

AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA

1. Introdução

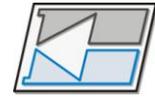
Uma das principais aplicações dos amplificadores na eletrônica é os amplificador de áudio. Estes circuitos são compostos de várias etapas e a principal delas é a etapa referente ao amplificador de potência. Os amplificadores de potência utilizados para este fim precisam possuir características especiais, tais como, baixa distorção e alto rendimento. Neste item serão estudados os conceitos fundamentais dos amplificadores de potência na sua configuração mais comum, o Push-Pull que é um amplificador de classe B.

2. Características do Amplificador

É sempre interessante, do ponto de vista de projeto, que a tensão de saída de um amplificador não sofra alterações com a troca da sua carga, evitando-se desta forma possíveis ceifamentos do sinal ou simplesmente, a sua sub-utilização.

As cargas utilizadas em áudio (auto-falantes) são padronizadas e normalmente, um amplificador é projetado prevendo o valor da carga. Portanto, a consideração de carga variável passa a ser irrelevante. Por outro lado, é importante que o amplificador transfira para a carga a máxima potência possível (quanto maior a potência na carga melhor), o que implica numa impedância de saída o mais próxima possível do valor da carga (Teorema da Máxima Transferência de Potência). Como a carga tem valor baixo (4 ou 8 Ω) a impedância de saída também deverá ter.

Com relação à entrada, em geral as fontes de áudio geram sinais de valor muito baixo. Isto significa que os amplificadores devem possuir uma impedância de entrada de valor relativamente alto para que haja um maior aproveitamento deste sinal.



3. Capacidade de Fornecimento de Potência à Carga

Quanto maior a potência fornecida à carga, melhor. Portanto, deve-se aproveitar ao máximo a capacidade da fonte CC, responsável pelo fornecimento de potência à carga. Pode-se aproveitar esta capacidade de duas formas:

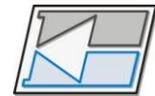
- a) utilizando-se na carga, a máxima tensão possível limitada pela fonte;
- b) tendo-se o menor consumo possível no amplificador, melhor será a relação entre a potência da fonte e a potência da carga, ou seja, melhor o rendimento.

Sendo assim, os amplificadores de áudio normalmente apresentam duas etapas: o pré-amplificador e o amplificador de potência.

4. Pré-amplificador e amplificador de potência:

Para o caso citado no item 3a, o amplificador deve possuir um ganho de tensão elevado o suficiente para obter-se na saída uma tensão pico-a-pico próxima a da fonte (configuração emissor comum). Por outro lado, o amplificador emissor comum tem alta impedância de saída e não pode ser conectado diretamente a uma carga de baixo valor resistivo, como é o caso dos alto-falantes. É necessário, portanto, a inclusão de um estágio coletor comum (com ganho de tensão próximo a um) na saída para reduzir esta impedância. Além disso, o amplificador coletor comum tem ganho de corrente elevado. Assim, a etapa coletor comum terá potência de saída bem maior que a etapa emissor comum. Pode-se, então, concluir que um amplificador de áudio deverá possuir uma etapa *emissor comum de baixa potência (pré-amplificador)* e outra etapa *coletor comum de alta potência (amplificador de potência)*.

Para obter-se o melhor rendimento (caso 3b) deve-se ter pelo menos no amplificador de potência, uma estrutura ou forma de operação de baixo consumo. Para este fim, definiu-se uma classe de operação muito mais eficiente que a normalmente utilizada, onde as perdas em CC são mínimas. Esta classe ficou definida como **classe B**, sendo a classe de operação normal chamada de **classe A**. A seguir, serão apresentadas as características de ambas as estruturas.



5. Classes de Operação de Amplificadores

As classes de operação de amplificadores são definidas de acordo com a forma da excursão do sinal, ou seja, o quanto o sinal CA está excursionando na região ativa.

a) Classe A

Na classe A o sinal o sinal excursiona totalmente na RAD (Região Ativa Direta), ou seja, não há ceifamento do sinal de saída. Se o sinal é uma senóide, pode-se dizer que o transistor está conduzindo durante os 360° do período.

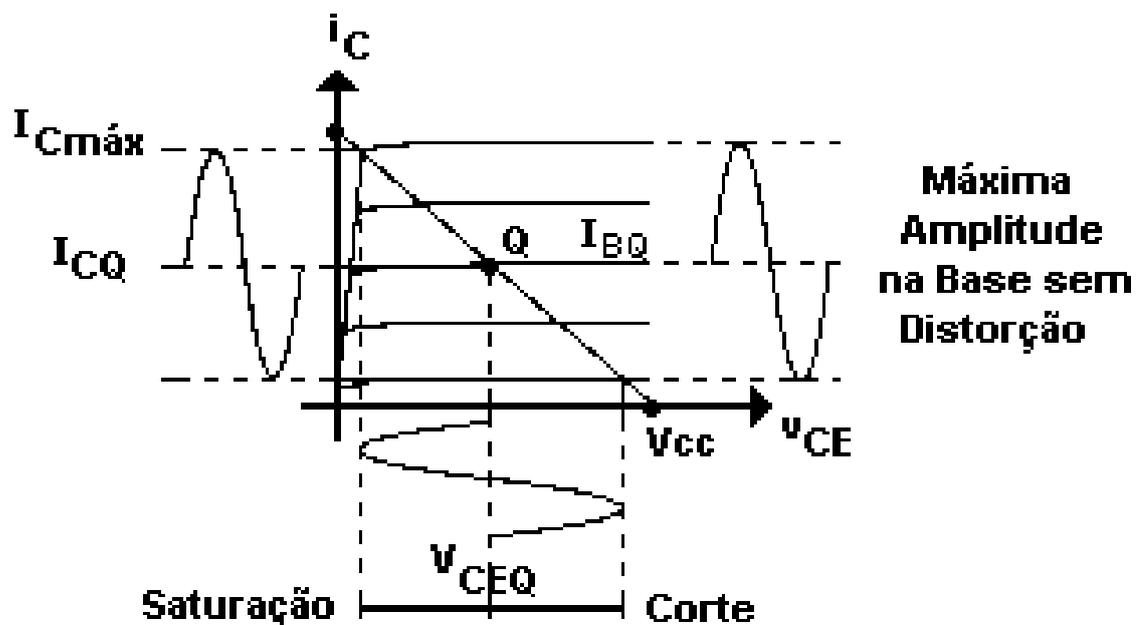
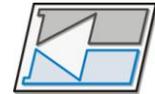


Figura 1 – Reta de carga para a operação do amplificador classe A.

O casos clássicos da operação em Classe A são o amplificador Emissor Comum, a sua versão linearizada e o amplificador Coletor Comum, apresentados a seguir:



Amplificador Emissor Comum (inversor)

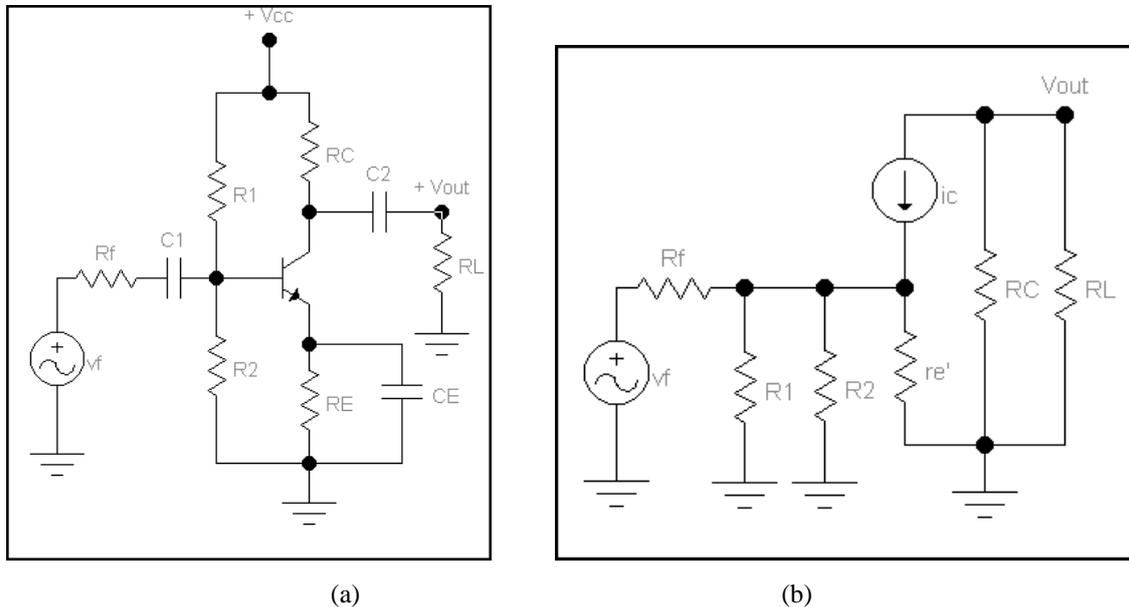


Figura 2 - (a) amplificador emissor comum; (b) modelo AC

Análise CC

$$V_B = V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

$$V_E = V_{TH} - V_{BE}$$

$$I_{CQ} \cong I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - (R_E + R_C) \cdot I_{CQ}$$

Análise CA

$$r_e' = \frac{25\text{mV}}{I_{CQ}}$$

$$Z_{IN} = R_1 // R_2 // \beta r_e'$$

$$Z_{OUT} = R_C$$

$$A_{V\text{sem}/\text{carga}} = -\frac{R_C}{r_e'}$$

$$A_{V\text{com}/\text{carga}} = -\frac{R_C // R_L}{r_e'}$$

$$\Gamma_C = R_C // R_L$$

$$PP = 2 \cdot V_{CEQ} \quad \text{ou} \quad PP = 2 \cdot I_{CQ} \cdot \Gamma_C$$

(escolher o menor valor)

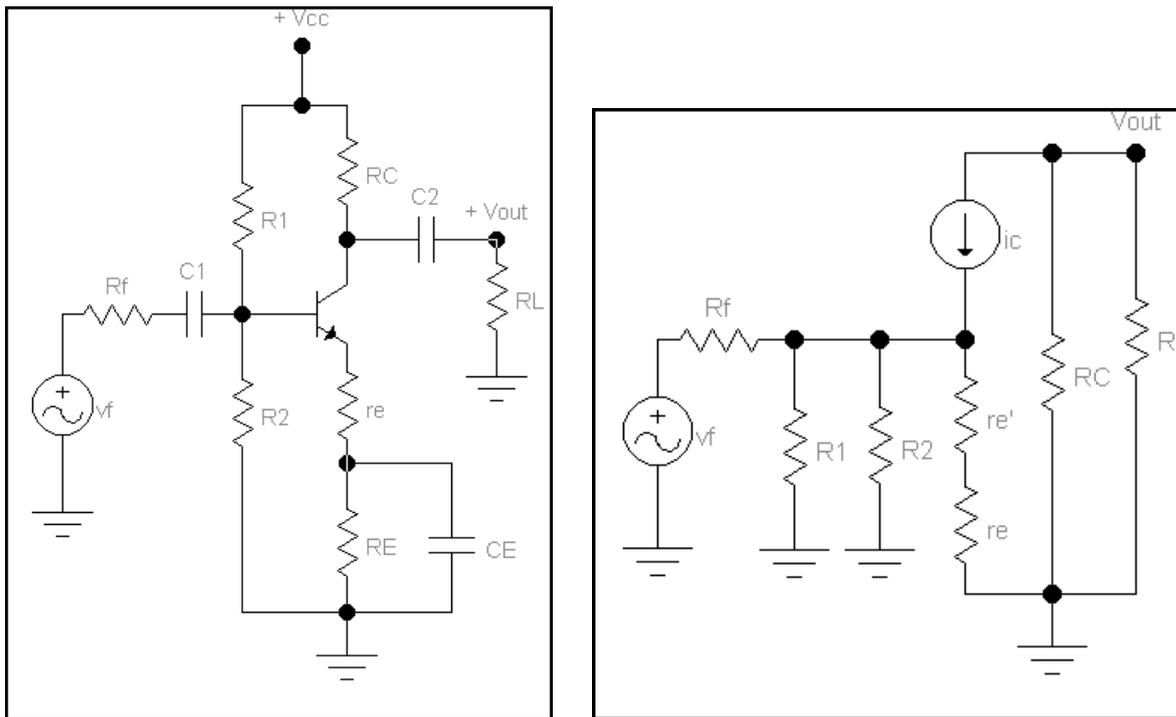
$$P_{IN} = V_{CC} \cdot (I_{CQ} + I_1)$$

$$I_1 = \frac{V_{CC}}{(R_1 + R_2)}$$

$$P_{OUT} = \frac{PP^2}{8 \cdot R_L}$$

$$\eta = (P_{OUT} / P_{IN}) \cdot 100\%$$

Amplificador Emissor Comum Linearizado (inversor)



(a)

(b)

Figura 3 - (a) amplificador emissor comum linearizado; (b) modelo AC

Análise CC

$$V_B = V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

$$V_E = V_{TH} - V_{BE}$$

$$I_{CQ} \cong I_E = \frac{V_E}{(R_E + r_E)}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - (R_E + r_E + R_C) \cdot I_{CQ}$$

Análise CA

$$Z_{IN} = R_1 // R_2 // \beta(r_E + r_e')$$

$$Z_{OUT} = R_C$$

$$A_{V_{sem}/carga} = -\frac{R_C}{(r_e' + r_E)}$$

$$A_{V_{com}/carga} = -\frac{R_C // R_L}{(r_e' + r_E)}$$

$$\Gamma_C = R_C // R_L$$

$$PP = 2 \cdot V_{CEQ} \left(\frac{\Gamma_C}{\Gamma_C + r_E} \right) \quad \text{ou} \quad PP = 2 \cdot I_{CQ} \cdot \Gamma_C$$

(escolher o menor valor)

$$P_{IN} = V_{CC} \cdot (I_{CQ} + I_1)$$

$$I_1 = \frac{V_{CC}}{(R_1 + R_2)}$$

$$P_{OUT} = \frac{PP^2}{8 \cdot R_L}$$

$$\eta = (P_{OUT} / P_{IN}) \cdot 100\%$$

Circuito Coletor Comum (não inversor)

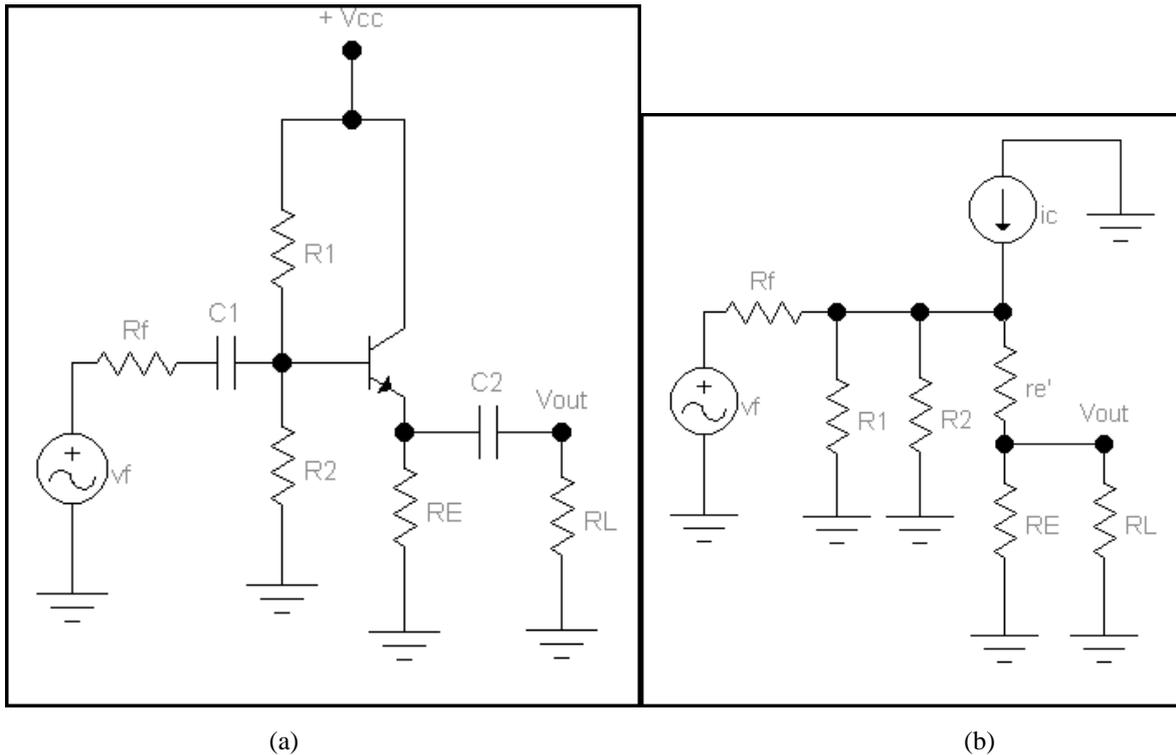


Figura 4 - (a) amplificador coletor comum; (b) modelo AC

Análise CC

$$V_B = V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

$$V_E = V_{TH} - V_{BE}$$

$$I_{CQ} \cong I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - R_E \cdot I_{CQ}$$

Análise CA

$$Z_{IN} = R_1 // R_2 // [\beta(r_e' + (R_E // R_L))]$$

$$Z_{OUT} = R_E // \left[r_e' + \left(\frac{R_1 // R_2 // R_f}{\beta} \right) \right]$$

$$A_{V_{sem}/carga} = \frac{R_E}{r_e' + R_E + \left(\frac{R_f // R_1 // R_2}{\beta} \right)}$$

$$A_{V_{com}/carga} = \frac{R_E // R_L}{r_e' + R_E // R_L + \left(\frac{R_f // R_1 // R_2}{\beta} \right)}$$

$$\Gamma_E = R_E // R_L$$

$$PP = 2 \cdot V_{CEQ} \quad \text{ou} \quad PP = 2 \cdot I_{CQ} \cdot \Gamma_E$$

(escolher o menor valor)

$$P_{IN} = V_{CC} \cdot (I_{CQ} + I_1)$$

$$I_1 = \frac{V_{CC}}{(R_1 + R_2)}$$

$$P_{OUT} = \frac{PP^2}{8 \cdot R_L}$$

$$\eta = (P_{OUT} / P_{IN}) \cdot 100\%$$

Aula Prática

Amplificadores Emissor Comum, Emissor Comum Linearizado e Coletor Comum

Objetivos:

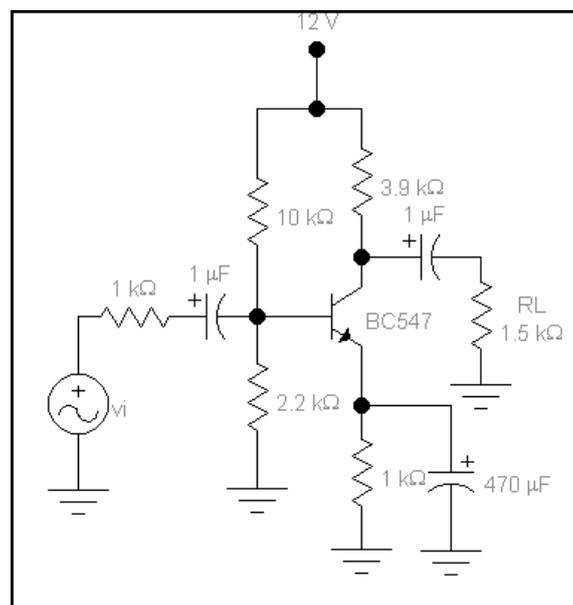
- ⇒ calcular os parâmetros CC e CA, considerando $\beta = 250$;
- ⇒ medir os parâmetros CC;
- ⇒ medir os parâmetros CA, para o máximo valor da tensão de saída (V_{OUT}) sem saturação (compliance);
- ⇒ comparar os resultados;

Procedimento:

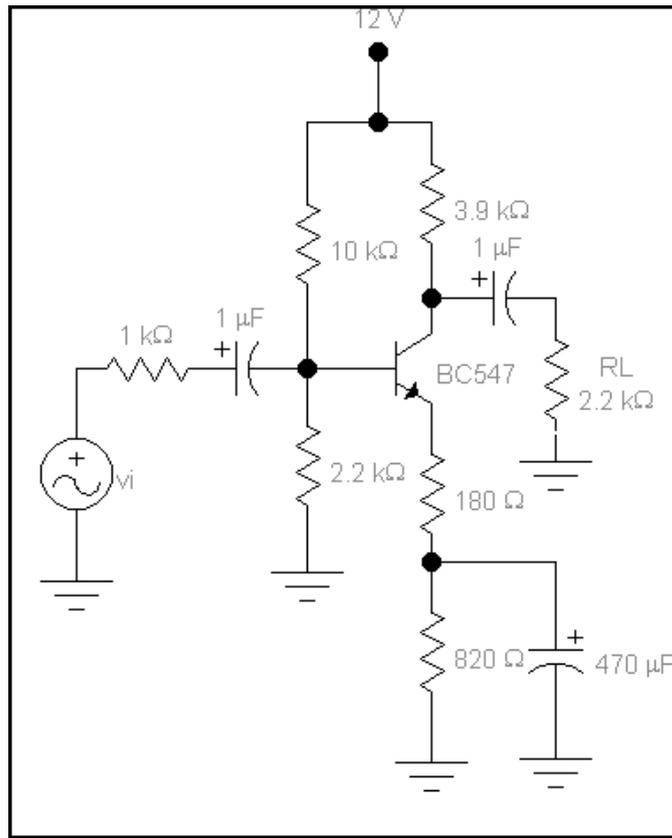
- ⇒ calcular os principais parâmetros CC (I_{CQ} e V_{ceq}) e CA ($AV_{com}/carga$ e PP) e o rendimento (η);
- ⇒ montar o circuito;
- ⇒ medir os parâmetros CC (V_B , V_C , V_E);
- ⇒ calcular ($I_{CQ}=V_E/R_E$) e ($V_{CEQ}=V_C-V_E$) a partir dos valores medidos e dos componentes do circuito;
- ⇒ medir os parâmetros CA (PP, V_{IN})
- ⇒ calcular ($AV_{com}/carga=PP/V_{IN}$), a partir dos valores medidos e dos componentes do circuito;
- ⇒ comparar os resultados;

OBS: todos os cálculos e medidas devem ser feitos *com a carga* acoplada.

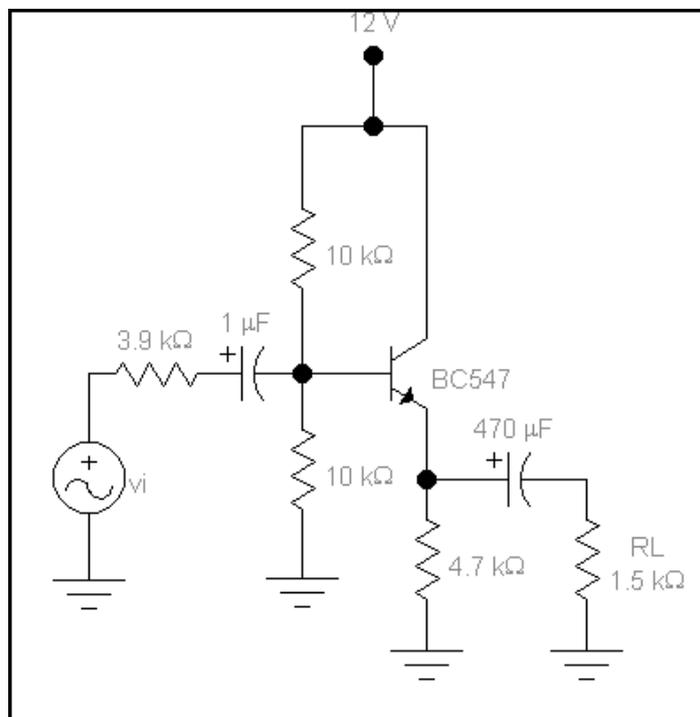
Circuito 01



Circuito 02



Circuito 03



b) Classe B

Na classe B, apenas a parte positiva da corrente de coletor (i_C) ou negativa da tensão coletor-emissor (v_{CE}) está excursionando na RAD, sendo que a parte restante na região de corte. Isto significa que o transistor está polarizado para trabalhar no corte e, portanto, a corrente de coletor quiescente é nula ($I_{CQ} = 0$). Se o sinal for senoidal, apenas meio ciclo estará na RAD, ou seja, 180° do período. Com $I_{CQ} = 0$ tem-se, certamente, menor dissipação de potência no transistor e nos resistores de polarização, reduzindo-se o consumo do amplificador e, conseqüentemente, melhorando-se o rendimento. Porém, para obter-se na saída o sinal completo, deve-se utilizar duas estruturas complementares de transistores.

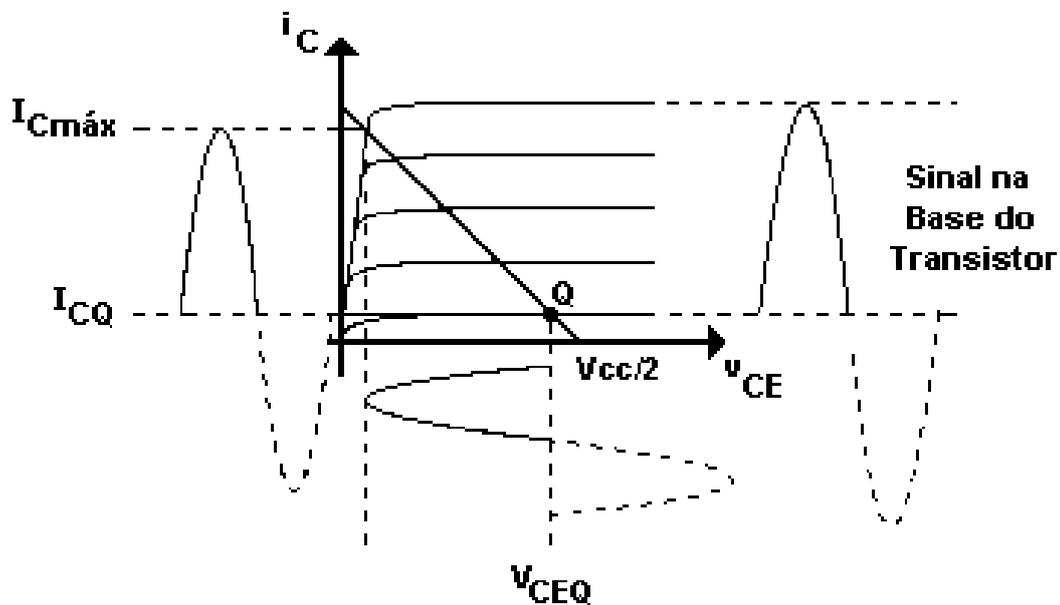


Figura 5 - Amplificadores classe B

- **Configuração Push-pull**

Push-Pull é a forma mais comum dos amplificadores classe B. Funciona à base de dois transistores polarizados no corte, conectados de forma que cada um deles conduz em um dos semiciclos do sinal de entrada. O transistor que estiver em condução é o responsável pela amplificação da corrente. Este circuito permite a obtenção de um amplificador com baixa distorção, baixa impedância de saída, alto rendimento e alta potência na carga. Porém, para o perfeito funcionamento é necessário que os transistores sejam complementares.

- **Circuito básico**

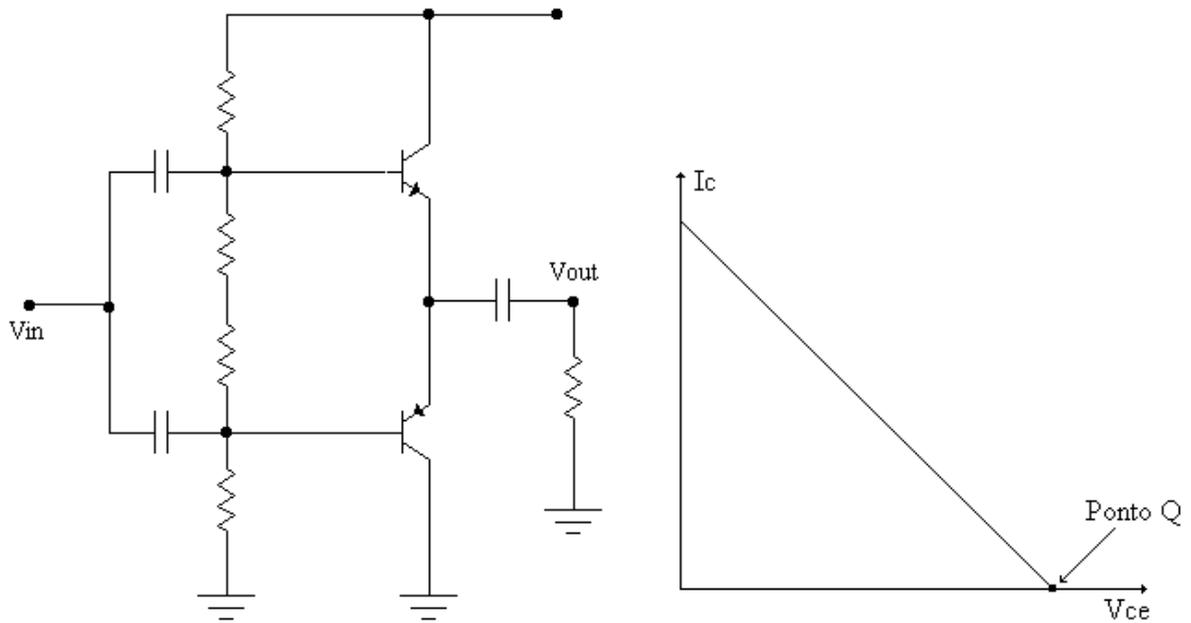


Figura 6 - Circuito básico Push-Pull e reta de carga

- **Distorção de cruzamento ou por "Crossover"**

Existe um intervalo que ocorre entre o corte do transistor que estava conduzindo e a condução do transistor que estava cortado. Isto se deve à necessidade de aplicar aproximadamente 0,7 Volts entre a base e o emissor para que eles entrem em condução.

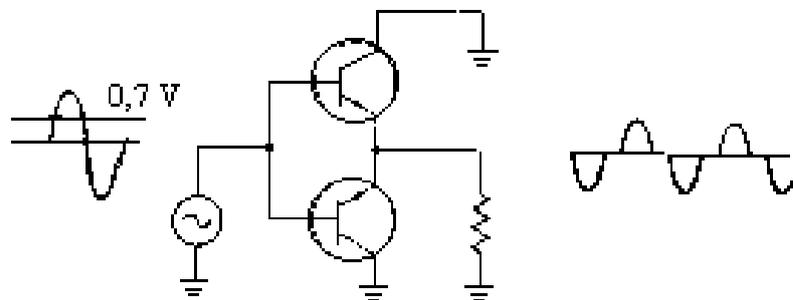


Figura 7 - Distorção de cruzamento

Solução: Utilizar uma configuração Classe AB, ou seja, um amplificador que conduz pouco mais que 180 graus. Isto é conseguido com a polarização do transistor um pouco a cima da região de corte.

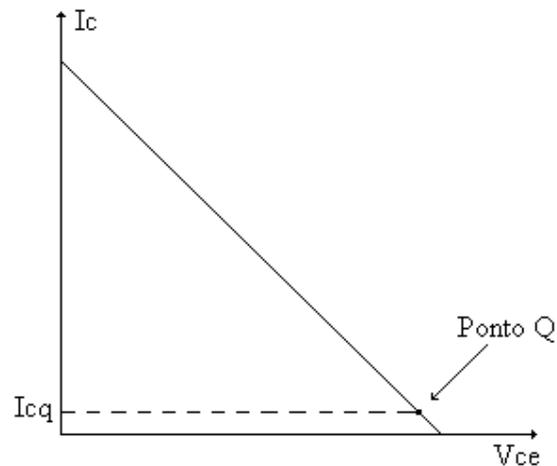


Figura 8 - Reta de carga do amplificador classe AB

- **Distorção não linear**

É o efeito percebido através da diferença de amplitude entre os semiciclos positivo e negativo do sinal de saída. É mais comum nos amplificadores classe A não realimentados, e ocorre porque cada semiciclo irá operar com correntes quiescentes de valor diferente, conseqüentemente, o ganho também o será. Nos amplificadores classe B a distorção não linear é bastante reduzida pois cada transistor funciona num dos semiciclos e operam por toda a reta de carga.

- **Espelho de corrente**

Para polarizar adequadamente um circuito push-pull, pode-se utilizar o conceito de espelho de corrente. A Figura 9 mostra a configuração onde um diodo é colocado em paralelo com o *diodo emissor* do transistor. Para que funcione adequadamente, é necessário que a curva do diodo seja semelhante à curva V_{be} do transistor. Dessa forma, a corrente no diodo que é facilmente determinada, será igual à corrente quiescente do transistor.

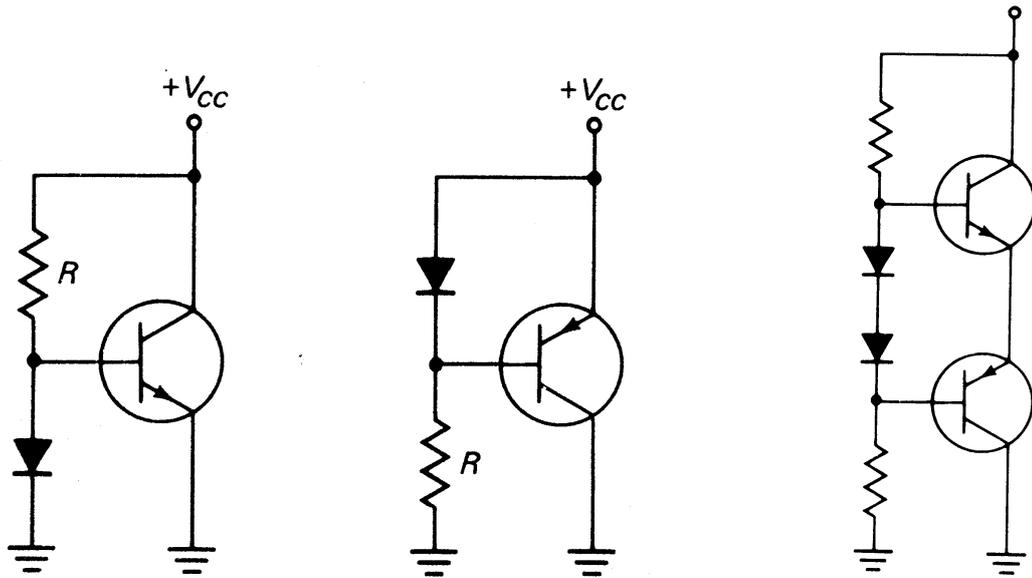
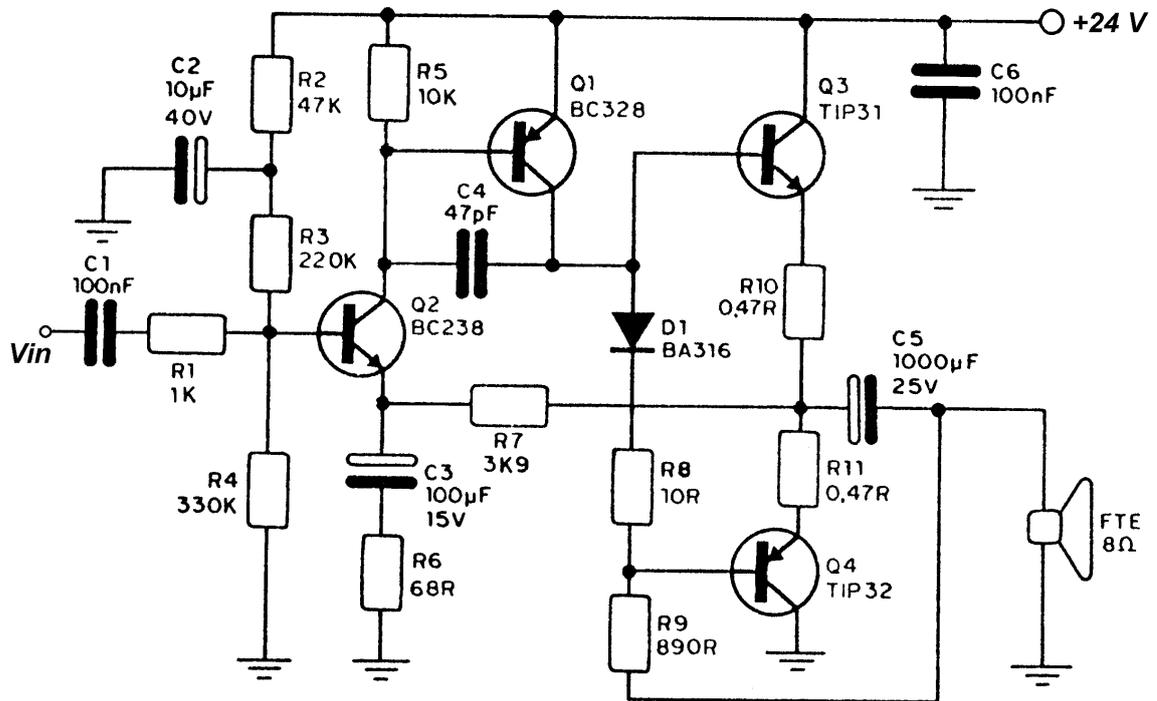


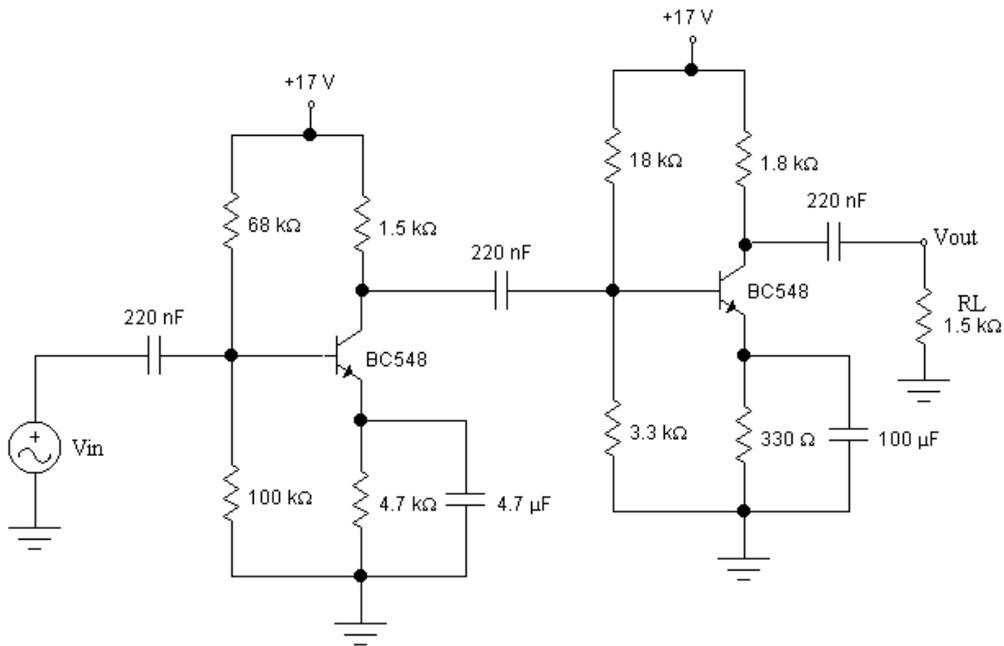
Figura 9 - espelho de corrente.

• Circuito Proposto



EXERCÍCIOS

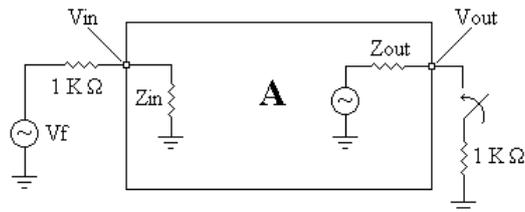
1. Dado o circuito abaixo, determine:
 - a) o ponto quiescente dos dois estágios amplificadores (I_{cQ} e V_{ceQ});
 - b) o ganho com carga de cada estágio;
 - c) as impedâncias de entrada e saída de cada estágio;
 - d) a tensão máxima na saída (V_{out});
 - e) o rendimento máximo do circuito;
 - f) a tensão de entrada (V_{in}).



- OBS: 1. A carga do primeiro estágio é a impedância de entrada do segundo;
2. A tensão máxima de saída corresponde à compliance do segundo estágio;
3. Para o cálculo do rendimento do circuito considera-se que:
- Pin é a soma das potências CC entregues aos dois estágios
 - Pout é apenas a potência entregue à carga (R_L)
4. Utilize $\beta = 250$

2. Quais as características principais de um amplificador que utiliza realimentação, como por exemplo o amplificador emissor comum linearizado?
3. Quais as aplicações de um amplificador coletor comum?

4. De que forma se pode melhorar o rendimento dos amplificadores?
5. O que é distorção não linear? Como se manifesta? Em que tipo de circuitos ocorre mais freqüentemente? Como evitar?
6. Considerando o diagrama abaixo e as medidas realizadas, calcule as impedâncias de entrada e saída do bloco "A".



Medidas de pico a pico realizadas

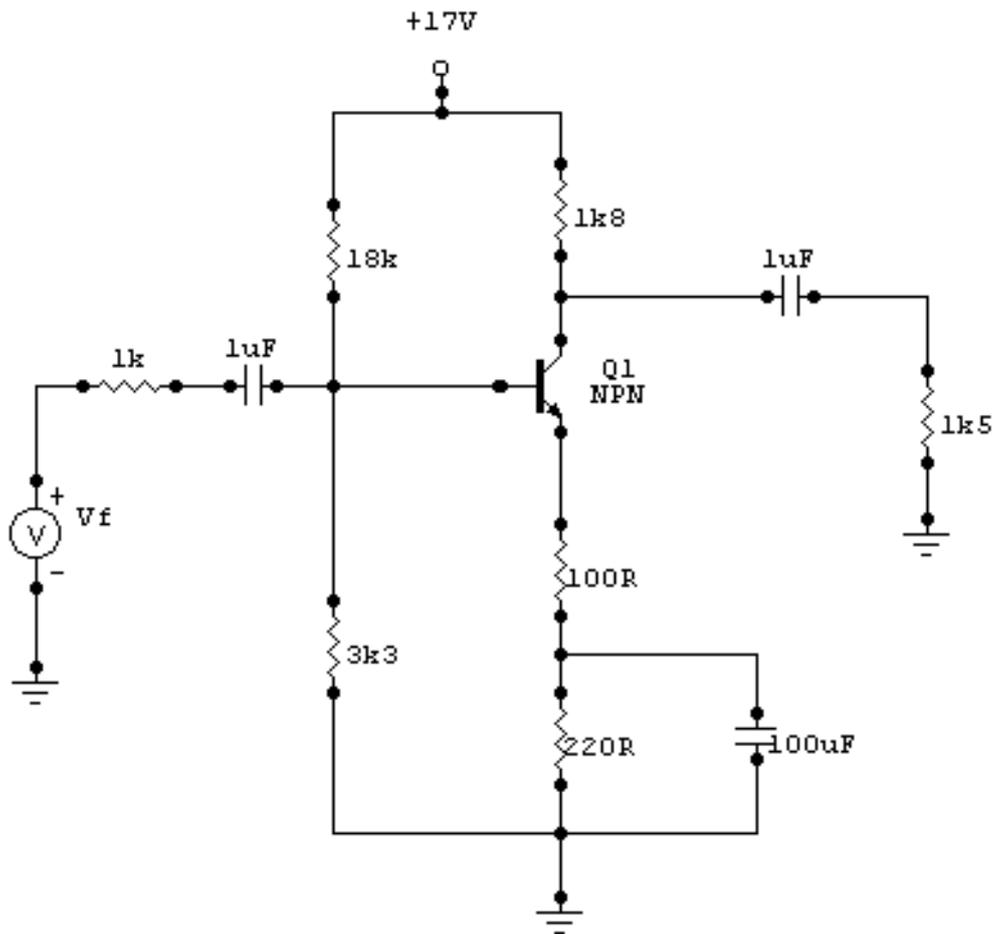
$$V_f = 50\text{ mV}$$

$$V_{in} = 45\text{ mV}$$

$$V_{out} = 8\text{ V (sem carga)}$$

$$V_{out} = 7\text{ V (com carga)}$$

7. Dado o circuito abaixo, determine:
- o ponto quiescente (I_{CQ} e V_{CEQ});
 - as retas de carga CC e CA;
 - o ganho de tensão com carga ($A_{V_{CC}}$);
 - as impedâncias de entrada e saída;
 - a tensão máxima na saída pico-a-pico ($V_{out_{pp}}$);
 - o rendimento máximo do circuito;
 - a tensão de entrada (V_{in}) para esta situação.



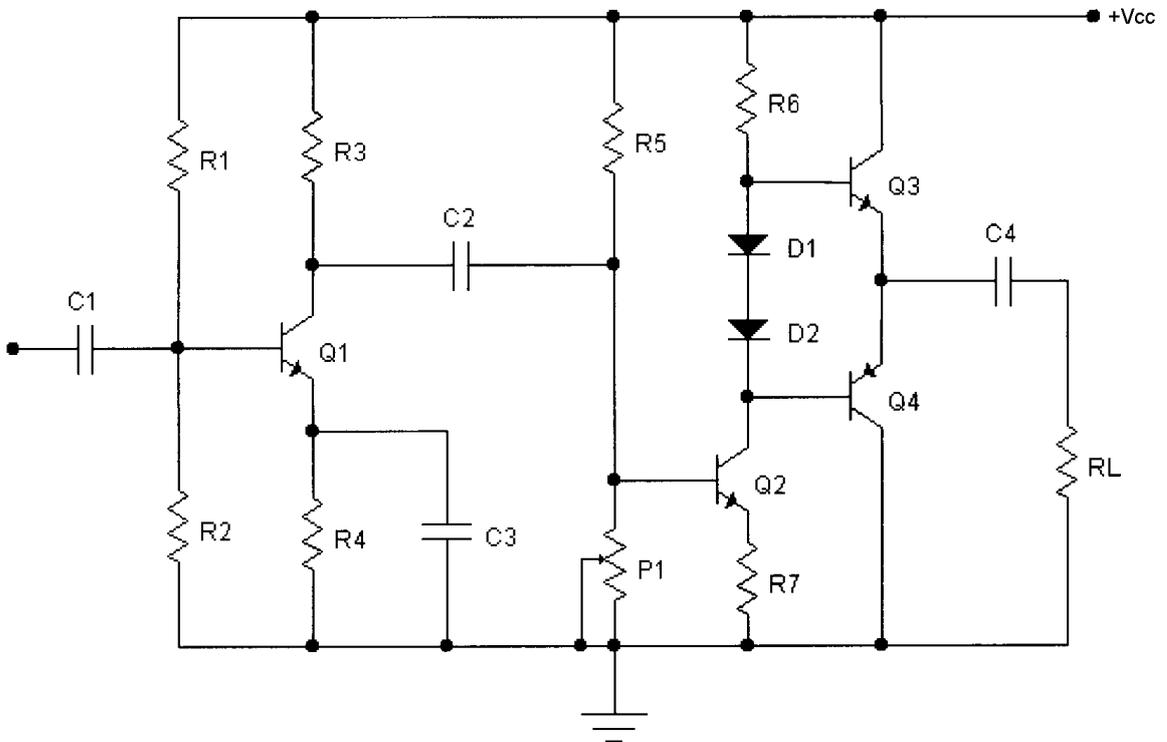
OBS: 1. A tensão máxima de saída corresponde à compliance;

2. Utilize $\beta = 250$

8. Qual a função dos capacitores do circuito acima? Anote no desenho a polaridade correta.

9. Com base no circuito abaixo, responda:

- Qual a função e o nome usual da estrutura inteira?
- Quais as características de cada um dos estágios que a compõem (nomenclatura, valor aproximado do ganho, impedâncias, etc...)?
- Quais as exigências em relação a Q2, Q3, D1 e D2, para que o circuito apresente melhor rendimento? Como se chama a estrutura composta por estes componentes?
- Baseado na resposta anterior, qual deve ser o valor da tensão CC entre os emissores de Q3 e Q4;
- Considerando que $R6=1k\Omega$, $R7=100\Omega$, $R5=12k\Omega$ e $V_{cc}=30$ volts, qual o valor de P1?



10. O que é distorção de cruzamento e como evitá-la?
11. Por que uma configuração Push-pull é adequada para amplificadores de potência de áudio?
12. Por que usualmente se utiliza um amplificador classe A como estágio pré-amplificador antes de uma etapa Push-pull?
13. Quais as diferenças entre um amplificador classe A e um classe B?
14. Comprove as equações CC e CA para os três tipos de amplificadores classe A estudados?