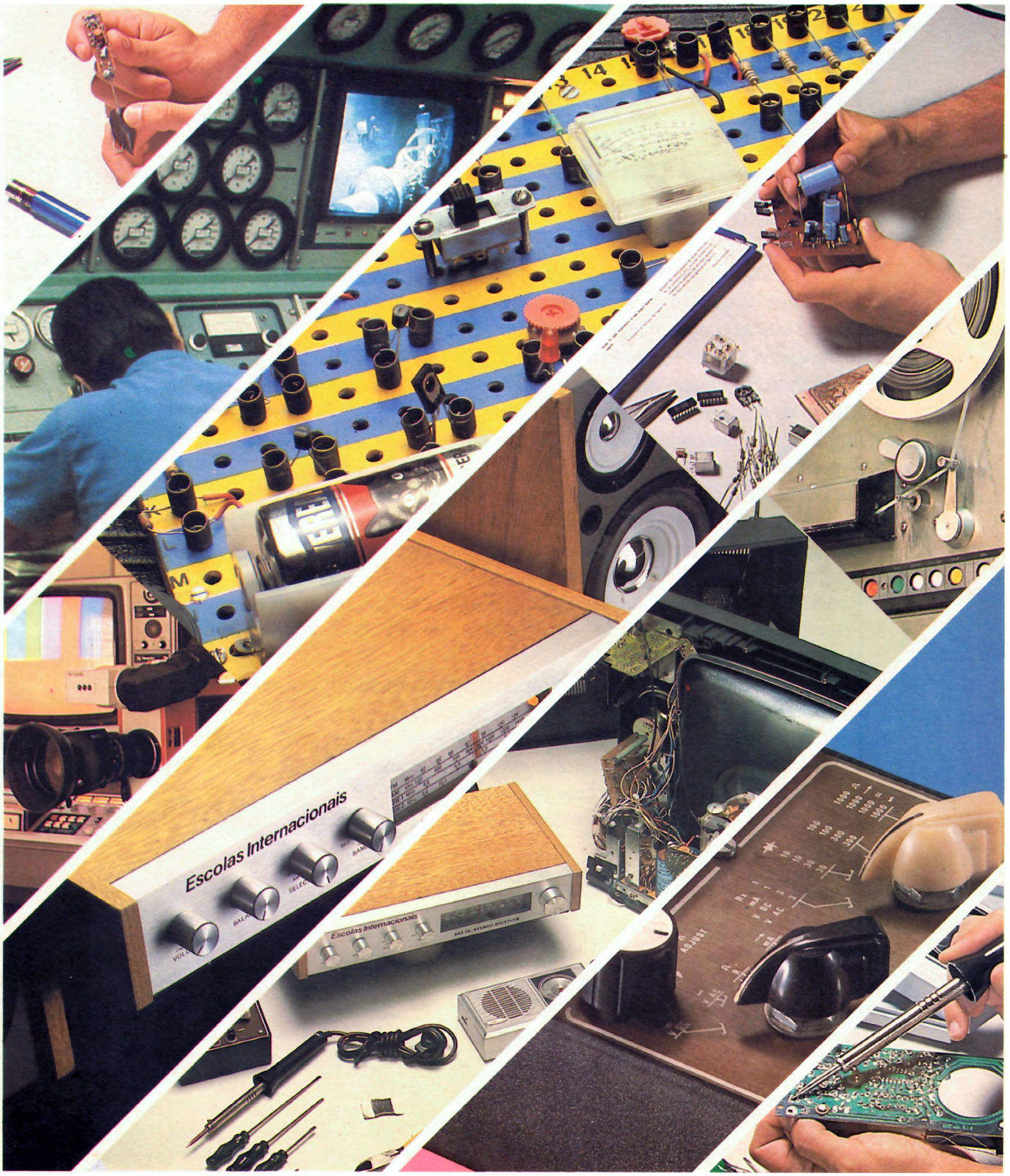
CIRCUITOS BÁSICOS E POLARIZAÇÃO DE TRANSISTORES



Escolas Internacionais

Referência
035

Índice Geral

LIÇÃO Nº. 19 – CIRCUITOS BÁSICOS E POLARIZAÇÃO DE TRANSISTORES

Introdução. 9
1. Símbolos algébricos em eletrônica 9
2. Elementos de circuito: passivos e ativos 11
3. O transistor como elemento ativo de um circuito eletrônico 12
4. O transistor como "fonte de corrente" 14
5. Configurações básicas do transistor 15
6. Ganho de amplificadores transistorizados 17
7. O transistor como amplificador de corrente 18
8. Amplificador base-comum 18
9. Ganho de corrente em base-comum em curto-circuito 19
10. Ganhos de tensão e ganhos de potência em base-comum 20
11. Circuitos práticos de amplificadores em base-comum 22
12. Amplificador transistorizado emissor-comum 23
13. Regras práticas para variações de grandezas elétricas em um transistor . . 24
14. Inversão de polaridade do sinal de saída em um amplificador emissor-comum. 25
15. Ganho de corrente de um amplificador transistorizado emissor-comum β em curto-circuito. 28
16. Relação entre α e β. 29
17. Circuitos práticos de amplificadores em emissor-comum 30
18. Amplificador transistorizado coletor-comum 32
19. Polarizações dos sinais de entrada e de saída em um circuito coletor-comum. 33
20. Sumário dos circuitos amplificadores básicos a transistor 34
Exame da lição nº. 19 35

Conteúdo didático programado e elaborado pela equipe técnico-pedagógica das Escolas Internacionais.

Copyright - International Textbook Company - ICS - International Correspondence Schools - Scranton, Pennsylvania - USA - Copyright - Direitos exclusivos no Brasil para ESCOLAS INTERNACIONAIS - São Paulo, SP - Brasil.

Reservados todos os direitos. Proibida a reprodução total ou parcial do texto e das ilustrações por qualquer forma ou meio, sem prévia autorização por escrito dos detentores do copyright. Edições ou reproduções não autorizadas estarão sujeitas às penalidades da Lei.

Escolas Internacionais

Impresso no parque gráfico das Escolas Internacionais do Brasil.

Introdução

O transistor é um elemento ativo de um circuito eletrônico. Este conceito vai ser apresentado nesta lição. E mais: você vai conhecer a importância e a aplicação do efeito transistor, estudado na lição anterior, os circuitos básicos ou configurações típicas de circuitos eletrônicos com transistores e aprenderá os princípios dos amplificadores transistorizados.

Além disso tudo, no primeiro capítulo desta lição você conhecerá os símbolos usados em eletrônica, de acordo com a padronização da ABNT — Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Circuitos Básicos e Polarização de Transistores

1 - Símbolos algébricos em eletrônica

Neste capítulo você irá conhecer os símbolos algébricos utilizados em eletrônica, de acordo com a padronização estabelecida pela ABNT — Associação Brasileira de Normas Técnicas.

A partir desta lição, como já entramos efetivamente no estudo da eletrônica, passaremos a utilizar somente os símbolos recomendados pela ABNT.

Apresentamos a seguir as regras gerais sobre os símbolos algébricos da eletrônica

Regra I

As letras maiúsculas são empregadas nos seguintes casos: indicar elementos do transistor, representar pontos físicos ou terminais de um circuito e também para representar valores constantes.

Exemplos

C = coletor
E = emissor
B = base
A = ponto de um circuito
K = um valor constante
R = resistência elétrica constante de um componente (quando o valor da resistência não varia com a diferença de tensão entre seus terminais).

Regra II

As letras minúsculas são empregadas para representar valores variáveis.

Exemplos

i = corrente alternada instantânea

v = tensão alternada instantânea

r = resistência elétrica variável ou que depende dos valores de tensão elétrica entre os terminais do elemento considerado.

Regra III

Uma letra minúscula com um índice em letra maiúscula, indica um valor instantâneo total da grandeza elétrica considerada. O índice refere-se a um elemento, eletrodo ou ponto físico de um circuito elétrico.

Exemplos

v_C = tensão instantânea total de coletor (componente contínua e alternada).

i_C = corrente instantânea total de coletor (componente contínua e alternada).

v_{CE} = tensão instantânea total coletor-emissor ou diferença de tensão instantânea total entre coletor e emissor (componente contínua e alternada).

Regra IV

Uma letra minúscula com um índice em letra minúscula, indica um valor instantâneo da componente alternada do sinal total, em um elemento, eletrodo ou ponto físico de um circuito elétrico.

Exemplos

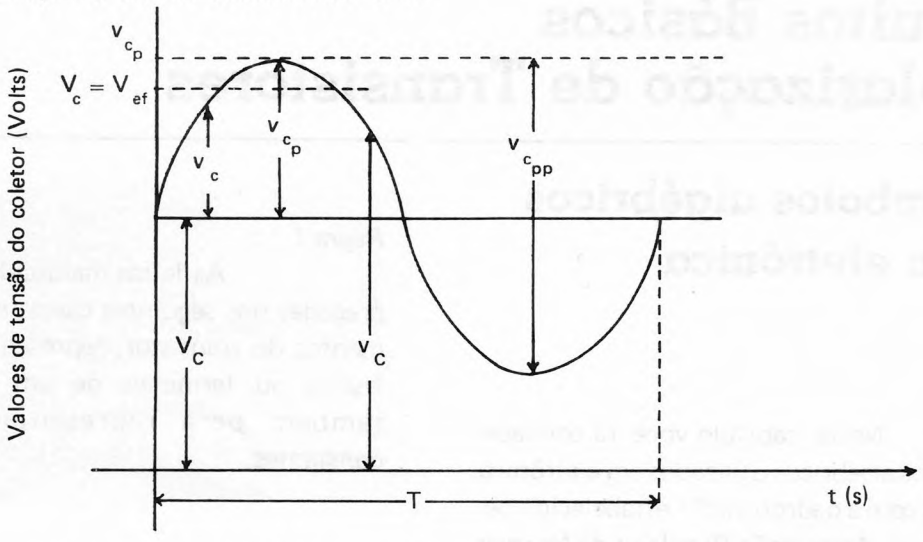
i_c = corrente instantânea do sinal de coletor (componente alternada do sinal).

v_c = tensão instantânea do sinal de coletor (componente alternada).

v_{ce} = tensão instantânea da componente alternada ou de sinal entre coletor e emissor.

Regra V

Uma letra maiúscula com um índice em letra maiúscula indica um valor médio da corrente tensão ou potência elétrica, em um elemento, eletrodo ou ponto físico de um circuito elétrico.



v_c = tensão da componente alternada do sinal

V_c ou V_{ef} ou V_{rms} = tensão eficaz do sinal

V_C = tensão da componente contínua do sinal

v_C = tensão total do sinal (componente contínua mais componente alternada)

v_{cpp} = tensão pico-a-pico do sinal de coletor

v_{cp} = tensão de pico do sinal de coletor

t = tempo

s = segundo

T = período

Fig. 1 — Indicação de alguns valores através dos símbolos da ABNT.

Direitos reservados

Exemplos

V_C = Tensão da componente contínua no coletor.

I_C = componente contínua da corrente de coletor.

V_{CE} = componente contínua da tensão entre coletor e emissor.

E_{CC} ou V_{CC} = tensão da bateria ou da fonte de alimentação do coletor.

E_{BB} ou V_{BB} = tensão da bateria ou da fonte de alimentação da base.

Regra VI

Uma letra maiúscula com um índice em letra minúscula, indica um valor eficaz ou RMS (root-mean-square= raiz quadrada média) de uma grandeza elétrica.

Exemplos

V_c ou V_{ef} ou V_{RMS} = tensão eficaz do sinal alternado de coletor.

I_c ou I_{ef} ou I_{RMS} = valor eficaz da corrente de coletor.

V_{ce} ou $V_{ce_{ef}}$ ou $V_{ce_{RMS}}$ = valor eficaz da tensão alternada entre coletor e emissor.

Observe na figura 1 a representação de alguns valores, utilizando-se os símbolos algébricos normalizados pela ABNT.

Afora todos estes símbolos mencionados, iremos empregar nesta lição os seguintes sinais, quando for feita uma comparação entre determinados valores.

$>$	maior que
$\geqslant$	maior ou igual a
$\gg$	muito maior que
$<$	menor que
$\leqslant$	menor ou igual a
$\ll$	muito menor que

2 - Elementos de circuito: passivos e ativos

Elemento passivo de um circuito eletrônico é o elemento físico de circuito que simplesmente absorve energia ou transforma esta energia numa ***relação de potência*** em que a ***potência de saída é menor que a potência de entrada.***

Em um elemento passivo ocorre, portanto, a seguinte relação:

Potência de entrada = Perdas + Potência de saída
ELEMENTO PASSIVO

Um exemplo de elemento passivo são os resistores. Nestes elementos a potência de entrada é igual às perdas que ocorrrem através da dissipação de calor.

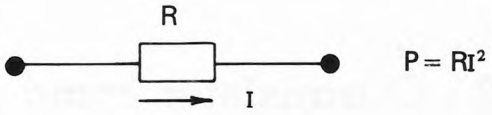


Fig. 2 – Resistor.

Os transformadores também constituem exemplo de elemento passivo de um circuito eletrônico. Mas, para os transformadores, a potência de entrada é igual à potência de saída mais as perdas que ocorrem por dissipação de calor e campos magnéticos dispersos.

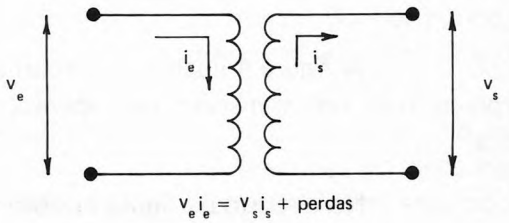


Fig. 3 – Transformador.

Elemento ativo de um circuito eletrônico é o elemento físico de circuito que pode fornecer uma ***potência de saída maior que a potência de entrada.***

Em um elemento ativo ocorre, portanto, a seguinte relação:

Potência de saída > Potência de entrada
ELEMENTO ATIVO

Como exemplos de elementos ativos de um circuito eletrônico podemos citar as válvulas eletrônicas de emissão termoiônica e os transistores. No capítulo seguinte você verá como os transistores conseguem fazer com que a potência de saída seja maior que a potência de entrada.

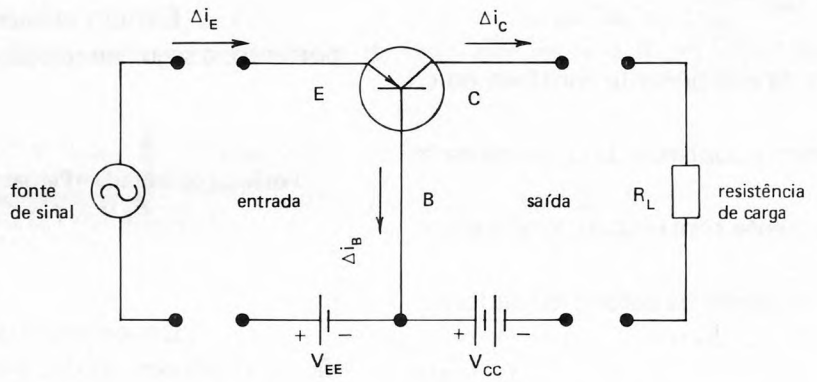


Fig. 4 – Circuitos de entrada e saída de um transistor.

3 - O transistor como elemento ativo de um circuito eletrônico

Um transistor em operação é um elemento ativo entre dois circuitos: um circuito de entrada e um circuito de saída (*).

A figura 4 ilustra um circuito eletrônico com um transistor em operação típica.

No circuito da figura 4, observe o seguinte:

- a base do transistor é comum a ambos os circuitos (o de entrada e o de saída);
- a parte do circuito do transistor à qual a fonte de sinal é conectada (ligada) chama-se "entrada";
- note, aqui, que para a fonte de sinal o transistor aparece como um circuito de saída;
- um circuito é denominado "circuito de carga", ou simplesmente "carga", de outro circuito, quando é "saída" deste;
- assim, o transistor é "carga" da fonte de sinal, e a resistência R_L é "carga" do transistor;
- a parte do transistor que trabalha junto ao circuito de saída, isto é, junto à resistência de carga R_L chama-se "saída".
- para a resistência de carga, por sua vez, o transistor aparece como fonte de sinal;
- esta "fonte de sinal", que é o transistor, é uma fonte de elevada resistência interna;
- observe diretamente na figura 4 que o circuito de saída do transistor é o circuito de sua junção base-coletor. Você já sabe que esta junção base-coletor é polarizada inversamente e, portanto, apresenta alta resistência à passagem da corrente elétrica;
- a resistência interna da junção base-coletor chama-se "resistência de saída" do transistor;
- sendo a resistência de saída do transistor elevada, a carga do transistor também pode ser elevada, isto é, R_L pode ser de alto valor. Isto significa que pequenas correntes no circuito gerarão elevadas potências, uma vez que: potência = $R_L \times i^2$;
- a carga apresentada pelo transistor à fonte de sinal chama-se "resistência de entrada"; esta resistência de entrada é muito baixa, porque o transistor está polarizado diretamente.

Pelo fato do circuito de entrada possuir baixa resistência, a potência fornecida pelas fontes de sinais será baixa.

A potência de entrada será, deste modo, pequena, porque a resistência de entrada do transistor é baixa.

A potência de saída, porém, será grande, porque terá praticamente a mesma corrente do circuito de entrada, mas com uma resistência de carga bem maior (*).

(*) Circuito de entrada (input, em inglês). Circuito de saída (output, em inglês).

(*) **Lembre-se do efeito transistor**, estudado na lição nº 18, pelo qual a corrente de portadores de carga provenientes do emissor atravessa a base do transistor, em virtude do fenômeno elétrico de difusão.

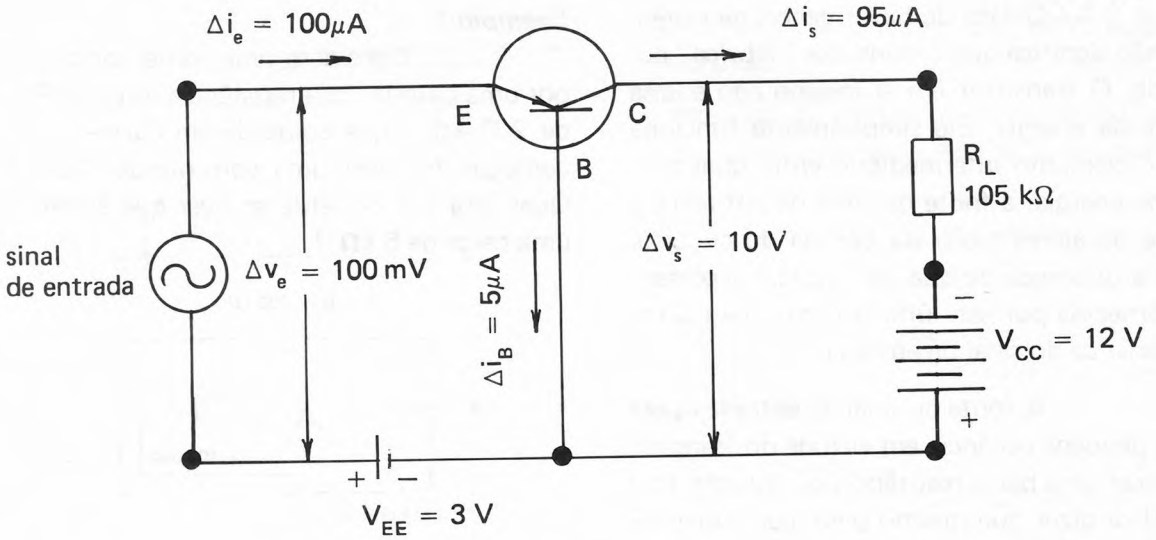


Fig. 5 — Correntes e tensões de entrada e de saída no transistor.

Observe, agora, a figura 5.

Nos circuitos de entrada e de saída ocorrem as seguintes condições:

a) Circuito de entrada

Δv_e = 100 mV = amplitude do sinal de entrada (valor de pico)

Δi_e = 100μA = amplitude da corrente de entrada (valor de pico)

A partir destes dados, pode-se calcular a resistência de entrada do transistor:

$$R_e = \frac{\Delta v_e}{\Delta i_e} \Rightarrow R_e = \frac{100 \times 10^{-3}}{100 \times 10^{-6}}$$

$R_e = 1 \times 10^3\ \Omega$ ou 1 kΩ

Então, a potência de entrada é

$\Delta P_e = R_e\ (\Delta i_e)^2$

$\Delta P_e = 1 \times 10^3 \times (100 \times 10^{-6})^2$

$\Delta P_e = 1 \times 10^3 \times 10^4 \times 10^{-12} \Rightarrow \Delta P_e = 1 \times 10^{-5}$

$\Delta P_e = 10 \times 10^{-6}$ W ou 10μW (valor de pico)

A potência de entrada também pode ser calculada diretamente, pois:

$\Delta P_e = \Delta v_e \times \Delta i_e \Rightarrow \Delta P_e = 100 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-6}$

$\Delta P_e = 10^4 \times 10^{-9}$

$\Delta P_e = 10 \times 10^{-6}$ W ou 10μW (valor de pico)

b) Circuito de saída

Δv_s = 10 V = amplitude da tensão do sinal de saída.

Δi_s = 95μA = amplitude da corrente do sinal de saída (variação da corrente de coletor).

A potência de saída pode ser determinada pela seguinte fórmula: $\Delta P_s = R_L \times (\Delta i_s)^2$. De acordo com a indicação da figura 5, o valor de R_L é 105 kΩ. Portanto, a potência de saída será:

$\Delta P_s = R_L \times (\Delta i_s)^2$

$\Delta P_s = 105 \times 10^3 \times (95 \times 10^{-6})^2$

$\Delta P_s = 105 \times 10^3 \times 9\,025 \times 10^{-12}$

$\Delta P_s = 947 \times 10^{-6}$ W ou 947μW (valor de pico)

A potência de saída também pode ser calculada da seguinte forma:

$\Delta P_s = \Delta v_s \times \Delta i_s \Rightarrow \Delta P_s = 10 \times 95 \times 10^{-6}$

$\Delta P_s = 950 \times 10^{-6}$ W ou 950μW (valor de pico)

Como os dois valores obtidos são bastante próximos, podemos considerá-los iguais. Assim, tomando o valor arredondado, podemos afirmar que a potência de saída é de 950μW (valor de pico).

Comparando as potências de saída e de entrada, teremos:

$$\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{950}{10} \Rightarrow \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = 95$$

Portanto, conclui-se que houve um aumento de potência de 95 vezes. Este aumento é chamado de amplificação ou ganho.

O exemplo que você acaba de observar demonstra que o transistor em sua ação comporta-se como um elemento ativo do circuito. Vimos que a potência de saída foi 95 vezes maior que a potência de entrada. Além disso, houve também um ganho de tensão:

Δv_e = 100 mV = 0,1 V

Δv_s = 10 V

Logo, a amplificação de tensão (A) que ocorreu foi de:

$$A = \frac{\Delta v_s}{\Delta v_e} \Rightarrow A = \frac{10}{0{,}1} \Rightarrow A = 100$$

Concluindo, podemos afirmar que no circuito estudado houve um ganho de potência de 95 vezes e um ganho de tensão de 100 vezes.

Direitos reservados

O fato de haver ganho de potência não significa que o transistor "fabrica" potência. O transistor em si mesmo não é uma fonte de energia. Ele simplesmente funciona como elemento intermediário entre duas fontes de energia: a fonte de sinal de entrada e a fonte de alimentação ou bateria do circuito, com a diferença de que ele "molda" a corrente fornecida por esta última com a mesma característica do sinal de entrada.

A fonte de sinal de entrada opera com pequena potência em virtude do transitor oferecer uma baixa resistência de entrada. Isto significa dizer que mesmo para igual corrente nos circuitos de entrada e de saída, pelo fato do segundo circuito apresentar resistência maior, a potência desenvolvida nele será conseqüentemente maior. Considerando o transistor capaz de fornecer uma potência de sinal maior do que ele recebe, ele pode ser tomado, junto com a fonte de alimentação de coletor, como uma fonte de sinal. Por simplicidade de linguagem omite-se, por vezes, a fonte de alimentação e diz-se apenas que o transistor é uma fonte de sinal para a sua carga, o que não deixa de ser verdadeiro no sentido de que todo o seu circuito, não apenas o transistor, é fonte de sinal.

Desta ação do transistor resulta que uma pequena potência de sinal de entrada aparecerá como uma grande potência de sinal de saída.

Portanto, é válido afirmar:

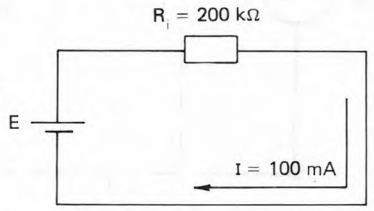
O transistor é um dispositivo eletrônico de ganho de potência (elemento ativo de circuito).

4 - O transistor como "fonte de corrente"

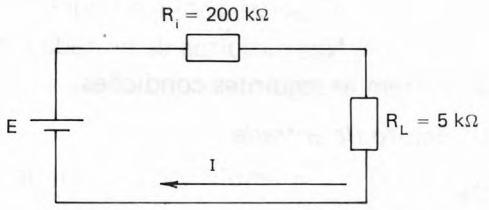
Diz-se que uma fonte que possui elevada resistência interna é uma fonte de corrente. Isto decorre do fato de que se a fonte consegue fornecer uma determinada corrente, mesmo com uma resistência interna elevada, ela não irá alterar a corrente apreciavelmente quando for aumentada sua resistência externa. Vamos ver dois exemplos, para esclarecer melhor.

Exemplo 1

Considere uma fonte constituída por uma bateria, cuja resistência interna (R_i) é de 200 kΩ e que colocada em curto-circuito consegue fornecer uma corrente de 100 mA. Qual será sua corrente se tiver que alimentar uma carga de 5 kΩ.?



a) Fonte em curto



b) Fonte com carga

Fig. 6 – Fonte com elevada resistência interna.

Solução

Como a fonte consegue fornecer uma corrente de 100 mA ou 0,1 A em curto-circuito, a tensão que ela possui pode ser calculada pela Lei de Ohm:

$$E = R \times I \Rightarrow E = 200 \times 10^3 \times 0{,}1 \Rightarrow E = 2 \times 10^4 \text{ V}$$

Acrescentando-se uma resistência de 5 kΩ, conforme está esquematizado na figura 6 (b), a corrente que passa pelo circuito será:

$$I = \frac{E}{R_i + R_L} \Rightarrow I = \frac{2 \times 10^4}{200 \times 10^3 + 5 \times 10^3}$$

$$I = \frac{20 \times 10^3}{205 \times 10^3} \Rightarrow I = \frac{20}{205}$$

$$I = 0{,}976 \text{ A ou } 97{,}6 \text{ mA}$$

Observe que com a adição de uma resistência de 5 kΩ, houve uma variação no valor da corrente de menos de 3%.

Exemplo 2

Considere uma fonte constituída por uma bateria, cuja resistência interna (R_i) é

de 5 kΩ, e que colocada em curto consegue fornecer uma corrente de 0,1 A. Qual será sua corrente se tiver que alimentar uma carga de 5 kΩ?

Solução

A tensão fornecida pela bateria será:

$$E = R \times I \Rightarrow E = 5 \times 10^3 \times 0{,}1\ A \Rightarrow E = 500\ V$$

A corrente que circulará pelo circuito quando for adicionada a carga de 5 kΩ será:

$$I = \frac{E}{R_i + R_L} \Rightarrow I = \frac{500}{5\,000 + 5\,000}$$

$$I = \frac{500}{10^4} \Rightarrow I = 0{,}05\ A \text{ ou } 50\ mA$$

Observe que, neste caso, com a adição da carga houve uma queda no valor da corrente de 50%.

Agora, vamos analisar os resultados obtidos nos dois exemplos. No primeiro caso, para uma resistência interna (R_i) igual a 200 kΩ, a corrente quase não variou porque sua resistência interna era muito alta, comparada com a resistência da carga (R_L = 5 kΩ). No segundo caso, para uma resistência interna (R_i) igual a 5 kΩ e uma carga com resistência (R_L) de 5 kΩ, a queda na corrente foi significativa: 50%.

Diz-se que a primeira fonte é uma fonte de corrente para cargas, cujas resistências sejam da ordem de 5 kΩ, enquanto que a segunda fonte (resistência interna baixa), não poderá ser considerada como fonte de corrente para cargas da ordem de 5 kΩ, porque a sua corrente sofreria uma queda muito acentuada (50%).

Então, pode-se concluir o seguinte: ***quanto maior a resistência interna, melhor a fonte de corrente.***

Como o transistor possui elevada resistência interna, devido à junção coletor-base ser polarizada inversamente, podemos afirmar:

O transistor pode ser considerado como uma fonte de corrente (uma fonte de sinal com alta resistência interna).

5 - Configurações básicas do transistor

O transistor é um elemento de circuito com 3 terminais, e fica situado entre o circuito de entrada ***(fonte de sinal)*** e o circuito de saída ***(carga),*** como você já estudou no capítulo 3 desta lição. O transistor, entretanto, pode ser ligado de maneira diferente da que foi vista no capítulo 3.

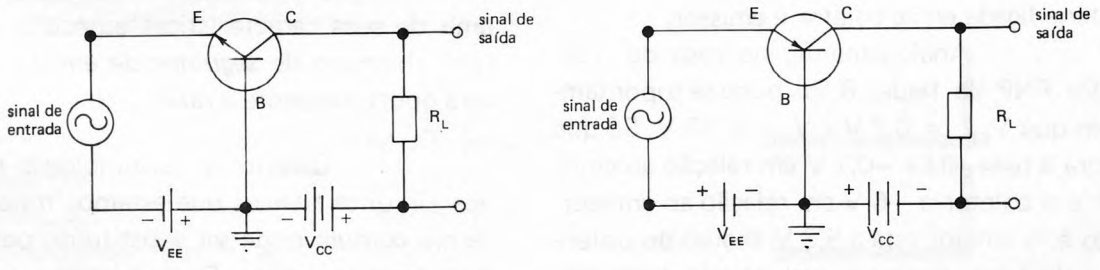
O transistor pode ser ligado de acordo com três possibilidades, a que denominamos ***configurações*** ou ***circuitos básicos.***

As três configurações ou circuitos básicos possíveis são as seguintes: a) circuito ***base-comum;*** b) circuito ***emissor-comum;*** c) circuito ***coletor-comum.***

Agora, vamos estudar detalhadamente cada uma destas configurações.

5.1 — Circuito base-comum

Característica: a base é comum ao circuito de entrada e ao circuito de saída, como mostra a figura 7.



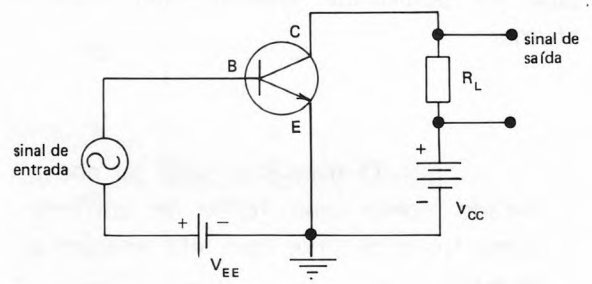
a) transistor NPN.

b) transistor PNP.

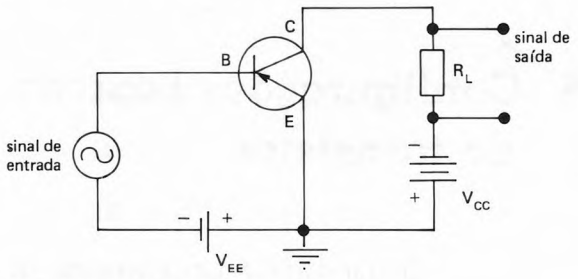
Fig. 7 — Configuração base-comum.

5.2 — Circuito emissor-comum

Característica: o emissor é comum ao circuito de entrada e ao circuito de saída, conforme está mostrado na figura 8.



a) Transistor NPN.



b) Transistor PNP.

Fig. 8 — Configuração emissor-comum.

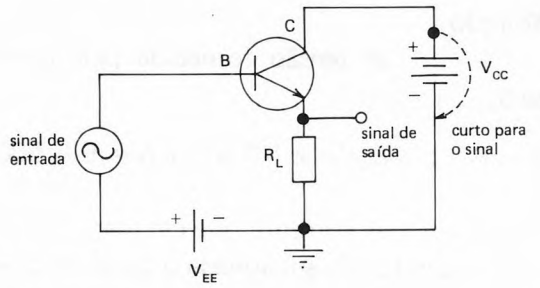
Nestas figuras você pode observar que a bateria V_{CC} está ligada entre coletor e emissor e não entre coletor e base. Então, pode-se perguntar o seguinte: ***como é que se polariza inversamente a junção base-coletor se a bateria está ligada entre coletor e emissor?***

A razão é que, num transistor NPN, polarizar inversamente a junção base-coletor significa que o coletor está a um potencial mais alto que a base, isto é, o coletor está mais positivo que a base. Na figura 8 (a), suponha-se que V_{EE} = 0,7 V e V_{CC} = 10 V. Então, a base está com +0,7 V em relação ao emissor e o coletor com +6 V em relação ao emissor (não estará com +10 V por causa da queda de tensão sobre R_L). Donde se conclui que o coletor está com uma tensão de 5,3 V acima da base (6 − 0,7 = 5,3). Isto num transistor NPN significa que a junção base-coletor está polarizada inversamente, mesmo com a bateria ligada entre coletor e emissor.

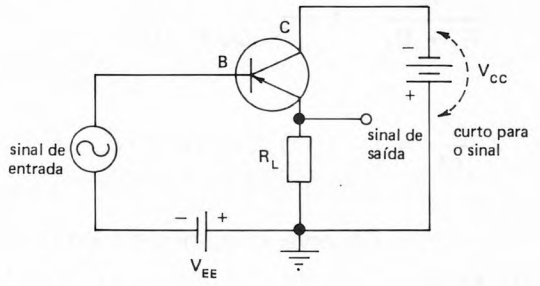
Analogamente, no caso do transistor PNP da figura 8 (b), pode-se supor também que V_{EE} = 0,7 V e V_{CC} = 10 V. Só que agora a base está a −0,7 V em relação ao emissor e o coletor a −6 V em relação ao emissor. Isto é, o coletor está a 5,3 V abaixo do potencial da base. Portanto, sendo um transistor PNP, a junção base-coletor está polarizada inversamente.

5.3 — Circuito coletor-comum

Característica: o coletor é comum ao circuito de entrada e ao circuito de saída, como mostra a figura 9.



a) Transistor NPN.



b) Transistor PNP.

Fig. 9 — Configuração coletor-comum:

Aqui também cabem as mesmas observações do circuito emissor-comum. Apesar de as baterias estarem ligadas entre emissor e coletor, o coletor e a base estão efetivamente polarizados de forma correta.

5.4 — Observações gerais

Na configuração ***coletor-comum,*** que você observou na figura 9, o coletor funciona como ***terra,*** pois a bateria é ligada diretamente entre coletor e terra.

Uma vez que a bateria é "vista", por um sinal alternado, como um ***curto-circuito,*** temos o sinal de entrada a base e o coletor (terra), e o sinal de saída entre o emissor e o coletor (terra).

O circuito coletor-comum, por uma de suas características especiais, é também chamado de ***seguidor de emissor.*** Você verá oportunamente a razão disto.

Quanto à terminologia relativa aos circuitos básicos que estamos tratando, o termo ***comum*** pode ser substituído pelos termos ***terra*** ou ***massa.*** Desta maneira, você poderá encontrar as seguintes denominações para as mesmas configurações:

circuito	base-comum	base à massa	ou	base à terra
circuito	emissor-comum	emissor à massa	ou	emissor à terra
circuito	coletor-comum	coletor à massa	ou	coletor à terra

Cada uma das 3 configurações possui características próprias, que serão vantajosas dependendo da aplicação do circuito do transistor no processamento do sinal.

O transistor é, assim, visto como um circuito com inúmeras funções dentro de um circuito maior. Dependendo da finalidade de cada uma dessas funções, é então escolhida a configuração mais vantajosa.

Você tomará contato com as características próprias de cada configuração, quando tratarmos com maior profundidade dos circuitos de amplificação com transistores, na lição n.º 20.

6 - Ganho de amplificadores transistorizados

Reunindo todas as informações que você já conhece, não lhe será difícil deduzir que os ***transistores*** são amplamente utilizados em circuitos elétricos e ***podem realizar uma extraordinária variedade de funções, simplesmente porque possuem a propriedade de amplificar sinais elétricos.***

Pode-se mesmo afirmar que a Eletrônica nasceu quando foi descoberto o primeiro dispositivo eletrônico capaz de amplificar sinais elétricos, e que foi a ***válvula a vácuo de termoemissão eletrônica.***

Mas, o que é amplificação?

Amplificação é o processo pelo qual valores de variação de grandezas de ***saída*** de um circuito elétrico, como ***corrente, tensão*** e ***potência*** elétricas, ***tornam-se maiores*** do que os respectivos valores de variação dessas grandezas, na entrada do mesmo circuito elétrico.

Em outras palavras, amplificação é o processo pelo qual as grandezas elétricas na saída de um circuito elétrico são maiores do que as grandezas elétricas do circuito de entrada, que as produz.

O termo ***ganho*** é muito usado e tende a significar o mesmo que amplificação. Em termos matemáticos, ganho é a razão entre o sinal de saída e o sinal de entrada.

As fórmulas seguintes são empregadas para determinar o ganho de corrente, tensão e potência em circuitos elétricos.

$$G_i = \frac{i_C}{i_E} \qquad (19.1)$$

G_i = ganho de corrente

i_C = corrente do sinal de saída

i_E = corrente do sinal de entrada

$$G_V = \frac{v_C}{v_E} \qquad (19.2)$$

G_V = ganho de tensão

v_C = tensão do sinal de saída

v_E = tensão do sinal de entrada

$$G_p = \frac{p_C}{p_E} \qquad (19.3)$$

G_p = ganho de potência

p_C = potência do sinal de saída

p_E = potência do sinal de entrada

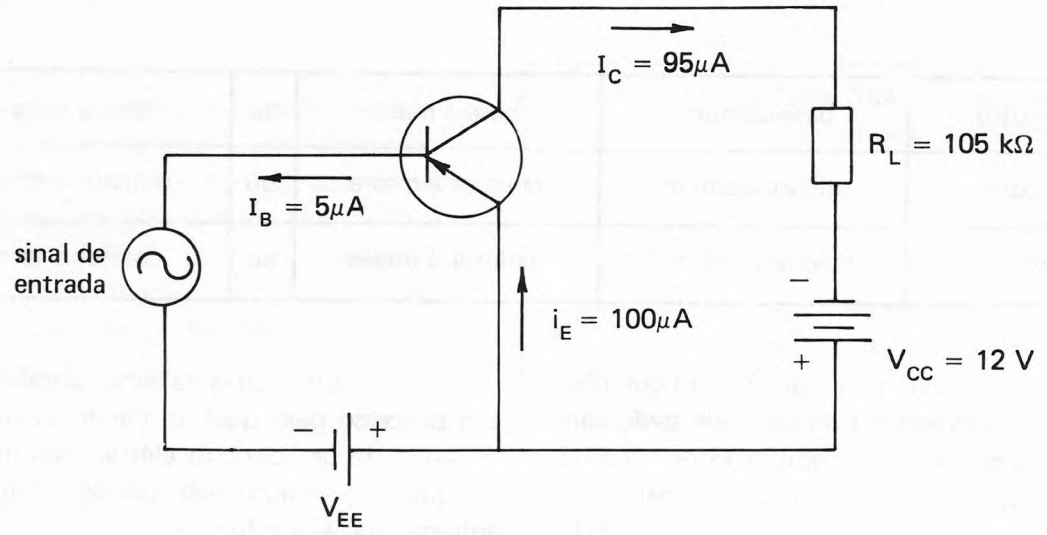


Fig. 10 – Ganho de corrente (configuração emissor-comum)

7 - O transistor como amplificador de corrente

Vamos examinar aqui, o mesmo circuito da figura 5, considerado, agora, na configuração ***emissor-comum,*** conforme o esquema apresentado na figura 10.

Observe que teremos um apreciável ganho de corrente, que pode ser determinado através da fórmula 19.1.

$$G_I = \frac{I_C}{I_B} \Rightarrow G_I = \frac{95\mu A}{5\mu A} \Rightarrow G_I = 19$$

Conclui-se que o transistor também pode ser considerado um dispositivo de ganho de corrente, se for ligado na configuração emissor-comum.

Isto permite que você conheça, agora, uma importante propriedade do transistor, que decorre, na realidade, do "efeito transistor" (estudado na lição nº 18), e que se resume na afirmativa:

A corrente de coletor é diretamente proporcional à corrente de base: $I_C \sim I_B$.

Quando você estudou o "efeito transistor", viu que os portadores de carga provenientes do emissor atravessavam a região de base, chegando ao coletor quase que em sua totalidade, e que apenas reduzido número deles era capturado pela base. Você viu, também, que a corrente de emissor é igual à soma das correntes de base e de coletor.

$$I_E = I_C + I_B \qquad (19.4)$$

Na realidade, a porção dos portadores de carga provenientes do emissor, injetados na base, são uma medida de proporcionalidade da própria corrente de emissor e de coletor, o que pode ser expresso da seguinte forma:

$$I_E = K \times I_B = I_C + I_B \qquad (19.5)$$

8 - Amplificador base-comum

Observe a figura 11. Em (a) desta figura está ilustrado um circuito na configuração ***base-comum,*** sendo o transistor de tipo PNP. Em (b), (c) e (d) estão ilustradas as diversas formas de ***onda*** dos sinais de entrada e de saída do referido circuito.

Simplificadamente, o sinal de entrada é tomado como sendo uma onda de forma ***senoidal.*** Na prática, os sinais freqüentemente se apresentam com formas de ondas mais complexas do que uma única senoidal.

Acompanhe, agora, a descrição do que acontece no circuito da figura 11.

- quando a tensão de entrada v_e aumenta, cresce igualmente a polarização direta entre emissor e base;

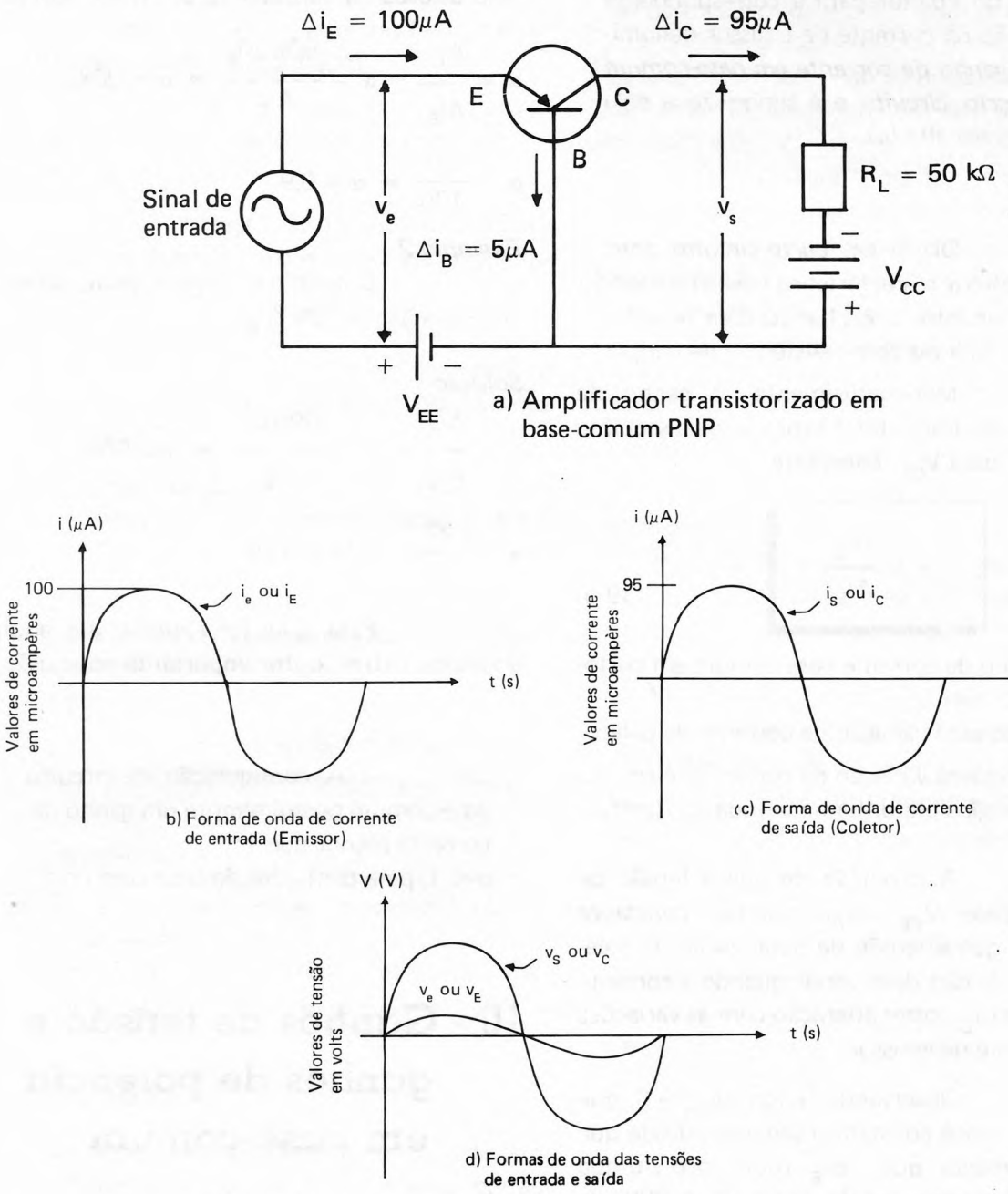


Fig. 11 – Circuito e formas de onda de um amplificador transistorizado base-comum.

- conseqüentemente, ocorre a elevação da corrente de emissor e a correspondente elevação da corrente de coletor;
- esta variação da corrente de coletor produz na saída, sobre a resistência de carga R_L, uma forma de onda de tensão semelhante às ondas de corrente do emissor e do coletor;
- esta forma de onda de tensão é, pois, igualmente "senoidal" e "em fase".

Quando estudou a corrente alternada, você viu que ***duas ondas senoidais estão em fase quando seus semiciclos coincidem:*** positivo com positivo e negativo com negativo.

9 - Ganho de correntes em base-comum em curto-circuito

Para transistores de junção, que são os do tipo que estamos considerando (PNP), a variação na corrente de coletor é de 90 a 99% da variação na corrente de emissor.

Atente, pois, para esta importante propriedade do transistor:

A razão da variação na corrente de coletor para a correspondente variação na corrente de emissor denomina-se ***ganho de corrente em base-comum em curto circuito*** e é simbolizada pela letra grega alfa (α).

Diz-se em ***curto-circuito*** porque o parâmetro α (característica básica) é medido com o transistor trabalhando com resistência de carga nula ou zero-resistência de carga (*).

Matematicamente, o ganho de corrente do transistor é expresso pela seguinte fórmula, para V_{CE} ***constante:***

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \qquad (19.6)$$

α = ganho de corrente base-comum em curto-circuito.

Δi_C = pequena variação na corrente de coletor

Δi_E = pequena variação na corrente de emissor com a tensão coletor-base mantida constante.

A condição de que a tensão de coletor-base V_{CE} seja mantida ***constante*** significa que a tensão de polarização de coletor (V_{CC}), não deve variar quando a corrente de coletor i_C sofrer alteração com as variações da corrente de emissor.

Observando a fórmula 19.6, que define α, você constata o seguinte: desde que Δi_C é menor que Δi_E (pois você viu que Δi_C está compreendido entre 90 e 99% de Δi_E) α será, evidentemente, ***menor que 1,*** ainda que muito próximo da unidade.

Temos, pois, o seguinte:

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} < 1$$

Para fixar esta conclusão, que é muito importante, vamos efetuar dois exercícios numéricos.

Exemplo 1

Determinar o valor de α, sabendo-se que $\Delta i_C = 90\%\ \Delta i_E$.

Solução

A determinação do valor de α é feita através da fórmula 19.6. Então, tem-se:

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \Rightarrow \alpha = \frac{90\%\ \Delta i_E}{\Delta i_E} \Rightarrow \alpha = 90\%$$

$$\alpha = \frac{90}{100} \Rightarrow \alpha = 0{,}9$$

Exemplo 2

Determinar o valor de α, sabendo-se que $\Delta i_C = 99\%\ \Delta i_E$.

Solução

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \Rightarrow \alpha = \frac{99\%\Delta i_E}{\Delta i_E} \Rightarrow \alpha = 99\%$$

$$\alpha = \frac{99}{100} \Rightarrow \alpha = 0{,}99$$

Pelo que foi exposto até aqui, podemos extrair outra importante conclusão:

A configuração de circuito base-comum possui sempre um ganho de corrente menor que 1:
$\alpha < 1$, para configuração base-comum.

10 - Ganhos de tensão e ganhos de potência em base-comum

O que vai ser dito a seguir pode parecer surpreendente: ***apesar de o ganho de corrente ser menor do que a unidade, os ganhos de tensão e de potência podem alcançar valores significativamente elevados.***

Você, porém, já conhece a explicação para este fato. É que a resistência do circuito de entrada é baixa (cerca de uma centena de ohms), enquanto a resistência do circuito de saída é bastante alta (cerca de centenas de milhares de ohms). Em um bom transistor alcança 1 M ohm.

Recorde que o fenômeno ocorre porque o circuito de entrada polariza a junção emissor-base diretamente, vencendo a barreira de potencial da junção e reduzindo a resistência elétrica do circuito de entrada, enquanto o circuito de saída polariza a junção base-cole-

(*) Você compreenderá este conceito a seu tempo, quando em trabalho prático medir experimentalmente o parâmetro α.

tor inversamente, aumentando a barreira de potencial e a resistência elétrica do circuito de saída.

Assim, com um sinal aplicado ao emissor, uma variação na corrente, que flui (se movimenta) através de um circuito de muito baixa resistência, é acompanhada praticamente pela mesma variação de corrente de coletor no circuito de saída. A única diferença é que a resistência de carga do circuito de saída do transistor poderá ser extremamente elevada.

Em consequência, um alto ganho de tensão (G_V), tanto quanto um alto ganho de potência (G_p), podem ser obtidos.

Vamos estudar esta conclusão detalhadamente, dada a sua importância.

De acordo com a definição de ganho, vista no capítulo 6 desta lição, podemos escrever:

$$G_v = \frac{\Delta v_S}{\Delta v_E} \qquad (19.7)$$

$$G_v = \frac{\Delta i_C R_L}{\Delta i_E r_E} \qquad (19.8)$$

Δv_S = variação da tensão de saída

Δv_E = variação da tensão de entrada

Δi_C = variação da corrente de coletor

Δi_E = variação da corrente de emissor

R_L = resistência de carga do circuito de saída

r_E = resistência do circuito de entrada (é usada letra "r" minúscula, porque a resistência de entrada varia com a tensão).

Há uma diferença entre a expressão dada para G_V do capítulo 6 e a fórmula 19.7. É que há ***dois tipos de ganho: o ganho estático e o ganho dinâmico.*** O ganho estático (fórmula 19.2) mede o ganho entre os valores absolutos da grandeza elétrica na entrada e na saída. O ganho dinâmico mede as ***variações*** dos valores absolutos da grandeza, elétrica na entrada e na saída. Futuramente estas diferenças serão tratadas com mais detalhes.

Exemplo 1

Determinar o ganho de tensão para os seguintes valores, que são valores normais:

$$\Delta i_C = 99\%\,\Delta i_E \quad \text{e} \quad \frac{R_L}{r_E} = 500.$$

Solução

Aplicando-se a fórmula 19.8, tem-se:

$$G_v = \frac{\Delta i_C R_L}{\Delta i_E r_E} \Rightarrow G_v = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \times \frac{R_L}{r_E}$$

$$G_v = \frac{0{,}99\Delta i_E}{\Delta i_E} \times 500 \Rightarrow G_v = 0{,}99 \times 500$$

$$G_v \cong 500$$

Você viu no capítulo 6 que o ganho de potência podia ser determinado através da relação entre a potência do sinal de saída e a potência do sinal de entrada (fórmula 19.3).

Pode-se deduzir uma outra fórmula para o cálculo do ganho de potência lembrando que: $p = i^2 \times R$ (potência em função da corrente e resistência). Então, substituindo-se esta última expressão da potência na fórmula 19.3, tem-se:

$$G_p = \frac{P_S}{P_E}$$

$$G_p = \frac{(\Delta i_C)^2 R_L}{(\Delta i_E)^2 r_E} \qquad (19.9)$$

Exemplo 2

Determine o ganho de tensão e o ganho de potência para o circuito esquematizado na figura 12, considerando que a resistência do circuito de entrada (r_E) é igual a 100Ω.

Solução

Para determinarmos o ganho de potência, vamos aplicar a fórmula 19.8.

$$G_v = \frac{\Delta i_C R_L}{\Delta i_E r_E} \Rightarrow G_v = \frac{95 \times 10^{-6} \times 50 \times 10^3}{100 \times 10^{-6} \times 10^2}$$

$$G_v = 475$$

A determinação do ganho de potência é feita através da fórmula 19.9.

$$G_p = \frac{(\Delta i_C)^2 R_L}{(\Delta i_E)^2 r_E} \Rightarrow G_p = \frac{(95 \times 10^{-6})^2 \times 50 \times 10^3}{(100 \times 10^{-6})^2 \times 100}$$

$$G_p = 451$$

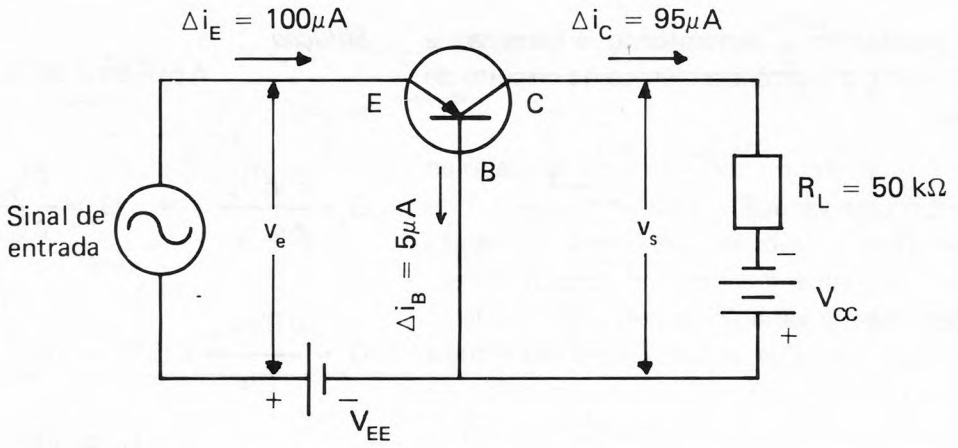


Fig. 12 – Amplificador transistorizado em base-comum PNP.

Vamos aproveitar este mesmo exemplo, para ressaltar um conceito importante, através do cálculo do ganho de corrente (G_i). Então, aplicando-se a fórmula 19.1, tem-se:

$$G_i = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \Rightarrow G_i = \frac{95 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-6}} \Rightarrow G_i = 0{,}95$$

Observe que o ganho de corrente (G_i) é igual ao valor de α, se este tivesse sido calculado pela fórmula 19.6. Mas, ***G_i não é α***.

Na realidade, α é o máximo valor limite para o ganho de corrente de um dado transistor, e é um parâmetro (ou seja, característica) do transistor, independentemente do valor da resistência de carga. Por outro lado, ***o ganho G_i do amplificador será diferente para diferentes resistências de carga.***

Fixe, então, os seguintes conceitos:

- α é um parâmetro do transistor e não depende da resistência da carga.
- G_i é uma variável dependente da resistência de carga do circuito.

(configuração base-comum)

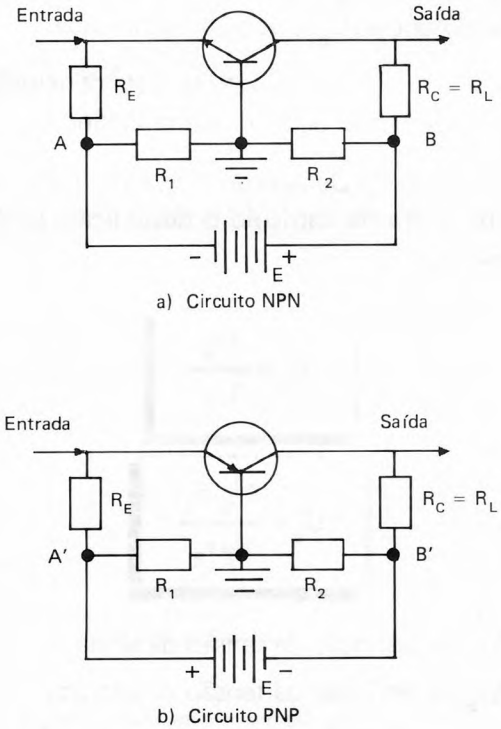


Fig. 13 – Amplificadores com base-comum.

11 - Circuitos práticos de amplificadores em base-comum

Observe a figura 13 (a) e (b), que mostra dois amplificadores com base-comum. Em (a) o amplificador é com transistor NPN, enquanto em (b) o amplificador é com transistor PNP.

- note que a base é aterrada (base à terra) em ambos os circuitos, sendo o elemento comum ou elemento de referência tanto para o circuito de entrada quanto para o circuito de saída;
- nestes tipos de circuito o sinal de entrada é introduzido no emissor e o sinal de saída é retirado no coletor;
- os resistores R_1 e R_2 são um divisor de tensão para se obter as corretas polarizações no transistor;
- veja que a terra ou base em (a) é mais "positiva" que o ponto A que corresponde ao emissor;
- ora, sabemos que a polarização para um transistor NPN, circuito emissor-base, é "emissor-negativo" e "base-positiva", o que se verifica em (a);

- já em (b), por ser um transistor PNP, a base deve ser mais "negativa" que o emissor, o que também acontece;

- observe, agora, os circuitos de coletor. No caso do transistor NPN, a polarização inversa aponta "base negativa em relação ao coletor", o que ocorre; no caso do transistor PNP, a polarização inversa base-coletor pede "base mais positiva", o que é obtido.

Assim, ambos os circuitos conseguem as polarizações adequadas para o seu correto funcionamento. Os valores dos resistores R_1 e R_2 dependerão do ***ponto de trabalho*** do transistor, como você verá mais adiante.

O circuito ***base-emissor*** não é tão freqüentemente usado, quando se deseja ganho, porque ***não ocorre ganho de corrente.*** Sua vantagem aparece quando temos um estágio de circuito anterior, tomado como fonte de sinal, com uma resistência de saída muito baixa, e o circuito de carga é outro estágio de circuito, com resistência de entrada muito alta. Neste caso acontece que:

— o circuito base-comum funciona como um circuito de adaptação de impedâncias, denominado ***circuito "casador de impedâncias".***

Exemplo de aplicação típica:

Você tem uma aplicação típica do circuito base-comum quando ocorre a necessidade de ***acoplar*** (unir, ligar) um estágio inicial de antena em um receptor de TV ou de FM, que é de baixa impedância (75 ohms ou 300 ohms), a um estágio de amplificação de alta impedância de entrada.

Veja, no quadro abaixo, quais são os valores típicos de ganho e de resistência para um ***amplificador base-comum:***

ganho de corrente	entre	0,85	e 0,99
ganho de tensão	entre	100	e 1 500
ganho de potência	entre	50	e 1 500
resistência de entrada	entre	25 Ω	e 75 Ω
resistência de saída	entre	800 kΩ	e 2 MΩ

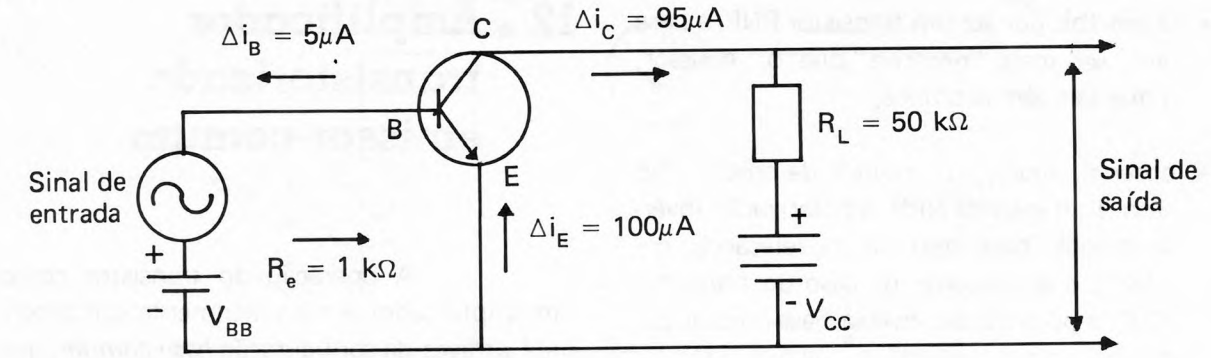
12 - Amplificador transistorizado emissor-comum

A operação do transistor como um amplificador é mais facilmente compreendida através da configuração ***base-comum,*** que você acabou de ver no capítulo 8, mas a configuração ***emissor-comum,*** ilustrada na figura 14 (a) é mais usada, em geral, nas aplicações práticas. Observe:

- no circuito transistorizado emissor-comum, a entrada é aplicada à base, ou, mais propriamente, entre base e emissor;
- quando um sinal é aplicado entre base e emissor de um transistor NPN, em configuração emissor-comum, a tensão e a corrente de entrada estão "em fase", ou seja, quando a tensão de entrada cresce positivamente, a corrente de base também cresce positivamente;
- isto você pode verificar facilmente: quando a tensão de base fica mais positiva em relação ao emissor, estamos incrementando (aumentando) a polarização direta da junção base-emissor;
- conseqüentemente, aumenta a corrente de emissor e aumentam, por isso, também as correntes de base e de coletor (como você já sabe);
- pode-se ampliar a afirmação acima, dizendo que:

Em um transistor NPN em configuração ***emissor-comum***, a tensão de entrada e as correntes de base, emissor e coletor estão todas "em fase".

- Isto você verifica em (b), (c) e (d) da figura 14.



a) amplificador transistorizado emissor-comum (NPN)

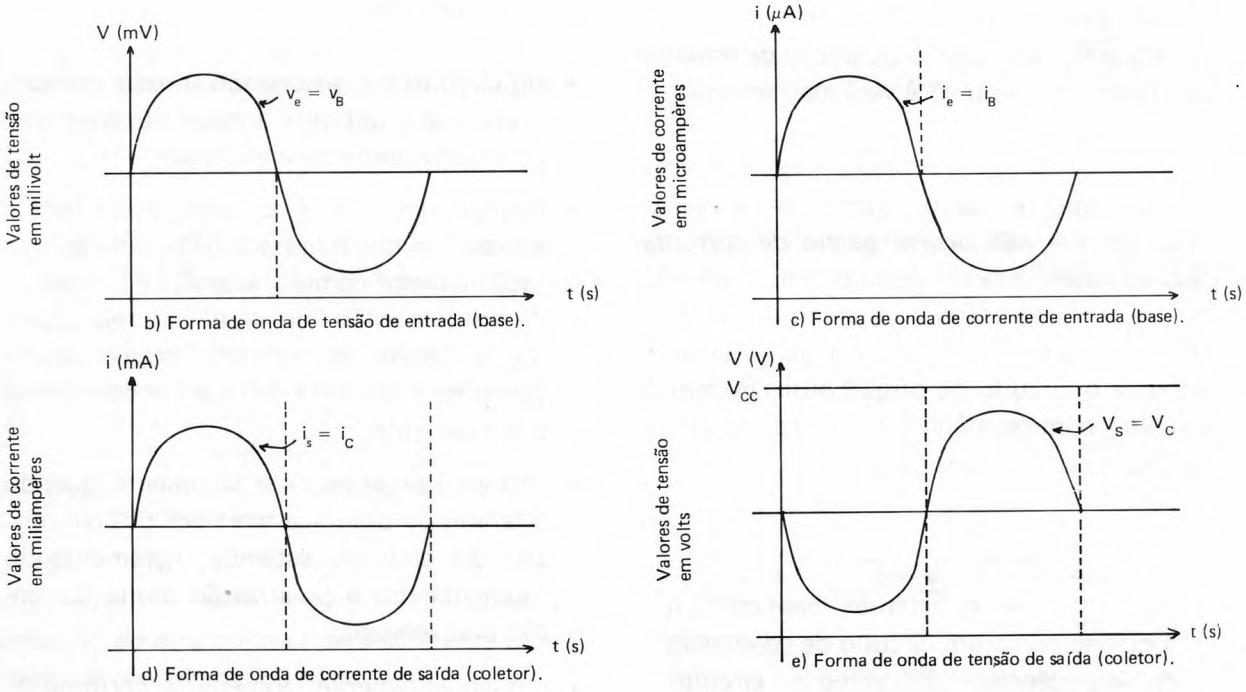


Fig. 14 — Circuito e formas de onda de um amplificador transistorizado emissor-comum (NPN).

13 - Regras práticas para variações de grandezas elétricas em um transistor

Você vai tomar conhecimento, agora, de duas regras práticas, extremamente valiosas e ao mesmo tempo surpreendentemente simples, que vão ajudar você a saber como reagem as correntes em um circuito transistorizado, de qualquer tipo (PNP ou NPN) e de qualquer configuração (base-comum, emissor-comum ou coletor-comum). São as seguintes:

I — Regra da identidade de fase das correntes:

As correntes de sinal de base, emissor e coletor estão sempre "em fase" (afirmação que é óbvia, tendo-se em vista o fenômeno físico do "efeito transistor"— válido para freqüências baixas).

II — Regra do sentido de variação do potencial de base:

Quando o valor do potencial de base varia no sentido do potencial de coletor, todas as correntes aumentam no transistor.

Quando o valor do potencial de base varia no sentido do potencial de emissor, todas as correntes decrescem (diminuem) no transistor.

Comprovação das regras I e II:

Volte a observar a figura 14. Vamos comprovar, agora, as regras I e II, tomando como exemplo essa figura.

A regra I se comprova pela simples observação das formas de onda em (b), (c) e (d).

A regra II, que não é tão óbvia quanto a primeira, requer mais atenção. Note o seguinte:

- no circuito ilustrado em (a), sendo o transistor de tipo NPN, a base é mais positiva que o emissor e o coletor é mais positivo que a base;
- a tensão de coletor em valor absoluto, isto é, em amplitude, é sempre superior à tensão de base;
- no caso do transistor de tipo NPN, a base é positiva em relação ao emissor e a tensão de coletor também é positiva, porém "mais positiva ainda", isto é, a um valor positivo mais alto que o da base.

Exemplo 1:

Se a tensão de emissor for 0 volt, a base poderá ter +0,6 volt, e o coletor +3 volts. Logo, a tensão de coletor +3 volts é ***mais positiva*** que a tensão da base +0,6 volt.

Exemplo 2:

Ainda, para maior facilidade de compreensão, suponha que o sinal de entrada eleve o potencial da base para +0,7 volt. Ora, a variação do potencial de base ***fo: no sentido de se aproximar do potencial do coletor,*** que é de +3 volts (antes da variação do sinal de entrada). De fato, a diferença +(3 − 0,7) = +2,3 V ***é menor que*** a diferença inicial +(3 − 0,6) = +2,4 V. Logo, o potencial de base "caminhou" no sentido de se igualar ao potencial de coletor: passou de +0,6 V para +0,7 V.

A regra II diz que, neste caso, todas as correntes aumentam no transistor. Este aumento é simples decorrência do fato de que a polarização direta entre base e emissor, que era de +0,6 V, aumentou para +0,7 V, o que resulta, como você sabe, em incremento (aumento) das correntes no transistor ("efeito transistor").

Exemplo 3:

Suponha, agora, que o potencial de base passou de +0,6 V para + 0,5 V. Ora, o potencial de base variou no sentido do potencial de emissor, isto é, ficou mais próximo deste. A diferença, que era de +0,6 V, diminui para +0,5 V.

A regra II diz que, neste caso, todas as correntes decrescem (diminuem). Isto você comprova observando simplesmente que a polarização direta entre base e emissor diminuiu, passando de +0,6 V para +0,5 V, o que reduz as correntes no transistor (novamente ocorre o "efeito transistor").

Conclusões:

1a.) Deve-se ter em mente que o transistor existe sob a forma de dois tipos básicos, PNP e NPN, e que pode ser ligado a outros transistores de uma infinidade de maneiras, com baterias positivas ou negativas no circuito.

2a.) A regra II ***não depende*** do tipo de transistor (se é PNP ou NPN), assim como ***não depende*** da polaridade das baterias do circuito. Leva em consideração apenas os valores dos potenciais dos três elementos: base, emissor e coletor.

3a.) Portanto, basta conhecer os valores dos potenciais de base, emissor e coletor, para que você esteja apto a, "num piscar de olhos", saber o que acontece com as correntes no transistor, quando há uma variação no potencial de base.

14 - Inversão de polaridade do sinal de saída em um amplificador emissor-comum

Reveja a figura 14(e):

- em (e) dessa figura, a forma de onda da tensão no coletor está "defasada" de 180° (cento e oitenta graus) da forma de onda da tensão na base, ou seja, as formas de onda de tensão de entrada e de saída em um amplificador transistorizado emissor-comum estão em "oposição de fase".

Lembre-se que:

Duas ondas senoidais estão "em oposição de fase" ou ***defasadas*** quando seus semiciclos não coincidem, ou seja, quando um é positivo, o outro é negativo, e vice-versa.

- a explicação para o fato, tal como se apresenta em (e) da figura 14 é simples:

  1°) o potencial de coletor depende da corrente de coletor, porque há uma queda de tensão na resistência de carga;

  2°) no caso do transistor NPN, quando a tensão ou potencial de base aumenta positivamente, isto quer dizer que "caminha" em direção à tensão de coletor, pela regra do sentido de variação do potencial de base (regra II), a corrente de coletor aumenta. Aumentando a corrente de coletor, aumenta a queda de tensão no resistor de carga. E, portanto, a tensão de coletor diminui positivamente de valor.

  Recapitulando: um incremento positivo da tensão de base em um transistor NPN resulta em um incremento da corrente de coletor e consequente aumento da queda de tensão sobre o resistor de carga, ***reduzindo o potencial positivo do coletor.*** Logo, um incremento positivo do potencial de base em um transistor NPN de um amplificador em configuração emissor-comum resulta em um incremento negativo do potencial de coletor.

Do que foi exposto até aqui, podemos estabelecer que:

A ***inversão da polaridade do sinal de saída em um amplificador emissor-comum,*** em relação ao sinal de entrada, é uma característica do amplificador na configuração emissor-comum e independe (isto é, ***não depende***) do tipo do transistor (NPN ou PNP).

Por que ocorre a inversão da polaridade e qual a razão de sua independência em relação ao tipo do transistor?

Leia com atenção os parágrafos seguintes.

Embora não seja evidente, a razão da inversão da polaridade e de sua independência quanto ao tipo do transistor, resulta dos fatos a seguir enunciados:

(1) O potencial do emissor é o potencial de referência do circuito (eixo ***zero*** das tensões).

(2) Quando o potencial de base se aproxima do potencial do emissor, o potencial do coletor se afasta, e vice-versa.

Demonstração:

Considerando os enunciados (1) e (2), temos que:

A — O enunciado (1) é uma decorrência da própria configuração emissor-comum (ou emissor à terra, ou emissor à massa).

B — O enunciado (2) resulta da aplicação da "regra do sentido de variação do potencial de base" (***regra II,*** que você estudou no capítulo 13 desta lição). Assim:

Quando o potencial de base se aproxima do potencial do emissor, a corrente de coletor diminui. Quando a corrente de coletor diminui, reduz a queda de tensão no resistor de carga e faz com que a tensão de coletor "se aproxime" da tensão da bateria do circuito de coletor. E isto é o mesmo que "afastar-se" da tensão de emissor. Ora, observe que:

O emissor é o potencial de referência do circuito em configuração emissor-comum.

Logo, quando o potencial de base se aproxima do potencial de emissor, verifica-se que o potencial de coletor se afasta (e vice-versa, aplicando-se o mesmo raciocínio).

Eixo ***zero*** das tensões é o eixo de referência do circuito.

Portanto, em relação ao eixo zero das tensões, os potenciais de base e de coletor possuem variações em sentidos opostos, o que quer dizer: ***oposição de fase*** ou ***polarização inversa de sinais.***

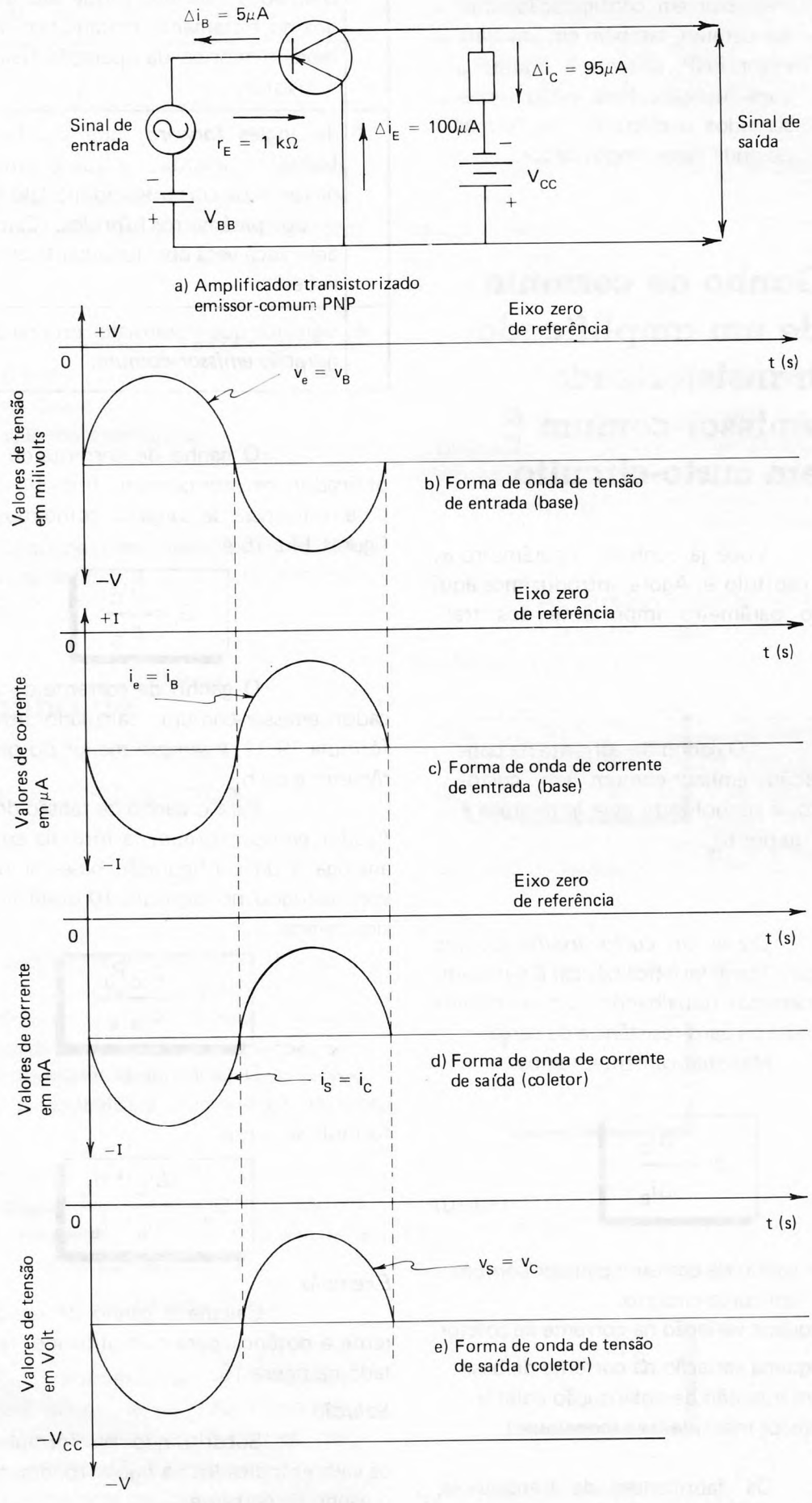


Fig. 15 — Circuito e formas de onda de um amplificador transistorizado emissor-comum PNP.

Nota:- Para constatar a inversão de polaridade do sinal amplificado pelo transistor em configuração emissor-comum, também em um transistor PNP, observe a figura 15 com atenção. Nela estão representados o circuito e as formas de onda desse amplificador.

15 - Ganho de corrente de um amplificador transistorizado emissor-comum β em curto-circuito

Você já conhece o parâmetro α, visto no capítulo 9. Agora, introduzimos aqui um novo parâmetro importante dos transistores:

O ganho de corrente na configuração emissor-comum em curto-circuito, é simbolizado pela letra grega β (beta) ou por h_{fe}.

Diz-se em ***curto-circuito*** porque o parâmetro (característica básica) β é medido com o transistor trabalhando com resistência de carga nula ou zero-resistência de carga.

Matematicamente, temos:

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \qquad (19.10)$$

$\beta = h_{fe}$ = ganho de corrente emissor-comum em curto-circuito.

Δi_C = pequena variação na corrente de coletor.

Δi_B = pequena variação na corrente de base com a tensão de polarização coletor-emissor mantida fixa (constante).

Os fabricantes de transistores, geralmente, usam entre os dados de especificação e características do transistor o símbolo h_{fe}, no qual:

h	provém da palavra ***híbrido,*** aplicada para designar parâmetros matemáticos chamados híbridos e que são utilizados no tratamento matemático de um modelo teórico da operação física do transistor.
f	do inglês ***forward,*** que significa "à frente", "adiante", e que é utilizado na razão de correntes do modelo teórico dos parâmetros híbridos. (Este modelo você verá oportunamente em suas lições).
e	significa que o transistor está na configuração ***emissor-comum.***

O ganho de corrente de um amplificador emissor-comum, trabalhando com uma resistência de carga tal como mostram as figuras 14 e 15 é:

$$G_i = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \qquad (19.11)$$

O ganho de corrente do amplificador emissor-comum, calculado através da fórmula 19.11, é sempre menor do que o parâmetro β ou h_{fe}.

Para o ganho de tensão do amplificador emissor-comum, a fórmula aplicada é análoga à da configuração base-comum, que você estudou no capítulo 10 desta lição. Assim, temos:

$$G_v = \frac{\Delta i_C R_L}{\Delta i_B r_E} \qquad (19.12)$$

O ganho de potência do amplificador emissor-comum é calculado através da fórmula seguinte:

$$G_p = \frac{(\Delta i_C)^2 R_L}{(\Delta i_B)^2 r_E} \qquad (19.13)$$

Exemplo

Calcule o ganho de tensão, corrente e potência para o amplificador representado na figura 16.

Solução

Substituindo na fórmula 19.11 os valores indicados na figura 16, determina-se o ganho de corrente:

$$G_i = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \Rightarrow G_i = \frac{95 \times 10^{-6}}{5 \times 10^{-6}} \Rightarrow \underline{G_i = 19}$$

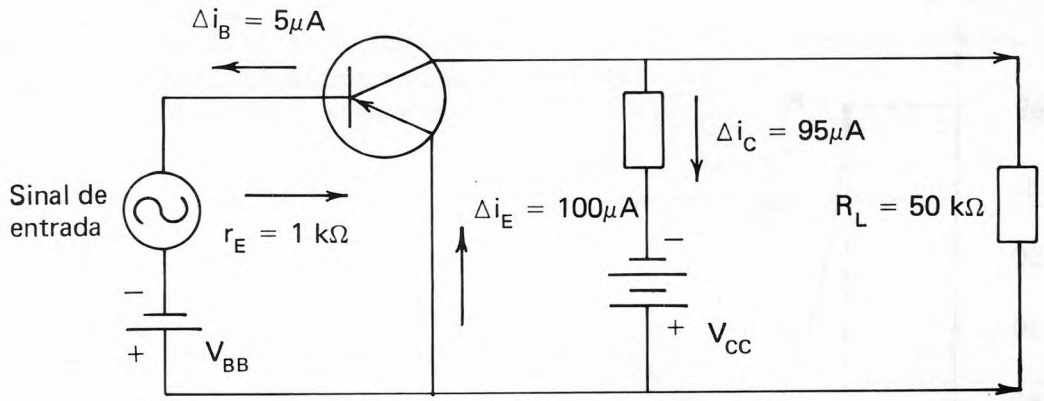


Fig. 16 — Amplificador transistorizado emissor-comum PNP.

O ganho de tensão é calculado através da fórmula 19.12.:

$$G_v = \frac{\Delta i_C R_L}{\Delta i_B r_E} \Rightarrow G_v = \frac{95 \times 10^{-6} \times 50\,000}{5 \times 10^{-6} \times 1\,000}$$

$$\underline{\underline{G_v = 950}}$$

O ganho de potência para o circuito da figura 16 será:

$$G_p = \frac{(\Delta i_C)^2 R_L}{(\Delta i_B)^2 r_E} \Rightarrow G_p = \frac{(95 \times 10^{-6})^2 \times 50\,000}{(5 \times 10^{-6})^2 \times 1\,000}$$

$$G_p = \left(\frac{95}{5}\right)^2 \times 50 \Rightarrow G_p = 19^2 \times 50$$

$$\underline{\underline{G_p = 18\,000}}$$

Por este exemplo que acabamos de resolver, você observa que o amplificador emissor-comum opera relativamente bem como amplificador de corrente. Além disso, com um valor relativamente normal de resistência de carga (da ordem de dezenas de milhares ou de centenas de milhares de ohms), pode-se afirmar:

> O amplificador na configuração emissor-comum fornece alto ganho de tensão e muito alto ganho de potência.

Se você fizer a comparação entre as duas configurações, base-comum e emissor-comum, você irá verificar que a ***configuração emissor-comum*** possui: a) alta resistência de entrada; b) menor resistência de saída; c) alto ganho de corrente; d) alto ganho de tensão; e) muito alto ganho de potência.

16 - Relação entre α e β

Uma simples relação matemática existe entre o ganho de corrente base-comum α em curto-circuito e o ganho de corrente emissor-comum β em curto-circuito.

Você já viu pela fórmula 19.4 que: $I_E = I_B + I_C$. Para pequenas variações de corrente, é válido escrever: $\Delta I_E = \Delta I_B + \Delta I_C$.

Se dividirmos esta última expressão por ΔI_C, teremos:

$$\frac{\Delta I_E}{\Delta I_C} = \frac{\Delta I_B}{\Delta I_C} + \frac{\Delta I_C}{\Delta I_C}$$

Mas, você sabe que $\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$ (fórmula 19.6) e que $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ (fórmula 19.10). Então, substituindo-se nessa expressão os valores de α e β, teremos:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\beta} + 1$$

Esta expressão pode ser rearrumada de modo a se calcular os valores de α e β, um em função do outro. Veja as fórmulas 19.14 e 19.15:

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \qquad (19.14)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \qquad (19.15)$$

As fórmulas 19.14 e 19.15 são muito importantes para a análise dos circuitos transistorizados.

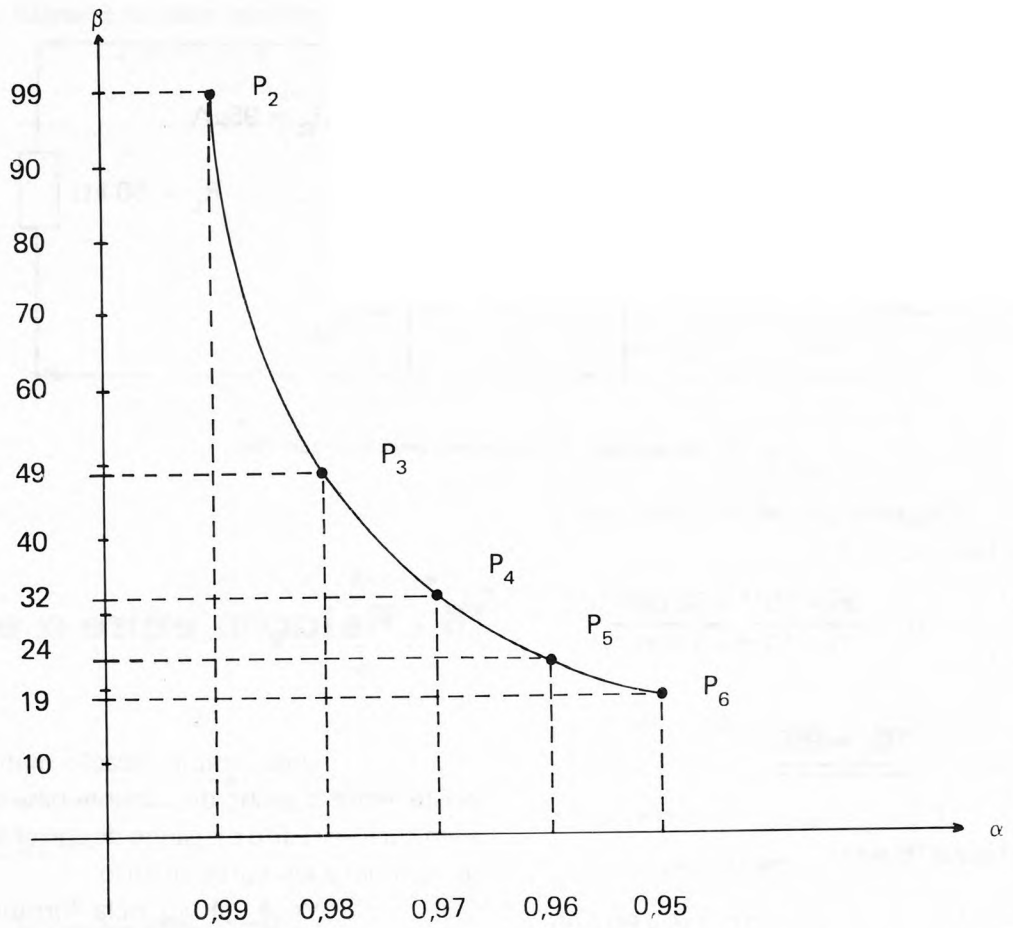


Fig. 17 – Valores de β em função de α.

Para melhor apreciação e percepção da interdependência entre α e β, observe a tabela I e o gráfico da figura 17.

Tabela I

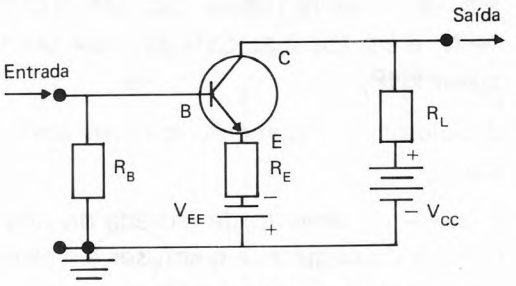
Pontos do gráfico	α	$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$
P_1	1	$\beta = \frac{1}{1-1} = \infty$
P_2	0,99	$\beta = \frac{0,99}{1-0,99} = 99$
P_3	0,98	$\beta = \frac{0,98}{1-0,98} = 49$
P_4	0,97	$\beta = \frac{0,97}{1-0,97} = 32$
P_5	0,96	$\beta = \frac{0,96}{1-0,96} = 24$
P_6	0,95	$\beta = \frac{0,95}{1-0,95} = 19$

17 - Circuitos práticos de amplificadores em emissor-comum

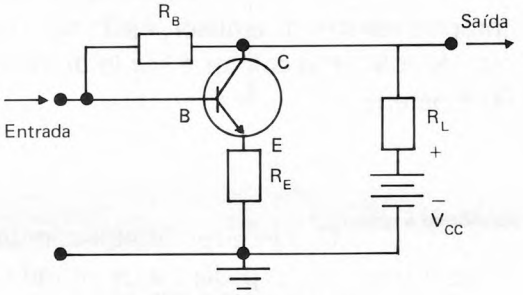
Na figura 18 (a), (b) e (c) estão representados três circuitos típicos emissor-comum:

Observe o circuito ilustrado em (a):

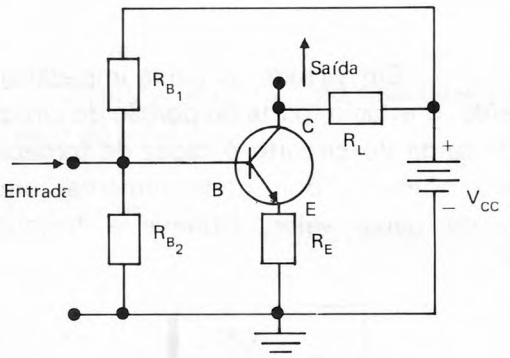
- é um circuito emissor-comum, polarizado com 2 baterias;
- você pode observar que a junção emissor-base está polarizada diretamente;
- sendo o transistor NPN, a base deve ficar a um potencial superior ao emissor, o que se registra;
- note que a base está ao potencial de terra e que o emissor está a um potencial inferior ao potencial de terra, devido à bateria V_{EE};
- a junção coletor-base está polarizada inversamente, como é requerido para o funcionamento do transistor NPN;
- a base, para polarização inversa, deve ficar



a) Circuito com 2 baterias



b) Circuito com uma bateria



c) Circuito com uma bateria

Fig. 18 — Transistor NPN: circuitos típicos em emissor-comum.

mais negativa que o coletor, o que se verifica;

- este tipo de circuito não é, contudo, prático, porque exige o emprego de duas baterias.

O circuito que é mostrado em (b) resolve a dificuldade, usando uma única bateria:

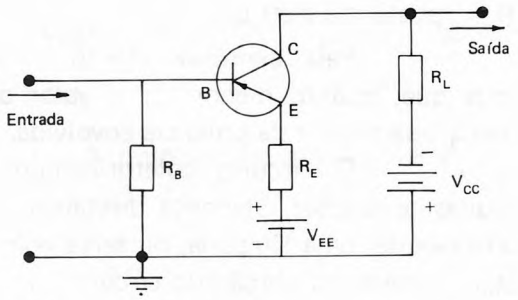
- a polarização de base em (b) é tirada diretamente do coletor, que está a um elevado potencial;
- desta maneira, não há dificuldade para a polarização direta da junção, porque a base é colocada a um potencial superior ao do emissor.

Outra solução prática é obtida com o uso do circuito que você vê em (c):

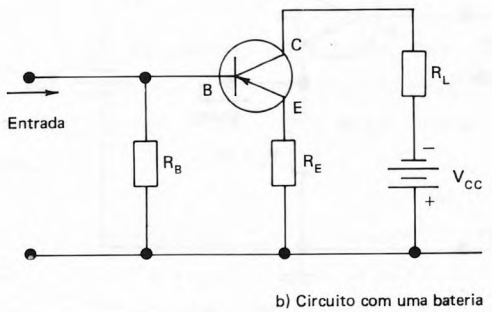
- neste caso, o potencial adequado para a base é formado por um divisor resistivo constituído pelos resistores R_{B_1} e R_{B_2}.

Os circuitos práticos, representados em (b) e (c) da figura 18, são muito utilizados e sua aplicação vai depender de uma ampla gama de fatores, que você irá estudar nas próximas lições.

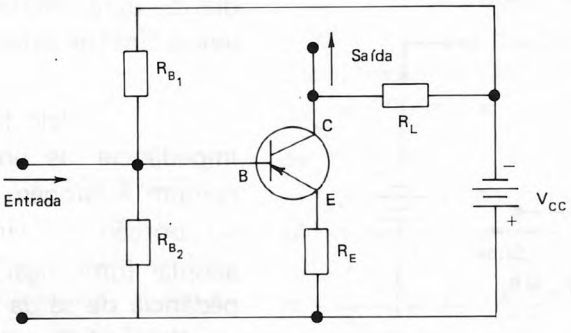
Veja, agora, na figura 19 (a), (b) e (c) os circuitos da figura anterior, só que adequados à utilização com um transistor de tipo PNP.



a) Circuito com 2 baterias



b) Circuito com uma bateria



c) Circuito com uma bateria

Fig. 19 — Transistor PNP: circuitos típicos em emissor-comum

Direitos reservados

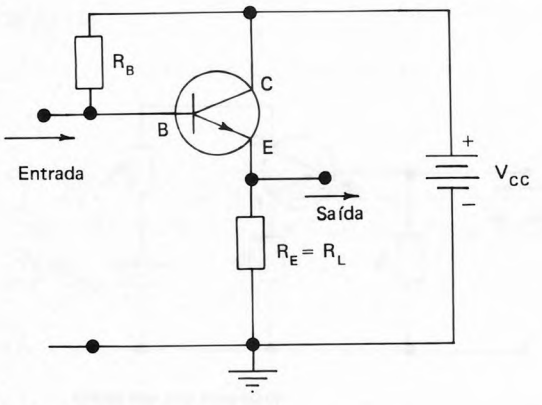
Nota: - Verifique você mesmo as condições que os circuitos oferecem para as corretas polarizações das junções do transistor, seguindo o mesmo raciocínio usado para o caso do transistor NPN da figura 18 (a), (b) e (c).

As diferenças básicas entre os circuitos, causadas pela mudança do tipo de transistor, residem unicamente na ***inversão das polaridades das baterias e, obviamente, das correntes no circuito.***

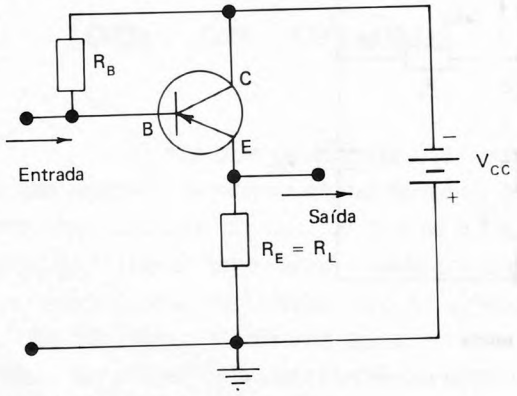
Observe que, enquanto para o ***transistor NPN o referencial de terra é negativo, para o transistor PNP é positivo.***

18 - Amplificador transistorizado coletor-comum

Dois amplificadores coletor-comum são mostrados na figura 20 (a) e (b).



a) circuito com transistor NPN



b) circuito com transistor PNP

Fig. 20 — Amplificador transistorizado coletor-comum

- em (a) o amplificador usa um transistor NPN, e em (b) o amplificador usa um transistor PNP;
- o coletor é o elemento comum neste circuito;
- a base é o elemento de entrada do sinal ou entrada do circuito, e o emissor é o elemento de saída do sinal ou saída do circuito;
- neste tipo de circuito o resistor de carga é o próprio resistor de emissor, e não há o resistor de coletor; o coletor é ligado diretamente à bateria.

O circuito coletor-comum possui uma alta impedância de entrada e uma baixa impedância de saída.

Em virtude da baixa impedância de saída, o estágio (parte ou porção do circuito) de saída do circuito é capaz de fornecer elevada potência, pois pode alimentar uma carga de baixo valor. Observe a fórmula 19.16.

$$P = \frac{V^2}{R} \qquad (19.16)$$

P = potência elétrica

V = tensão elétrica

R = resistência elétrica

Pela expressão 19.16 constatamos que, quanto menor for o valor de R, maior será o valor da potência envolvida.

O circuito coletor-comum, em muitas aplicações, alimenta diretamente um alto-falante, uma lâmpada, ou serve como estágio (parte ou porção do circuito) intermediário, para excitar um amplificador de potência final de saída.

Pelo fato de possuir uma elevada impedância de entrada, o circuito coletor-comum é também usado como ***estágio*** (parte ou porção do circuito) ***intermediário*** para acoplar (unir, ligar)um circuito de elevada impedância de saída a outro de baixa impedância, "casando" as impedâncias.

O "casamento" de impedâncias é uma operação largamente usada em Eletrônica, sendo de extrema importância.

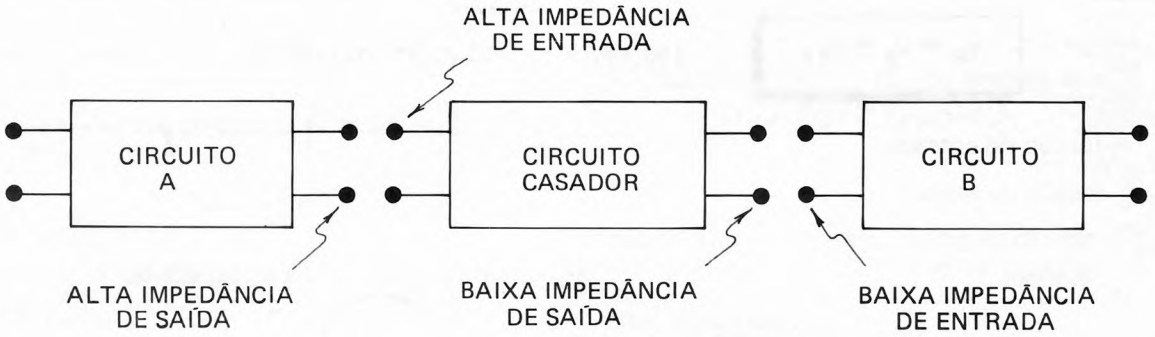


Fig. 21 — Casamento de impedâncias entre circuitos.

E, em Eletrônica, como regra geral, faz-se um "casamento de impedâncias" quando as impedâncias, vistas pelos circuitos envolvidos, se equivalem.

Veja a ilustração dessa regra na figura 21.

- o circuito A, da figura 21, possui alta impedância de saída, por isso não pode ser aplicado diretamente sobre o circuito B, que possui baixa impedância de entrada;
- para resolver o problema, lançamos mão do "circuito casador de impedâncias". Este faz com que a baixa impedância de entrada do circuito B seja vista pelo circuito A como uma alta impedância.

Em outras palavras, o ***circuito casador de impedâncias*** "reflete" para o circuito A uma alta impedância e, também, "reflete" para o circuito B uma baixa impedância.

19 - Polarizações dos sinais de entrada e de saída em um circuito coletor-comum

A polarização do sinal de saída em relação ao sinal de entrada é facilmente percebida ao se compreender o funcionamento do amplificador coletor-comum.

Tome, para exemplo, o circuito (básico) da figura 20(a), e suponha que seja aplicado um sinal que eleve o potencial da base do transistor, fazendo-o ficar mais positivo.

- Ora, tal incremento é no sentido da tensão de coletor, e você já sabe, pela "regra do sentido de variação do potencial de base" (regra II, do capítulo 13 desta lição), que a corrente no transistor se eleva;
- conseqüentemente, aumenta a queda de potencial no resistor de emissor, em relação à massa (terra do circuito), ou seja, aumenta o potencial de emissor: o emissor fica mais positivo;
- considerando que o sinal de saída é retirado do emissor, temos, finalmente, que para um incremento positivo do sinal de entrada, resultará um incremento positivo do sinal de saída;
- evidentemente, para um sinal com incremento negativo (declínio do potencial de base), haverá redução da corrente do transistor e a conseqüente redução da queda de potencial no emissor, o que resulta em um incremento negativo no sinal de saída.

Conclusões

Chega-se, pois, a uma característica importante do circuito coletor-comum:

O sinal de saída "segue" o sentido de variação do sinal de entrada. Por isso, o circuito coletor-comum é também chamado de ***seguidor de emissor.***

Isso significa que não varia a polaridade do sinal de entrada, ao passar pelo transistor. Ou, em outras palavras, ***o sinal de entrada e de saída estão em fase.***

Outra característica importante do circuito coletor-comum é que a tensão de

saída é sempre menor que a tensão de entrada, pois em qualquer momento tem-se a relação:

$$V_E = V_S + V_{BE} \qquad (19.17)$$

V_E = tensão de entrada

V_S = tensão de saída

V_{BE} = tensão de polarização direta entre base e emissor

Como V_{BE} é sensivelmente constante (sua variação é desprezível em comparação com a variação do sinal de entrada), temos:

$$V_S = V_E - V_{BE} \qquad (19.18)$$

Em um circuito coletor-comum, ou seguidor de emissor, os sinais de entrada e de saída estão em fase e o ***ganho de tensão é menor que 1.***

O circuito coletor-comum, entretanto, possui alto ganho de corrente e alto ganho de potência. Mas, o aspecto mais importante deste circuito é o seguinte:

Em um circuito coletor-comum, ou seguidor de emissor, ***a resistência de entrada é muito alta e a resistência de saída é muito baixa.***

Observe, na figura 22, as formas de onda em um amplificador coletor-comum.

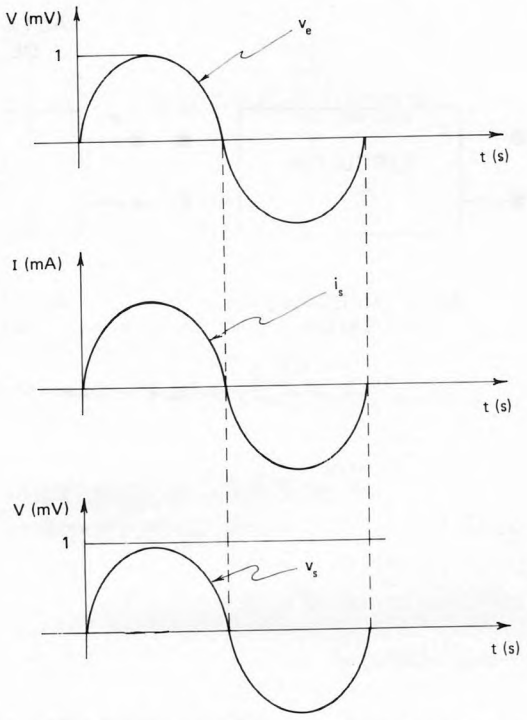


Fig. 22 — Formas de onda em um amplificador coletor-comum.

20 - Sumário dos circuitos amplificadores básicos a transistor

Na Tabela II, abaixo, estão reunidas as propriedades básicas dos amplificadores transistorizados, usados nas três configurações: emissor-comum, base-comum e coletor-comum.

Tabela II

Sumário comparativo das características dos três amplificadores básicos a transistor			
Característica	*emissor-comum*	*base-comum*	*coletor-comum*
Ganho de corrente	**alto** (10 — 100)	**baixo** (0,85 — 0,99)	**alto** (10 — 100)
Ganho de tensão	**alto** (100 — 5 000)	**alto** (100 — 1 500)	**baixo** (0,95 — 0,99)
Ganho de potência	**alto** (1 000 — 25 000)	**baixo** (50 — 1 500)	**baixo** (10 — 50)
Impedância de entrada	**média** (1 800 — 1 200 Ω)	**baixa** (25 — 750 Ω)	**alta** (50 kΩ — 2 MΩ)
Impedância de saída	**média** (50 kΩ — 100 kΩ)	**alta** (800 kΩ — 2 MΩ)	**baixa** (50 — 100 Ω)

Exame

CIRCUITOS BÁSICOS E POLARIZAÇÃO DE TRANSISTORES
REFERÊNCIA 035

Observações Para o Aluno

- Antes de responder as questões você deverá ter feito um estudo minucioso e completo desta lição.
- Agora, leia cada questão até compreender bem o que se pede.
- Cada questão apresenta várias soluções. Apenas uma solução é correta.
- Em cada questão indique a solução que você julgar correta e, a seguir, transcreva, com atenção, as suas respostas para a Folha de Respostas, anexa.

1. Um elemento de circuito é chamado de passivo quando:
   a) não há amplificação de tensão
   b) não há amplificação de corrente
   c) não há amplificação de potência
   d) não há amplificação de sinal

2. Um exemplo de elemento ativo é:
   a) resistor
   b) capacitor
   c) transformador
   d) transistor

3. O transistor é um elemento de circuito que consegue transferir do circuito de entrada ao circuito de saída uma mesma:
   a) tensão
   b) corrente
   c) potência
   d) resistência

4. O circuito emissor-base de um transistor possui:
   a) baixa resistência interna
   b) elevada resistência interna
   c) baixa estabilidade térmica
   d) alta estabilidade térmica

5. A configuração de um circuito a transistor em que o emissor faz parte dos circuitos de entrada e de saída chama-se:
   a) base-comum
   b) coletor-comum
   c) emissor-comum
   d) emissor aberto

6. Em relação ao sinal alternado, a fonte de alimentação é considerada um:
   a) circuito aberto
   b) circuito fechado
   c) circuito de polarização
   d) circuito de estabilização

7. A configuração de circuito em que há amplificação de corrente chama-se:
   a) base à terra, base à massa ou base-comum
   b) coletor à terra, coletor à massa ou coletor-comum
   c) emissor à terra, emissor à massa ou emissor-comum
   d) coletor aberto

Direitos reservados

8. A configuração base-comum apresenta:
   a) alta resistência de entrada e baixa resistência de saída
   b) baixa resistência de entrada e baixa resistência de saída
   c) alta resistência de entrada e alta resistência de saída
   d) baixa resistência de entrada e alta resistência de saída.

9. A configuração emissor-comum apresenta:
   a) alta resistência de entrada e baixa resistência de saída.
   b) baixa resistência de entrada e baixa resistência de saída.
   c) média resistência de entrada e média resistência de saída.
   d) baixa resistência de entrada e alta resistência de saída.

10. A configuração coletor-comum apresenta:
    a) alta resistência de entrada e baixa resistência de saída.
    b) baixa resistência de entrada e baixa resistência de saída.
    c) alta resistência de entrada e alta resistência de saída.
    d) baixa resistência de entrada e alta resistência de saída.

11. Em um circuito emissor-comum temos:
    a) baixo ganho de corrente e sinal de saída em fase com o de entrada.
    b) alto ganho de corrente e sinal de saída defasado de 180° com o de entrada
    c) baixo ganho de tensão e sinal de saída em fase com o de entrada
    d) baixo ganho de potência e sinal de saída defasado de 180° com o de entrada

12. Em um circuito coletor-comum verifica-se que:
    a) a tensão de saída está defasada de 180° com a de entrada e é alto o ganho de tensão
    b) a tensão de saída está defasada de 180° com a de entrada e é baixo o ganho de tensão
    c) a tensão de saída está em fase com a de entrada e o ganho de tensão é menor que 1
    d) a tensão de saída está em fase com a de entrada e o ganho de tensão é maior que 1

13. O ganho de corrente "α" é:
    a) a razão entre as correntes de base e de coletor
    b) a razão entre as correntes de coletor e de emissor
    c) a razão entre as correntes de base e de emissor
    d) a razão entre as correntes de emissor e de coletor

14. O ganho de corrente "β" é:
    a) a razão entre as correntes de coletor e de base
    b) a razão entre as correntes de coletor e de emissor
    c) a razão entre as correntes de base e de emissor
    d) a razão entre as correntes de base e de coletor

15. Quando a tensão de base em um transistor NPN, ligado na configuração emissor-comum, sofre um decréscimo de tensão, verifica-se:
    a) todas as correntes do circuito aumentam.
    b) a tensão de saída de coletor sofre uma queda positivamente.
    c) todas as correntes do circuito diminuem.
    d) a corrente de base decresce e a de coletor cresce.

16. Quando a tensão de base em um transistor PNP, ligado na configuração emissor-comum, aumenta negativamente, ocorre:
    a) a tensão de saída de coletor fica mais negativa e a corrente de coletor aumenta.
    b) a tensão de saída de coletor fica mais positiva e a corrente de coletor aumenta.
    c) todas as correntes decrescem.
    d) a corrente de base diminui e a de coletor aumenta.

17. Quando a tensão de base em um transistor NPN, ligado na configuração coletor-comum, aumenta positivamente, temos:
    a) a corrente de coletor e a tensão de emissor aumentam positivamente.
    b) a corrente de base e a tensão de coletor aumentam positivamente.
    c) todas as correntes diminuem.
    d) a corrente de base e a tensão de emissor sofrem um incremento negativo.

18. Em um transistor PNP, na configuração base-comum:
    a) quando a tensão de emissor se afasta da tensão de base, todas as correntes sofrem um incremento negativo.
    b) quando a tensão de emissor se aproxima da tensão de base, aumenta negativamente a tensão de coletor com redução da corrente de coletor.
    c) quando a corrente de emissor aumenta, a tensão de coletor aumenta negativamente.
    d) quando a corrente de coletor aumenta, a tensão de emissor diminui positivamente.

Direitos reservados