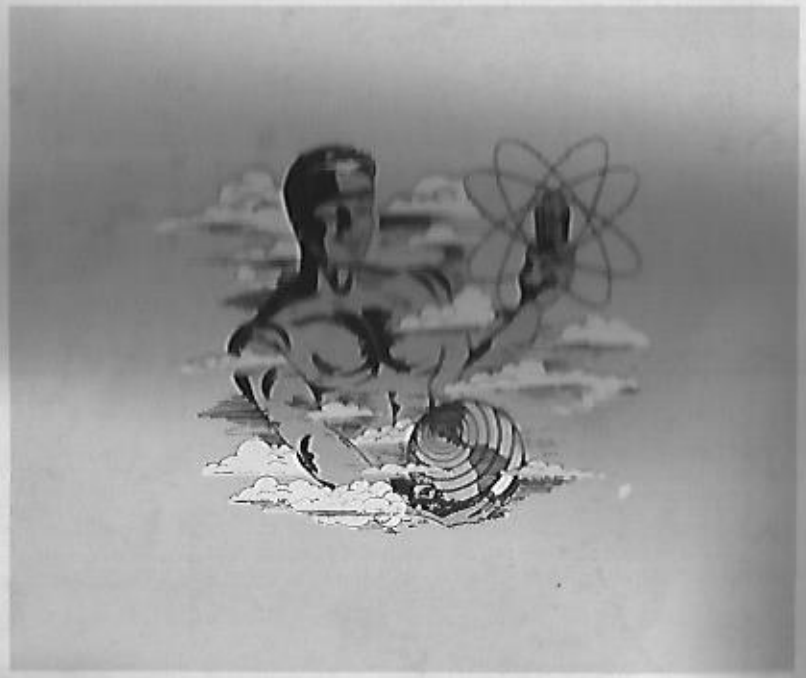


Printed in Brazil
Impresso no Brasil

OCCIDENTAL SCHOOLS
ESCOLA DEDICADA EXCLUSIVAMENTE AO ENSINO ESPECIALIZADO DE ELETRÔNICA — RÁDIO — TELEVISÃO E SUAS RAMIFICAÇÕES
ESTABELECIDA EM 1947



C. Walsh, Diretor
RUA CAPITÃO SALOMÃO 59 - C.E.P. 01034 - SÃO PAULO - S.P. - BRASIL

LIÇÃO E-13
INDUTÂNCIA

Dizemos que um circuito elétrico tem indutância quando nele há um condutor ou uma bobina que tem a propriedade de induzir em suas próprias espiras (voltas) uma tensão, que é de polaridade oposta à tensão aplicada. Esta tensão induzida é devida à mudança da intensidade da corrente que passa pela bobina.

Embora a indutância seja uma propriedade característica das bobinas, também um pedaço de fio estirado pode apresentar certa indutância; contudo, ela é relativamente tão pequena que o fio terá que ser demasiadamente comprido, ou a frequência demasiadamente alta, para que a indutância se manifeste. Por esta razão, na maioria dos casos práticos consideraremos que somente as bobinas é que tem indutância, e frequentemente é substituído o nome de bobina pelo de *indutor*, já que esta é a principal característica das bobinas.

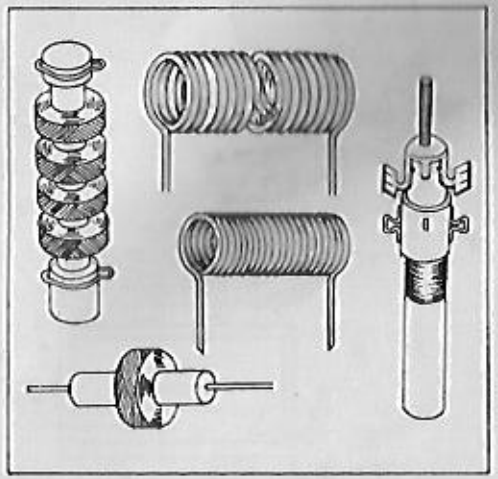


FIGURA 1
VÁRIOS TIPOS DE BOBINAS

Tendo apresentado uma idéia geral do significado de indutância, explicaremos em detalhes as razões pelas quais é possível produzir uma tensão induzida nas próprias espiras de uma bobina, quando a corrente que flui varia de intensidade. Além disso, explicaremos o efeito que a tensão induzida tem sobre as variações da corrente. Para isso, será necessário lembrar que, *quando as linhas de força de um campo magnético são cortadas por um condu*

fos, é induzida ou aparece no condutor uma tensão. Para obter esta tensão, tanto faz mover o condutor no campo magnético, como mover o campo magnético através do condutor.

Vejamos o que sucede numa bobina, quando começa a fluir uma corrente elétrica por ela. De acordo com o que explicamos anteriormente, o aluno se recorda que uma corrente elétrica é uma corrente (fluxo) de eletrons que pode ser comparada, na maior parte de seus aspectos, com uma corrente de água.

Portanto, se fizermos fluir uma corrente contínua (C.C.) por uma bobina, o que sucederá na bobina será algo similar ao que acontece quando fazemos passar uma corrente de água por uma serpentina, anteriormente vazia. Observaremos que a água não chegará imediatamente à outra extremidade da serpentina, porque irá avançando, volta por volta, até chegar ao fim da serpentina.

Na figura 2 mostramos que a mesma coisa sucede no caso de uma corrente elétrica, pois esta vai percorrendo volta (espira) por volta da bobina, até chegar à outra extremidade. Contudo, no caso da corrente elétrica, o tempo que leva a eletricidade para percorrer a bobina toda é bem menor que o da água na serpentina; contudo, sempre haverá certa diferença de tempo entre o instante em que a corrente percorre as primeiras espiras e o instante em que chega ao final da bobina.

Outro ponto importante que devemos ter presente é que em todo circuito eletrônico, mesmo que seja de corrente contínua, a corrente elétrica não alcança sua intensidade normal instantaneamente, transcorrendo sempre algum espaço de tempo entre o instante em que a corrente começa a fluir e o instante em que ela alcança sua intensidade normal. Isto pode ser comparado com a velocidade de funcionamento de um motor, pois sabemos que o motor só alcança sua velocidade normal instantes após ter sido ligado à linha de força. No caso do motor, este não alcança sua velocidade normal instantaneamente por causa da *inércia*, ou seja, a força que faz um corpo permanecer *em repouso* quando este está em repouso, ou mantê-lo em movimento quando ele está em movimento.

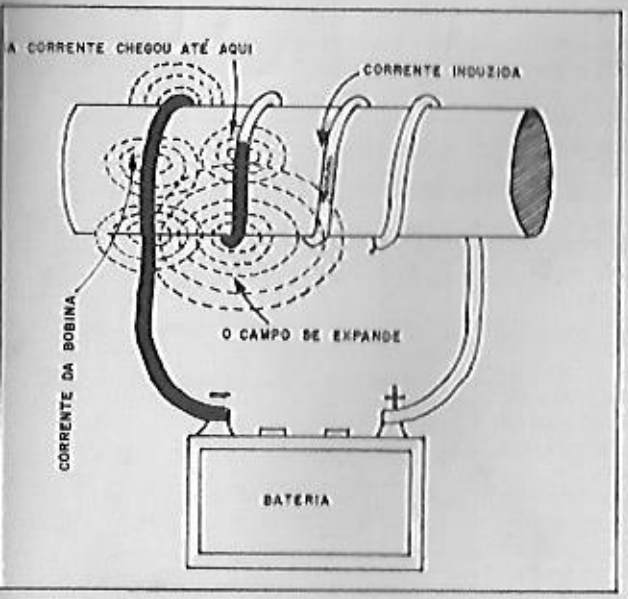


FIGURA 2
O CAMPO MAGNÉTICO SE EXPANDE QUANDO A CORRENTE ELÉTRICA COMEÇA A FLUIR

Quando se trata de um circuito elétrico, a corrente não alcança instantaneamente sua intensidade máxima devido à *indutância* do circuito; quanto maior for a indutância do circuito, maior será o tempo que a corrente levará para alcançar sua intensidade máxima (décimos ou milésimos de segundo). Em outras palavras, a indutância de um circuito é algo semelhante à inércia de um aparelho mecânico. Esta analogia será explicada mais detalhadamente no transcurso desta lição; por agora, continuaremos a estudar o que sucede na bobina quando a corrente elétrica começa a fluir por ela.

De acordo com a figura 2, e conforme os princípios explicados em lição anterior, sabemos que no mesmo instante em que a corrente começa a fluir, ela começa a formar campos magnéticos em redor das primeiras espiras da bobina; estes campos magneticos vão se expandindo à medida que aumenta a intensidade da corrente que flui pelas primeiras espiras.

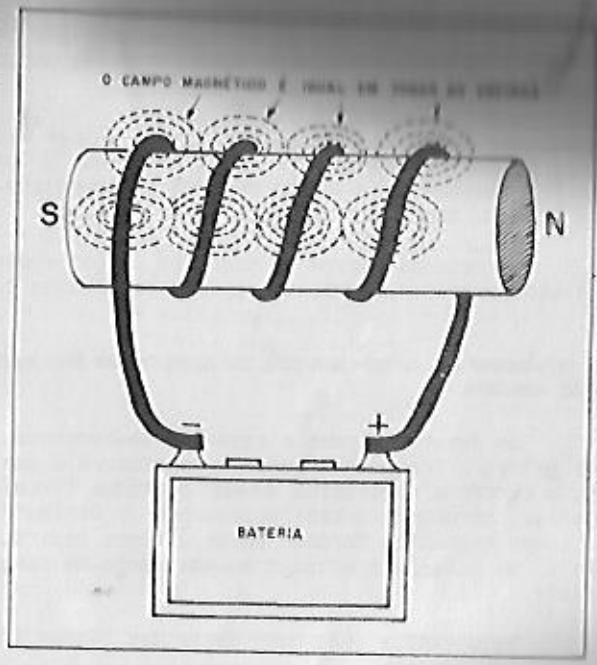


FIGURA 3
O CAMPO MAGNÉTICO PERMANECE ESTÁVEL POIS A CORRENTE É CONSTANTE

Estes campos magnéticos ao se *expandirem* começarão a invadir a região ocupada pelas espiras, através das quais ainda não circulou nenhuma corrente. Isto quer dizer que os campos magnéticos formados pelas primeiras espiras *irão cortar outras espiras da bobina*, pelas quais ainda não circulou nenhuma corrente, gerando, assim, uma tensão que é de polaridade oposta à aplicada pela fonte exterior (bateria). Esta tensão induzida produz uma corrente em *direção oposta* à corrente original, conforme mostra a figura 2, por meio da flecha ondulada.

A razão pela qual a tensão gerada por indução na mesma bobina é de polaridade oposta à tensão aplicada, é devido à direção do campo magnético formado pela corrente original. Este princípio é expresso pela *Lei de Lenz*, que diz que uma corrente elétrica induzida é sempre em tal direção a se opor à corrente ou à variação do campo magnético que a produz. Portanto, na figura 2 vemos que a corrente induzida se opõe à corrente original (voltagem da bateria).

Como indicamos anteriormente, a tensão gerada pelas linhas de força, ao cortarem as espiras da bobina, é de polaridade oposta à tensão aplicada originalmente, razão pela qual esta tensão induzida na mesma bobina se chama *força contraeletromotriz* (f.c.e.m.), porque ela se opõe à força que originalmente fez circular a corrente (neste caso, a tensão ou f.e.m. da bateria). Como esta tensão gerada é induzida na mesma bobina, este fenômeno é conhecido também pelo nome de *auto-indução* (indução na própria bobina) e é a característica de todo circuito que tem indutância.

À medida que a corrente avança pela bobina, até alcançar sua intensidade normal, ela terá que vencer não somente a resistência do circuito, como também a oposição que a tensão induzida apresenta à sua passagem. Esta oposição retarda um pouco o tempo necessário para que a corrente complete sua circulação pela bobina e possa alcançar sua intensidade normal. Contudo, como a f.c.e.m. é sempre muito menor que a tensão aplicada exteriormente (pela bateria), a tensão exterior vence finalmente a f.c.e.m., e a corrente alcança sua intensi

dade normal. Isto está ilustrado na figura 3, onde podemos ver que os campos magnéticos formados são agora iguais em todas as espiras da bobina, e que não tendem a se expandir ou a se contrair mais, porque não haverá mais corte de linhas de força e nem tensão induzida.

Sob estas condições, se a bobina ficar ligada indefinidamente, não acontecerá nada de anormal pois, durante todo o tempo que a circulação da corrente for constante, o campo magnético também será constante, ou seja, não haverá nenhuma contração ou expansão do mesmo.

No caso da figura 3, todos os campos individuais formados por cada espira são somados e, portanto, o campo magnético total é mais forte.

O FENÔMENO DA AUTO-INDUÇÃO SE REPETE AO SER ABERTO O CIRCUITO, PORÉM EM DIREÇÃO OPOSTA

Se interrompermos a passagem da corrente, abrindo o circuito da bateria, na primeira fração de segundo acontecerá o que ilustramos na figura 4, isto é, a corrente eletrônica ainda continua circulando pelas últimas espiras da bobina, porém sua intensidade tende a diminuir rapidamente; isto faz com que o campo magnético formado pelas últimas espiras tenda agora a se contrair, isto é, na *direção contrária* ao movimento do campo, quando a corrente começava a fluir.

Isto indica que o novo corte das linhas de força do campo magnético, que está se contraindo, gerará agora uma tensão induzida de polaridade oposta à voltagem induzida, quando a corrente começava a circular, ou seja, neste momento a tensão induzida é da mesma polaridade que a tensão que a bateria havia aplicado à bobina; isto indica que a tensão induzida agora tende a manter a circulação da corrente quando a tensão original desaparecer. Isto acontece numa pequena fração de segundo porque, à medida que o campo se contrai mais e mais, há menos tensão induzida, até que o campo magnético e a tensão induzida desaparecem por completo.

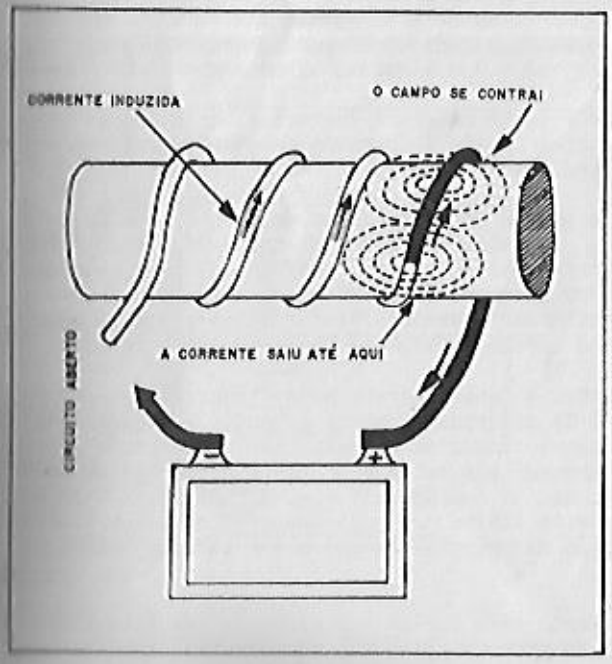


FIGURA 4
QUANDO O CIRCUITO SE ABRE, O CAMPO MAGNÉTICO SE CONTRAI E É INDUZIDA UMA TENSÃO QUE TENDE A MANTER A CORRENTE FLUINDO

Na figura 5 ilustramos a maneira de efetuar uma experiência, por meio da qual é possível comprovar praticamente o fenômeno descrito até agora. Para isso, utiliza-se uma bobina formada por 75 espiras de fio de Cobre, enroladas num núcleo de Ferro, sendo a bobina ligada a uma bateria, conforme ilustra a figura 5. Ao interromper o circuito, notaremos que soltará uma faísca mais forte, quando houver a ligação da bobina à bateria. Isto sucede porque a corrente inicial é muito baixa, devido à oposição que a força contraeletromotriz, produzida pela auto-indução, apresenta ao aumento da corrente. Quando a bobina é desligada, a auto-indução é em sentido oposto, de modo que a forte faísca que se forma é devida à tensão induzida na bobina ser muito forte, quando a intensidade do campo começa a se contrair. Em outras palavras, a faísca produzida é devida à auto-indução na bobina.

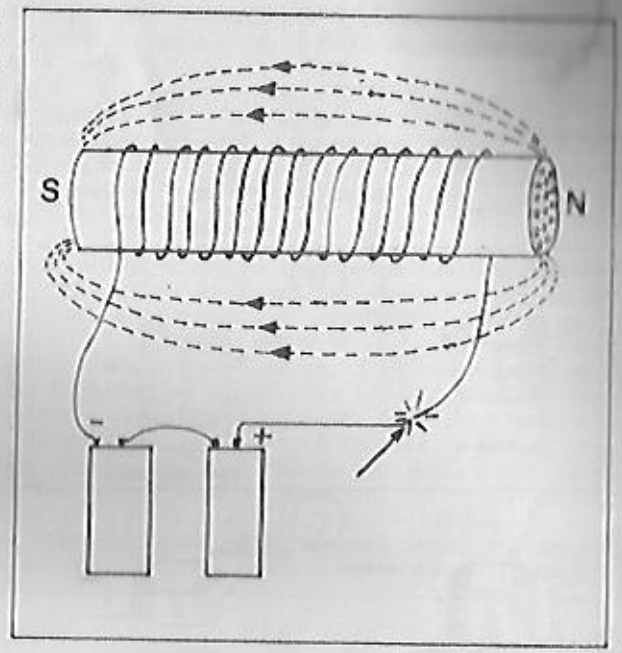


FIGURA 5
EXPERIÊNCIA DE AUTO-INDUÇÃO

Explicando este fenomeno sob outro ponto de vista, podemos considerar que, no momento em que ligamos uma bobina à bateria, parte da energia elétrica está sendo usada não somente para vencer a resistência do fio, mas também para formar um campo magnético ao redor da bobina; por esta razão, transcorrem *frações de segundos* antes que a corrente alcance seu valor normal. Por outro lado, quando desaparece a energia original da bateria aplicada à bobina, o campo magnético, que havia se formado originalmente, produz uma tensão que é devolvida ao circuito, na forma de uma faísca entre os contatos, quando abrimos o circuito da bateria.

Relacionando estas explicações com o fenômeno mecânico da inércia, o aluno poderá deduzir com mais clareza porque a indutância de uma bobina pode ser comparada com a inércia de um aparelho mecânico, pois a indutância *se opõe a qualquer variação de intensidade* da corrente, na sua passagem pelo condutor, enquanto que a inércia de uma bola, roda ou um objeto em movimento, se opõe a que o objeto aumente ou diminua de velocidade.

Resumindo, podemos dizer que a *indutância* é a característica que tem uma bobina de produzir uma f.c.e.m., toda vez que a corrente que passa por ela *varia de intensidade*. Além disso, podemos dizer que são chamados *circuitos indutivos* todos os circuitos que têm indutância. A indutância de uma bobina é representada pela letra "L", nas fórmulas e nos diagramas esquemáticos dos circuitos eletrônicos.

FATORES QUE DETERMINAM A INDUTÂNCIA DE UM CIRCUITO

A indutância de um circuito depende de vários fatores, dos quais os principais são: o número total de espiras da bobina, a relutância do circuito magnético (núcleo), o diâmetro da bobina, o calibre (grossura) do fio, o espaçamento entre as espiras, etc. Por exemplo, se uma bobina tem mais espiras que

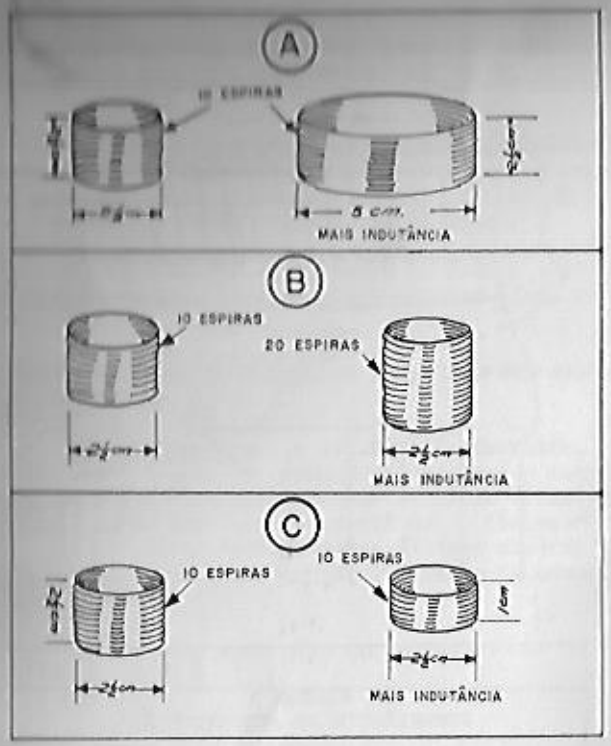


FIGURA 6
FATORES QUE AFETAM A INDUTÂNCIA DE UMA BOBINA

outra, ela terá mais indutância, porque produzirá tensões induzidas de maior intensidade e, portanto, a força contraeletromotriz induzida será também maior.

A relutância do circuito magnético depende do material utilizado no núcleo da bobina pois, se usarmos um núcleo de Ferro em lugar de um núcleo de ar, o campo magnético será maior, porque o Ferro tem menor relutância que o ar e, como resultado, as tensões induzidas serão maiores.

Se tivermos duas bobinas com igual diâmetro e o mesmo número de espiras, a que tiver o núcleo de Ferro terá muito maior indutância.

O diâmetro da bobina afeta a indutância, pois com maior diâmetro o condutor será mais comprido e, portanto, a indução será maior. Por isso, quanto maior for o diâmetro da bobina, maior será também sua indutância.

Além disso, quanto mais compacto for o enrolamento da bobina (utilizando fio muito fino, e portanto mais espiras), maior será sua indutância porque o campo magnético estará mais concentrado e, consequentemente, a tensão induzida será maior.

Na figura 6 mostramos o efeito das dimensões de uma bobina sobre sua indutância. Observe que, das duas bobinas com igual número de espiras (figura 6A), terá maior indutância a que tiver maior diâmetro. Se aumentarmos o número de espiras (figura 6B), a indutância aumenta, apesar de conservarmos o diâmetro igual para as duas. Na figura 6C mostramos o mesmo diâmetro, o mesmo número de espiras, mas com enrolamento mais compacto; vemos que o campo magnético produzido pela bobina da direita será mais concentrado, ou seja, produzirá maior número de linhas de força por centímetro quadrado.

UNIDADE DE INDUTÂNCIA

A propriedade de um circuito de se opor a qualquer mudança no fluxo da corrente que flui por ele se chama indutância. Portanto, pelas explicações dadas até agora, deduzimos que a indutância é um fator muito importante em todos os circuitos eletrônicos, onde a corrente elétrica varia continuamente de intensidade. Para expressar a grandeza da indutância de uma bobina empregamos o *HENRY*. Esta *unidade de indutância* é abreviada pela letra "H".

O *henry* pode ser definido como sendo a indutância presente num circuito, quando uma corrente, que varia de intensidade à razão de 1 ampère por segundo induz ao circuito uma f.e.m. de 1 volt.

Algumas bobinas usadas em rádio, especialmente as que não têm núcleo de Ferro, tem uma indutância tão pequena que o henry se torna uma unidade demasiadamente grande para expressá-la; neste caso, utilizamos os submúltiplos: *milihenry* e o *microhenry*. Um milihenry equivale à milésima parte de um henry, e o microhenry à milionésima parte de um henry.

Como dissemos anteriormente, a indutância de uma bobina aumenta consideravelmente se lhe acrescentarmos um núcleo de Ferro; por isso, no caso de desejarmos bobinas de *pouca indutância*, utilizaremos *bobinas com núcleo de ar*.

Na figura 7 mostramos vários tipos destas bobinas utilizadas em rádio. Como podemos observar, estas são formadas por espiras de fio enroladas em formas isolantes, sem nenhuma substância magnética no núcleo. Outras bobinas, como as utilizadas em aparelhos transmissores, não são enroladas em forma, sendo suas espiras sustentadas por lâminas de baquelite ou qualquer outra substância isolante. Como estas bobinas são utilizadas geralmente em circuitos onde a frequência da corrente elétrica é sumamente alta, como as frequências correspondentes às ondas de rádio, elas são comumente chamadas de bobinas de *radiofrequência* (R.F.) ou reatores de R.F.; seu símbolo corresponde a uma espiral e geralmente tem a indutância expressa em milihenrys ou microhenrys.

Contudo, cabe-nos indicar aqui que também existem bobinas de R.F. que, apesar de não possuírem núcleo de Ferro, têm no centro um cilindro de um material composto de Ferro pulverizado comprimido sob alta pressão. Este tipo de bobina é conhecido pelo nome de *bobina de sintonia por permeabilidade*, e seu *núcleo é comumente chamado de núcleo de ferrite*. Seus princípios serão explicados em outras lições deste Curso. A esquerda da figura 7 mostramos um destes tipos de bobina e seu respectivo símbolo.

Na figura 8 vemos outro tipo de bobina de núcleo de Ferro, formada por várias camadas de fio enroladas numa base isoladora, e com papel isolante entre cada ca-

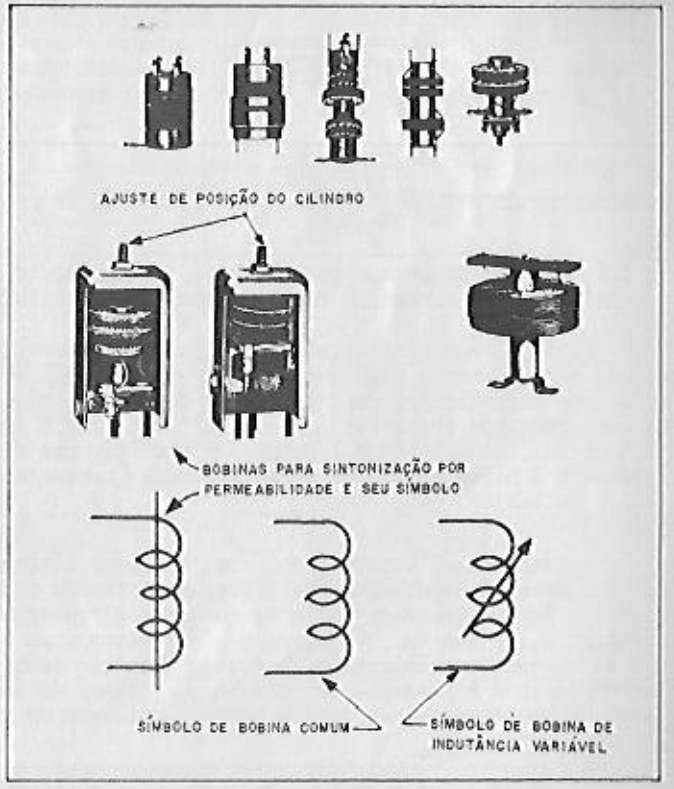


FIGURA 7
VÁRIAS BOBINAS DE RADIOFREQUÊNCIA E SEU SÍMBOLO

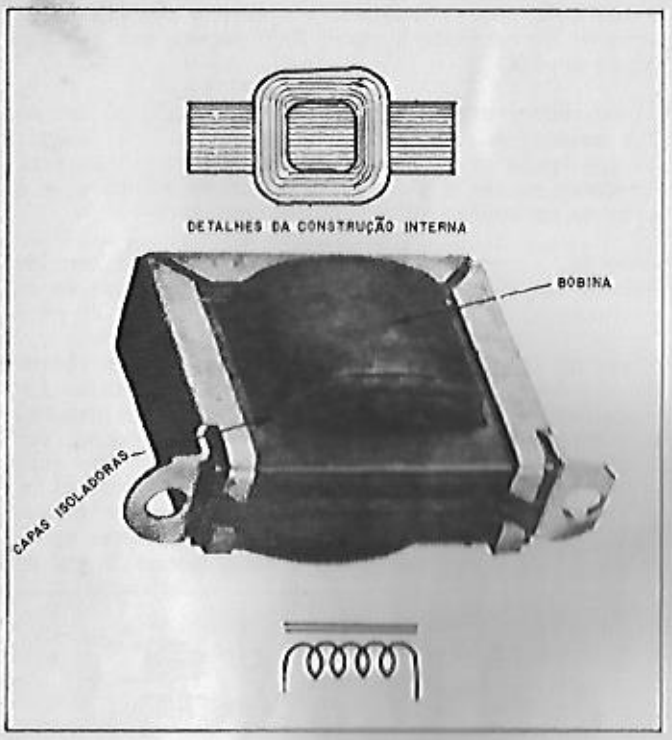


FIGURA 8
DETALHES DE CONSTRUÇÃO E SÍMBOLO DE UM REATOR DE FILTRO

mada. A indutância deste tipo de bobina está geralmente compreendida entre 10 e 50 henrys; este tipo de bobina recebe o nome de reator de filtro, geralmente utilizado para dar passagem à Corrente Contínua e oferecer alta impedância à Corrente Alternada.

EFEITO DA INDUTÂNCIA NUM CIRCUITO DE C.A.

Até o momento só explicamos o efeito da indutância num circuito de Corrente Contínua (C.C.), do qual deduzimos que a indutância só se manifesta nestes circuitos no momento que a corrente começa a fluir, ou no momento em que ela é interrompida, pois são as únicas ocasiões em que a corrente varia de intensidade. Por este motivo, os efeitos de indutância no circuito de C.C. não são de grande importância, porque nestes circuitos a corrente se mantém constante durante o funcionamento do circuito.

Contudo, nos circuitos de corrente alternada, onde a corrente está variando continuamente de intensidade e direção, os efeitos de indutância são de grande importância. Nos circuitos de C.A. a indutância é sempre considerada como um fator primordial e de maior importância que a resistência da bobina, já que, na maioria dos casos, a oposição que a indutância de uma bobina apresenta à passagem da corrente alternada é centenas de vezes maior que a resistência da bobina.

Vejamos o que sucede quando uma corrente alternada passa por uma bobina de considerável indutância. Na figura 9 mostramos por etapas o que sucede nos diversos instantes de um ciclo da corrente alternada, quando esta corrente é aplicada a uma bobina. A figura 9A corresponde ao instante do ciclo em que não há nenhuma tensão gerada, porque a posição instantânea que ocupa o condutor do gerador é paralela em relação às linhas de força. Por isso, neste instante, o amperímetro não indica nenhuma passagem de corrente.

Contudo, tão logo a tensão do gerador comece a aparecer, é produzida uma passagem de corrente através da bobina, com o correspondente desenvolvimento da f.c.e.m., que tende a se opor à corrente produzida pela tensão do gerador de eletricidade.

Não obstante, como a voltagem aplicada pelo gerador é sempre maior que a voltagem da f.c.e.m., a voltagem aplicada pelo gerador vence a resistência que a f.c.e.m. lhe apresenta, e se estabelece um campo magnético com a polaridade indicada na figura 9B. Neste instante, a tensão do gerador é máxima, razão pela qual a intensidade do campo magnético é também máxima.

Logo em seguida, a tensão do gerador de C.A. começa a diminuir e, por este motivo, também a corrente tende a diminuir; contudo, desta vez, a f.c.e.m. tende a se opor a esta diminuição de corrente, retornando ao circuito a energia magnética do campo que havia sido criada em forma de tensão induzida. Quando a tensão do gerador baixa a zero, a f.c.e.m. também desaparece e, neste instante, não existe nenhum campo magnético (figura 9C). Isto quer dizer que a f.c.e.m. não impede indefinidamente que a corrente desapareça, fazendo unicamente com que o seu desaparecimento seja menos rápido.

Posteriormente, a tensão do gerador de C.A. começa de novo a aumentar, porém, desta vez, com polaridade oposta, fazendo com que a direção da corrente da bobina seja inversa e que o campo magnético que se inicia seja também de polaridade inversa ao anterior. Neste caso, a tensão do gerador de C.A. tem que vencer a f.c.e.m., que se desenvolve devido à variação da intensidade do campo; contudo, a tensão do gerador vence a f.c.e.m. e o campo magnético alcança de novo uma intensidade máxima (figura 9D), com polaridade inversa à anterior.

Contudo, esta condição só prevalece por um instante, porque a tensão do gerador de C.A. começa de novo a diminuir, dando lugar a que a f.c.e.m. tenda a se opor à diminuição da corrente. Isto é produzido numa fração de segundo; logo o campo magnético desaparece totalmente e a corrente volta a zero (figura 9E).

Quando isto sucede, o processo começa a se repetir e se sucederão as condições ilustradas em "A", "B", "C", "D" e "E" da figura 9, ou seja, durante o ciclo seguinte da tensão de C.A., fornecida pelo gerador de C.A.

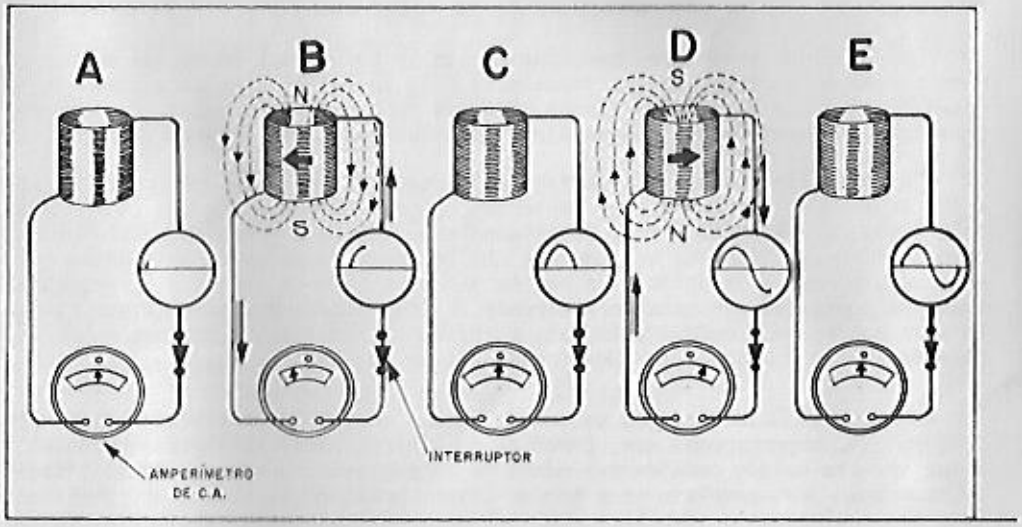


FIGURA 9
VARIAÇÕES DO CAMPO MAGNÉTICO DE UMA BOBINA ALIMENTADA COM UMA C.A.

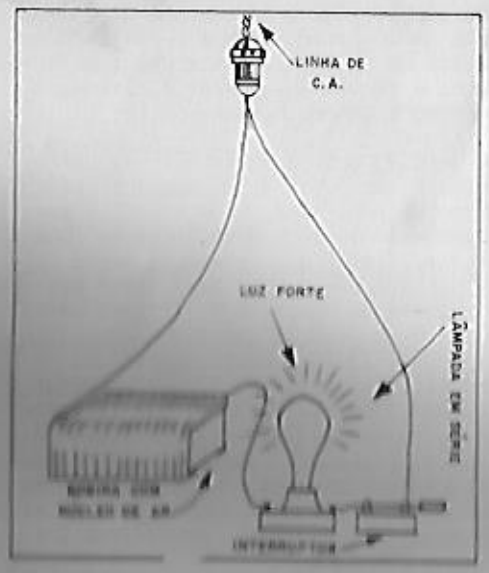


FIGURA 10
A BOBINA COM NÚCLEO DE AR NÃO APRESENTA MUITA REATÂNCIA INDUTIVA

Resumindo, podemos dizer que o campo magnético que se forma ao redor de uma bobina alimentada com C.A. está variando continuamente de intensidade e polaridade, de acordo com as variações da tensão aplicada. Isto quer dizer que *sempre e em todos os instantes* haverá uma f.c.e.m., que se opõe à tensão aplicada e que trata de evitar que a corrente varie de intensidade.

Isto quer dizer também que a oposição à passagem da corrente alternada que uma bobina apresenta, como consequência das tensões induzidas, se manifesta em todos os instantes. Esta oposição que a indutância de uma bobina apresenta à passagem de uma C.A. se chama *reatância indutiva*; ela depende da indutância da bobina e da frequência de C.A. aplicada.

Em outras palavras, a reatância indutiva que uma bobina apresenta à passagem da corrente é o resultado da oposição oferecida pela f.c.e.m. desenvolvida na bobina, como consequência das variações da intensidade da corrente circulante. Esta reatância indutiva pode ser calculada quando conhecemos a indutância da bobina e a frequência da C.A. A reatância é expressa em *OHMS*, da mesma maneira que a resistência elétrica de um circuito.

EFEITO DE UMA BOBINA COM NÚCLEO DE FERRO SOBRE UMA CORRENTE ALTERNADA

Nas páginas anteriores mencionamos que se colocarmos um núcleo de Ferro numa bobina de núcleo de ar, a indutância dela aumentará consideravelmente; a razão disto é que o valor da tensão induzida na bobina será *maior*. Isto é comprovado experimentalmente com os circuitos ilustrados nas figuras 10 e 11.

A experiência ilustrada na figura 10 consiste em ligar uma bobina de 75 a 100 espiras de fio esmaltado, em série com uma lâmpada elétrica, alimentada pela linha de C.A. de 60 hertz. Observamos que, enquanto a bobina não tiver núcleo de Ferro, a lâmpada se acenderá com intensidade um pouco mais baixa que a normal, porque a indutância da bobina não é suficiente para que a reatância indutiva possa reduzir consideravelmente a intensidade da corrente que circula pela bobina. Em outras palavras, a reatância indutiva de uma bobina de núcleo de ar não é muito alta numa frequência de 60 hertz.

Contudo, se colocarmos no centro desta bobina umas lâminas de Ferro (figura 11), observaremos que, à medida que introduzimos as lâminas no núcleo, a luz irá diminuindo consideravelmente de intensidade, e com a possibilidade de se apagar por completo se a bobina tiver considerável número de espiras. Isto nos indica que a indutância da bobina aumentou consideravelmente, fazendo com que a reatância indutiva, oferecida por esta indutância, seja agora suficientemente alta para reduzir a corrente circulante a ponto de não acender mais o filamento da lâmpada.

Devemos lembrar que, neste caso, o fio da bobina sempre apresenta certa resistência; contudo, ela é mínima em comparação com a reatância indutiva da bobina.

Esta experiência é uma comprovação clara de que a indutância de uma bobina aumenta consideravelmente, se utilizarmos um núcleo de Ferro; neste caso, a f.c.e.m. gerada na bobina é muito maior, já que o Ferro permite a formação de um campo magnético mais intenso.

Se repetirmos esta experiência, utilizando agora uma linha elétrica de C.C., observaremos que a intensidade da luz emitida pela lâmpada é a mesma, tanto usando uma bobina com núcleo de ar como de Ferro. Isto é devido a que, num circuito de C.C., a intensidade e direção da corrente circulante é *constante*; o fenômeno da f.c.e.m. não se manifesta e a única resistência que a corrente encontra à sua passagem pela bobina é a resistência do fio de Cobre que forma o enrolamento. Porém, como explicamos anteriormente, nos instantes que fechamos ou abrimos o circuito haverá algum efeito de indutância; contudo, este efeito dura tão pouco tempo que é quase imperceptível.

EFEITO DA FREQUÊNCIA SOBRE A REATÂNCIA INDUTIVA

Como a reatância indutiva de uma bobina depende das variações de intensidade da corrente que circula por ela, quanto mais rápidas forem estas variações, maior será a f.c.e.m. desenvolvida e, portanto, maior será também a reatância indutiva que a bobina apresenta à passagem de uma C.A. Em outras palavras, se aumentarmos a frequência em uma C.A. que circula por uma bobina, a reatância indutiva também aumentará.

Suponhamos, para comprovar o que dissemos, que dispomos de um pequeno gerador de C.A. movido por um motor a gasolina. Para iniciar esta experiência, ajustamos o controle de velocidade do motor de tal maneira que a frequência da C.A. seja exatamente de 60 hertz. Feito isto, ligamos ao gerador uma lâmpada em série com uma bobina de suficiente núcleo de Ferro, para que a lâmpada se acenda fracamente (figura 12).

A seguir, aumentamos a velocidade de rotação do motor a gasolina, para aumentar a frequência da C.A. produzida pelo gerador, até que alcance qualquer frequência mais alta que 60 hertz (por exemplo, 90 hertz). Assim fazendo, notaremos que, apesar do voltímetro de C.A. indicar uma voltagem igual ou maior que a anterior, a lâmpada estará apagada ou quase apagada. A razão disto é que as variações da corrente que flui pela bobina são agora tão rápidas, que a reatância indutiva da bobina aumentou consideravelmente, reduzindo a passagem da corrente a tal ponto que ela não é suficiente para acender o filamento da lâmpada.

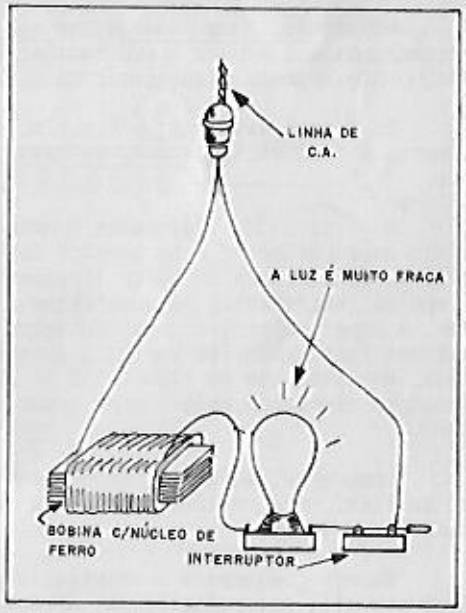


FIGURA 11
A REATÂNCIA INDUTIVA DE UMA BOBINA COM NÚCLEO DE FERRO É MUITO ALTA

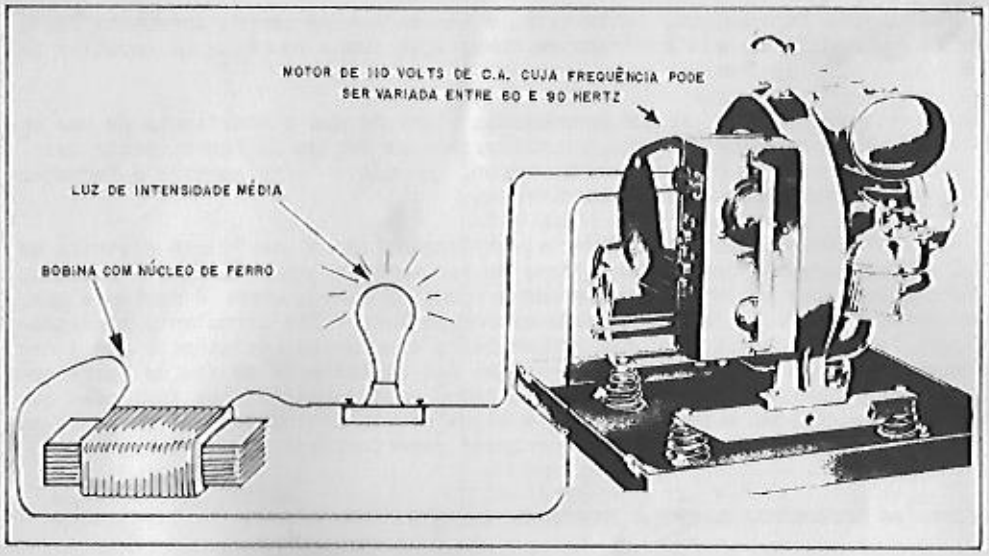


FIGURA 12
A REATÂNCIA INDUTIVA DE UMA BOBINA AUMENTA, QUANDO A FREQUÊNCIA DA C.A. AUMENTA

Se formos diminuindo a velocidade de rotação do gerador, observaremos que a lâmpada começa a se acender novamente, aumentando de intensidade à medida que diminuimos a frequência da C.A. aplicada.

Resumindo, isto quer dizer que *se aumentarmos a frequência da C.A. que circula por uma bobina, a sua reatância indutiva também aumentará.* Pelo contrário, *se diminuirmos a frequência da C.A., a reatância indutiva também diminuirá.*

Em outras palavras, a f.c.e.m. induzida na bobina aumenta, à medida que aumenta a frequência da C.A. aplicada, e diminui à medida que diminui a frequência.

Na figura 13 ilustramos o mesmo princípio por meio de diagramas, utilizando um amperímetro e um gerador de C.A. de frequência variável. Quando a frequência da C.A. é de 60 hertz (figura 13A), o amperímetro indica alta corrente. À medida, entretanto, que aumentamos a frequência da C.A., produzida pelo gerador, o amperímetro indica muito menos corrente (figura 13B); quando o gerador estiver fornecendo 180 hertz, a corrente que o amperímetro indicará será a metade, enquanto que na figura 13C a frequência do gerador é tão elevada que a oposição oferecida pela bobina (reatância indutiva) reduz a corrente quase a zero.

Lembre-se, portanto, que embora a indutância de uma bobina seja constante ou fixa, sua reatância indutiva depende sempre da frequência da C.A. aplicada.

Quando conhecemos a indutância de uma bobina e a frequência da C.A. que flui por ela, podemos calcular a reatância indutiva pela fórmula:

$X_L = 6{,}28 \times f \times L$

X_L representa a reatância indutiva em *ohms*

6,28 é uma constante que não varia, equivalente a 2 PI (2¶)

f representa a frequência da C.A. em *hertz*
L representa a indutância em *henrys*

Exemplo: suponhamos que desejamos calcular a reatância indutiva de um reator na frequência de 60 hertz cuja indutância é de 10 henrys. Substituindo estes valores na fórmula $X_L = 6{,}28 \times f \times L$, teremos:

$X_L = 6{,}28 \times 60 \times 10$

$X_L = 3.768$ ohms

Isto é, a reatância indutiva de um reator cuja indutância é de 10 henrys na frequência de 60 Hz é de 3.768 ohms.

Este mesmo exemplo nos serve para indicar a importância do fenômeno da auto-indução (f.c.e.m. gerada), pois a resistência do enrolamento de um reator de 10 henrys pode ser aproximadamente de 50 ohms (conforme o calibre do fio empregado), enquanto que a reatância indutiva produzida pela f.c.e.m. é de 3.768 ohms na frequência de 60 hertz. Isto quer dizer que a oposição que este reator apresentaria à passagem de uma corrente seria somente de 50 ohms, enquanto que a *oposição total* que o mesmo apresentaria à passagem de uma C.A. de 60 Hz seria de 3.768 ohms por parte da reatância indutiva, mais os 50 ohms da resistência da bobina.

No momento, basta saber que a *oposição total* (conjunto da reatância indutiva mais a resistência) se chama *IMPEDÂNCIA*. Em lição mais avançada do Curso voltaremos a falar da reatância indutiva e resistência, e então trataremos em detalhes da impedância.

As aplicações dos fenômenos da indutância e reatância indutiva são numerosíssimas em todos os circuitos de rádio e TV, e podemos dizer que pelo menos 50% das partes de um receptor estão formadas por bobinas de alta e baixa indutância, que permitem controlar as correntes alternadas e obter delas os efeitos desejados. Por exemplo, como os reatores (figura 14) apresentam tal oposição a qualquer flutuação de corrente (mudança de intensidade da corrente), eles são sempre utilizados onde desejamos

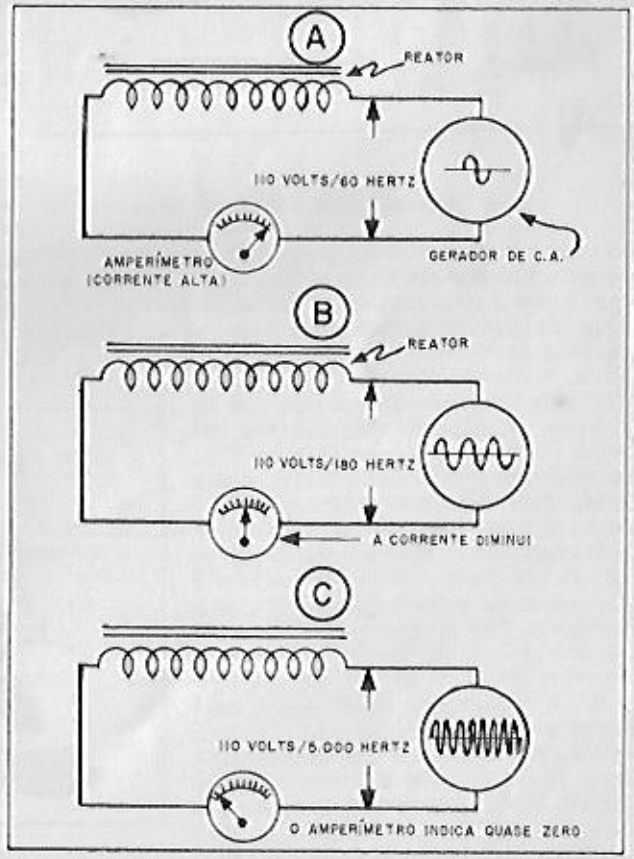


FIGURA 13
A CORRENTE DIMINUI QUANDO A FREQUÊNCIA NUM CIRCUITO INDUTIVO AUMENTA

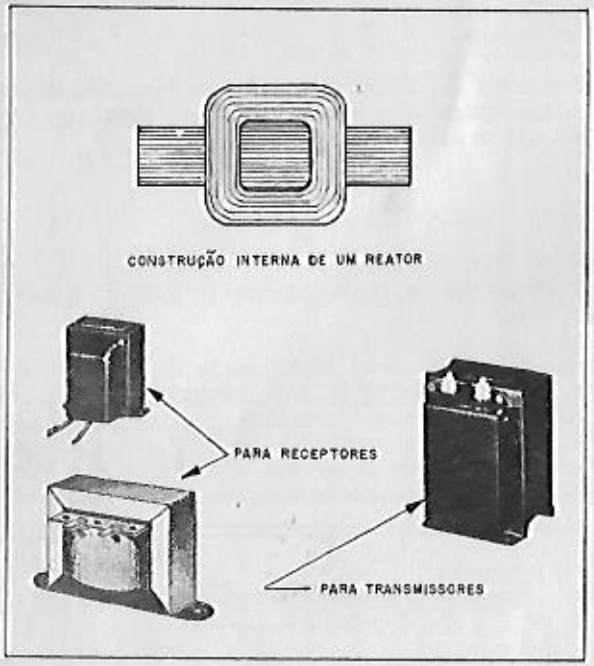


FIGURA 14
REATORES DE FILTRO

que a intensidade da corrente que flui pelo circuito seja a mais estável possível. Por isso, esta categoria de bobinas com núcleo de ferro são chamadas comumente de *reatores de filtro*.

Estes reatores filtram as alterações da C.A., fornecendo, à saída, uma corrente muito mais estável (figura 15).

Em circuitos de receptores, onde não queremos que passem correntes alternadas de frequências mais altas ou mais baixas que de um determinado limite, utilizaremos bobinas que tenham a indutância adequada para produzir esse efeito.

INDUÇÃO MÚTUA ENTRE BOBINAS

Se colocarmos duas bobinas, uma ao lado da outra, como ilustramos na figura 16, sendo uma delas ligada intermitentemente a uma bateria, por meio de um interruptor, enquanto que a outra permanece ligada a um galvanômetro, observaremos que toda vez que ligarmos ou desligarmos a bobina da bateria, será produzida uma deflexão no voltímetro; isto indica que foi induzida uma tensão na bobina ligada ao voltímetro, como consequência da *indução mútua*.

Se ao invés de bobinas com núcleo de ar, usarmos duas bobinas num mesmo núcleo de Ferro (figura 17), observaremos o mesmo efeito, com a única diferença que a tensão induzida na bobina superior será de maior amplitude. A razão da maior deflexão do ponteiro do voltímetro é por causa da auto-indução, já que o núcleo de Ferro permite a formação de um campo magnético mais forte.

É importante notar que o movimento do ponteiro do voltímetro oscila no momento que fechamos ou abrimos o circuito da bateria, pois quando o interruptor é fechado o campo magnético se expande, e quando o interruptor é aberto o campo magnético se contrai; isto é, o movimento ou direção do campo magnéti-

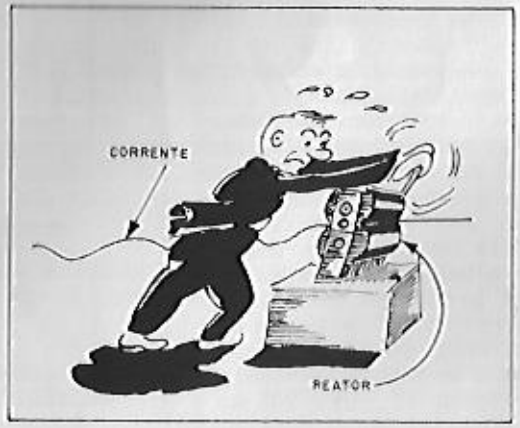


FIGURA 15
ANALOGIA DO FUNCIONAMENTO DE UM REATOR DE FILTRO

co sobre as espiras da bobina superior se inverte, porque a tensão gerada na bobina inferior varia também de polaridade, no momento de fechar ou abrir o circuito da bateria.

A bobina na parte inferior da figura 17 (a que produz o campo magnético) é conhecida como *bobina primária*, enquanto que a bobina onde aparece a tensão induzida é conhecida como *bobina secundária*. Comumente falando, dizemos enrolamento primário e enrolamento secundário.

Resumindo, podemos dizer que quando dois circuitos independentes se encontram dispostos de tal forma a haver indução eletromagnética entre ambos, dizemos que os circuitos apresentam *indução mútua*.

Observe que nos *circuitos indutivos não há nenhuma ligação entre os dois enrolamentos*, e a tensão que aparece no secundário é devida à indução eletromagnética; por isso, é que dizemos existir somente uma *ligação indutiva* entre estes circuitos.

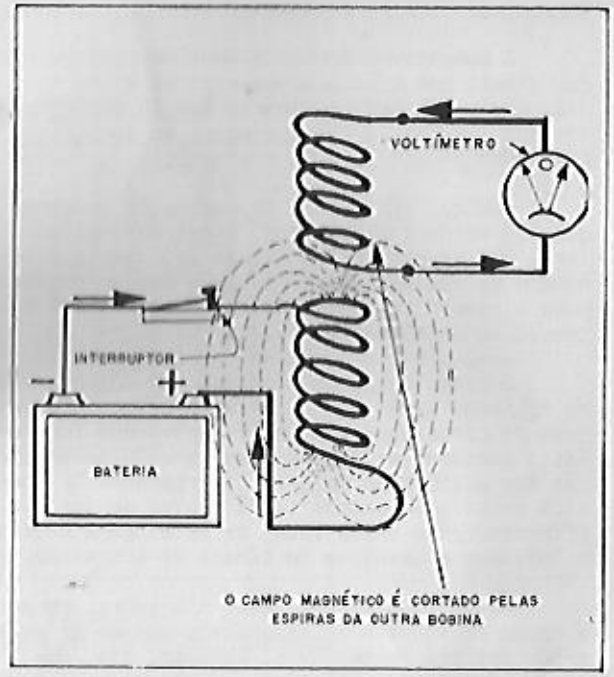


FIGURA 16
INDUÇÃO MÚTUA ENTRE DUAS BOBINAS

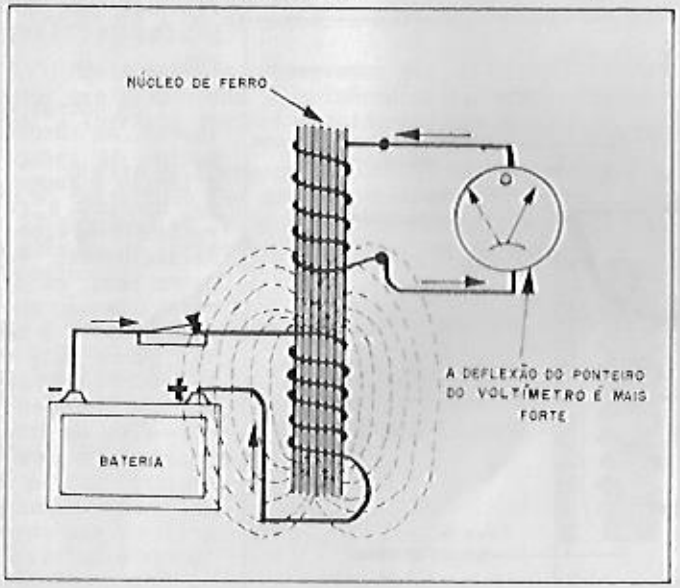


FIGURA 17
A INDUÇÃO MÚTUA É MAIS FORTE COM NÚCLEO DE FERRO

Estas bobinas não são enroladas conforme mostra a figura 17, mas conforme a figura 18, onde vemos um corte transversal de uma destas bobinas de indução. Observe que o enrolamento primário é feito com fio mais grosso e com menor número de espiras que o enrolamento secundário. Como o secundário tem maior número de espiras que o primário, a tensão de saída do secundário será mais alta que a

tensão aplicada ao primário.

O aumento de tensão produzido por uma bobina de indução está em proporção direta com a relação de espiras entre o primário e o secundário. Por exemplo, se o enrolamento primário tem 20 espiras e o enrolamento secundário 2.000 espiras, a tensão que aparecerá no secundário será 100 vezes mais alta que a tensão no primário, pois a proporção de espiras é de 1 para 100.

Uma das aplicações da bobina de indução é a tão conhecida bobina de ignição dos motores a gasolina. Estes motores utilizam bobinas de construção similar à que ilustramos na figura 18, com a diferença que o secundário tem tal número de espiras (em comparação com o primário) que a tensão do secundário pode alcançar um valor instantâneo de até 8.000 volts, utilizando somente uma tensão no primário de 6 volts.

O circuito comum utilizado em motores a gasolina está ilustrado na figura 19, onde vemos que o circuito primário é interrompido continuamente por um jogo de contatos e um came rotativo que funciona com a mesma rotação do motor. Estes contatos se fecham e se abrem alternadamente, e em sincronismo com a posição dos pistões do motor, interrompendo a corrente primária e produzindo uma alta tensão no secundário da bobina de ignição, tensão esta que é distribuída alternadamente entre todas as velas para produzir nestas uma faísca destinada a inflamar a gasolina na câmara de combustão.

Pelas explicações dadas até agora, nos pareceria que a bobina de indução é capaz de induzir no secundário uma maior quantidade de energia elétrica que a que aparece no primário. Contudo, isto *não é correto* pois, se é verdade que uma bobina de indução eleva a tensão, ela também reduz outros fatores elétricos que determinam a quantidade de energia (potência elétrica). Por exemplo, é verdade que a tensão que aparece no secundário é muito mais alta que a tensão no primário; todavia, a *corrente disponível* que podemos tomar do secundário não passa de poucos miliampères.

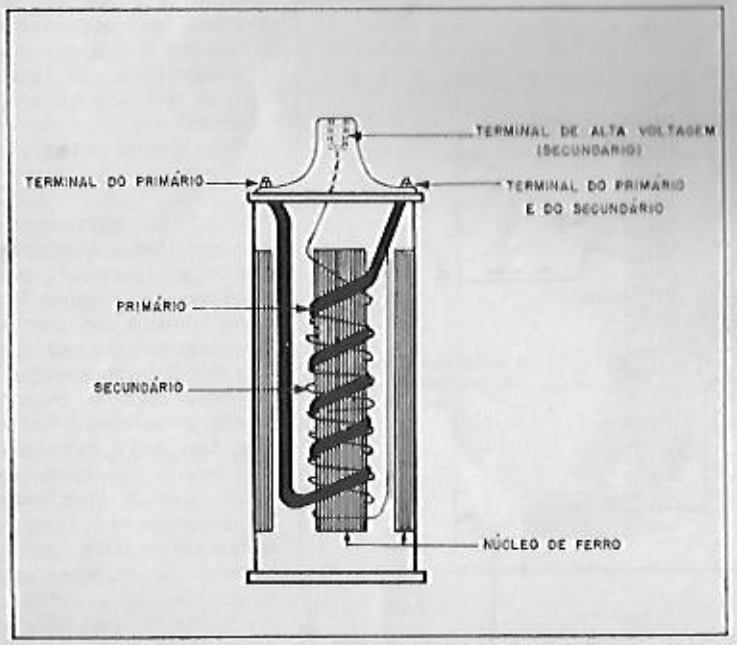


FIGURA 18

Em outras palavras, no caso da bobina de indução a tensão é aumentada; contudo a corrente diminui consideravelmente. Por outro lado, no primário a tensão aplicada à bobina é baixa, porém este fator é compensado por uma corrente mais alta em intensidade, já que o calibre do fio do primário é mais grosso e sua resistência é baixa.

Por exemplo, suponhamos que o primário receba uma tensão de 6 volts e

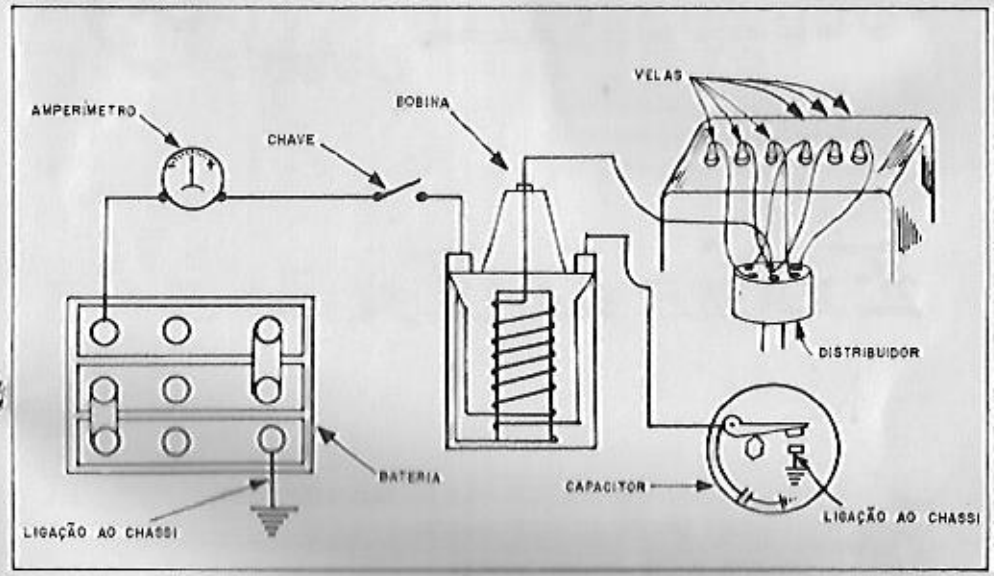


FIGURA 19
CIRCUITOS DE IGNIÇÃO DE UM AUTOMÓVEL

ampères. Isto quer dizer que a *potência em watts*, aplicada ao primário, é de 60 watts (W = E x I). No enrolamento secundário teremos uma tensão induzida de 6.000 volts com uma corrente de 10 miliampères; utilizando a fórmula (W = E x I) obteremos 60 watts, o que quer dizer que a potência disponível no enrolamento secundário é a mesma potência aplicada ao enrolamento primário.

Neste exemplo, observamos que a energia disponível no secundário não é maior que a aplicada ao primário pois, embora tenha havido um aumento na tensão, a corrente diminui consideravelmente.

O fato da corrente disponível no secundário ser muito limitada, é devido ao calibre do fio do secundário destas bobinas ser muito reduzido; embora utilizássemos um calibre maior, o resultado seria que, tão logo aumentássemos o consumo da corrente secundária, seria aumentado também o consumo da corrente primária.

Na prática, observamos que a energia elétrica que aparece no secundário é um pouco menor que a aplicada ao enrolamento primário. A razão disso é que, no interior do núcleo da bobina, se formam certas correntes magnéticas chamadas correntes de Foucault, que consomem parte da energia aplicada transformando-a em calor. A corrente de Foucault será explicada numa das próximas lições deste Curso.

*****
***
*

IMPRESSO NO BRASIL
DIREITOS RESERVADOS 1947

OCCIDENTAL Schools

EXAME DA LIÇÃO E-13

- CADA QUESTÃO APRESENTA TRÊS OU MAIS RESPOSTAS.
- SOMENTE UMA DELAS ESTÁ CORRETA.
- MARQUE A QUE JULGAR CORRETA.
- TRANSCREVA AS RESPOSTAS CORRETAS PARA A FOLHA DE EXAME ANEXA.

1 - A indutância é a característica que uma bobina tem de:

a) não apresentar oposição à passagem de uma C.A.
X b) induzir em suas próprias espiras uma tensão de polaridade oposta à tensão aplicada, quando a corrente que passa pela bobina varia de intensidade
c) não apresentar oposição à passagem contínua de uma C.C.

2 - A tensão que é induzida sobre as mesmas espiras de uma bobina, quando a corrente que passa por ela varia de intensidade, é devida:

a) à resistência da bobina (oposição de suas espiras à passagem de uma corrente elétrica)
X b) aos campos magnéticos variáveis que são cortados pelas próprias espiras da bobina
c) à constituição eletrônica do condutor de que é formada a bobina, como no caso da produção de tensão por meio termoelétrico

3 - A tensão (f.c.e.m.) induzida numa bobina, ou gerada nas próprias espiras da bobina, recebe esse nome devido à seguinte razão:

a) essa tensão é da mesma polaridade que a tensão aplicada à bobina
b) a tensão induzida nas mesmas espiras da bobina é de amplitude maior que a tensão aplicada
X c) a tensão induzida pela expansão ou contração do campo magnético nas espiras da bobina é de polaridade oposta à tensão aplicada pela fonte de alimentação exterior à bobina

4 - A oposição total de uma bobina à passagem de uma corrente é muito mais notável, quando a fonte de alimentação externa aplicada à bobina é:

X a) uma tensão de C.A. de alta frequência
b) uma tensão de C.A. de baixa frequência
c) uma tensão de C.C.

5 - A oposição da bobina à passagem de uma C.A. (reatância indutiva) diminui quando:

a) diminui a tensão da C.A. aplicada à bobina
b) aumenta a frequência da C.A. aplicada à bobina
X c) diminui a frequência da C.A. aplicada à bobina

6 - A indutância de uma bobina diminui, quando são alteradas as dimensões na bobina e o número de espiras da seguinte forma:

a) quando o número de espiras é igual, mas se aumenta o diâmetro da bobina
X b) quando se diminui o número de espiras e as outras dimensões permanecem constantes
c) quando se aumenta o número de espiras e as outras dimensões permanecem constantes

7 - As unidades de indutância são:

a) o ohm, o quilohm e o megohm
X b) o henry, o milihenry e o microhenry
c) o farad, o microfarad e o micromicrofarad

8 - A indutância de uma bobina aumenta quando se coloca um núcleo de Ferro na bobina, devido à seguinte razão:

X a) o núcleo de Ferro permite a formação de campos magnéticos mais intensos, e portanto um maior desenvolvimento da f.c.e.m.
b) o núcleo de Ferro permite a formação de campos magnéticos mais fracos
c) o núcleo de Ferro aumenta a resistência da bobina

9 - A indução de tensão que uma bobina pode produzir sobre a outra é devido à seguinte condição:

X a) o campo magnético produzido por uma bobina corta as espiras da outra bobina
b) porque há uma ligação elétrica entre as duas bobinas
c) porque a corrente de elétrons salta de uma bobina para a outra

10- Qual é a reatância indutiva de um reator com as seguintes características: ele tem 45 henrys de indutância e está ligado a uma fonte de alimentação de 110 volts de C.A., cuja frequência é de 50 hertz?

X a) 14.130 ohms
b) 1.554.300 ohms
c) 1.413.000 ohms
d) 1.413 ohms