

Transistores Bipolares 4

Adrielle C. Santana

Modelos para CA

Uma vez que polarizamos o transistor com o ponto Q no centro da reta de carga (próximo), aplicando-se uma pequena tensão CA na base produz uma tensão CA maior no coletor.

Essa é a amplificação. Uma das funções do transistor é importante para o rádio, televisão, computadores, entre outros equipamentos.

Capacitor de Acoplamento

Num resistor a oposição à passagem de corrente independe da frequência desta, no entanto, no capacitor, quanto maior a frequência, menor a oposição à passagem de corrente. Isso tem a ver com a “resistência” que o capacitor apresenta em circuitos CA conhecida formalmente com “**reatância capacitiva**”.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Capacitor de Acoplamento

A fórmula anterior nos diz que quando a frequência é suficientemente alta, a reatância é próxima de **zero** de modo que o capacitor se comporta como um curto-circuito.

Quando a frequência é zero, temos um circuito CC, a reatância é **infinita**, ou seja, o capacitor se comporta como um circuito aberto.

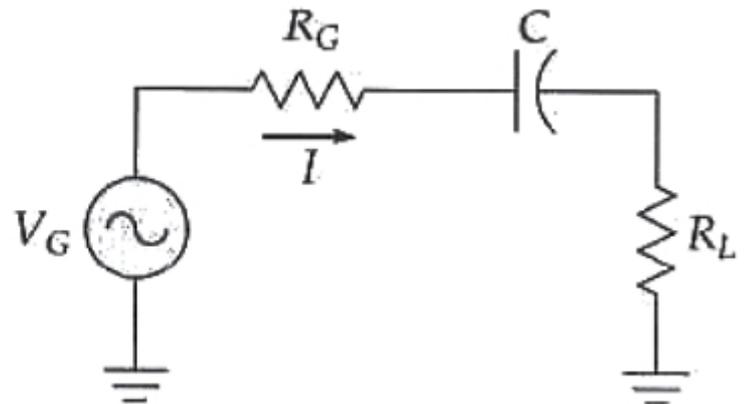
Capacitor de Acoplamento

Um capacitor de acoplamento transmite uma tensão CA de um ponto a outro. Como funciona?

Para o circuito abaixo a corrente é aproximadamente zero se a frequência for muito baixa (tender a cc). Se a frequência for alta o capacitor age como um curto e a corrente é dada por:

$$R = R_G + R_L$$

$$I_{\text{máx}} = \frac{V_G}{R}$$



Capacitor de Acoplamento

Mas, um gerador CA vai sempre possuir alguma frequência diferente de zero. Temos então que dimensionar o capacitor de forma que sua reatância seja o suficiente para fazer com que ele se comporte como um curto na menor frequência do gerador. Uma regra simples para isso é **fazer a reatância ser:**

$$X_C < 0,1R$$

Capacitor de Acoplamento

A frequência crítica

Trata-se da frequência para a qual:

$$X_C = R$$

Nessa frequência a corrente vale 0.707 da corrente máxima.

$$I = 0,707 I_{\text{máx}}$$

Capacitor de Acoplamento

Calcula-se a frequência crítica como segue:

De $X_C = R$ temos que

$$\frac{1}{2\pi f C} = R \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi RC} \Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Capacitor de Acoplamento

A frequência de quina

A frequência a partir da qual o capacitor se comporta como um curto é chamada de frequência de quina e é calculada fazendo-se:

$$f_H > 10f_c$$

Acima dessa frequência a corrente na carga I tende a ser cerca de 99% do seu valor máximo.

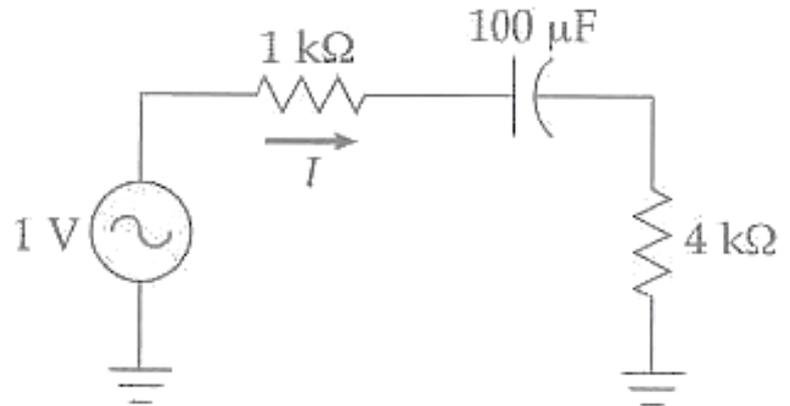
Capacitor de Acoplamento

Ex.: Um capacitor acopla o sinal de um gerador para uma carga. Qual a I_{\max} e a f_h ?

$$I_{\max} = \frac{1 \text{ V}}{5 \text{ k}\Omega} = 200 \text{ }\mu\text{A}$$

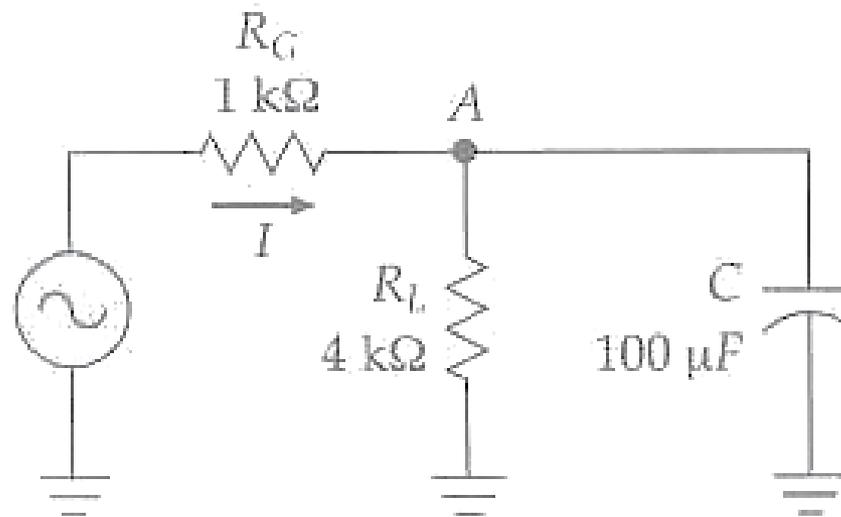
$$f_c = \frac{1}{2\pi(5 \text{ k}\Omega)(100 \text{ }\mu\text{F})} = 0,318 \text{ Hz}$$

$$f_h = 3,18 \text{ Hz}$$



Capacitor de Desvio (Bypass)

Nessa configuração o capacitor age como um curto a altas frequências desviando a corrente do resistor R_L . O ponto A se torna um curto circuito para o terra. Se medirmos a corrente no resistor R_L na alta frequência veremos um valor próximo a zero.



Capacitor de Desvio (Bypass)

Para esse caso, qual seria a frequência de quina?

Nesse caso a resistência equivalente R é dada por:

$$R = R_G \parallel R_L \Rightarrow R = \frac{R_G R_L}{R_G + R_L}$$

A partir dela calcula-se a f_c :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Dela achamos a frequência de quina como antes: $f_h = 10f_c$

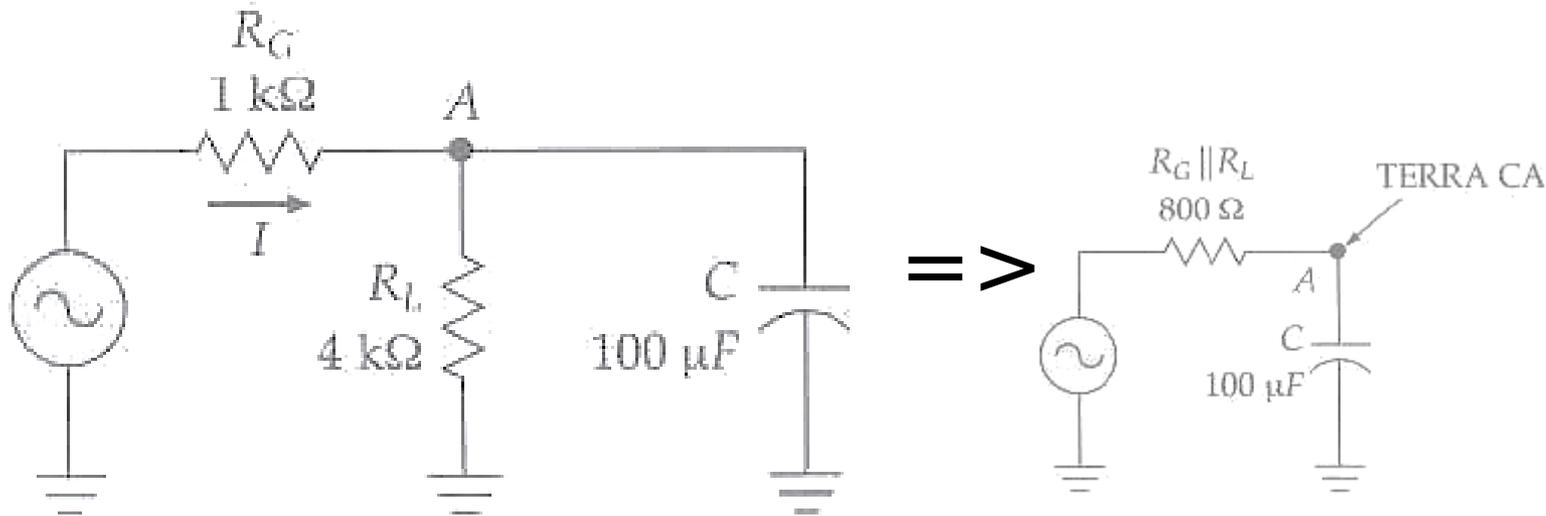
Capacitor de Desvio (Bypass)

O ponto terra criado pelo capacitor a altas frequências é conhecido como **terra para CA**.

Ele é usado quando deseja-se que o no exemplo anterior o ponto A seja um terra para altas frequências e seja normal para baixas frequências.

Capacitor de Desvio (Bypass)

Para o circuito abaixo, calcular a f_h .

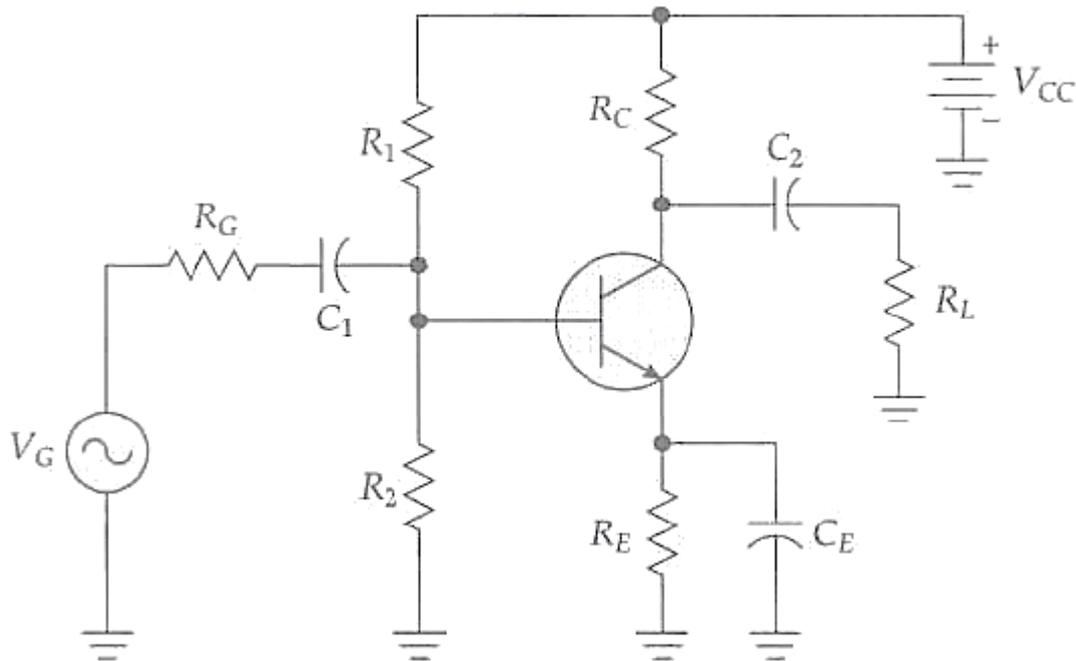


$$f_c = \frac{1}{2\pi(800 \text{ }\Omega)(100 \text{ }\mu\text{F})} = 1,99 \text{ Hz}$$

$$f_h = 10(1,99 \text{ Hz}) = 19,9 \text{ Hz}$$

Teorema da Superposição nos Amplificadores

Um amplificador com transistor é ilustrado abaixo. V_{CC} é a tensão CC que estabelece o ponto Q enquanto V_G é a tensão CA acoplado por C_1 na base, e por C_2 na saída. C_E é de desvio.



Teorema da Superposição nos Amplificadores

As variações de corrente CA produzidas na base são multiplicadas por β_{cc} produzindo as mesmas variações maiores na corrente do coletor.

Para analisar esse circuito vamos dividir a análise em CC e CA. Esse é o uso do **teorema da superposição para circuitos**. Podemos analisar os efeitos de cada fonte individualmente no circuito e depois somá-los.

Teorema da Superposição nos Amplificadores

Análise CC

- Transformar as fontes CA em curtos;
- Desconectar os capacitores (que se comportam como circuito aberto a baixa frequência mesmo);
- Calcular corrente e tensões CC do **circuito equivalente CC** resultante.

Teorema da Superposição nos Amplificadores

Análise CA

- Substituir as fontes CC em curtos;
- Considerar os capacitores como curtos (a altas frequências é esse o seu comportamento mesmo);
- Calcular corrente e tensões CA do **circuito equivalente CA** resultante.

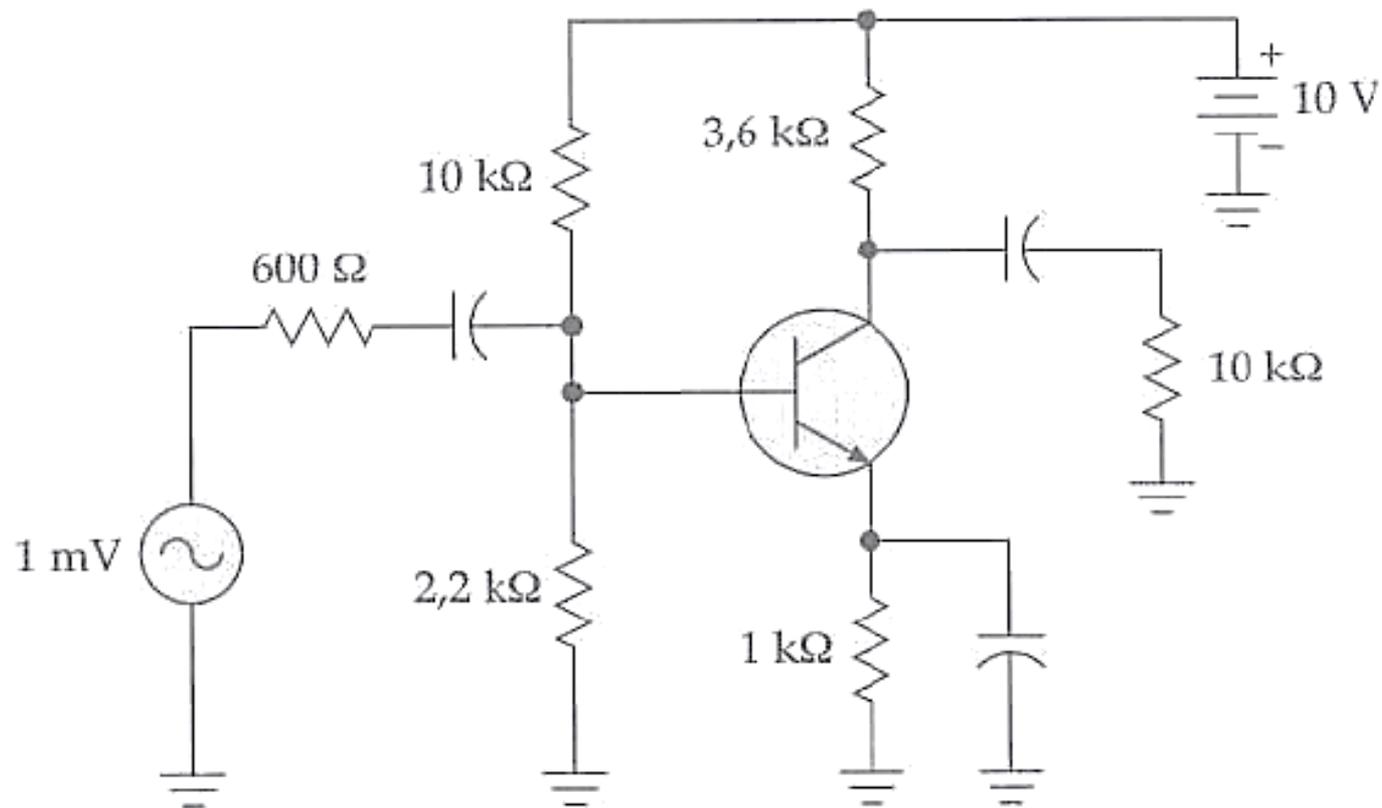
Teorema da Superposição nos Amplificadores

Superposição

- Somar as correntes CC e CA em cada ramo obtendo a corrente total neste.
- Somar a tensão CC e CA em cada nó ou resistor para obter a tensão total neste.

Teorema da Superposição nos Amplificadores

Exemplo



Teorema da Superposição nos Amplificadores

- A tensão CA acoplada pelo capacitor da base produz uma variação CA na base na frequência do gerador CA.
 - A variação CA na base é amplificada por β e percebida na corrente de coletor (versão maior de I_B).
 - Uma variação de tensão CA é percebida no resistor do coletor.
 - $V_C = V_{CC} - I'_C R_C$ que será CA. Onde I'_C é a combinação das correntes I_C com a i_c .
- Obs.: i_c é a corrente alternada no coletor.

Teorema da Superposição nos Amplificadores

- O capacitor na saída acopla a tensão CA do coletor (V_C) em R_L .

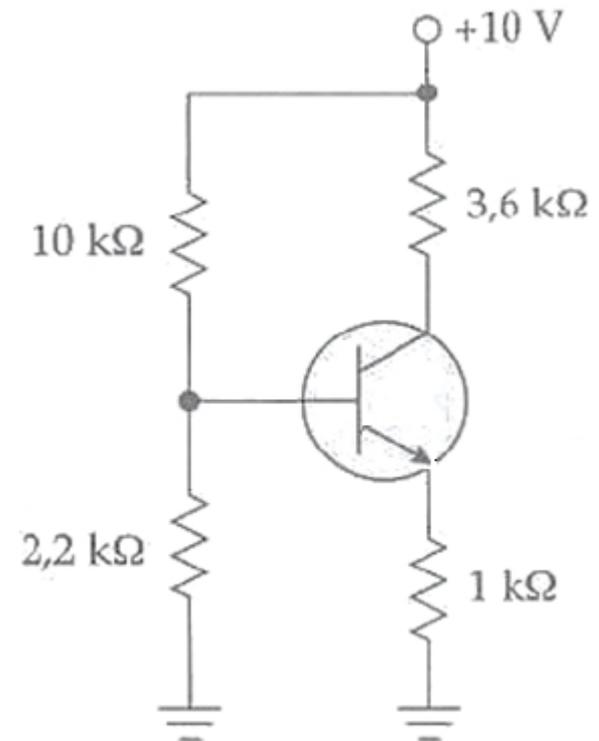
Se o gerador CA fosse um gerador de áudio, pegaríamos sobre o R_L esse sinal de áudio amplificado (receptor de rádio com vários estágios de transistores).

Teorema da Superposição nos Amplificadores

Análise CC do exemplo

Aplicando o procedimento comentado para análise CC obtemos o seguinte circuito equivalente CC:

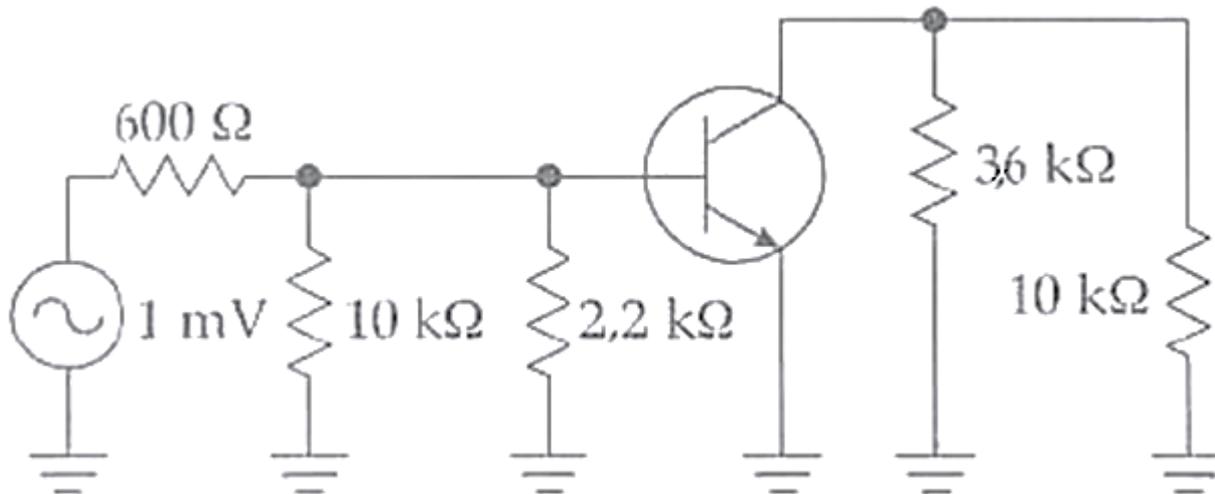
$$\begin{aligned}V_B &= 1,8 \text{ V} \\V_E &= 1,1 \text{ V} \\I_E &= 1,1 \text{ mA} \\V_C &= 6,04 \text{ V} \\V_{CE} &= 4,94 \text{ V}\end{aligned}$$



Teorema da Superposição nos Amplificadores

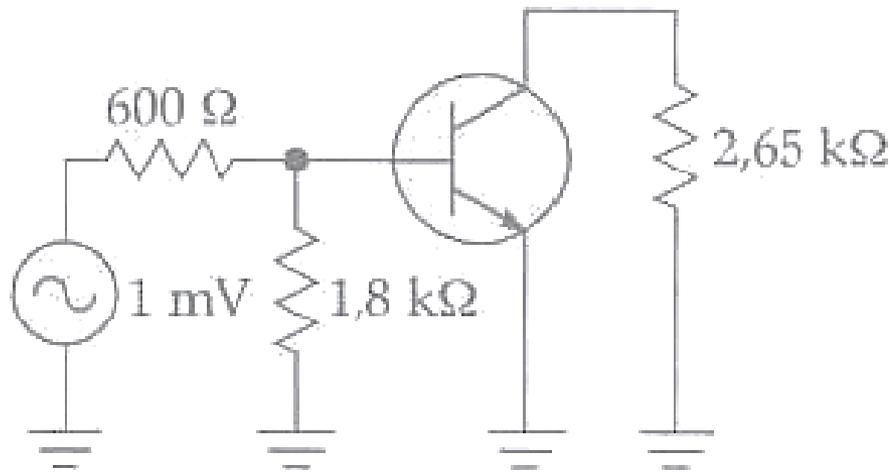
Análise CA do exemplo

Aplicando o procedimento comentado para análise CA temos obtemos o seguinte circuito equivalente CA:



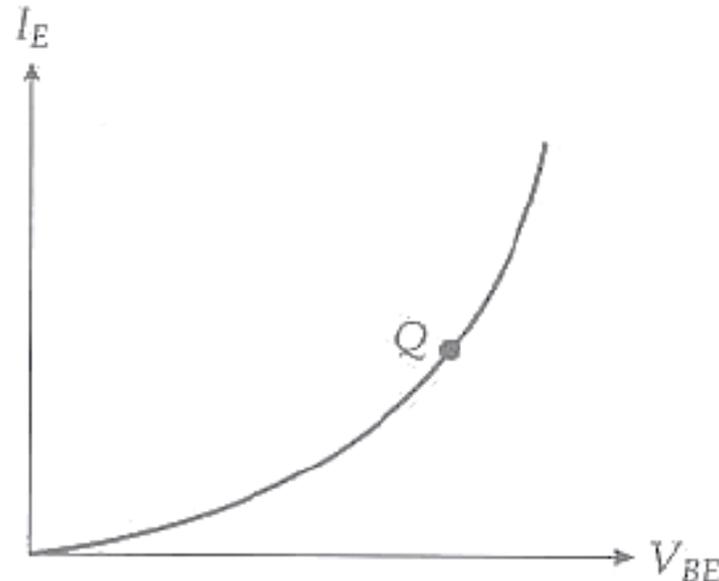
Teorema da Superposição nos Amplificadores

Resolvendo os resistores equivalentes temos:



Operação em Pequeno Sinal

Abaixo tem-se uma versão distorcida da curva I_E x V_{BE} . Isso é feito para fazermos a análise a seguir. Na verdade a curva teria um joelho sendo que antes dele I_E seria aproximadamente 0 até que $V_{BE} = 0,7$ V.

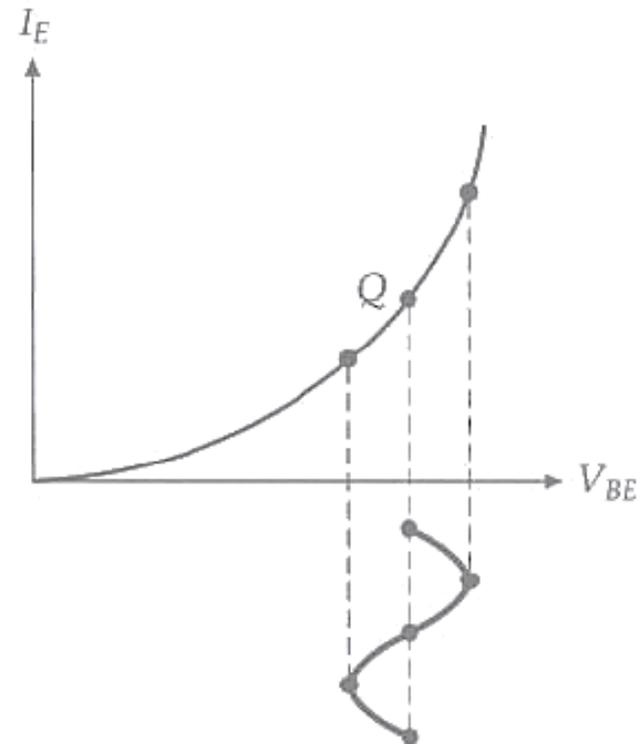


Operação em Pequeno Sinal

Ao acoplar um sinal CA na base o ponto Q irá variar com a variação CA.

Esse novo ponto Q é chamado de **ponto de operação instantâneo**.

A figura mostra esse movimento do ponto Q instantâneo em relação ao ponto Q criado pela polarização CC.



Operação em Pequeno Sinal

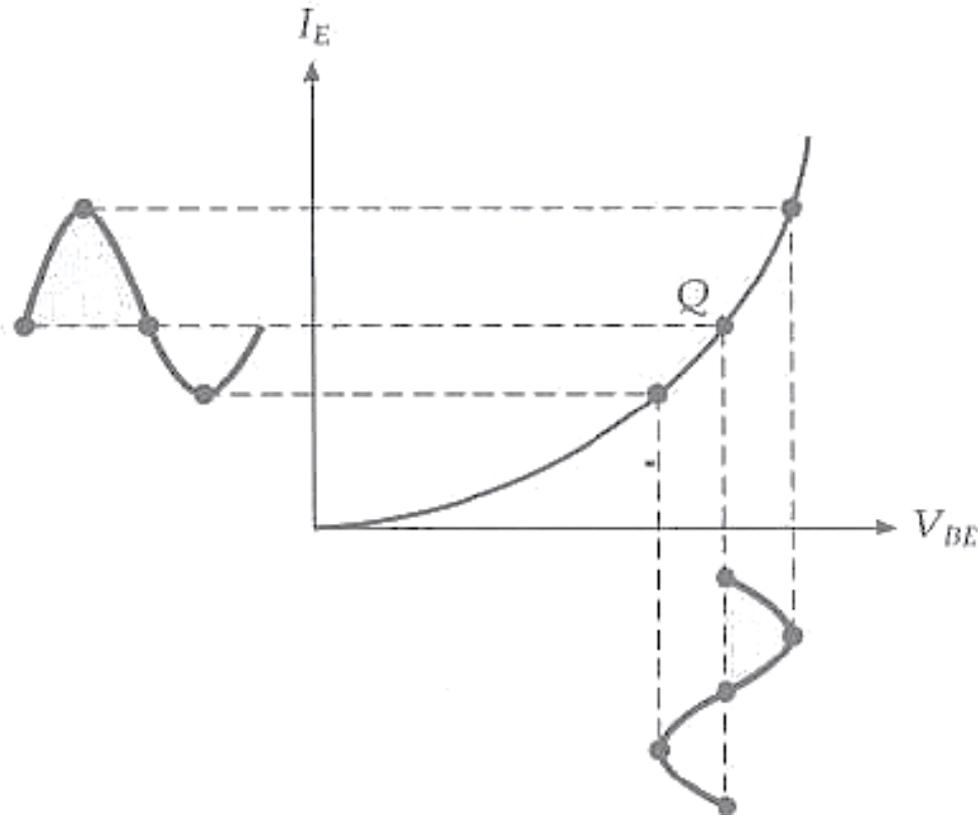
V_{BE} agora é dado pela soma de uma tensão CC com uma tensão CA.

A tensão CA na base produz corrente CA no emissor com mesma frequência e aproximadamente mesmo formato (senoidal).

Devido ao formato do gráfico a corrente do emissor tende a ficar distorcida conforme a figura a seguir.

Operação em Pequeno Sinal

O que é indesejado pois, distorce também I_C e consequentemente a tensão de saída (áudio por exemplo).

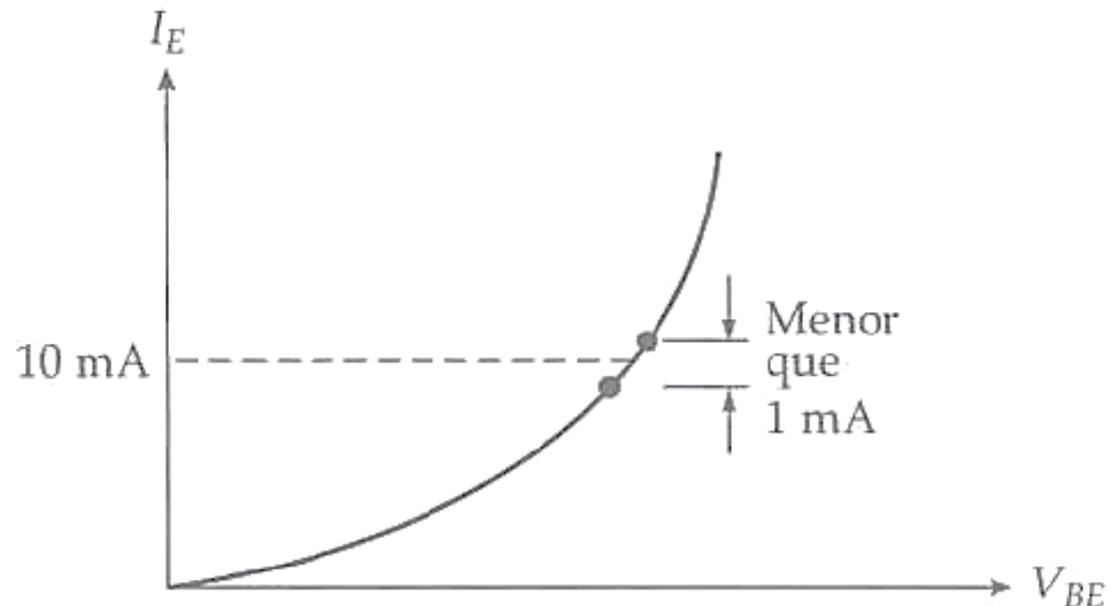


Operação em Pequeno Sinal

Uma forma de reduzir tal distorção é reduzindo o movimento do ponto Q. Isso é conseguido reduzindo-se a tensão CA da base. Dessa forma a corrente CA no emissor também será pequena e o alongamento e compressão observados ficarão bastante reduzidos.

Operação em Pequeno Sinal

O sinal CA será considerado suficientemente pequeno quando a corrente CA do emissor, pico a pico, for menor que 10% da corrente CC do emissor.



Operação em Pequeno Sinal

Esses amplificadores que obedecem à essa regra dos 10% serão chamados e **amplificadores de pequenos sinais**. São usados nas entradas dos receptores de TV e rádio pois o sinal vindo da antena é pequeno o suficiente para obedecer à regra dos 10%.

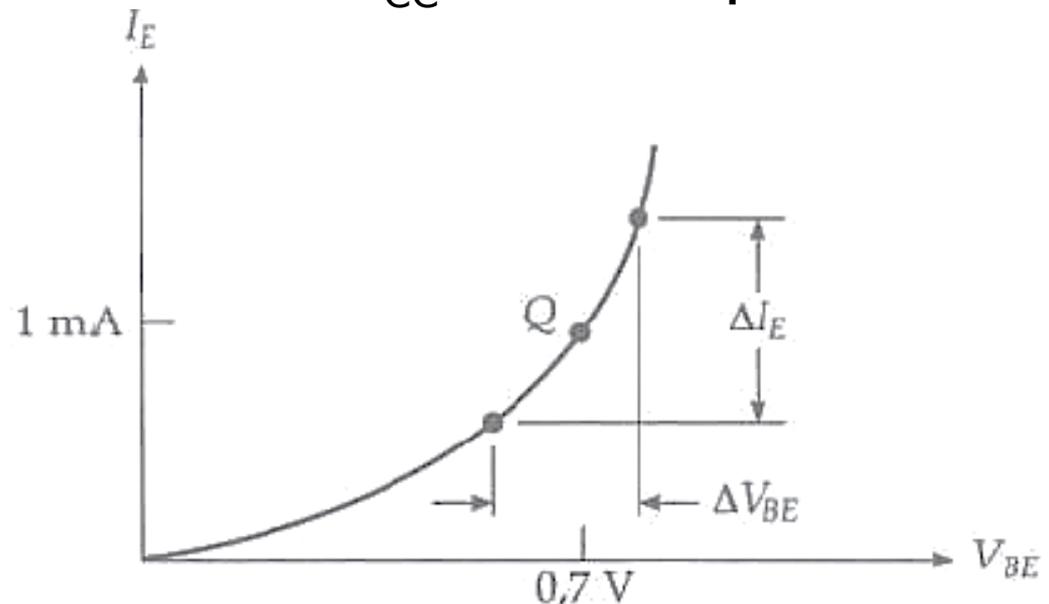
Resistência CA do Diodo Emissor

Para encontrar valores de resistências em CC costuma-se utilizar a lei de Ohm.

$$R_{cc} = \frac{V}{I}$$

Por exemplo, na figura abaixo R_{cc} é dado por:

$$R_{cc} = \frac{0,7 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 700 \Omega$$



Resistência CA do Diodo Emissor

Já a resistência CA (R_{ac}) é definida como a divisão da tensão CA sobre o componente, pela corrente CA que circula por ele (I_E).

$$R_{ac} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_E}$$

Onde os Δ representam valores pico a pico da tensão e corrente CA.

Resistência CA do Diodo Emissor

Considerando que a condição de pequeno sinal é satisfeita pode-se calcular a resistência CA do emissor fazendo:

$$r_e' = \frac{25 \text{ mV}}{I_E}$$

Essa resistência é interna ao transistor que ocorre devido ao uso de tensão alternada nele.

O Beta CA

Seja o amplificador visto anteriormente cujos valores CC são:

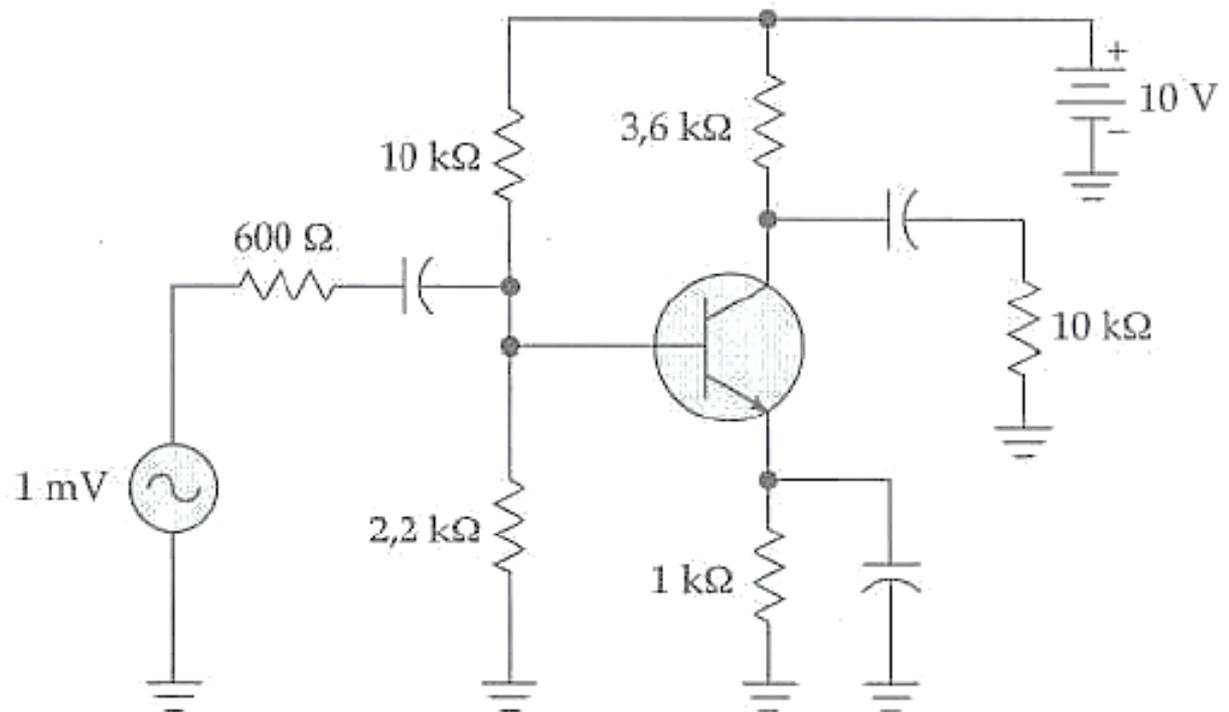
$$V_B = 1,8 \text{ V}$$

$$V_E = 1,1 \text{ V}$$

$$I_E = 1,1 \text{ mA}$$

$$V_C = 6,04 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 4,94 \text{ V}$$



O Beta CA

Utilizando a fórmula para a resistência CA do emissor tem-se:

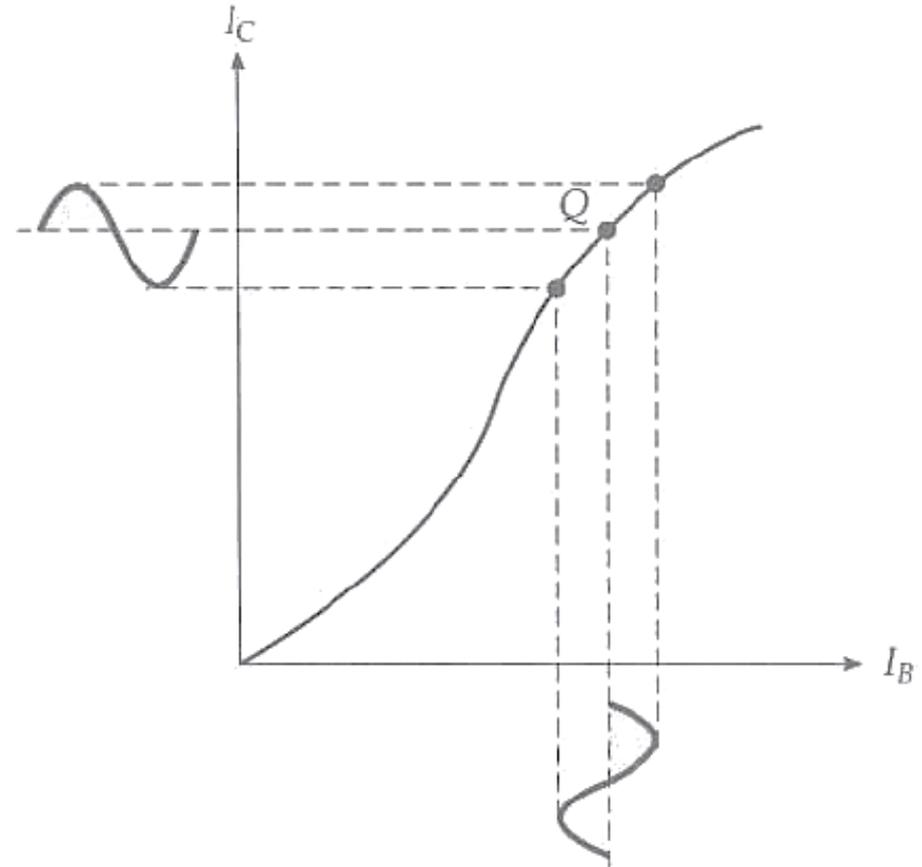
$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{1,1 \text{ mA}} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_E} = 22,7 \Omega$$

O β_{CC} é calculado como sempre fazendo:

$$\beta_{CC} = \frac{I_C}{I_B}$$

O Beta CA

No gráfico abaixo relacionam-se as correntes I_C e I_B onde no ponto Q temos os seus valores CC utilizados no cálculo do β_{CC} .



O Beta CA

O ganho de corrente CA é dada pela divisão da variação da corrente no coletor pela variação da corrente na base.

$$\beta = \frac{i_c}{i_b}$$

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

Essa variação é tomada pico a pico. O valor de β varia com a inclinação do gráfico apresentado diferentes valores para uma mesma variação das correntes.

O Beta CA

Na folha de dados temos:

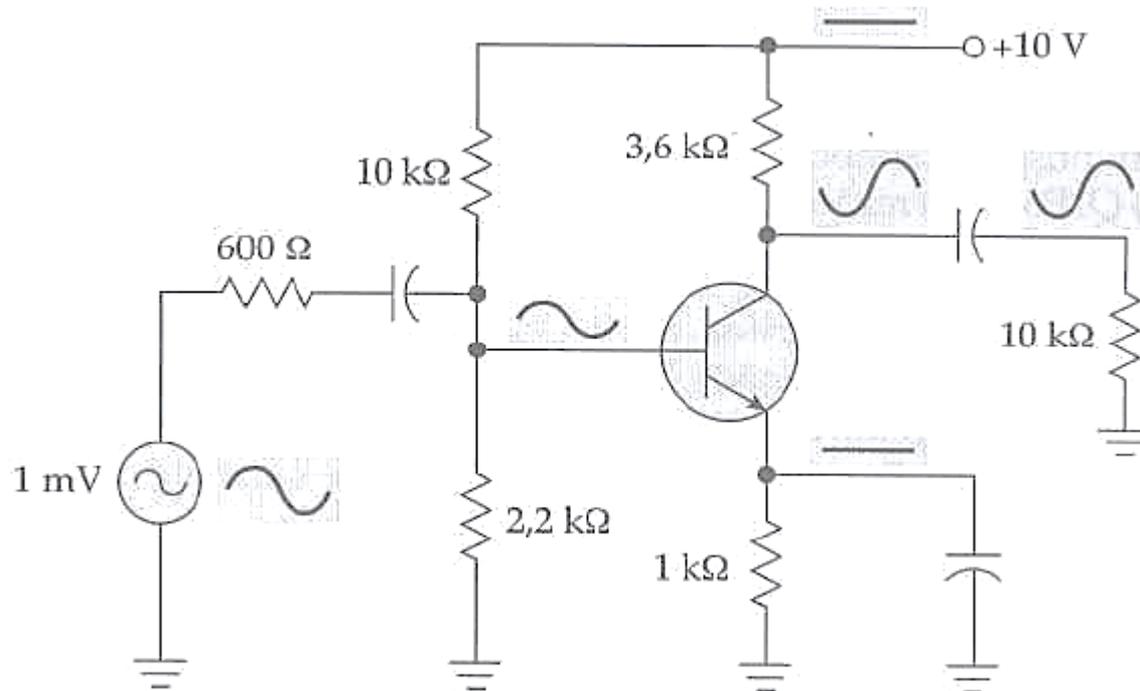
$$h_{FE} \Rightarrow \beta_{CC}$$

e

$$h_{fe} \Rightarrow \beta$$

Amplificador EC

Na figura a seguir temos um amplificador em emissor-comum pois, em CA o emissor é aterrado. O gerador possui uma resistência interna de $600\ \Omega$ e tensão pico a pico de 1mV .



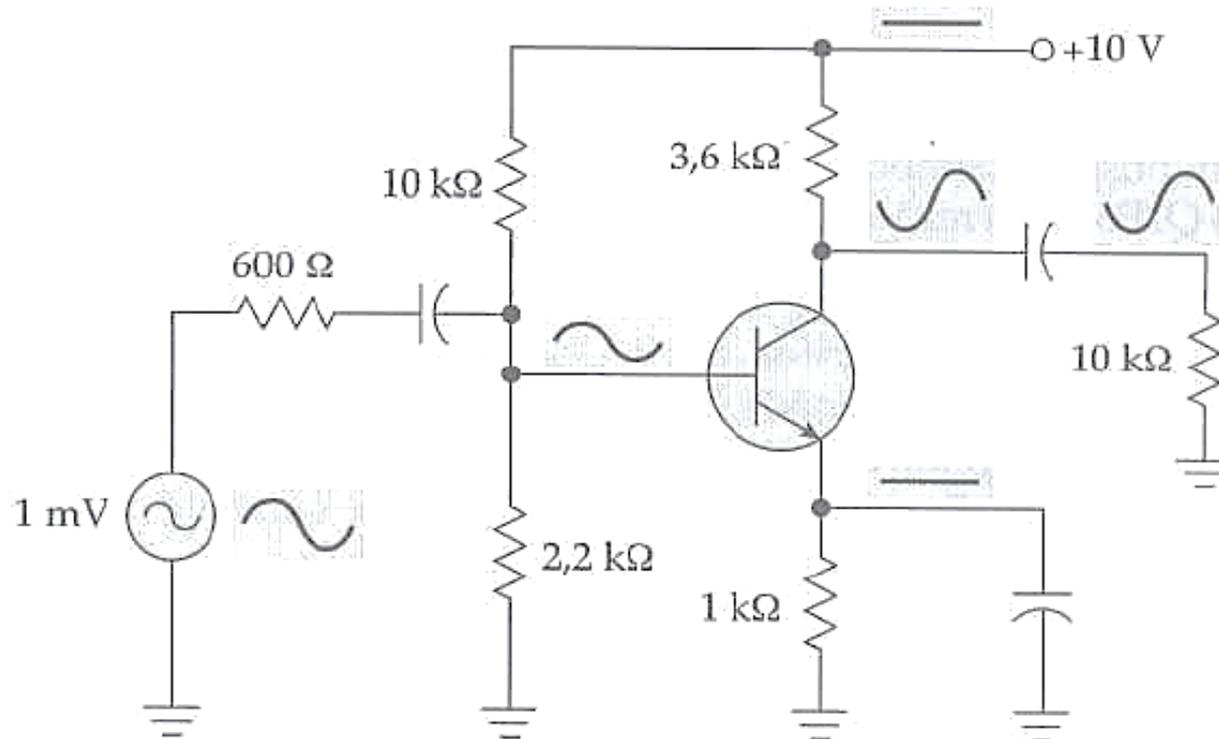
Amplificador EC

A tensão CA na base é menor que a da fonte devido a queda de tensão no resistor. Com o emissor aterrado para CA toda a tensão CA da base aparece no diodo emissor onde se observa uma corrente CA.

A corrente CA no coletor é aprox. igual a corrente CA no emissor. Quanto maior a corrente no coletor (picos) maior a queda de tensão no seu resistor e menor V_c e virse-versa.

Amplificador EC

Observe que a tensão V_C é invertida em relação a fonte numa defasagem de 180° .



Amplificador EC

A tensão total do coletor é a tensão CC + CA.

A tensão CC é aprox. 6V. A tensão CA varia em torno dessa de 6V.

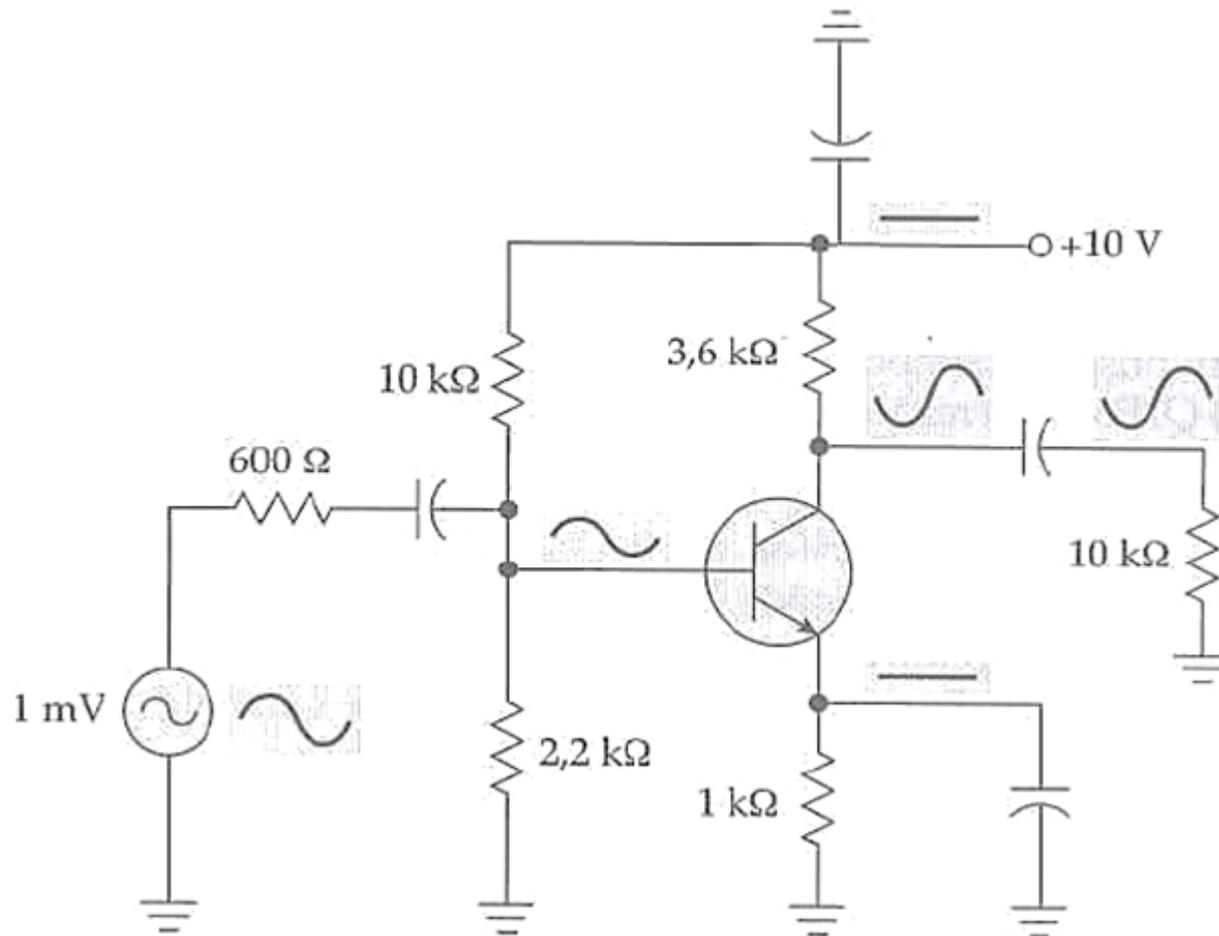
O capacitor na saída tende a bloquear tensões CC (que possuem frequência zero) de modo que na saída será observada **somente** uma tensão CA amplificada (capacitor é um curto para AF).

Amplificador EC

Já no **emissor, veremos apenas uma tensão CC** de 1,1V pois, em AF o capacitor de desvio funciona como um curto para tensões CA.

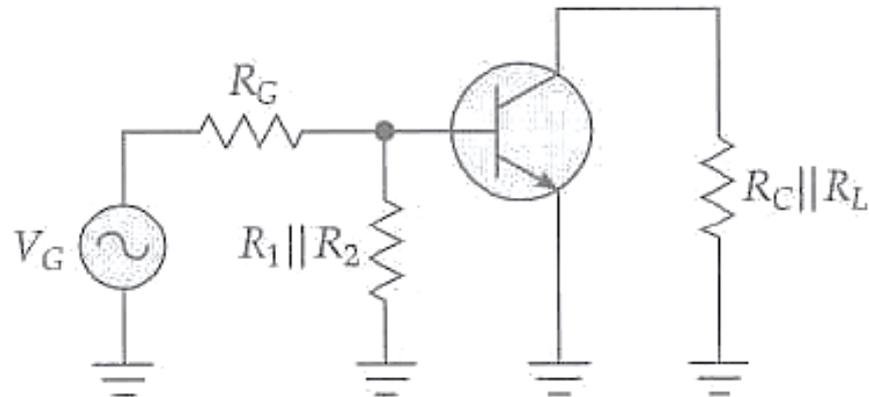
Também não será observada tensão CA na fonte pois esta deve possuir internamente um capacitor de filtro que funciona com desvio para tensões CA em alta frequência.

Amplificador EC



Modelo CA para Amplificador EC

Reduzindo o amplificador EC anterior ao seu modelo CA tem-se:



A tensão na resistência do gerador depende do valor de $R_1 || R_2$ e da corrente CA drenada pela base. Assim **a base funciona como uma outra resistência** a ser considerada nessa conta dada:

Modelo CA para Amplificador EC

$$R_{ca} = \frac{v_b}{i_b}$$

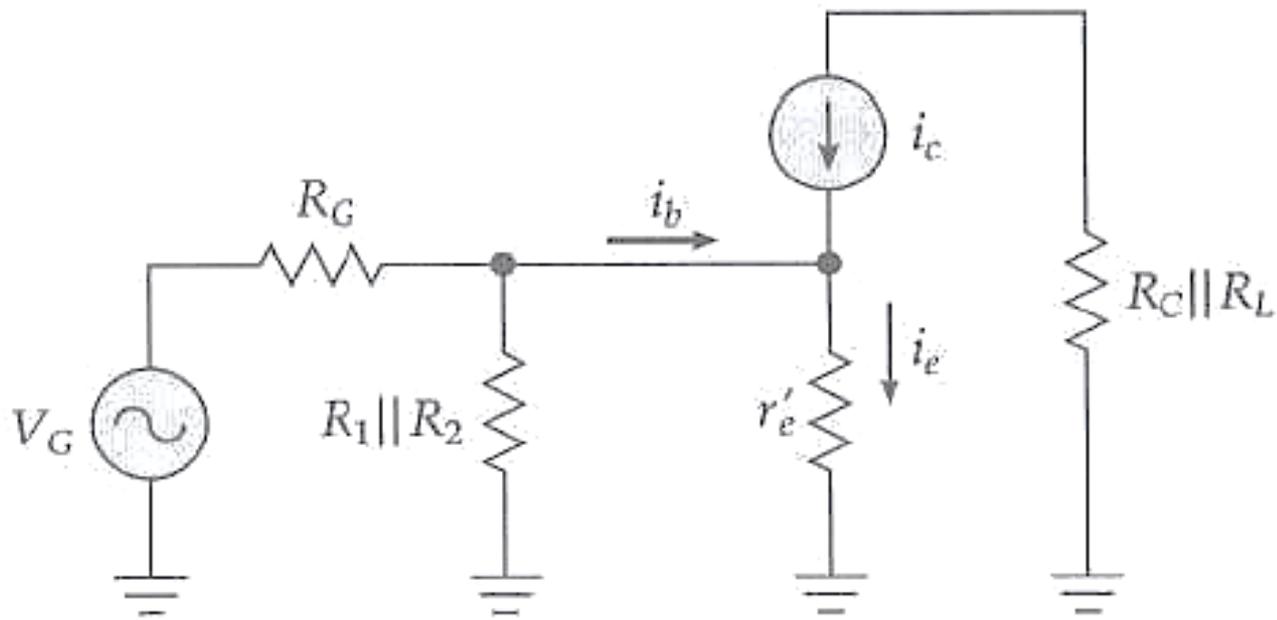
Onde v_b e i_b são valores CA pico a pico na base.

Essa equação é geralmente descrita como uma **Impedância de entrada da base.**

$$z_{ent(base)} = \frac{v_b}{i_b}$$

Modelo CA para Amplificador EC

O circuito equivalente CA pode se reescrito como segue (modelo r_e):



Modelo CA para Amplificador EC

Dessa forma a corrente CA do emissor pode ser calculada fazendo-se:

$$i_e = \frac{v_b}{r_e}$$

Se o transistor operar na região ativa, sempre poderemos aproximar a corrente do coletor da corrente do emissor. Sendo assim:

$$v_c = i_c r_c$$

Modelo CA para Amplificador EC

Trabalhando as fórmulas vistas até agora podemos estabelecer uma outra forma de calcular a impedância de entrada da base.

Sabe-se que $Z_{\text{ent(base)}} = \frac{v_b}{i_b}$ e que $v_b = i_e r'_e$.
Assim:

$$Z_{\text{ent(base)}} = \frac{i_e r'_e}{i_b}$$

Como aproximamos i_c de i_e então: $i_e/i_b = \beta$

Onde obtemos:

$$Z_{\text{ent(base)}} = \beta r'_e$$

Modelo CA para Amplificador EC

Estágios

Um estágio de um amplificador mais complexo é definido como o conjunto formado por um transistor e seus capacitores e resistores. Com dois circuitos desse tem-se um amplificador dito de dois estágios.

Modelo CA para Amplificador EC

A impedância de entrada **do estágio** é dada como:

$$z_{ent} = R_1 \parallel R_2 \parallel \beta r_e'$$

Ela é sempre menor que a impedância de entrada da base.

Parâmetros CA do *Datasheet*

SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

Current-Gain—Bandwidth Product ($I_C = 10 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 20 \text{ V dc}$, $f = 100 \text{ MHz}$)	2N3903 2N3904		f_T	250 300	— —	MHz
Output Capacitance ($V_{CB} = 5.0 \text{ V dc}$, $I_E = 0$, $f = 100 \text{ kHz}$)		3	C_{ob}	—	4.0	pF
Input Capacitance ($V_{BE} = 0.5 \text{ V dc}$, $I_C = 0$, $f = 100 \text{ kHz}$)		3	C_{ib}	—	8.0	pF
Input Impedance ($I_C = 1.0 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	2N3903 2N3904	13	h_{ie}	0.5 1.0	8.0 10	k ohms
Voltage Feedback Ratio ($I_C = 1.0 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	2N3903 2N3904	14	h_{fe}	0.1 0.5	5.0 8.0	$\times 10^{-4}$
Small-Signal Current Gain ($I_C = 1.0 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	2N3903 2N3904	11	h_{fe}	50 100	200 400	—
Output Admittance ($I_C = 1.0 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)		12	h_{oe}	1.0	40	μohms
Noise Figure ($I_C = 100 \mu\text{A dc}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V dc}$, $R_S = 1.0 \text{ k ohms}$, $f = 10 \text{ Hz to } 15.7 \text{ kHz}$)	2N3903 2N3904	9, 10	NF	— —	6.0 5.0	dB

Parâmetros CA do *Datasheet*

Na análise CA de circuitos com transistores podemos utilizar tanto a análise feita anteriormente utilizando os parâmetros β e r'_e quanto os parâmetros ditos “*parâmetros h*” presentes nas folhas de dados.

Existe uma relação entre esses parâmetros:

$$\beta = h_{fe}$$

$$r'_e = \frac{h_{ie}}{h_{fe}}$$

$$h_{ie} = \beta r'_e$$

$Z_{ent(base)}$

Parâmetros CA do *Datasheet*

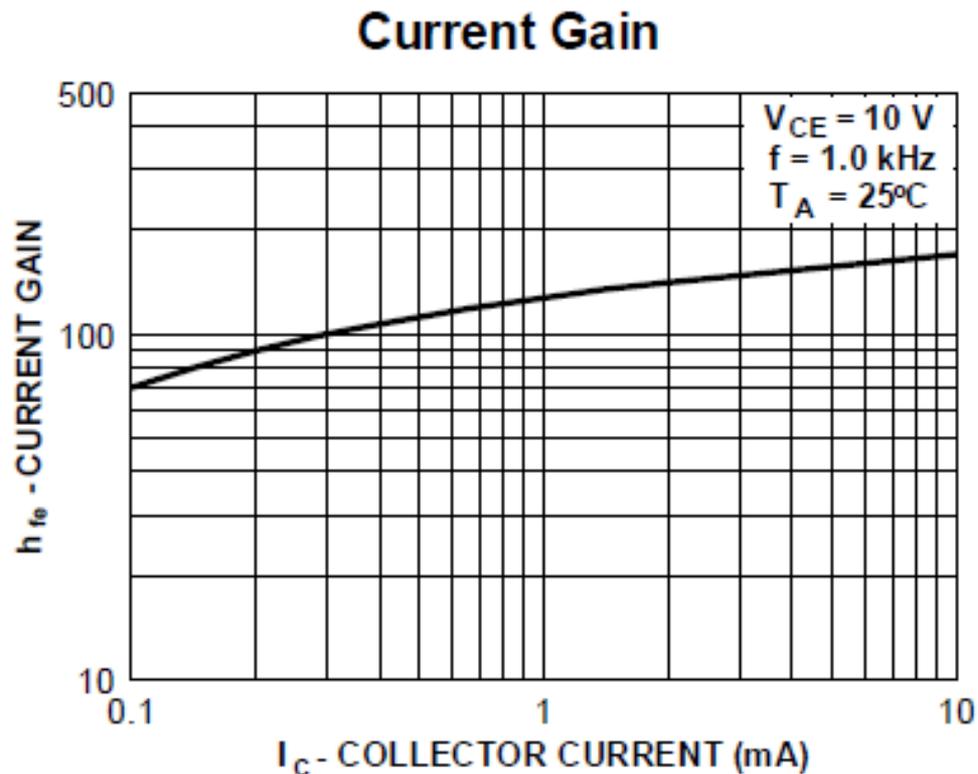
No *datasheet* o h_{ie} varia de 1 a 10 k Ω de modo que para valores máximos de h_{ie} e h_{fe} temos para o 2N3904:

$$r'_e = \frac{10 \text{ k}\Omega}{400} = 25 \Omega$$

Para a nossa análise esses são os parâmetros mais importantes.

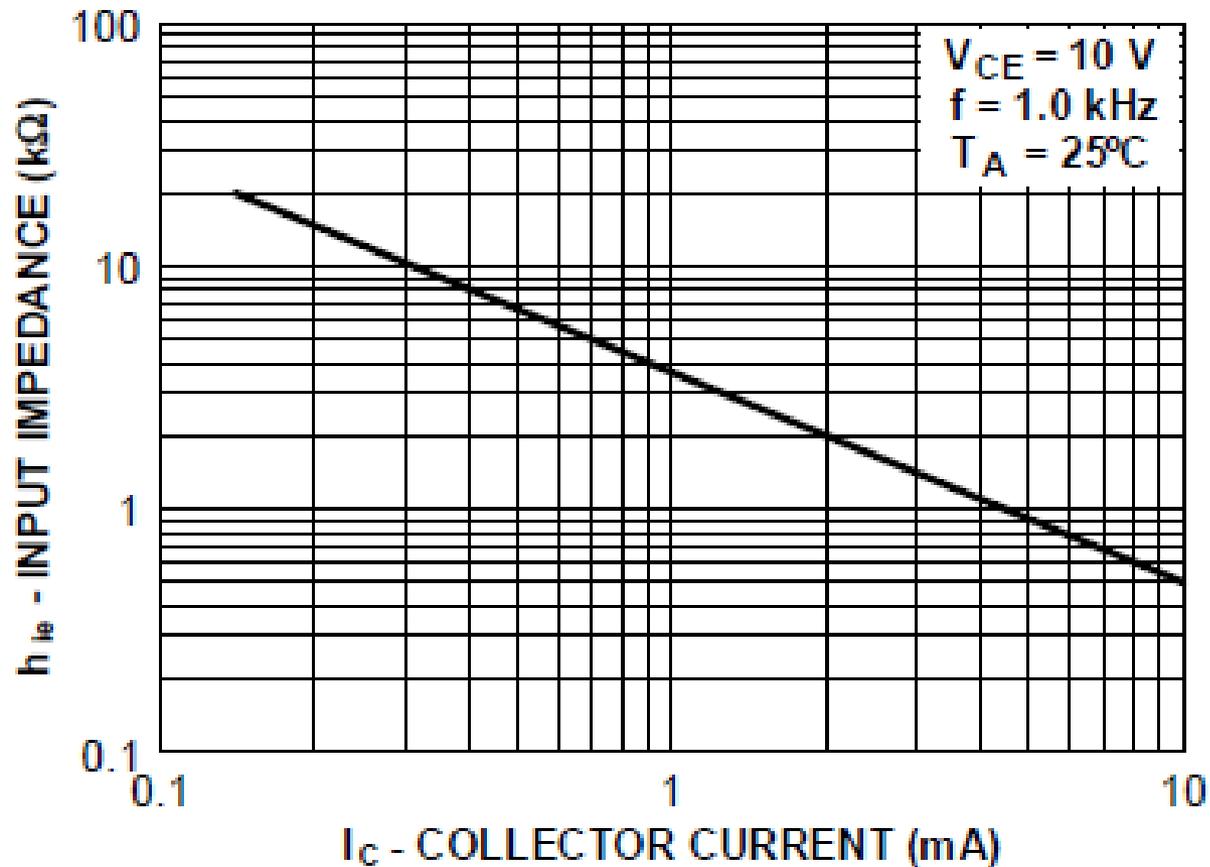
Parâmetros CA do *Datasheet*

O *datasheet* ainda disponibiliza alguns gráficos para verificarmos a alteração desses parâmetros com a temperatura e com a corrente I_C .



Parâmetros CA do *Datasheet*

Input Impedance



Parâmetros CA do *Datasheet*

Por exemplo, consideremos $I_c = 1\text{mA}$.
Qual o valor de r'_e ?

Pelo *datasheet* temos aproximadamente:

$$h_{ie} = 3,6 \text{ k}\Omega$$

$$h_{fe} = 125$$

$$r'_e = \frac{3,6 \text{ k}\Omega}{125} = 28,8 \Omega$$

Pela fórmula que vimos anteriormente
sem utilizar os parâmetros h temos algo
próximo:

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 25 \Omega$$