

## AMPLIFICAÇÃO DE SINAIS ELÉTRICOS

Denomina-se de sinal elétrico a *qualquer variação de tensão ou corrente* através da qual se conduz uma informação.

O sinal de televisão, por exemplo, se constitui em variações de tensão que são uma "versão elétrica" das imagens captadas pela câmera (fig. 1).

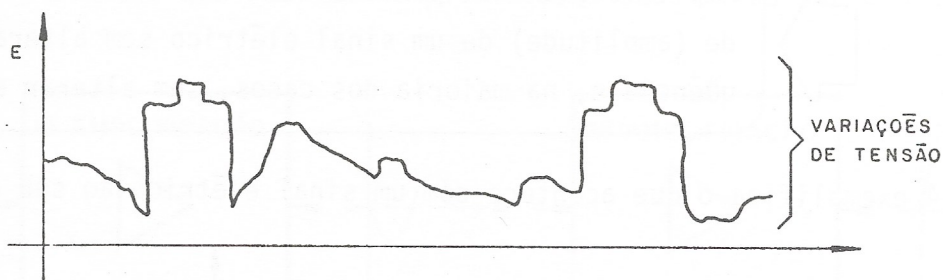


Fig. 1

Os sinais elétricos podem se apresentar como variações puras de tensão ou corrente ou como variações sobre um nível de tensão ou corrente contínua (figs. 2 e 3).

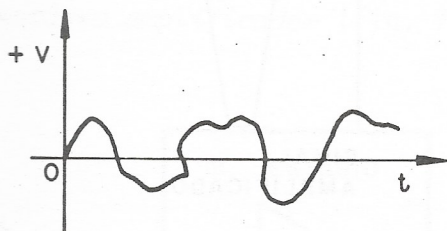


Fig. 2

Sinal  $\Rightarrow$  variação pura de tensão ou corrente

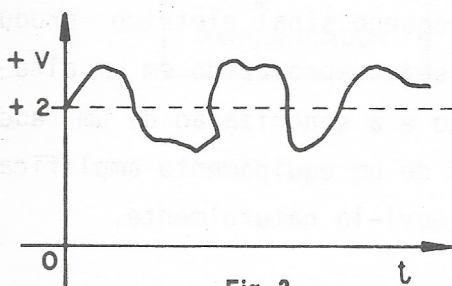
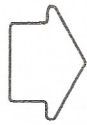


Fig. 3

Sinal  $\Rightarrow$  variação sobre um nível de tensão CC

A música, reproduzida por um alto-falante, por exemplo, nada mais é do que um sinal elêtrico transformado em som pelo alto-falante.

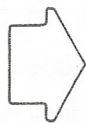


Sinais elétricos são variações de tensão ou corrente que conduzem uma informação.

Dependendo da aplicação a que se destinam os sinais elétricos podem ser de grande ou pequena intensidade.

Por exemplo: para movimentar os alto-falantes de um estádio de futebol necessita-se que o sinal elétrico a ser reproduzido tenha uma grande intensidade, enquanto que para movimentar os fones de um gravador (ou HEADPHONE) é suficiente um sinal de pequena intensidade.

Existe um processo através do qual um sinal elétrico de pequena intensidade, pode ser transformado em um sinal elétrico de grande intensidade. Este processo é denominado de AMPLIFICAÇÃO.



Amplificação é um processo que visa aumentar a intensidade (amplitude) de um sinal elétrico sem alterar a sua fre<sub>q</sub>uência e, na maioria dos casos, sem alterar a sua forma.

A figura 4 exemplifica o que acontece com um sinal elétrico ao ser amplificado.

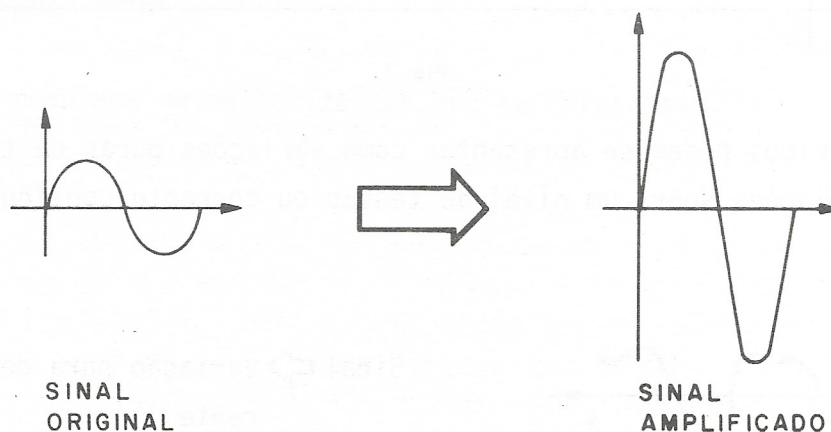


Fig. 4

A amplificação possibilita, por exemplo, que o pequeno sinal elétrico produzido por uma agulha de toca-disco (alguns milivolts) seja reproduzido em um alto-falante. Outro exemplo de aplicação da amplificação é a sonorização de um auditório. A amplificação da voz de um orador, através de um equipamento amplificador, permite que todas as pessoas do ambiente possam ouvi-lo naturalmente.



## Amplificador e estágio amplificador

O termo "amplificador" define todo um conjunto de componentes e circuitos que realizam a amplificação de um sinal.

Um amplificador de toca-disco, por exemplo, se compõe de uma série de pequenos circuitos que, no conjunto, amplificam o sinal da agulha mais de 1000 vezes para que o alto-falante possa funcionar (fig. 5).

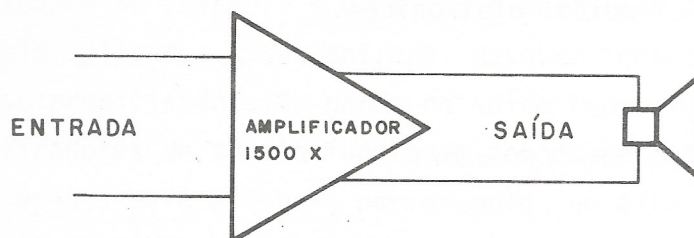


Fig. 5

Amplificações de sinal da ordem de 1000 ou 2000 vezes são empregadas constantemente em circuitos de rádio, televisão e controles industriais.

Entretanto, devido a uma limitação prática, não é possível amplificar um sinal 1000 ou 2000 vezes diretamente. A amplificação é feita parceladamente, através de uma série de circuitos que realizam amplificações sucessivas sobre o sinal (fig. 6).

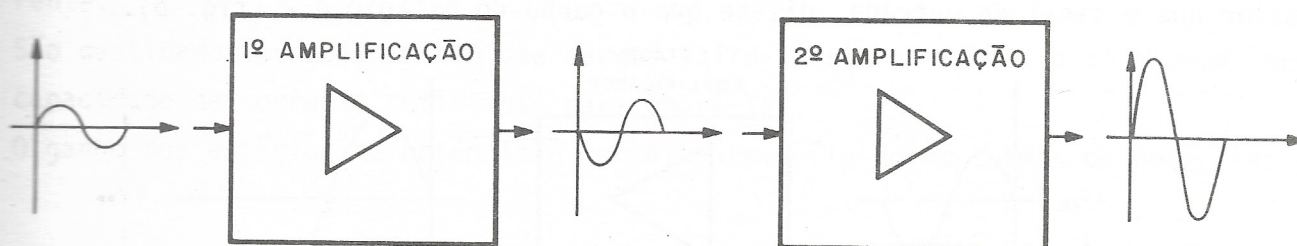


Fig. 6

Cada um dos circuitos que realiza uma parcela da amplificação total é denominado de *estágio amplificador* (fig. 7).

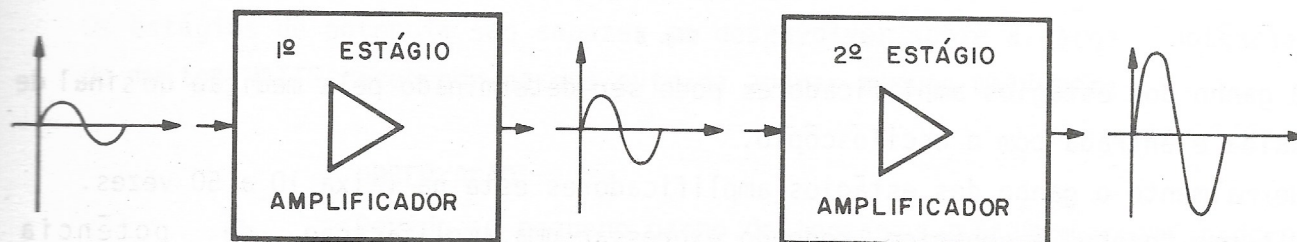


Fig. 7

Conclui-se então que:



Um *AMPLIFICADOR* se compõe de diversos *ESTÁGIOS AMPLIFICADORES*

#### OBSERVAÇÃO:

Os estágios amplificadores fazem parte da grande maioria dos circuitos eletrônicos.

#### *Ganho de um estágio amplificador*

O ganho de um estágio amplificador define quantas vezes o sinal é amplificado por este estágio. É uma relação direta entre o sinal presente na saída do estágio e o sinal aplicado à sua entrada.

GANHO  $G = \frac{\text{SINAL DE SAÍDA}}{\text{SINAL DE ENTRADA}}$

Assim, se o sinal na saída de um estágio amplificador tem a amplitude duas vezes maior que o sinal da entrada, diz-se que o ganho do estágio é 2 (fig. 8).

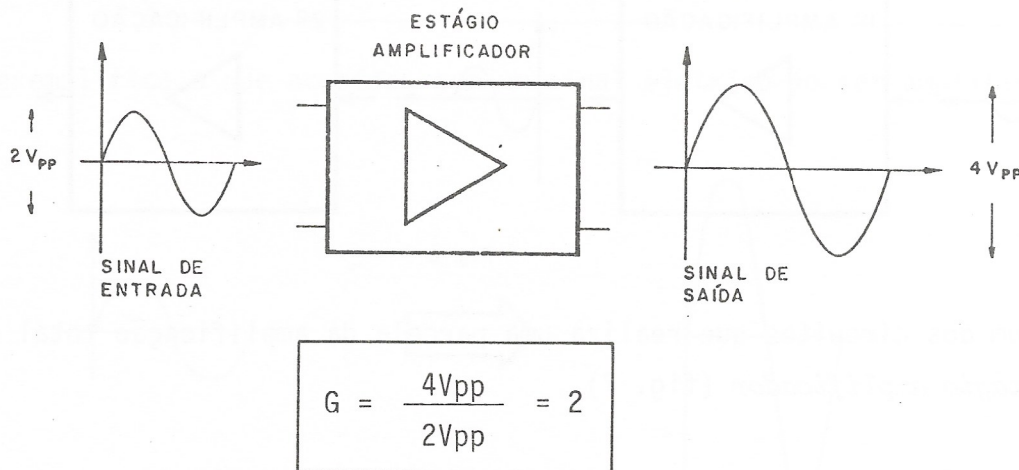


Fig. 8

O ganho dos estágios amplificadores pode ser determinado pela medição do sinal de saída e entrada com o osciloscópio.

Normalmente o ganho dos estágios amplificadores está na faixa 10 a 50 vezes.

O termo "ganho" é genérico, podendo expressar uma amplificação de potência

$\left( \frac{P_{SAÍDA}}{P_{ENTRADA}} \right)$ , de tensão  $\left( \frac{V_{SAÍDA}}{V_{ENTRADA}} \right)$  ou corrente  $\left( \frac{I_{SAÍDA}}{I_{ENTRADA}} \right)$ .



## *Tipos de estágios amplificadores*

Os estágios amplificadores podem ser de três tipos:

- a) estágio amplificador de tensão
- b) estágio amplificador de corrente
- c) estágio amplificador de potência para saída

a) **ESTÁGIO AMPLIFICADOR DE TENSÃO:** é um estágio destinado a aumentar a amplitude de tensão dos sinais aplicados a sua entrada. Recebem tensões da ordem de microvolts ou milivolts, propiciando alto ganho na saída (normalmente até 100 vezes). Os estágios amplificadores de tensão funcionam com correntes pequenas de forma que não podem ser usados para acionar, por exemplo, um alto-falante que necessita de correntes mais elevadas.

b) **ESTÁGIO AMPLIFICADOR DE CORRENTE:** são estágios que se destinam a fornecer grandes variações de corrente na saída a partir de pequenas variações de corrente aplicadas à entrada.

c) **ESTÁGIO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA PARA SAÍDA:** são estágios amplificadores com pequeno ganho de tensão (2 a 5 vezes) mas que propiciam também um ganho de corrente.

São destinados ao acionamento das cargas (alto-falantes, relês, etc) porque têm capacidade de corrente suficiente para operá-las.

O ganho dos estágios de potência é normalmente definido em termos de potência:

$$G(\text{Potência}) = \frac{\text{Potência de Saída}}{\text{Potência de Entrada}}$$

Os estágios de potência são capazes de desenvolver sobre a carga potências de muitos WATTS recebendo na sua entrada apenas alguns miliwatts.

### **OBSERVAÇÃO**

Devido ao pequeno ganho de tensão os estágios amplificadores de potência necessitam de grandes variações de tensão na entrada para fornecer um ganho de potência adequado.

Os amplificadores de som são uma composição de estágios amplificadores de tensão e um estágio de potência para saída (fig. 9).

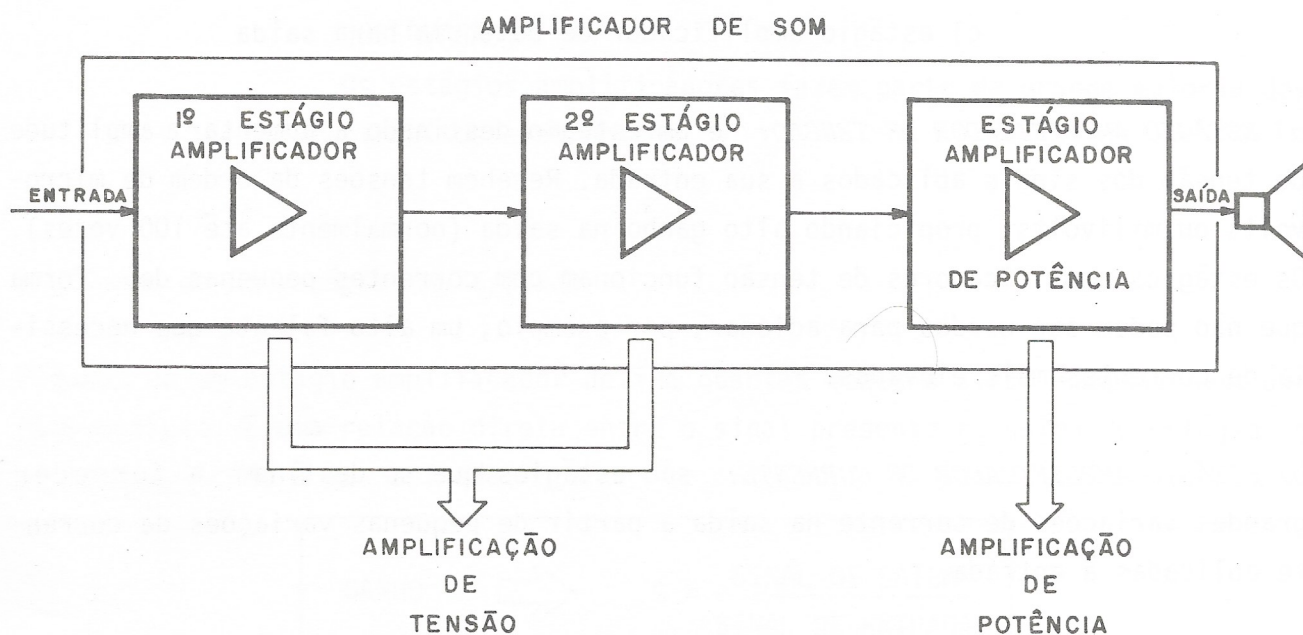


Fig. 9

Os estágios amplificadores de tensão tem por finalidade amplificar o sinal de entrada até que as variações de tensão sejam suficientes para que o amplificador de potência funcione como máximo rendimento, sendo denominado de pré-amplificadores. O estágio de potência recebe as tensões amplificadas e propicia a potência necessária (tensão e corrente) para a movimentação do alto-falante.

### EXERCÍCIO 1



## ESTÁGIO AMPLIFICADOR EM EMISSOR COMUM

É um tipo de circuito amplificador de sinais que proporciona alto ganho de tensão e de corrente empregando um transistor ligado em configuração de emissor comum (fig.10).

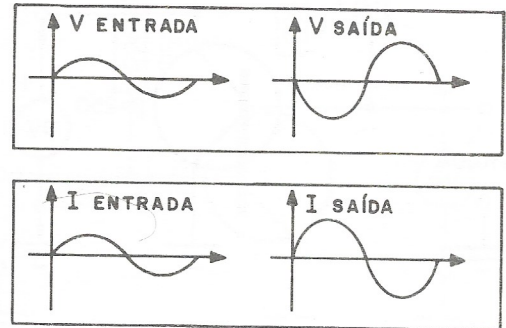
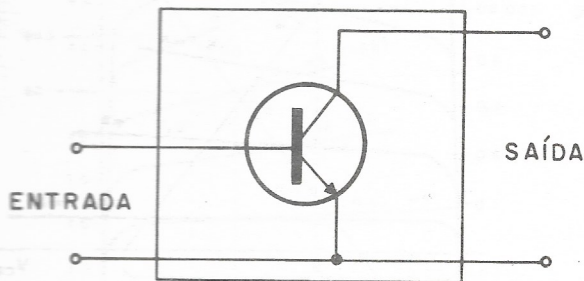


Fig. 10

Os estágios amplificadores com transistor em emissor comum são os mais empregados na amplificação de sinais devido ao fato de apresentarem alto ganho de tensão e de corrente, o que resulta em um ganho de potência elevado.

### Princípios de funcionamento

O princípio de funcionamento dos estágios amplificadores baseia-se na mudança do ponto de operação do transistor.

O funcionamento do estágio amplificador pode ser dividido em três condições:

- a) sem sinal de entrada
- b) com sinal de entrada positivo
- c) com sinal de entrada negativo

As três condições podem ser analisadas tomando como base o estágio amplificador em emissor comum apresentado na figura 11.

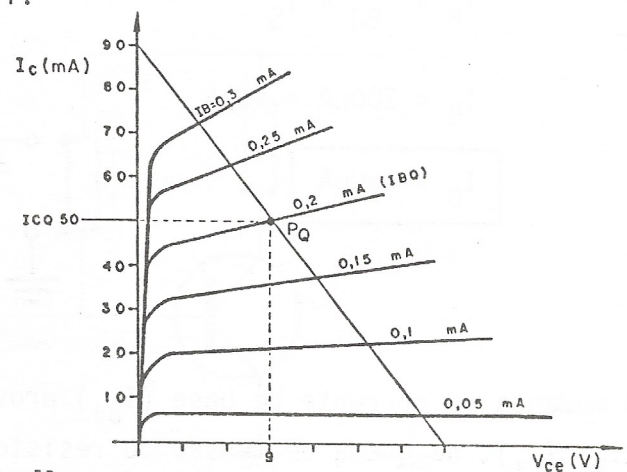
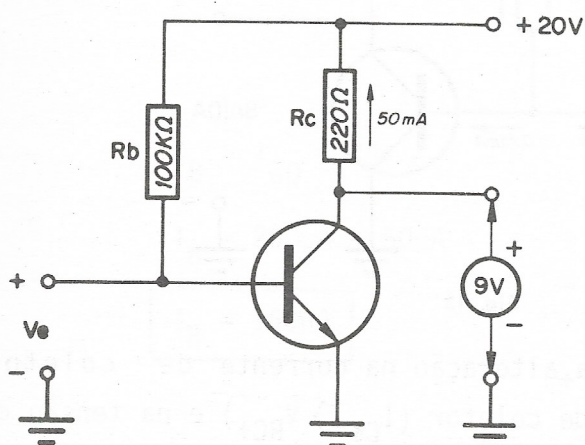


Fig. 11

a) *Sem sinal de entrada*: quando o estágio amplificador não recebe sinal na entrada, o transistor se mantém no ponto de funcionamento (fig.12).

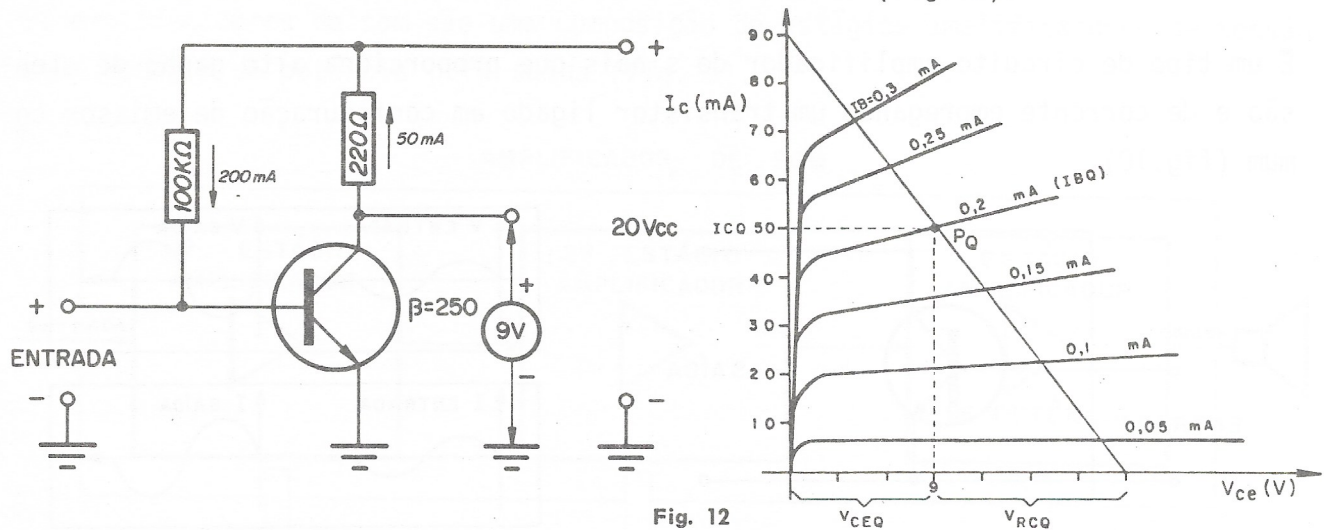
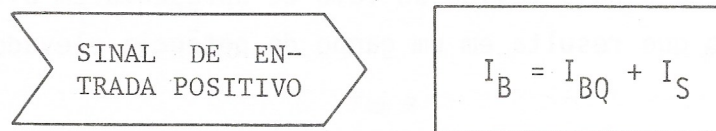


Fig. 12

b) *Com sinal de entrada positivo*: um sinal de entrada é positivo quando a corrente aplicada circula no mesmo sentido da corrente de polarização, somando-se a esta.



onde  $I_B$  = corrente de base

$I_{BQ}$  = corrente de polarização de base

$I_S$  = corrente de sinal

Tomando como exemplo um sinal positivo de  $50\mu A$  aplicado ao circuito tem-se o que é mostrado na figura 13.

$$I_B = I_{BQ} + I_S$$

$$I_B = 200\mu A + 50\mu A$$

$$I_B = 250\mu A$$

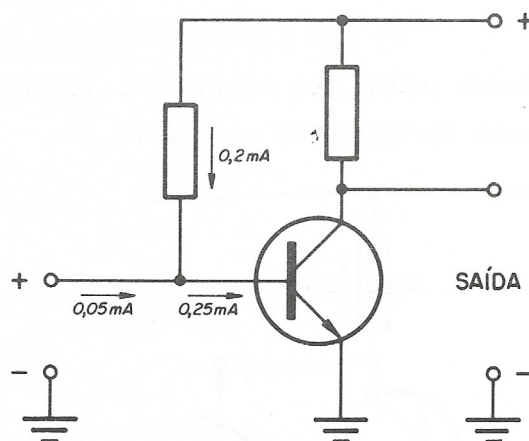


Fig. 13

A mudança na corrente de base ( $I_{B\uparrow}$ ) provoca alteração na corrente de coletor ( $I_{B\uparrow} \rightarrow I_{C\uparrow}$ ), na queda de tensão do resistor de coletor ( $I_{C\uparrow} \rightarrow V_{RC\uparrow}$ ) e na tensão de coletor-emissor ( $V_{RC\uparrow} \rightarrow V_{CE\downarrow}$ ).



Através da curva característica com a reta de carga ( $220\Omega$ ) pode se determinar graficamente o comportamento do transistor com o aumento da corrente de base (fig. 14).

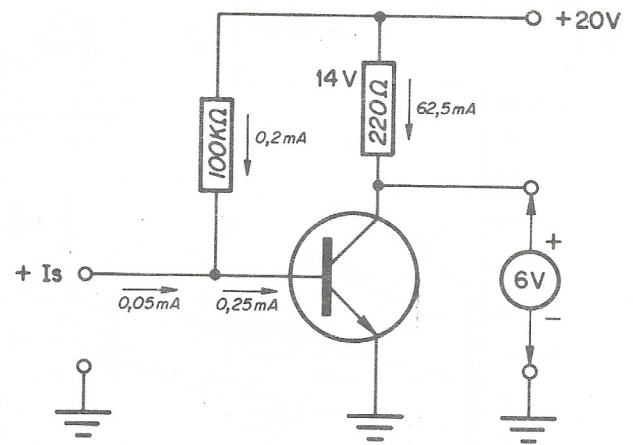
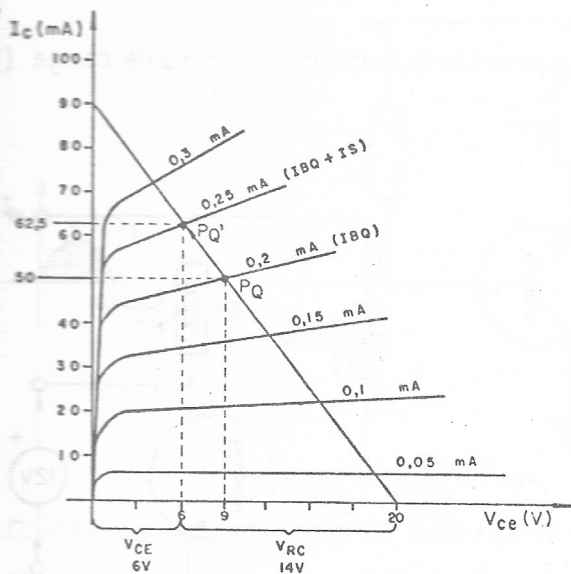


Fig. 14

#### RESUMINDO

Amplificador em emissor comum com sinal de entrada positivo:

$$I_B = I_{BQ} + I_S$$

$$I_{B\uparrow} \quad I_{C\uparrow} \quad V_{RC\uparrow} \quad V_{CE\downarrow}$$

c) Com sinal de entrada negativo: um sinal de entrada  $\bar{e}$  negativo quando a corrente aplicada circula em sentido oposto a corrente de polarização. Logo:

SINAL DE ENTRADA NEGATIVO

$$I_B = I_{BQ} - I_S$$

Considerando-se como exemplo um sinal negativo de  $50\mu A$  tem-se o apresentado na figura 15.

$$I_B = I_{BQ} - I_S$$

$$I_B = 200\mu A - 50\mu A$$

$$I_B = 150\mu A$$

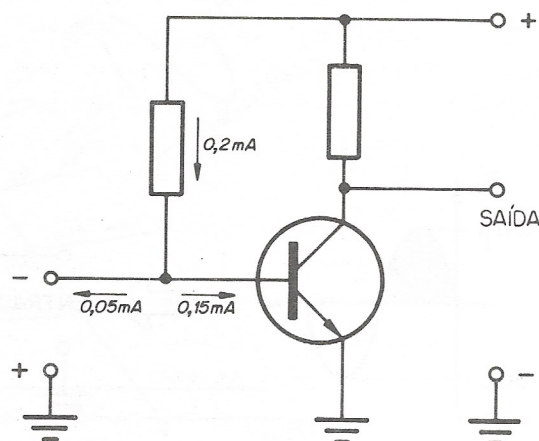


Fig. 15

A mudança na corrente de base ( $I_{B\downarrow}$ ) provoca modificações na corrente de coletor ( $I_{B\downarrow} \Rightarrow I_{C\downarrow}$ ), na queda de tensão do resistor de coletor ( $I_{C\downarrow} \Rightarrow V_{RC\downarrow}$ ) e na tensão coletor-emissor ( $V_{RC\downarrow} \Rightarrow V_{CE\uparrow}$ ).

Determina-se os limites através da curva característica com a reta de carga (fig. 16).

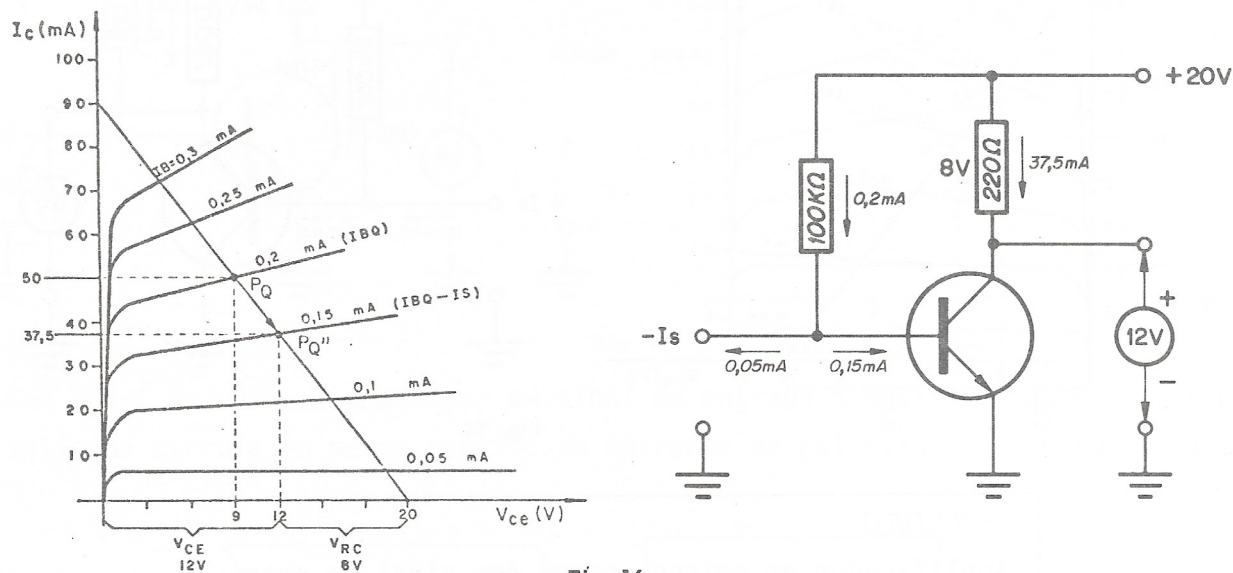


Fig. 16

#### RESUMINDO

Amplificador em emissor comum com sinal de entrada negativo:

$$I_B = I_{BQ} - I_S$$

$$I_{B\downarrow} \quad I_{C\downarrow} \quad I_{RC\downarrow} \quad V_{CE\uparrow}$$

A partir das conclusões assinaladas, pode-se analisar o comportamento do estágio amplificador em emissor comum com um sinal de entrada senoidal.

Considerando que o sinal aplicado seja uma variação senoidal de tensão, tem-se uma variação senoidal de corrente conforme a figura 17.

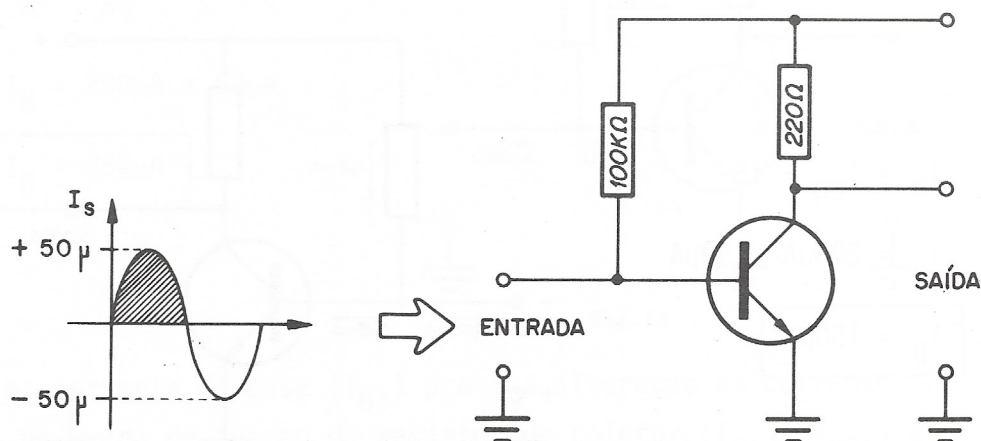


Fig. 17



No semiciclo em que o sinal de entrada  $\bar{e}$  positivo tem-se:  $I_B \uparrow$   $I_C \uparrow$   $V_{RC} \uparrow$   $V_{CE} \downarrow$  acompanhando a forma senoidal do sinal de entrada (fig. 18).

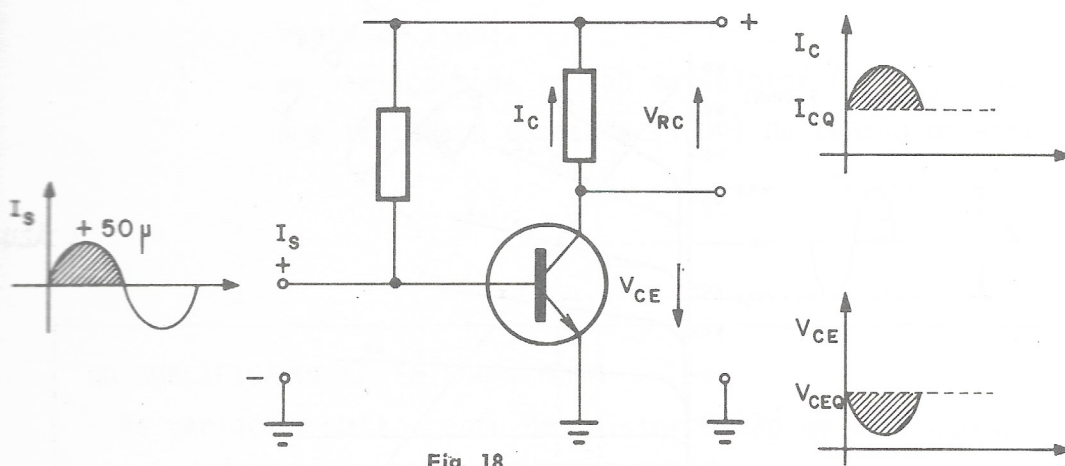


Fig. 18

No semiciclo em que o sinal de entrada  $\bar{e}$  negativo tem-se:  $I_B \downarrow$   $I_C \downarrow$   $V_{RC} \downarrow$   $V_{CE} \uparrow$  acompanhando a forma senoidal do sinal de entrada (fig. 19).

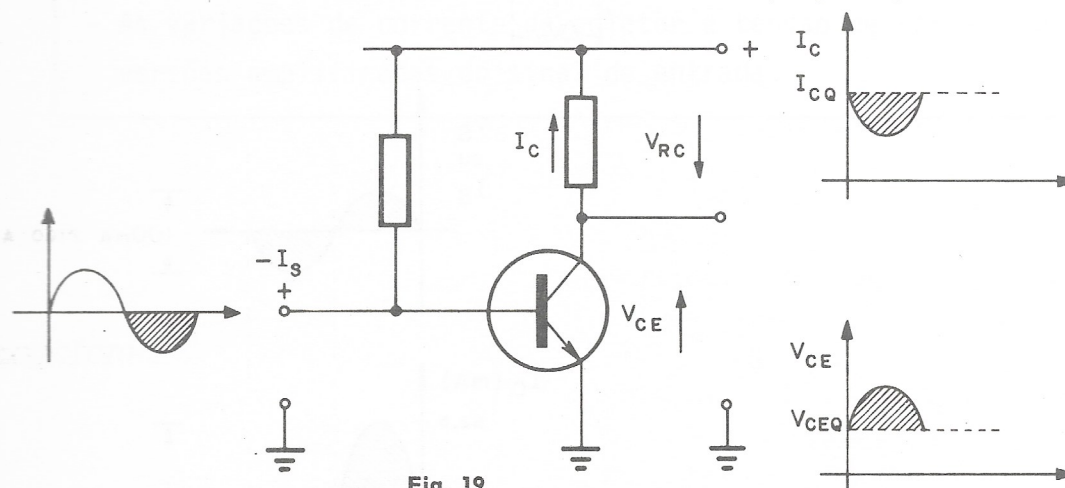


Fig. 19

Os valores reais de corrente e tensões podem ser obtidos aplicando o sinal de entrada sobre as curvas do transistor (fig. 20).

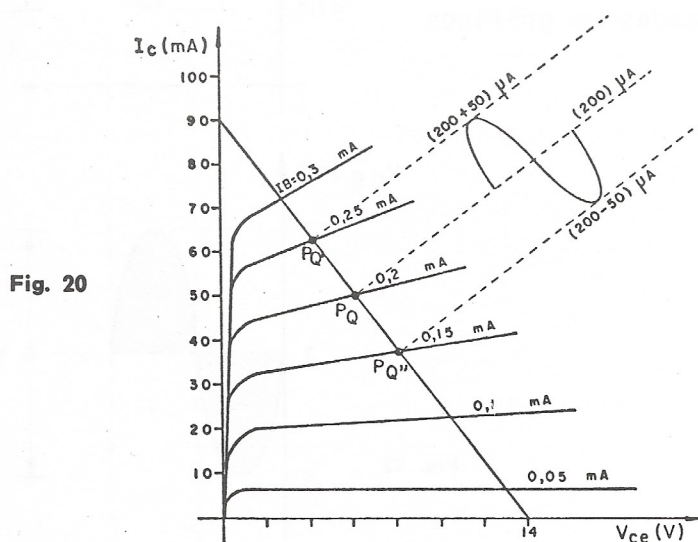


Fig. 20

Projetando os pontos A, B e C na vertical e horizontal se obtêm as variações de tensão e corrente resultantes no circuito de coletor (fig. 21).

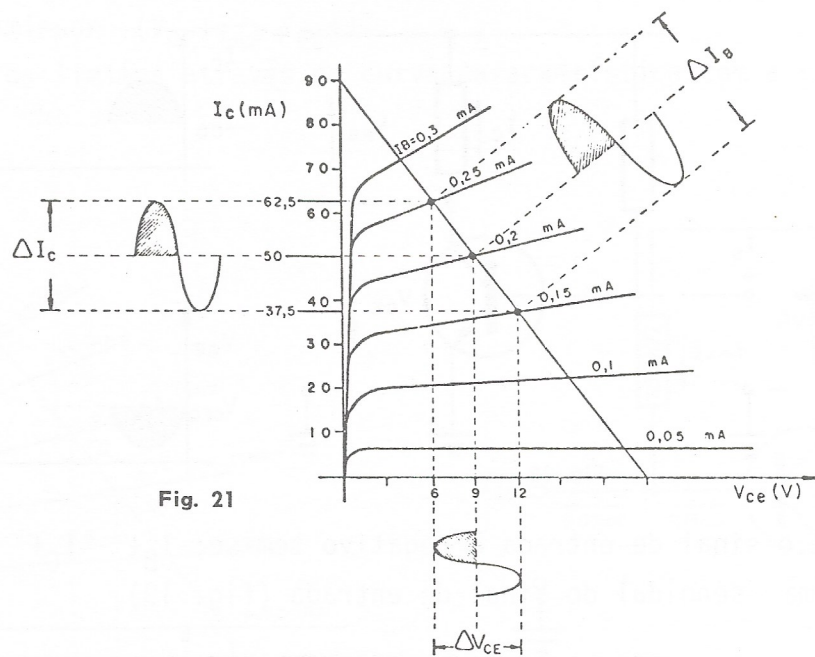


Fig. 21

A figura 22 mostra um ciclo completo do sinal de entrada e as formas de saída da corrente de coletor e tensão coletor-emissor ( $V_{CE} = V_{SAÍDA}$ ) colocadas em gráficos sincronizados.

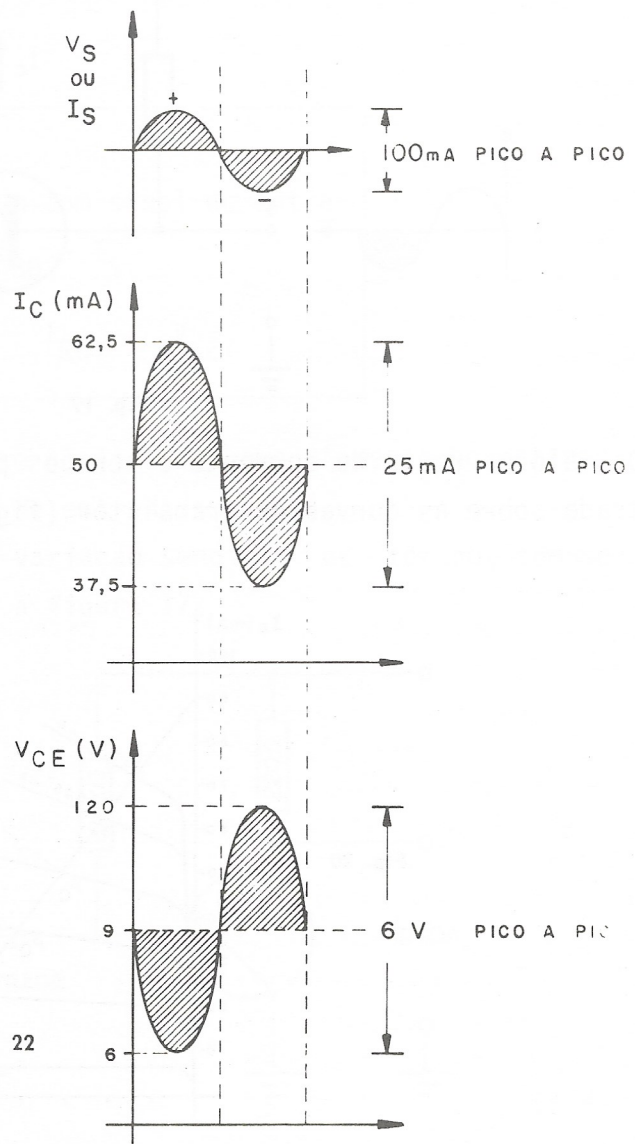


Fig. 22



Através da análise dos três gráficos verifica-se:

- as variações da corrente de coletor são uma versão amplificada (muitas vezes maior e em fase com as variações da corrente de sinal.
- as variações da tensão de coletor ( $V_{SAÍDA}$ ) são uma versão amplificada e defasada ( $180^\circ$ ) da tensão de sinal.

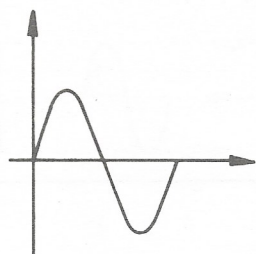
CONCLUSÃO:

NO AMPLIFICADOR EM EMISSOR COMUM

- As variações da corrente de coletor estão em fase com o sinal de entrada.
- As variações da tensão de saída ( $V_{CE}$ ) estão defasadas  $180^\circ$  (invertidas) em relação ao sinal de entrada.
- As variações de corrente de coletor e tensão de saída são versões amplificadas do sinal de entrada.

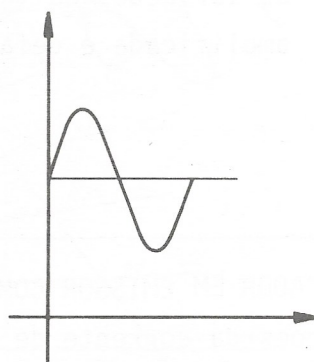
EXERCÍCIO 2

Um sinal pode ser puro ou acompanhado por um nível de tensão CC (figs. 23 e 24).



SINAL PURO

Fig. 23



SINAL COM NÍVEL DE CC

Fig. 24

No caso dos amplificadores interessa apenas amplificar *as variações* de tensão e corrente (sinal puro ou apenas a variação sobre o nível CC). Se o sinal a ser amplificado está acompanhado por um nível CC é necessário eliminar esta componente CC para que não interfira nas tensões de polarização.

Isto pode ser feito através de capacitores ou transformadores que não transferem o nível CC fixo mas permitem a "passagem" das variações (figs. 25 e 26).

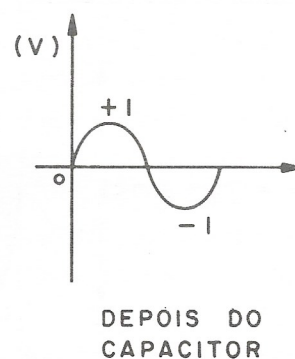
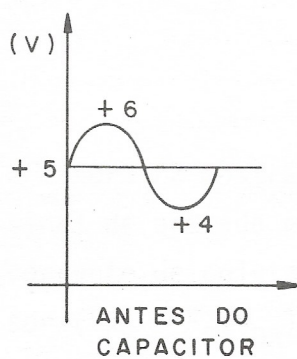


Fig. 25

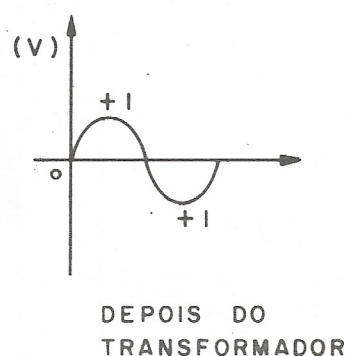
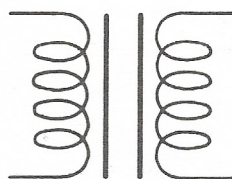
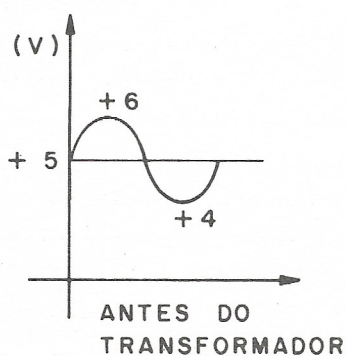


Fig. 26



Os estágios amplificadores sempre possuem um capacitor ou transformador de entrada e outro de saída, de forma que o circuito amplificador propriamente dito receba apenas as variações de tensão ou corrente e entregue também apenas versões amplificadas destas variações (fig. 27).

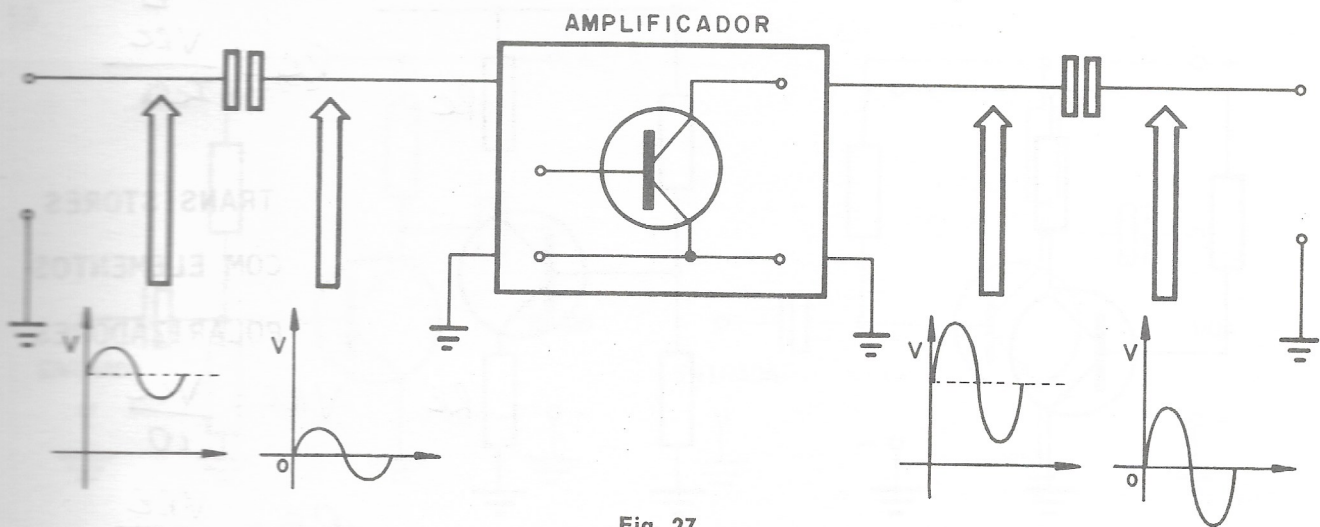


Fig. 27

Nos estágios amplificadores transistorizados para audio-freqüências (20Hz a 20KHz) os capacitores de entrada e saída são, geralmente, eletrolíticos (fig. 28).

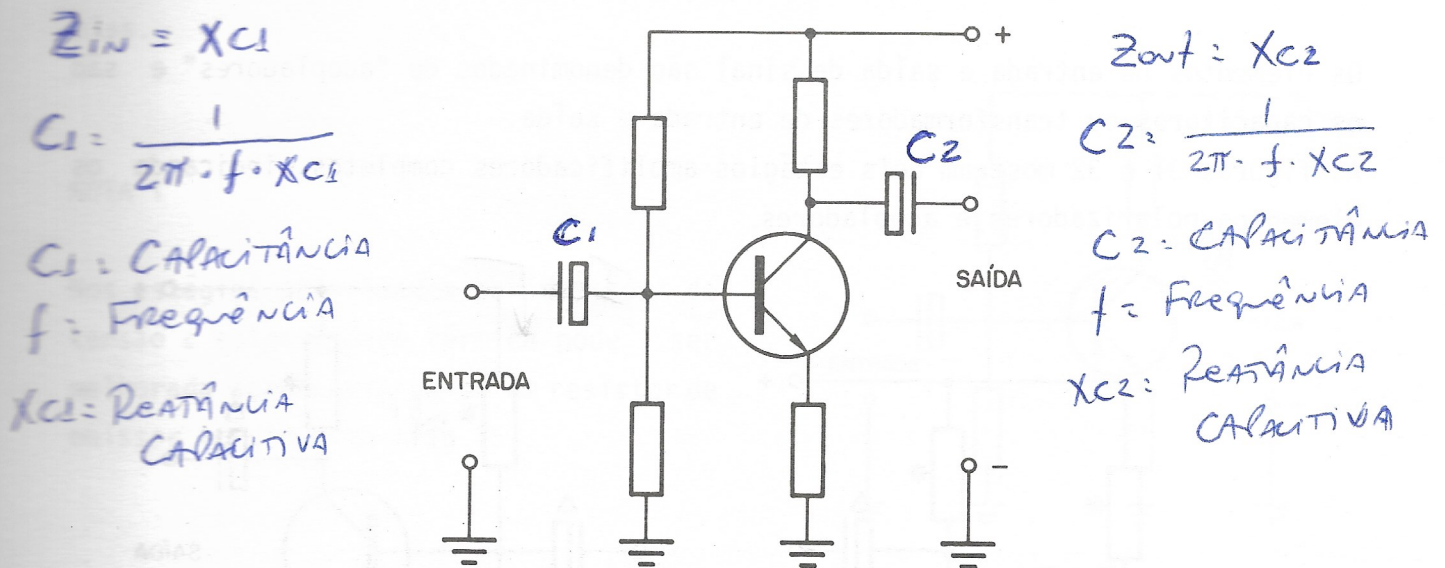


Fig. 28

Assim, pode-se dizer que o circuito amplificador de sinais na configuração de emissor comum se compõe fundamentalmente de dois grupos de elementos:

- elementos de polarização
- elementos para aplicação e retirada de sinais

Os elementos de polarização são aqueles que tem por finalidade estabelecer o ponto de funcionamento do transistor (resistor de coletor, resistores de base, resistor de emissor) (figs. 29 e 30).

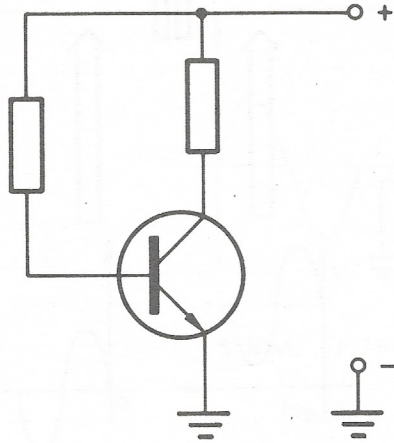


Fig. 29

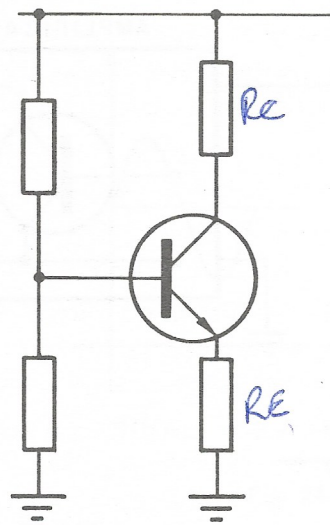


Fig. 30

$$V_{RE} = \frac{V_{CC}}{2}$$

$$R_C = \frac{V_{RE}}{I_{CQ}}$$

TRANSISTORES  
COM ELEMENTOS  
POLARIZADORES

$$V_{RE} = \frac{V_{CC}}{10}$$

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_{CQ}}$$

Os elementos de entrada e saída de sinal são denominados de "acopladores" e são os capacitores ou transformadores de entrada e saída.

As figuras 31 e 32 mostram dois estágios amplificadores completos, indicando os elementos polarizadores e acopladores.

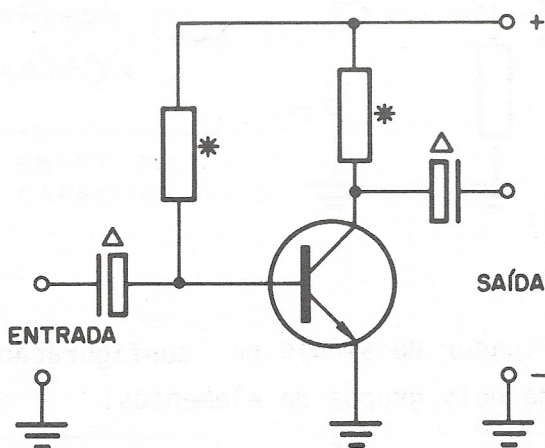


Fig. 31

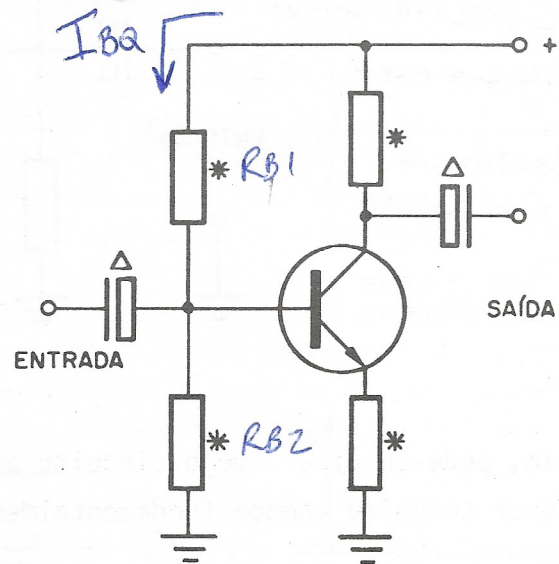


Fig. 32

$$V_{RB2} = V_{RE} + V_{BE}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{10}$$

$$R_{B2} = \frac{V_{RB2}}{I_{BQ}}$$

\* POLARIZADORES  
△ ACOPLADORES

$$R_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{RB2}}{I_{BQ}}$$



### Desacoplamento do emissor

Nos estágios amplificadores em que o emissor está conectado diretamente ao terra, como os mostrados nas figuras 33 e 34, o ganho é elevado, geralmente maior que 50.

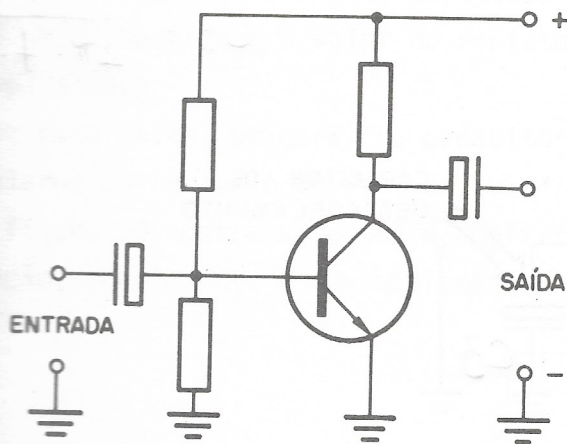


Fig. 33

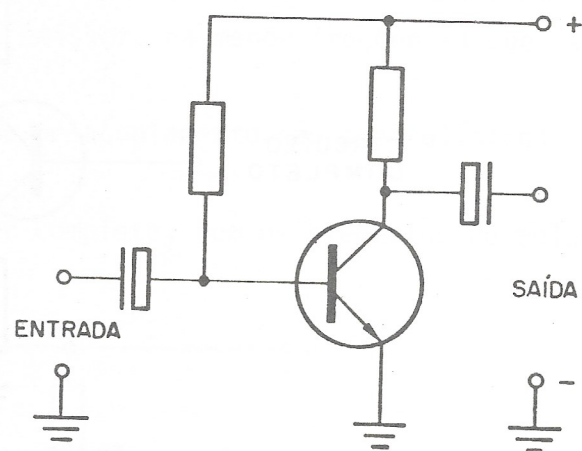


Fig. 34

Como desvantagem este tipo de circuito tem baixa estabilidade térmica, sendo adequado para estágios iniciais não sujeitos a variações de temperatura muito amplas.

#### NOTA 1

Nos estágios polarizados por divisor de tensão a estabilidade térmica pode ser melhorada acrescentando-se um resistor de emissor ao circuito (fig.35).

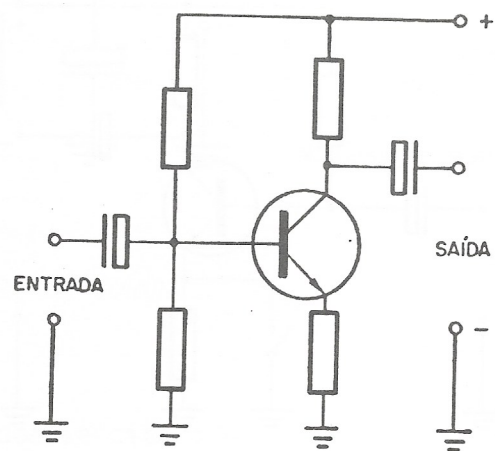


Fig. 35

Por outro lado, o resistor de emissor incluído no circuito reduz sensivelmente o seu ganho, que passa a se situar tipicamente próximo a 10.

#### NOTA 2



O resistor de emissor colocado em um estágio amplificador polarizado por divisor de tensão aumenta a estabilidade térmica mas reduz o seu ganho.

Entretanto, acrescentando-se ao circuito um capacitor em paralelo com o resistor de emissor, denominado de *CAPACITOR DE DESACOPLAMENTO* se obtém um estágio termicamente estável e com ganho elevado (fig. 36)

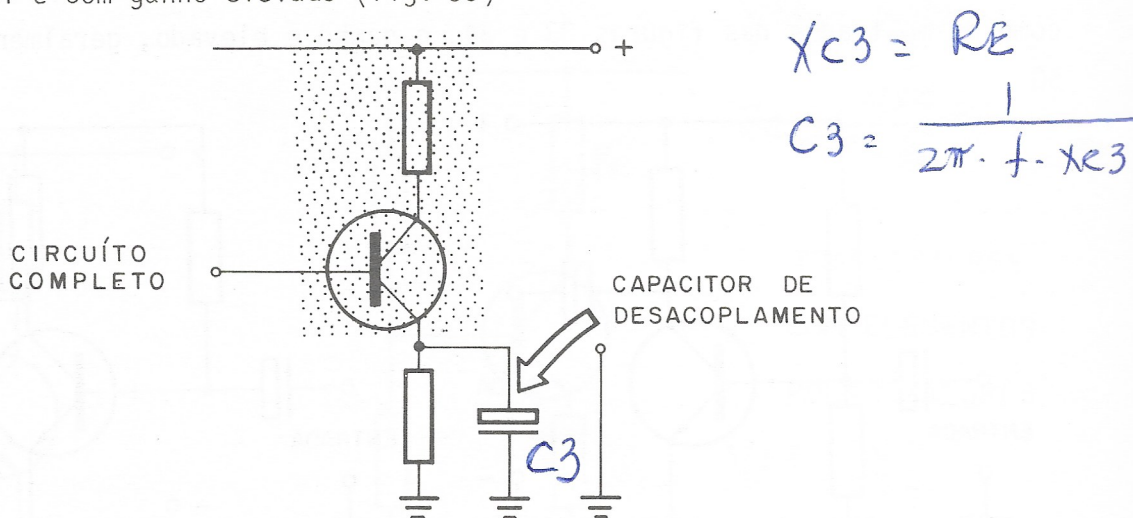


Fig. 36

Se o capacitor conectado em paralelo com o resistor de emissor tiver uma reatância muito baixa, poderá ser considerado como um curto circuito, *toça a vez que o transistor amplificar um sinal.*

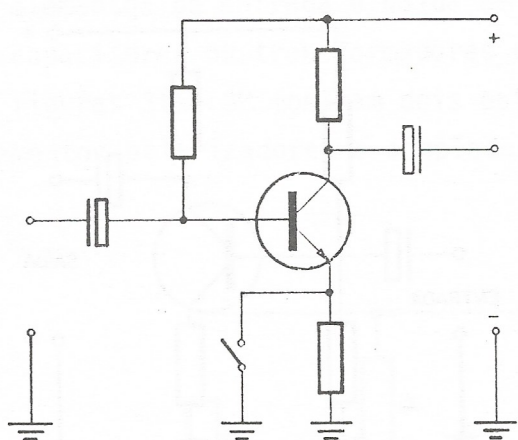


Fig. 37

Enquanto o circuito estiver no ponto de operação, *sem sinal de entrada*, o capacitor se comporta como um circuito aberto, não interferindo nas tensões de polarização (fig.37).

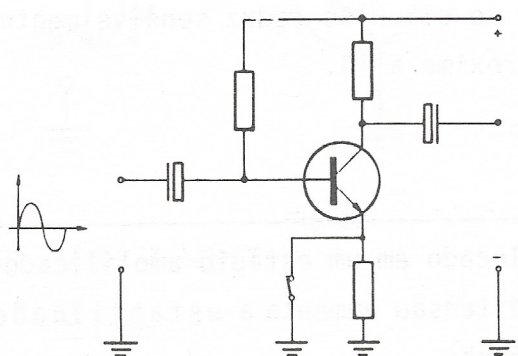


Fig. 38

Quando se aplica um sinal de entrada, o capacitor se comporta (idealmente) como um curto circuito, de forma que o circuito funciona como se o emissor estivesse ligado diretamente à massa (fig.38).



Desta forma pode-se obter um estágio amplificador com ganho da ordem de 50 e com boa estabilidade térmica.

Para que o capacitor realize o desacoplamento adequado sua reatância deve ser pequena em relação ao resistor de emissor.

Na prática, a reatância do capacitor de acoplamento deve apresentar uma reatância 10 vezes menor que o valor do resistor de emissor, na menor frequência que será amplificada.

Por esta razão, em geral os capacitores de desacoplamento são eletrolíticos com valores entre  $1\mu\text{F}$  e  $50\mu\text{F}$ .

A figura 39 mostra um estágio amplificador completo, com os elementos de polarização, acoplamento e desacoplamento.

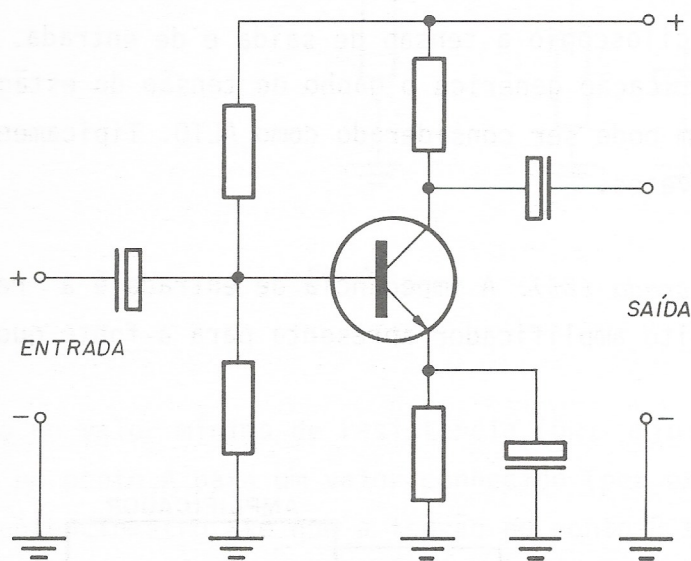


Fig. 39

#### PROPRIEDADES DO ESTÁGIO AMPLIFICADOR EM EMISSOR COMUM

Como características do estágio amplificador pode-se citar:

- ganho de corrente
- ganho de tensão
- impedância de entrada
- impedância de saída

a) *Ganho de corrente ( $A_i$ )*: O ganho de corrente de um estágio amplificador é definido como sendo a relação entre a variação da corrente de saída e a variação da corrente de entrada. No estágio amplificador em emissor comum tem-se:

$$A_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

O ganho de corrente do estágio amplificador em emissor comum equivale ao próprio ganho de corrente do transistor ( $\beta$ ).

Em termos de classificação genérica o ganho de corrente do estágio amplificador em emissor comum pode ser considerado ALTO, situando-se tipicamente em algumas dezenas de vezes.

b) *Ganho de tensão*: Define-se como ganho de tensão a relação:  $A_V = \frac{\Delta V_S}{\Delta V_E}$

No estágio amplificador em EC o ganho de tensão depende muito dos elementos "polarizadores" e das correntes de polarização. Isto dificulta a determinação analítica. Entretanto, o ganho de tensão pode ser determinado facilmente na prática, medindo-se com o osciloscópio a tensão de saída e de entrada.

Em termos de classificação genérica o ganho de tensão do estágio amplificador em emissor comum também pode ser considerado como ALTO. Tipicamente este ganho é de algumas dezenas de vezes.

c) *Impedância de entrada ( $Z_i$ )*: A impedância de entrada é a "resistência" que a entrada de um circuito amplificador apresenta para a fonte que fornece o sinal (fig. 40).

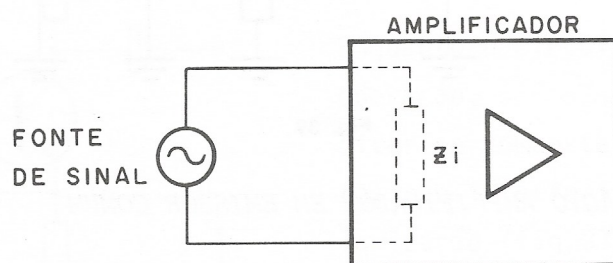


Fig. 40

A impedância de entrada dos estágios amplificadores em emissor comum geralmente é de algumas centenas de ohms, que pode ser classificada genericamente como média.

A determinação analítica da impedância de entrada implica em um conhecimento mais profundo do transistor. Para evitar a necessidade de uma resolução matemática, em caso de necessidade, pode-se determinar a impedância de entrada por um processo prático.



Este processo emprega um potenciômetro em série com a entrada do estágio amplificador (fig. 41).

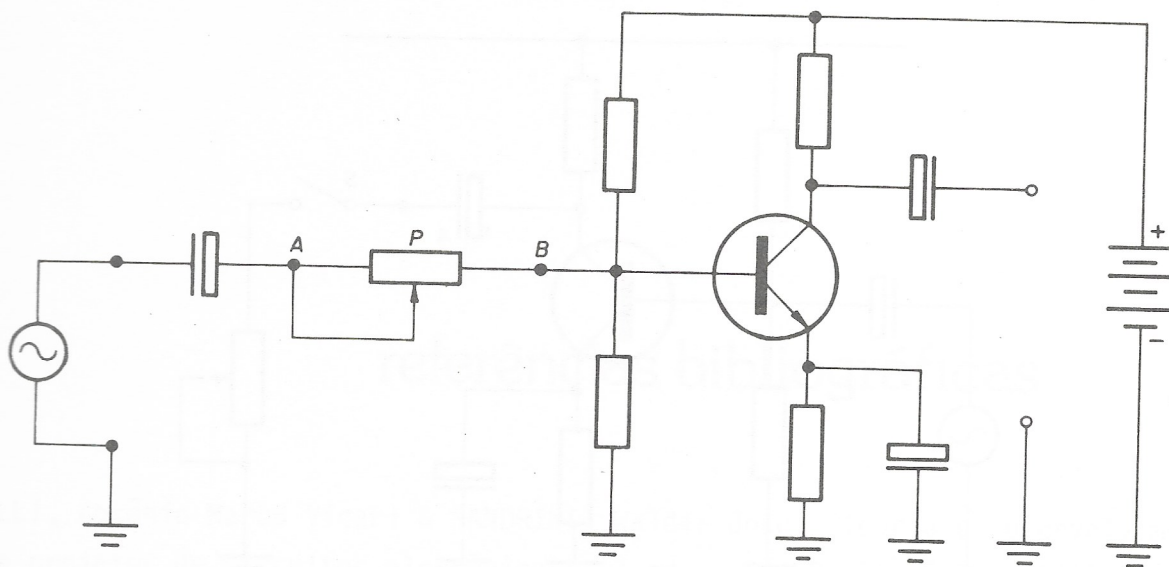


Fig. 41

Com o potenciômetro no valor mínimo de resistência ( $0\Omega$ ) ajusta-se a tensão pico a pico do sinal no ponto A para um valor conhecido (por exemplo 50mVpp).

Após, ajusta-se o potenciômetro até que a tensão no ponto B seja a metade da tensão aplicada ao ponto A (por exemplo 25mVpp).

Nesta situação, pelo princípio do divisor de tensão, a resistência do potenciômetro é igual a impedância de entrada do estágio. Pode-se, então, desconectar o potenciômetro do circuito sem mover o seu cursor e medir a sua resistência que é igual a  $Z_i$  do amplificador.

O conhecimento da impedância de entrada de um amplificador é importante quando se deseja conectá-lo a uma fonte de sinal e obter o correto casamento de impedâncias.

d) *Impedância de saída ( $Z_o$ ):* A impedância de saída de um circuito amplificador também é importante no momento em que se pretende conectar a saída deste estágio com outro circuito posterior.

O valor da impedância de saída pode ser determinado matematicamente, a partir de um conhecimento mais amplo do transistor. Entretanto, o seu valor também pode ser obtido por processo prático, utilizando-se um potenciômetro na saída do circuito (fig. 42).

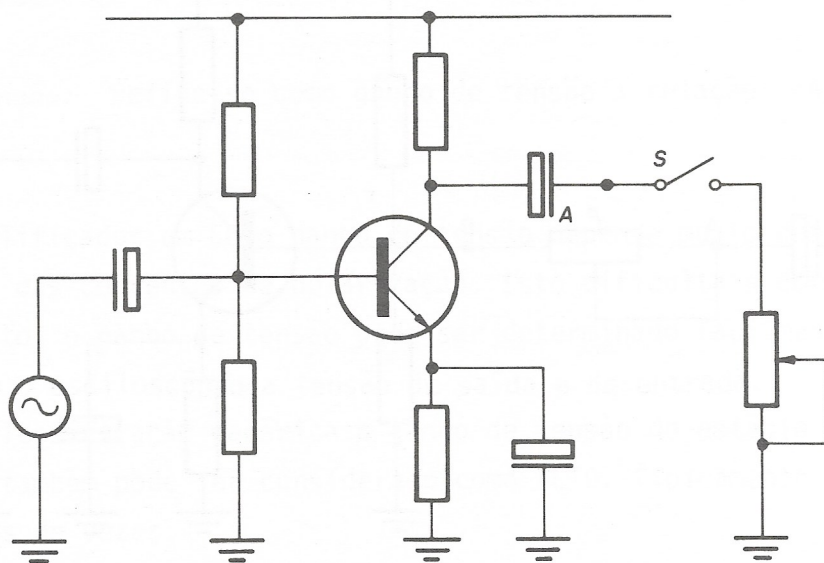


Fig. 42

Com a chave desligada (amplificador sem carga) mede-se a tensão pico a pico do sinal presente no ponto A.

Após, liga-se a chave e ajusta-se o potenciômetro até que o sinal no ponto A tenha a metade da amplitude inicial.

Nesta situação, a resistência do potenciômetro tem o mesmo valor da impedância de saída do estágio.

*É importante salientar* que tanto para o processo prático de determinação de  $Z_i$  como de  $Z_o$  o gerador de sinal deve ser ajustado para que não haja distorção no sinal de saída o que levaria a valores incorretos de  $Z_i$  e  $Z_o$ .

Os estágios amplificadores em emissor comum tem uma impedância de saída que pode ser classificada como ALTA situando-se tipicamente na faixa de centenas de ohms até vários quiloohms.

Em resumo, as características genéricas do amplificador em emissor comum são:

Ganho de corrente = alto (dezenas de vezes)  
 Ganho de tensão = alto (dezenas de vezes)  
 Impedância de entrada = média (centenas de ohms)  
 Impedância de saída = alta (centenas até milhares de ohms)

### EXERCÍCIO 3