

A saída é mínima quando R_2 vale zero:

$$V_{S(\min)} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{0}{470}\right) = 1,25 \text{ V}$$

2. No exemplo 1, qual deve ser a mínima tensão de entrada para que o circuito funcione para qualquer valor da saída?

Solução:

Para que a saída seja regulada, é necessário que a entrada seja 2,5 V maior que a tensão de saída; portanto, a entrada deve ser: $10 + 2,5 = 12,5 \text{ V}$.

Capítulo 5

Amplificadores



Existem basicamente dois tipos de amplificadores: os de pequenos sinais e os de potência.

A função dos amplificadores de pequenos sinais, chamados de pré-amplificadores, é aumentar a amplitude do sinal da ordem de mV fornecido por uma fonte, como um microfone, toca-CD etc. Esses amplificadores operam na região linear das curvas características e, portanto, a distorção (deformação) do sinal é minimizada. Outra característica desses modelos é permitir a análise usando parâmetros com valores praticamente constantes, pelo fato de o transistor estar operando na região linear. Esses sinais, mesmo depois de amplificados, não possuem potência suficiente para fazer um alto-falante funcionar.

Os amplificadores de potência têm como finalidade ampliar o sinal fornecido pelos pré-amplificadores o suficiente para fazer um alto-falante funcionar.

Acoplar significa deixar passar apenas o sinal, bloqueando a componente contínua.

5.1 Capacitores de acoplamento

Um capacitor de **acoplamento** faz a passagem de um sinal CA de um ponto a outro, sem perda significativa do sinal. Por exemplo, no circuito da figura 5.1a, se o capacitor estiver bem dimensionado ($X_C \ll R_1 + R_2$), aparecerá em R_2 somente a parte alternada da tensão de entrada (V_g), cuja amplitude é definida pelo divisor de tensão composto por R_1 e R_2 , ou seja, o capacitor terá reatância desprezível (comporta-se como um curto-circuito) diante de $R_1 + R_2$.

Para um bom acoplamento:

$$X_C \ll R_1 + R_2 \text{ ou}$$

$$C \gg \frac{1}{2\pi f_{\min}(R_1 + R_2)}$$

em que f_{\min} é a menor frequência de operação do circuito.

Na figura 5.1a, considere que na entrada do circuito existe um gerador CC de 4 V conectado em série, alimentado por uma tensão alternada de $4 V_{pp}$ e frequência de 10 kHz. A figura 5.1b mostra as formas de onda na entrada (V_e) e na saída (V_s) do circuito, para um capacitor de acoplamento de 10 μF cuja reatância

em 10 kHz vale 1,6 Ω . Nessas condições, a amplitude de pico a pico na saída é determinada pelo divisor de tensão de $2 V_{pp}$, constituído por R_1 e R_2 .

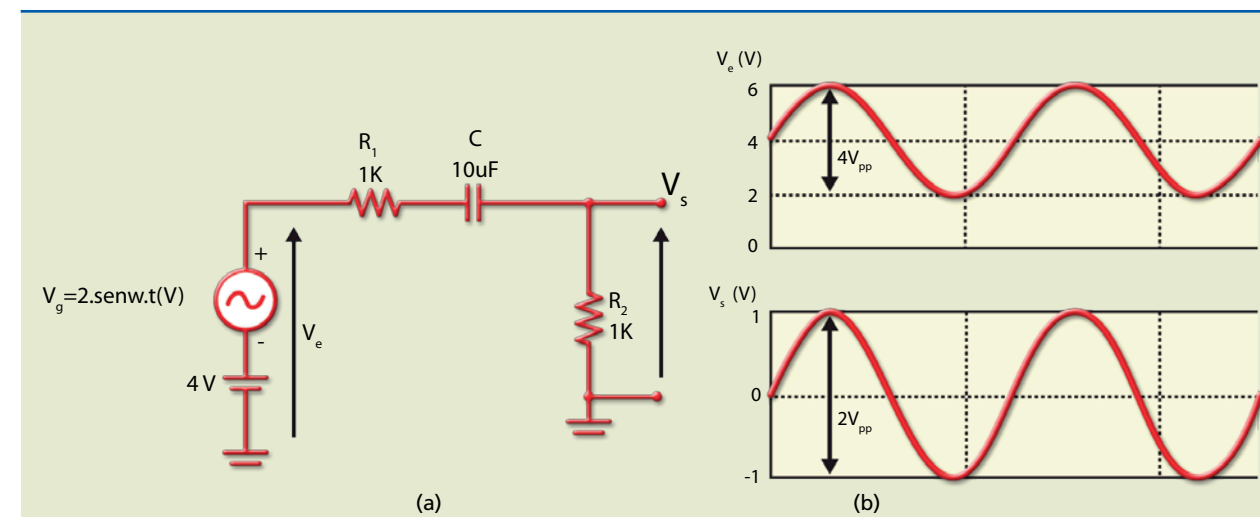


Figura 5.1
a) Circuito com capacitor de acoplamento bem dimensionado e
b) formas de onda de entrada e saída.

A figura 5.2 apresenta o mesmo circuito da figura 5.1a, mas utilizando um capacitor de acoplamento com valor de 0,01 μF . Esse valor de capacitância é inadequado, pois sua reatância na frequência de 10 kHz vale 1,6 k Ω , que, ao ser somada (vetorialmente) a R_1 e R_2 , resulta em um valor de saída de 1,6 V_{pp} .

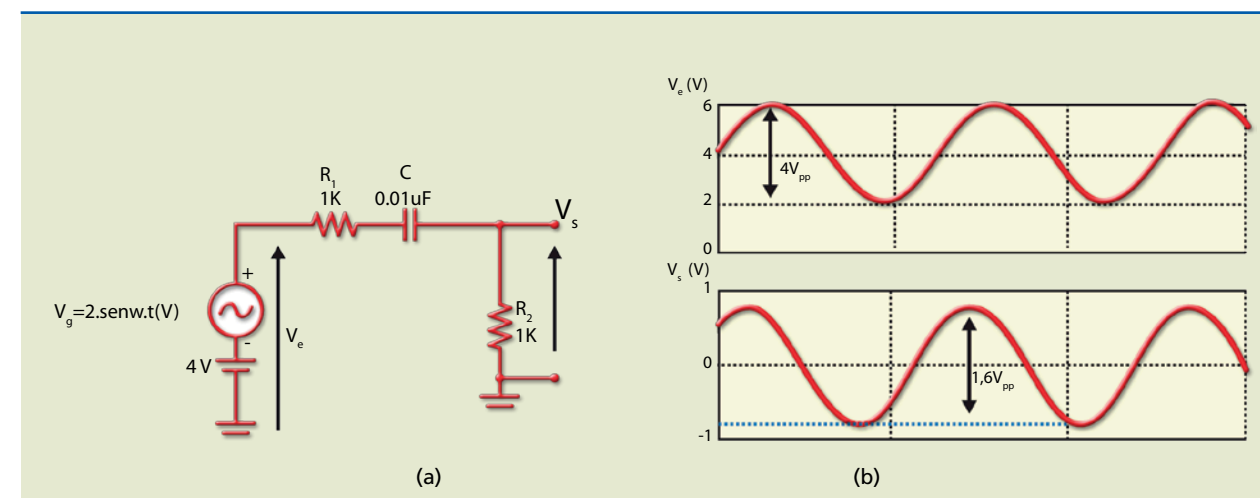


Figura 5.2
a) Circuito com capacitor de acoplamento mal dimensionado e
b) formas de onda de entrada e saída.

5.2 Capacitores de desacoplamento

Outro tipo de acoplamento existente em um amplificador é o de um ponto não ligado ao terra. O capacitor que executa esse acoplamento é chamado de capacitor *bypass* ou capacitor de desacoplamento. Na figura 5.3, a amplitude do sinal em R_2 (tanto em CC como em CA) é dada pelo divisor de tensão quando o capacitor não está conectado.



Figura 5.3

Capacitor de desacoplamento desligado:
a) medida da tensão CC e
b) medida da tensão CA.

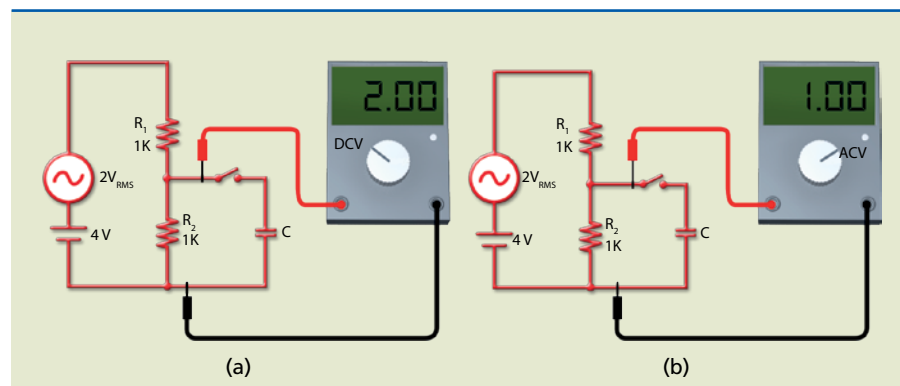
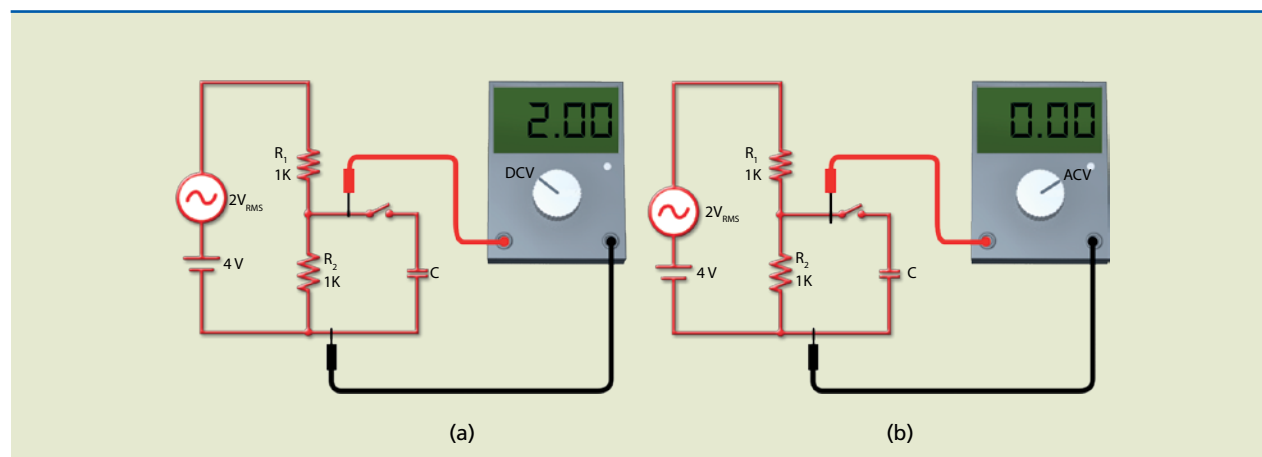


Figura 5.4

Capacitor de desacoplamento ligado:
a) medida da tensão CC e
b) medida da tensão CA.

Ao acionarmos a chave que interliga o capacitor ao circuito (figura 5.4), notaremos que a tensão em R_2 terá apenas a componente contínua e seu valor será equivalente ao especificado pelo divisor de tensão. **Atenção:** essa observação é válida somente se o capacitor apresentar reatância muito menor que $R_1//R_2$. No caso da componente alternada, o valor da tensão CA será praticamente nulo, pois os terminais de R_2 estarão em “curto-circuito” para CA.



5.3 Amplificador emissor comum de pequenos sinais

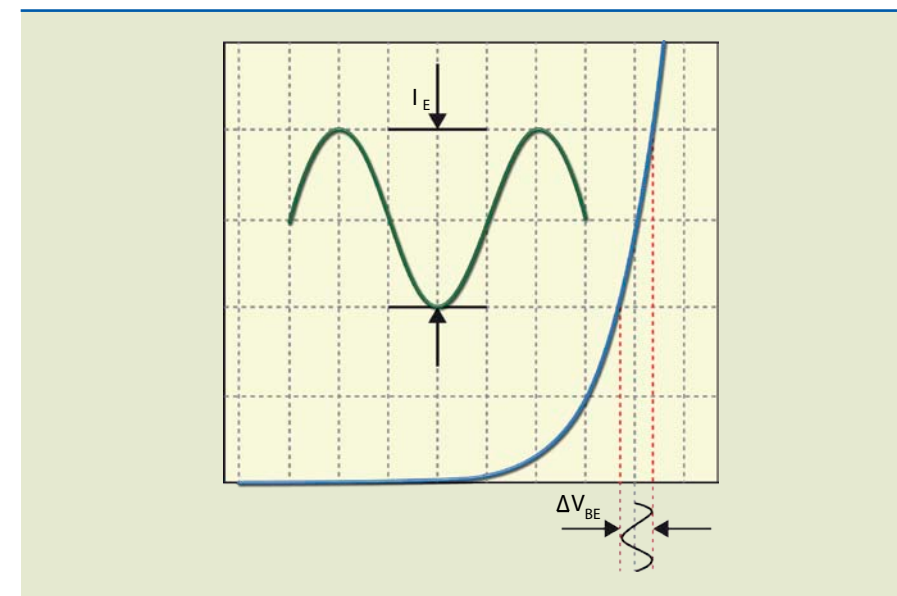
Quando polarizamos um transistor, aplicamos uma tensão de polarização CC (V_{BEQ}) na base, uma tensão CC entre coletor e emissor (V_{CEQ}), uma corrente CC na base (I_{BQ}) e uma corrente CC de emissor (I_{EQ}). Nessas condições, ao aplicarmos um sinal na entrada do amplificador, a tensão oscilará acima e abaixo de V_{BE} . Portanto, existirá uma variação de tensão ao redor do ponto quiescente (ΔV_{BE}), provocando variação de corrente de emissor (ΔI_E) e, em consequência, variação de tensão entre coletor e emissor (ΔV_{CE}).

Um amplificador é de pequenos sinais se a amplitude do sinal for suficientemente baixa para que sua operação ocorra na região linear da curva $I_E \cdot V_{BE}$.

A figura 5.5 mostra um sinal aplicado na base (ΔV_{BE}) e a resposta (ΔI_E).

Figura 5.5

Curva $I_E \cdot V_{BE}$ de um transistor.



Nesse gráfico, define-se a resistência incremental ou resistência dinâmica da junção base-emissor como:

$$r_{be} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_E} = \frac{v_{be}}{i_e}$$

Pode-se calcular r_{be} aproximadamente por:

$$r_{be} = \frac{25 \text{ mV}}{I_E}$$

em que I_E é a corrente quiescente de emissor e 25 mV uma constante à temperatura de 25 °C.

A análise de amplificadores aqui realizada considera os modelos simplificados de Ebers Moll para determinar os principais parâmetros CA, como ganho de tensão, impedância de entrada e impedância de saída.

5.3.1 Modelo simplificado do transistor em baixas frequências

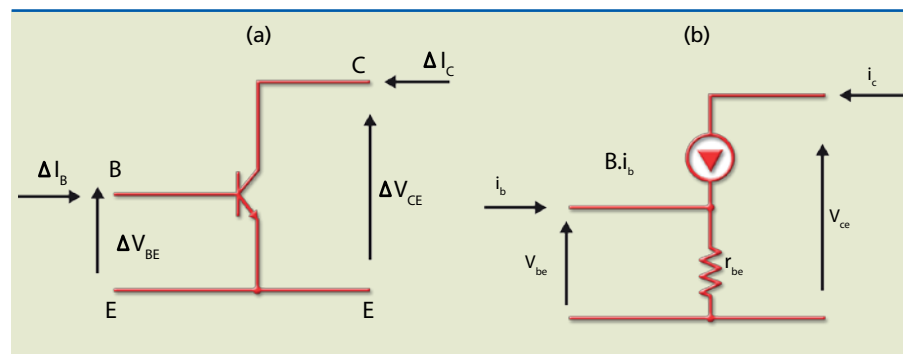
Esse modelo é para pequenos sinais, pois despreza as capacitâncias parasitárias das junções. Observe as simplificações a seguir, usadas para representar um sinal (figura 5.6).

- $i_c = \Delta I_C$: variação da corrente de coletor ao redor do ponto Q;
- $i_b = \Delta I_B$: variação da corrente de base ao redor do ponto Q;
- $v_{be} = \Delta V_{BE}$: variação da tensão base-emissor ao redor do ponto Q;
- $v_{ce} = \Delta V_{CE}$: variação da tensão coletor-emissor ao redor do ponto Q.



Figura 5.6

a) Sinais de corrente e tensão em um transistor e b) modelo simplificado para pequenos sinais.



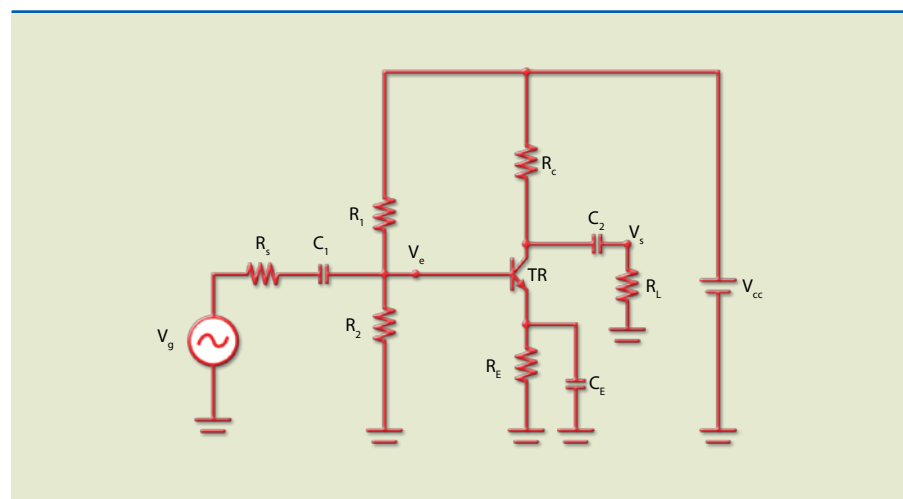
5.4 Análise de amplificadores

A análise de amplificadores pode ser feita por parâmetros CC, quando se leva em conta a polarização, conforme explicado anteriormente, ou por parâmetros CA, que considera a determinação do ganho, como veremos a seguir.

A figura 5.7 mostra um estágio de um amplificador emissor comum (EC) completo com os capacitores de acoplamento (C_1 e C_2) e de desacoplamento ou *bypass* (C_E). O símbolo V_g representa a fonte do sinal a ser amplificado e R_S , sua resistência interna ou de saída (pode representar a saída de um estágio amplificador). Os resistores R_1 , R_2 , R_C e R_E são de polarização e R_L a resistência de carga ou a impedância de entrada do estágio seguinte.

Figura 5.7

Estágio de um amplificador EC completo.



A resposta global é a superposição das respostas no circuito na análise CC e no circuito na análise CA.

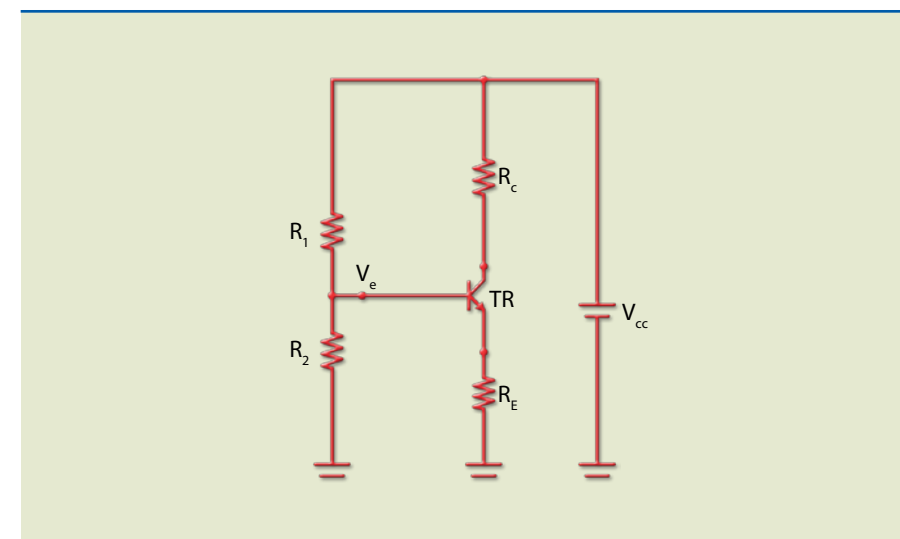
5.4.1 Circuito equivalente CC de um amplificador emissor comum

A figura 5.8 apresenta o circuito equivalente CC de um amplificador emissor comum. Para obter esse circuito, os capacitores são considerados circuitos

abertos e as correntes e tensões presentes, contínuas (ponto quiescente). A análise desse circuito consiste em determinar o ponto quiescente, como visto anteriormente.

Figura 5.8

Circuito equivalente CC do amplificador da figura 5.7.

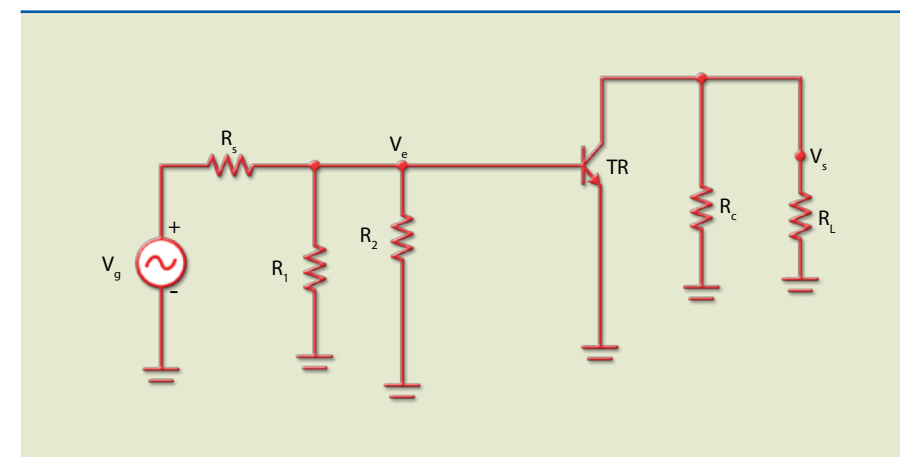


5.4.2 Circuito equivalente CA de um amplificador emissor comum para pequenos sinais

A figura 5.9 apresenta o circuito equivalente CA de um amplificador emissor comum para pequenos sinais. Para obter esse circuito, os capacitores e as fontes CC são considerados curto-circuito ($\Delta V = 0$) e as correntes e tensões são variações: ΔV_{BE} , ΔV_{CE} , ΔI_B , ΔI_E e ΔI_C . Nesse circuito, é preciso determinar as impedâncias de entrada e saída e os ganhos de tensão e corrente.

Figura 5.9

Circuito equivalente CA do amplificador da figura 5.7.

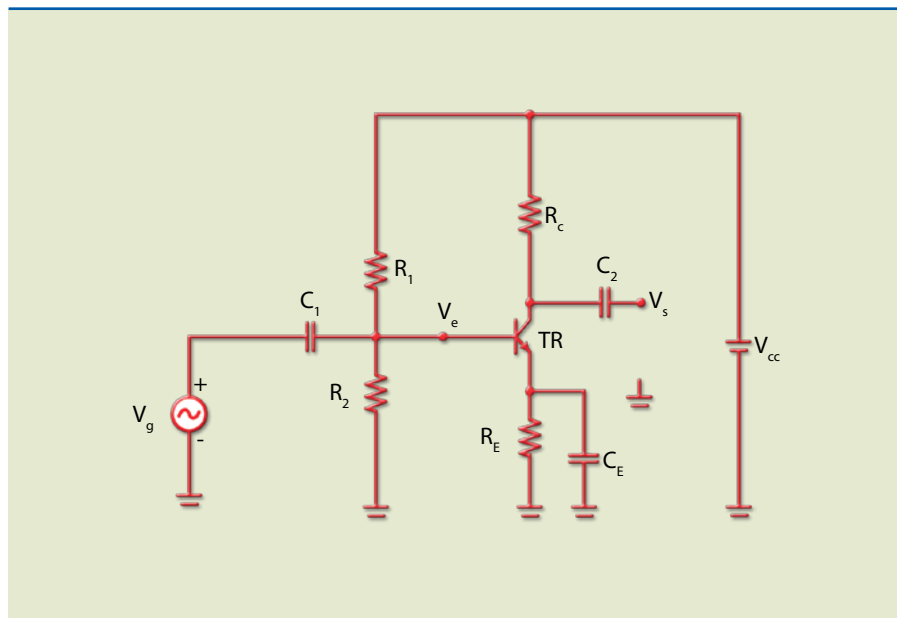


Amplificador EC com resistência de fonte nula e carga infinita

Para fazermos a análise CA desse circuito, devemos considerar que o valor da resistência da fonte (R_S) do sinal é nula e o valor da carga (R_L) ligada na saída é infinito. A figura 5.10 mostra o circuito nessas condições.



Figura 5.10
Amplificador EC com $R_s = 0$ e R_L infinita.



Observe que o circuito equivalente CC do circuito da figura 5.10 é igual ao da figura 5.8 e o circuito equivalente CA está indicado na figura 5.11a.

Note, na figura 5.11b, que o sinal de entrada do gerador de sinais (V_g) é igual ao sinal aplicado na base (V_e). Para esse circuito, a impedância de entrada (Z_e) no gerador V_g é:

$$Z_e = R_1 // R_2 // Z_{e(\text{base})}$$

em que:

$$Z_{e(\text{base})} = \frac{V_e}{i_b} = \frac{r_{be} \cdot (i_b + \beta \cdot i_b)}{i_b} = r_{be} \cdot (1 + \beta) \cong \beta \cdot r_{be}$$

O ganho de tensão entre a saída (V_s) e a entrada (V_e) na base é calculado por:

$$A_V = \frac{V_s}{V_e} = \frac{-R_C \cdot i_c}{r_{be} \cdot (i_b + i_c)} = \frac{-R_C \cdot \beta \cdot i_b}{r_{be} \cdot (i_b + \beta \cdot i_b)} = \frac{-R_C \cdot \beta \cdot i_b}{r_{be} \cdot (1 + \beta) \cdot i_b} \cong -\frac{R_C}{r_{be}}$$

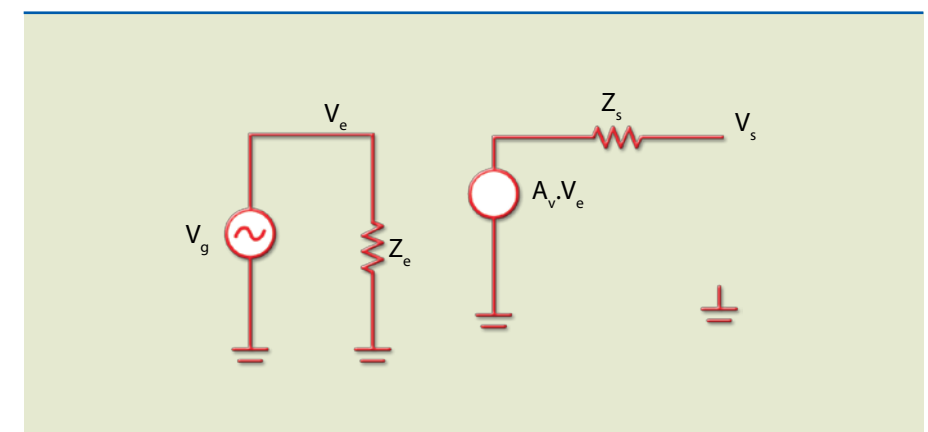
em que r_{be} é a resistência incremental da junção base-emissor definida anteriormente e β o ganho de corrente na configuração emissor comum. O sinal negativo na expressão do ganho indica defasagem de 180° entre os valores de entrada e de saída.

O circuito equivalente da saída é obtido aplicando Thévenin na saída do circuito da figura 5.11a. Desse modo, a resistência vista com a fonte de corrente eliminada (aberta) é R_C e a tensão em vazio é $A_V \cdot V_e$.

A impedância de saída (Z_s) é calculada por:

$$Z_s = R_C$$

O circuito da figura 5.12 representa o circuito equivalente CA do amplificador da figura 5.10.

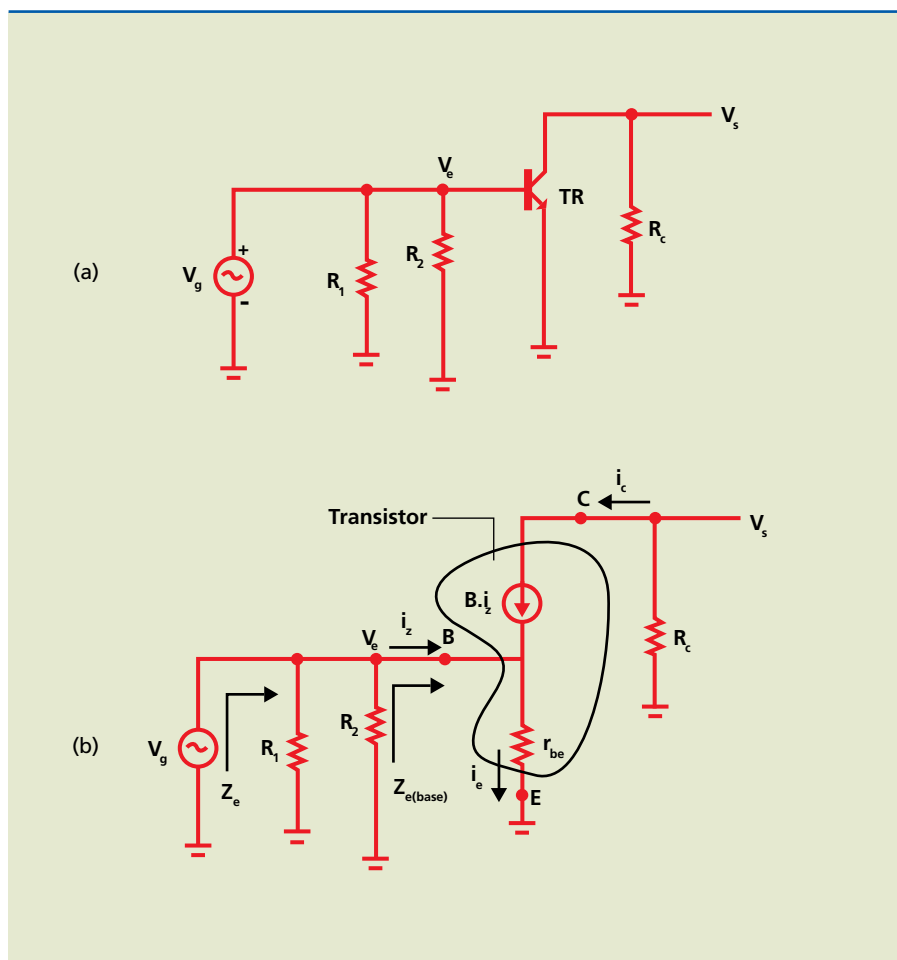


Como R_L é infinita, então $V_s = A_V \cdot V_e$ e, nesse caso, $V_g = V_e$.

Figura 5.12

Circuito equivalente CA do amplificador da figura 5.10.

Figura 5.11
a) Circuito equivalente CA do amplificador da figura 5.8 e
b) transistor substituído pelo modelo.



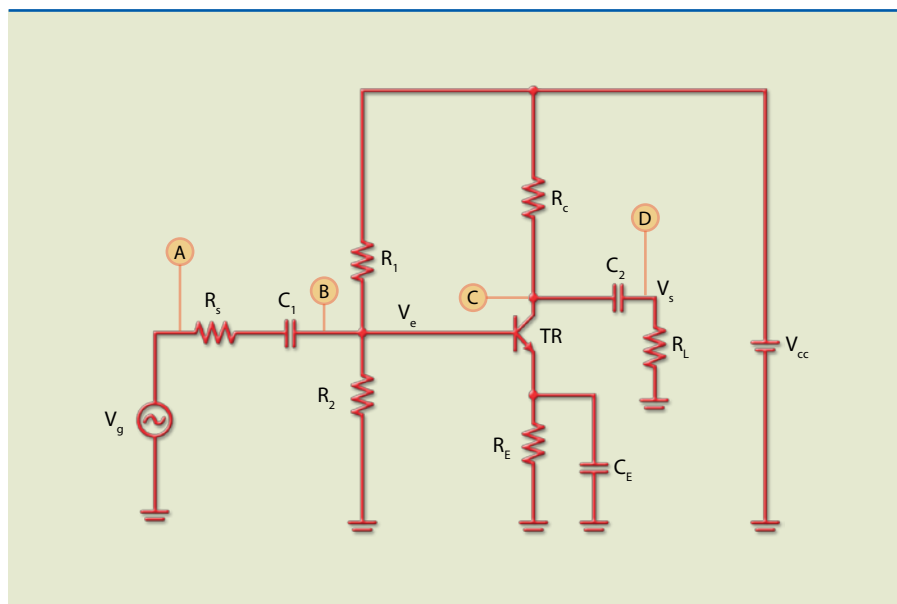
Exemplo

Com base no amplificador da figura 5.13:

- a) determine o valor quiescente de V_{CE} e I_C ;
- b) determine o valor da tensão na saída de pico a pico, considerando uma tensão no gerador (V_g) de 40 mV_{pp} ;
- c) desenhe as formas de onda da tensão nos pontos A, B, C e D.

Dados: $\beta = 300$ e $V_{BE} = 0,7\text{ V}$.

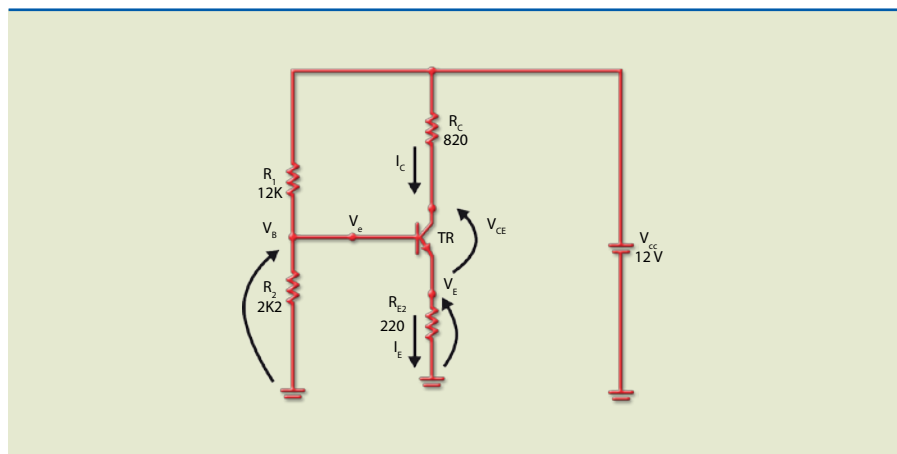
Figura 5.13



Solução:

- a) Calculamos primeiro os valores quiescentes (figura 5.14):

Figura 5.14



$$V_B = \frac{2k2}{2k2 + 12k} \cdot 12\text{ V} = 1,86\text{ k}2$$

Em seguida, V_E :

$$V_E = 1,86 - 0,7 = 1,16\text{ V}$$

Portanto:

$$I_C = I_E$$

$$I_E = \frac{1,16\text{ V}}{220\ \Omega}$$

$$V_{RC} = 0,82\text{ k} \cdot 5,2\text{ mA} = 4,26\text{ V}$$

$$V_{CE} = 12 - (4,26 + 1,16) = 6,58\text{ V e } V_C = 12 - 4,26 = 7,74\text{ V}$$

- b) O valor da resistência incremental da junção base-emissor vale:

$$r_{be} = \frac{25\text{ mV}}{I_E} = \frac{25\text{ mV}}{5,2\text{ mA}} = 4,8\ \Omega$$

A impedância olhando na base é:

$$Z_{e(\text{base})} \cong \beta \cdot r_{be} = 300 \cdot 4,8 = 1440\ \Omega$$

Impedância de entrada:

$$Z_e = R_1 // R_2 // Z_{e(\text{base})} = 12\text{ k} // 2\text{ k}2 // 1,44\text{ k} = 811\ \Omega$$

Impedância de saída:

$$Z_s = 820\ \Omega$$

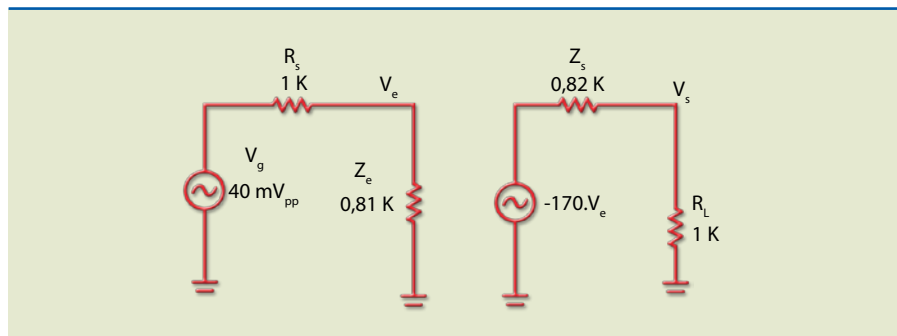
O ganho de tensão entre a base (V_e) e a saída (V_s) vale:

$$A_v = -\frac{R_C}{r_{be}} = -\frac{820\ \Omega}{4,8\ \Omega} = -170$$

O modelo para CA do amplificador é o da figura 5.15:



Figura 5.15



Podemos determinar a tensão V_e :

$$V_e = \frac{0,81k}{1k + 0,81k} \cdot 40 \text{ mV}_{PP} = 17,8 \text{ mV}_{PP}$$

Portanto, o valor do gerador é:

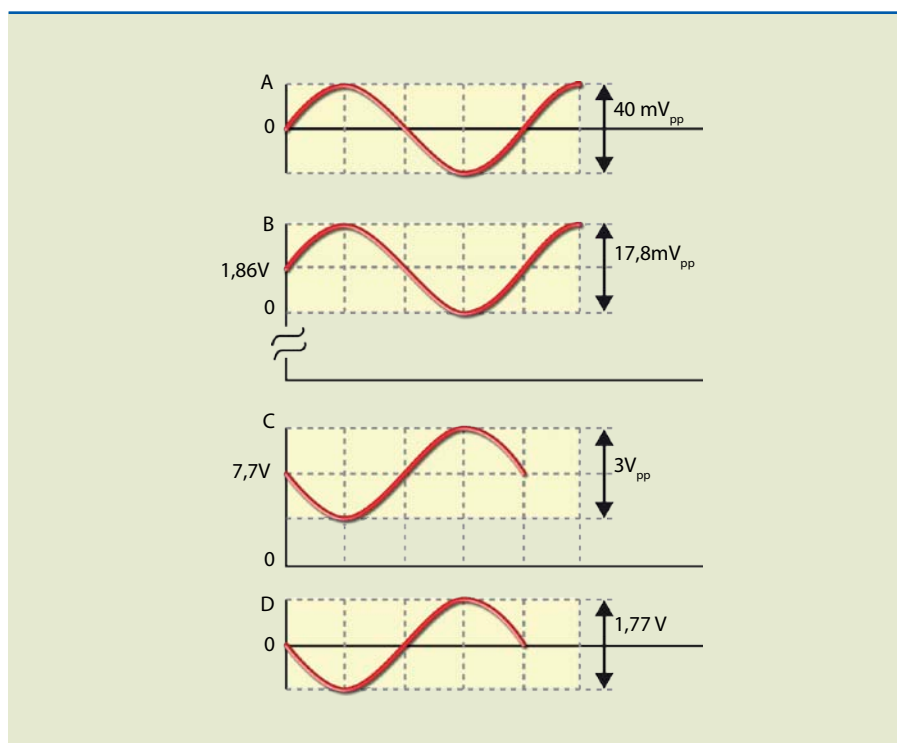
$$A_V \cdot V_e = -170 \cdot 17,8 \text{ mV}_{PP} = -3 \text{ V}_{PP}$$

A tensão na carga vale:

$$V_L = \frac{1k}{1k + 0,82k} \cdot -3 \text{ V}_{PP} = 1,77 \text{ V}_{PP}$$

c) As principais formas de onda no circuito, com base nos resultados anteriores, estão indicadas na figura 5.16:

Figura 5.16



Amplificador EC com resistência de fonte e carga

Para esse modelo, consideramos uma resistência de fonte (R_S) e uma resistência de carga (R_L), conforme ilustra a figura 5.17. A resistência da fonte pode representar também a resistência de saída do estágio anterior e a de carga, a resistência de entrada do estágio seguinte.

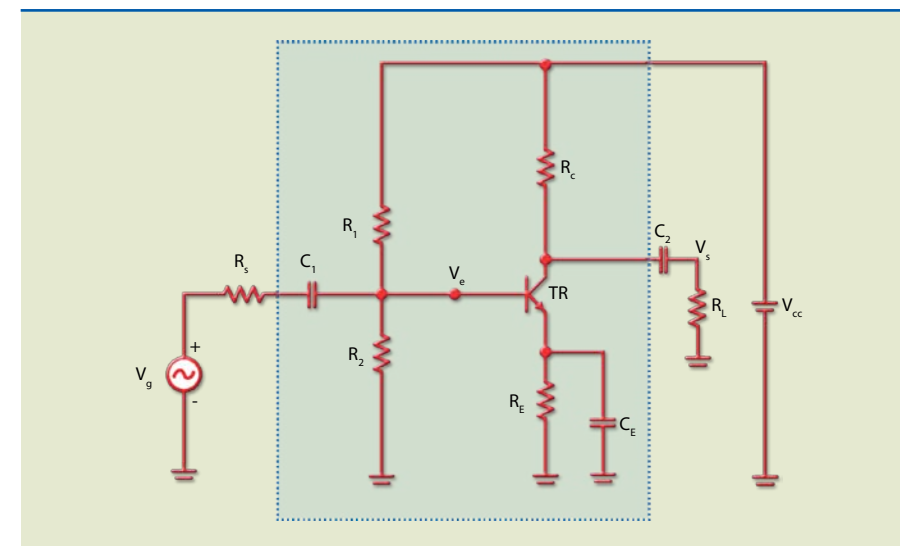


Figura 5.17

Amplificador EC com resistência de fonte e carga.

Observe que o retângulo tracejado no circuito da figura 5.18 é o mesmo circuito analisado anteriormente. Assim, podemos usar o modelo da figura 5.17 para representá-lo, adicionando a carga (R_L) e a resistência da fonte (R_S).

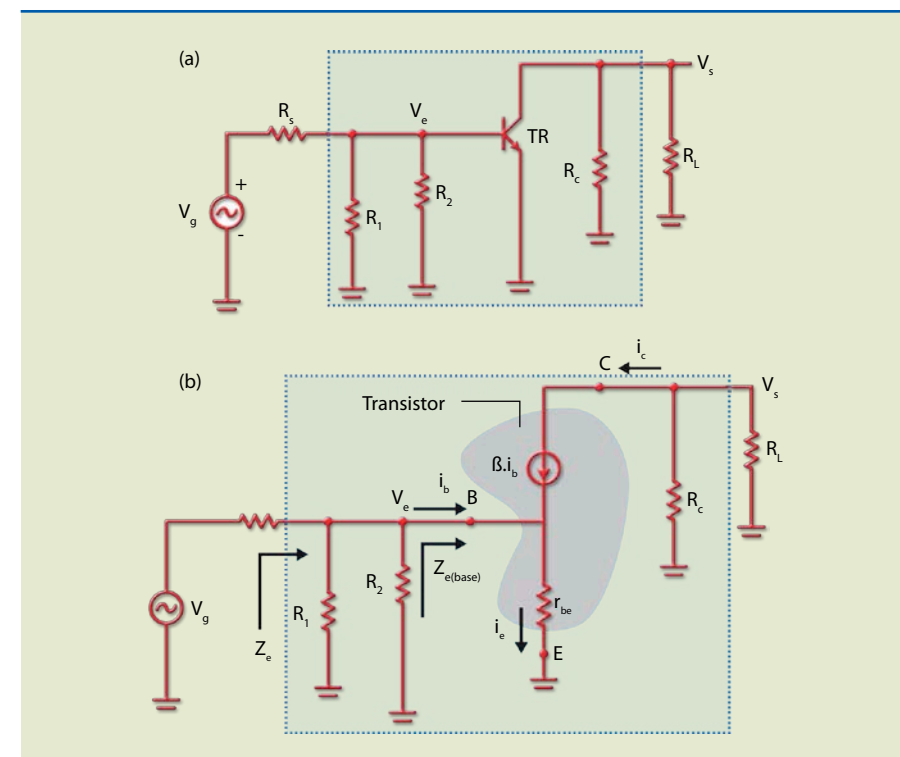


Figura 5.18

a) Circuito equivalente CA do amplificador da figura 5.17 e b) transistor substituído pelo modelo.



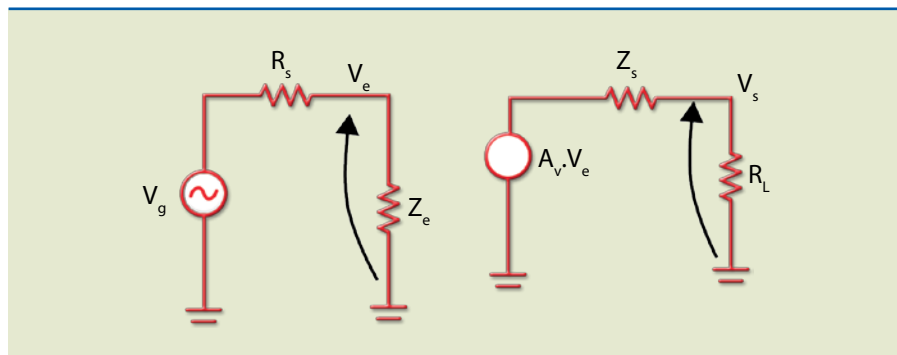
A impedância de entrada é calculada da mesma forma que nos modelos apresentados, mas a tensão na entrada (V_e) agora é uma parcela da tensão do gerador (V_g) por causa do divisor de tensão existente constituído por R_s e Z_e .

$$Z_e = R_1 // R_2 // Z_{e(\text{base})}$$

$$V_e = \frac{Z_e}{Z_e + R_s} \cdot V_g$$

O circuito da figura 5.19 representa o circuito equivalente CA do amplificador da figura 5.17.

Figura 5.19
Circuito equivalente CA do amplificador da figura 5.17.



Na saída do circuito, em decorrência da carga R_L , também haverá uma divisão de tensão. Portanto, o valor da tensão de saída será dada por:

$$V_s = \frac{R_L}{R_L + R_C} \cdot A_v \cdot V_e$$

sendo:

$$A_v = -\frac{R_C}{r_{be}}$$

5.4.3 Amplificador EC com realimentação parcial

Como visto anteriormente, o amplificador EC tem o ganho, entre a base e o coletor, dado por:

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_C}{r_{be}}$$

Note que o ganho do amplificador depende do parâmetro r_{be} , entre outros fatores. Esse parâmetro é influenciado pelo tipo de transistor e por sua temperatura

de trabalho, deixando o ganho altamente instável. Para tornar o circuito estável e reduzir a distorção, aplica-se realimentação negativa em CA.

A figura 5.20 mostra um amplificador EC com realimentação negativa em CA por meio do resistor R_{E1} . Esse resistor não tem capacitor de desacoplamento em paralelo, o que causa a realimentação em CA. Tal realimentação (negativa) diminui a distorção e torna o ganho do circuito menos dependente do parâmetro r_{be} . Do ponto de vista de CC, a resistência do emissor é $R_{E1} + R_{E2}$.

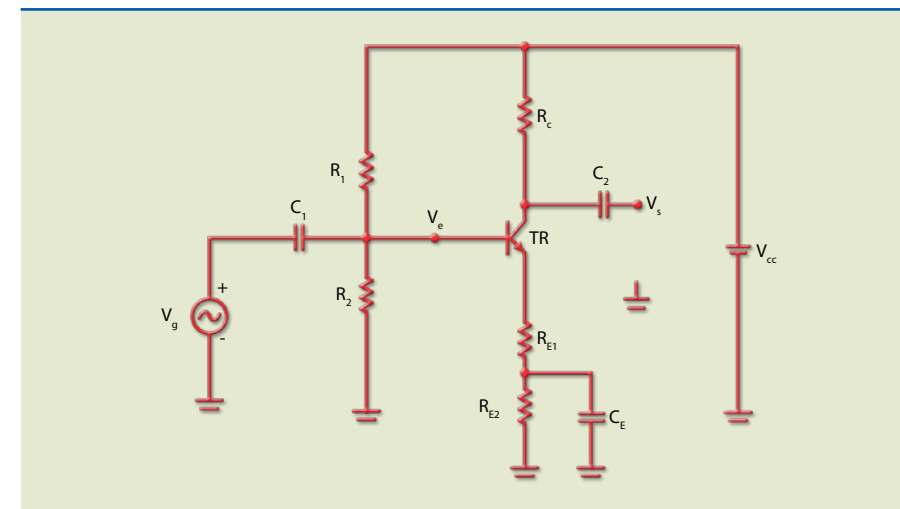


Figura 5.20
Amplificador EC com realimentação negativa – resistência de fonte nula e carga infinita.

A figura 5.21 apresenta o circuito equivalente para pequenos sinais. Observe que o capacitor de C_E deixa em curto-circuito o resistor R_{E2} , e, portanto, esse resistor não aparece no circuito equivalente CA, somente R_{E1} .

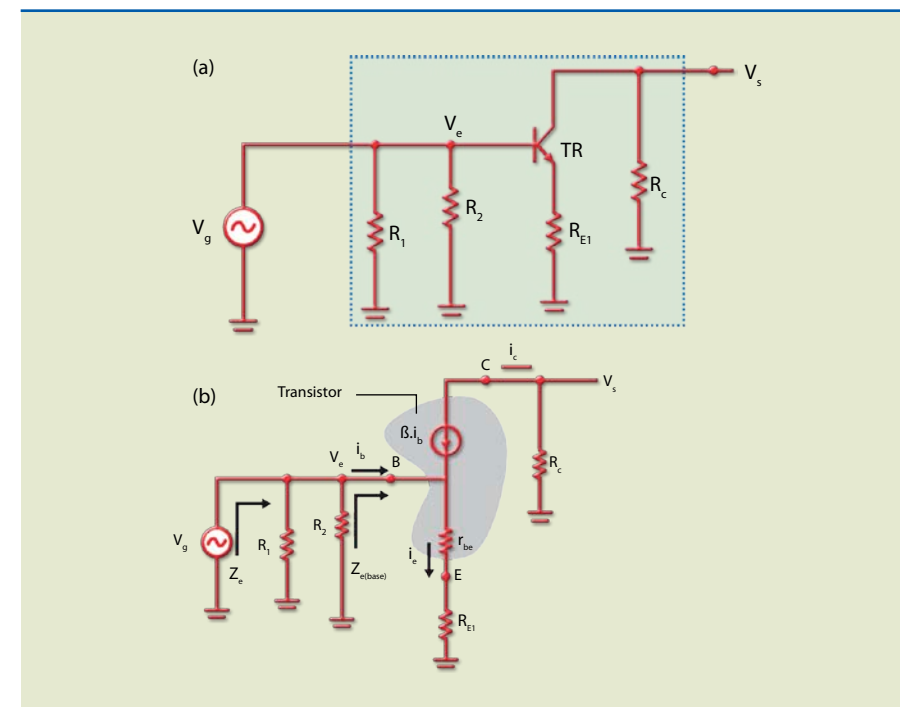


Figura 5.21
a) Circuito equivalente CA do amplificador com realimentação da figura 5.20 e b) circuito com modelo do transistor.



Analisando o circuito da figura 5.21, podemos notar que o resistor R_{E1} aparece no circuito equivalente CA, fazendo a realimentação CA. Perceba que não existe capacitor de desacoplamento em paralelo com o resistor R_{E1} . O ganho com a realimentação entre a base e a saída é dado por:

$$A_V = \frac{V_s}{V_g} = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_C}{r_{be} + R_{E1}}$$

Se $R_{E1} \gg r_{be}$, o ganho torna-se praticamente estável. Nesse caso, o ganho é determinado por:

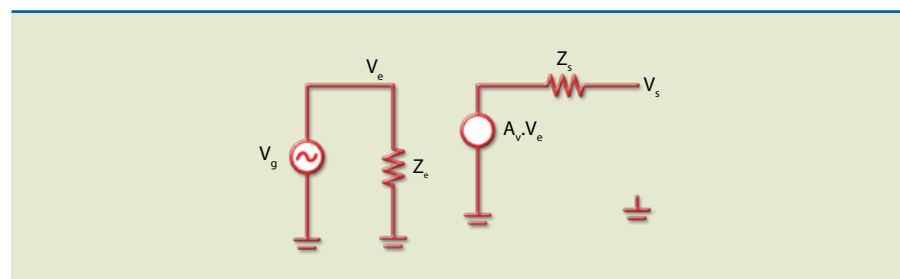
$$A_V = \frac{V_s}{V_g} = \frac{V_s}{V_e} \cong -\frac{R_C}{R_{E1}}$$

Nessa configuração, o ganho não depende do transistor, mas somente da relação entre as resistências R_C e R_{E1} . Nessas condições, dizemos que a realimentação estabilizou o ganho. Na prática, o ganho varia quando substituímos o transistor, mas é uma variação muito pequena.

A análise CA do circuito da figura 5.20 pode ser feita considerando o circuito equivalente CA da figura 5.21, resultando no circuito simplificado da figura 5.22.

Figura 5.22

Circuito equivalente AC do circuito da figura 5.20.



Para o circuito da figura 5.20, a impedância que o gerador V_g percebe é dada por:

$$Z_e = R_1 // R_2 // Z_{e(base)}$$

e a impedância olhando na base:

$$Z_{e(base)} = \beta(r_{be} + R_{E1})$$

Note que a impedância de entrada olhando na base aumentou muito seu valor. A impedância de saída é dada por: $Z_s = R_C$.

5.4.4 Mais sobre amplificador EC com resistência de fonte e carga

O amplificador EC da figura 5.23 apresenta o mesmo circuito do amplificador da figura 5.20, com a adição das resistências de fonte (R_S) e carga (R_L). Como já dito, a resistência de fonte do sinal pode representar também a resistência de saída do estágio anterior, e a de carga, a resistência de entrada do estágio seguinte.

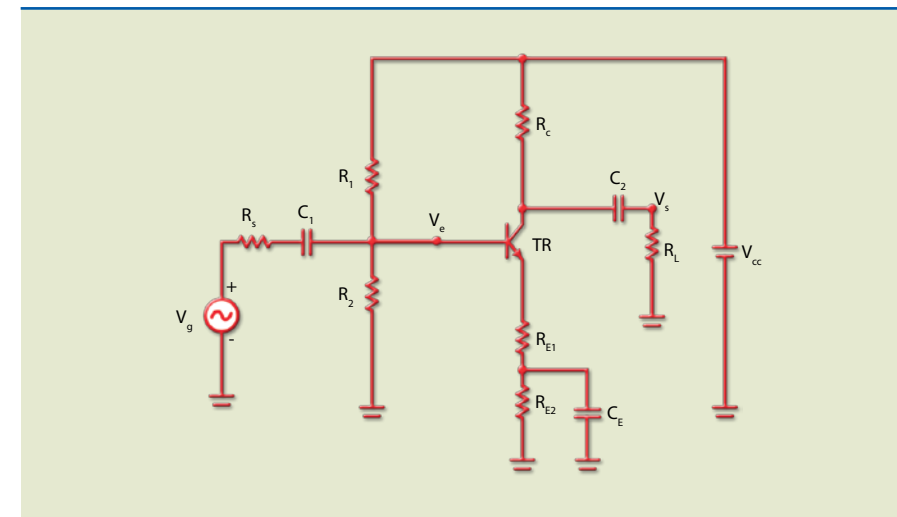


Figura 5.23

Amplificador EC com realimentação – carga finita e resistência de fonte não nula.

O modelo utilizado para calcular a tensão de saída para determinado valor de tensão de entrada é o mesmo apresentado anteriormente, com exceção de que nesse modelo existe um divisor de tensão na entrada (R_S e Z_e) e na saída (Z_s e R_L). A figura 5.24 ilustra o circuito equivalente.

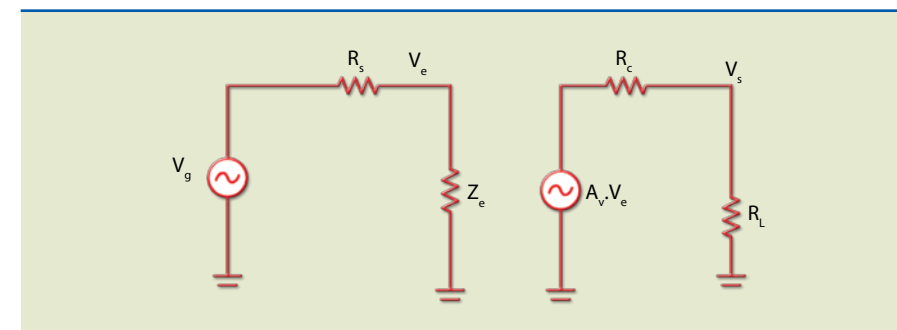


Figura 5.24

Modelo CA do circuito da figura 5.23.

As impedâncias de entrada e de saída são dadas por:

$$Z_e = R_1 // R_2 // Z_{e(base)}, Z_{e(base)} = \beta \cdot (r_{be} + R_{E1}) \text{ e } Z_s = R_C.$$

O ganho de tensão entre a base e a saída é calculado por:

$$A_V = \frac{V_s}{V_e} \cong -\frac{R_C}{R_{E1}}$$



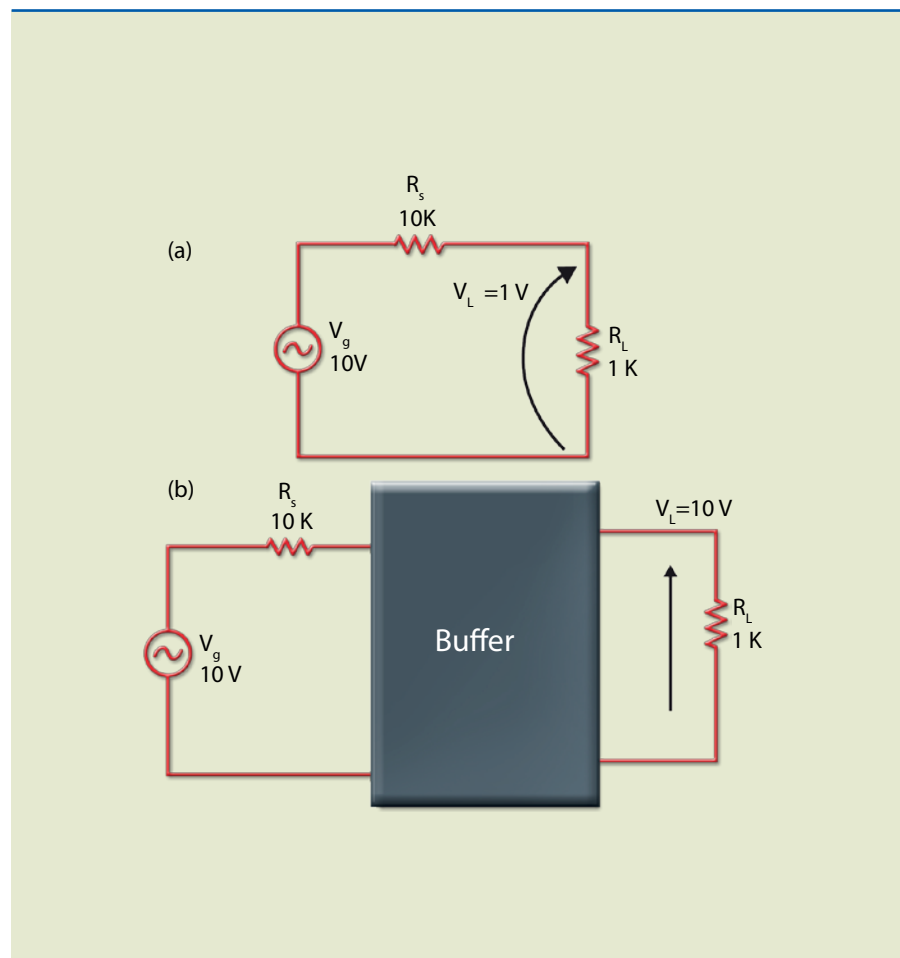
5.5 Amplificador coletor comum

Como vimos, ao ligarmos uma fonte de alta impedância de saída a uma carga de baixo valor, a maior parte da tensão estará na resistência interna da fonte. Para evitar que isso aconteça, devemos intercalar um circuito com alta impedância de entrada e baixa impedância de saída entre a saída da fonte e a carga, conforme ilustra a figura 5.25. Quando inserimos um transistor nesse circuito, ele passa a ser chamado de amplificador coletor comum, também conhecido por seguidor de emissor ou *buffer*. As principais características desse circuito são: altíssima impedância de entrada, baixa impedância de saída e ganho unitário.

Esses circuitos são usados em várias aplicações, como no estágio de saída de amplificadores, em que é necessário efetuar o casamento da impedância do alto-falante (em geral 4 a 8 Ω) com a impedância de saída do amplificador. Essa configuração também é utilizada para construir um regulador de tensão em série.

Figura 5.25

a) Carga de baixo valor ligada na saída de circuito com alta impedância de saída e b) *buffer* como interface.



A figura 5.26 mostra o amplificador coletor comum, que é um circuito com realimentação negativa introduzida por R_E .

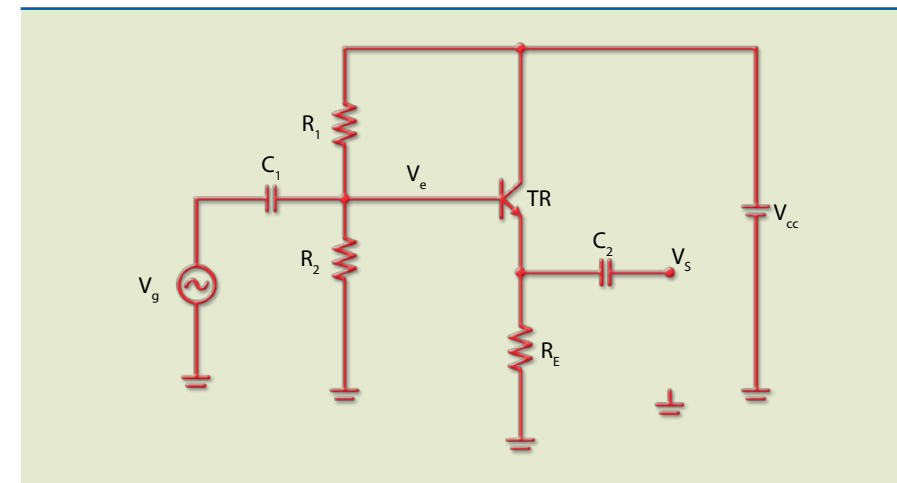


Figura 5.26

Amplificador coletor comum.

A análise CC do amplificador da figura 5.26 é igual à do amplificador emissor comum, ou seja, com os resistores R_1 e R_2 polarizando a base do transistor de tal forma que V_{CE} seja aproximadamente a metade de V_{CC} .

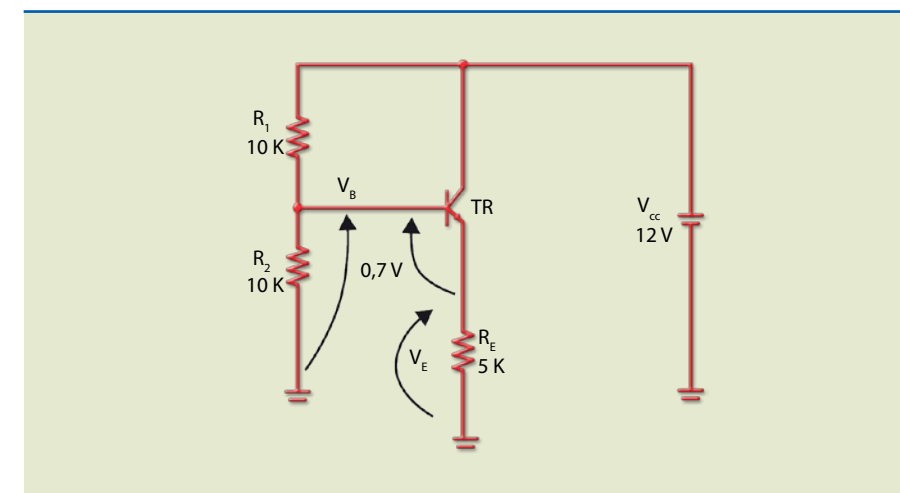


Figura 5.27

Amplificador coletor comum – análise CC.

Considerando o circuito da figura 5.27, podemos determinar alguns valores, como:

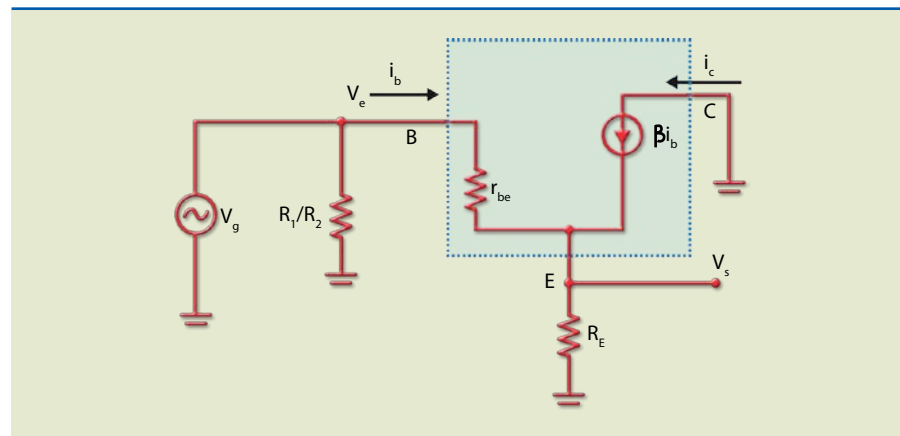
- tensão na base: $V_B = \frac{10\text{ k}}{10\text{ k} + 10\text{ k}} \cdot 12\text{ V} = 6\text{ V}$;
- tensão de emissor: $V_E = V_B - 0,7 = 5,3\text{ V}$;
- corrente de emissor: $I_E = \frac{5,3\text{ V}}{5\text{ k}} = 1,06\text{ mA}$;
- tensão coletor-emissor: $V_{CE} = 12 - V_E = 12 - 5,3 = 6,7\text{ V}$.



A análise CA é feita usando o mesmo raciocínio utilizado para o amplificador emissor comum. A figura 5.28 mostra o circuito equivalente CA com o transistor substituído pelo modelo de Ebers Moll, capacitores e fontes CC em curto-circuito.

Figura 5.28

Circuito equivalente CA do circuito da figura 5.26.



Para esse circuito, o ganho entre a base e a saída é calculado por:

$$A_v = \frac{V_s}{V_e}$$

em que $V_s = R_E \cdot (1 + \beta) \cdot i_b$ e $V_e = r_{be} \cdot i_b + (1 + \beta) \cdot i_b$

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{R_E \cdot (1 + \beta)}{r_{be} + (1 + \beta) \cdot R_E} \cong 1$$

Impedância de entrada

A impedância de entrada do circuito vale:

$$Z_e = R_2 // R_1 // Z_{e(\text{base})}$$

em que $Z_{e(\text{base})}$ é a impedância olhando na base e pode ser calculada por:

$$Z_{e(\text{base})} = \frac{V_e}{i_b} = \frac{(R_E \cdot (1 + \beta) + r_{be}) \cdot i_b}{i_b} = r_{be} + (1 + \beta) \cdot R_E \cong \beta \cdot R_E$$

que normalmente resulta um valor alto. Por exemplo: se $\beta = 200$ e $R_E = 5 \text{ k}\Omega$, então $Z_{e(\text{base})} = 200 \cdot 5 \text{ k} = 1 \text{ M}$.

A impedância de entrada será limitada pelos valores das resistências e polarização dos resistores R_1 e R_2 . Por exemplo: se $R_1 = R_2 = 100 \text{ k}$, então $Z_e = 100 \text{ k} // 100 \text{ k} // 1 \text{ M} = 47,6 \text{ k}$.

5.6 Amplificadores de potência

As principais características desejáveis em um amplificador são: linearidade, eficiência, potência na saída e ganho de tensão. Dificilmente todas elas estão presentes ao mesmo tempo no amplificador, porque, em geral, uma característica afeta outra (ou outras) – melhorar a linearidade, por exemplo, pode comprometer a eficiência. Assim, o que o projetista deve fazer é definir quais características devem ser atendidas em detrimento de outras.

Os amplificadores de potência são usados no último estágio de um amplificador; por isso, normalmente têm como carga um alto-falante. Como esses circuitos trabalham com sinais elevados, sua análise não será feita usando os modelos utilizados.

Os amplificadores de potência se dividem em classes. As mais conhecidas são:

- Classe A
- Classe B
- Classe AB
- Classe C
- Classe D

Os amplificadores classes A, B e AB operam de forma linear; os classe C, na ressonância; e os classe D, no modo de chaveamento. Cada modelo é indicado para uma aplicação específica: classes A, B e AB em amplificadores de áudio de equipamentos de grande porte, classe C em radiofrequência (RF) e classe D em equipamentos portáteis.

As classes são caracterizadas pela localização do ponto de operação e duração da condução do transistor de saída em cada semiciclo. Um amplificador apresenta linearidade se operar em uma região linear das curvas características. Desse modo, a relação entre a saída e a entrada é linear e, portanto, o sinal de saída terá a mesma forma do sinal de entrada, porém com sinal amplificado.

Define-se a eficiência (η) ou rendimento de um amplificador como a relação entre a potência obtida na carga e a potência CC fornecida pela fonte ao circuito de saída. A eficiência ideal é 1, valor impossível de atingir, pois nesse caso nenhuma potência seria dissipada no circuito amplificador. O rendimento é calculado por:

$$\eta = \frac{\text{potência do sinal entregue para a carga}}{\text{potência CC fornecida ao circuito de saída}} = \frac{P_{CA}}{P_{CC}}$$

em que P_{CA} é a potência CA fornecida à carga e P_{CC} a potência CC que a fonte fornece ao circuito amplificador.

A figura 5.29 mostra, de maneira simplificada, o diagrama de blocos de um amplificador genérico. A carga, representada por R_L , pode ser um alto-falante ou um motor.



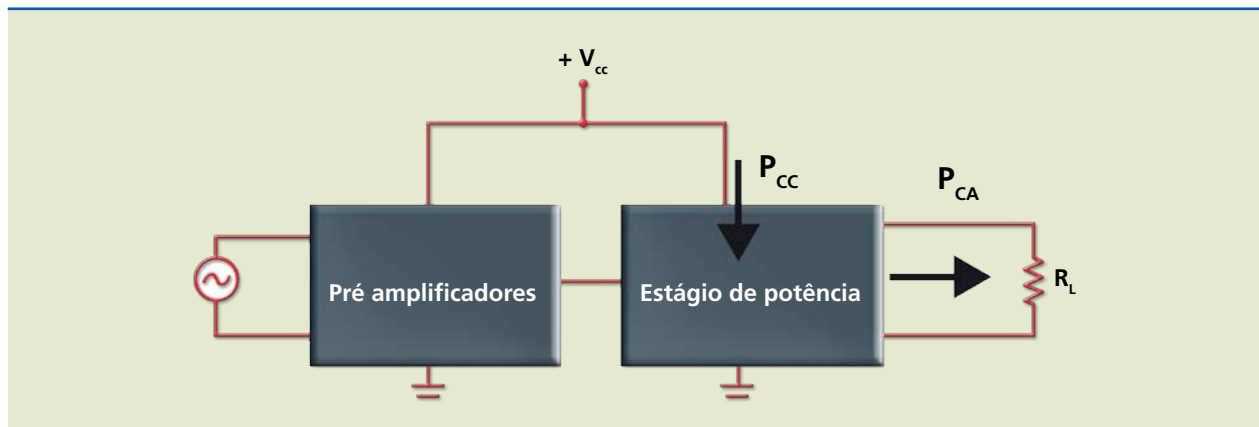


Figura 5.29

Diagrama de blocos de um amplificador.

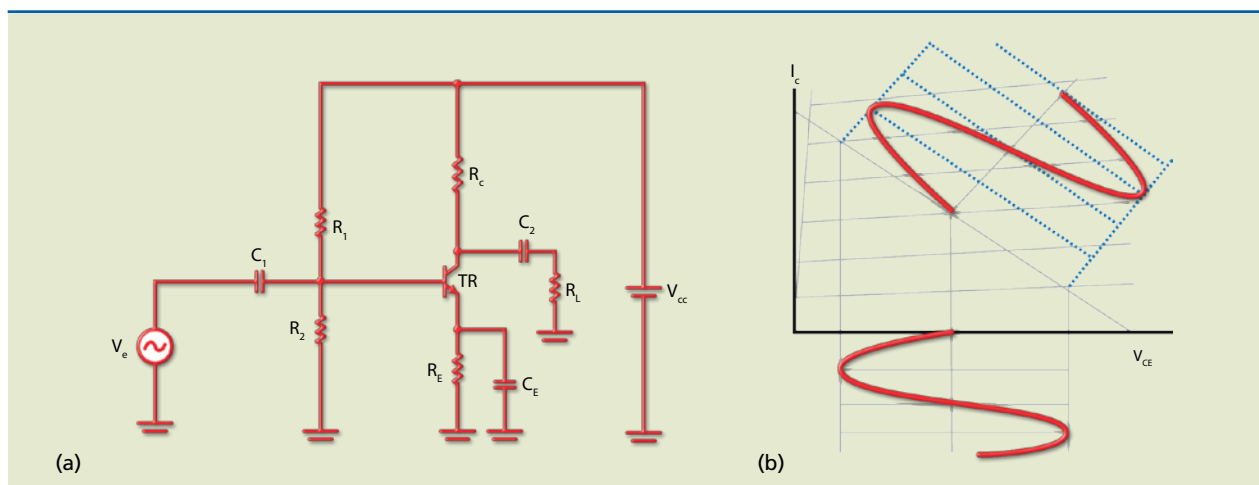
5.6.1 Amplificador classe A

É a classe de amplificadores com a maior linearidade (menor grau de distorção), porém com o menor rendimento, de aproximadamente 25% no máximo. Isso significa que, para obter 10 W de potência na carga, a fonte deve ter potência de 40 W.

Figura 5.30

Amplificador classe A:
a) circuito e
b) formas de onda e reta de carga.

A polarização no circuito de um amplificador classe A é feita de tal modo que o transistor fica conduzindo enquanto tiver sinal de entrada, portanto em 360° (figura 5.30). A polarização é igual à dos transistores amplificadores de baixo sinal, estudados anteriormente.



5.6.2 Amplificador classe B

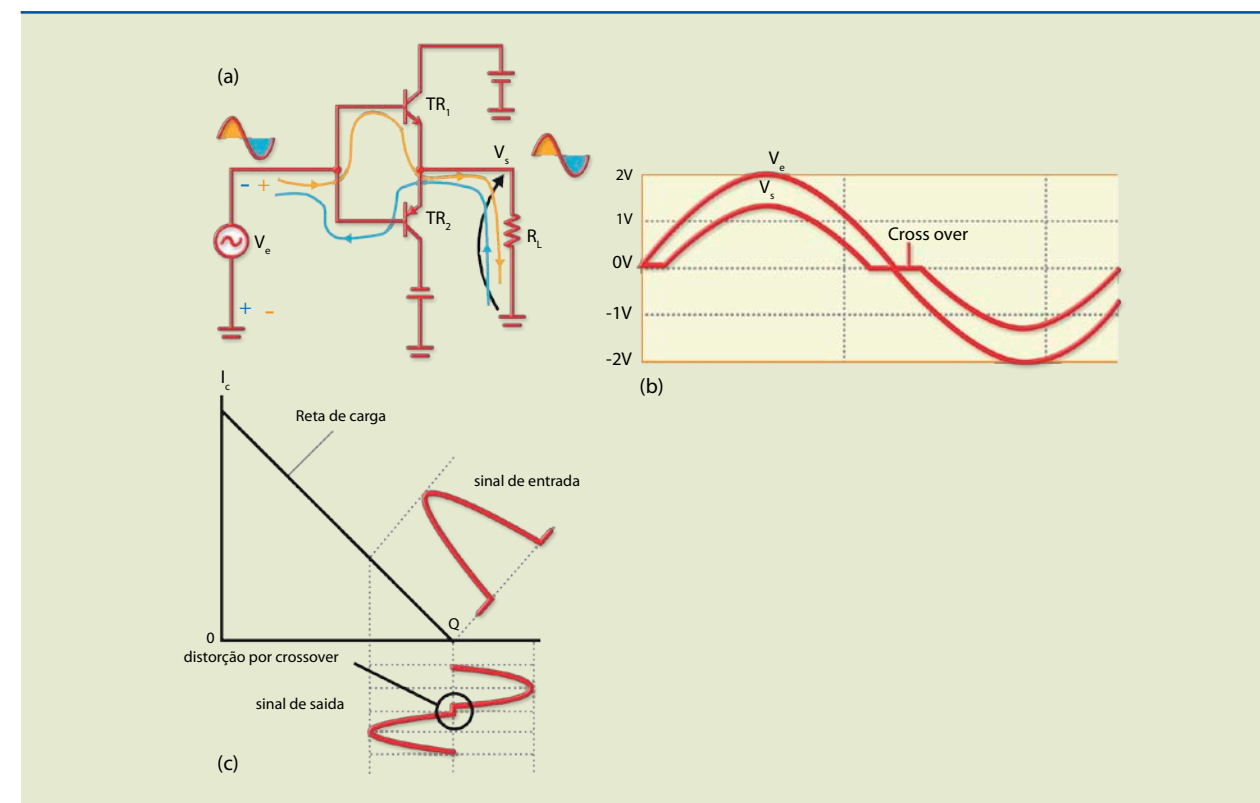
O amplificador classe B é polarizado no corte (correntes quiescentes nulas); portanto, a potência em CC é baixa e o rendimento alto. A figura 5.31 mostra um circuito classe B denominado *push-pull* com saída complementar e as formas de onda de entrada (V_e) e saída (V_s). No semiciclo positivo do sinal de entrada, a condução é feita pelo transistor TR_1 (NPN) e, no semiciclo negativo, pelo TR_2 (PNP). Observe que, para a configuração classe B, é necessário o uso de fonte simétrica e os transistores devem estar na configuração coletor comum (seguidor de emissor).

Note também que existe um intervalo em que os dois transistores estão cortados; é nesse momento que a tensão de entrada é menor que 0,6 V, e isso causa distorção.

Essa distorção é chamada de distorção por cruzamento (*crossover*) e aparece porque o transistor só começa a conduzir quando a tensão V_{BE} excede 0,6 V aproximadamente. Quanto menor a amplitude do sinal, maior a distorção.

Figura 5.31

a) Amplificador classe B,
b) formas de onda de entrada e saída e
c) reta de carga e sinal de entrada e saída.



A figura 5.32 mostra um circuito que não necessita de fonte simétrica. Nesse caso, a fonte de alimentação para polarizar o transistor TR_2 é o capacitor C_L , que tem valor elevado (tipicamente 1 000 μF) e consegue manter a carga.

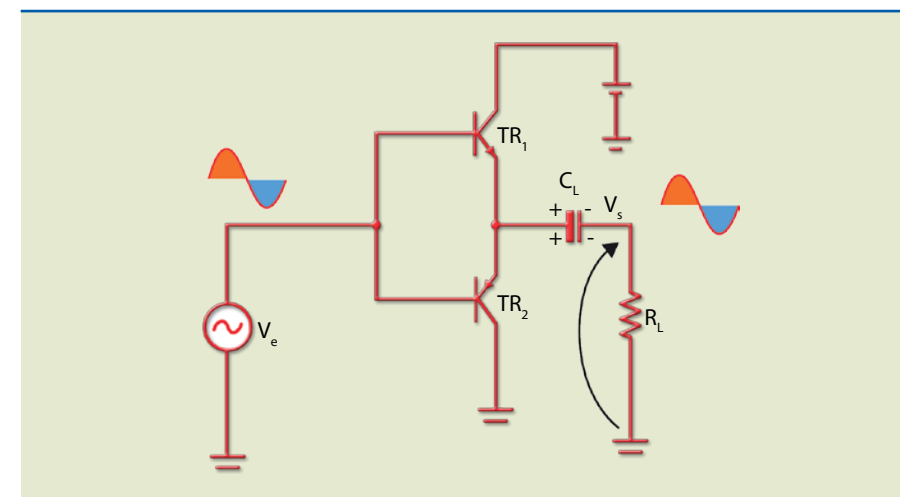


Figura 5.32

Amplificador classe B com fonte simples.



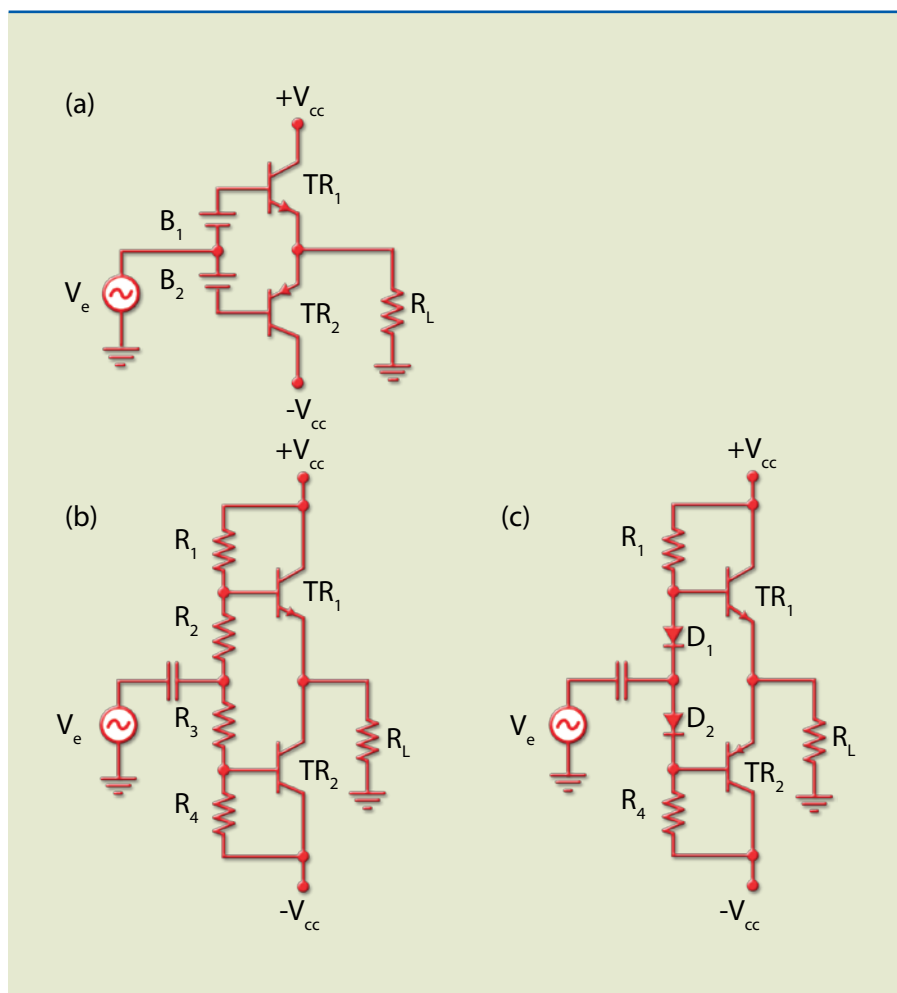
5.6.3 Amplificador classe AB

Esse amplificador é um intermediário entre os classes A e B em termos de eficiência e distorção. Nessa classe, os transistores são polarizados um pouco acima do corte com uma tensão próxima de 0,6 V. A partir desse valor, quando a tensão de entrada (V_e) se torna positiva, o transistor TR_1 conduz no semiciclo positivo e, quando a tensão de entrada fica negativa, TR_2 conduz no semiciclo negativo, eliminando o *crossover*.

A figura 5.33a mostra esse conceito com as baterias B_1 e B_2 polarizando os transistores TR_1 e TR_2 , respectivamente. Na prática, as baterias são substituídas por tensões obtidas por meio do divisor de tensão ou por diodo. No circuito da figura 5.33b, a tensão em R_2 representa a bateria B_1 , que polariza TR_1 , e a tensão em R_3 representa a bateria B_2 , que polariza TR_2 . No circuito da figura 5.33c, a tensão de polarização é obtida nos diodos D_1 e D_2 . A polarização por diodos é preferível, pois a tensão não dependerá da alimentação V_{CC} .

Figura 5.33

Amplificador classe AB:
 a) eliminando o *crossover*;
 b) polarização com divisor de tensão e
 c) polarização por diodos.



A fonte ($-V_{CC}$) que polariza o transistor TR_2 também pode ser eliminada, adicionando um capacitor de grande valor em série com a carga, como foi feito no classe B. O ganho de corrente do estágio de saída pode ser aumentado se inserir-

mos um par Darlington no lugar de cada um dos transistores de saída dos circuitos da figura 5.32. Observe a necessidade de colocar quatro diodos em vez de dois (figura 5.34).

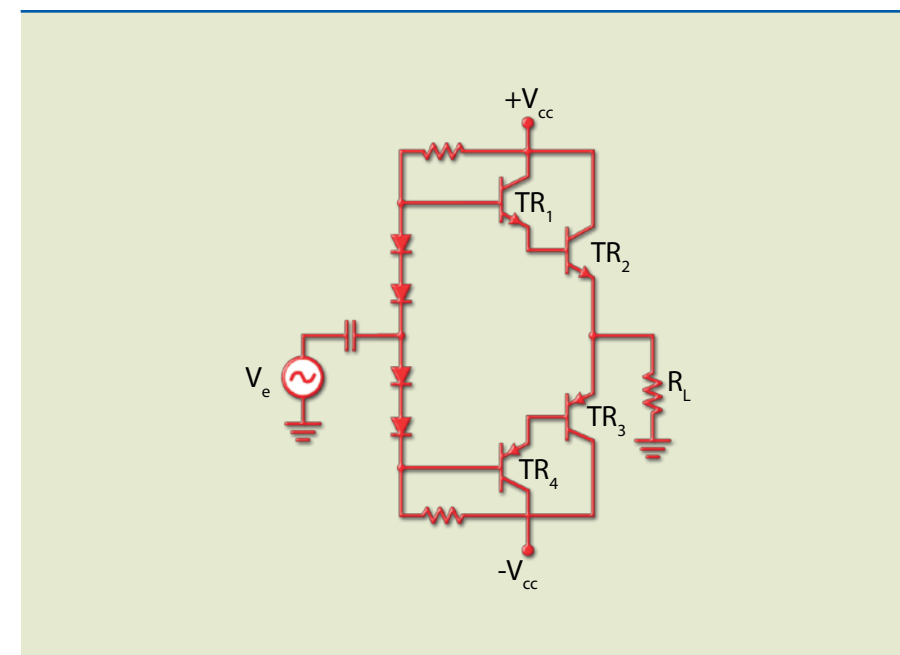


Figura 5.34

Aumento do ganho de corrente do estágio de saída.

5.6.4 Amplificador classe C

Os amplificadores classe C têm rendimento maior que os classes A, B e AB, pois o transistor conduz somente uma pequena parte do semiciclo positivo. A diferença principal entre os classe C e os outros é que o ganho é máximo em uma única frequência, chamada de ressonância. A figura 5.35 mostra o circuito e o comportamento do ganho de acordo com a frequência. Quando o sinal de entrada atinge a frequência de ressonância estabelecida, o transistor começa a conduzir e o circuito LC (chamado de circuito tanque) passa a oscilar no ganho máximo.

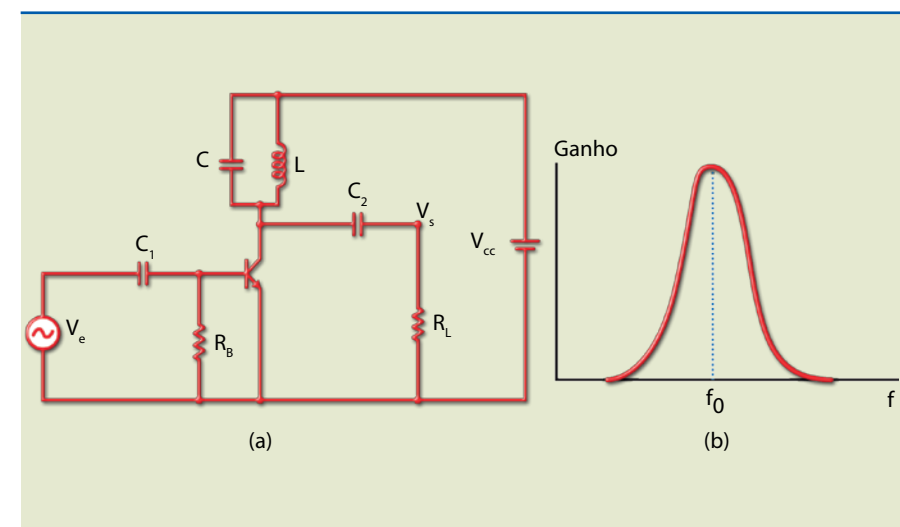


Figura 5.35

Amplificador classe C:
 a) circuito e
 b) curva de resposta em frequência.



O ganho é máximo na frequência de ressonância (f_o), que pode ser calculada por:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Observe que não existe polarização de base; é o sinal que providencia essa polarização.

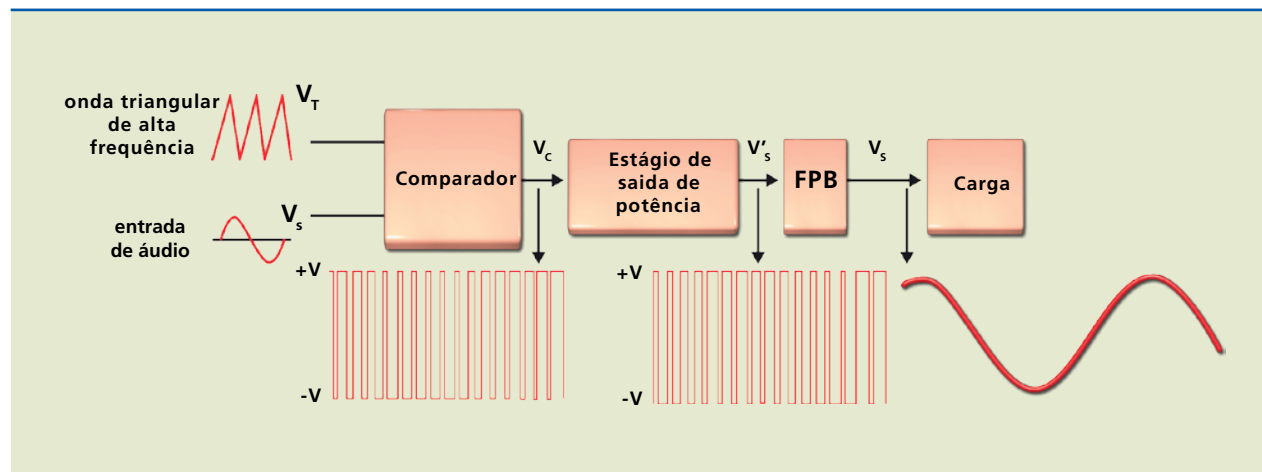
5.6.5 Amplificador classe D

Nessa classe de amplificadores, os transistores operam como chave. No corte a corrente é zero e na saturação a tensão é zero. Desse modo, a potência dissipada é muito baixa, a eficiência aumenta e, portanto, a fonte de alimentação requer menor potência. Esse tipo de amplificador é largamente usado em equipamentos portáteis.

A ideia básica consiste em converter o sinal de áudio (V_s) em um sinal de onda quadrada modulado em PWM (modulação por largura de pulso) de frequência muito maior que a de áudio. Depois, efetua-se a filtragem, recuperando o sinal de áudio (figura 5.36).

Figura 5.36

Diagrama de blocos de um amplificador classe D.



A tensão de saída do comparador (V_C) é:

$$V_C = +V, \text{ se } V_s > V_T, \text{ e } V_C = -V, \text{ se } V_s < V_T.$$

Essa tensão (V_C) é aplicada na entrada de um amplificador fonte comum com um par complementar de transistores MOS, que operarão como chave (figura 5.37).

Para $V_C = +V$, o transistor TR_1 corta e o TR_2 conduz a saída $V'_s = -V$, se a queda de tensão através de TR_2 for desprezível. Similarmente, se $V_C = -V$, TR_1 conduz e TR_2 corta a saída $V'_s = +V$.

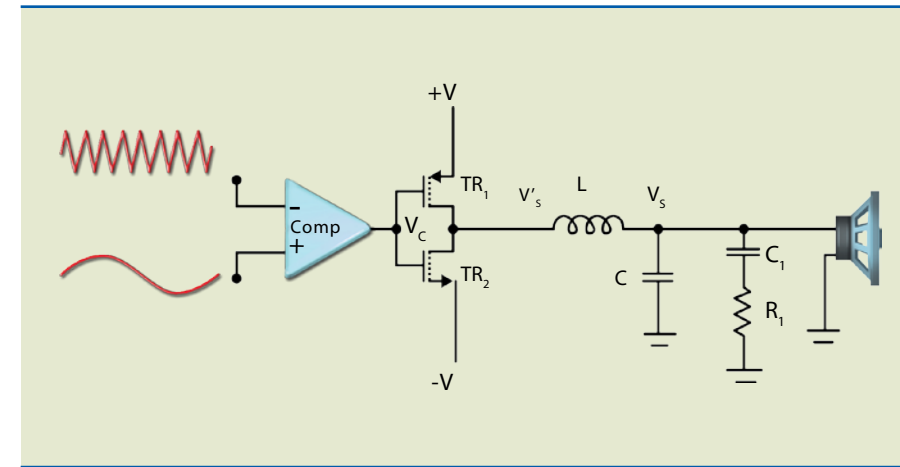


Figura 5.37

Amplificador classe D básico.

Os componentes representados por L e C compõem o filtro passa-baixa de rede, constituída por R_1 e C_1 , compensando a reatância indutiva da bobina do alto-falante. Dessa maneira, o filtro enxerga uma carga resistiva em alta frequência.

