

## CAPÍTULO 8

### AMPLIFICADORES TRANSISTORIZADOS

#### CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS AMPLIFICADORES

Os amplificadores podem ser classificados de acordo com:

A frequência de operação:

- Amplificadores de áudiofrequência(AF)
- Amplificadores de videofrequência
- Amplificadores de radiofrequência(RF)

A classe de operação:

- Classe A
- Classe B
- Classe C
- Classes intermediárias(A2, B2, AB1, AB2)

O sistema de acoplamento:

- Acoplamento RC
- Acoplamento a transformador
- Acoplamento por impedância
- Acoplamento direto

O uso:

- Amplificadores de potência ou corrente
- Amplificadores de tensão

#### FREQUÊNCIAS DE OPERAÇÃO

As faixas de frequência de operação determinam o tipo de amplificador a ser usado.

#### Amplificadores de áudiofrequência

Estes amplificadores atuam numa faixa de frequência que vai de 20 Hz a 20 kHz, faixa esta, sensível ao ouvido humano e por esta razão recebe o nome de áudiofrequência. Estes amplificadores são encontrados em receptores de rádio, intercomunicadores e outros.

#### Amplificadores de videofrequência

Estes amplificadores abrangem uma ampla faixa de frequência que vai de 30 kHz a 6 MHz. Eles são empregados em circuitos que ampliam sinais que devem ser vistos em telas de radares, televisores etc.

#### Amplificadores de radiofrequência

Diferenciam-se dos outros dois tipos porque ampliam uma estreita faixa de frequência dentro do espectro de radiofrequência, que vai de 30 kHz até vários GHz. São usados em vários equipamentos. Quando sintonizamos uma emissora de rádio estamos deslocando a estreita faixa de ampliação do circuito, dentro do espectro de frequência.

#### CLASSES DE OPERAÇÃO

De acordo com a polarização empregada para o transistor, podemos atribuir as classes de operação.

A classe de operação é determinada pelo circuito de polarização de entrada. Na maioria dos circuitos amplificadores a polarização e a reta de carga têm valores fixos, definidos pelos valores de seus componentes.

Consideraremos, em nossas análises, somente os efeitos do circuito de polarização de entrada.

#### Amplificador classe “A”

Os amplificadores da classe “A” operam durante os dois semiciclos do sinal de entrada, (360°). São polarizados para trabalhar na região ativa da curva de saída.

Geralmente operam na parte linear das curvas características, a fim de obter na saída uma resposta fiel (não distorcida) do sinal de entrada.

O primeiro passo para a determinação da classificação do amplificador é a construção da reta de carga como mostrado na figura 8-1 Em seguida, deve-se selecionar um ponto quiescente de modo a permitir que um sinal de entrada varie através da parte linear da curva característica. Neste exemplo foi escolhida uma  $I_B$  estática de 500  $\mu A$  e a  $V_{CC}$  é selecionada em seguida para um valor de 9 Volts para o circuito em classe “A”.

Veja na figura 8-1 o circuito de entrada e as formas de onda para um ponto “Q” de 500  $\mu A$ , em classe A.

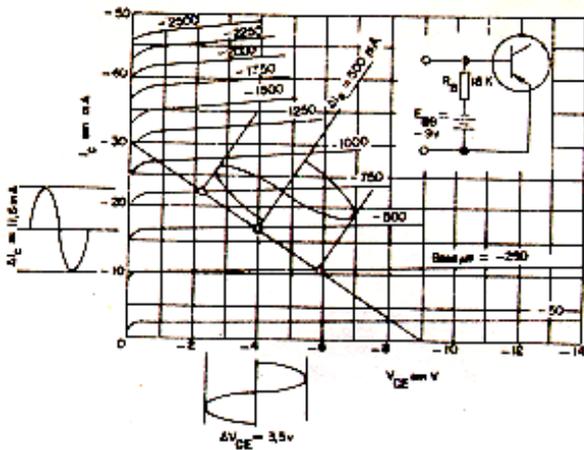


Figura 8-1 Circuito de entrada e formas de onda em classe “A”

Em seguida determinaremos o valor de  $R_B$  e, para calcular esse valor é necessário que se leve em consideração o valor da  $V_{BE}$  do transistor. Assim, a equação correta para o cálculo de  $R_B$  é a seguinte:

$$R_B = \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{I_B}$$

Na prática, porém, podemos desprezar o valor de  $V_{BE}$ , e desta forma teremos:

$$R_B = \frac{V_{CC}}{I_B}$$

Substituindo a  $V_{CC}$  e  $I_B$  pelos valores de 9V e 500  $\mu A$  respectivamente teremos:

$$R_B = \frac{9V}{500 \mu A} = 18k\Omega$$

O circuito de polarização de entrada está completamente mostrado na parte superior direita da figura 8-1.

Quando o sinal de entrada é zero (ver a figura 8-1), a  $I_B$  é  $-500 \mu A$ , a  $I_C$  é  $-17 \text{ mA}$  e a  $V_{CE}$  é  $-3,9 \text{ V}$  (valores do ponto quiescente).

Uma variação da corrente de entrada para o seu valor máximo negativo de 250  $\mu A$ , elevará a  $I_B$  para  $-750 \mu A$ , logo a  $I_C$  aumentará para  $-22,2 \text{ mA}$ , enquanto que a  $V_{CE}$  diminuirá para  $-2,3 \text{ V}$ .

Quando a  $I_B$  diminui para  $-250 \mu A$ , a  $I_C$  diminui para  $-11,8 \text{ mA}$  enquanto que a  $V_{CE}$  aumenta para  $-5,5 \text{ V}$ .

Assim, uma tensão de saída de 3,2 Vpp e uma variação na corrente de saída de 10,4 mA são obtidas.

Podemos notar que quando a  $I_B$  aumenta negativamente, a  $I_C$  fica mais negativa e a  $V_{CE}$

menos negativa. Por outro lado, quando a  $I_B$  diminui negativamente, a  $I_C$  fica menos negativa e a  $V_{CE}$  mais negativa. Isto indica que as correntes de entrada e de saída estão em fase enquanto que as tensões de entrada e de saída estão fora de fase. Portanto, há uma inversão de  $180^\circ$  na configuração de emissor comum.

### Amplificador classe “B”

Os amplificadores classe “B” operam na região ativa das curvas, durante um semiciclo do sinal de entrada, e permanecem em corte durante o outro ( $180^\circ$ ).

Visto que somente metade do sinal de entrada é amplificada, os amplificadores classe “B” são normalmente montados na configuração “Push-pull”, que são amplificadores de potência formados por dois transistores que conduzem alternadamente, mas que na saída, produzem um sinal que é idêntico ao sinal de entrada.

O ponto quiescente (POE) é estabelecido no cruzamento da reta de carga com a curva de  $I_B$  igual à zero como se vê na figura 8-2.

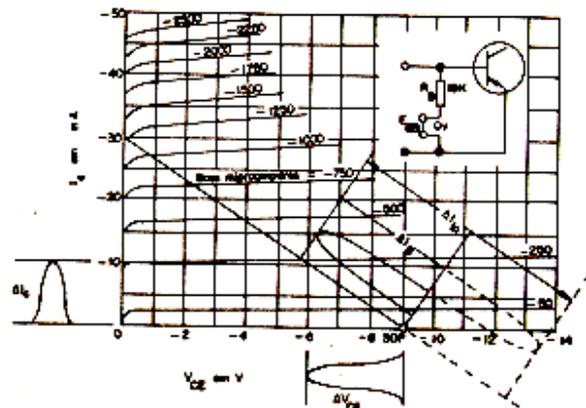


Figura 8-2 Circuito de entrada e formas de onda em classe “B”

Uma fonte de polarização de entrada não é requerida, já que a corrente quiescente da base é zero.

Uma  $R_B$  relativamente grande (18 k) é usada para limitar a dissipação do sinal de entrada do circuito de polarização. Assim, o circuito de polarização de entrada contém somente um resistor de polarização, como se vê na figura 8-2.

No ponto quiescente,  $I_B$  e  $I_C$  são iguais a zero e  $V_{CE}$  é igual a  $-9V$ . Quando o sinal de entrada se torna negativo, polariza diretamente a junção emissor-base.

Na alternância positiva a junção emissor-base está polarizada inversamente. O transistor fica cortado e parte da corrente de entrada passa através de  $R_B$ , durante esta alternância.

### Amplificador classe "C"

A operação em classe "C" é conseguida pela polarização inversa da junção de entrada do transistor. Com polarização inversa aplicada ao transistor, a corrente de base permanece em zero até que a corrente de entrada produza uma queda de tensão através da resistência de entrada. Esta queda de tensão deve estar com polaridade oposta à fonte de polarização do circuito de entrada e deve superar a tensão da fonte.

Na figura 8-3,  $I_B$  permanece em zero até que a corrente de entrada se torne igual a  $-100\mu A$ . Quando isto ocorre, a  $V_{BE}$  é igual a zero.

$$\begin{aligned} V_{BE} &= E_{BB} + (I_{in} \times R_B) = \\ &= 1,5V + (-100\mu A \times 15k) = \\ &= 1,5V + (-1,5V) = 0 \end{aligned}$$

Desta equação podemos deduzir que a junção emissor-base estará polarizada diretamente, quando a corrente de entrada for maior que  $-100\mu A$ . Um sinal de saída é obtido para a porção de corrente de entrada que é maior que  $-100\mu A$ .

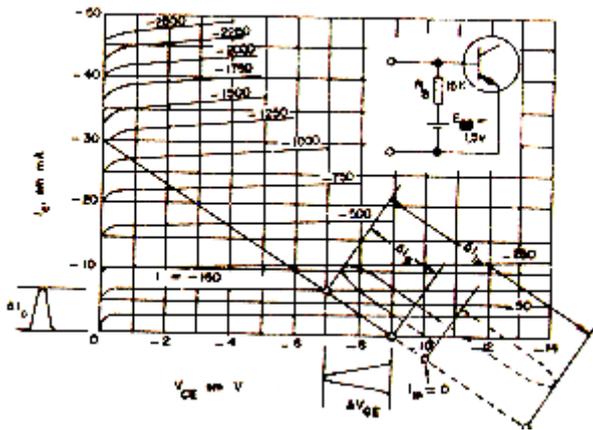


Figura 8-3 Circuito de entrada e formas de ondas em classe "C"

Na prática, um sinal de entrada muito maior será usado para obter amplificação em classe "C".

Na figura 8-4 vemos as formas de onda de saída, com relação às de entrada para cada

classe de operação. Os sinais não foram mostrados com amplificação, nem com inversão de fase, pois nosso interesse está somente no período de condução.

CLASSE	FORMAS DE ONDAS DE ENTR.	FORMAS DE ONDAS DE SAÍDA	PERÍODO DE CONDUÇÃO
A <sub>1</sub>			360°
A <sub>2</sub>			340°
AB <sub>1</sub>			340°
AB <sub>2</sub>			320°
B			180°
B <sub>2</sub>			entre 120° e 180°
C			120°

Figura 8-4 Formas de onda de saída com relação às de entrada para cada classe de operação.

### SISTEMAS DE ACOPLAMENTO

Um simples estágio amplificador, normalmente não é suficiente nas aplicações em aparelhos receptores, transmissores e outros equipamentos eletrônicos.

Um ganho mais elevado é obtido pelo acoplamento de vários estágios amplificadores.

#### Casamento de impedâncias

Para que haja a máxima transferência de sinal, o estágio de entrada deve ter a impedância equilibrada com a da fonte de sinal (microfone, antena etc); e o estágio final deve ter a impedância equilibrada com a da carga (fone, alto-falante, linha de transmissão etc)

Da mesma forma, a impedância de saída de um estágio deve estar "casada" com a impedância de entrada do estágio seguinte.

Além do equilíbrio de impedância, é de vital importância isolar a passagem de corrente contínua, de uma etapa para outra.

### Tipos de acoplamento

- A) Redes RC
- B) Transformadores

- C) Acoplamento por impedância
- D) Acoplamento direto

### Acoplamento RC

A figura 8-5A apresenta um amplificador de dois estágios acoplados mediante uma rede RC.

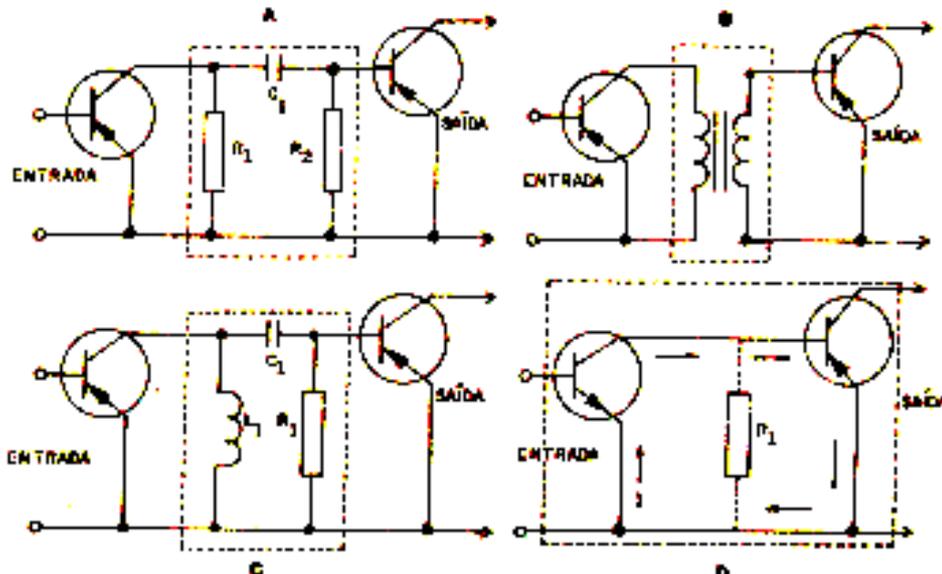


Figura 8-5 Amplificador com acoplamento RC

O capacitor de acoplamento  $C_1$  tem como primeira função isolar a tensão de CC presente no coletor do primeiro estágio, para que ela não apareça na base do transistor do estágio seguinte e, como segunda função transferir o sinal de um estágio para o outro.

O capacitor de acoplamento deve ter, também, uma reatância reduzida para as tensões de sinal e, portanto, seu valor de capacitância deve ser relativamente alto.

Os valores típicos de capacitância vão de 1 a  $30\mu\text{F}$ . É necessário que o valor do capacitor seja alto, por causa da baixa impedância de entrada do estágio seguinte.

O sinal que sai do primeiro estágio, desenvolve-se no resistor  $R_B$ . O capacitor  $C_1$  e o resistor  $R_1$  constituem a rede RC de acoplamento entre os dois estágios. A eficiência do amplificador acoplado mediante uma rede RC é baixa, por causa da dissipação de potência de CC no resistor de carga.

### Resposta de frequência

As frequências muito baixas são atenuadas pelo capacitor de acoplamento,

porque a sua  $X_C$  torna-se alta, com a diminuição da frequência. A resposta em altas frequências, para o transistor está limitada pelo efeito “Shunt” da capacitância emissor-coletor do primeiro estágio, e da capacitância base-emissor do segundo estágio.



Figura 8-6 Capacitância entre os elementos do transistor

Observe na figura 8-6 que  $C_C$  e  $R_B$  estão em série e em baixas frequências e, que a  $X_C$  é consideravelmente alta, provocando assim o máximo de queda de sinal em  $C_C$  e o mínimo em  $R_B$ .

No entanto, para as altas frequências, aparece uma  $X_C$  mínima, em paralelo com  $R_C$ , resultando numa resistência total mínima

possibilitando o desvio de grande parte ou até mesmo de todo o sinal para a terra.

### Vantagens e desvantagens do acoplamento por rede RC

O acoplamento RC é bastante usado em circuitos transistorizados, por oferecer uma boa resposta de frequência, sendo de simples confecção e preço relativamente baixo.

Porém, embora esse acoplamento ofereça uma boa resposta em frequência, não é o tipo de maior eficiência, em face das dificuldades em casar as impedâncias entre estágios. Outra desvantagem desse tipo de acoplamento está no fato de apresentar grandes perdas quando usado em frequências muito baixas.

### Acoplamento a transformador

No acoplamento a transformador o enrolamento do primário do transformador ( $T_1$ ) é a impedância de carga do coletor do primeiro estágio.

O enrolamento secundário de  $T_1$  desenvolve o sinal de CA, para a base do transistor do segundo estágio e também age como caminho de retorno de CC, da base.

A resistência muito baixa, no circuito de base, auxilia a estabilização da polarização no ponto de operação de CC. Com um resistor na entrada do emissor, o fator de estabilidade de corrente é quase ideal.

Como não há resistor de carga de coletor para dissipar potência, a eficiência do amplificador acoplado a transformador se reduz, teoricamente, para 50%. Por este motivo, o processo de acoplamento a transformador é muito usado em equipamentos portáteis e operados com baterias.

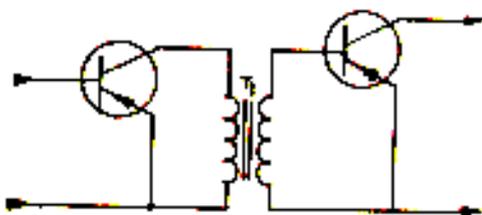


Figura 8-7 Acoplamento a transformador

### Vantagens e desvantagens do acoplamento a transformador

Os transformadores facilitam o equilíbrio da carga de saída do transistor e o

equilíbrio da fonte, à entrada do transistor, para se obter o máximo de ganho de potência, para um determinado estágio.

A resposta de frequência de um estágio acoplado por intermédio de transformador não é tão boa quanto a do estágio acoplado por rede RC. A resistência “Shunt” do enrolamento primário, nas baixas frequências, causa a queda de resposta nestas frequências. Nas altas frequências, a resposta é reduzida pela capacitância de coletor e pela reatância de saída, entre os enrolamentos do transformador.

Além da resposta de frequência ser pobre, os transformadores são mais caros, mais pesados, e ocupam maior área que os resistores e capacitores empregados no acoplamento RC.

Portanto, o uso do acoplamento a transformador é limitado, normalmente, àquelas aplicações que requerem alta eficiência de potência de saída.

### Acoplamento por impedância

O acoplamento por impedância é similar ao acoplamento por rede RC, com exceção de que o resistor de carga é substituído por um indutor ( $L_1$ ), como apresentado na figura 8-8

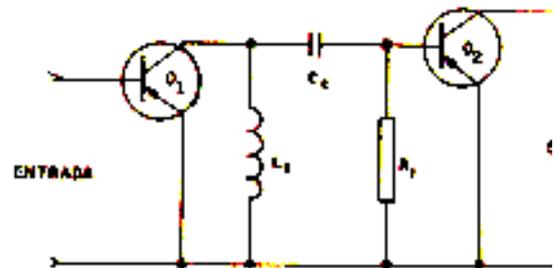


Figura 8-8 Acoplamento por impedância

A resistência de carga é somente a resistência do fio do enrolamento, o qual proporciona uma queda mínima de tensão de CC. Grandes valores de indutância devem ser usados, para que seja oferecida uma alta reatância, nas baixas frequências.

O ganho do estágio acoplado por impedância cresce com o aumento da frequência, já que a reatância indutiva é diretamente proporcional à frequência.

Na faixa de altas frequências, a reatância diminui, por causa da capacitância distribuída no circuito, que desvia o sinal.

Os campos magnéticos que cercam a impedância de carga podem causar, também,

um acoplamento indesejável a outros circuitos. Por isso, esses campos devem ser controlados, através de indutâncias apropriadas.

### Acoplamento direto

Quando o transistor de um estágio amplificador é ligado diretamente ao transistor do estágio seguinte dizemos que o acoplamento é direto, como mostrado na figura 8-9.

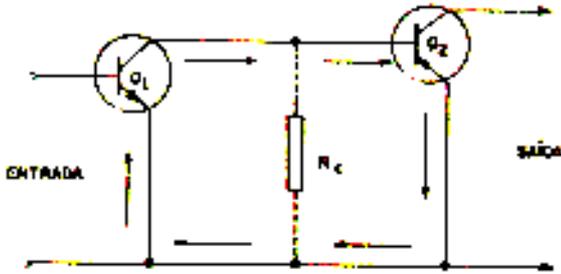


Figura 8-9 Acoplamento direto

Este tipo de acoplamento é usado para a amplificação de sinais chamados de “corrente contínua”, em virtude da frequência ser muito baixa.

Observando o circuito da figura 8-9, vemos que um transistor PNP está ligado diretamente a um transistor NPN. A direção do fluxo de corrente é indicada pelas setas. Se a corrente do coletor do primeiro estágio for maior que a corrente de base do estágio seguinte, devemos ligar o resistor R<sub>C</sub> (carga do coletor), como está indicado pela linha tracejada.

Como o número de componentes necessários no amplificador acoplado diretamente é mínimo, teremos o máximo de economia e também a máxima fidelidade de sinal. Entretanto, o número de estágios que podem ser acoplados diretamente é limitado.

### AMPLIFICADORES DE ÁUDIO

Antes de iniciarmos os estudos destes amplificadores, é interessante lembrar, que a finalidade de um amplificador é a de aumentar a tensão, a corrente, ou o nível de potência de um sinal, a um valor necessário, a fim de operar um dispositivo de saída.

Esse dispositivo pode necessitar de considerável energia ou pode exigir uma alta tensão, com baixa potência, para sua operação.

Os amplificadores de tensão (baixo nível) são estágios de amplificação projetados para produzir um grande valor de tensão, através da carga do circuito de coletor. Para produzir uma alta tensão, utilizável através de um circuito de carga, é necessário que a oposição à variação de I<sub>C</sub> seja a máxima possível, qualquer que seja a carga (resistor, reatância ou impedância).

Os amplificadores de potência (alto nível) são estágios amplificadores, construídos para fornecer grandes quantidades de potência para a carga no circuito coletor.

Num amplificador de potência, deve haver uma grande corrente no circuito do coletor, uma vez que a potência é o produto da resistência, pelo quadrado da corrente.

Os pré-amplificadores são etapas de baixo nível, que se destinam à amplificação de sinais originários de dispositivos, tais como microfones, detectores, cápsulas magnéticas etc.

### AMPLIFICADORES DE ÁUDIO TRANSISTORIZADOS

Os circuitos amplificadores de áudio são projetados especificamente para ampliar sinais da faixa de áudio frequência, isto é, sinais compreendidos entre 20 Hz e 20kHz.

O circuito de entrada de um amplificador transistorizado deve ser alimentado com a corrente de saída de um pré-amplificador. Neste caso, cada transistor é considerado como um amplificador de corrente ou potência, operando a um nível de corrente ou de potência, mais elevado que o nível do estágio anterior e menos elevado que o do estágio seguinte.

Uma vez que os transistores são, essencialmente, dispositivos amplificadores de potência, seu uso nos circuitos de áudio é classificado nas categorias amplificador de áudio de baixo nível e amplificador de áudio de alto nível.

O nível de potência de um estágio amplificador de áudio é determinado pelos requisitos do projeto. Em alguns casos, os amplificadores de baixo nível (também chamados de amplificadores de sinal) podem operar com potências variando de “picowatts” até “miliwatts”, enquanto que em outras situações (amplificadores de potência) podem operar com vários Watts.

## Circuito amplificador de áudio básico

O circuito da figura 8-10 apresenta um estágio amplificador básico de áudio.

A estabilização para esse amplificador é estabelecida pela corrente de base-emissor. Essa corrente cria uma tensão que polariza diretamente o circuito de entrada.

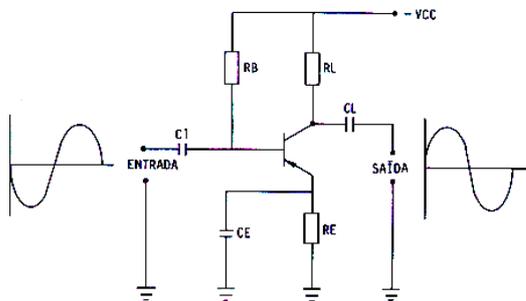


Figura 8-10 Amplificador de áudio básico

O resistor de base  $R_B$  limita a corrente de polarização estabelecendo assim o ponto quiescente.

Durante o semiciclo positivo do sinal de entrada a polarização direta diminui. Isso provoca uma conseqüente diminuição da corrente de coletor, através de  $R_L$ , e a tensão em  $R_L$  diminui.

Assim, a tensão de coletor aumenta, em direção a um valor negativo de  $V_{CC}$ .

Durante o semiciclo negativo do sinal de entrada, a polarização direta aumenta. Isso faz com que a corrente através de  $R_L$  aumente, aumentando também a queda de tensão sobre a mesma, tornando negativa a tensão de coletor.

O capacitor  $C_1$  acopla o sinal de entrada e o capacitor  $C_2$  o sinal de saída.

$R_E$  é o resistor de estabilização de emissor e está ligado em paralelo com o capacitor de desacoplamento  $C_E$ .

Ainda na figura 8-10 podemos ver que o sinal de saída está  $180^\circ$  defasado do sinal de entrada.

Como o sinal de saída é maior que o sinal de entrada, há um ganho de tensão.