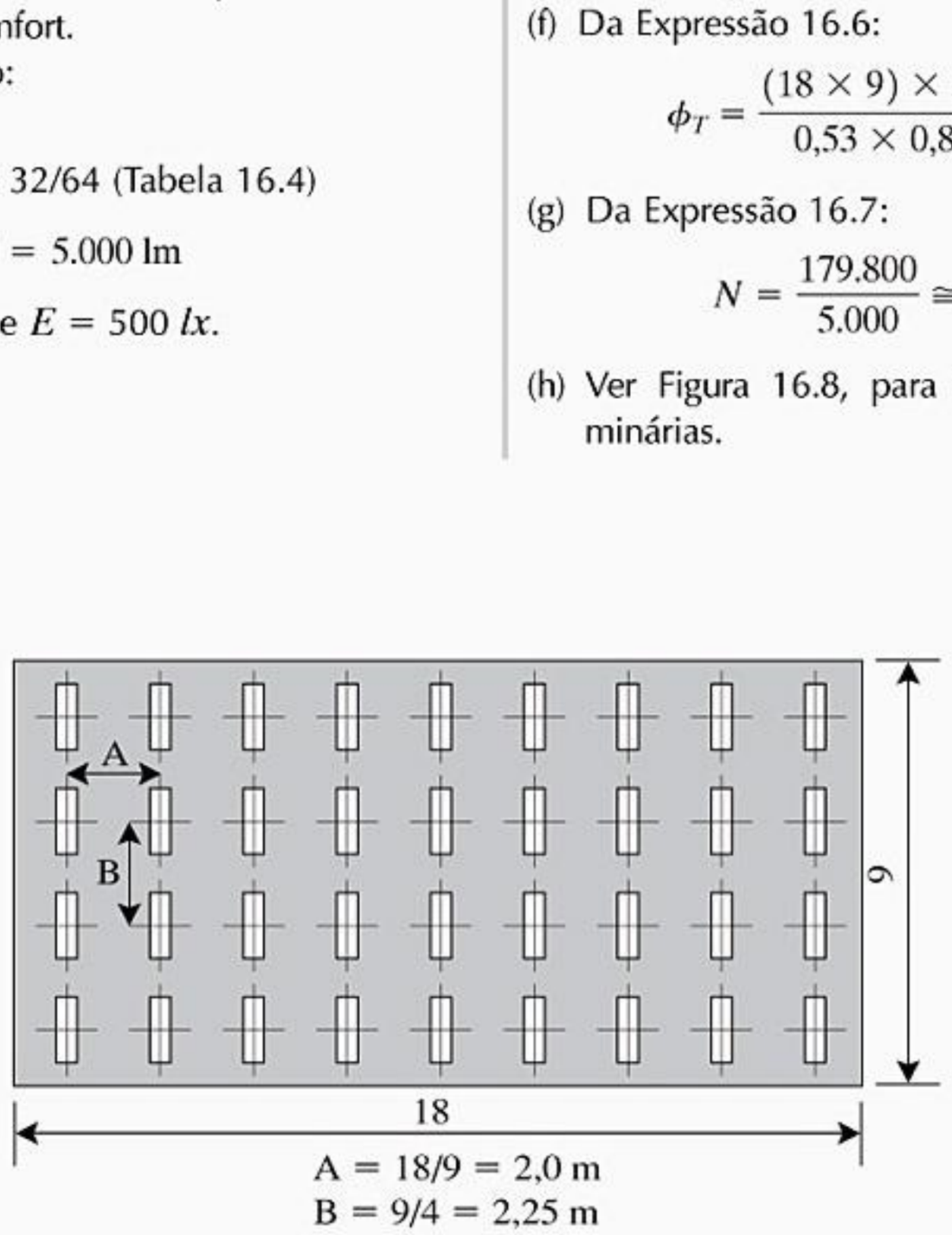


Figura 16.8 ■ Distribuição das luminárias

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)



HDK 472 Cl ZDK 472 - HPL-N 250W

Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,47	0,43	0,40	0,46	0,42	0,40	0,42	0,40	0,38
0,80	0,54	0,50	0,47	0,53	0,49	0,47	0,49	0,46	0,45
1,00	0,59	0,55	0,53	0,58	0,55	0,52	0,54	0,52	0,51
1,25	0,64	0,60	0,58	0,63	0,60	0,57	0,59	0,57	0,56
1,50	0,67	0,64	0,61	0,66	0,63	0,61	0,62	0,60	0,59
2,00	0,71	0,69	0,67	0,70	0,68	0,66	0,67	0,66	0,64
2,50	0,74	0,72	0,70	0,72	0,71	0,69	0,70	0,69	0,67
3,00	0,75	0,74	0,72	0,74	0,73	0,71	0,72	0,71	0,69
4,00	0,77	0,76	0,74	0,76	0,74	0,73	0,73	0,72	0,71
5,00	0,78	0,77	0,76	0,76	0,75	0,75	0,74	0,74	0,72

SDK 472 c/ ZDK 472 - SON 400W

Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,39	0,35	0,32	0,39	0,35	0,32	0,35	0,32	0,31
0,80	0,46	0,42	0,39	0,45	0,42	0,39	0,41	0,39	0,38
1,00	0,51	0,47	0,45	0,50	0,47	0,44	0,47	0,44	0,43
1,25	0,56	0,52	0,50	0,55	0,52	0,49	0,51	0,49	0,48
1,50	0,59	0,56	0,53	0,58	0,55	0,53	0,54	0,52	0,51
2,00	0,63	0,61	0,59	0,62	0,60	0,58	0,59	0,57	0,56
2,50	0,65	0,63	0,62	0,64	0,62	0,61	0,62	0,60	0,59
3,00	0,67	0,65	0,64	0,66	0,64	0,63	0,63	0,62	0,61
4,00	0,69	0,67	0,66	0,67	0,66	0,65	0,65	0,64	0,63
5,00	0,70	0,68	0,67	0,68	0,67	0,66	0,66	0,65	0,64

HDK 472 c/ ZDK 472 - HPL-N 400W

Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,39	0,35	0,33	0,39	0,35	0,33	0,35	0,32	0,31
0,80	0,46	0,42	0,39	0,45	0,42	0,39	0,41	0,39	0,38
1,00	0,51	0,47	0,45	0,50	0,47	0,44	0,46	0,44	0,43
1,25	0,55	0,52	0,49	0,54	0,51	0,49	0,51	0,49	0,48
1,50	0,58	0,55	0,53	0,57	0,55	0,52	0,54	0,52	0,51
2,00	0,62	0,60	0,58	0,61	0,59	0,57	0,58	0,57	0,56
2,50	0,65	0,63	0,61	0,64	0,62	0,60	0,61	0,60	0,58
3,00	0,66	0,65	0,63	0,65	0,64	0,63	0,63	0,62	0,60
4,00	0,68	0,67	0,66	0,67	0,66	0,65	0,65	0,64	0,62
5,00	0,69	0,68	0,67	0,68	0,67	0,66	0,66	0,65	0,63

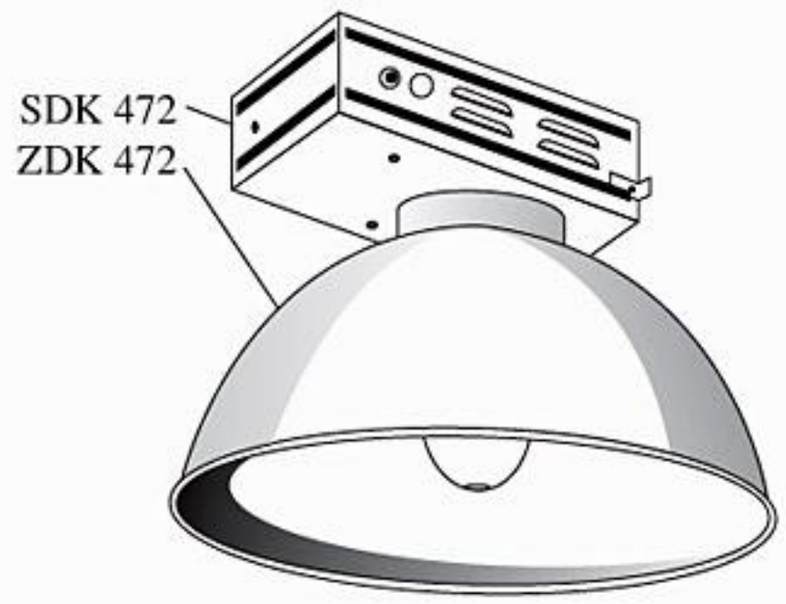
HDK 472 d ZDK 473 - HPL-N 250W

Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,51	0,47	0,44	0,50	0,47	0,44	0,46	0,44	0,43
0,80	0,57	0,53	0,50	0,57	0,53	0,50	0,52	0,50	0,49
1,00	0,62	0,59	0,56	0,61	0,58	0,56	0,58	0,55	0,54
1,25	0,67	0,63	0,61	0,66	0,63	0,60	0,62	0,60	0,59
1,50	0,70	0,67	0,64	0,69	0,66	0,64	0,65	0,63	0,62
2,00	0,74	0,72	0,70	0,73	0,71	0,69	0,70	0,68	0,67
2,50	0,77	0,75	0,73	0,76	0,74	0,72	0,73	0,72	0,70
3,00	0,79	0,77	0,76	0,77	0,76	0,75	0,75	0,74	0,72
4,00	0,81	0,79	0,78	0,79	0,78	0,77	0,77	0,76	0,74
5,00	0,82	0,81	0,80	0,80	0,79	0,78	0,78	0,77	0,75

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)



SDK 472 c/ZDK 472 - SON 150W

Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,47	0,43	0,40	0,46	0,43	0,40	0,43	0,40	0,39
0,80	0,53	0,49	0,47	0,52	0,49	0,47	0,49	0,46	0,45
1,00	0,58	0,55	0,52	0,57	0,54	0,52	0,54	0,52	0,50
1,25	0,62	0,59	0,57	0,61	0,59	0,56	0,58	0,56	0,55
1,50	0,65	0,62	0,60	0,64	0,62	0,60	0,61	0,59	0,58
2,00	0,69	0,67	0,65	0,68	0,66	0,64	0.65	0,64	0,62
2,50	0,71	0,70	0,68	0,70	0,69	0,67	0,68	0,67	0,65
3,00	0,73	0,71	0,70	0,72	0,70	0,69	0,69	0,68	0,67
4,00	0,74	0,73	0,72	0,73	0,72	0,71	0,71	0,70	0,69
5,00	0,75	0,74	0,73	0,74	0,73	0,72	0,72	0,71	0,69

HDK 472 c/ ZDK 473 - HPL-N 400W

Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,50	0,46	0,42	0,50	0,45	0,42	0,45	0,42	0,41
0,80	0,58	0,53	0,49	0,57	0,52	0,49	0,52	0,49	0,48
1,00	0,63	0,59	0,56	0,62	0,58	0,55	0,58	0,55	0,54
1,25	0,68	0,64	0,61	0,67	0,63	0,61	0,63	0,60	0,59
1,50	0,72	0,68	0,65	0,70	0,67	0,65	0,66	0,64	0,63
2,00	0,77	0,74	0,71	0,75	0,73	0,71	0,72	0,70	0,68
2,50	0,80	0,77	0,75	0,78	0,76	0,74	0,75	0,74	0,72
3,00	0,82	0,80	0,78	0,80	0,79	0,77	0,77	0,76	0,74
4,00	0,84	0,82	0,81	0,82	0,81	0,80	0,80	0,79	0,77
5,00	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,81	0,81	0,80	0,78

SDK 472 c/ ZDK 473 - SON 150WTS

Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,52	0,48	0,45	0,51	0,48	0,45	0,47	0,45	0,44
0,80	0,58	0,54	0,51	0,57	0,53	0,51	53	0,51	0,50
1,00	0,62	0,59	0,56	0,61	0,58	0,56	0,58	0,56	0,54
1,25	0,66	0,63	0,61	0,65	0,62	0,60	0,62	0,60	0,59
1,50	0,69	0,66	0,64	0,68	0,65	0,63	0,65	0,63	0,62
2,00	0,73	0,71	0,69	0,72	0,70	0,68	0,69	0,68	0,66
2,50	0,76	0,74	0,72	0,74	0,73	0,71	0,72	0,71	0,69
3,00	0,77	0,76	0,74	0,76	0,75	0,74	0,74	0,73	0,71
4,00	0,79	0,78	0,77	0,77	0,77	0,76	0,75	0,75	0,73
5,00	0,80	0,79	0,78	0,78	0,78	0,77	0,76	0,76	0,74

HDK 475 c/ ZDK 475 - HPL-N 250W

Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,34	0,29	0,25	0,34	0,28	0,25	0,28	0,25	0,23
0,80	0,42	0,36	0,32	0,41	0,36	0,32	0,35	0,32	0,30
1,00	0,48	0,43	0,38	0,47	0,42	0,38	0,41	0,38	0,36
1,25	0,54	0,48	0,44	0,52	0,48	0,44	0,47	0,44	0,42
1,50	0,58	0,53	0,49	0,56	0,52	0,49	0,51	0,48	0,46
2,00	0,63	0,59	0,56	0,62	0,58	0,55	0,57	0,55	0,53
2,50	0,67	0,64	0,61	0,65	0,62	0,60	0,61	0,59	0,57
3,00	0,70	0,66	0,64	0,68	0,65	0,63	0,64	0,62	0,60
4,00	0,72	0,70	0,68	0,71	0,69	0,67	0,67	0,66	0,64
5,00	0,74	0,72	0,70	0,72	0,71	0,69	0,69	0,68	0,66

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)



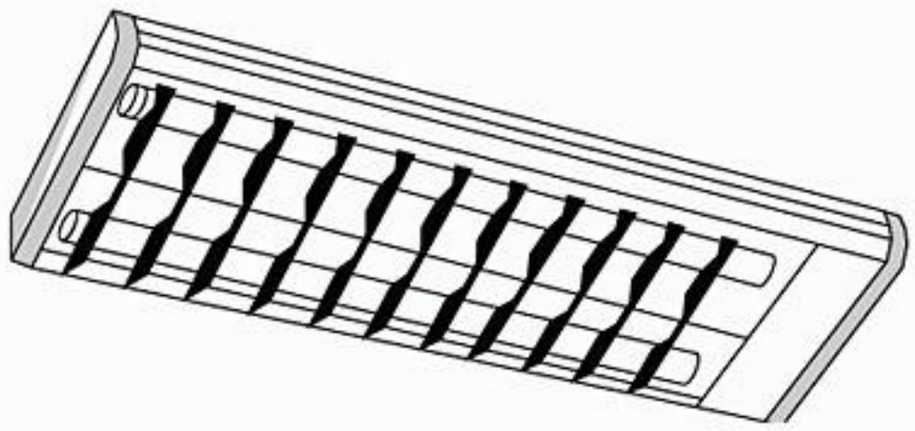
SDK 472 c/ ZDK 473 - SON 250W										HDK 475 c/ ZDK 475 - HPL-N 400W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,53	0,49	0,47	0,53	0,49	0,47	0,49	0,46	0,45	0,60	0,33	0,27	0,23	0,32	0,27	0,23	0,26	0,23	0,22
0,80	0,59	0,55	0,53	0,58	0,55	0,52	0,54	0,52	0,51	0,80	0,40	0,34	0,30	0,39	0,34	0,30	0,33	0,30	0,28
1,00	0,64	0,60	0,58	0,63	0,60	0,57	0,59	0,57	0,56	1,00	0,46	0,40	0,36	0,44	0,40	0,36	0,39	0,36	0,34
1,25	0,68	0,65	0,62	0,67	0,64	0,62	0,64	0,62	0,60	1,25	0,51	0,46	0,42	0,50	0,45	0,42	0,44	0,41	0,40
1,50	0,71	0,68	0,66	0,70	0,67	0,65	0,66	0,65	0,63	1,50	0,55	0,50	0,46	0,53	0,49	0,46	0,49	0,46	0,44
2,00	0,75	0,73	0,71	0,74	0,72	0,70	0,71	0,70	0,68	2,00	0,60	0,57	0,53	0,59	0,56	0,53	0,55	0,52	0,50
2,50	0,78	0,76	0,74	0,76	0,75	0,73	0,74	0,73	0,71	2,50	0,64	0,61	0,58	0,62	0,60	0,57	0,58	0,56	0,54
3,00	0,79	0,78	0,76	0,78	0,77	0,75	0,76	0,75	0,73	3,00	0,66	0,63	0,61	0,65	0,62	0,60	0,61	0,59	0,57
4,00	0,81	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78	0,77	0,77	0,75	4,00	0,69	0,67	0,65	0,68	0,66	0,64	0,65	0,63	0,61
5,00	0,82	0,81	0,80	0,80	0,80	0,79	0,78	0,78	0,76	5,00	0,71	0,69	0,67	0,70	0,68	0,66	0,67	0,65	0,63

SDK 472 c/ ZDK 473 - SON 400W										HDK 475 c/ ZDK 475 - SON 250W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,45	0,41	0,38	0,44	0,40	0,37	0,40	0,37	0,36	0,60	0,36	0,30	0,26	0,35	0,29	0,25	0,29	0,25	0,24
0,80	0,51	0,47	0,44	0,50	0,47	0,44	0,46	0,44	0,42	0,80	0,44	0,38	0,33	0,42	0,37	0,33	0,37	0,33	0,31
1,00	0,56	0,53	0,50	0,55	0,52	0,49	0,51	0,49	0,48	1,00	0,50	0,44	0,40	0,49	0,43	0,39	0,43	0,39	0,37
1,25	0,61	0,57	0,55	0,60	0,57	0,54	0,56	0,54	0,52	1,25	0,56	0,50	0,46	0,54	0,49	0,46	0,49	0,45	0,43
1,50	0,64	0,61	0,58	0,63	0,60	0,58	0,59	0,57	0,56	1,50	0,60	0,55	0,51	0,58	0,54	0,50	0,53	0,50	0,48
2,00	0,69	0,66	0,64	0,67	0,65	0,63	0,64	0,63	0,61	2,00	0,66	0,62	0,58	0,64	0,61	0,57	0,59	0,57	0,55
2,50	0,71	0,69	0,67	0,70	0,68	0,67	0,67	0,66	0,64	2,50	0,70	0,66	0,63	0,68	0,65	0,62	0,64	0,61	0,59
3,00	0,73	0,71	0,70	0,72	0,70	0,69	0,69	0,68	0,66	3,00	0,72	0,69	0,66	0,70	0,68	0,65	0,66	0,64	0,62
4,00	0,75	0,74	0,72	0,74	0,72	0,71	0,71	0,70	0,69	4,00	0,75	0,73	0,70	0,73	0,71	0,69	0,70	0,68	0,66
5,00	0,76	0,75	0,74	0,75	0,74	0,73	0,72	0,72	0,70	5,00	0,77	0,75	0,73	0,75	0,73	0,72	0,72	0,70	0,68

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)



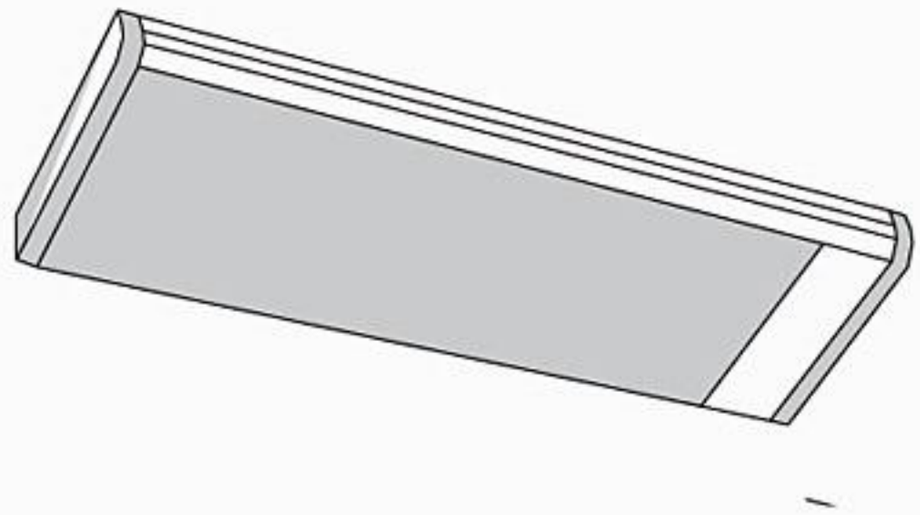
HDK 475 c/ ZDK 475 - SON 400W										TCS029-D-2TLD16W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,34	0,28	0,24	0,33	0,28	0,24	0,28	0,24	0,23	0,60	0,27	0,33	0,20	0,26	0,22	0,19	0,22	0,19	0,18
0,80	0,42	0,36	0,32	0,41	0,36	0,32	0,35	0,31	0,30	0,80	0,33	0,28	0,25	0,32	0,28	0,25	0,27	0,24	0,23
1,00	0,48	0,42	0,38	0,47	0,42	0,38	0,41	0,37	0,36	1,00	0,37	0,33	0,30	0,36	0,32	0,29	0,32	0,29	0,27
1,25	0,54	0,48	0,44	0,52	0,48	0,44	0,47	0,43	0,42	1,25	0,41	0,37	0,34	0,40	0,37	0,34	0,36	0,33	0,32
1,50	0,58	0,53	0,49	0,56	0,52	0,48	0,51	0,48	0,46	1,50	0,45	0,41	0,38	0,43	0,40	0,37	0,39	0,37	0,35
2,00	0,64	0,60	0,56	0,62	0,59	0,56	0,58	0,55	0,53	2,00	0,49	0,46	0,43	0,48	0,45	0,42	0,44	0,42	0,40
2,50	0,68	0,64	0,61	0,66	0,63	0,60	0,62	0,59	0,57	2,50	0,52	0,49	0,47	0,50	0,48	0,46	0,47	0,45	0,43
3,00	0,70	0,67	0,64	0,69	0,66	0,63	0,65	0,63	0,61	3,00	0,54	0,51	0,49	0,52	0,50	0,48	0,49	0,47	0,46
4,00	0,73	0,71	0,68	0,72	0,69	0,67	0,68	0,66	0,64	4,00	0,56	0,54	0,52	0,55	0,53	0,51	0,52	0,50	0,48
5,00	0,75	0,73	0,71	0,74	0,72	0,70	0,70	0,69	0,67	5,00	0,58	0,56	0,54	0,56	0,55	0,53	0,53	0,52	0,50

TCS029-2TLD 16W										TCS 029-D - 2 TLD 32W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,31	0,26	0,23	0,30	0,26	0,23	0,26	0,23	0,21	0,60	0,29	0,24	0,21	0,28	0,24	0,21	0,23	0,20	0,19
0,80	0,37	0,32	0,29	0,36	0,32	0,29	0,32	0,29	0,27	0,80	0,35	0,30	0,27	0,34	0,30	0,26	0,29	0,26	0,25
1,00	0,42	0,37	0,34	0,41	0,37	0,34	0,36	0,34	0,32	1,00	0,40	0,35	0,32	0,39	0,34	0,31	0,34	0,31	0,29
1,25	0,46	0,42	0,39	0,45	0,42	0,39	0,41	0,38	0,37	1,25	0,44	0,40	0,37	0,43	0,39	0,36	0,38	0,36	0,34
1,50	0,50	0,46	0,43	0,49	0,45	0,42	0,44	0,42	0,41	1,50	0,48	0,44	0,40	0,46	0,43	0,40	0,42	0,39	0,37
2,00	0,55	0,51	0,49	0,53	0,50	0,48	0,50	0,48	0,46	2,00	0,52	0,49	0,46	0,51	0,48	0,45	0,47	0,45	0,43
2,50	0,57	0,55	0,52	0,56	0,54	0,52	0,53	0,51	0,50	2,50	0,55	0,52	0,50	0,54	0,51	0,49	0,50	0,48	0,46
3,00	0,60	0,57	0,55	0,58	0,56	0,54	0,55	0,54	0,52	3,00	0,58	0,55	0,53	0,56	0,54	0,52	0,52	0,51	0,49
4,00	0,62	0,60	0,58	0,61	0,59	0,57	0,58	0,57	0,55	4,00	0,60	0,58	0,56	0,58	0,57	0,55	0,55	0,54	0,52
5,00	0,63	0,62	0,60	0,62	0,61	0,59	0,59	0,58	0,57	5,00	0,62	0,60	0,58	0,60	0,58	0,57	0,57	0,56	0,54

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)



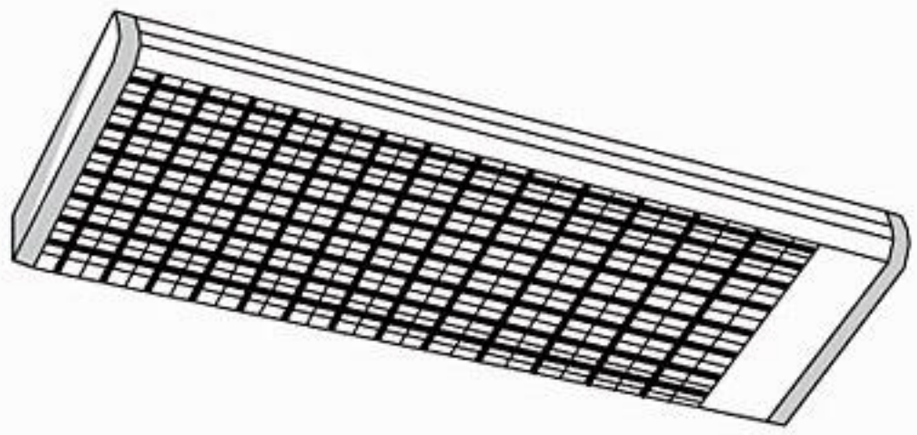
TCS 029 - 2 TLD 32W										TCS 029 TV-2 TLD 16W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,29	0,24	0,31	0,28	0,24	0,21	0,24	0,21	0,20	0,60	0,13	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11
0,80	0,34	0,30	0,27	0,34	0,30	0,27	0,29	0,26	0,25	0,80	0,15	0,14	0,13	0,15	0,14	0,13	0,14	0,13	0,13
1,00	0,39	0,35	0,32	0,38	0,34	0,31	0,34	0,31	0,30	1,00	0,16	0,15	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14
1,25	0,43	0,39	0,36	0,42	0,39	0,36	0,38	0,36	0,34	1,25	0,17	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15
1,50	0,46	0,43	0,40	0,45	0,42	0,39	0,41	0,39	0,38	1,50	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17	0,16	0,16
2,00	0,51	0,48	0,45	0,50	0,47	0,45	0,46	0,44	0,43	2,00	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17
2,50	0,54	0,51	0,49	0,53	0,50	0,48	0,49	0,48	0,46	2,50	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18
3,00	0,56	0,53	0,51	0,54	0,52	0,51	0,52	0,50	0,49	3,00	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18
4,00	0,58	0,56	0,54	0,57	0,55	0,54	0,54	0,53	0,51	4,00	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19
5,00	0,59	0,58	0,56	0,58	0,57	0,55	0,56	0,55	0,53	5,00	0,20	'0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19

FCS029-2PL*11W										TMS 500 - 1 TL 20W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,30	0,26	0,23	0,29	0,26	0,23	0,25	0,23	0,22	0,60	0,31	0,24	0,19	0,28	0,22	0,18	0,20	0,16	0,13
0,80	0,36	0,32	0,29	0,35	0,31	0,29	0,31	0,28	0,27	0,80	0,38	0,31	0,26	0,35	0,28	0,24	0,26	0,22	0,17
1,00	0,41	0,37	0,33	0,40	0,36	0,33	0,36	0,33	0,32	1,00	0,44	0,37	0,31	0,40	0,34	0,29	0,30	0,26	0,21
1,25	0,45	0,41	0,38	0,44	0,40	0,38	0,40	0,37	0,36	1,25	0,50	0,43	0,37	0,45	0,39	0,34	0,35	0,31	0,26
1,50	0,48	0,44	0,42	0,47	0,44	0,41	0,43	0,41	0,39	1,50	0,54	0,47	0,42	0,49	0,43	0,38	0,39	0,35	0,29
2,00	0,52	0,49	0,47	0,51	0,48	0,46	0,48	0,46	0,44	2,00	0,61	0,54	0,49	0,55	0,50	0,45	0,45	0,41	0,35
2,50	0,55	0,52	0,50	0,54	0,51	0,50	0,51	0,49	0,48	2,50	0,65	0,59	0,54	0,59	0,54	0,50	0,49	0,46	0,39
3,00	0,57	0,55	0,53	0,55	0,54	0,52	0,53	0,51	0,50	3,00	0,68	0,63	0,58	0,62	0,58	0,54	0,52	0,49	0,42
4,00	0,59	0,57	0,55	0,58	0,56	0,55	0,55	0,54	0,52	4,00	0,72	0,68	0,64	0,66	0,62	0,59	0,57	0,54	0,46
5,00	0,60	0,59	0,57	0,59	0,57	0,56	0,56	0,55	0,54	5,00	0,75	0,71	0,68	0,68	0,65	0,62	0,60	0,57	0,49

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)



FCS 02Í-2 PL*13 W										TMS 500-1 TLD16W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,30	0,26	0,23	0,30	0,26	0,23	0,25	0,23	0,22	0,60	0,33	0,26	0,21	0,30	0,24	0,19	0,22	0,18	0,14
0,80	0,36	0,32	0,29	0,35	0,32	0,29	0,31	0,29	0,27	0,80	0,40	0,33	0,27	0,36	0,30	0,25	0,28	0,23	0,19
1,00	0,41	0,37	0,34	0,40	0,36	0,34	0,36	0,33	0,32	1,00	0,46	0,39	0,33	0,42	0,36	0,31	0,33	0,28	0,23
1,25	0,45	0,41	0,38	0,44	0,41	0,38	0,40	0,38	0,36	1,25	0,52	0,45	0,39	0,47	0,41	0,36	0,38	0,33	0,28
1,50	0,48	0,45	0,42	0,47	0,44	0,42	0,43	0,41	0,40	1,50	0,56	0,49	0,44	0,51	0,45	0,41	0,42	0,37	0,31
2,00	0,53	0,50	0,47	0,52	0,49	0,47	0,48	0,46	0,45	2,00	0,63	0,57	0,52	0,57	0,52	0,48	0,48	0,44	0,37
2,50	0,55	0,53	0,51	0,54	0,52	0,50	0,51	0,49	0,48	2,50	0,68	0,62	0,57	0,62	0,57	0,53	0,52	0,49	0,42
3,00	0,57	0,55	0,53	0,56	0,54	0,52	0,53	0,52	0,50	3,00	0,71	0,66	0,61	0,65	0,60	0,57	0,55	0,52	0,45
4,00	0,59	0,58	0,56	0,58	0,57	0,55	0,56	0,54	0,53	4,00	0,75	0,71	0,67	0,69	0,65	0,62	0,60	0,57	0,49
5,00	0,61	0,59	0,58	0,59	0,58	0,57	0,57	0,56	0,54	5,00	0,78	0,74	0,71	0,71	0,68	0,65	0,63	0,60	0,52

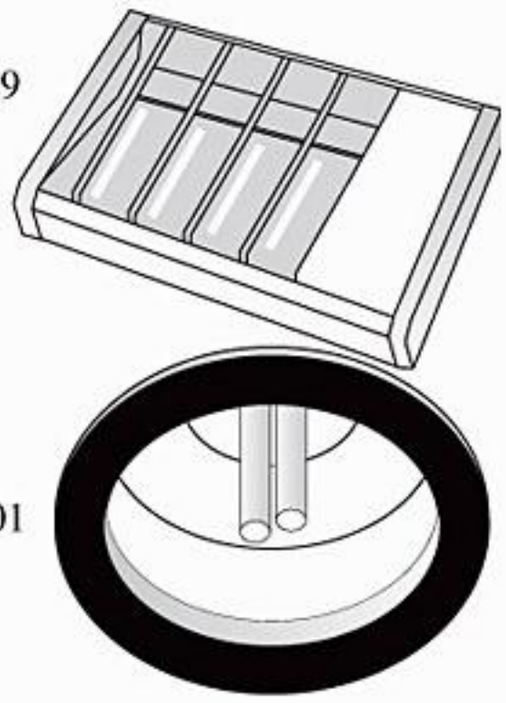
FBN801-1PL*13W										TMS 500 - 1 TL 40W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,32	0,27	0,24	0,31	0,27	0,24	0,27	0,24	0,22	0,60	0,31	0,24	0,19	0,28	0,22	0,18	0,20	0,17	0,13
0,80	0,39	0,34	0,30	0,38	0,33	0,30	0,33	0,30	0,28	0,80	0,39	0,31	0,26	0,35	0,29	0,24	0,26	0,22	0,18
1,00	0,44	0,39	0,36	0,43	0,39	0,35	0,38	0,35	0,34	1,00	0,44	0,37	0,31	0,40	0,34	0,29	0,31	0,27	0,22
1,25	0,49	0,44	0,41	0,47	0,44	0,40	0,43	0,40	0,39	1,25	0,50	0,43	0,37	0,45	0,39	0,34	0,36	0,32	0,26
1,50	0,52	0,48	0,45	0,51	0,47	0,44	0,47	0,44	0,42	1,50	0,55	0,48	0,42	0,49	0,44	0,39	0,40	0,36	0,29
2,00	0,57	0,54	0,51	0,56	0,53	0,50	0,52	0,50	0,48	2,00	0,61	0,55	0,49	0,55	0,50	0,46	0,46	0,42	0,35
2,50	0,60	0,57	0,44	0,59	0,56	0,54	0,55	0,54	0,52	2,50	0,66	0,60	0,55	0,60	0,55	0,51	0,50	0,47	0,39
3,00	0,62	0,60	0,58	0,61	0,59	0,57	0,58	0,56	0,55	3,00	0,69	0,64	0,59	0,63	0,58	0,54	0,53	0,50	0,43
4,00	0,65	0,63	0,61	0,63	0,62	0,60	0,61	0,59	0,58	4,00	0,73	0,69	0,65	0,67	0,63	0,60	0,58	0,55	0,47
5,00	0,66	0,65	0,63	0,65	0,63	0,62	0,62	0,61	0,59	5,00	0,76	0,72	/69	0,69	0,66	0,63	0,60	0,58	0,50

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)

FCS 029



FBN 801

TMS 500 - 2 TLD 32W										TMS 500 c/ RN 500 - 1 TLD 16W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,33	0,26	0,21	0,30	0,24	0,19	0,22	0,18	0,14	0,60	0,34	0,27	0,22	0,32	0,26	0,22	0,26	0,22	0,20
0,80	0,40	0,33	0,27	0,37	0,30	0,25	0,28	0,23	0,19	0,80	0,41	0,35	0,29	0,40	0,34	0,29	0,33	0,29	0,27
1,00	0,46	0,39	0,33	0,42	0,36	0,31	0,33	0,28	0,23	1,00	0,48	0,41	0,35	0,46	0,40	0,35	0,39	0,35	0,33
1,25	0,52	0,45	0,39	0,47	0,41	0,36	0,38	0,33	0,28	1,25	0,54	0,47	0,42	0,52	0,46	0,41	0,45	0,41	0,39
1,50	0,57	0,50	0,44	0,52	0,46	0,41	0,42	0,38	0,31	1,50	0,58	0,52	0,47	0,56	0,51	0,46	0,50	0,46	0,43
2,00	0,64	0,57	0,52	0,58	0,52	0,48	0,48	0,44	0,37	2,00	0,65	0,60	0,55	0,63	0,58	0,54	0,57	0,53	0,51
2,50	0,68	0,62	0,57	0,62	0,57	0,53	0,52	0,49	0,42	2,50	0,70	0,65	0,61	0,67	0,63	0,60	0,62	0,59	0,57
3,00	0,71	0,66	0,62	0,65	0,61	0,57	0,56	0,52	0,45	3,00	0,73	0,69	0,65	0,70	0,67	0,64	0,66	0,63	0,60
4,00	0,76	0,71	0,67	0,69	0,66	0,62	0,50	0,57	0,49	4,00	0,77	0,74	0,70	0,75	0,72	0,69	0,70	0,68	0,66
5,00	0,79	0,75	0,71	0,72	0,69	0,66	0,63	0,61	0,52	5,00	0,80	0,77	0,74	0,77	0,75	0,72	0,73	0,71	0,69

TMS 500 - 1 TL65W										TMS 500 C/RN 500 - 1 TL 40W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,32	0,25	0,20	0,29	0,22	0,18	0,20	0,17	0,13	0,60	0,32	0,24	0,22	0,32	0,26	0,21	0,25	0,24	0,20
0,80	0,39	0,31	0,26	0,35	0,29	0,24	0,26	0,22	0,18	0,80	0,40	0,33	0,29	0,39	0,33	0,28	0,32	0,28	0,24
1,00	0,45	0,37	0,32	0,40	0,34	0,29	0,31	0,27	0,22	1,00	0,46	0,40	0,35	0,45	0,39	0,34	0,38	0,34	0,32
1,25	0,50	0,43	0,37	0,45	0,39	0,34	0,36	0,32	0,26	1,25	0,52	0,46	0,41	0,50	0,45	0,40	0,44	0,40	0,38
1,50	0,55	0,48	0,42	0,49	0,44	0,39	0,40	0,36	0,29	1,50	0,56	0,51	0,46	0,55	0,50	0,45	0,49	0,45	0,43
2,00	0,61	0,55	0,50	0,56	0,50	0,46	0,46	0,42	0,35	2,00	0,63	0,58	0,54	0,61	0,57	0,53	0,56	0,53	0,50
2,50	0,66	0,60	0,55	0,60	0,55	0,51	0,50	0,47	0,39	2,50	0,67	0,63	0,59	0,66	0,62	0,59	0,61	0,58	0,55
3,00	0,69	0,64	0,59	0,63	0,58	0,55	0,53	0,50	0,42	3,00	0,71	0,67	0,63	0,69	0,65	0,62	0,64	0,61	0,59
4,00	0,73	0,69	0,65	0,67	0,63	0,60	0,57	0,55	0,47	4,00	0,74	0,71	0,69	0,72	0,70	0,67	0,60	0,66	0,64
5,00	0,76	0,72	0,69	0,69	0,66	0,63	0,60	0,58	0,49	5,00	0,77	0,74	0,72	0,75	0,73	0,74	0,71	0,69	0,67

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)

TMS 500



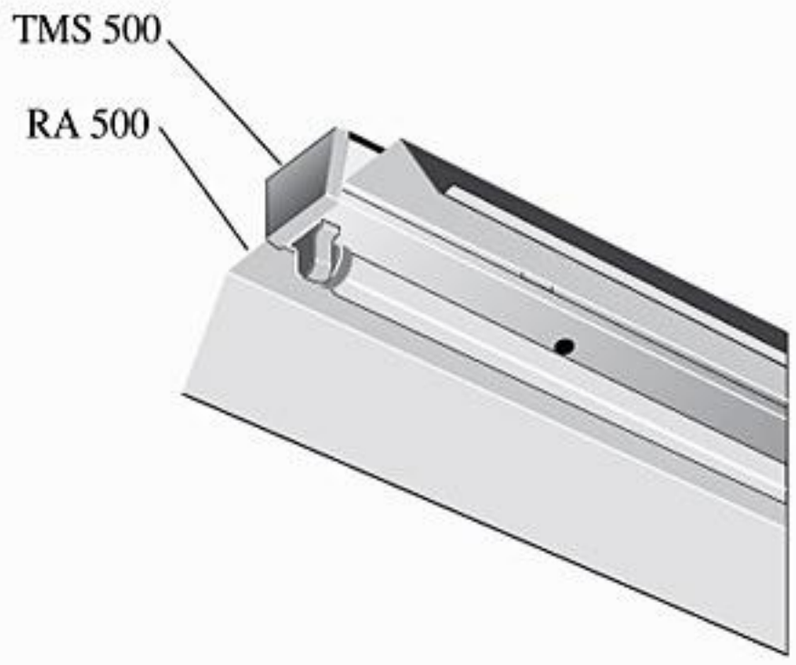
TMS 500 c/ RN 500 - 1 TL 20W										TMS 500 C/ RN 500 - 1 TLD 32W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,33	0,26	0,21	0,32	0,26	0,21	0,25	0,21	0,19	0,60	0,35	0,28	0,23	0,34	0,27	0,23	0,27	0,23	0,21
0,80	0,40	0,33	0,28	0,39	0,33	0,28	0,32	0,28	0,26	0,80	0,42	0,35	0,30	0,41	0,35	0,30	0,34	0,30	0,28
1,00	0,46	0,39	0,34	0,45	0,39	0,34	0,38	0,34	0,31	1,00	0,49	0,42	0,37	0,47	0,41	0,36	0,40	0,36	0,34
1,25	0,52	0,46	0,41	0,50	0,45	0,40	0,44	0,40	0,37	1,25	0,55	0,48	0,43	0,53	0,48	0,43	0,47	0,42	0,40
1,50	0,57	0,51	0,46	0,55	0,49	0,45	0,48	0,44	0,42	1,50	0,60	0,54	0,49	0,58	0,52	0,48	0,51	0,48	0,45
2,00	0,63	0,58	0,54	0,61	0,57	0,53	0,56	0,52	0,50	2,00	0,67	0,61	0,57	0,65	0,60	0,56	0,59	0,56	0,53
2,50	0,68	0,63	0,59	0,66	0,62	0,58	0,60	0,57	0,55	2,50	0,71	0,67	0,63	0,69	0,65	0,62	0,64	0,61	0,59
3,00	0,71	0,67	0,63	0,69	0,65	0,62	0,64	0,61	0,59	3,00	0,74	0,70	0,67	0,72	0,69	0,66	0,68	0,65	0,63
4,00	0,75	0,72	0,69	0,73	0,70	0,67	0,68	0,66	0,64	4,00	0,79	0,75	0,72	0,77	0,74	0,71	0,72	0,70	0,68
5,00	0,78	0,75	0,72	0,75	0,73	0,71	0,71	0,69	0,67	5,00	0,81	0,78	0,76	0,79	0,77	0,75	0,75	0,73	0,7.1

TMS 500 c/ RN 500 - 1 TL 65W										TMS 500 - 2 TL 20W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,33	0,27	0,22	0,32	0,26	0,22	0,26	0,22	0,20	0,60	0,31	0,25	0,21	0,27	0,22	0,18	0,19	0,16	0,12
0,80	0,41	0,34	0,29	0,40	0,34	0,29	0,33	0,29	0,27	0,80	0,38	0,32	0,27	0,33	0,28	0,24	0,24	0,21	0,15
1,00	0,47	0,40	0,35	0,46	0,40	0,35	0,39	0,35	0,33	1,00	0,44	0,37	0,33	0,38	0,33	0,29	0,28	0,25	0,19
1,25	0,53	0,47	0,42	0,52	0,46	0,41	0,45	0,41	0,39	1,25	0,49	0,43	0,38	0,43	0,38	0,34	0,32	0,29	0,22
1,50	0,58	0,52	0,47	0,56	0,51	0,46	0,50	0,46	0,43	1,50	0,53	0,47	0,43	0,46	0,41	0,38	0,36	0,33	0,24
2,00	0,65	0,59	0,55	0,63	0,58	0,54	0,57	0,53	0,51	2,00	0,59	0,54	0,50	0,51	0,47	0,44	0,41	0,38	0,29
2,50	0,69	0,65	0,61	0,67	0,63	0,60	0,62	0,59	0,57	2,50	0,63	0,59	0,55	0,55	0,51	0,48	0,44	0,42	0,34
3,00	0,72	0,68	0,65	0,70	0,67	0,64	0,66	0,63	0,60	3,00	0,66	0,62	0,58	0,57	0,54	0,51	0,47	0,44	0,34
4,00	0,77	0,73	0,70	0,75	0,72	0,69	0,70	0,68	0,66	4,00	0,70	0,66	0,63	0,61	0,50	0,55	0,50	0,48	0,37
5,00	0,79	0,76	0,74	0,77	0,75	0,72	0,73	0,71	0,69	5,00	0,72	0,69	0,66	0,63	0,60	0,58	0,52	0,50	0,38

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)



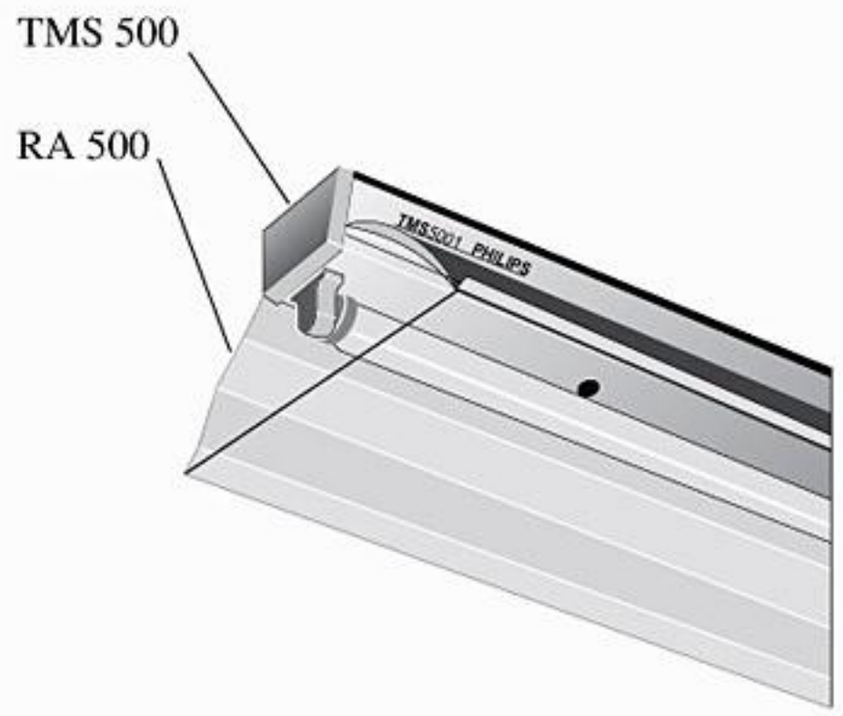
TMS 500 c/ RA 500 - 1 TLD 32W										TMS500-2TLD16W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,44	0,38	0,34	0,43	0,38	0,34	0,38	0,34	0,33	0,60	0,31	0,25	0,21	0,27	0,22	0,18	0,19	0,16	0,12
0,80	0,52	0,46	0,42	0,51	0,46	0,42	0,45	0,42	0,40	0,80	0,39	0,32	0,27	0,33	0,28	0,24	0,24	0,21	0,15
1,00	0,59	0,53	0,49	0,57	0,52	0,49	0,52	0,48	0,46	1,00	0,44	0,38	0,33	0,38	0,33	0,29	0,29	0,25	0,19
1,25	0,64	0,59	0,55	0,63	0,58	0,55	0,58	0,54	0,52	1,25	0,50	0,44	0,39	0,43	0,38	0,34	0,33	0,30	0,22
1,50	0,69	0,64	0,60	0,67	0,63	0,59	0,62	0,59	0,57	1,50	0,54	0,48	0,43	0,47	0,42	0,38	0,36	0,33	0,25
2,00	0,75	0,71	0,67	0,73	0,70	0,67	0,69	0,66	0,64	2,00	0,60	0,55	0,50	0,52	0,48	0,44	0,41	0,38	0,29
2,50	0,79	0,75	0,72	0,77	0,74	0,71	0,73	0,71	0,69	2,50	0,64	0,60	0,55	0,56	0,52	0,49	0,45	0,42	0,32
3,00	0,81	0,78	0,76	0,79	0,77	0,75	0,76	0,74	0,72	3,00	0,67	0,63	0,59	0,58	0,55	0,52	0,47	0,45	0,34
4,00	0,84	0,82	0,80	0,82	0,80	0,79	0,79	0,78	0,75	4,00	0,71	0,67	0,64	0,62	0,59	0,56	0,51	0,49	0,37
5,00	0,86	0,84	0,82	0,84	0,82	0,81	0,81	0,80	0,77	5,00	0,73	0,70	0,67	0,64	0,61	0,59	0,53	0,51	0,39

TMS 500 c/ RF 500 - 1 TLD 32W										TMS 500 - 2 TLD 40W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,37	0,33	0,29	0,37	0,32	0,29	0,32	0,29	0,28	0,60	0,32	0,25	0,21	0,28	0,22	0,19	0,19	0,16	0,12
0,80	0,44	0,39	0,36	0,43	0,39	0,36	0,38	0,35	0,34	0,80	0,39	0,32	0,28	0,34	0,28	0,24	0,25	0,21	0,16
1,00	0,50	0,45	0,41	0,49	0,44	0,41	0,44	0,41	0,39	1,00	0,45	0,38	0,33	0,39	0,33	0,29	0,29	0,26	0,19
1,25	0,55	0,50	0 47	0,53	0,50	0,46	0,49	0,46	0,45	1,25	0,50	0,44	0,39	0 43	0,38	0,34	0,33	0,30	0,22
1,50	0,58	0,54	0,51	0,57	0,53	0,50	0,53	0,50	48	1,50	0,54	0,48	0,44	0,47	0,42	0,38	0,36	0,33	0,25
2,00	0,63	0,60	0,57	0,62	0,59	0,57	0,58	0,56	0,54	2,00	0,60	0,55	0,51	0,52	0,48	0,45	0,41	0,39	0,29
2,50	0,67	0,64	0,61	0,65	0,63	0,61	0,62	0,60	0,58	2,50	0,64	0,60	0,56	0,56	0,52	0,49	0,45	0,42	0,32
3,00	0,69	0,66	0,64	0,67	0,65	0,63	0,64	0,63	0,61	3,00	0,67	0,63	0,59	0,58	0,55	0,52	0,47	0,45	0,34
4,00	0,71	0,69	0,68	0,70	0,68	0,67	0,67	0,66	0,64	4,00	0,71	0,67	0,64	0,62	0,59	0,56	0,51	0,49	0,37
5,00	0,73	0,71	0,70	0,71	0,70	0,69	0,69	0,68	0,66	5,00	0,73	0,70	0,6.7	0,64	0,61	0,59	0,53	0,51	0,39

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)



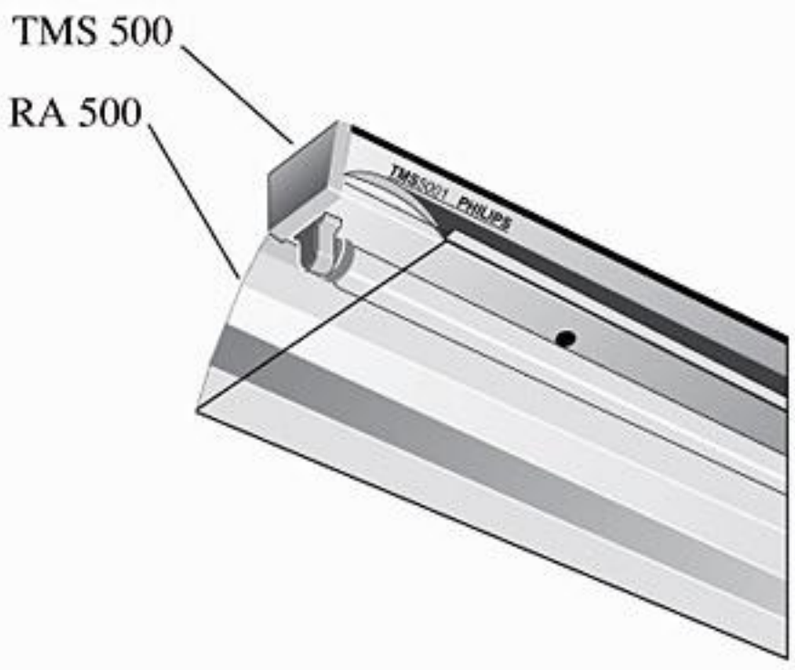
TMS 500 - 2 TLD 32W										TMS 500 C/ RN 500 - 2 TLD 16W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,31	0,25	0,20	0,27	0,22	0,18	0,19	0,16	0,11	0,60	0,32	0,26	0,23	0,31	0,26	0,23	0,26	0,22	0,21
0,80	0,38	0,32	0,27	0,33	0,28	0,24	0,24	0,21	0,15	0,80	0,39	0,33	0,29	0,38	0,33	0,29	0,32	0,29	0,27
1,00	0,44	0,37	0,32	0,38	0,33	0,29	0,28	0,25	0,18	1,00	0,44	0,39	0,35	0,43	0,38	0,35	0,38	0,34	0,33
1,25	0,49	0,43	0,38	0,42	0,37	0,34	0,32	0,29	0,22	1,25	0,49	0,44	0,41	0,48	0,44	0,40	0,43	0,40	0,38
1,50	0,53	0,47	0,43	0,46	0,41	0,37	0,35	0,32	0,34	1,50	0,53	0,48	0,45	0,51	0,48	0,44	0,47	0,44	0,42
2,00	0,59	0,54	0,50	0,51	0,47	0,44	0,40	0,38	0,28	2,00	0,58	0,54	0,51	0,57	0,54	0,51	0,53	0,50	0,48
2,50	0,63	0,58	0,54	0,55	0,51	0,48	0,44	0,41	0,31	2,50	0,62	0,58	0,56	0,60	0,57	0,55	0,56	0,54	0,52
3,00	0,66	0,62	0,58	0,57	0,54	0,51	0,46	0,44	0,34	3,00	0,64	0,61	0,59	0,63	0,60	0,58	0,59	0,57	0,55
4,00	0,69	0,66	0,63	0,60	0,58	0,55	0,50	0,48	0,36	4,00	0,67	0,65	0,63	0,65	0,63	0,62	0,62	0,61	0,59
5,00	0,72	0,69	0,66	0,62	0,60	0,58	0,52	0,50	0,38	5,00	0,69	0,67	0,65	0,67	0,65	0,64	0,64	0,63	0,61

TMS 500 - 2 TLD 65W										TMS 500 c/ RN 500 - 2 TL 40W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,31	0,25	0,20	0,27	0,22	0,18	0,19	0,16	0,12	0,60	0,30	0,25	0,22	0,29	0,25	0,22	0,25	0,24	0,20
0,80	0,38	0,32	0,27	0,33	0,28	0,24	0,24	0,21	0,15	0,80	0,37	0,32	0,28	0,36	0,31	0,28	0,31	0,27	0,26
1,00	0,43	0,37	0,32	0,38	0,33	0,29	0,28	0,25	0,18	1,00	0,42	0,37	0,33	0,41	0,36	0,33	0,36	0,33	0,31
1,25	0,49	0,43	0,38	0,42	0,37	0,33	0,32	0,29	0,22	1,25	0,47	0,42	0,38	0,45	0,41	0,38	0,41	0,38	0,36
1,50	0,53	0,47	0,42	0,46	0,41	0,37	0,35	0,32	0,24	1,50	0,50	0,46	0,42	0,49	0,45	0,42	0,44	0,42	0,40
2,00	0,59	0,54	0,49	0,51	0,47	0,43	0,40	0,38	0,39	2,00	0,55	0,52	0,49	0,54	0,51	0,48	0,50	0,47	0,46
2,50	0,63	0,58	0,54	0,54	0,51	0,48	0,44	0,41	0,31	2,50	0,59	0,55	0,53	0,57	0,54	0,52	0,53	0,51	0,50
3,00	0,65	0,61	0,58	0,57	0,54	0,51	0,46	0,44	0,33	3,00	0,61	0,58	0,56	0,59	0,57	0,55	0,56	0,54	0,52
4,00	0,69	0,66	0,62	0,60	0,57	0,55	0,49	0,47	0,36	4,00	0,64	0,61	0,59	0,62	0,60	0,58	0,59	0,58	0,56
5,00	0,71	0,68	0,66	0,62	0,60	0,58	0,51	0,50	0,38	5,00	0,65	0,63	0,62	0,64	0,62	0,61	0,61	50	0,58

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)



TMS 500 c/ RN 500 - 2 TL 20W

Room Index IK__	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,31	0,26	0,22	0,30	0,26	0,22	0,25	0,22	0,21
0,80	0,38	0,32	0,29	0,37	0,32	0,28	0,32	0,28	0,27
1,00	0,43	0,38	0,34	0,42	0,37	0,34	0,37	0,34	0,32
1,25	0,48	0,43	0,39	0,47	0,42	0,39	0,42	0,39	0,37
1,50	0,52	0,47	0,44	0,50	0,46	0,43	0,46	0,43	0,41
2,00	0,57	0,53	0,50	0,56	0,52	0,49	0,51	0,49	0,47
2,50	0,60	0,57	0,54	0,59	0,56	0,53	0,55	0,53	0,51
3,00	0,63	0,60	0,57	0,61	0,59	0,56	0,50	0,56	0,54
4,00	0,66	0,63	0,61	0,64	0,62	0,60	0,61	0,59	0,57
5,00	0,67	0,65	0,63	0,66	0,64	0,62	0,63	0,61	0,59

TMS 500 c/ RN 500 - 2 TLD 32W

Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,31	0,26	0,22	0,30	0,25	0,22	0,25	0,22	0,21
0,80	0,37	0,32	0,29	0,37	0,32	0,28	0,31	0,28	0,27
1,00	0,43	0,38	0,34	0,42	0,37	0,34	0,37	0,34	0,32
1,25	0,48	0,43	0,39	0,46	0,42	0,39	0,42	0,39	0,37
1,50	0,51	0,47	0,43	0,50	0,46	0,43	0,45	0,43	0,41
2,00	0,57	0,53	0,50	0,55	0,52	0,49	0,51	0,49	0,47
2,50	0,60	0,57	0,54	0,58	0,56	0,53	0,55	0,53	0,51
3,00	0,62	0,59	0,57	0,61	0,58	0,56	0,57	0,55	0,54
4,00	0,65	0,63	0,61	0,63	0,61	0,60	0,60	0,59	0,57
5,00	0,66	0,65	0,63	0,65	0,63	0,62	0,62	0,61	0,59

TMS 500 c/ RN 500 - 2 TL 65W

Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,29	0,25	0,21	0,29	0,24	0,21	0,24	0,21	0,20
0,80	0,36	0,31	0,27	0,35	0,30	0,27	0,30	0,27	0,25
1,00	0,41	0,36	0,32	0,40	0,35	0,32	0,35	0,32	0,30
1,25	0,45	0,41	0,37	0,44	0,40	0,37	0,39	0,37	0,35
1,50	0,49	0,44	0,41	0,47	0,44	0,41	0,43	0,40	0,39
2,00	0,54	0,50	0,47	0,52	0,49	0,47	0,48	0,46	0,44
2,50	0,57	0,54	0,51	0,55	0,53	0,50	0,52	0,50	0,48
3,00	0,59	0,54	0,54	0,58	0,55	0,53	0,54	0,53	0,51
4,00	0,62	0,59	0,57	0,60	0,58	0,57	0,57	0,56	0,54
5,00	0,63	0,61	0,60	0,62	0,60	0,59	0,59	0,58	0,56

TCW 502 - 2 TL 40W

Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,23	0,19	0,15	0,22	0,18	0,15	0,17	0,14	0,13
0,80	0,29	0,24	0,20	0,27	0,33	0,19	0,22	0,19	0,17
1,00	0,33	0,28	0,24	0,31	0,27	0,23	0,26	0,23	0,26
1,25	0,37	0,32	0,28	0,35	0,31	0,28	0,30	0,27	0,24
1,50	0,40	0,36	0,32	0,38	0,34	0,31	0,33	0,30	0,27
2,00	0,45	0,41	0,37	0,43	0,39	0,36	0,38	0,35	0,32
2,50	0,48	0,45	0,41	0,46	0,43	0,40	0,41	0,39	0,36
3,00	0,51	0,47	0,44	0,48	0,45	0,43	0,43	0,41	0,38
4,00	0,53	0,51	0,48	0,51	0,49	0,46	0,46	0,45	0,42
5,00	0,55	0,53	0,51	0,53	0,51	0,49	0,49	0,47	0,44

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)

TCW 502



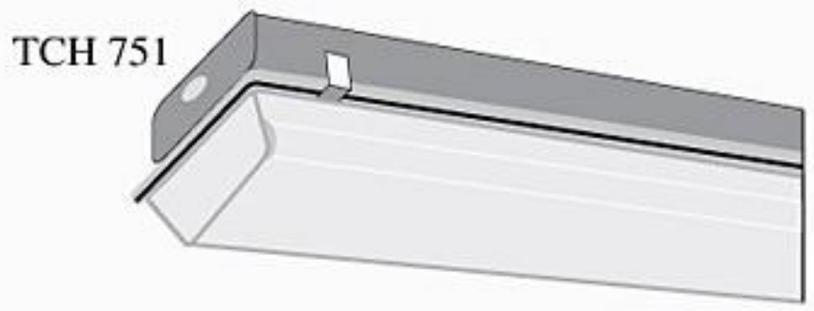
TMS 500 c/ RA 500-2 TLD 32W										**TCH75- 2 TL 20W**									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,37	0,33	0,29	0,37	0,32	0,29	0,32	0,29	0,28	0,60	0,28	0,22	0,18	0,27	0,22	0,18	0,21	0,18	0,14
0,80	0,44	0,39	0,36	0,43	0,39	0,36	0,38	0,35	0,34	0,80	0,34	0,29	0,24	0,33	0,28	0,24	0,27	0,23	0,22
1,00	0,50	0,45	0,41	0,49	0,44	0,41	0,44	0,41	0,39	1,00	0,40	0,34	0,29	0,38	0,33	0,29	0,32	0,28	0,26
1,25	0,55	0,50	0,47	0,53	0,50	0,46	0,49	0,46	0,45	1,25	0,44	0,39	0,34	0,43	0,38	0,34	0,37	0,33	0,31
1,50	0,58	0,54	0,51	0,57	0,53	0,50	0,53	0,50	48	1,50	0,48	0,43	0,38	0,46	0,42	0,38	0,40	0,37	0,35
2,00	0,63	0,60	0,57	0,62	0,59	0,57	0,58	0,56	0,54	2,00	0,54	0,49	0,45	0,52	0,48	0,44	0,46	0,43	0,41
2,50	0,67	0,64	0,61	0,65	0,63	0,61	0,62	0,60	0,58	2,50	0,57	0,53	0,50	0,55	0,52	0,48	0,50	0,47	0,45
3,00	0,69	0,66	0,64	0,67	0,65	0,63	0,64	0,63	0,61	3,00	0,60	0,56	0,53	0,58	0,55	0,52	0,53	0,50	0,48
4,00	0,71	0,69	0,68	0,70	0,68	0,67	0,67	0,66	0,64	4,00	0,63	0,60	0,57	0,61	0,58	0,56	0,57	0,55	0,52
5,00	0,73	0,71	0,70	0,71	0,70	0,69	0,69	0,68	0,66	5,00	0,66	0,63	0,60	0,63	0,61	0,59	0,59	0,57	0,54

TCW 501 - 1 TL 40W										**TCH 751 - 1 TL 40W**									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,27	0,21	0,17	0,25	0,20	0,16	0,19	0,15	0,13	0,60	0,28	0,22	0,18	0,27	0,21	0,17	0,20	0,16	0,14
0,80	0,33	0,26	0,22	0,31	0,25	/21	0,24	0,20	0,17	0,80	0,35	0,28	0,23	0,33	0,27	0,22	0,25	0,22	0,19
1,00	0,38	0,31	0,26	0,35	0,30	0,25	0,28	0,24	0,21	1,00	0,40	0,33	0,28	0,38	0,32	0,27	0,30	0,26	0,23
1,25	0,42	0,36	0,31	0,40	0,34	0,30	0,32	0,39	0,25	1,25	0,45	0,39	0,34	0,42	0,37	0,32	0,35	0,31	0,27
1,50	0,46	0,40	0,35	0,43	0,38	0,34	0,36	0,32	0,29	1,50	0,49	0,43	0,38	0,46	0,41	0,36	0,38	0,35	0,31
2,00	0,52	0,46	0,42	0,48	0,44	0,40	0,41	0,38	0,34	2,00	0,55	0,49	0,45	0,52	0,47	0,43	0,44	0,41	0,37
2,50	0,55	0,51	0,46	0,52	0,48	0,44	0,45	0,42	0,38	2,50	0,59	0,54	0,49	0,55	0,51	0,47	0,48	0,45	0,41
3,00	0,58	0,54	0,50	0,55	0,51	0,48	0,48	0,45	0,41	3,00	0,62	0,57	0,53	0,58	0,54	0,51	0,51	0,48	0,44
4,00	0,62	0,58	0,55	0,58	0,55	0,52	0,52	0,50	0,45	4,00	0,66	0,62	0,58	0,62	0,59	0,56	0,56	0,53	0,48
5,00	0,64	0,61	0,58	0,61	0,58	0,55	0,55	0,53	0,48	5,00	0,68	0,65	0,61	0,64	0,61	0,59	0,58	0,56	0,51

(continua)

(continuação)

Tabela 16.6 ■ Fator de utilização (η)



TCH 751 - 2 TL 40W										TCH751 -4TL40W									
Room Index K	Refletâncias									Room Index K	Refletâncias								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000		751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,27	0,21	0,17	0,26	0,21	0,17	0,20	0,17	0,15	0,60	0,24	0,19	0,16	0,23	0,19	0,16	0,18	0,16	0,14
0,80	0,33	0,27	0,23	0,31	0,26	0,22	0,25	0,22	0,20	0,80	0,29	0,24	0,21	0,28	0,24	0,21	0,23	0,29	0,19
1,00	0,37	0,32	0,28	0,36	0,31	0,27	0,30	0,26	0,24	1,00	0,33	0,29	0,25	0,32	0,28	0,25	0,27	0,24	0,23
1,25	0,42	0,37	0,32	0,40	0,35	0,32	0,34	0,31	0,29	1,25	0,37	0,33	0,30	0,36	0,32	0,29	0,31	0,28	0,27
1,50	0,46	0,41	0,36	0,44	0,39	0,35	0,38	0,35	0,32	1,50	0,40	0,36	0,33	0,39	0,35	0,32	0,34	0,32	0,30
2,00	0,51	0,46	0,43	0,49	0,45	0,41	0,43	0,40	0,38	2,00	0,45	0,41	0,38	0,43	0,40	0,37	0,39	0,37	0,34
2,50	0,55	0,56	0,47	0,52	0,49	0,46	0,47	0,44	0,42	2,50	0,48	0,45	0,42	0,46	0,43	0,41	0,42	0,40	0,38
3,00	0,57	0,53	0,50	0,55	0,51	0,49	0,50	0,47	0,44	3,00	0,50	0,47	0,44	0,48	0,46	0,43	0,44	0,42	0,40
4,00	0,60	0,57	0,54	0,58	0,55	0,53	0,53	0,51	0,48	4,00	0,52	0,50	0,48	0,50	0,48	0,47	0,47	0,45	0,43
5,00	0,62	0,60	0,57	0,60	0,58	0,55	0,56	0,54	0,51	5,00	0,54	0,52	0,50	0,52	0,50	0,49	0,49	0,47	0,45

EXERCÍCIOS

1. Quais são as faixas de comprimento de onda do espectro visível?

2. Defina fluxo luminoso (Φ).

3. Quais são os requisitos básicos de uma luminária?

4. Que parâmetros afetam o fator de utilização de uma luminária?

5. Qual é o princípio de funcionamento de uma lâmpada incandescente?

6. Qual é o princípio de funcionamento de uma lâmpada de descarga de gases?

7. Quais são os componentes de uma lâmpada de luz mista?

8. Qual é o princípio de emissão de luz do LED?

9. Quais são as principais vantagens do LED sobre as lâmpadas incandescentes?

10. Que roteiro deve ser seguido nos cálculos de iluminação interna?

A
Apêndice

Influências externas

A.1 Seleção dos componentes em função das influências externas

Os componentes da instalação devem ser selecionados e instalados de acordo com as prescrições da Tabela A1. As características dos componentes são determinadas por um grau de proteção ou por conformidade com ensaios.

Quando um componente não possuir características construtivas compatíveis com as influências externas presentes no local, ele pode ser utilizado sob a condição de que lhe seja provida, na execução da instalação, uma proteção complementar apropriada. Essa proteção não deve afetar as condições de funcionamento do componente.

Quando diferentes influências externas ocorrerem simultaneamente, seus efeitos podem ser independentes ou mútuos, e os graus de proteção devem ser escolhidos de acordo.

A escolha das características dos componentes em função das influências externas é necessária não somente para seu funcionamento correto, mas também para garantir a confiabilidade das medidas de proteção especificadas na NBR 5410.

As medidas de proteção associadas à construção do componente são válidas para condições de influências externas apenas se os ensaios respectivos, previstos nas normas do componente, forem realizados sob tais condições.

Para efeito de entendimento da Tabela A.1, são consideradas 'normais' as seguintes classes de influências externas:

- AA (temperatura ambiente): AA4.
- AB (umidade atmosférica): AB4.
- Outras condições ambientais (AC a AS): XX1 de cada parâmetro.
- Condições de utilização e de construção das edificações (B e C): XX1 de cada parâmetro, exceto no caso do parâmetro BC, que é BC2.

A palavra 'normal' que aparece na terceira coluna da Tabela A.1 significa que um componente que atenda aos requisitos das normas técnicas aplicáveis, dentro das condições de funcionamento por elas definidas como normais, reúne as características necessárias para operar satisfatoriamente sob as influências externas descritas.

A.2 Seleção das linhas elétricas em função das influências externas

As prescrições relativas à seleção e à instalação das linhas elétricas, sob o ponto de vista das influências externas, são apresentadas na Tabela A.2.

Tabela A.1 ■ Características dos componentes da instalação em função das influências externas

Código	Influências externas		Características exigidas para seleção e instalação dos componentes	Referências
	Condições ambientais (4.2.6.1)			
	AA – Temperatura ambiente (4.2.6.1.1)			
	Faixas de temperatura			
	Limite inferior °C	Limite superior °C		
AA1	−60	+5	Componentes projetados especialmente para a aplicação ou medidas adequadas[1]	
AA2	−40	+5		
AA3	−25	+5		
AA4	−5	+40	Normal (em certos casos podem ser necessárias precauções especiais)	
AA5	+5	+40	Normal	
AA6	+5	+60	Componentes projetados especialmente para a aplicação ou medidas adequadas[1]	
AA7	−25	+55	Componentes projetados especialmente para a aplicação ou medidas adequadas[1]	
AA8	−50	+40		

AB – Condições do ambiente (4.2.6.1.2)							
	Temperatura do ar °C		Umidade relativa %		Umidade absoluta g/m³		
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior	
AB1	−60	+5	3	100	0,003	7	Requer medidas adequadas[2]
AB2	−40	+5	10	100	0,1	7	Requer medidas adequadas[2]
AB3	−25	+5	10	100	0,5	7	Requer medidas adequadas[2]

AB – Condições climáticas do ambiente (4.2.6.1.2)							
	Temperatura do ar °C		Umidade relativa %		Umidade absoluta g/m³		
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior	
AB4	−5	+40	5	95	1	29	Normal
AB5	+5	+40	5	85	1	25	Normal
AB6	+5	+60	10	100	1	35	Requer medidas adequadas[2]
AB7	−25	+55	10	100	0,5	29	Requer medidas adequadas[2]
AB8	−50	+40	15	100	0,04	36	Requer medidas adequadas[2]

AC – Altitude			
AC1	≤ 2.000 m	Normal	
		Podem ser necessárias precauções especiais como a aplicação de fatores de correção	
AC2	> 2.000 m	Nota: Para certos componentes podem ser necessárias medidas especiais a partir de 1.000 m	

Fonte: Tabela 32 da NBR 5410

(continua)

(continuação)

Código	Influências externas	Características exigidas para seleção e instalação dos componentes	Referências
AD – Presença de água (4.2.6.1.4)			
AD1	Desprezível	IPX0	
AD2	Gotejamento	IPX1 ou IPX2	
AD3	Precipitação	IPX3	
AD4	Aspersão	IPX4	
AD5	Jatos	IPX5	
AD6	Ondas	IPX6	
AD7	Imersão	IPX7	
AD8	Submersão	IPX8	
AE – Presença de corpos sólidos			
AE1	Desprezível	IP0X	
AE2	Pequenos objetos (2,5 mm)	IP3X	
AE3	Objetos muito pequenos (1 mm)	IP4X	
AE4	Poeira leve	IP5X caso a penetração de poeira não prejudique o funcionamento do componente	
AE5	Poeira moderada	IP6X caso a poeira não deva penetrar no componente	
AE6	Poeira intensa	IP6X	
AF – Presença de substâncias corrosivas ou poluentes (4.2.6.1.6)			
AF1	Desprezível	Normal	
AF2	Agentes atmosféricos	Conforme a natureza dos agentes	
AF3	Intermitente	Proteção contra corrosão definida pelas especificações dos componentes	
AF4	Permanente	Componente especialmente concebidos, conforme a natureza dos agentes	
AG – Choques mecânicos (4.2.6.1.7)			
AG1	Fracos	Normal. Por exemplo, componentes para uso doméstico e análogo	IEC 60721-3-32002, classes 3M1/3M2/3M3 e IEC 60721-3-4:1987. classes 4M1/4M2/4M3 IEC 60721-3-3.2002.classes 3M4/3M5/3M6 classes 3M4/3M5/3M6 e IEC 60721-3-4:1987 classes 4M4/4M5/4M6
AG2	Médios	Componentes para uso industrial, quando aplicável, ou proteção reforçada	
AG3	Severos	Proteção reforçada	IEC 60721-3-3:2002, classes 3M7/3M8 e IEC60721-3-4:1987, classes 4M7/4M8

(continua)

(continuação)

AH – Vibrações			
AH1	Fracas	Normal	
AH2	Médias	Componentes projetados especialmente para a aplicação, ou medidas adequadas[1]	
AH3	Severas		
AK – Presença de fibra ou mofo			
AK1	Desprezível	Normal Proteções especiais, como: – grau de proteção aumentado (ver AE) – componentes especiais ou revestimentos protegendo os invólucros – medidas para evitar a presença de flora	
AK2	Prejudicial		
AL – Presença de fauna			
AL1	Desprezível	Normal A proteção pode compreender: – grau de proteção adequado contra a penetração de corpos sólidos (ver AE) – resistência mecânica suficiente (ver AG) – precauções para evitar a presença da fauna (como limpeza, uso de pesticidas) – componentes especiais ou revestimentos protegendo os invólucros	
AL2	Prejudicial		
AM – Influências eletromagnéticas, eletrostáticas ou ionizantes			
AM1 – Harmônicas e inter-harmônicas			
AM1-1	Nível controlado	Devem ser tomadas precauções para que a situação controlada não seja prejudicada	Inferior à tabela 1 da IEC 61000-2-2.2002
AM1-2	Nível normal	Medidas especiais no projeto da instalação, tais como filtros	De acordo com a Tabela 1 da IEC61000-2-2.2002
AM1-3	Nível alto		Localmente superior à tabela 1 da IEC 61000-2-2.2002
AM2 – Tensões de sinalização			
AM2-1	Nível controlado	Circuitos de bloqueio, por exemplo	Inferior aos especifica-dos abaixo
AM2-1	Nível médio	Sem requisitos adicionais	IEC 61000-2-1 e IEC 61000-2-2
AM2-3	Nível alto	Requer medidas adequadas	

(continua)

(continuação)

AM 3 – Variações de amplitude da tensão			
AM3-1	Nível controlado		
AM3-2	Nível normal	Ver 5.4 e 5.5	
AM4 – Desequilíbrio de tensão			
AM4	Nível normal	De acordo com a IEC 61000-2-2	
AM5 – Variações de freqüência			
AM5	Nível normal	+- 1 HZ de acordo com a IEC 61000-2-2	
AM6 – Tensões induzidas de baixa freqüência (4.2.6.1.10)			
AM6	Sem classificação	Ver 5.4.3 Alta suportabilidade dos sistemas de sinalização e comando de dispositivos de manobra	ITU-T
AM7 – Componentes contínuas em redes c.a. (4.2.6.1.10)			
AM7	Sem classificação	Medidas para limitar seu nível e duração nos equipamentos de utilização ou em suas proximidades	
AM8 – Campos magnéticos radiados (4.2.6.1.10)			
AM8-1	Nível médio	Normal	Nível 2 de IEC 61000-4-8:2001
AM8 - 2	Nível alto	Proteção por medidas adequadas, tais como blindagem e/ou separação	Nível 4 da IEC 61000-4-8:2001
AM9 – Campos elétricos			
AM9 – 1	Nível desprezível)	Normal	IEC 61000-2-5
AM9 – 2	Nível médio	Ver IEC 61000-2-5	
AM9 – 3	Nível alto	Ver IEC 61000-2-5	
AM9 – 4	Nível muito alto	Ver IEC 61000-2-5	
AM21 – Tensões ou correntes induzidas oscilantes			
AM21	Sem classificação	Normal	IEC 61000-4-6
AM22 – Transitórios unidirecionais conduzidos, na faixa do nanossegundo			
AM22 – 1	Nível desprezível)	Requer medidas de proteção	Nível 1 da IEC 61000-4-4:2004
AM22 – 2	Nível médio	Requer medidas de proteção	Nível 2 de IEC 61000-4-4:2004
AM22 – 3	Nível alto	Equipamento normal	Nível 3 de IEC 61000-4-4:2004
AM22 – 4	Nível muito alto	Equipamento normal	Nível 4 da IEC 61000-4-4:2004

(continua)

(Continuação)

AM23-1	Nível controlado	Suportabilidade a impulsos dos componentes e proteção contra sobretensões, levando-se em conta a tensão nominal da instalação e a categoria de suportabilidade, de acordo com 5,4,2	4.2.6.1.12, 5,4.2 e 6.3.5
AM23-2	Nível médio		
AM23-3	Nível alto		
AM24 – Transitórios oscilantes conduzidos			
AM24-1	Nível médio	Ver IEC 61000-4-12	Ver IEC 61000-4-12
AM24-2	Nível alto	Ver IEC 60255-22-1	Ver IEC 60255-22-1
AM25 – Fenômenos radiados de alta freqüência (4.2.6.1.10)			
AM25-1	Nível desprezível		Nível 1 da IEC 61000-4-3:2002
AM25-2	Nível médio	Normal	Nível 2 da IEC 61000-4-3:2002
AM25-3	Nível alto	Nível reforçado	Nível 3 da IEC 61000-4-3:2002
AM31 – Descargas eletroestáticas (4.2.6.1.10)			
AM31-1	Nível baixo	Normal	Nível 1 da IEC 61000-4-2:2001
AM31-2	Nível médio	Normal	Nível 2 da IEC 61000-4-2:2001
AM31-3	Nível alto	Normal	Nível 3 da IEC 61000-4-2:2001
AM31-3	Nível muito alto	Reforçada	Nível 3 da IEC 61000-4-2:2001
AM41 – Radiações ionizantes (4.2.6.1.10)			
AM41-1	Sem classificação	Proteção especiais, tais como distanciamento de fonte, interposição de blindagens, invólucro de materiais especiais	
AN – Radiação solar (4.2.6.1.11)			
AN1	Desprezível	Normal	IEC 60721-3-3
AN2	Média	Requer medidas adequadas[2]	IEC 60721-3-3
		Requer medidas adequadas[2], tais como:	
AN3	Alta	– componente resistente à radiação ultravioleta – revestimento de cores especiais – interposição de anteparos	IEC 60721-3-4

(continua)

(continuação)

AQ – Descargas atmosféricas (4.2.6.1.12)			
AQ1	Desprezíveis	Normal	
AQ2	Indiretas	Ver 5.4.2 e 6.3.5	
		Ver 5.4.2 e 6.3.5	
AQ3	Diretas	Quando aplicável, a proteção contra descargas atmosféricas deve ser conforme ABNT NBR 5419	
AR – Movimentação do ar (4. 2. 6. 1. 13)			
AR1	Desprezível	Requer medidas adequadas[2]	
AR2	Média	Requer medidas adequadas[2]	
AR3	Forte	Requer medidas adequadas[2]	
AS – Vento (4. 2. 6. 1. 14)			
AS1	Desprezível	Normal	
AS2	Médio	Requer medidas adequadas[2]	
AS3	Forte	Requer medidas adequadas[2]	
B – Utilização (4. 2. 6. 2)			
BA – Competência de pessoas (4. 2. 6. 2. 1)			
BA1	Comuns	Normal	
BA2	Crianças	Componente com grau de proteção superior a IP2X Componentes com temperaturas de superfície externa superiores a 80 °C (60 °C para creches e locais análogos) devem ser inacessíveis	
BA3	Incapacitadas	Conforme a natureza da deficiência	
BA4	Advertidas	Componentes não protegidos contra contatos diretos admitidos apenas em locais de acesso restrito a pessoas devidamente autorizadas	
BA5	Qualificadas		
BB – Resistência elétrica do corpo humano (4. 2. 6. 2. 2)			
BB1	Alta	Normal	
BB2	Normal	Normal	
BB3	Baixa	Medidas de proteção adequadas (ver 5.1 e Seção 9 e Anexo C)	
BB4	Muito baixa	Medidas de proteção adequadas (ver 5.1 e Seção 9 e Anexo C)	
BC – Contatos das pessoas com o potencial da terra (4. 2. 6. 2. 3)			
BC1	Nulo	Condição excepcional, não considerada, na prática para seleção dos componentes	IEC 61140:2001
BC2	Raros	Componentes classes I, II e III	
BC3	Freqüente	Componentes classes I, II e III	
BC4	Contínuo	Medidas especiais	

(continua)

(continuação)

BD – Fuga das pessoas em emeregências (4.2.6.2.4)			
BD1	Normal	Normal	
BD2	Longa		
BD3	Tumultuada	Ver 5.2.2.2	
BD4	Longa e tumultuada		

BE – Natureza dos materiais processados ou armazenados (4.2.6.2.5)			
BE1	Riscos desprezíveis	Normal	5.2.2.3
BE2	Riscos de incêndio	Componentes constituídos de materiais não-propagantes de chama. Precauções para que uma elevação significativa da temperatura ou uma centelha no componente não possa provocar incêndio externamente	
BE3	Riscos de explosão	Componentes adequados para atmosferas explosivas	
BE4	Riscos de contaminação	Medidas adequadas, tais como: – proteção contra fragmentos de lâmpadas e de outros objetos frágeis – anteparos contra radiações prejudiciais, como infravermelhos e ultravioletas	

C – Construção das edificações (4.2.6.3)			
CA – Materiais de construção (4.2.6.3.1)			
CA1	Não-combustíveis	Normal	
CA2	Combustíveis	Ver 5.2.2.4	

CB – Estrutura das edificações (4.2.6.3.2)			
CB1	Riscos desprezíveis	Normal	
CB2	Sujeitas a propagação de incêndio	Nota: Componentes constituídos de materiais não-propagantes de chama, inclusive de origem não-elétrica. Barreiras corta-fogo Nota: Podem ser previstos detectores de incêndio	5.2.2.5

CB – Estrutura das edificações (4.2.6.3.2)			
CB3	Sujeitas a movimentação	Juntas de contração ou de expansão nas linhas elétricas	
CB4	Flexíveis ou instáveis	(em estudo)	

Notas:
1. Podem ser necessárias precauções suplementares (por exemplo, lubrificação especial).
2. Medidas especiais devem ser adotadas entre o projetista da instalação e o fabricante do componente, por exemplo, componentes especialmente concebidos para a aplicação.

Tabela A.2 ■ Seleção e instalação de linhas elétricas em função das influências externas (origem: Tabela 34 da NBR 5410)

Código	Classificação		Seleção e instalação das linhas
A – Condições ambientais			
AA – Temperatura ambiente			
AA1	−60 °C	+5 °C	Sob temperaturas inferiores a – 10 °C os condutores ou cabos com isolação e/ou cobertura de PVC, bem como os condutores de PVC não devem ser manipulados nem submetidos a esforços mecânicos, visto que o PVC pode se tonar quebradiço Quando a temperatura ambiente (ou do solo) for superior aos valores de referência (20 °C para linhas subterrâneas e 30 °C para as demais), as capacidades de condução de corrente dos condutores e cabos isolados devem ser reduzidas de acordo com 6.2.5.3.3
AA2	−40 °C	+5 °C	
AA3	−25 °C	+5 °C	
AA4	−5 °C	+40 °C	
AA5	+5 °C	+40 °C	
AA6	+5 °C	+60 °C	
AA7	−25 °C	+55 °C	
AA8	−50 °C	+40 °C	
AC – Altitude (sem influência)			
AD – Presença de água			
AD1	Desprezível		O uso de molduras só é permitido em AD1
AD2	Gotejamento		
AD3	Precipitação		Nas condições AD3 a AD6 só devem ser usadas linhas com proteção adicional à penetração de água, com os graus IP adequados, em princípio sem revestimento metálico externo
AD4	Aspersão		
AD5	Jatos		
AD6	Onda		Os cabos uni e multipolares dotados de cobertura extrudada podem ser usados em qualquer tipo de linha, mesmo com condutos metálicos
AD7	Imersão		
AD8	Submersão		Cabos para uso submerso
AE – Presença de corpos sólidos			
AE1	Desprezível		Nenhuma limitação
AE2	Pequenos objetos		Nenhuma limitação, desde que não haja exposição a danos mecânicos
AE3	Objetos muito pequenos		Nenhuma limitação
AE4	Poeira leve		Podem ser necessárias precauções para evitar que a deposição de poeira ou outras substâncias chegue ao ponto de prejudicar a dissipação térmica das linhas elétricas.Isso inclui a seleção de um método de instalação que facilite a remoção da poeira
AE5	Poeira moderada		
AE6	Poeira intensa		
AF – Presença de substâncias corrosivas ou poluentes			
AF1	Desprezível		Nenhuma limitação
AF2	Atmosférica		As linhas devem ser protegidas contra corrosão ou contra agentes químicos; os cabos uni e multipolares com cobertura extrudada são considerados adequados; os condutores isolados só podem ser usados em eletrodutos que apresentem resistência adequadas aos agentes presentes
AF3	Intermitente		
AF4	Permanente		Só é admitido o uso de cabos uni ou multipolares adequados aos agentes químicos presentes

(continua)

(continuação)

AH – Vibrações		
AH1	Fracas	Nenhuma limitação
AH2	Médias	Podem ser necessárias linhas flexíveis
AH3	Severas	Só podem ser utilizadas linhas flexíveis constituídas por cabos uni ou multipolares flexíveis ou condutores isolados flexíveis em eletroduto flexível
AK – Presença de flora ou mofo		
AK1	Desprezível	Nenhuma limitação
AK2	Prejudicial	Deve ser avaliada a necessidade de utilizar: – cabos providos de armação, se diretamente enterrados – condutores isolados em condutos com grau de proteção adequado – materiais especiais ou revestimento adequados protegendo cabos ou eletrodutos
AL – Presença de fauna		
AL1	Desprezível	Nenhuma limitação
AL2	Prejudicial	Linhas com proteção especial. Se existir risco devido à presença de roedores e cupins, deve ser usada uma das soluções: – cabos providos de armação – condutores isolados em condutos com grau de proteção adequado – materiais especialmente aditivados ou revestimento adequado em cabos ou eletrodutos
AN – Radiação solar		
AN1	Desprezível	Nenhuma limitação
AN2	Média	Os cabos ao ar livre ou em condutos abertos devem ser resistentes às intempéries. A elevação da temperatura da superfície dos condutores ou cabos deve ser levada em conta nos cálculos da capacidade de condução de corrente
AN3	Alta	
B – Utilizações		
BA – Competência das pessoas (sem influência)		
BB – Resistência elétrica do corpo humano		
BB1	Alta	Nenhuma limitação
BB2	Normal	
BB3	Baixa	Ver 5.1 e Seção 9
BB4	Muito baixa	
BC – Contato das pessoas com o potencial da terra		
BC1	Nulo	Nenhuma limitação
BC2	Raro	
BC3	Freqüente	Ver 5.1 e Seção 9
BC4	Contínuo	
BD – Fuga das pessoas em emergência		
BD1	Normal	Nenhuma limitação
BD2	Longa	
BD3	Tumultuada	Ver 5.2.2.2
BD4	Longa e tumultuada	

(continua)

(continuação)

BE – Natureza dos materiais processados ou armazenados		
BE1	Riscos desprezível	Nenhuma limitação
BE2	Risco de incêndio	Ver 5.2.2.3
BE3	Riscos de explosão	Linhas protegidas por escolha adequada da maneira de instalar (para BE3. ver ABNT NBR 9518)
BE4	Riscos de contaminação	
C – Construção das edificações		
CA – Materiais de construção		
CA1	Não-combustível	Nenhuma limitação
CA2	Combustíveis	Ver 5.2.2.4
CB – Estrutura das edificações		
CB1	Riscos desprezível	Nenhuma limitação
CB2	Sujeitas à propagação de incêndio	Ver 5.2.2.3
CB3	Sujeitas à movimentação	Linhas flexíveis ou contendo juntas de dilatação e de expansão
CB4	Flexíveis	Linhas flexíveis

B

Apêndice

Os eletrodos de fundação e a equalização de potencial

Por Celso Luiz Pereira Mendes
Consultor, SM IEEE, VDE

A infra-estrutura de aterramento de uma edificação, cujo elemento central é o eletrodo de aterramento, deve observar os seguintes requisitos da norma NBR 5410 da ABNT, conforme edição 2004:

- Ser confiável e satisfazer os requisitos de segurança das pessoas.
- Poder conduzir correntes de falta à terra sem risco de danos térmicos, termomecânicos e eletromecânicos, ou de choques elétricos causados por essas correntes.
- Quando aplicável, atender também aos requisitos funcionais da instalação.

Eletrodos de aterramento embutidos nas fundações representam uma solução econômica e altamente eficaz para assegurar a manutenção de suas características durante a vida útil das edificações.

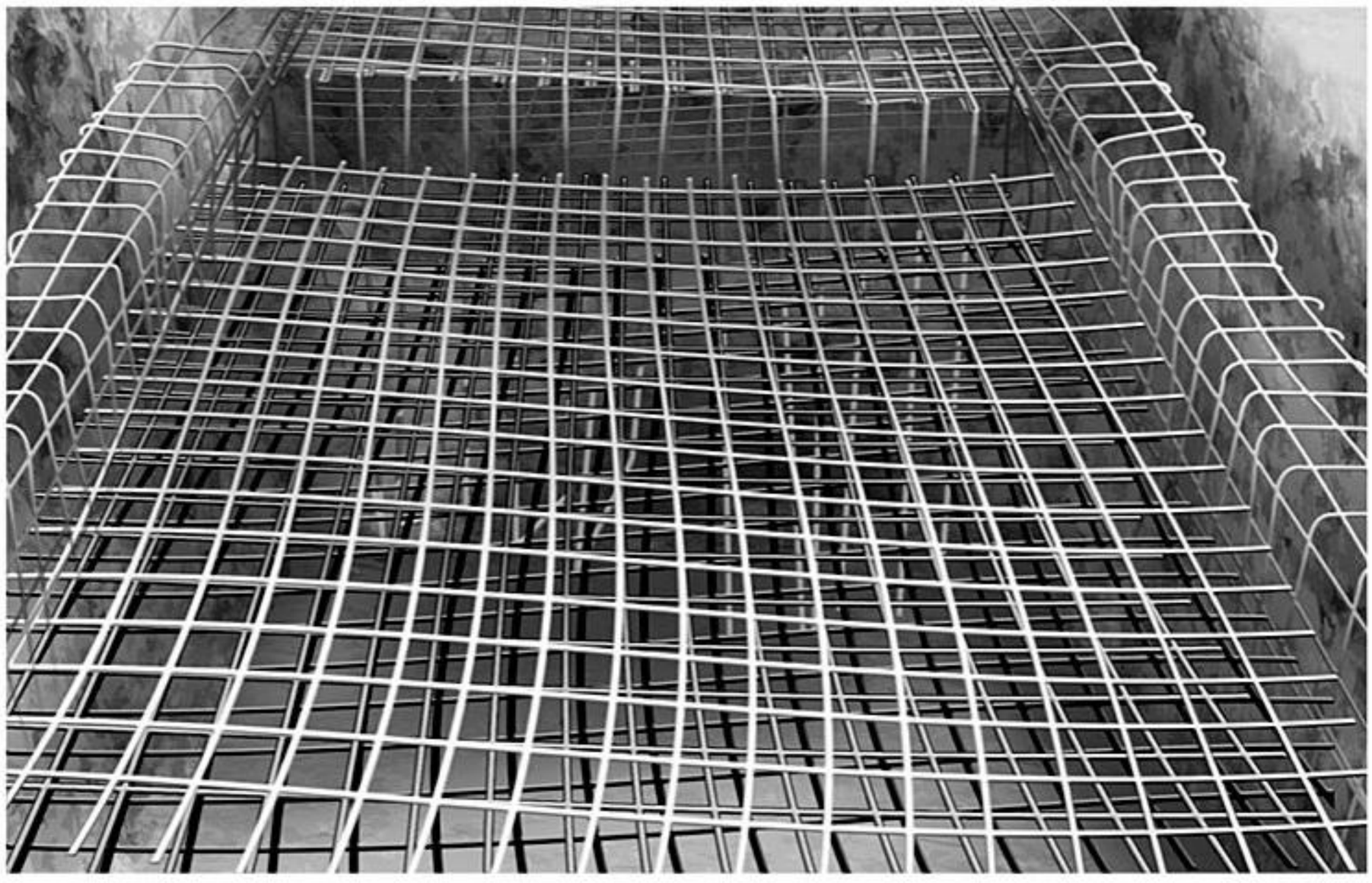


Figura B.1 ▪ Armadura de um bloco de fundação industrial

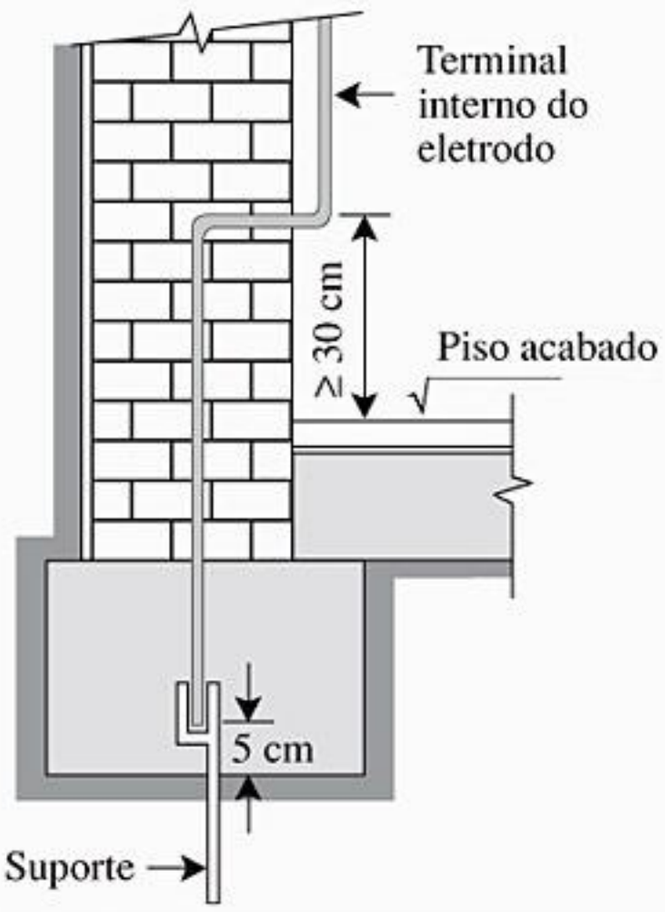


Figura B.2 ▪ Eletrodo de aterramento em fundação sem armadura

Dentre os tipos de eletrodos de aterramento admitidos pela norma brasileira, destacam-se os seguintes:

- Preferencialmente, uso das próprias armaduras do concreto das fundações.
- Uso de fitas, barras ou cabos metálicos, especialmente previstos, imersos no concreto das fundações.
- Uso de malhas metálicas enterradas, no nível das fundações, cobrindo a área da edificação e complementadas, quando necessário, por hastes verticais e/ou cabos dispostos radialmente.
- No mínimo, uso de anel metálico enterrado, circundando o perímetro da edificação e complementado, quando necessário, por hastes verticais e/ou cabos dispostos radialmente.

A primeira alternativa está ilustrada na Figura B.1.

Em 1987, *Eletricidade Moderna* publicou um trabalho pioneiro do engenheiro Armando P. Reis Miranda, em que o autor comenta a evolução da técnica dos eletrodos embutidos nas fundações, tanto nos Estados Unidos como na Alemanha, além de descrever e ilustrar exemplos de aplicação em projetos de sua responsabilidade.

Ao longo dos anos, os eletrodos ditos naturais, que utilizam a armadura de aço das fundações, têm encontrado a devida aceitação no Brasil, por exemplo, em edifícios de apartamentos, escritórios e hotéis, entre outros. Eles facilitam a execução, de modo prático e eficaz, do aterramento unificado do sistema elétrico, de telecomunicações, de tecnologia da informação, do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) e das conseqüentes medidas de eqüipotencialização. Atualmente, ambas as normas brasileiras — NBR 5410 e NBR 5419 — definem requisitos para essa configuração.

B.1 Os eletrodos de fundação e a prática alemã

Na Alemanha, os eletrodos de fundação figuram na norma DIN VDE 0141 (*Aterramento de instalações com tensões nominais >1 kV*) desde 1976 e foram incorporados à DIN VDE 0100 (equivalente à NBR 5410 da ABNT) em 1983. Suas especificações e sua execução são regidas pela norma DIN 18014:2007 (*Eletrodos de fundação*), e eles se aplicam a qualquer tipo de edificação, sendo dispensáveis apenas em caso de estrutura inteiramente metálica, interligada às fundações. A instalação do eletrodo deve começar simultaneamente à construção das fundações. A supervisão deve estar a cargo de profissionais especializados, e todas as etapas de montagem devem ser documentadas mediante desenhos, fotografias e protocolos de medição.

Há uma diferença importante entre as normas DIN e a norma NBR 5410. Enquanto esta admite preferencialmente o uso das próprias armaduras das fundações como eletrodo, a norma alemã exige, incondicionalmente, uma fita ou barra de aço de seção circular, conectada às armaduras a cada dois metros. Nos demais aspectos, os procedimentos de instalação praticados na Alemanha são perfeitamente compatíveis com os objetivos da NBR 5410, devendo-se atentar, apenas, para eventuais diferenças no dimensionamento dos componentes. Os materiais utilizáveis como eletrodo de fundação e suas dimensões mínimas constam da Tabela 51 da NBR 5410.

Em linhas gerais, aplicam-se os seguintes critérios:

(a) O eletrodo de fundação consiste de uma fita de aço medindo no mínimo 30 x 3,5 mm, ou 25 x 4 mm, ou de um cabo de aço com seção mínima de 95 mm². O aço pode ser zincado a quente ou inoxidável.

(b) O eletrodo deve formar um anel fechado, embutido nas fundações ao longo de todo o perímetro do prédio, de modo a se situar, no mínimo, 5 cm acima do fundo do concreto (Figura B.2).
(c) A fita de aço deve ser disposta com a largura na vertical, para facilitar que fique completamente imersa no concreto, o que lhe confere proteção contra corrosão.
(d) Se a fundação for de concreto armado, a norma NBR 5410 admite o uso das armaduras como eletrodo natural, como já mencionado, sendo suficientes as amarrações com arame de aço torcido existentes. Pela norma alemã, nesse caso o eletrodo deve ser assentado logo acima da armadura mais profunda (Figura B.3).
(e) Se a fundação não for de concreto armado, será necessário cravar suportes de fixação a cada 2 m (Figura B.4), de modo a manter o eletrodo em posição, como prescrevem os itens (*b*) e (*c*) anteriores.
(f) Juntas de dilatação existentes em estruturas armadas devem ser transpostas pelo eletrodo de fundação por meio de elementos flexíveis externos ao concreto (Figura B.5). A proteção mecânica poderá ser provida, instalando-se essa emenda em um nicho na parede. Além disso, toda e qualquer junção que conecte metais distintos deve ser protegida contra os efeitos da corrosão eletrolítica.
(g) A norma alemã determina que conexões e derivações no eletrodo de fundação embutidas no concreto sejam soldadas, aparafusadas (Figura B.6) ou tenha conectores de pressão específicos para tal fim, disponíveis no mercado. O uso de solda nas armaduras do concreto depende de aprovação prévia dos engenheiros responsáveis pela estrutura.
(h) O terminal de acesso ao eletrodo de fundação deve aflorar no local de entrada do cabo de energia elétrica (pressupondo-se entrada subterrânea). Nesse ponto, deve situar-se, também, o barramento de eqüipotencialização principal (BEP) do prédio. A Figura B.2 ilustra o terminal em questão. Trata-se de uma fita de aço zincada a fogo, ou revestida contra corrosão, de seção igual à do eletrodo, emergindo a 30 cm do piso do pavimento mais baixo e prolongando-se por 1,5 m até o BEP. Essa conexão é tratada em 6.4.1.2.3 da NBR 5410.

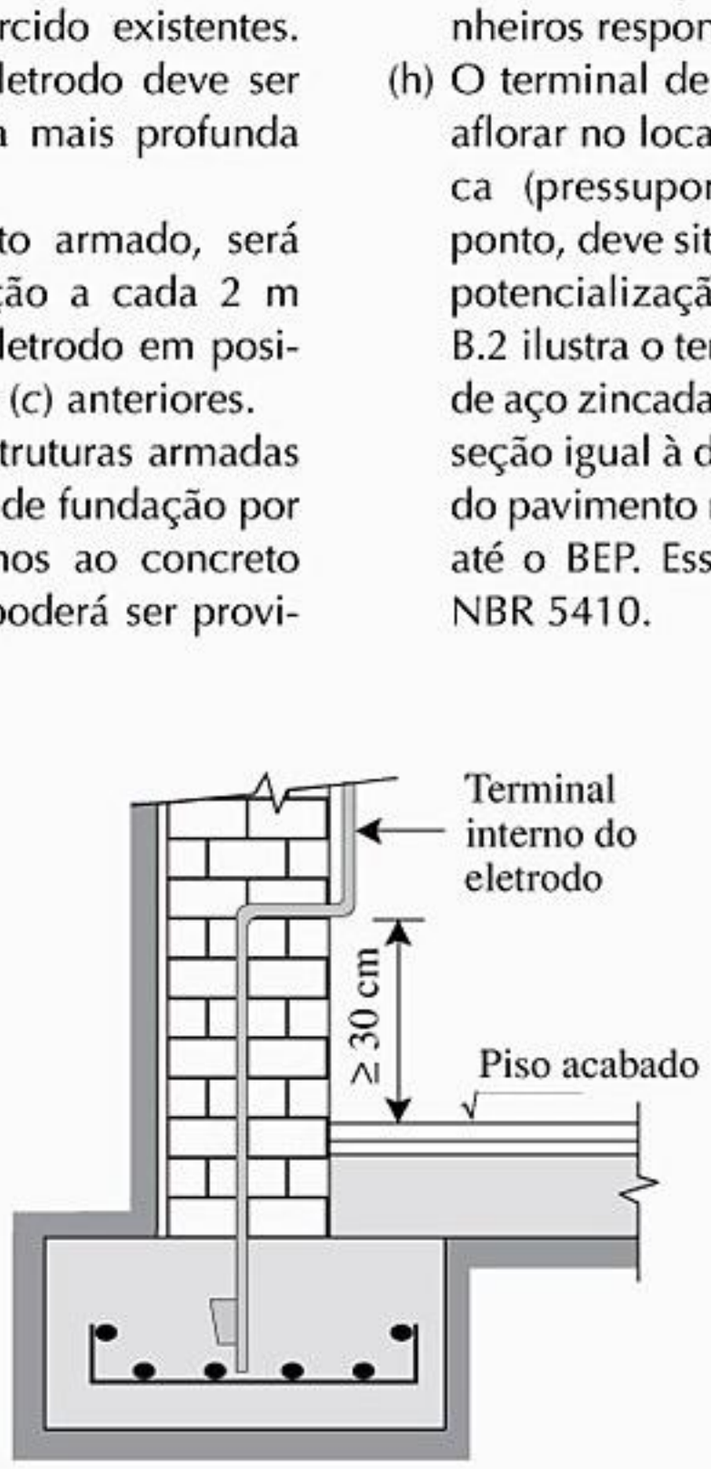


Figura B.3 ■ Eletrodo de aterramento em fundação de concreto armado

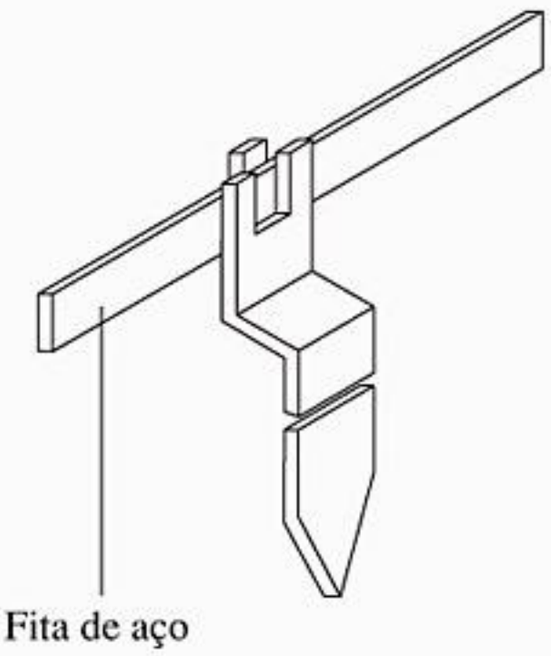


Figura B.4 ■ Suporte do eletrodo de fundação

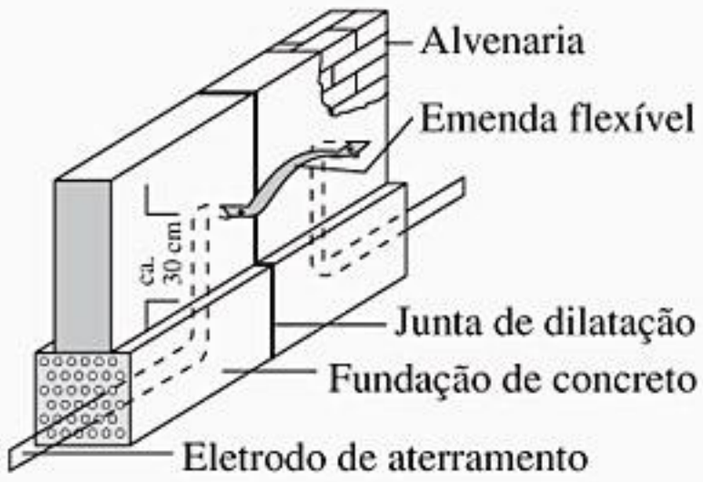


Figura B.5 ▪ Emenda externa do eletrodo nas juntas de dilatação

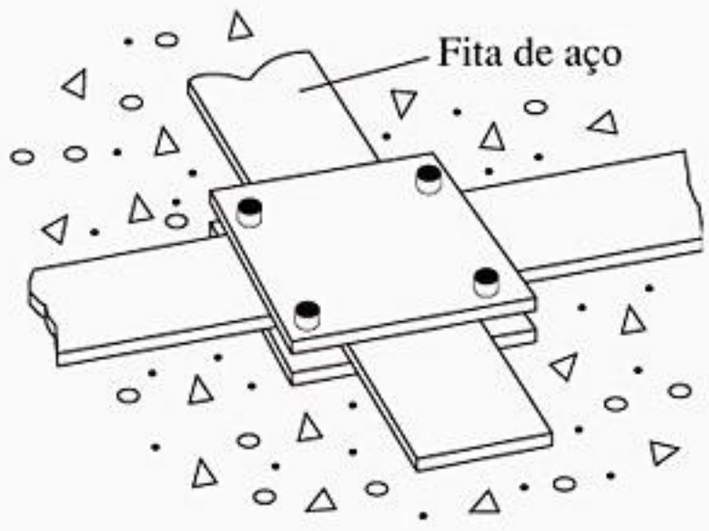
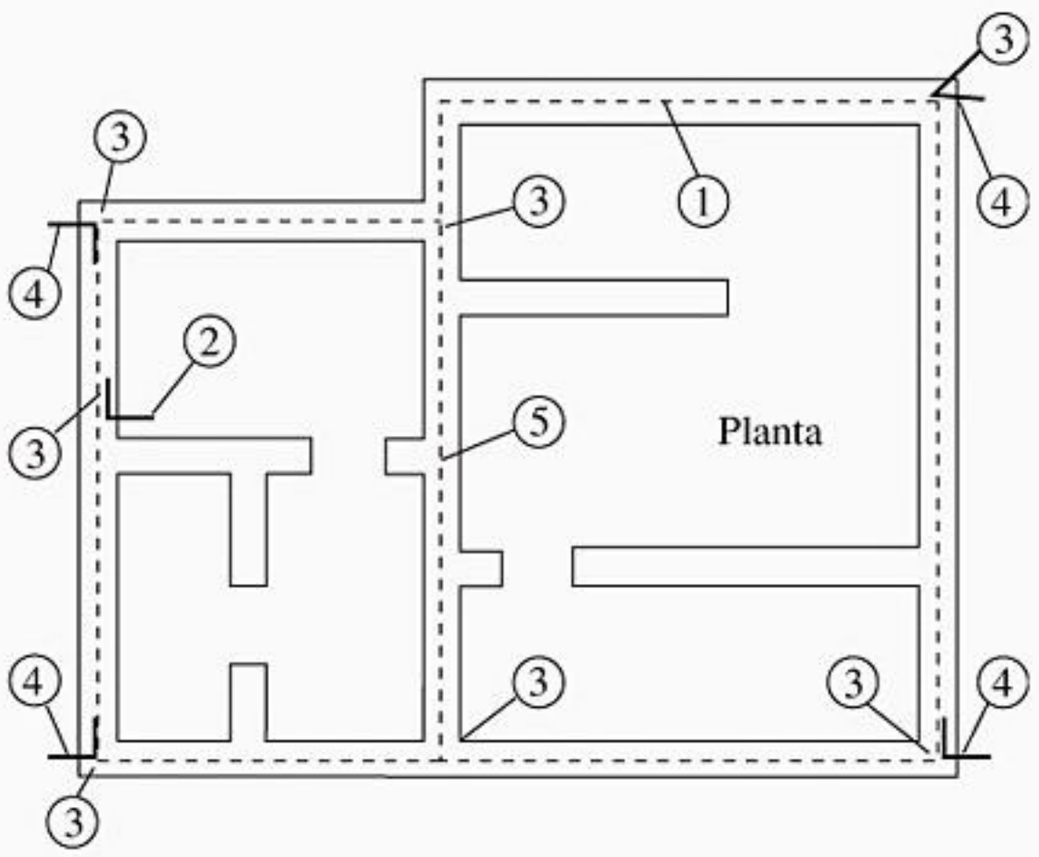


Figura B.6 ▪ Conexão aparafusada embutida no concreto



Legenda:
1 - Fita de aço
2 - Terminal interno
3 - Conexões embutidas
4 - Terminais para as descidas dos pára-raios
5 - Ligação transversal

Figura B.7 ▪ Infra-estrutura de aterramento da edificação

(i) O eletrodo de fundação poderá ser provido de outros terminais que afloram *externamente* ao prédio, destinados a receber as descidas dos pára-raios (Figura B.7). Aqui se aplicam, também, as prescrições da norma NBR 5419.

B.2 Aterramento do SPDA

Quando o eletrodo de fundação for utilizado também para aterramento do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), a norma alemã prescreve liga-

ções no sentido transversal, através das fundações, de modo que o reticulado interno não exceda 20 × 20 m (Figura B.7). Em galpões industriais onde houver pilares internos, estes podem eventualmente funcionar como condutores de descida das correntes dos raios. Nesses casos, é necessário que os pilares internos sejam interligados com o eletrodo de fundação instalado no perímetro do prédio. O projeto deve contemplar os requisitos de segurança específicos para a equalização de potencial no solo.

B.3 Compatibilidade eletromagnética

Com a disseminação das instalações e equipamentos de tecnologia da informação (TI), as medidas de compatibilidade eletromagnética tornaram-se mais rigorosas. Nos locais com uso extensivo de TI, recomendam-se malhas de aterramento com módulos de no máximo 5 x 5 m ligados às armaduras da fundação [4]. Nesses locais, dois outros requisitos são relevantes: a eqüipotencialização dita funcional, tratada na seção 6.4.5 da NBR 5410, e o aterramento do neutro num único ponto (quando existem mais de um transformador ou fonte de segurança), com o fim de evitar perturbações eletromagnéticas causadas pela circulação de correntes de retorno no sistema de aterramento.

B.4 Resistência de aterramento

Medições relatadas por Wiesinger e Hasse, pesquisadores alemães muito atuantes nos fóruns de normalização internacional, demonstram que a resistividade do solo (ρ), até uma profundidade de 1,5 m, sofre variações sazonais da ordem de 60% (+/− 30% em torno de um valor médio), verificando-se o valor máximo no inverno e o mínimo no verão, devido às variações climáticas. Nas profundidades maiores que 1,5 m, essa variação pode diminuir para 20%. Em ambos os casos, entende-se excluída a influência das chuvas.

O elemento metálico do eletrodo de fundação não se acha em contato direto com a terra, mas por meio da camada de concreto que o envolve. Uma vez que o concreto conserva calor e certo teor de umidade, a resistência de aterramento (RA) de um eletrodo de fundação resulta mais estável que a de qualquer outro tipo de eletrodo. Na prática, essa resistência situa-se entre 1 e 10 Ω, sendo de 2 a 6 Ω para edificações habitacionais unifamiliares típicas, conforme a resistividade do solo, as características do concreto e as condições de temperatura e umidade.

Eletrodos de fundação naturais em edifícios de múltiplos pavimentos e análogos, providos de fundações de concreto armado extensas, em geral construídas sobre estacas profundas, tendem a apresentar resistências de aterramento extremamente baixas.

Para determinar o valor de R_A, pode-se adotar a equação simplificada da resistência de aterramento de um anel não-circular:

$$R_A = \frac{2\rho}{3D}$$

onde:

- R_A = resistência de aterramento do eletrodo (Ω);
- ρ = resistividade do solo (Ω.m);
- $D = \sqrt{\left(\frac{A \cdot 4}{\pi}\right)} = 1{,}13\sqrt{A}$;
- A = área circunscrita pelo anel (m^2).

A partir de medições realizadas em eletrodos instalados, a Associação das Concessionárias Alemãs de Energia Elétrica (VDEW) demonstra que esse método é suficientemente exato. Já outros autores sugerem uma fórmula específica:

$$R_A = \frac{\rho}{1{,}57\,\pi\sqrt[3]{V}}$$

na qual V é o volume das fundações de concreto.

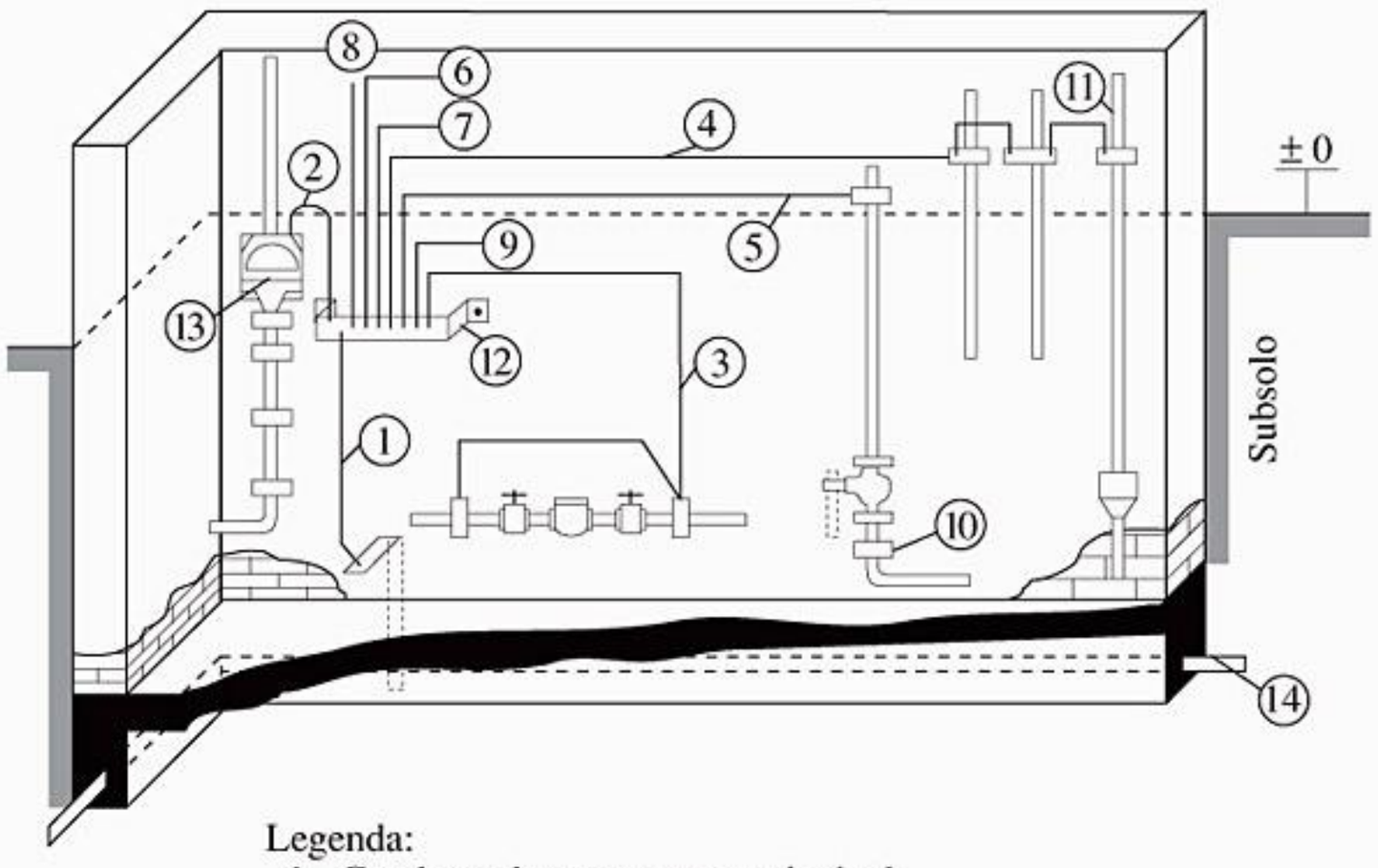
A NBR 5419 assim se refere à resistência de aterramento:

5.1.3.1.2 – Para assegurar a dispersão da corrente de descarga atmosférica na terra sem causar sobretensões perigosas, o arranjo e as dimensões do subsistema de aterramento são mais importantes que o próprio valor da resistência de aterramento. Para o caso de eletrodos não naturais, recomenda-se uma resistência de aproximadamente 10 Ω, como forma de reduzir os gradientes de potencial no solo e a probabilidade de centelhamento perigoso.

Como se observa, quando se utilizam eletrodos naturais (de fundação) a NBR 5419 não se preocupa em fixar um valor específico de resistência de aterramento. Outros requisitos para eletrodos naturais são definidos em 5.1.3.3 da norma. Sabe-se ainda que, devido à topologia dos eletrodos de fundação, sua impedância de surto Z_i, isto é, sua impedância perante um impulso de corrente, como nas descargas atmosféricas, pode ser considerada menor que a resistência de aterramento R_A.

B.5 Barramento de eqüipotencialização principal (BEP)

Um requisito fundamental das normas NBR 5410 e DIN VDE 0100, diretamente vinculado à questão do aterramento, é a equalização de potencial. Em cada edificação, um ou mais condutores de eqüipotencialização principal devem reunir os seguintes elementos:



Legenda:
1 - Condutor de aterramento principal
2 - Condutor de proteção principal (PEN)
3 - Canalização de água
4 - Canalização de aquecimento central
5 - Canalização de gás
6 - Ao eletrodo de aterramento da antena
7 - À instalação de telecomunicação
8 - Ao eletrodo de aterramento do pára-raios
9 - Reserva
10 - Luva isolante interposta na canalização de gás
11 - Canalização de esgoto, quando metálica
12 - Barra de ligação eqüipotencial principal
13 - Mufla do cabo de entrada de baixa tensão
14 - Eletrodo de aterramento nas fundações

Figura B.8 ■ Eqüipotencialização principal (ver Anexo G da NBR 5410)

- As armaduras de concreto armado e outras estruturas metálicas da edificação.
- As tubulações metálicas de água, de gás combustível, de esgoto, de sistemas de ar-condicionado, de gases industriais, de ar comprimido, de vapor etc., bem como os elementos estruturais metálicos a elas associados.
- Os condutos metálicos das linhas de energia e de sinal que entram e/ou saem da edificação.
- As blindagens, armações, coberturas ou capas metálicas de cabos das linhas de energia e de sinal que entram e/ou saem da edificação.
- Os condutores de proteção das linhas de energia e de sinal que entram e/ou saem da edificação.
- Os condutores de interligação provenientes de outros eletrodos de aterramento porventura existentes ou previstos no entorno da edificação.
- Os condutores de interligação provenientes de eletrodos de aterramento de edificações vizinhas, nos casos em que esta interligação for necessária ou recomendável.
- O condutor neutro da alimentação elétrica, salvo se não existente ou se a edificação precisar ser alimentada, por qualquer motivo, em esquema TT ou IT.
- O(s) condutor(es) de proteção principal(is) da instalação elétrica (interna) da edificação.

Atestando a importância da eqüipotencialização como medida de segurança, observa-se que, já na década de 1980, idênticos requisitos constavam das normas NFPA-78 (Estados Unidos), BS-6651 (Grã-Bretanha), UTE C17-100 (França), VDE 0100 (Alemanha) e no projeto IEC 81(CO)6, que deu origem à revisão da NBR 5419 na época.

O objetivo da eqüipotencialização é evitar tensões de contato perigosas em caso de faltas fase-massa internas ou externas à edificação (transferência de potencial). Analogamente, a eqüipotencialização contra descargas atmosféricas (*Blitzschutz-Potentialausgleich*, da norma DIN VDE) visa evitar centelhamentos perigosos causados pelos raios. A proteção adicional contra sobretensões transitórias deve ser provida por dispositivos de proteção contra surtos (DPS); uma abordagem

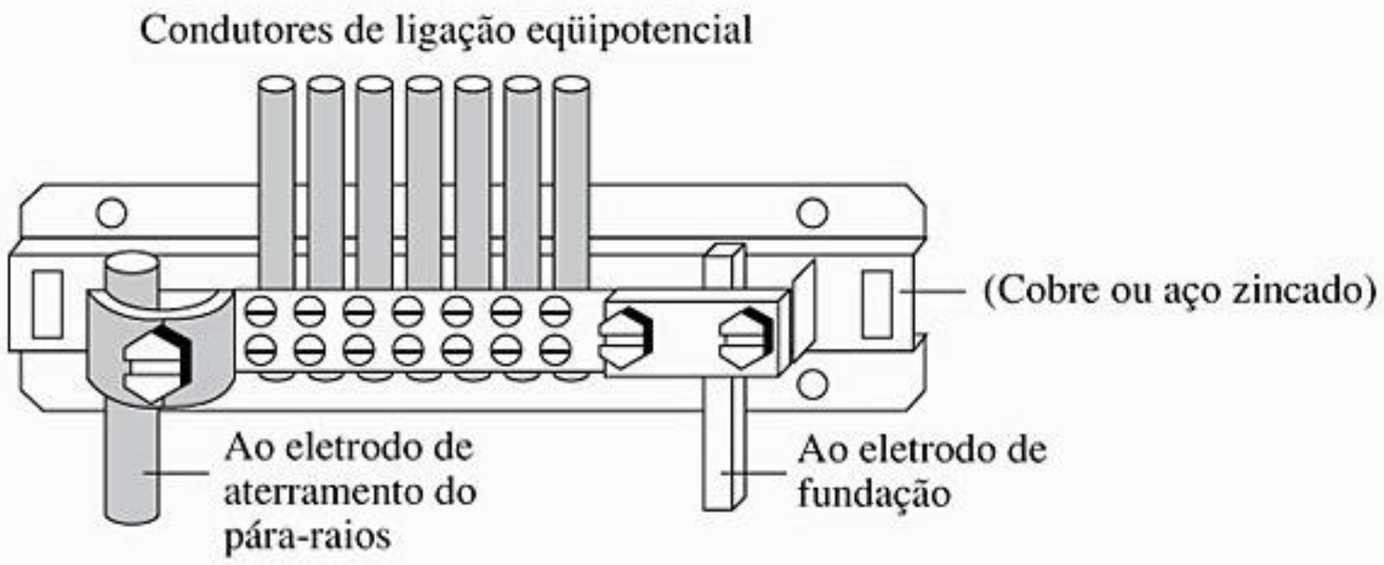


Figura B.9 ■ Barramento de eqüipotencialização principal (BEP)

minuciosa desse conceito encontra-se no Capítulo 12. No âmbito internacional, este tópico é tratado pela norma IEC 62305:2006 – Parte 4.

Em instalações industriais, a eqüipotencialização principal de uma área pode ser realizada no barramento PE do quadro geral de baixa tensão da respectiva subestação transformadora. Já para locais de habitação, o arranjo físico recomendado é mostrado na Figura B.8, associado a um eletrodo de fundação. Essa figura, extraída originalmente da norma alemã, foi de certa forma precursora do atual Anexo G da NBR 5410.

O barramento BEP padronizado, reproduzido na Figura B.9, é de cobre com seção de 25 mm² ou de aço zincado a fogo com seção equivalente, e dispõe no mínimo dos seguintes terminais:

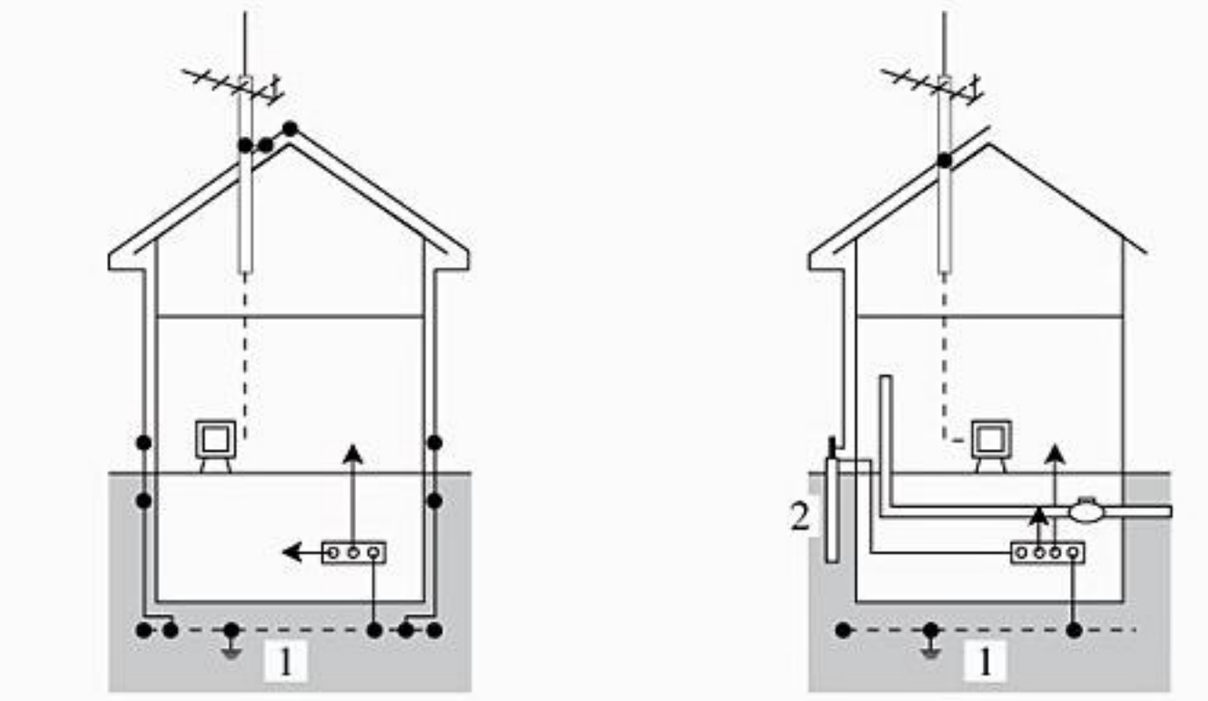
- 1 de 30 × 4 mm ou Φ 10 mm.
- 1 de 50 mm².
- 6 de 6 a 25 mm².
- 1 de 2,5 a 6 mm².

Os condutores de eqüipotencialização são conectados às tubulações em pontos acessíveis e identificados, mediante braçadeiras metálicas duplas (com dois parafusos M6) ou simples (um parafuso M10), protegidas contra danos mecânicos, térmicos e químicos. Conexões subterrâneas ou em atmosferas agressivas podem ser protegidas com luvas termocontráteis conforme DIN 30672.

B.6 Aterramento de antenas externas

A Figura B.8 indica que está prevista a eqüipotencialização com o eletrodo de aterramento da antena (posição nº 6 na legenda). De fato, o mastro de uma antena externa de TV instalado sobre uma estrutura deve ser aterrado conforme prescreve a NBR 5419, Anexo A, seção A.3.1. A norma admite duas alternativas:

- O mastro da antena deve ser interligado ao SPDA com solda exotérmica ou braçadeira com dois parafusos M8 (uma interligação curta e retilínea, para obter baixa indutância).
- Se não houver SPDA, a antena deve possuir um condutor de aterramento exclusivo, de seção não inferior a 16 mm² em cobre, ligado a um eletrodo de aterramento.



(a) Mastro da antena ligado ao condutor de descida do pára-raios

(b) Condutor de aterramento exclusivo para a antena

Figura B.10 ■ Aterramento de antenas: (a) eletrodo de fundação; (b) eletrodo da antena

A Figura B.10 mostra que os condutores de aterramento de antenas e/ou de pára-raios devem ser ligados, externamente à edificação, ao respectivo eletrodo; internamente à edificação, o eletrodo é conectado ao barramento de eqüipotencialização principal. O objetivo é garantir que o escoamento da corrente de descarga atmosférica para a terra não seja feito através do BEP, e sim diretamente no eletrodo.

Tanto a norma brasileira (NBR 5419:2005) quanto a alemã (DIN EN 62305:2006) — esta última já harmonizada com a série IEC 62305:2006 — admitem, sob condições específicas, que as armaduras dos pilares de concreto armado sejam utilizadas como condutores naturais de descida das correntes de descarga atmosférica. Isso também se aplica ao mastro da antena, que, nesse caso, deve ser conectado à armadura dos pilares, de acordo com a norma.

Quando uma edificação estiver dispensada da instalação de pára-raios, mas possuir antena externa, o aterramento desta será apenas uma medida preventiva. Não significa, evidentemente, que uma antena possa substituir o pára-raio quando a norma indicar que ele é necessário.

B.7 Conclusão

Em suma, os eletrodos de aterramento embutidos nas fundações impõem-se pelas seguintes características:

- Asseguram baixos valores de resistência de aterramento, praticamente imunes às alterações climáticas.
- O anel embutido no concreto (assim como as armaduras) fica protegido contra danos mecânicos e corrosão, e tem vida útil compatível com a das edificações.
- Sua topologia é ideal para a eqüipotencialização dos sistemas elétricos, eletrônicos e de proteção contra descargas atmosféricas.

Sob a ótica da segurança das pessoas contra tensões de contato perigosas, bem como contra centelhamentos perigosos na ocorrência de descargas atmosféricas, a unificação dos aterramentos e a convergência de todas as massas e elementos condutivos para um sistema de eqüipotencialização constituem uma medida de proteção eficaz, da qual se beneficiam também os equipamentos eletrônicos e de tecnologia da informação.



Índice remissivo

A

Acessórios para linha elétrica com eletroduto, 184
Admitância em paralelo, 34
Agrupamento, fatores de, 292, 398
  omissão dos, 292-295
Alimentação
  diretamente em baixa tensão, 8
  em alta tensão, 8- 9
Alma, 134
Análise
  da corrente de curto-circuito, 316
  de um circuito, 59
  inicial, 126
Aparelho
  de iluminação, 3
  elétrico, 3
  eletrodoméstico, 3
  eletroprofisisonal, 3
Aparelhos
  de descarga, 11
  de iluminação, 11
  incandescentes, 11
Aplicação
  dos dispositivos DR, 261-268
    esquema TT, 261-266
    esquema TN, 266-267
    esquema IT, 267-268
  dos esquemas de aterramento, 258
  prática da condição de proteção, Aplicação, 244
Aplicações
  de circuito simétrico, 51-52
Aquecimento
  adiabático, 305
  dos condutores e queda de tensão, 281-314
Arruela, 182
Aspectos gerais das linhas, 171-173
Aterramento
  aplicação dos esquemas de, 258
  aspectos fundamentais para a escolha do, 258
  condutor de, 88
  condutores de, 270
  de instalações alimentadas por rede de distribuição, 259-261
  de pára-raios e antenas, 93
  de proteção, 79, 88, 90,
  de subestações de transformação, 258
    de proteção, 258
    (funcional) do neutro, 258
    de proteção da instalação de baixa tensão, 258
  eletrodo de, 79, 80-88
  escolha do esquema de, 258
  esquemas de, 90, 258
  funcional, 79-90
  por rede pública em baixa tensão, 258
  principal, 88
  resistência de, 80, 88
Aterramentos, 78-93
  básicos, 91
  de proteção, 235
Atuação da proteção, 384
Ausência de escoamento, 152

B

baixa tensão, Instalação de, 8
Banco
  automático de capacitores, 428
  de capacitores, 422
Bandeja, 168
Barra, 133
Barramento, 133
  blindado, 133
Blindagem
  sobre a isolação, 154
  sobre o condutor, 154
Blindagens, 154-155
Bloco alveolado, 169
Bobina magnetizante, 208,
Bom comportamento ao fogo, 152
Borracha etileno-propileno, 153
Box, 182
Braçadeira, 182
Bucha, 182

C

Cabo, 134
  a gás, 137

a óleo fluido, 137
com propagação reduzida da chama, 161
composição e forma do, 164
concêntrico, 137
cordão, 137
propagador da chama, 161
multiplexado, 137
revestido, 136
Cabos
a óleo fluído, 137
a óleo sob pressão, 152
armação de um, 137
com baixa emissão de fumaça e de gases tóxicos e corrosivos, 162,
com massa não escoante, 152
de baixa tensão, 152
de controle, 136
de potência, 136
aplicação dos, em instalações de baixa tensão, 138
em condições de fogo e incêndio, Comportamento dos, 161-162
em papel, 155
escada ou leito para, 169
para circuitos de segurança, 162
prateleira para, 170
resistentes à chama, 162
secos, 137, 155
sob pressão, 137
suportes horizontais para, 170
uni e multipolares, 137, 230
acolchoamento, 137
enchimento, 137
Caixa de derivação, 169, 185
Caixa moldada
disjuntores em, 206, 212-214
disjuntores termomagnéticos em, 207
Cálculo de correntes de falta, 315-334
presumidas, 324-325
Cálculos
de queda de tensão, 307
práticos de circuitos, 36-41
preliminares de potências e correntes,
simplificados, 328-331
Caldeiras elétricas, 11
Calha ou eletrocalha, 169
Calor, dissipação de, 300
Câmera de extinção, 205-206
Canaleta, 169
Capacidade
de condução de corrente, 139, 283, 286-296
fatores de agrupamento, 292
número de condutores carregados, 287
omissão dos fatores de agrupamento, 292
resistividade térmica do solo, 292
temperatura ambiente, 286
de estabelecimento, 193
em curto-circuito, 193
de interrupção, 193
em curto-circuito, 193
térmica, 301
Capacidades de condução de corrente, 286-295
Capacitância nominal, 426
Capacitor
capacitância nominal do, 426
corrente do, 425
corrente nominal do, 426
potência nominal do, 426
tensão nominal do, 426
Capacitores, 425
banco automático de, 428
bancos de, 422
constituição dos, 427
banco fixo, 427
banco semi-automático, 428
banco automático, 428
compensação estática de energia reativa ou compensação de energia reativa em tempo real, 428
de potência, 425
localização dos, 425
no quadro de distribuição principal, 425
no lado da média ou alta tensão, 427
Características
básicas dos fusíveis, 203
de corte, 195
nominais, 13
tempo-corrente, 195
Caracterização das sobrecorrentes, 335-336
Carga
elétrica, 4, 30
fator de, 107
genérica,
trifásica, 35
Cargas
elétricas genéricas, 32
industriais e similares, 13, 387
indutivas, 429
ligadas em Y e D, 46-49
lineares, 4, 421
não-lineares, 4, 421
residenciais e comerciais, 13, 387
Cartuchos tipo industrial, 198
Chave, 191
compensadora, 389
de faca, 191
eletromagnética, 191
estrela-triângulo, 389
estrela-triângulo e compensadoras automáticas, 391
de partida, 191
Choque elétrico, 7
contatos diretos, 7
contatos indiretos, 7
Choques elétricos, 175,
Ciclo de operação, 189
Circuito
auxiliar, 189
com carga concentrada na extremidade, 36
comutador de sensibilidade, 217
de distribuição, 206
de prova, 217
elétrico, 1
magnético, 208
monofásico, 2
polifásico, 2
terminal, 362
trifásico, 31
equilibrado, 37
Circuitos, 14-17
com carga distribuída, 37-41