

Amplificador Emissor Comum (Teoria)

Autor: Eng. Wagner Rambo

Polarização de transístores bipolares de junção: para que os TBJ's operem como amplificadores, precisam ser polarizados de modo a trabalhar na região ativa. No caso de transistores NPN:  $V_C > V_B > V_E$ . Os transistores PNP, por sua vez:  $V_E > V_B > V_C$  (Figura 1).

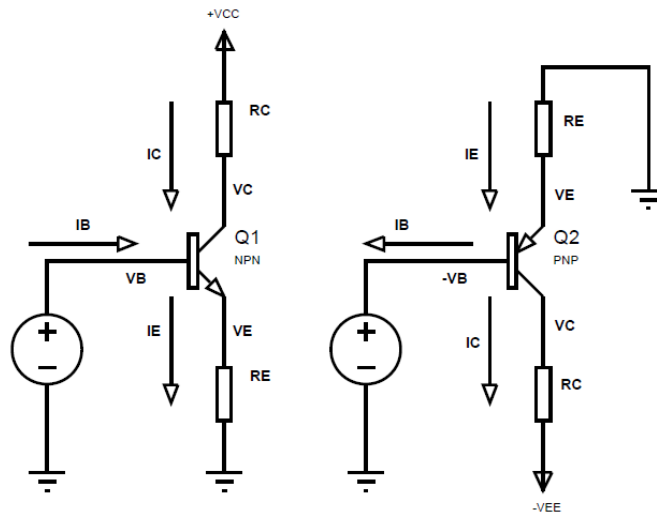


Figura 1 - Polarização de TBJ's na região ativa.

A topologia de pré-amplificador mais comum, que é um padrão industrial reconhecido, consiste no amplificador em emissor comum, pois o terminal emissor é comum entre a entrada e a saída (Figura 2).

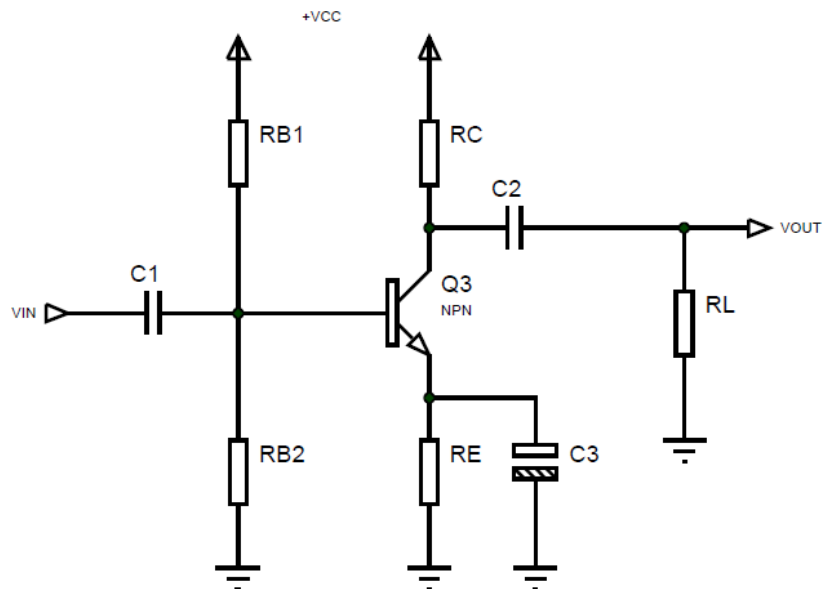


Figura 2 - Amplificador emissor comum.

Considerando uma fonte geradora de sinal, com impedância de saída de  $600\Omega$  e aplicando um sinal determinístico ao circuito, teremos nos pontos destacados da Figura 3, os seguintes sinais.

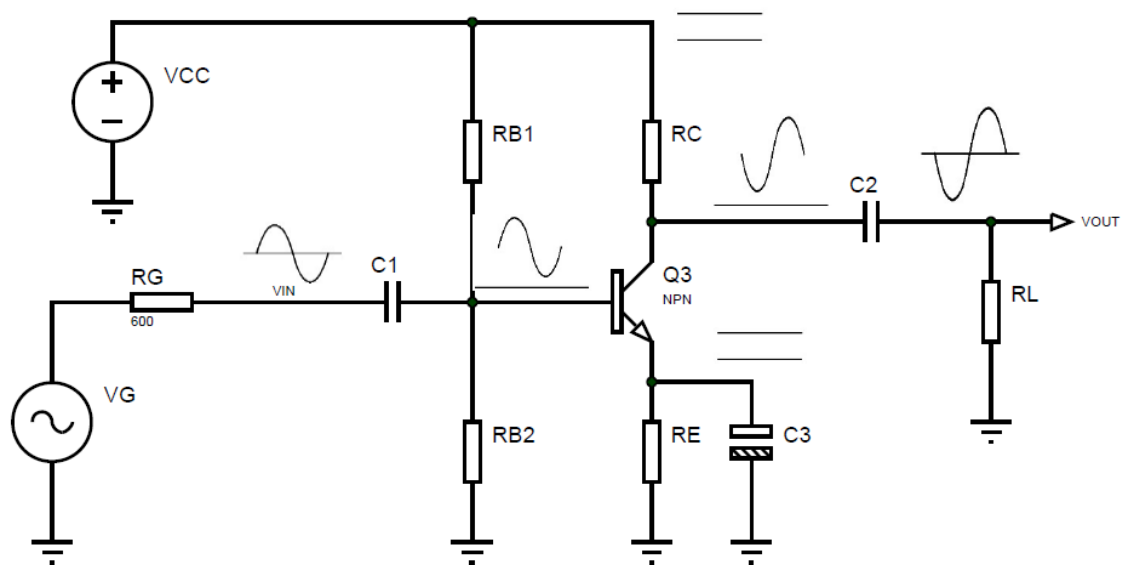


Figura 3 - Amplificador Emissor Comum e os Sinais no Circuito.

É comum nos cursos técnicos e universitários, as análises DC e AC do circuito serem analisadas de forma individual, o que facilita para os cálculos teóricos e também a parte de projeto. Uma dica importante é você tirar um bom tempo para analisar cuidadosamente a Figura 3, com intuito de compreendê-la totalmente. O entendimento dos sinais trabalhando em conjunto (AC e DC) vai lhe ajudar a interpretar de forma muito mais rápida e objetiva qualquer circuito amplificador e lhe conceder o *feeling* para construir suas próprias topologias, caso a área de projetos seja de seu interesse.

Partiremos agora, para a análise teórica de um amplificador emissor comum. Esta servirá para os técnicos e auxiliará bastante na tarefa de manutenção de amplificadores industriais que contenham tal topologia. Aos que desejam projetar seus amplificadores, a compreensão total da análise de um modelo já existente é muito necessária.

Com o objetivo de obtermos valores mais próximos da realidade, adotaremos a regra de utilizar 4 casas decimais de precisão nos cálculos, caso a quarta casa seja igual a zero, pode-se considerar apenas 3 casas decimais.

Vamos dissecar o amplificador emissor comum da Figura 4, com intuito de obter todos os parâmetros relevantes para posterior desenvolvimento de projetos. Mas quais parâmetros são esses? São as tensões e correntes quiescentes (destinadas à polarização do transistor), as impedâncias de entrada e saída, o ganho de tensão e sua frequência mínima de operação.

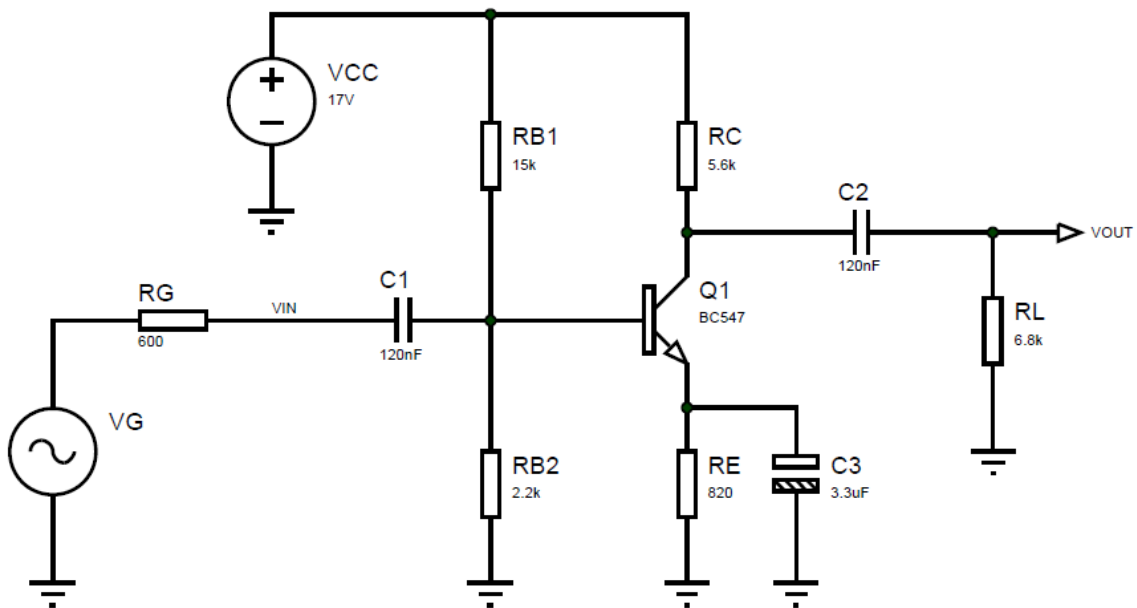


Figura 4 - Amplificador emissor comum para análise teórica.

As tensões e correntes quiescentes são obtidas desconsiderando-se o sinal AC aplicado à entrada do amplificador. O circuito da Figura 5 demonstra o transistor com os componentes utilizados em sua polarização e os parâmetros DC a serem determinados.

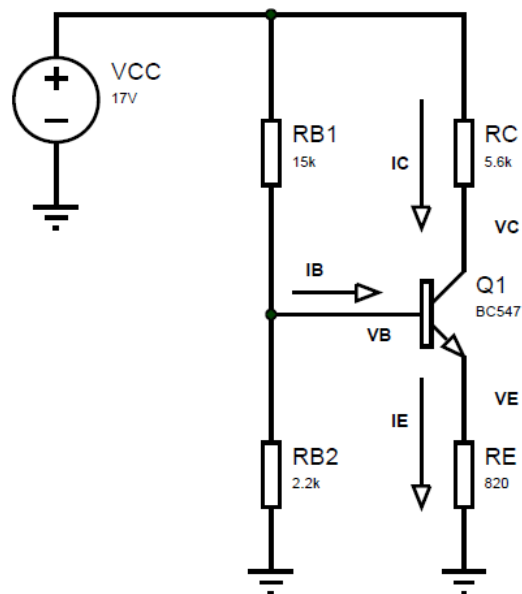


Figura 5 - Circuito para cálculo das tensões e correntes de polarização.

O circuito resultante vem da clássica teoria de análise DC de circuito amplificadores, onde as fontes de tensão e corrente AC são consideradas como curto circuito e os capacitores são considerados como um circuito aberto.

A tensão de base  $V_B$  é obtida através da equação de divisor de tensão

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B2} + R_{B1}} \times V_{CC}$$
$$V_B = \frac{2200}{2200 + 15000} \times 17$$
$$\mathbf{V_B = 2,1744V}$$

Conhecendo a tensão de base, podemos calcular a tensão de emissor, que é a diferença entre a tensão de base  $V_B$  e a queda de tensão base-emissor  $V_{BE}$ . O transistor utilizado é o NPN BC547, no *datasheet* o fabricante prevê um  $V_{BE}$  típico de  $660mV$ . É comum no entanto, para transistores de silício, utilizarmos o valor máximo, que é de  $700mV$  ou  $0,7V$ .

$$\mathbf{V_E = V_B - V_{BE} = 2,1744 - 0,7 = 1,4744V}$$

Utilizando a Lei de Ohm, calculamos corrente de emissor  $I_E$  onde

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1,4744}{820} = 0,001798A$$
$$\mathbf{I_E = 1,798mA}$$

Agora que sabemos a corrente de emissor, podemos calcular a corrente de coletor que terá um valor muito próximo da mesma. Basicamente, a corrente de coletor  $I_C$  é igual à razão entre o ganho do transistor e o ganho somado a 1, multiplicada pela corrente de emissor. Ficou complicado? É simples, a razão entre o ganho e o ganho somado a 1 é conhecida como  $\alpha$  e calculada dessa forma

$$\alpha = \frac{h_{FE}}{h_{FE} + 1}$$

OBS.: Em muitas literaturas o ganho do transistor  $h_{FE}$  também é chamado de  $\beta$  do transistor. Neste curso utilizaremos sempre  $h_{FE}$  uma vez que  $\beta$  também é um parâmetro conhecido ao utilizarmos análise teórica em amplificadores com malha de realimentação (estudaremos posteriormente neste módulo).

O *datasheet* do fabricante nos informa que o BC547B (componente prático que utilizaremos) tem um  $h_{FE}$  que pode variar entre 200 e 450. Para cálculo teórico, é comum utilizarmos um média aritmética simples entre o mínimo e o máximo, no caso o valor 325. Agora podemos calcular o  $\alpha$

$$\alpha = \frac{325}{325 + 1} = 0,9969$$

O parâmetro  $\alpha$  é adimensional e sempre terá um valor próximo de 1. A corrente de coletor será

$$I_C = \alpha \times I_E = 0,9969 \times 1,798 \times 10^{-3}$$
$$\mathbf{I_C = 1,792mA}$$

A corrente de base  $I_B$  é facilmente calculada, pois é a razão entre a corrente de coletor e o ganho do transistor utilizado

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{1,792 \times 10^{-3}}{325}$$

$$\mathbf{I_B = 5,5138\mu A}$$

A tensão que falta calcular é a tensão de coletor  $V_C$  onde novamente iremos recorrer à Lei de Ohm, pois ela é a tensão da fonte menos a queda de tensão no resistor de coletor

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C$$

$$V_C = 17 - (5600 \times 1,792 \times 10^{-3})$$

$$\mathbf{V_C = 6,9648V}$$

Podemos ainda calcular a tensão entre coletor e emissor do transistor, parâmetro conhecido como  $V_{CE}$ , que simplesmente é a diferença entre a tensão de coletor e emissor

$$V_{CE} = V_C - V_E = 6,9648 - 1,4744$$

$$\mathbf{V_{CE} = 5,4904V}$$

Os transistores têm um  $V_{CE}$  limite máximo para operar em condições normais e não correr risco de queima, no caso do BC547 esse valor é 45V (parâmetro  $V_{CEO}$  do *datasheet*).

Assim, todas as grandezas pertinentes à polarização do transistor foram calculadas. Após efetuar os cálculos (ou análise prática a partir da medida das tensões e correntes) você deve se perguntar: o transistor está na região ativa?

No caso do NPN:  $V_C > V_B > V_E$

$$V_C = 6,9648V$$

$$V_B = 2,1744V$$

$$V_E = 1,4744V$$

Neste caso está, portanto ele pode operar como amplificador! Dica: no caso de um amplificador apresentando um defeito, verifique com o multímetro as tensões e correntes quiescentes, caso as mesmas estejam coerentes, pode eliminar esta hipótese de defeito.

As impedâncias de entrada e saída do amplificador, bem como seu ganho de tensão, devem ser determinadas a partir da análise do circuito em um modelo AC. Na literatura existem os modelos  $T$  e  $\pi$  para representar o circuito, para este circuito, vamos utilizar o modelo  $\pi$  (Figura 6).

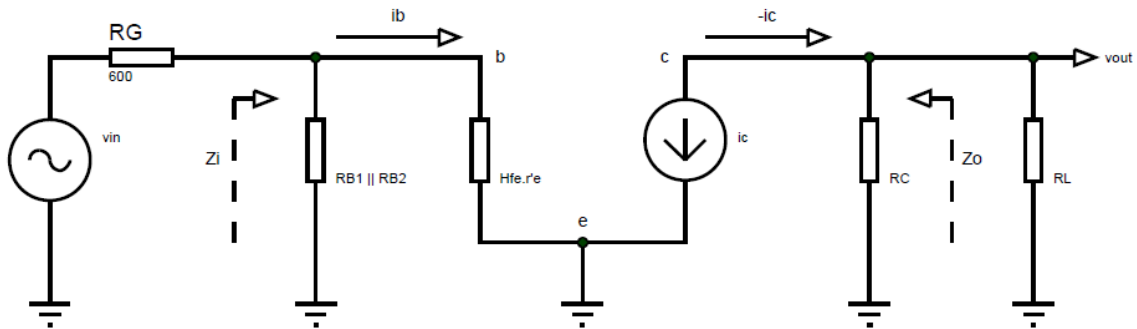


Figura 6 - Circuito equivalente AC do amplificador.

É comum em análise de sinais, utilizarmos tensões e correntes com caracteres em minúsculo, isto é  $v_b$ ,  $v_c$ ,  $v_e$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ,  $i_e$ . No circuito da Figura 6, podemos observar um resistor  $r'_e$  que consiste na resistência interna de emissor do transistor. Como analisamos do ponto de vista da base, multiplicamos por  $h_{fe}$  para uma aproximação. O apóstrofo ' indica que consiste em uma resistência inerente ao componente, presente em sua estrutura interna. A fonte de corrente independente também faz parte do transistor, logo temos uma representação do componente em um nível mais baixo de abstração, uma vez que é necessário para a análise seguinte.

Outro ponto é que, quando analisamos em AC, as fontes de tensão DC independentes são um curto circuito, as fontes de corrente DC independentes são circuito aberto e os capacitores são um curto circuito. Daí se origina a presente topologia e por este motivo o resistor  $R_{B1}$  cai para o terra e fica em paralelo com  $R_{B2}$  e o resistor  $R_C$  cai para o terra e fica em paralelo com  $R_L$ .

Para o ganho de tensão  $A_V$ , sabemos que o mesmo é a razão entre a tensão de saída  $v_{out}$  e tensão de entrada  $v_{in}$

$$A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

Analisando o circuito da Figura 6, encontramos a seguinte expressão para a tensão de saída, novamente recorrendo à Lei de Ohm

$$v_{out} = -i_c \times (R_C \parallel R_L)$$

Considerando a impedância de saída  $R_G$  do gerador, temos uma expressão para a tensão entre base e emissor do transistor (nela o  $R_B$  significa o paralelo de  $R_{B1}$  com  $R_{B2}$ )

$$v_{be} = \frac{R_B \parallel h_{fe}r'_e}{(R_B \parallel h_{fe}r'_e) + R_G} \times v_{in}$$

A corrente  $i_c$  é igual ao produto entre o parâmetro de condutância  $gm$  e a tensão  $v_{be}$

$$i_c = gm \times v_{be}$$

Então

$$v_{out} = -gm v_{be} \times (R_C \parallel R_L)$$

Substituindo  $v_{be}$  na equação

$$v_{out} = -gm \times \frac{R_B \parallel h_{fe}r'_e}{(R_B \parallel h_{fe}r'_e) + R_G} \times v_{in} \times (R_C \parallel R_L)$$

Dividindo ambos os lados por  $v_{in}$  temos a equação para cálculo do ganho de tensão

$$A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -gm \times \frac{R_B \parallel h_{fe}r'_e}{(R_B \parallel h_{fe}r'_e) + R_G} \times (R_C \parallel R_L)$$

A resistência interna de emissor  $r'_e$  depende do parâmetro  $V_T$  que é relacionado à tensão térmica. Em geral utiliza-se o valor de  $25mV$ . A razão entre  $V_T$  e a corrente de emissor do circuito, nos fornece a resistência interna de emissor

$$r'_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{25 \times 10^{-3}}{1,798 \times 10^{-3}} = 13,9043\Omega$$

O parâmetro  $gm$  é a razão entre a corrente de coletor e o parâmetro  $V_T$

$$gm = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1,792 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-3}} = 0,0716S$$

Cálculo do  $R_B$

$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2} = \frac{1}{\frac{1}{15000} + \frac{1}{2200}} = 1918,6046\Omega$$

Cálculo do ganho de tensão

$$A_V = -0,0716 \times \frac{1918,6046 \parallel (325 \times 13,9043)}{(1918,6046 \parallel (325 \times 13,9043)) + 600} \times (5600 \parallel 6800)$$

$$A_V = -152,284 \frac{V}{V}$$

O sinal negativo para o ganho de tensão indica que o sinal de saída estará defasado em  $180^\circ$  em relação ao sinal de entrada. O ganho é adimensional, mas costuma-se sinalizar com a expressão  $\frac{V}{V}$  para destacar que consiste em um ganho de tensão.

A impedância de entrada, é obtida através dos resistores de polarização de base e da resistência interna de emissor do transistor (vista pela base).

$$Z_i = R_B \parallel (h_{fe}r'_e)$$

$$Z_i = \frac{1918,6046 \times (325 \times 13,9043)}{1918,6046 + (325 \times 13,9043)}$$

$$\mathbf{Z_i = 1346,7921\Omega}$$

$$\mathbf{Z_i \cong 1,35k\Omega}$$

Para esta topologia, a impedância de saída  $Z_o$  será igual a resistência de coletor

$$Z_o = R_C$$

$$\mathbf{Z_o = 5,6k\Omega}$$

A frequência crítica (aquela onde a reatância capacitiva é igual à resistência total da malha) para o capacitor  $C_1$  pode ser calculada considerando a impedância de entrada do amplificador e a impedância de saída do gerador.

$$f_{crit} = \frac{1}{2\pi \times (R_G + Z_i) \times C_1}$$

$$f_{crit} = \frac{1}{2\pi \times (600 + 1346,7921) \times 120 \times 10^{-9}}$$

$$\mathbf{f_{crit} = 681,27Hz}$$

A frequência de quina (aquela onde o capacitor agirá como um curto total para AC) é 10 vezes a frequência crítica.

$$f_{quin} = 10f_{crit}$$

$$\mathbf{f_{quin} = 10 \times 681,27 = 6,8127kHz}$$

Para o capacitor  $C_2$ , as frequências serão

$$f_{crit} = \frac{1}{2\pi \times (R_L + Z_o) \times C_2} = \frac{1}{2\pi \times (6800 + 5600) \times 120 \times 10^{-9}} = \mathbf{106,9589Hz}$$

$$\mathbf{f_{quin} = 1,0695kHz}$$

Abaixo da maior frequência de quina calculada (a do capacitor  $C_1$ ) o circuito não irá operar com o ganho total, pois haverá o efeito da reatância capacitiva em oposição à passagem de corrente.

Estudaremos mais detalhes sobre o efeito dos capacitores nas aulas sobre resposta em frequência.