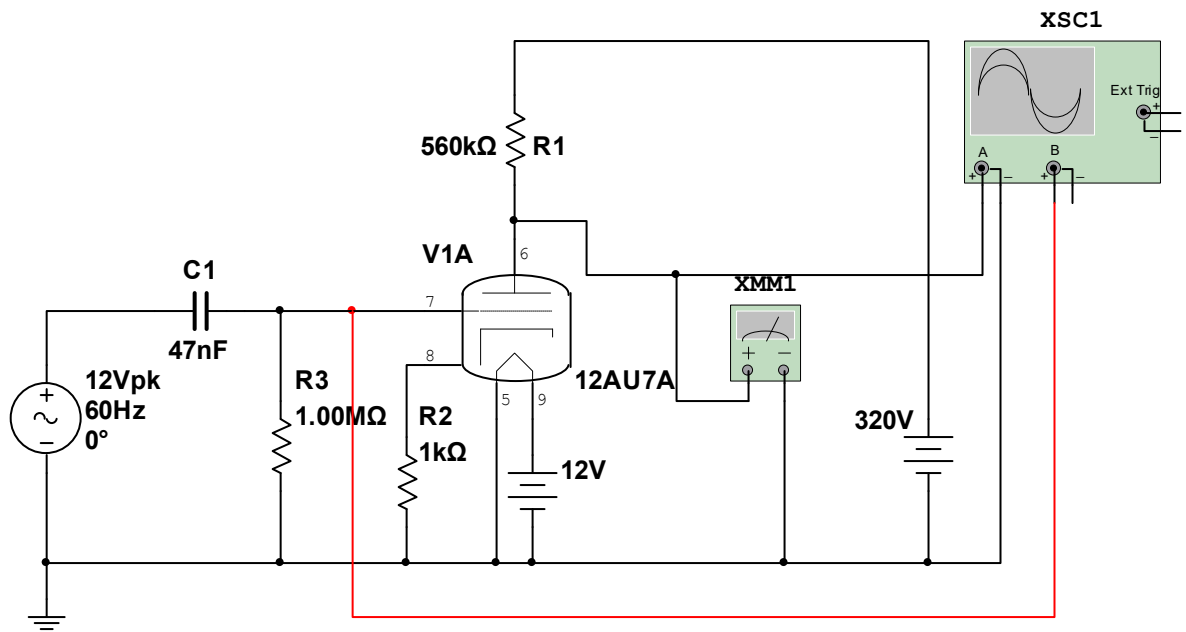


CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA II
Prof. MSc. Luís Caldas
ANO - 2022



Ementa do curso Eletrônica Básica II

Módulo	Seção	Cap.	Página	Assunto
1	4.7	4	239 a 245	Transistor como amplificador
2	4.8 a 4.9	4	245 a 262	Modelos equivalentes para pequenos sinais e análise gráfica
3	4.10 a 4.11	4	262 a 281	Polarização do transistor, emissor, coletor e base comum, Impedância de entrada e saída.
4	4.12	4	282 a 295	Transistor como chave, corte e saturação, análise gráfica
5	4.13 e 4.14	4	295 a 306	Tempos de chaveamento atraso, subida, descida e armazenamento, Modelo de Ebers Moll para grandes sinais
6	4.15	4	308 a 312	Modelo PI-Híbrido para altas frequências, frequência de corte, transcondutância, ganho de tensão e corrente
7	7.2	7	543 a 555	Função de transferência, as 3 faixas de frequências
8	7.3	7	555 a 563	Resposta em baixa frequência de amplificador de pequeno sinal e projeto.
9	7.4	7	563 a 572	Resposta em alta frequência do amplificador de pequeno sinal e projeto.
10	7.5	7	572 a 579	Cascode, projeto

Resumo: O curso de eletrônica básica II se resume no estudo da polarização de transistores bipolares de junção. Um capítulo inteiro com a polarização para os tipos de montagens e aplicações dos transistores. São calculados os parâmetros como impedância de entrada e saída, o ganho de tensão e de corrente, através de modelos equivalentes em CA, como π -híbrido são extraídos os parâmetros dos transistores, também das curvas características e estudo dos quadripolos. É presente neste estudo a resposta em frequência para amplificadores de pequenos sinais, sistemas em cascata e conexão Darlington. Uma lista de exercícios resolvidos e alguns com resposta consolidam o estudo. Segue a bibliografia utilizada para o curso e aulas expositivas.

TRANSISTOR PARTE II

MODELAGEM DO TRANSISTOR TJB

Para análise AC do transistor é utilizado circuitos equivalentes, ou modelos que representam a estrutura interna do dispositivo. Um modelo é uma combinação dos elementos do circuito e as suas relações, as quais se aproximam do funcionamento real do dispositivo sob determinadas condições de operação.

MODELO R_E

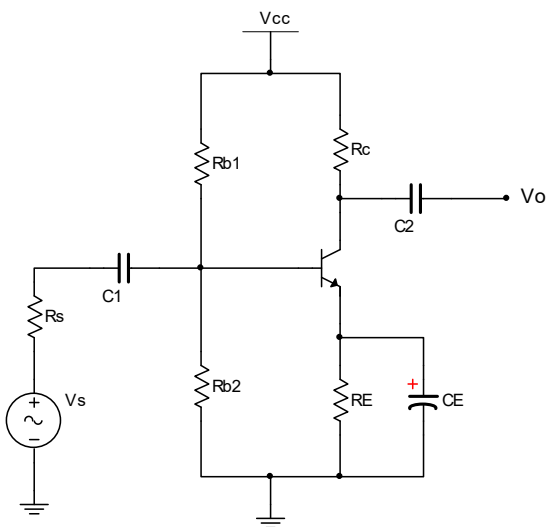
A abordagem desse modelo permite determinar um parâmetro importante ao invés de usar a folha de dados do fabricante para determiná-lo. Baseado no modelo π -híbrido quase que exclusivo para análise do transistor em alta frequência. O modelo inclui uma conexão entre entrada e saída e uma realimentação da tensão de saída e as quantidades de entrada.

TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR

O circuito a seguir é um amplificador montagem em emissor comum e vai ser representado pelo modelo equivalente pi-híbrido.

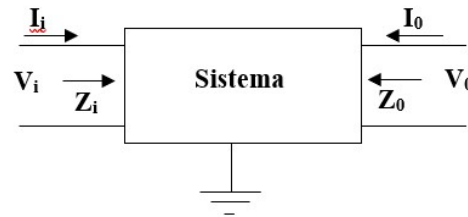
ANÁLISE AC DO CIRCUITO

O circuito em análise é um amplificador de pequenos sinais a TJB, polarizado como divisor de tensão e com capacitores de desacoplamento CC do sinal de entrada e saída.



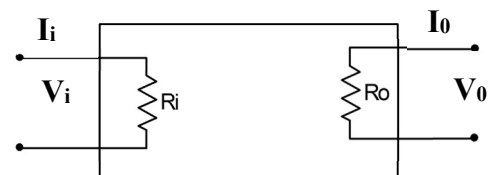
Considerações:

1. A fonte V_{cc} é curto-circuito para sinal;
2. Os capacitores C_1 , C_2 e CE são um curto-circuito para sinais.
3. O resistor R_E é curto-circuitado por CE ;
4. Os parâmetros Z_i , Z_o e I_i e I_o podem ser determinados conforme sistema.

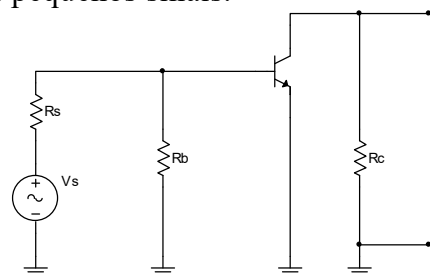


Do sistema de parâmetros impedância de entrada Z_i e impedância de saída Z_o , temos:

$$Z_i = V_i / I_i \text{ E } Z_o = V_o / I_o$$



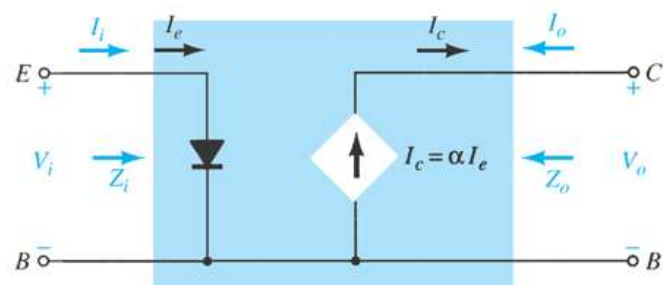
Redesenhando o circuito acima para a análise em CA para pequenos sinais.



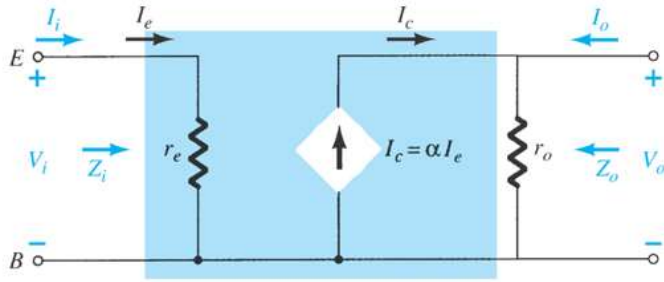
MODELO r_e DO TRANSISTOR

O diodo do modelo r_e pode ser substituído pelo resistor r_e e pode ser aplicado para as configurações EC, BC e CC do transistor TJB.

CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM



CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM



Sabendo-se que $V_T = 26\text{mV}$, a resistência do diodo é determinada por $r_D = 26\text{mV}/I_D$. Como a corrente que passa pelo diodo é a corrente de emissor, temos:

$r_e = 26\text{mV}/I_e$. Para o terminal de entrada $Z_i = V_i/I_b$
 $Z_i = V_{be}/I_b$ e sendo $V_{be} = I_e r_e$, onde $I_e = I_c + I_b$
 $V_{be} = (I_c + I_b)r_e = I_b(\beta + 1)r_e$, daí podemos calcular que:

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA SAÍDA Z_i E Z_o

A impedância de entrada vista pelo terminal de entrada é beta vezes o valor de r_e , será:

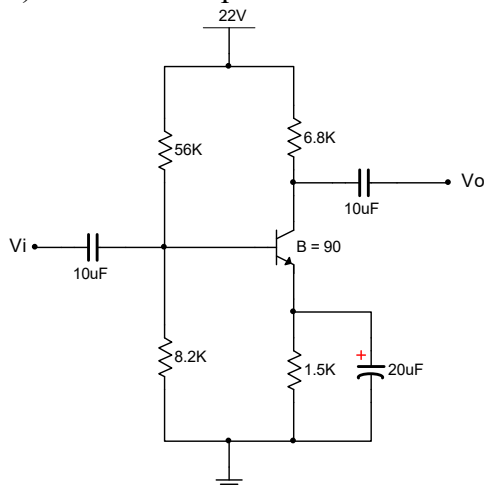
$$Z_i = (\beta + 1)I_{br_e}/I_b = (\beta + 1)r_e \cong \beta r_e.$$

A impedância de saída vista pelo terminal de saída será:

$$Z_o = R_c // r_o.$$

Exercício: Para o circuito da figura a seguir, determinar:

- a) O valor de r_e
- b) O valor de Z_i e Z_o ($r_o = \infty$)
- c) O valor de A_v ($r_o = \infty$)
- d) Os itens b e c para $r_o = 50\text{K}$



Solução: A condição do cálculo ter melhor precisão

é quando a condição ser satisfeita $\beta R_E > 10R_{B2}$, ou quando a corrente que circula nos resistores R_{B1} e R_{B2} seja pelo menos 10 vezes a corrente na base do transistor.

$$90 \cdot (1,5\text{K}) > 10 \cdot (8,2\text{K}) \Rightarrow 135\text{K} > 82\text{K} \text{ (Satisfeita)}$$

a) A Tensão na base do transistor será:

$$V_{B2} = V_{CC} R_{B2}/(R_{B1} + R_{B2}) = (22)(8,2\text{K})/(8,2\text{K} + 56\text{K}) = 2,81\text{V}$$

A tensão sobre o resistor de emissor será:

$$V_{RE} = V_{B2} - V_{BE} = 2,81\text{V} - 0,7\text{V} = 2,11\text{V}$$

$$\text{A corrente } I_E = V_{RE}/R_E = 2,11/1,5\text{K} = 1,41\text{mA}.$$

$$\text{O valor de } r_e = V_T/I_E = 26\text{mV}/1,41\text{mA} = 18,44\Omega.$$

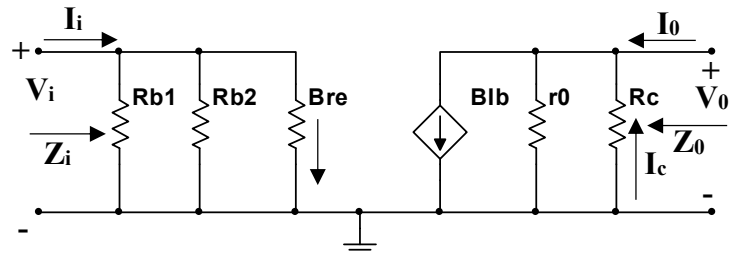
b) A resistência equivalente $R_B = R_{B1} // R_{B2}$, então $R_B = 56\text{K} // 8,2\text{K} = 7,15\text{K}$.

A impedância $Z_i = \beta r_e // R_B$, fica:

$$Z_i = 90 \cdot 18,44 // 7,15\text{K} = 1,35\text{K}$$

$$Z_o = R_c // r_o = 6,8\text{K}$$

Observando o modelo r_e do circuito amplificador de pequenos sinais, temos:



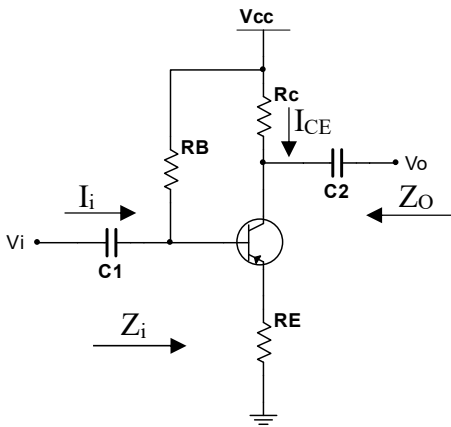
$V_{BE} = V_i$ e $I_B = V_{BE}/r_e$ e $V_O = -V_i/r_e \cdot (R_c/r_o) \Rightarrow$ Do item 1 para $r_o = \infty \Rightarrow A_v = V_O/V_i \cong -R_c/r_e$
 $A_v = -6,8\text{K}/18,44$ e $A_v = -368,76$.

Do item 2 para $r_o = 50\text{K} \Rightarrow V_O/V_i = -(R_c/r_o)/r_e$
 $V_O/V_i = -6,8\text{K}/50\text{K}/18,44 = -324,76$

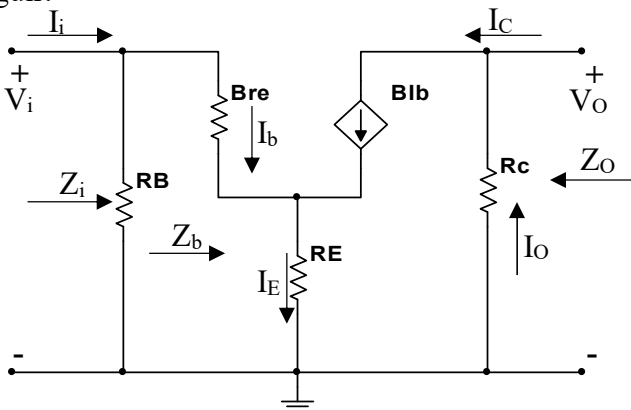
$A_v = -324,3$ a diferença entre os resultados é porque a condição ($r_o \geq 10 R_c$) não foi satisfeita.

CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM COM RESISTOR R_E

A configuração do emissor comum inclui um resistor de emissor que pode ser curto-circuitado em CA ou não. O modelo r_e equivalente será utilizado para análise das impedâncias de entrada e saída e ganho de tensão. A resistência r_o não tendo efeito será omitida na análise. O circuito a seguir mostra a configuração emissor comum.



O modelo de descrição do circuito é apresentado a seguir.



Resistência de emissor RE refletida na base, fica:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

A corrente de base será:

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

A corrente de emissor fica:

$$\frac{I_E}{(\beta + 1)} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} - \frac{V_E}{R_B} = \frac{V_E}{R_E (\beta + 1)}$$

Separando-se os termos fica:

$$V_E \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_E (\beta + 1)} \right) = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

Isolando-se os termos, fica:

$$V_E \left(\frac{R_B + R_E (\beta + 1)}{R_B R_E (\beta + 1)} \right) = \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{R_B}$$

Rearranjando-se temos:

$$\frac{V_E}{R_E (\beta + 1)} = \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{R_B + R_E (\beta + 1)}$$

A equação final da corrente será:

$$\frac{I_E}{(\beta + 1)} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_E (\beta + 1)}$$

A equação final será:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_E (\beta + 1)}$$

Para a determinação da impedância Zb, deve-se refletir na base o efeito do resistor RE.

$$V_i = I_b \cdot \beta r_e + I_E R_E, \text{ onde } I_E = (\beta + 1) I_b \Rightarrow$$

$$V_i = I_b \cdot \beta r_e + (\beta + 1) I_b R_E = I_b \beta r_e + (\beta + 1) I_b R_E.$$

$$V_i / I_b = \beta r_e + (\beta + 1) R_E$$

A impedância Zb = βre + (β + 1)RE pode ser escrita Zb = β(re + RE) ≅ βRE (RE >> re).

A impedância de entrada pode ser escrita como:

$$Z_i = R_B // Z_b$$

A impedância de saída Zo = RC.

O ganho Av = - RC / RE. (desprezando-se re).

Condição: r0 ≥ 10RC

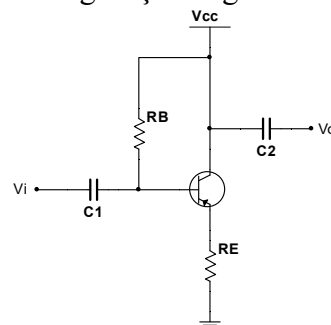
Exercício: Para o circuito anterior são dados: RB = 470K, RC = 2,2K, RE = 0,56K, r0 = 40K, β = 120, C1 = C2 = 10µF e VCC = 20V. Calcular:

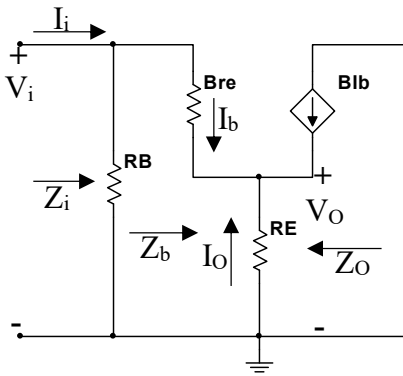
- re
- Zi
- Zo
- Av

Resposta: re = 5,45Ω, Zi = 59,34KΩ, Zo = 2,2KΩ e Av = - 3,93.

CONFIGURAÇÃO COLETOR COMUM OU SEGUIDOR DE EMISSOR

A configuração de seguidor de emissor a saída é pelo resistor de emissor e é um pouco menor do que Vi, pois o ganho Av = 1. A fase de saída segue a fase de entrada e o coletor é curto-circuitado para a terra, pois a fonte Vcc é um curto-circuito para AC. O modelo re equivalente será utilizado para análise das impedâncias de entrada e saída e ganho de tensão. O circuito a seguir mostra a configuração seguidor de emissor.





Para a determinação da impedância Z_b , deve-se refletir na base o efeito do resistor R_E .

$$V_i = I_b \cdot \beta r_e + I_E R_E, \text{ onde } I_E = (\beta + 1)I_b \Rightarrow$$

$$V_i = I_b \cdot \beta r_e + (\beta + 1)I_b R_E = I_b \beta r_e + (\beta + 1)I_b R_E.$$

$$V_i/I_b = \beta r_e + (\beta + 1)R_E.$$

A impedância $Z_b = \beta r_e + (\beta + 1)R_E$ pode ser escrita $Z_b = \beta(r_e + R_E) \cong \beta R_E$ ($R_E \gg r_e$).

A impedância de entrada pode ser escrita como $Z_i = R_B // Z_b$ e a impedância de saída pode ser escrita como: $Z_O = R_E // (r_e + R_B/\beta) \cong r_e$.

O ganho $A_V = V_O/V_i = R_E/(R_E + r_e)$ e $R_E \gg r_e \Rightarrow A_V = 1$.

Exercício: Dados $R_E = 3.3K$, $R_B = 220K$, $C_1 = C_2 = 10\mu F$, $V_{CC} = 12V$, $\beta = 100$ e $r_o = \infty$.

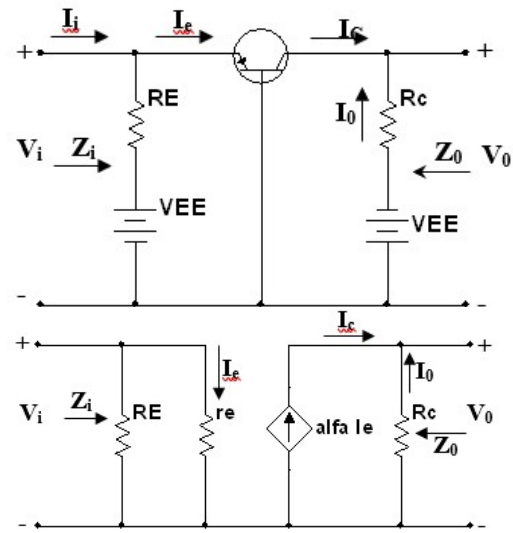
Pede-se:

- a) r_e
- b) Z_i
- c) Z_O
- d) A_V

Resposta: $r_e = 12,61\Omega$, $Z_i = 132,72K\Omega$, $Z_O = 12.61\Omega$ e $A_V \cong 1$.

CONFIGURAÇÃO BASE COMUM

A configuração base comum tem impedância baixa de entrada e alta de saída e o ganho de corrente é menor do que a unidade, porém tem ganho alto de tensão. O modelo r_e equivalente será utilizado para análise das impedâncias de entrada e saída e ganho de tensão. O circuito a seguir mostra o modelo equivalente.



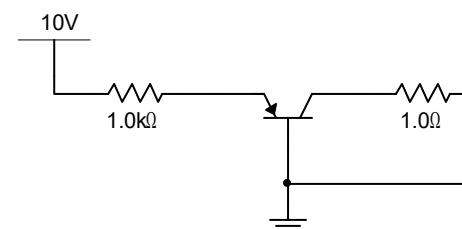
A impedância de entrada $Z_i = r_e // R_E$, de saída $Z_O = R_C$, ganhos $A_V = R_C/r_e$ e $A_i = 1$.

Exercício: Dados: $R_E = 1K\Omega$, $R_C = 5K\Omega$, $V_{EE} = 2V$ e $V_{CC} = 8V$ e $r_o = 1M\Omega$ e $\alpha = 0.98$. Pede-se:

- a) r_e
- b) Z_i
- c) Z_O
- d) A_V
- e) A_i

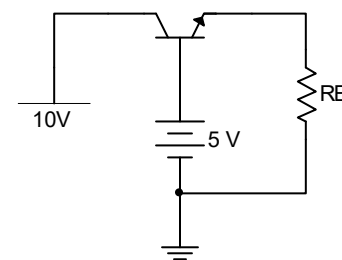
Resposta: $r_e = 20\Omega$, $Z_i = 20\Omega$, $Z_O = 5K\Omega$, $A_V = 250$ e $A_i = 1$.

1. A corrente I_E será. $V_{BE} = 0,6V$.



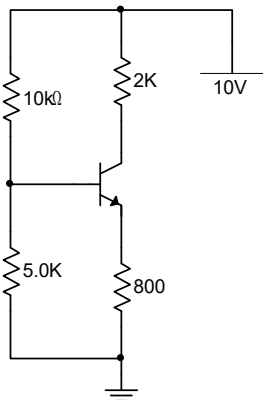
Resposta: $I_E = 9,4mA$.

2. A tensão V_{CE} , sabendo-se $V_{BE} = 0,6V$.



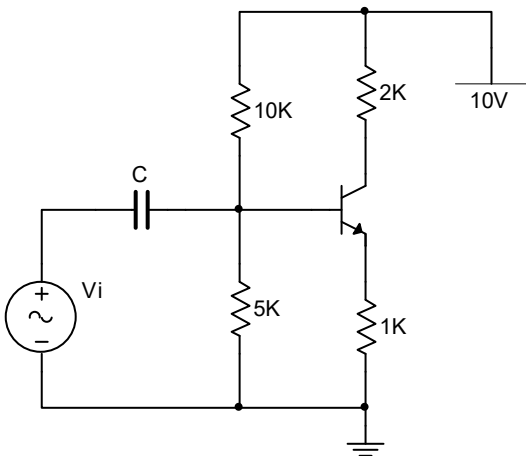
Resposta: $V_{CE} = 5,6V$.

3. Determinar a corrente de base I_B , sabendo-se que $V_{BE} = 0,6V$ e $\beta = 100$.



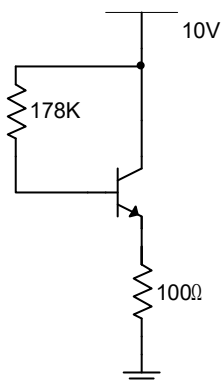
Resposta: $I_B = 34,17\mu A$

4. A tensão de saída para um sinal de entrada AC de 1V, onde $V_{BE} = 0,6V$ e $\beta = 100$.



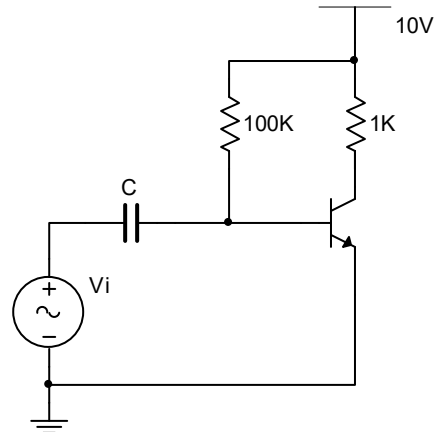
Resposta: $V_O = -2V$

5. Determinar a impedância de saída, sabendo-se que: $V_{BE} = 0,6V$, $\beta = 100$, $V_T = 25mV$ e $I_E = 5mA$.



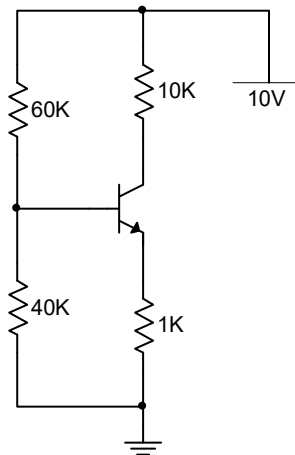
Resposta: $Z_O = 5\Omega$.

6. A impedância de entrada $V_{BE} = 0,6V$, $V_T = 25mV$ e $\beta = 100$.



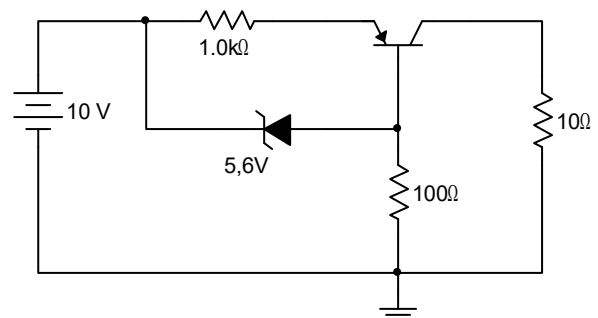
Resposta: $Z_i = 265,3\Omega$.

7. A impedância de saída.



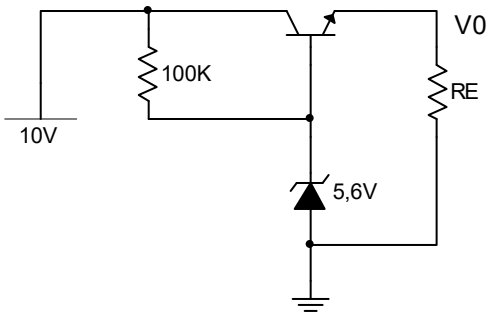
Resposta: $Z_O = 10K\Omega$.

8. A corrente I_E para $V_{EB} = 0,6V$ e $\beta_{MIN} = 50$.



Resposta: $I_E = 5mA$.

9. A tensão V_O $V_{BE} = 0,6V$ e $\beta_{MIN} = 50$.

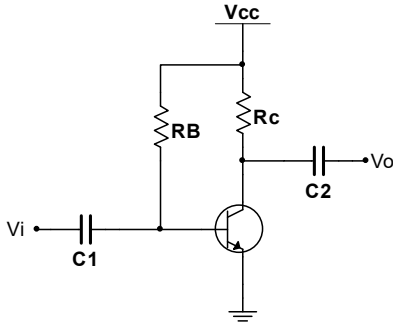


Resposta: $V_O = 5V$.

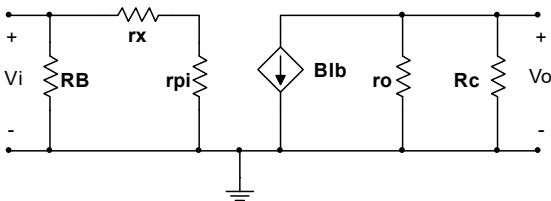
Lista de Exercícios resolvidos de polarização

I - Configuração emissor-comum com polarização fixa.

1. Circuito com polarização fixa:



Modelo equivalente para análise em CA.



a. Determinação impedância de entrada e saída Z_i e Z_o e o ganho A_v .

$$Z_i = R_B // (r_x + r_\pi), \text{ onde } r_\pi = \beta r_e \Rightarrow Z_i \cong R_B // \beta r_e \text{ (} \beta r_e \geq 10r_x \text{)}.$$

$$Z_o = R_C // r_o \text{ e como } r_o \geq 10R_C \Rightarrow Z_o \cong R_C.$$

$$V_o = -i_c(R_C // r_o), V_i \cong V_\pi \text{ (} \beta r_e \geq 10r_x \text{)}, i_c = \beta I_B \text{ e } I_B = V_i / r_\pi \Rightarrow V_o = -\beta V_i / \beta r_e \cdot (R_C // r_o) = -(R_C // r_o) / r_e.$$

Exemplo: Para o circuito acima, calcular:

- a) O valor de r_e .
- b) Z_i e Z_o .
- c) A_v com $r_o = \infty$ e $50K\Omega$.

Dados: $V_{CC} = 12V$, $R_C = 3K\Omega$, $R_B = 470K\Omega$, $C_1 = C_2 = 10\mu F$ e $\beta = 100$

Em CC:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0,7}{470K\Omega} = 24,04\mu A$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = (101)(24,04\mu A) = 2,428mA$$

$$r_e = \frac{26mV}{I_E} = \frac{26mV}{2,428mA} = 10,71\Omega$$

b. As impedâncias de entrada e saída Z_i e Z_o , serão:

$$\beta r_e = (100)(10,71\Omega) = 1071\Omega, Z_i = R_B // \beta r_e =$$

$$Z_i = 470K\Omega // 1,07K\Omega \cong 1,07K\Omega \text{ e}$$

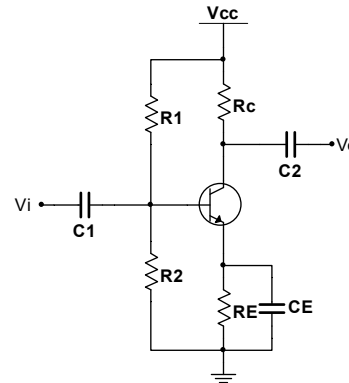
$$Z_o = R_C = 3K\Omega.$$

c. O ganho de tensão A_v , será:

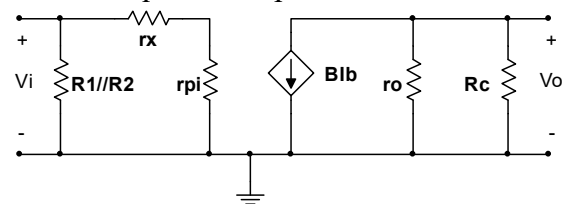
$$A_v = -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{3K\Omega}{1,07K\Omega} = -280,11 (r_o = \infty)$$

$$A_v = -\frac{R_C // r_o}{r_e} = -\frac{3K\Omega // 50K\Omega}{1,07K\Omega} = -264,24$$

2. Circuito: Polarização por divisor de tensão:



Modelo equivalente para análise em CA



a. Determinação impedância de entrada e saída Z_i e Z_o e o ganho A_v .

$$R_B = R_1 // R_2 \text{ e } Z_i = R_B // (r_x + r_\pi), \text{ onde } r_\pi = \beta r_e \Rightarrow Z_i \cong R_B // \beta r_e \text{ (} \beta r_e \geq 10r_x \text{)}.$$

$$Z_o = R_C // r_o \text{ e como } r_o \geq 10R_C \Rightarrow Z_o \cong R_C.$$

$$V_o = -i_c(R_C // r_o), V_i \cong V_\pi \text{ (} \beta r_e \geq 10r_x \text{)}, i_c = \beta I_B \text{ e } I_B = V_i / r_\pi \Rightarrow V_o = -\beta V_i / \beta r_e \cdot (R_C // r_o) = -(R_C // r_o) / r_e.$$

Exemplo: Para o circuito acima, calcular:

- a) O valor de r_e .

b) Z_i e Z_o .

c) A_v com $r_o = \infty$ e $50K\Omega$.

Dados: $V_{CC} = 22V$, $R_C = 6,8K\Omega$, $R_1 = 56K\Omega$, $R_2 = 8,2K\Omega$, $R_E = 1,5K\Omega$, $C_E = 20\mu F$, $C_1 = C_2 = 10\mu F$ e $\beta = 90$.

Em CC:

Condição: $\beta R_E > 10R_2 \Rightarrow (90)(1,5K\Omega) > 10(8,2K\Omega) \therefore 135K\Omega > 82K\Omega$ (Condição satisfeita)
A tensão V_B (base do transistor à terra)

$$V_B = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 22 \frac{8,2K\Omega}{8,2K\Omega + 56K\Omega} = 2,81V$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2,81V - 0,7V = 2,11V$$

A corrente de emissor, será:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{2,11V}{1,5K\Omega} = 1,41mA$$

$$r_e = \frac{26mV}{I_E} = \frac{26mV}{1,41mA} = 18,44\Omega$$

$$R_B = R_1 // R_2 = 56K\Omega // 8,2K\Omega = 7,15K\Omega \Rightarrow$$

$$Z_i = R_B // \beta r_e = 7,15K\Omega // (90)(18,44\Omega)$$

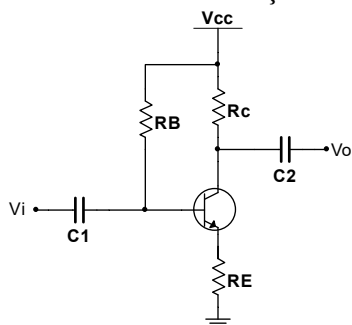
$$Z_i = 7,15K\Omega // 1,66K\Omega = 1,35K\Omega.$$

$$Z_o = R_C = 6,8K\Omega.$$

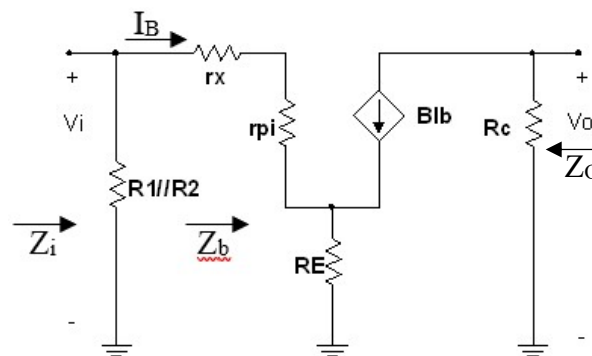
$$A_v = -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{6,8K\Omega}{0,1844K\Omega} = -368,76$$

$$A_v = -\frac{R_C // r_o}{r_e} = -\frac{6,8K\Omega // 50K\Omega}{0,1844K\Omega} = -324,3$$

3. Circuito: Polarização com resistor de emissor



Modelo equivalente para análise em CA



As leis de Kirchoff das tensões ficam:

$$V_i = I_B(r_x + r_\pi) + I_E.R_E, V_i = I_B.\beta r_e + (\beta+1)I_B.R_E \Rightarrow$$

$$Z_b = V_i/I_B = \beta r_e + (\beta+1)R_E \text{ e } Z_b \cong \beta(r_e + R_E) \cong \beta R_E$$

$$Z_i = R_B // Z_b = R_B // \beta R_E \text{ e } Z_o = R_C.$$

$$A_v = -R_C / (r_e + R_E).$$

Exemplo: Para o circuito acima, calcular:

a) O valor de r_e .

b) Z_i e Z_o .

c) A_v com $r_o = \infty$.

Dados: $V_{CC} = 20V$, $R_C = 2,2K\Omega$, $R_B = 470K\Omega$, $R_E = 0,56K\Omega$, $C_1 = C_2 = 10\mu F$ e $\beta = 120$.

Em CC:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{20V - 0,7V}{470K\Omega} = 35,89\mu A \Rightarrow$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = (120)(35,89\mu A) = 4,34mA$$

$$r_e = \frac{26mV}{I_E} = \frac{26mV}{4,34mA} = 5,99\Omega$$

b. $Z_b = \beta(r_e + R_E) = 120(5,99\Omega + 560\Omega) = 67,92K\Omega$ e

$$Z_i = R_B // Z_b = 470K\Omega // 67,92K\Omega = 59,34K\Omega.$$

$$Z_o = R_C = 2,2K\Omega.$$

c) $A_v = -R_C / (r_e + R_E) = -2,2K\Omega / (5,99\Omega + 560\Omega) \cong A_v = -3,89$.

Repita o exemplo anterior com $C_E = 20\mu F$.

Em CC:

a. $r_e = 5,99\Omega$ (não muda).

b. $Z_i = R_B // Z_b$ e $Z_b = \beta r_e$ ($R_E = 0$ curto-circuito em CA) = $470K\Omega // (120)(5,99\Omega) = 717,70\Omega$.

$$Z_o = R_C = 2,2K\Omega.$$

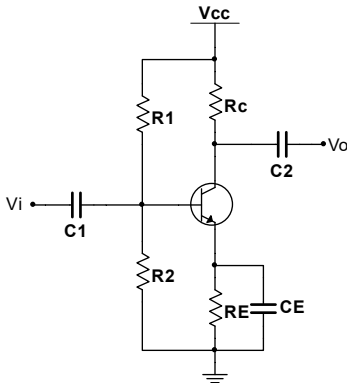
c. $A_v = -R_C / r_e = -2,2K\Omega / 5,99\Omega = -367,28$

Obs.: Um aumento no ganho muito significativo.

Exemplo: Para o circuito acima, calcular:

- a) O valor de r_e .
- b) Z_i e Z_o .
- c) A_V com $r_o = \infty$ e $50K\Omega$.

Dados: $V_{CC} = 16V$, $R_C = 6,8K\Omega$, $R_1 = 90K\Omega$, $R_2 = 10K\Omega$, $R_E = 0,68K\Omega$, $C_E = 20\mu F$, $C_1 = C_2 = 10\mu F$ e $\beta = 210$.



Em CC:

$$V_B = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 16 \frac{10K\Omega}{10K\Omega + 90K\Omega} = 1,6V$$

$$I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} = \frac{1,6V - 0,7V}{0,68K} = 1,324mA$$

$$r_e = \frac{26mV}{I_E} = \frac{26mV}{1,324mA} = 19,64\Omega$$

b. $Z_i = R_B // Z_b$ e $Z_b = \beta(r_e + R_E)$

$$Z_b = (210)(19,64\Omega + 0,68K\Omega)$$

$$Z_b = 146,92K\Omega \text{ e } Z_i = 10K\Omega // 90K\Omega // 146,92K\Omega$$

$$Z_i = 8,48K\Omega$$

$$Z_o = R_C = 2,2K\Omega$$

c. $A_V = -R_C / (r_e + R_E) = -2,2K\Omega / (19,64\Omega + 680\Omega)$
 $= A_V = -3,14$

Com C_E , temos:

a. $r_e = 19,64\Omega$ (não muda)

b. $Z_b = \beta r_e = (210)(19,64\Omega) = 4,12K\Omega$ e

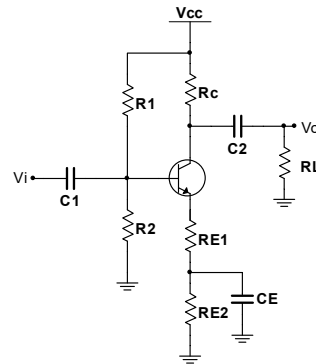
$$Z_i = R_B // Z_b \quad Z_i = (9K\Omega) // (4,12K\Omega) = 2,83K\Omega \text{ e}$$

$$Z_o = 2,2K\Omega$$

c. $A_V = -R_C / r_e = -2,2K\Omega / 19,64\Omega = -112,02$.

Obs.: Um aumento significativo no ganho.

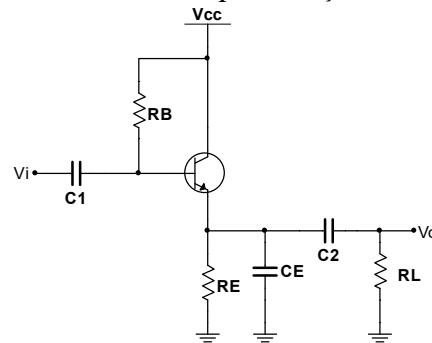
Alternativa para aumento do ganho e da impedância de entrada do circuito.



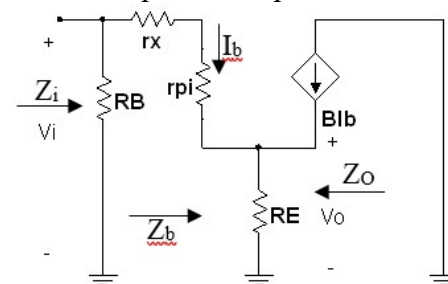
II - Configuração seguidor de emissor ou coletor comum.

Esta configuração apresenta uma alta impedância de entrada e uma baixíssima impedância de saída sendo o ganho de tensão unitário. É muito utilizada como um “drive” por apresentar um alto ganho de corrente. O sinal de saída estará em fase com o sinal de entrada.

1. Circuito com polarização fixa



Modelo equivalente para análise em CA



As leis de Kirchoff das tensões ficam:

$$V_i = I_B(r_x + r_\pi) + I_E \cdot R_E, \quad V_i = I_B \cdot \beta r_e + (\beta + 1) I_B \cdot R_E \Rightarrow$$

$$Z_b = V_i / I_B = \beta r_e + (\beta + 1) R_E \text{ e } Z_b \cong \beta(r_e + R_E) \cong \beta R_E$$

$$Z_i = R_B // Z_b = R_B // \beta R_E$$

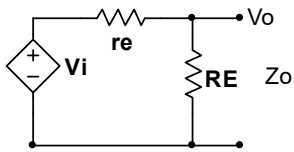
Para encontrar Z_o , determinar a corrente de emissor.

$$\text{A corrente de base } I_b = V_i / Z_b \text{ e } Z_b = \beta r_e + (\beta + 1) R_E$$

$$\text{e } I_E = (\beta + 1) I_b \Rightarrow I_E = (\beta + 1) V_i / Z_b$$

$$I_E = \frac{(\beta + 1)V_i}{\beta r_e + (\beta + 1)R_E} = \frac{V_i}{\frac{\beta r_e}{(\beta + 1)} + R_E} = \frac{V_i}{r_e + R_E}$$

A impedância de saída Z_O , será:



$$Z_O = R_E // r_e \cong r_e \quad (R_E > 10r_e)$$

O ganho $A_V = V_O / V_i$ e do circuito:

$$V_O = V_i R_E / (R_E + r_e) \cong 1 \quad (R_E \gg r_e)$$

Exemplo: Para o circuito acima, calcular:

- O valor de r_e .
- Z_i e Z_O .
- A_V

Dados: $V_{CC} = 12V$, $R_B = 220K\Omega$, $R_E = 3,3K\Omega$, $C_1 = C_2 = 10\mu F$ e $\beta = 100$.

a. A corrente

$$I_b = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{12 - 0,7}{220K\Omega + (101)3,3K\Omega} = 20,42\mu A$$

$$I_E = (\beta + 1)I_b = (101)(20,42\mu A) = 2,062mA$$

$$r_e = \frac{26mV}{2,062mA} = 12,61\Omega$$

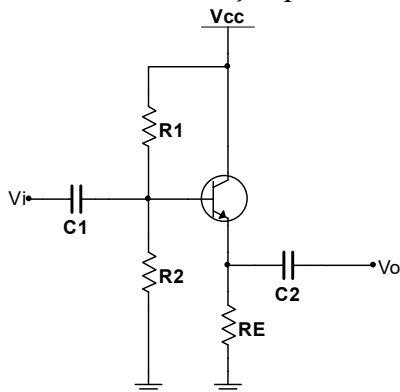
$$b. Z_b = \beta r_e + (\beta + 1)R_E = (100)(12,61\Omega) + (101)(3,3K\Omega) = 333,3K\Omega$$

$$Z_i = R_B // Z_b = 220K\Omega // 333,3K\Omega = 132,72K\Omega \text{ e } Z_O$$

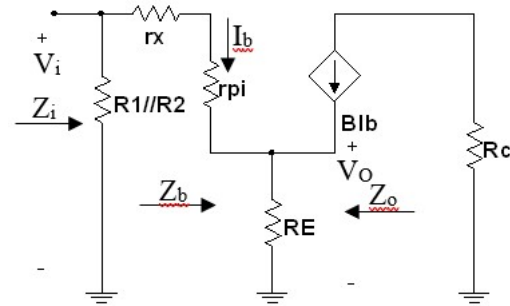
$$= R_E // r_e = 3,3K\Omega // 12,61\Omega = 12,56\Omega$$

$$A_V = R_E / (r_e + R_E) = 3,3K\Omega / (3,3K\Omega + 12,61\Omega) = 0,996 \cong 1$$

Circuito: Polarização por divisor de tensão



Modelo equivalente para análise em CA.

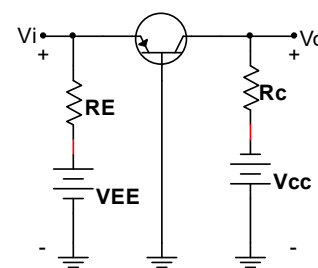


$$Z_b = \beta r_e + (\beta + 1)R_E \text{ e } R_B = R_1 // R_2 \text{ e } Z_i = R_B // Z_b \text{ e } Z_O = R_E // r_e$$

$$\text{O ganho } A_V \text{ será: } A_V = R_E / (R_E + r_e)$$

III - Configuração base comum.

Circuito: Base comum



A impedância $Z_i = R_E // r_e$ e $Z_O = R_C$

O ganho de tensão $A_V = V_O / V_i \Rightarrow I_E = V_i / (R_E // r_e)$

e $V_O = \alpha I_E R_C = \alpha V_i R_C / (R_E // r_e)$

$$A_V = \alpha R_C / (R_E // r_e) \text{ como } R_E \gg r_e \Rightarrow A_V = \alpha R_C / r_e \cong A_V = R_C / r_e$$

Exemplo: Para o circuito acima, calcular:

- O valor de r_e .
- Z_i e Z_O .
- A_V

Dados: $V_{CC} = 2V$, $V_{EE} = 8V$, $R_C = 5,0K\Omega$, $R_E = 1,0K\Omega$, $C_1 = C_2 = 10\mu F$ e $\alpha = 0,98$.

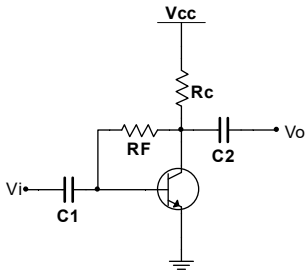
$$a. \text{ Corrente } I_E = \frac{V_{EE} - V_{EB}}{R_E} = \frac{2V - 0,7V}{1K\Omega} = 1,3mA$$

$$r_e = \frac{26mV}{I_E} = \frac{26mV}{1,3mA} = 20\Omega$$

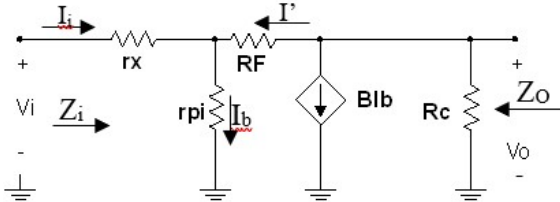
$$b. Z_i = R_E // r_e = 1K\Omega // 20\Omega = 19,61\Omega \text{ e } Z_O = R_C = 5K\Omega$$

$$c. A_V = R_C / r_e = 5K\Omega / 20\Omega = 250$$

IV - Configuração realimentação do coletor

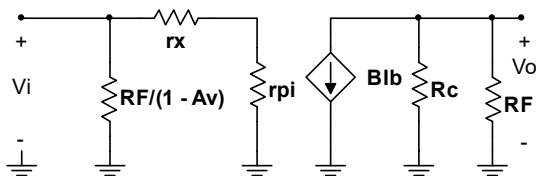


Modelo equivalente para análise em CA



Determinando Zi usando o teorema de Miller para o resistor de realimentação de coletor RF, temos:

$R' = R_F / (1 - A_V)$ e assim, fica:



$$Z_i = \beta r_e // R_F / (1 - A_V)$$

Determinando ZO e usando o teorema de Miller para o resistor de realimentação de coletor RF, temos:

$$Z_O = R_C // R_F \text{ e } (R_F \gg R_C) \Rightarrow Z_O = R_C$$

$$A_V = - R_C / r_e$$

Exemplo: Para o circuito acima, calcular:

- a) O valor de r_e .
- b) Z_i e Z_O .
- c) A_V

Dados: $V_{CC} = 9V$, $R_C = 2,7K\Omega$, $R_F = 180K\Omega$, $C_1 = C_2 = 10\mu F$ e $\beta = 200$ e $r_O = \infty$.

a)

$$V_{CC} = R_F \frac{I_E}{\beta + 1} + R_C I_E + V_{BE} \Rightarrow$$

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \frac{R_F}{\beta + 1}} = \frac{9V - 0,7V}{2,7K\Omega + \frac{180K\Omega}{201}}$$

$$I_E = 2,3mA \Rightarrow r_e = \frac{26mV}{I_E} = \frac{26mV}{2,3mA} = 11,3\Omega$$

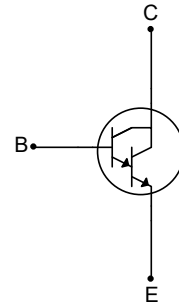
$$A_V = - \frac{R_C}{r_e} = - \frac{2,7K\Omega}{11,3\Omega} = -239$$

$$Z_i = \beta r_e // \frac{R_F}{(1 - A_V)} = (200)(11,3\Omega) // \frac{180K\Omega}{(1 - (-239))} = 563\Omega$$

$$Z_O = R_C // R_F = 2,7K\Omega // 180K\Omega = 2,66K\Omega$$

CONFIGURAÇÃO DARLINGTON

A configuração conhecida de dois transistores bipolares de junção opera como um transistor com um fator de amplificação β muito alto. A figura a seguir mostra a configuração Darlington.



Pode-se calcular a relação de corrente I_{E2}/I_{B1} :

$$I_{E1} = (\beta_1 + 1)I_{B1} \text{ e } I_{E2} = (\beta_2 + 1)I_{B2} \Rightarrow$$

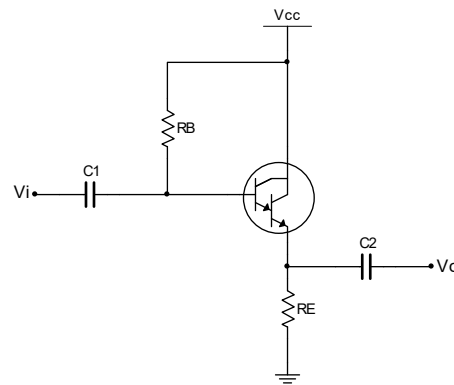
$$I_{E2} = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1)I_{B1}$$

$$\text{A relação } I_{E2}/I_{B1} = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1) = \beta_2\beta_1 + \beta_1 + \beta_2$$

$$\beta \cong \beta_1\beta_2$$

O circuito da figura a seguir mostramos uma ligação Darlington e as relações de correntes e tensões e ganho. Essa configuração foi apresentada em 1963 por Darlington S. do laboratório Bells.

Esta configuração serve para que o dispositivo seja capaz de proporcionar um grande ganho de corrente (h_{FE} ou parâmetro β do transistor). O ganho total do Darlington é produto do ganho dos transistores individuais.



A corrente de base pode ser calculada como:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE1} - V_{BE2}}{R_B + \beta_D R_E}$$

A tensão de coletor $V_C = V_{CC}$.

A tensão no emissor de Q2, será:

$$V_{E2} = R_E I_{E2}. \text{ A tensão } V_{B1} = V_{CC} - R_B I_{B1} =$$

$$V_{B1} = V_{E2} + V_{BE1} + V_{BE2}.$$

A tensão entre coletor e emissor de Q2, será:
 $V_{CE2} = V_{CC} - V_{E2}$.

EXEMPLO: Calcular as tensões de polarização CC e as correntes para a configuração Darlington da figura acima onde $V_{CC} = 18V$, $V_{BE} = 0,7V$, $R_E = 390\Omega$ e $R_B = 3,3M\Omega$ com $\beta_1 = 50$ e $\beta_2 = 100$.

O valor do β_D , será: $\beta_D = 50 \times 100 = 5.000$

$$A \text{ corrente } I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE1} - V_{BE2}}{R_B + \beta_D R_E}$$

$$I_B = \frac{18 - 0,7 - 0,7}{3,3 \times 10^3 + 5000 \times 390} = \frac{16,6V}{5,25M\Omega} = 3,16\mu A.$$

A corrente $I_{E2} \cong I_{C2} = \beta_D \cdot I_{B1} \Rightarrow 5000 \cdot 3,16 \times 10^{-6} = 15,80mA$

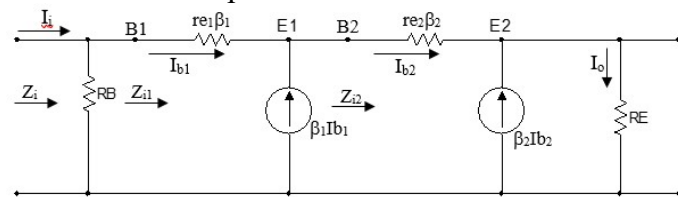
A tensão $V_{E2} = I_{E2} \cdot R_E = 15,80mA \times 390\Omega = 6,16V$.

A tensão $V_{CE2} = V_{CC} - V_{E2} = 18V - 6,16V = 11,84V$

Calcular para o exercício acima a:

- a) Impedância de entrada
- b) Ganho de corrente
- c) Ganho de tensão
- d) Impedância de saída

A partir do modelo equivalente do circuito é retirado todos os parâmetros acima.



Então iniciando por Z_{i2} , temos:

$$Z_{i2} = re_2\beta_2 + \beta_2 R_E = \beta_2(re_2 + R_E)$$

Então Z_{i1} , será:

$$Z_{i1} = re_1\beta_1 + \beta_1 Z_{i2} = \beta_1(re_1 + Z_{i2}) = \beta_1(re_1 + \beta_2(re_2 + R_E))$$

Como $R_E \gg re_2 \Rightarrow Z_{i1} = \beta_1(re_1 + \beta_2 R_E)$ e $\beta_2 R_E \gg re_1 \Rightarrow Z_{i1} \cong \beta_1 \beta_2 R_E$

A impedância Z_i de entrada será:

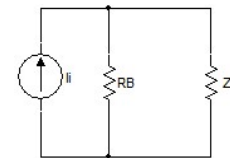
$$Z_i = R_B // Z_{i1} = R_B // \beta_1 \beta_2 R_E, \text{ sendo } \beta_D = \beta_1 \beta_2 \Rightarrow Z_i = R_B // \beta_D R_E$$

a) Do problema $Z_i = 3,3M\Omega // 5.000 \times 390\Omega = 1,38M\Omega$.

O ganho de corrente A_i , será:

Do modelo acima, podemos escrever que:

$$I_0 = I_{b2} + \beta_2 I_{b2}, I_0 = I_{b2}(\beta_2 + 1) \text{ e } I_{b2} = I_{b1} + \beta_1 I_{b1} = I_{b1}(\beta_1 + 1) \Rightarrow I_0 = I_{b1}(\beta_1 + 1)(\beta_2 + 1).$$



$$I_{b1} = I_i \frac{R_B}{R_B + Z_i} = I_i \frac{R_B}{R_B + \beta_D R_E}$$

$$I_0 = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1)I_{b1} = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1) \left(\frac{R_B}{R_B + \beta_D R_E} \right) I_i$$

$$\frac{I_0}{I_i} = A_i \cong \frac{\beta_1 \beta_2 R_B}{R_B + \beta_1 \beta_2 R_E} = \frac{\beta_D R_B}{R_B + \beta_D R_E}$$

Do problema temos:

$$b) A_i = \frac{5.000 \times 3,3M\Omega}{3,3M\Omega + 5.000 \times 390\Omega} = 3,14 \times 10^3$$

O ganho de tensão A_v será:

c) $A_v \cong 1$

d) Impedância de saída Z_o

$$Z_o = \frac{re_1}{\beta_2} + re_2 \text{ e } re_1 = \frac{26mV}{I_{E1}}$$

$$\therefore I_{E1} = I_{b2} = \frac{I_{E2}}{\beta_2} = \frac{15,80mA}{100} = 0,158mA$$

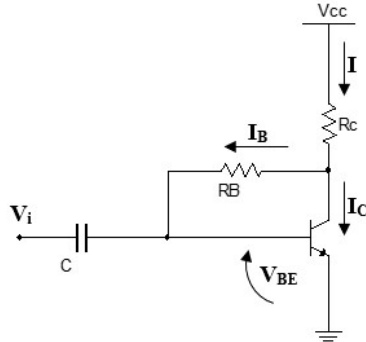
$$re_1 = \frac{26mV}{0,158mA} = 164,5\Omega$$

$$re_2 = \frac{26mV}{I_{E2}} = \frac{26mV}{15,80mA} = 1,65\Omega$$

$$Z_o = \frac{164,5}{100} \Omega + 1,65\Omega \cong 3,3\Omega$$

CONFIGURAÇÃO ACOPLAMENTO PELO EMISSOR

A realimentação pelo coletor é menos sensível à variação do ganho. A figura a seguir mostra a variação do β pela corrente I_C do circuito a seguir.



A corrente $I = I_C + I_B$ e $I_B = (V_{CC} - V_{BE} - R_C I) / R_B$

$$R_B I_B + R_C (\beta + 1) I_B = V_{CC} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_C (\beta + 1)} \text{ e } I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \frac{R_B}{(\beta + 1)}}$$

Fazendo $V_{CC} = 15V$, $R_C = 1K$ e $R_B = 200K$, calcular I_C para:

- a) $\beta = 100 \Rightarrow I_C = 4,77mA$
- b) $\beta = 300 \Rightarrow I_C = 8,58mA$

EXERCÍCIO: Para o circuito com realimentação pelo coletor são dados: $\beta = 100$, $V_{BE} = 0,6V$, $V_{CC} = 12V$, $R_B = 150K$ e $R_C = 1K$, pede-se:

- a) O valor da corrente de base e de coletor.
- b) A tensão V_{CE} .

Resposta: 0,045mA, 5,58mA e 7,37V

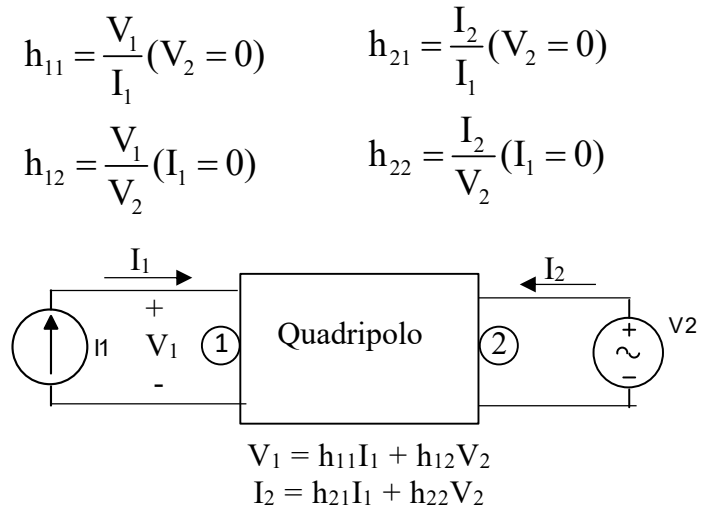
PARÂMETROS DE QUADRIPOLOS

TIPO H

A caracterização híbrida da rede de dois acessos é baseada na excitação da rede por I_1 e V_2 , conforme a figura a seguir. As descrições das equações são:

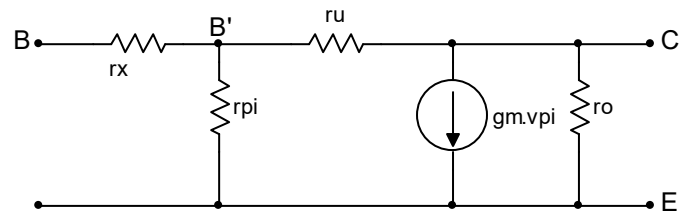
$$V_1 = h_{11} I_1 + h_{12} V_2$$

$$I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} V_2$$



- h_{11} – Impedância de entrada no acesso 1 com acesso 2 curto-circuitado;
- h_{12} – Razão da tensão reversa de entrada em aberto;
- h_{21} – Ganho de corrente da rede com acesso 2 em curto-circuito;
- h_{22} – Admitância de saída com acesso de entrada em circuito aberto.

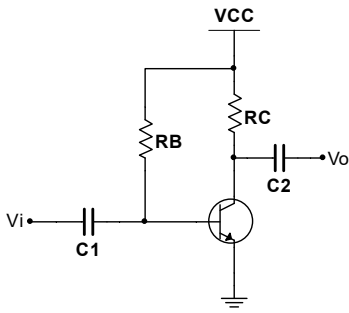
Exemplo: A figura a seguir mostra o modelo do circuito para pequenos sinais de um transistor. Calcule os parâmetros h, onde $r_x = 100\Omega$, $r_\pi = 2,5K\Omega$, $r_\mu = 10M,\Omega$ e $r_o = 100K\Omega$ e $g_m = 40mA/V$



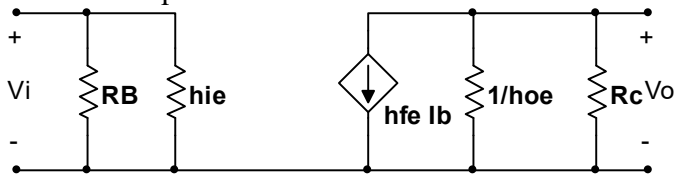
$$h_{11} = 2.5K + 0,1K = 2.6K \text{ e } h_{12} = 2.5 \times 10^3 / 10 \times 10^6 = 2.5 \cdot 10^{-4}, h_{21} = 40mA \times 2.5K = 100 \text{ e } h_{22} = 2 \times 10^{-5} S$$

MODELO EQUIVALENTE “MONTAGEM CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM”

O circuito a seguir mostra a configuração em emissor comum e o modelo a seguir do circuito híbrido CA.

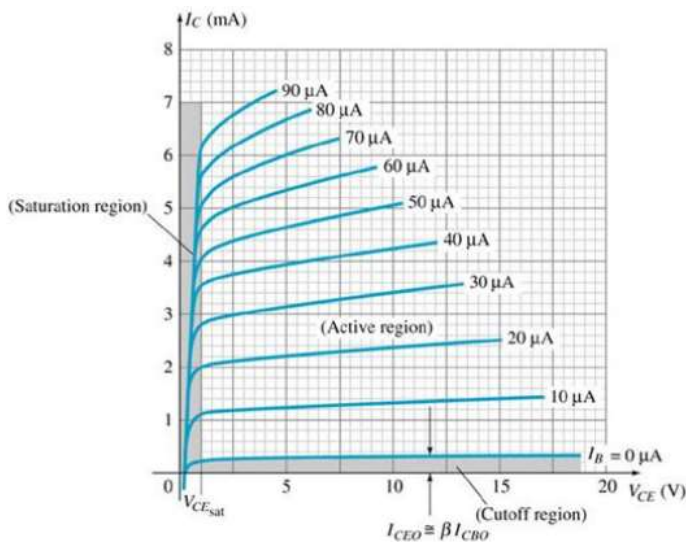


O modelo equivalente em CA



Onde $h_{ie} = \beta r_e$, $r_o = 1/h_{oe}$ e $\beta = h_{fe}$.

Retirando os parâmetros híbridos das curvas características do TJB.

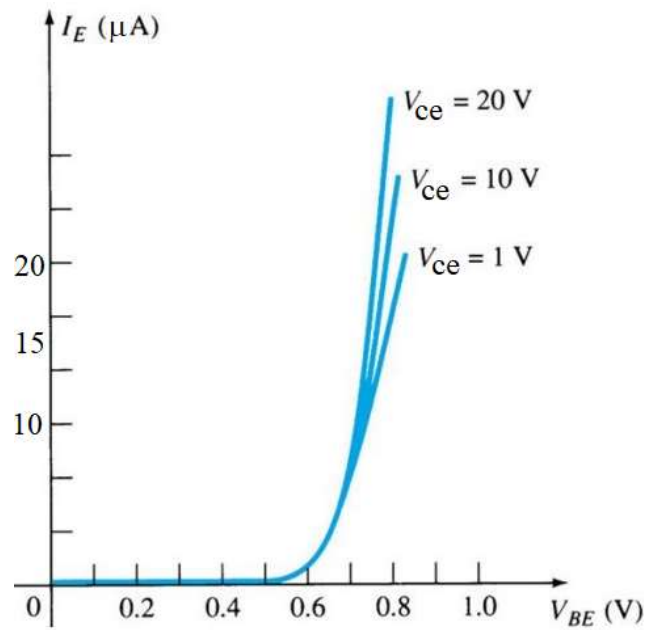


1. Pode-se do gráfico retirar o valor de h_{fe}

$$h_{fe} = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \Big|_{V_{CE}=cte} = \frac{(2,7 - 1,7) \times 10^{-3}}{(20 - 10) \times 10^{-4}} \Big|_{V_{CE}=8,4V} = 100$$

2. Pode-se do gráfico retirar o valor de h_{oe}

$$h_{oe} = \frac{\Delta i_C}{\Delta V_{CE}} \Big|_{i_B=cte} = \frac{(2,2 - 2,1) \times 10^{-3}}{10 - 7} \Big|_{i_B=15\mu A} = 33 \mu S$$



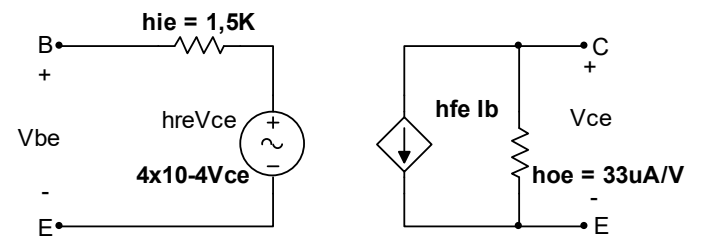
3. Pode-se do gráfico retirar o valor de h_{ie}

$$h_{ie} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta i_B} \Big|_{V_{CE}=cte} = \frac{(733 - 718) \times 10^{-3}}{(20 - 10) \times 10^{-6}} \Big|_{V_{CE}=8,4V} = 1,5K\Omega$$

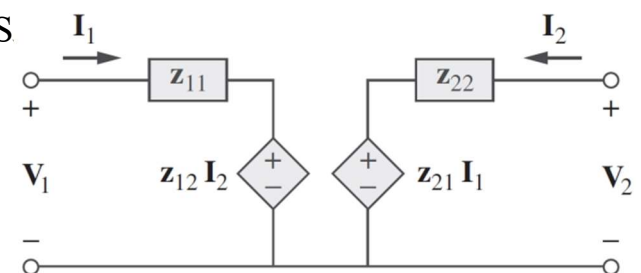
4. Pode-se do gráfico retirar o valor de h_{re}

$$h_{re} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \Big|_{i_B=cte} = \frac{(733 - 725)}{20 - 0} \Big|_{i_B=15\mu A} = 4 \times 10^{-4}$$

Circuito equivalente híbrido modelo completo para transistor configuração emissor comum,



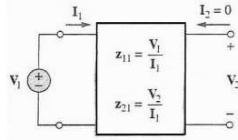
Parâmetros tipo Z de impedâncias



Parâmetros de Impedância (z)

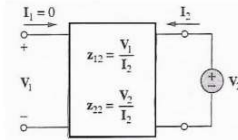
$$z_{11} = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{I_2=0}$$

$$z_{21} = \frac{V_2}{I_1} \Big|_{I_2=0}$$

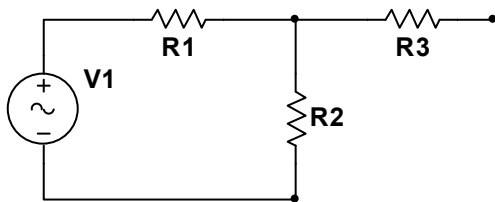
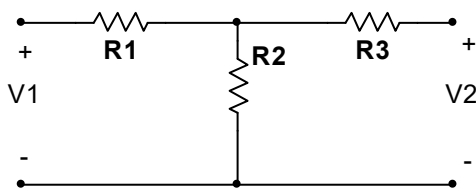


$$z_{12} = \frac{V_1}{I_2} \Big|_{I_1=0}$$

$$z_{22} = \frac{V_2}{I_2} \Big|_{I_1=0}$$

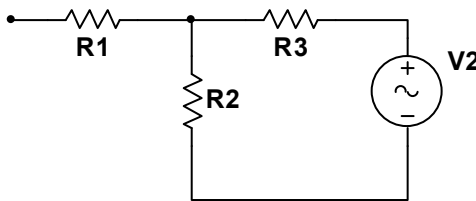


Exemplo: Para o quadripolo a seguir, pede-se calcular os parâmetros (z), sendo dados: $R_1 = R_2 = 2\Omega$ e $R_3 = 4\Omega$.



$$Z_{11} = V_1/I_1 \Rightarrow I_1 = V_1/4 \text{ e } Z_{11} = V_1/V_1/4\Omega = 4\Omega.$$

$$Z_{21} = V_2/I_1 \Rightarrow I_1 = V_2/2 = Z_{21} = V_2/V_2/2 = 2\Omega.$$



$$Z_{12} = V_1/I_2 \Rightarrow V_1 = 2I_2 \text{ e } Z_{12} = 2I_2/I_2 = 2\Omega.$$

$$Z_{22} = V_2/I_2 \Rightarrow I_2 = V_2/6 \text{ e } Z_{22} = V_2/V_2/6 = 6\Omega.$$

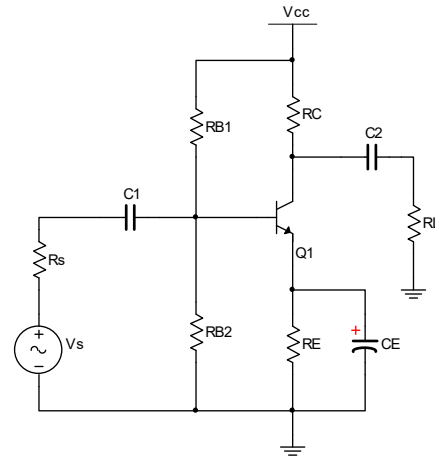
Resposta: $Z_{11} = 4\Omega$, $Z_{12} = 2\Omega$, $Z_{21} = 2\Omega$ e $Z_{22} = 6\Omega$.

AMPLIFICADOR DE PEQUENO SINAL

O circuito a seguir mostra um transistor bipolar cuja configuração é em emissor comum, polarização por divisor de tensão. Vamos fazer a análise da resposta

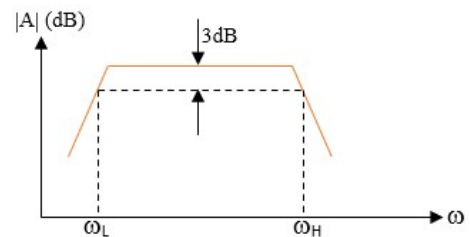
em frequência obedecendo as seguintes considerações.

1. Os capacitores de acoplamento C_1 e C_2 são curto-circuito para sinal AC;
2. A fonte de alimentação V_{cc} é um curto para sinal AC;
3. O capacitor C_E de emissor é um curto-circuito para sinal.



DEFINIÇÕES DE GANHO, CURVA DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO CIRCUITO RC E FREQUÊNCIA DE CORTE INFERIOR.

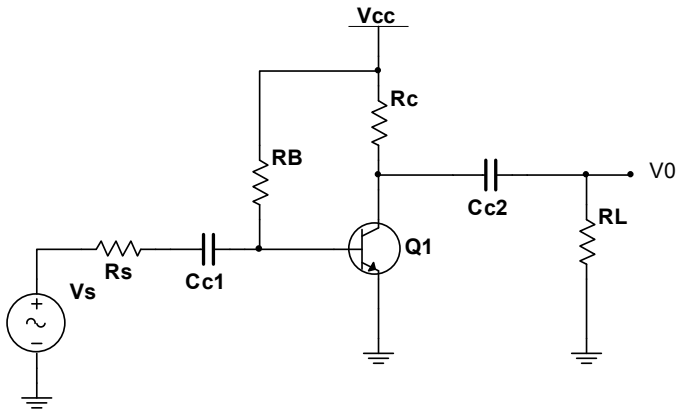
As três faixas de frequência da curva do amplificador ganho x frequência são descritas a seguir.



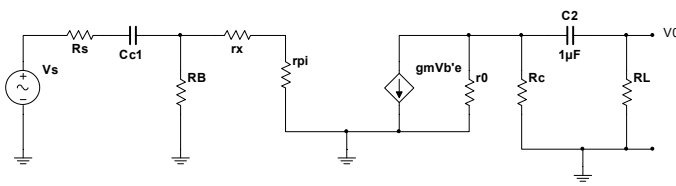
- Faixa de baixas frequências: Capacitores de acoplamento e passagem afetam o desempenho
- Faixa de médias frequências: Nenhuma capacitância afeta o desempenho
- Faixa de altas frequências: Capacitâncias internas do transistor afetam o desempenho

A Resposta em Baixas Frequências

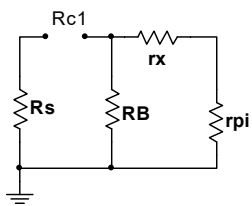
A seguir para estudo da resposta em frequência do amplificador de pequenos sinais a TJB, o circuito amplificador de tensão montagem em emissor comum com capacitores de acoplamentos C_{C1} e C_{C2} onde em baixas frequências C_{C1} e C_{C2} seus efeitos não interagem entre si.



O modelo π -híbrido do circuito amplificador é apresentado a seguir.



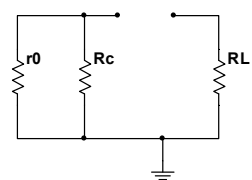
1. Para C_{C1}



$$R_{C2} = R_S + R_B // (r_x + r_\pi)$$

$$\omega_{C2} = \frac{1}{C_{C2} R_{C2}}, f_{C2} = \frac{1}{2\pi R_{C2} C_{C2}}$$

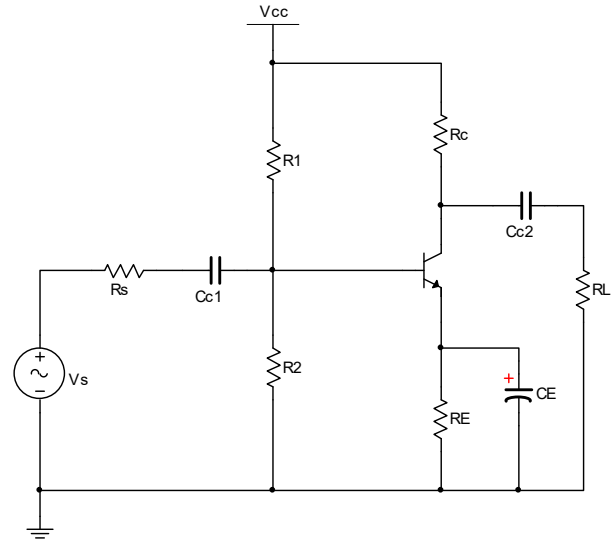
2. Para C_{C2}



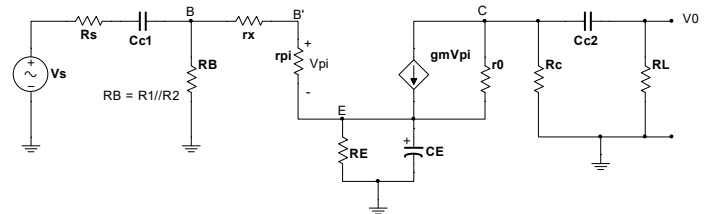
$$R_{C2} = R_L + (R_C // r_o)$$

$$\omega_{C2} = \frac{1}{C_{C2} R_{C2}}, f_{C2} = \frac{1}{2\pi R_{C2} C_{C2}}$$

A seguir para estudo da resposta em frequência do amplificador de pequenos sinais a TJB, o circuito divisor de tensão com capacitores de acoplamentos C_{C1} e C_{C2} e de passagem C_E onde em baixas frequências a impedância de entrada do amplificador inclui o efeito de C_E e portanto, C_{C1} e C_E seus efeitos interagem entre si. Temos que considerar os efeitos deles na resposta em baixas frequências e no cálculo da frequência de corte inferior.



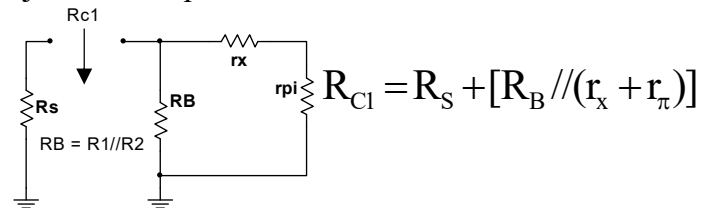
O circuito equivalente para o amplificador divisor de tensão na faixa de baixa frequência fica:



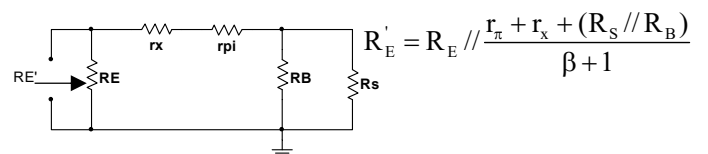
Determinação de ω_L – Método das constantes de tempo de curto-circuito para obter uma estimativa da frequência de corte inferior a 3 dB, ω_L .

Procedimento:

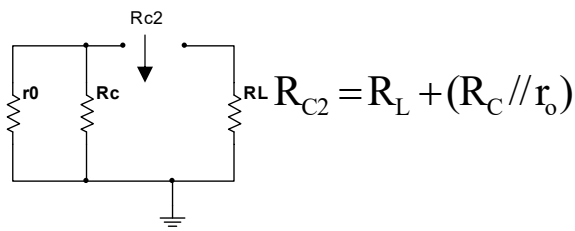
1. Ajustamos V_S para zero. Então ajustamos C_E e C_{C2} para infinito e determina-se a resistência R_{C1} vista por C_{C1} . Observando o modelo equivalente e ajustando C_E para infinito, teremos:



2. Ajustamos C_{C1} e C_{C2} para infinito e determina-se a resistência R'_E vista por C_E . Considerar a reflexão das resistências do circuito de base para o circuito de emissor.



3. Ajustamos C_{C1} e C_E para infinito e termina-se a resistência R_{C2} vista por C_{C2} .



Um valor aproximado para ω_L é dado a seguir:

$$\omega_L = \frac{1}{R_{C1}C_{C1}} + \frac{1}{R'_E C_E} + \frac{1}{R_{C2}C_{C2}}$$

O zero introduzido por C_E corresponde ao valor de s que faz com que $Z_E = 1/(R_E + sC_E)$ seja infinito.

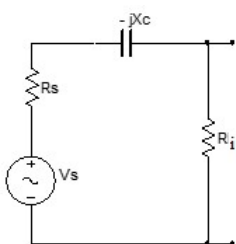
$$s_Z = \frac{1}{C_E R_E}$$

Obs.: A resistência R'_E é a menor entre as três resistências R_{C1} e R_{C2} e portanto, deve ser o polo dominante de baixa frequência e a sua contribuição é cerca de 80% de ω_L .

Receita prática

Fazer C_E , tal que $(1/R'_E C_E)$ seja o polo dominante em baixa frequência e igual a $0,8\omega_L$ e os outros dois capacitores C_{C1} e C_{C2} os 20% restantes e divididos igualmente para cada um deles.

a) Frequência de corte A seguir apresentamos o circuito RC passa alta para a curva inicial do amplificador. Para frequências abaixo da frequência de corte o circuito atenua até a frequência onde o ganho é unitário. O modelo equivalente observando as considerações onde $R_B = R_{B1} // R_{B2}$ e $R_i = R_B // (r_x + r_\pi)$, a expressão do ganho x frequência de corte, temos:



Quando $f_c = f$, então:

$$\frac{V_b}{V_s} = \frac{K}{\sqrt{1^2 + (\frac{f_L}{f})^2}}, K = \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

Calculando em dB, temos:

$$20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = -3dB$$

Então na frequência de corte o ganho cai de 3dB ou de $\sqrt{2}$.

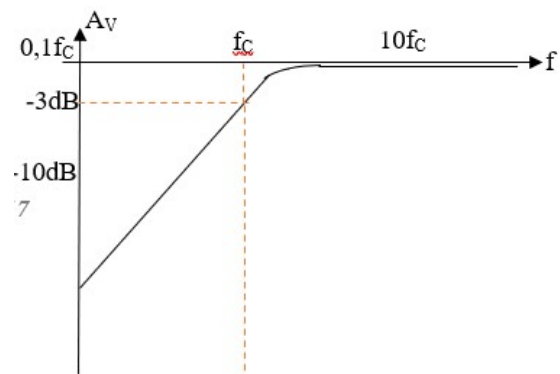
Chamando-se de $A_v = \frac{V_b}{V_s}$, o ganho de tensão, temos:

$$\frac{V_b}{V_s} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1^2 + (\frac{f_c}{f})^2}} = 20 \log [(1^2 + (\frac{f_c}{f})^2)]^{-1/2}$$

$$= -10 \log [1^2 + (\frac{f_c}{f})^2]$$

$A_v = -10 \log [1^2 + (f_c/f)^2]$, daí: Para f igual a:

- a) $f = 0,1f_c$ temos: $A_v = -10 \log [1 + 100] = -20dB$.
 - b) $f = f_c$ temos: $A_v = -10 \log [1 + 1] = -3dB$.
 - c) $f = 10f_c$ temos: $A_v = -10 \log [1 + 0,01] = 0dB$
- O gráfico de resposta em frequência do passa-alta, será:



A fase do circuito, será: $\varnothing = \arctg(f_c/f)$, então temos:

- a) $f = 0,1f_c$ temos: $\varnothing = \arctg(0,1) = 5,7^\circ$
- b) $f = f_c$ temos: $\varnothing = \arctg(1) = 45^\circ$
- c) $f = 10f_c$ temos: $\varnothing = \arctg(10) = 84,3^\circ$

O gráfico da fase do circuito, será:

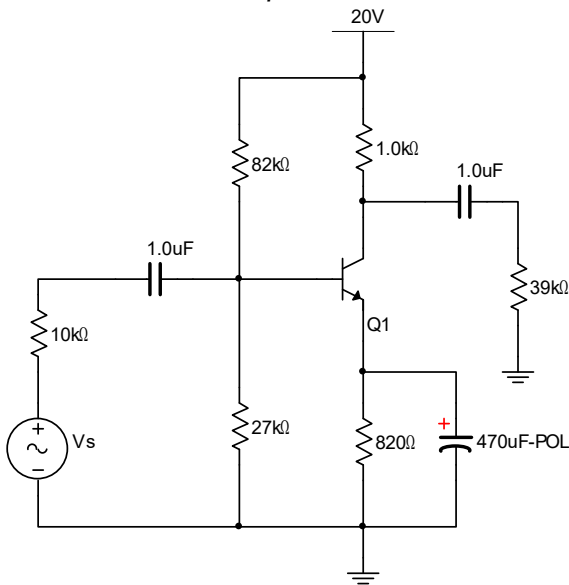
Obs.: A característica do circuito RC é de um filtro passa-alta onde o ganho é menor do que a unidade.

EXEMPLO: Para o circuito a seguir, pede-se:

- a) A impedância de entrada e saída
- b) A frequência de corte inferior

c) O ganho de tensão do circuito.

Dados: $V_{BE} = 0,7V$, $\beta = 100$ e $V_T = 26mV$.



$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi(R_s + R_B)C_1} = \frac{1}{2\pi(10K + 20K)10^{-6}} = 5,3Hz$$

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi(R_C + R_L)C_1} = \frac{1}{2\pi(1K + 40K)10^{-6}} = 3,9Hz$$

Entre f_{c1} e f_{c2} e f_{CE} é escolhida a maior frequência f_{c1} , pois:

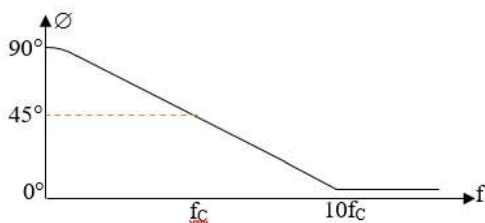
$$f_{CE} = \frac{1}{2\pi R_E C_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 820 \cdot 470 \cdot 10^{-6}} = 0,4Hz$$

O valor da transcondutância $g_m = 1/r_e$ e o valor de $r_e = 26mV/5mA \cong 5\Omega$ e $g_m = 0,2S$.

c) O ganho

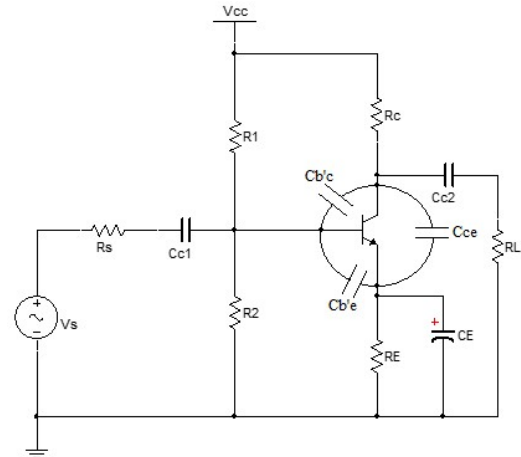
$$A_v = -\frac{R_B}{R_s + R_B} \cdot g_m \cdot R_C // R_L =$$

$$A_v = -\frac{20K}{30K} \cdot 0,2 \times 0,97K = -130$$



CURVA DA RESPOSTA DO AMPLIFICADOR DE PEQUENO SINAL NA FREQUÊNCIA DE CORTE SUPERIOR.

O circuito a seguir será analisado e através do modelo π -híbrido para altas frequências serão retirados os resistores equivalentes e capacitor de efeito Miller.



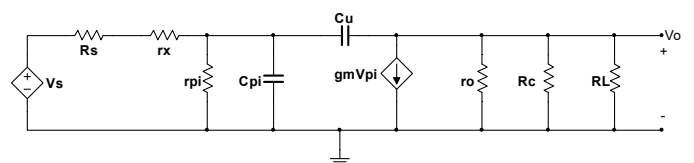
R_1 e R_2 – Divisor de tensão;

C_{C1} , C_{C2} e C_E – Acoplamento e passagem;

$C_{B'E}$, $C_{B'C}$ e C_{CE} – Capacitâncias internas do transistor.

Frequência de corte superior A seguir apresentamos o circuito passa baixa para a curva final do amplificador. Para frequências acima da frequência de corte, o circuito atenua até a frequência de ganho unitário. O modelo equivalente observando as considerações onde $R_B = R_{B1} // R_{B2}$, temos:

O modelo π -híbrido para análise do circuito em alta frequência.

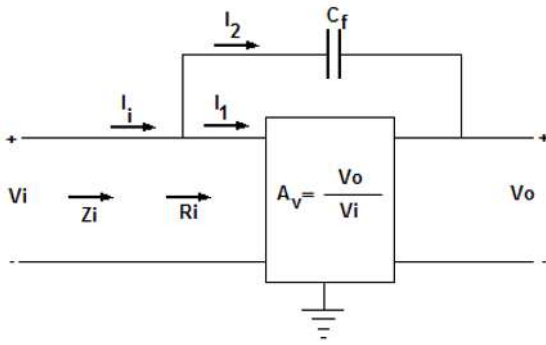


$$R'_s = (R_s // R_1 // R_2 + r_x) // r_{\pi} \text{ e } R'_L = r_o // R_C // R_L \text{ e } V'_s = V_s r_{\pi} / (R_s + r_x + r_{\pi})$$

TEOREMA DE MILLER

As capacitâncias parasitas, entre terminais, internas ao dispositivo e outras influenciam na resposta em alta frequência.

Estas capacitâncias se multiplicam quando aplicadas à amplificadores e a capacitância de realimentação $C_f = C_{B'C}$ é calculada, como:



Aplicando a lei de Kirchoff para a corrente resulta em:

$I_i = I_1 + I_2$, onde:

$$I_i = \frac{V_i}{Z_i} \quad \text{e} \quad I_1 = \frac{V_i}{R_i}$$

$$\text{e} \quad I_2 = \frac{V_i - V_o}{X_{Cf}} = \frac{V_i - A_v V_i}{X_{Cf}} = \frac{(1 - A_v) V_i}{X_{Cf}}$$

Substituindo obtém-se:

$$\frac{V_i}{Z_i} = \frac{V_i}{R_i} + \frac{(1 - A_v) V_i}{X_{Cf}}$$

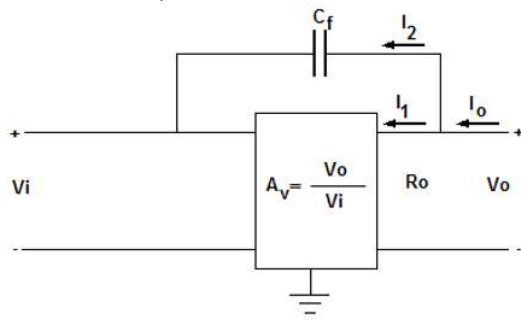
$$\frac{1}{Z_i} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{X_{Cf}/(1 - A_v)}$$

$$\text{Onde} \quad \frac{X_{Cf}}{1 - A_v} = \frac{1}{\omega \cdot (1 - A_v) C_f} = X_{CM}, \text{ onde}$$

$$C_T = (1 - A_v) \cdot C_f$$

$$\frac{1}{Z_i} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{X_{CT}}$$

Para a saída, temos $C_f = C_{CE}$:



Aplicando-se novamente a lei de Kirchoff, temos:

$$I_o = I_1 + I_2, \text{ como } I_1 = \frac{V_o}{R_o} \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{V_o - V_i}{X_{Cf}}$$

Como R_o é grande o suficiente, tal que:

$$I_o \cong \frac{V_o - V_i}{X_{Cf}} = V_i = \frac{V_o}{A_v}$$

$$I_o = \frac{V_o - V_o/A_v}{X_{Cf}} = \frac{V_o (1 - 1/A_v)}{X_{Cf}}$$

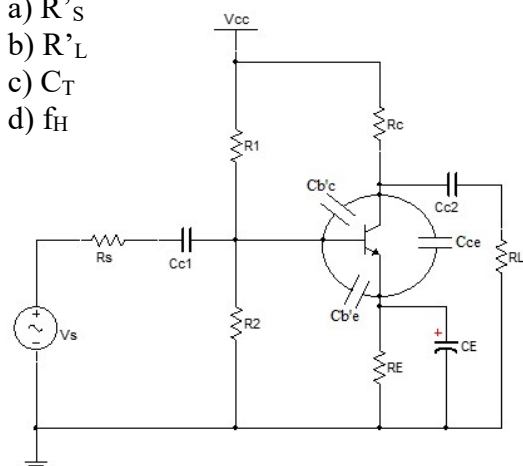
$$\frac{V_o}{I_o} = \frac{X_{Cf}}{1 - 1/A_v} = \frac{1}{\omega \cdot C_f (1 - 1/A_v)} =$$

$$\frac{1}{\omega \cdot C_M}, \text{ onde } C_M = C_f (1 - 1/A_v)$$

$$\text{Capacitância } C_T = C_M + C_{B'E} = C_{B'C} (1 - A_v) + C_{B'E}, \text{ onde } \omega_H = \frac{1}{C_T R'_S}$$

Exercício: Dados: $R_S = 4K\Omega$, $R_1 = 8K\Omega$, $R_2 = 4K\Omega$, $R_E = 3,3K\Omega$, $R_C = 6K\Omega$ e $V_{CC} = 12V$. A corrente $I_E = 1mA$, $\beta_0 = 100$, $C_\pi = 13,9 pF$, $C_\mu = 2pF$, $r_o = 100K\Omega$ e $r_X = 50\Omega$. Além disso, o ganho em frequências médias $A_M = -22,5V/V$. Pedese:

- R'_S
- R'_L
- C_T
- f_H



$$R'_s = [(R_s // R_1 // R_2) + r_x] // r_\pi$$

$$R'_s = [(4 // 8 // 4) + 0,05] // \frac{100}{40} = 1K$$

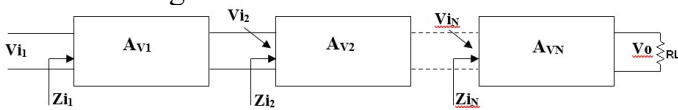
$$R'_L = R_C // r_o // R_L = 6 // 4 // 100 = 2,344K\Omega$$

$$C_T = C_\pi + C_\mu(1 - A_V), A_V = -g_m R'_L \Rightarrow C_T = 203,4pF$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi C_T R'_s} = \frac{1}{2\pi \cdot 203,4 \cdot 10^{-12} \cdot 2,344 \cdot 10^3} = 782KHz$$

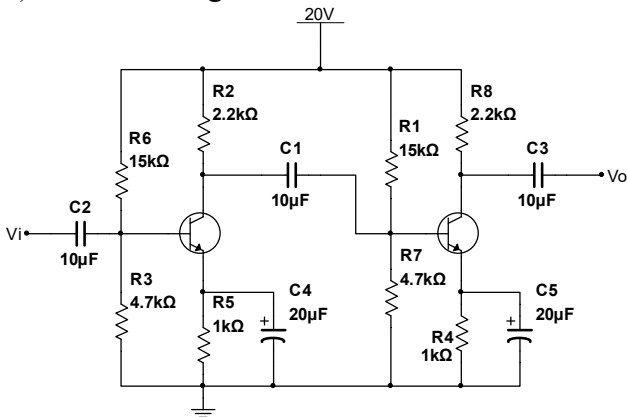
SISTEMA EM CASCATA

O sistema de duas portas é muito útil quando se trata de sistemas em cascata, conforme o diagrama de bloco a seguir.



Exemplo: Calcular o ganho de tensão sem/com carga e a tensão de saída dos amplificadores a seguir com acoplamentos RC e $\beta = 200$.

- a) A_{VT} , sem carga.
- b) A_{VT} , com carga de $10K\Omega$.



$$V_{B2} = V_{B1} = 20 \frac{4,7K}{4,7K + 15K} = 4,77V$$

$$R_B = 4,7K // 15K = 3,57K$$

$$I_E = \frac{4,77 - 0,7}{3,57K / 200 + 1K} = 3,97mA$$

$$r_e = \frac{26mV}{3,97mA} = 6,53\Omega$$

$$Z_{i2} = 4,7K // 15K / (200)(6,53) \Rightarrow$$

$$A_{Vi} = - \frac{R_C // Z_{i2}}{r_e}$$

O ganho pode ser calculado como:

$$A_{Vi} = - \frac{(2,2K) // (4,7K) // (15K) // (200)(6,53)}{6,53} = -102,3$$

$$A_{V2} = - R_C / r_e = 2,2K / 6,53 = - 338,46$$

O ganho total será: $A_{VT} = A_{V1} A_{V2}$
 $A_{VT} = (- 102,3)(-338,46) = 34,6 \times 10^3$
 $V_O = 25\mu V \times 34,6 \times 10^3 = 865mV$.

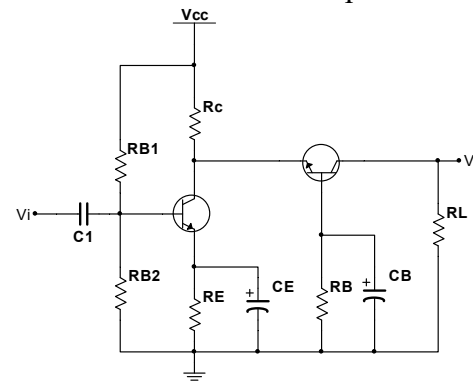
b) Com carga R_L

$$A_{VT} = 10K / (10K + 2,2K) \times A_{VT} = 28,36 \times 10^3$$

$$V_O = 25\mu V \times 28,36 \times 10^3 = 707,5mV$$

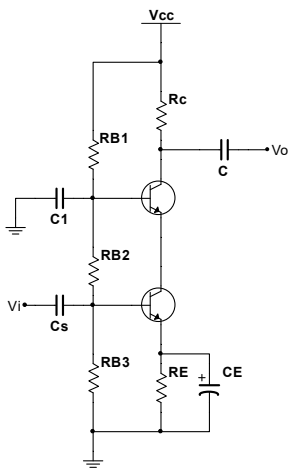
CONEXÃO CASCODE

A vantagem da conexão cascode é a alta impedância de entrada, ganho do primeiro estágio relativamente baixo e com a redução da capacitância de efeito Miller enquanto o estágio seguinte base comum oferece uma excelente resposta em frequência.



Exemplo: Calcular o ganho de tensão sem carga para o circuito a seguir.

Dados: $V_{CC} = 18V$, $R_C = 1,8K$, $R_{B1} = 6,8K$, $R_{B2} = 5,6K$, $R_{B3} = 4,7K$, $C_S = 5\mu F$, $C_1 = 10\mu F$, $C = 5\mu F$, $R_E = 1,1K$, $\beta = 200$ e $C_E = 20\mu F$.



$$V_{B2} = 18 \frac{5,6K + 4,7K}{5,6K + 4,7K + 6,8K} = 10,84V$$

$$V_{B1} = 18 \frac{4,7K}{5,6K + 4,7K + 6,8K} = 4,94V$$

$$I_E = \frac{4,94 - 0,7}{1,1K} = 3,85mA \Rightarrow I_C = 3,8mA.$$

O valor de r_e , será:

$$r_e = \frac{26mV}{3,83mA} = 6,8\Omega$$

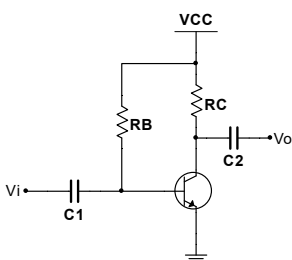
$$A_{V1} = -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{r_e}{r_e} = -1$$

$$A_{V2} = \frac{R_C}{r_e} = \frac{1,8K}{6,8} = 265$$

$$A_{VT} = A_{V1} A_{V2} = (-1)(265) = -265$$

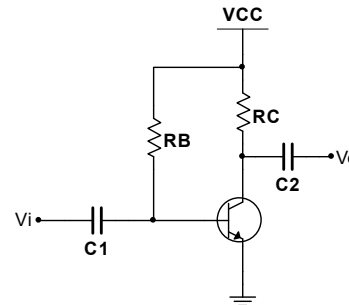
EXERCÍCIOS PROPOSTOS POLARIZAÇÃO DOS TRANSISTORES.

1. Calcular as tensões e correntes de polarização fixa de um circuito cuja configuração é emissor comum, sendo dados: $V_{CC} = 9V$, $V_{BE} = 0,7V$, $\beta = 45$, $R_B = 150K\Omega$, $R_C = 2,1K\Omega$.



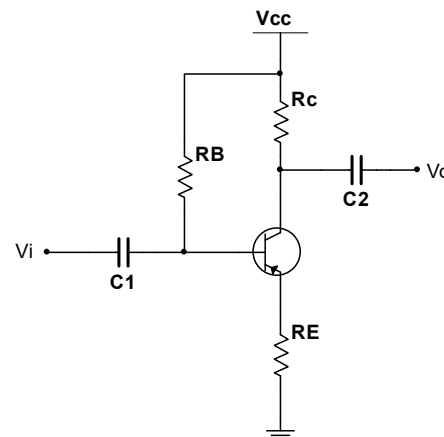
Resposta: $I_C = 2,49mA$ e $V_{CE} = 3,771V$.

2. Calcular a tensão V_{CE} de polarização fixa de um circuito cuja configuração é emissor comum, sendo dados: $V_{CC} = 12V$, $V_{BE} = 0,7V$, $\beta = 70$, $R_B = 250K\Omega$, $R_C = 1,8K\Omega$.



Resposta: $V_{CE} = 6,3048V$

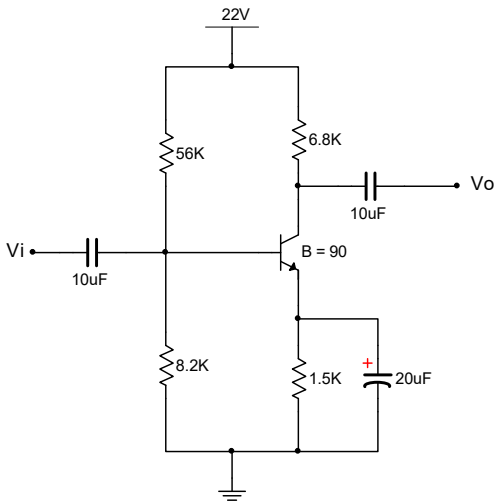
3. Calcular as tensões e correntes de polarização fixa de um circuito cuja configuração é emissor comum, sendo dados: $V_{CC} = 18V$, $V_{BE} = 0,7V$, $\beta = 55$, $R_B = 47K\Omega$, $R_C = 0,5K\Omega$ e $R_E = 750\Omega$.



Respostas: $I_C = 10,69mA$ e $V_{CE} = 4,49V$.

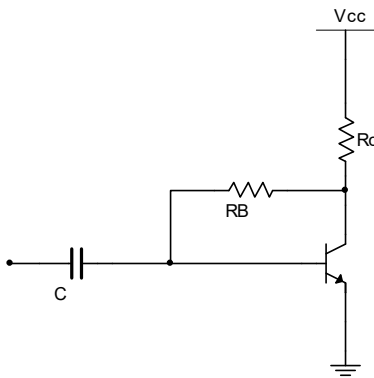
4. Calcular as tensões e correntes de polarização por divisor de tensão de um circuito cuja configuração é emissor comum, sendo dados: $V_{CC} = 22V$, $V_{BE} = 0,7V$, $\beta = 90$, $R_1 = 56K\Omega$, $R_2 = 8,2K\Omega$, $R_C = 6,8K\Omega$ e $R_E = 1,5K\Omega$.

Condição: $\beta R_E \geq 10R_2$.



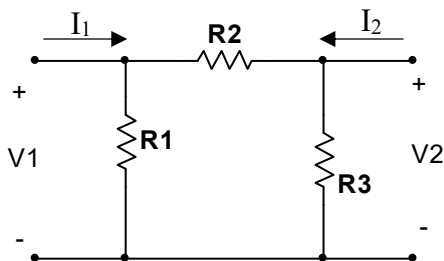
Respostas: $I_C = 1,2611\text{mA}$ e $V_{CE} = 10,5\text{V}$

5. Calcular as tensões e correntes de polarização de um circuito cuja configuração é de realimentação pelo coletor, sendo dados: $V_{CC} = 12\text{V}$, $V_{BE} = 0,7\text{V}$, $\beta = 55$, $R_F = 150\text{K}\Omega$ e $R_C = 0,5\text{K}\Omega$.



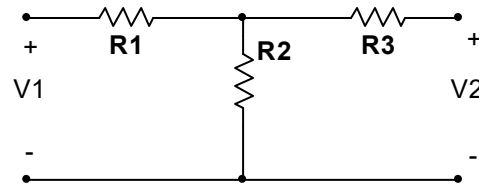
Resposta: $I_C = 3,50\text{mA}$, $V_{CE} = 10,25\text{V}$.

6. Determinar os parâmetros híbridos H para o circuito a seguir:



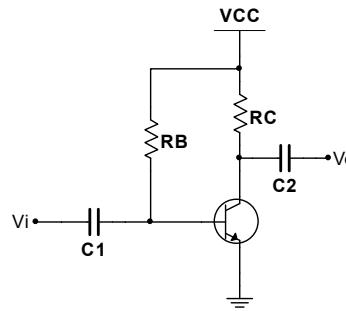
Respostas: $h_{11} = 2\Omega$, $h_{12} = 2/3 \text{ V/V}$, $h_{21} = - 2/3 \text{ A/A}$ e $h_{22} = 4/9 \text{ A/V}$.

7. Determinar os parâmetros híbridos H para o circuito a seguir: $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = R_3 = 1\Omega$.



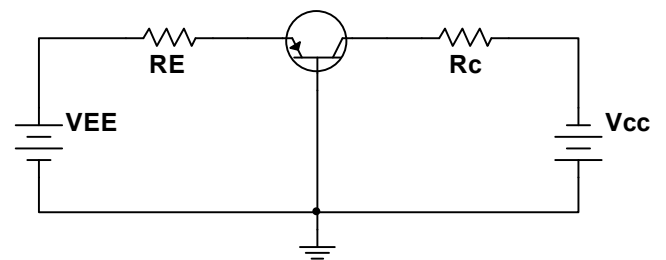
Respostas: $h_{11} = 2,5\Omega$, $h_{12} = 0,5\text{V/V}$, $h_{21} = - 0,5\text{A/A}$ e $h_{22} = 0,5\text{A/V}$.

8. Montar o circuito híbrido equivalente no circuito CA para o circuito polarização fixa. Dados: $h_{ie} = 1,175\text{K}\Omega$, $h_{fe} = 120$, $h_{oe} = 20\mu\text{A/V}$, sendo $R_B = 330\text{K}\Omega$, $R_C = 2,7\text{K}\Omega$ e $V_{CC} = 8\text{V}$.



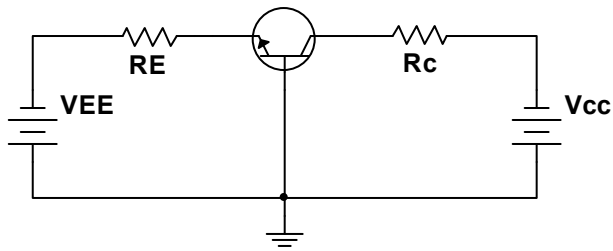
EXERCÍCIOS DE POLARIZAÇÃO

1. Calcular as tensões e correntes de polarização de para um circuito de polarização de base-comum com transistor PNP. Suponha os seguintes valores para o transistor, $\alpha = 0,985$ e $V_{BE} = - 0,7\text{V}$. Os componentes do circuito são $R_E = 720\Omega$ e $R_C = 3,9\text{K}$ e as tensões das fontes são $V_{CC} = 9\text{V}$ e $V_{EE} = 1,5\text{V}$ (Veja a Fig. 4.2 para o tipo de circuito).



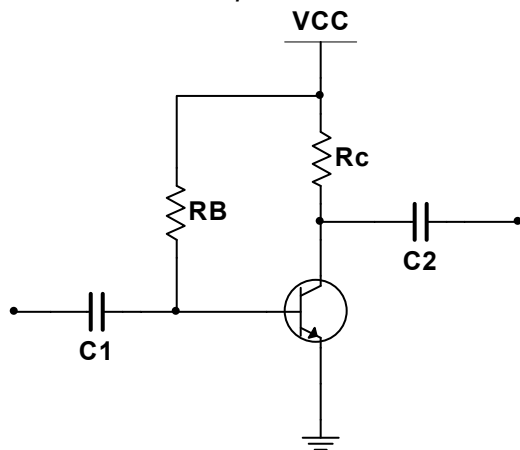
Resposta: $I_C = 1,094\text{mA}$ e $V_{CB} = - 4,733\text{V}$.

2. Calcular a tensão coletor-base para um circuito de polarização de base-comum com transistor NPN (como na Fig. a seguir), com $R_E = 1,8\text{K}\Omega$, $R_C = 2,7\text{K}\Omega$, $V_{EE} = 9\text{V}$, $V_{CC} = - 22\text{V}$, $\alpha = 0,995$ $V_{BE} = +0,7\text{V}$.



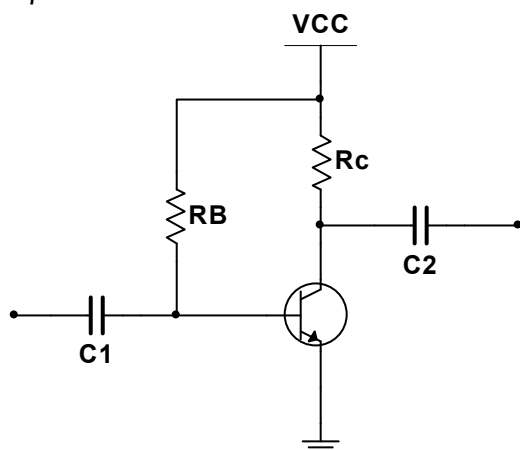
Resposta: $V_{CB} = 9,61V$

3. Calcular as correntes e tensões de polarização para o circuito em emissor-comum de polarização da Fig. 4.5, com $R_B = 150K\Omega$, $R_C = 2,1K\Omega$, $V_{CC} = 9V$, $V_{BE} = +0,7$ e $\beta = 45$.



Resposta: $I_C = 2,49mA$ e $V_{CE} = 3,771V$.

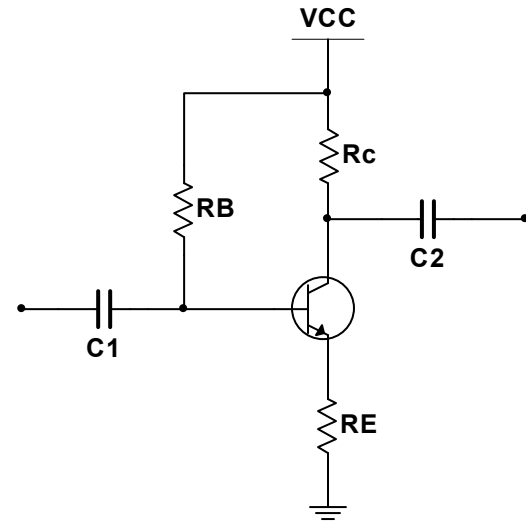
4. Usando um circuito de polarização fixada com transistor NPN, como na Fig. 4.8. calcular a tensão de polarização coletor-emissor (V_{CE}) para: $R_B = 250K\Omega$, $R_C = 1,8K\Omega$, $V_{CC} = 12V$, $V_{BE} = 0,7V$ e $\beta = 70$.



Resposta: $V_{CE} = 6,305V$,

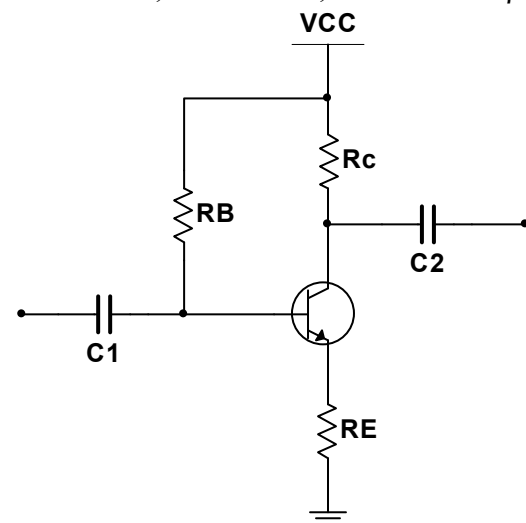
5. Calcular as tensões e correntes de polarização de para um circuito de polarização com estabilização

por resistor de emissor como na Fig. 4.11, com $R_B = 47K\Omega$, $R_E = 750\Omega$, $R_C = 0,5K\Omega$, $V_{BE} = 0,7$, $\beta = 55$ e $V_{CC} = 18 V$.



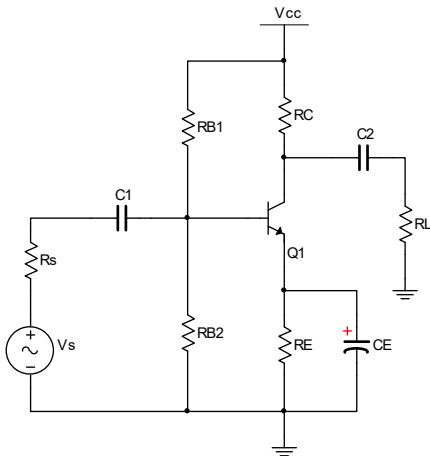
Resposta: $I_C = 10,69mA$ e $V_{CE} \cong 4,5V$.

6. Calcular a tensão coletor-emissor (V_{CE}) para um circuito de polarização com estabilização por resistor de emissor, com transistor NPN, como na Fig. 4.11, para: $R_B = 75K\Omega$, $R_C = 0,5K\Omega$, $R_E = 470\Omega$, $V_{BE} = 0,7V$, $V_{CC} = 10V$ e $\beta = 80$.



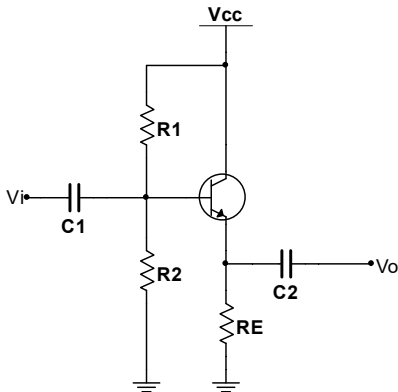
Resposta: $V_{CE} \cong 3,6V$.

7. Calcular as tensões e correntes de polarização para o circuito da Fig. 4.14 com: $R_{B1} = 56K\Omega$, $R_{B2} = 4,7K\Omega$, $R_E = 750\Omega$, $R_C = 6,8k$, $V_{CC} = 24V$, $V_{BE} = 0,7$ e $\beta = 55$.



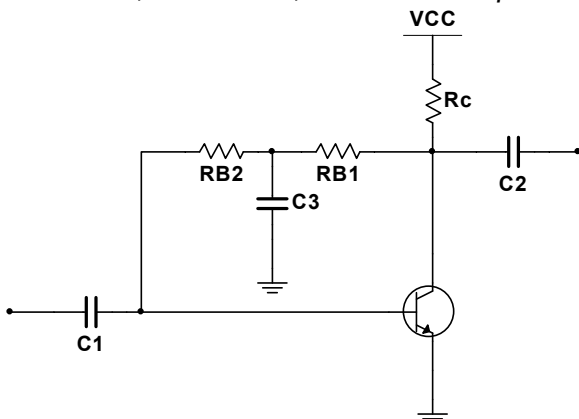
Resposta: $I_E = 14,39\text{mA}$ e $V_{CE} = 13,45\text{V}$.

8. Calcular a tensão de coletor V_{CE} , para o circuito de da Fig. 4.14 com: $R_1 = 12\text{K}\Omega$, $R_2 = 1,5\text{K}\Omega$, $R_E = 1,0\text{K}\Omega$, $V_{CC} = 9\text{V}$, $V_{BE} = 0,7$ e $\beta = 75$.



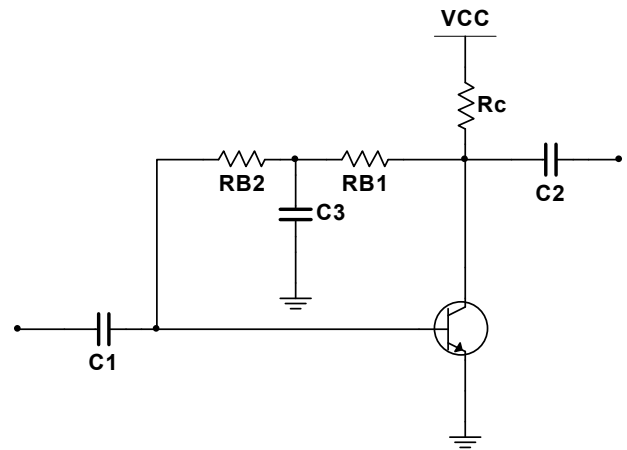
Resposta: $V_{CE} = 8,0\text{V}$.

9. Calcular as correntes e tensões de polarização para o circuito da Fig. 4.20.com: $R_B = 100\text{K}\Omega$, $R_C = 5\text{K}\Omega$, $V_{CC} = 10\text{V}$, $V_{BE} = 0,7$ V e $\beta = 60$.



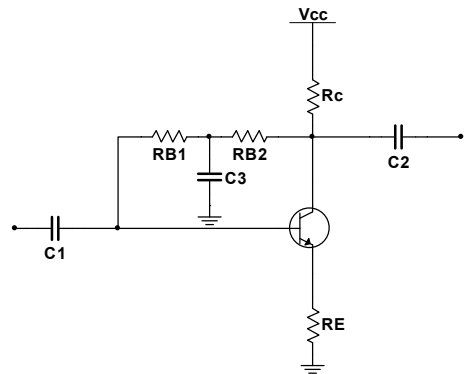
Resposta: $I_C = 1,13\text{mA}$ e $V_C \cong 4,33\text{V}$

10. Calcular a tensão dc do coletor para terra no circuito da Fig. 4.20 com: $R_B = 68\text{K}\Omega$, $R_C = 2,4\text{K}\Omega$, $V_{CC} = 15\text{V}$, $V_{BE} = 0,7\text{V}$ e $\beta = 48$.



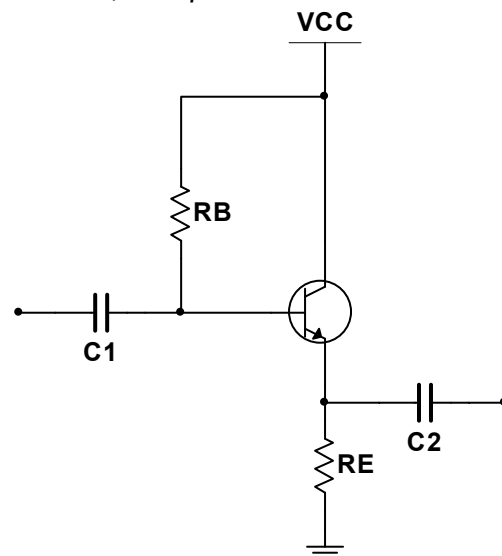
Resposta: $I_C = 2,73\text{mA}$, $V_{CE} = V_C = 8,30\text{V}$.

11. Calcular as tensões e correntes de polarização para o circuito da Fig. 4.21 com: $R_B = 200\text{K}\Omega$, $R_E = 270\Omega$, $R_C = 3,6\text{K}\Omega$, $V_{BE} = 0,7\text{V}$, $\beta = 40$ e $V_{CC} = 16\text{V}$.



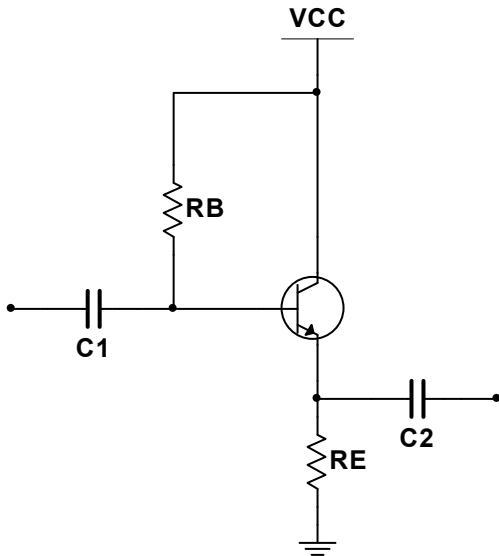
Resposta: $I_C = 1,72\text{mA}$ e $V_{CE} = 9,33\text{V}$.

12. Para o circuito seguidor de emissor da Fig. 4.22 calcular as correntes e tensões de polarização DC para: $R_B = 240\text{K}\Omega$, $R_E = 1,8\text{K}\Omega$, $V_{CC} = 9,0\text{V}$, $V_{BE} = 0,7\text{V}$ e $\beta = 85$.



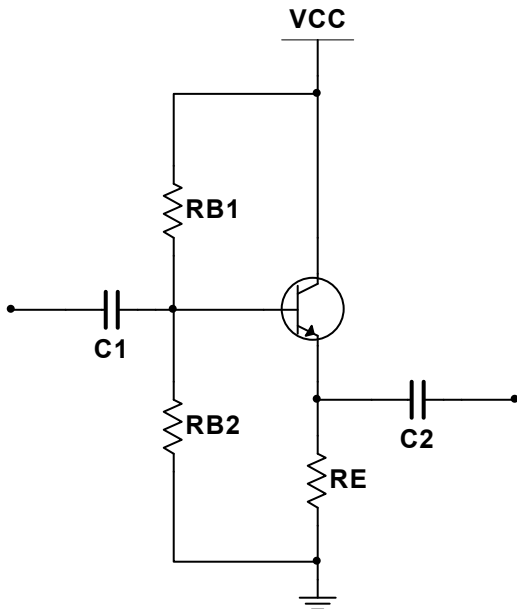
Resposta: $I_E = 1,80\text{mA}$ e $V_E = 3,25\text{V}$.

13. Calcular a tensão DC nos terminais do resistor de emissor do circuito seguidor de emissor da Fig.4.22 com: $R_B = 91K\Omega$, $R_E = 1,2K\Omega$, $V_{CC} = 25V$, $V_{BE} = 0,7V$ e $\beta = 60$.



Resposta: $V_E = 10,83V$

14. Calcular a tensão de emissor (em relação à terra) para o circuito de polarização da Fig. 4.24 com $R_{B1} = 270K\Omega$, $R_{B2} = 330K\Omega$, $R_E = 4,7K\Omega$, $V_{CC} = 15V$, $V_{BE} = 0,7V$ e $\beta = 150$.



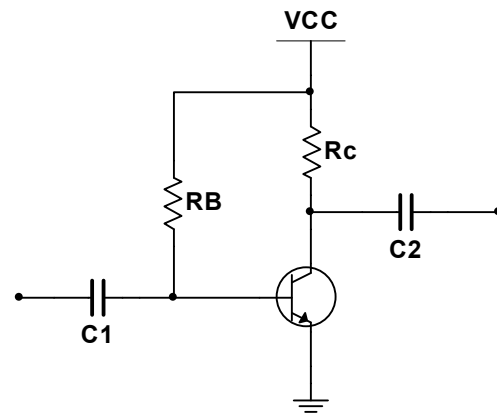
Resposta: $V_E = 6,24V$ ($(150)(4.7K) < (10)(330K)$)

15. Dado o circuito de polarização fixada da Fig. 4.5 com: $R_B = 80K\Omega$, $R_C = 4K\Omega$, $V_{CC} = 20V$, $V_{BE} = 0,7V$ e a característica de coletor do transistor mostrada na Fig. 4.35, faça o seguinte:
(a) Desenhe a linha de carga de.

- (b) Determine o ponto de operação quiescente Q.
- (c) Determine o ponto de operação para $R_C = 8K\Omega$.
- (d) Idem (c) para $V_{CC} = 15V$ ($R_C = 4K\Omega$).

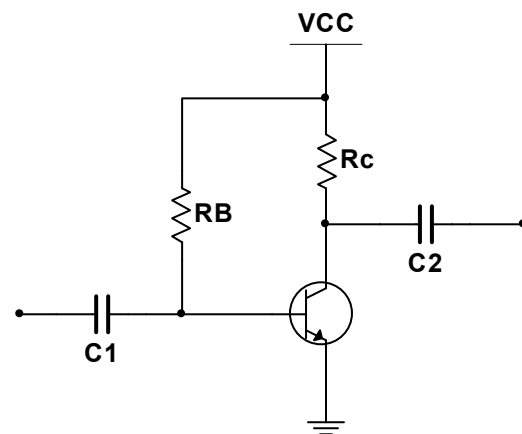
16. Determinar graficamente o ponto de operação para um circuito de polarização fixada com transistor PNP com a característica de coletor da Fig. 4.36 e para: $R_B = 150K\Omega$, $R_C = 2K\Omega$, $V_{CC} = -20V$ e $V_{BE} = -0,7V$.

17. Projetar um circuito de emissor-comum com polarização fixada usando um transistor n Fig. 4.5. O transistor possui um ganho de corrente (β) de 80 e deve operar com $I_{Cq} = 2mA$ e $V_{CE} = 10V$. Usar uma fonte de coletor de 22 V.



Resposta: $R_C = 6K\Omega$ e $R_B = 852K\Omega$.

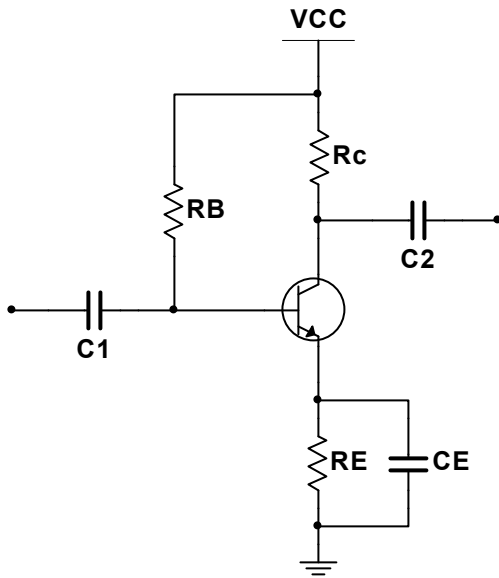
18. Projetar um circuito NPN como na Fig. 4.5 com ganho de corrente 250 para uma corrente de coletor de 10mA e uma tensão coletor-emissor de 10V. Usar uma fonte de 22V.



Resposta: $R_B = 532,5K\Omega$ e $R_C = 1,2K\Omega$.

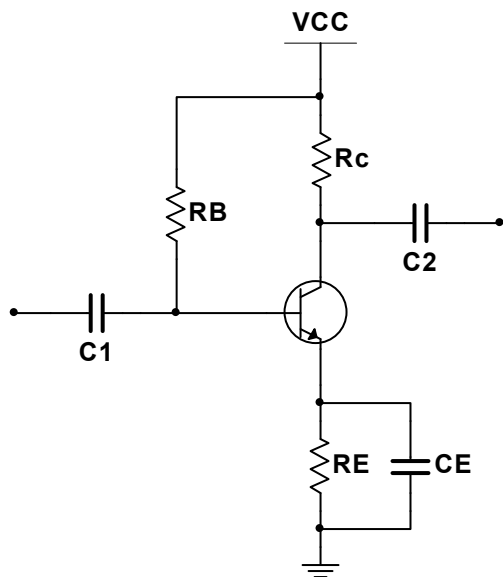
19. Calcular os valores dos resistores para o circuito amplificador com estabilização de emissor da fig. 4.29. Usar transistor NPN de silício com um ganho

de corrente 250, quando polarizado com $I_{CQ} = 10\text{mA}$ e $V_{CEQ} = 15\text{V}$. Usar uma fonte de tensão de 30V



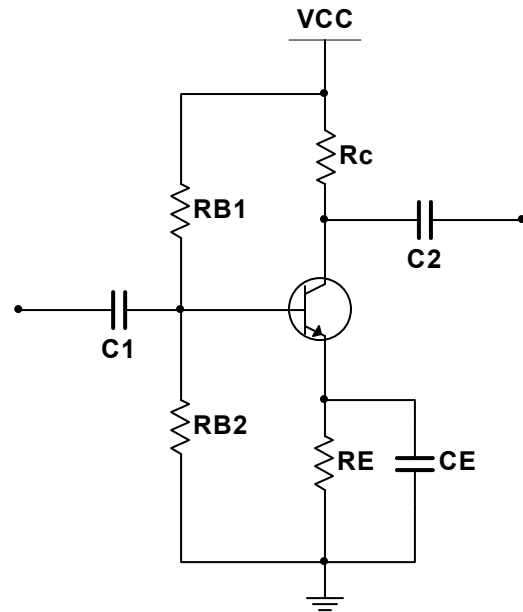
Resposta: $R_E = 300\Omega$.

20. Projetar um circuito de polarização de como na Fig. 4.29 usando um transistor NPN com ganho de corrente 400 para $I_{CQ} = 10\text{mA}$ e $V_{CEQ} = 10\text{V}$. Usar uma fonte de tensão de 22V.



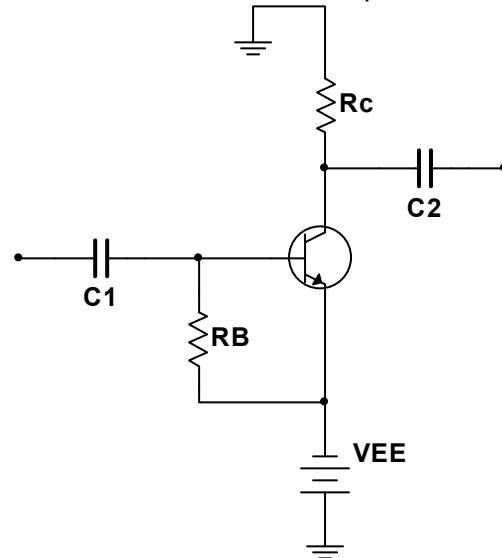
Resposta: $R_B = 764\text{K}\Omega$, $R_C = 980\Omega$ e $R_E = 220\Omega$.

21. Projetar um circuito de polarização por divisor de tensão, como na fig. 4.30, para operação com $V_{CEQ} = 8\text{V}$, $I_{CQ} = 5\text{mA}$. usando um transistor com ganho de corrente $\beta = 130$ e uma fonte de tensão $V_{CC} = 18\text{V}$.



Resposta: $R_E = 360\Omega$, $R_C = 1,64\text{K}\Omega$, $R_{B1} = 29\text{K}\Omega$ e $R_{B2} = 4,68\text{K}\Omega$

22. Determinar o valor da tensão de medida do coletor para o circuito da fig. 4.31 com: $V_{EE} = 15\text{V}$, $R_B = 47\text{K}\Omega$, $R_C = 1,2\text{K}\Omega$ e $\beta = 30$.



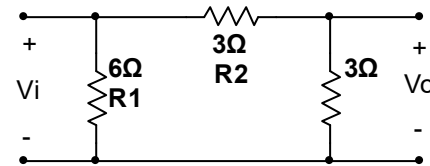
Resposta: $V_C = -0,53\text{V}$.

23. Calcular a tensão de base (em relação à terra) para o circuito da fig. 4.32 com: $R_B = 210\text{K}\Omega$, $R_E = 4,3\text{K}\Omega$, $V_{EE} = +12\text{V}$, $V_{EB} = 0,7$ e $\beta = 120$.

LISTA DE EXERCÍCIOS DE PARÂMETROS DO TRANSISTOR.

PROBLEMAS

- (a) Determinar os parâmetros híbridos para o circuito da Fig. 7.93.
(b) Desenhar o circuito equivalente híbrido.



Resposta: $h_{11} = 2\Omega$, $h_{12} = 2/3$, $h_{21} = -2/3$ e $h_{22} = 4/9S$.

- Desenhar o circuito equivalente híbrido completo para a configuração coletor-comum e indicar sentidos de correntes conforme mostrado nas Figs.7.10a e b.

Resposta:

- Determinar os parâmetros híbridos h_{fe} e h_{oe} a partir das características de coletor da Fig. 7.11 no ponto Q dado por $V_{CE} = 5V$ e $I_C = 5mA$ e comparar com os valores obtidos na Seção 7.5.

Resposta: $h_{fe} = 110$, $h_{oe} = 40\mu S$.

- Qual o parâmetro híbrido na Fig. 7.16 que sofre a maior variação para uma mudança em I_C de 1 para 20mA? E o que sofre a menor variação?

Resposta: h_{oe}

- Qual o parâmetro na Fig. 7.17 que sofre a maior variação para uma mudança em V_{CE} de 1 para 50V? E o que sofre a menor variação?

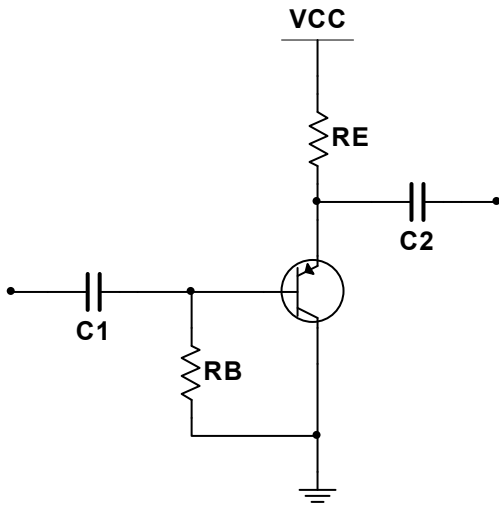
Resposta: O maior = h_{re} , o menor = h_{fe} .

- Qual o parâmetro na Fig. 7.18 de menor sensibilidade à temperatura? E o de maior sensibilidade?

Resposta: O menor h_{oe} e o maior h_{ie}

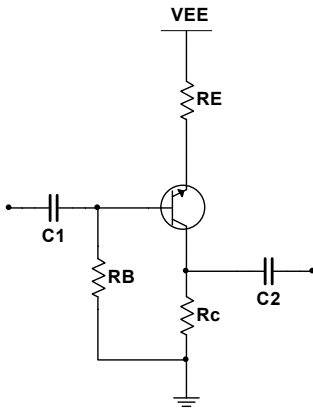
- Dado o circuito da figura para: $V_{CC} = 12V$, $R_B = 150K\Omega$, $R_C = 4K\Omega$, determinar:

- Ganho de corrente $A_i = I_o/I_i$.
- Ganho de tensão $A_v = V_o/V_i$.
- Impedância de entrada Z_i .
- Impedância de saída Z_o .



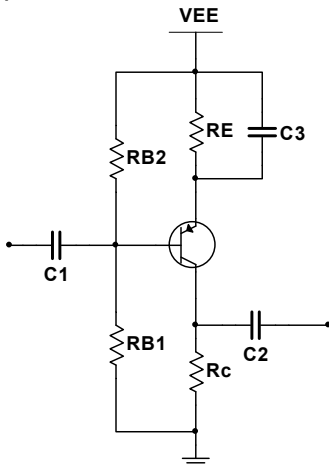
Resposta: $V_B = 3,269V$.

- Calcular a corrente de coletor para o circuito da fig. 4.33 com: $R_B = 80K\Omega$, $R_C = 1,8K\Omega$, $R_E = 750\Omega$, $V_{EE} = -9V$, $V_{BE} = 0,7$ e $\beta = 135$.



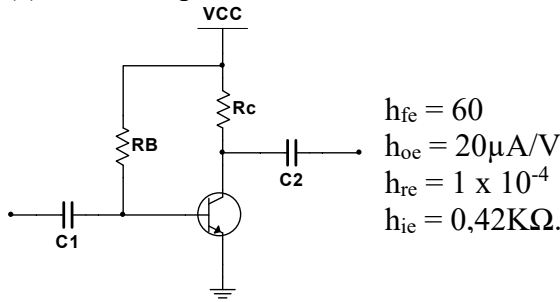
Resposta: $I_C = 6,15mA$.

- Calcular a tensão coletor-emissor para o circuito da fig. 4.34 com: $R_{B1} = 120K\Omega$, $R_{B2} = 15K\Omega$, $R_E = 3,9K\Omega$, $R_C = 12K\Omega$, $V_{EE} = 18V$, $V_{BE} = 0,7V$ e $\beta = 200$.



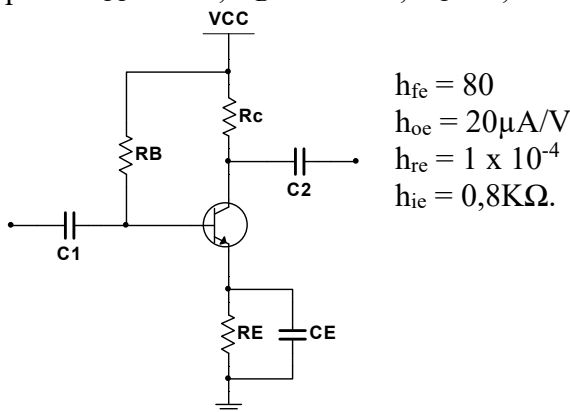
Resposta: $V_{CE} = -12,78V$

(e) Ganho de potência A_p ,



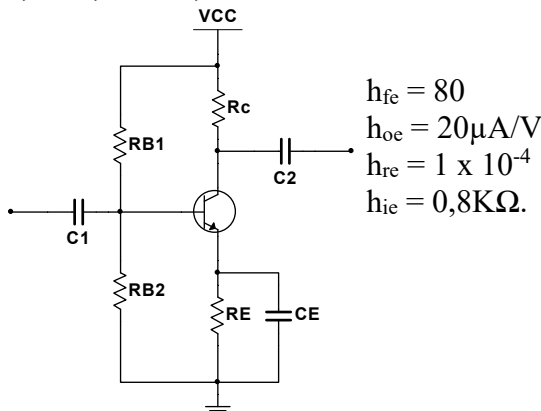
Resposta: (a) 55,56, (b) -558,67, (c) 397,78Ω, (d) 3,91KΩ, (e) $3,10 \times 10^4$.

8. Repetir o Problema 7 para o circuito da figura para: $V_{CC} = 16V$, $R_B = 250K\Omega$, $R_C = 1,8K\Omega$.



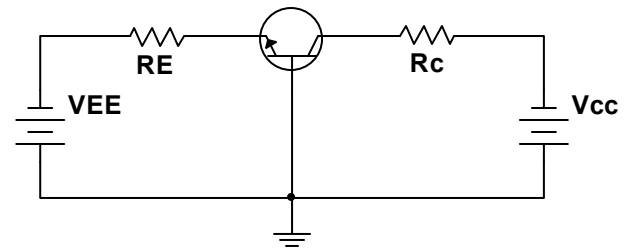
Resposta: (a) 77,22 (b) -176,81 (c) 785,06Ω (d) 1768,17Ω.

9. Repetir o Problema 7 para o circuito da Figura para: $V_{CC} = 16V$, $R_{B1} = 40K\Omega$, $R_{B2} = 10K\Omega$, $R_C = 3,9K\Omega$, $R_E = 1,2K\Omega$.



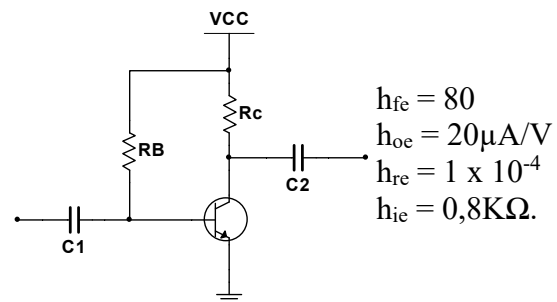
Resposta: (a) 79,78, (b) -276,26, (c) 1,126KΩ, (d) 3,87KΩ e (e) $22,04 \times 10^3$.

10. Repetir o Problema 7 para o circuito da figura para: $V_{EE} = 3V$, $V_{CC} = 16V$, $R_E = 1K\Omega$, $R_C = 3,6K\Omega$, $h_{fb} = -0,988$, $h_{ob} = 0,31\mu A/V$, $h_{ib} = 13\Omega$, $h_{rb} = 58,6 \times 10^{-6}$.



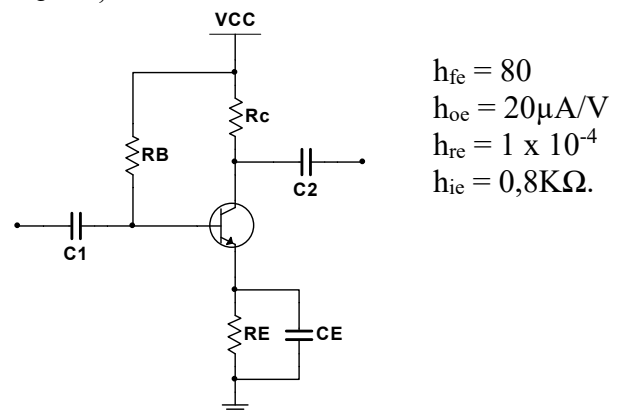
Resposta: (a) 1 (b) 268,98 (c) 13,02Ω (d) 3541Ω.

11. Usando o circuito equivalente híbrido aproximado adequado, determinar A_i , A_v , Z_i , Z_o e $A_{v'} para o circuito da figura (comparar com os resultados anteriores do Problema 7). Dados: $V_{CC} = 16V$, $R_B = 250K\Omega$, $R_C = 1,8K\Omega$.$



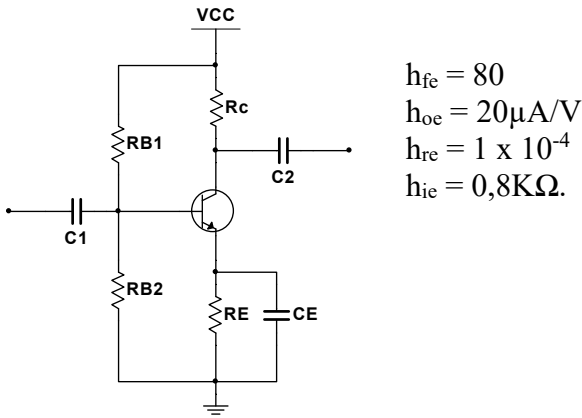
Resposta: (a) 60 (b) -571,43 (c) 420Ω (d) 4KΩ (e) $3,43 \times 10^4$.

12. Repetir o problema 11 para o circuito da figura, para: $V_{CC} = 16V$, $R_B = 250K\Omega$, $R_E = 3,0K\Omega$, $R_C = 1,8K\Omega$.



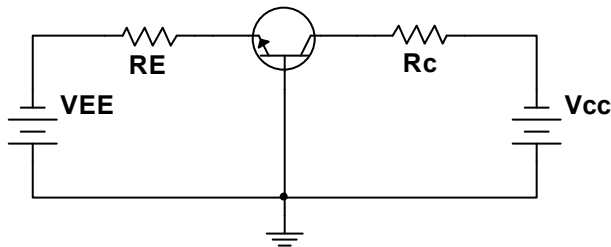
Resposta: $Z_i = 786,10\Omega$, $Z_o = 1,8K\Omega$, $A_v = -180$, $A_i = 80$.

13. Repetir o problema 11 para o circuito da figura para: $V_{CC} = 16V$, $R_{B1} = 40K\Omega$, $R_{B2} = 10K\Omega$, $R_E = 1,2K\Omega$, $R_C = 1,8K\Omega$.



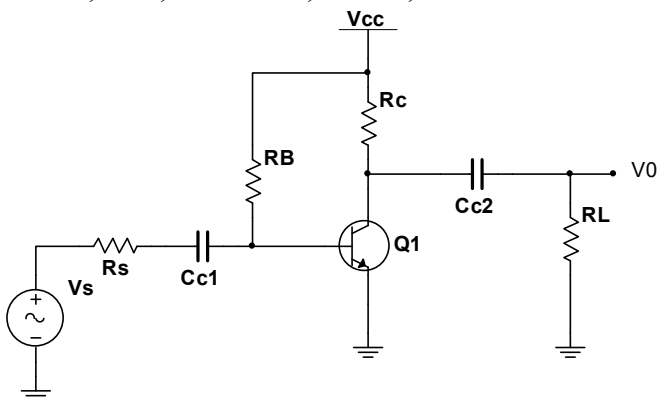
Resposta: (a) 85,1 (b) - 278,9 (c) 1,19KΩ (d) 3,9KΩ (e) 23,7 x 10³.

14. Repetir o problema 11 para o circuito da figura para: $V_{EE} = 3V$, $V_{CC} = 16V$, $R_E = 1K\Omega$, $R_C = 3,6K\Omega$, $h_{fb} = -0,988$, $h_{ob} = 0,31\mu A/V$, $h_{ib} = 13\Omega$, $h_{rb} = 58,6 \times 10^{-6}$.



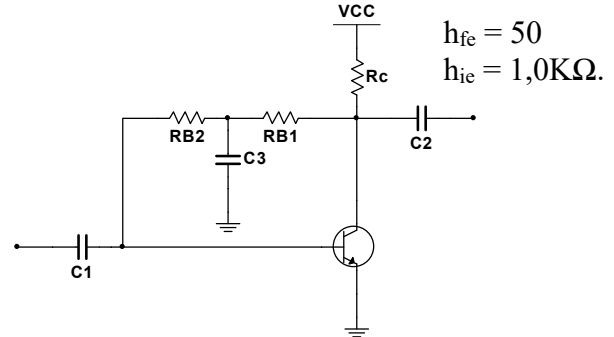
Resposta:

15. (a) Usando um circuito equivalente aproximado, determinar o ganho de corrente $A_i = I_o/I_i$ e o ganho de tensão a) $A_v = V_o/V_i$ para o circuito da fig. 7.98. (b) Determinar Z_i e Z_o . (c) Determinar $A_v V_o/V_s$
 Dados: $V_{CC} = 6V$, $R_B = 200K\Omega$, $R_C = 2,2K\Omega$, $R_E = 1,2K\Omega$, $R_S = 1K\Omega$, $R_L = 2,2K\Omega$.



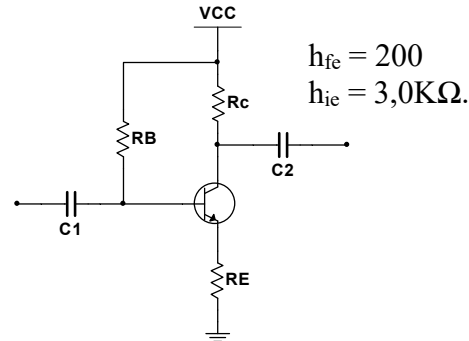
Resposta: (a) $A_i = -25$ $A_v = -23,4$ (b) $Z_i = 2,35K\Omega$, $Z_o \cong 1,1K\Omega$ (c) - 16,38.

16. (a) Determinar o novo $A_v = V_o/V_i$ para o exemplo 7.6 se for conectada uma carga de 5,6KΩ do coletor para a terra. (b) Determinar o novo $A_i = I_o/I_i$, sendo agora I_o a corrente através da carga de 5,6KΩ.
 Dados: $R_{B1} = R_{B2} = 150K\Omega$, $R_C = 3K\Omega$.



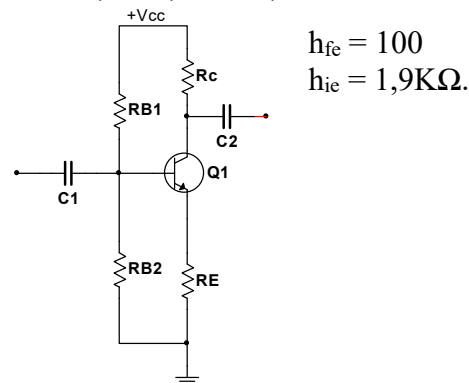
Resposta:

17. Determinar a impedância de entrada Z_i , a impedância de saída Z_o , o ganho de tensão $A_v = V_o/V_i$ para o circuito da figura: $V_{CC} = 12V$, $R_B = 250K\Omega$, $R_C = 5,6K\Omega$, $R_E = 1,2K\Omega$.



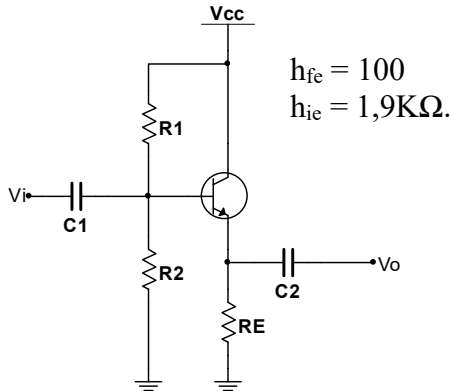
Resposta: $Z_i = 123,23\Omega$, $Z_o \cong 5,6K\Omega$, $A_v = -4,67$.

18. Determinar Z_i , Z_o , A_v e A_i para o circuito da figura: $V_{CC} = 16V$, $R_{B1} = 40K\Omega$, $R_{B2} = 10K\Omega$, $R_C = 3,9K\Omega$, $R_E = 1,2K\Omega$.



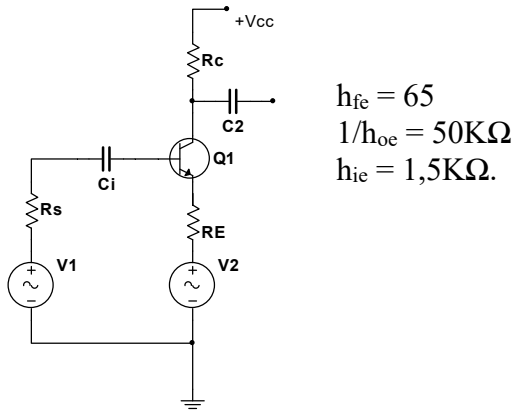
Resposta: $Z_i = 7,5K\Omega$, $Z_o = 3,9K\Omega$, $A_v = -3,25$, $A_i = 6,25$

19. Determinar Z_i , Z_o , A_v e A_i para o circuito da figura: $V_{CC} = 16V$, $R_{B1} = 220K\Omega$, $R_{B2} = 120K\Omega$, $R_E = 3,3K\Omega$.



Resposta: $Z_i = 62,95K\Omega$, $Z_o \cong 18,7\Omega$, $A_v = 0,994$, $A_i = 19$.

20. Determinar V_o (em termos de V_1 e V_2) para o circuito da figura. Dados: $R_C = 10K\Omega$, $R_S = 2K\Omega$, $R_E = 250K\Omega$.



Resposta:

21. Repetir o problema 7, usando o tratamento introduzido na seção 7.10 (usar $r_B = 1,25\Omega$).

Resposta: $I_B = 75,3\mu A$, $I_E = 4,518mA$, $r_e = 7\Omega$, $\beta = 60$.

22. Repetir o problema 10, usando o tratamento introduzido na seção 7.10 (usar $r_B = 1,7\Omega$).

Resposta:

23. Repetir o problema 17, usando o tratamento introduzido na seção 7.10 (usar $r_B = 1,1\Omega$).

Resposta: $V_B = 2,938V$, $I_E = 1,865mA$, $r_e = 15,04\Omega$, $\beta = 200$.

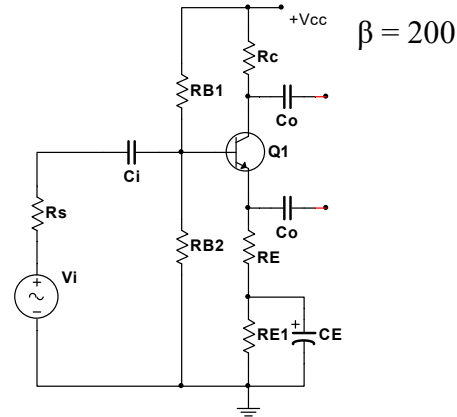
24. Repetir o problema 18, usando o tratamento introduzido na seção 7.10 (usar $r_B = 0,5\Omega$).

Resposta:

25. Repetir o problema 19, usando o tratamento introduzido na seção 7.10 (usar $r_B = 1,7\Omega$).

Resposta: $V_B = 5,71V$, $I_E = 1,52mA$, $r_e = 19,01\Omega$, $\beta = 100$.

26. Determinar Z_i , Z_o , A_v e A_i para o circuito da figura: $V_{CC} = 30V$, $R_{B1} = 100K\Omega$, $R_{B2} = 20K\Omega$, $R_S = 2K\Omega$, $R_C = 6,8K\Omega$, $R_E = 2K\Omega$, $R_{E1} = 150\Omega$.



Resposta: $Z_i = 11,02K\Omega$, $Z_o = 11,97\Omega$, $A_v = -45,33$, $A_i = 133,33$.

27. Determinar Z_i , Z_o , A_v e A_i para o circuito da fig. 7.104.

Resposta: $r_e = 26\Omega$, $A_v = 14,43$, $Z_o = 12K\Omega$, $A_i = -0,25$, $Z_i = 207,88\Omega$.

28. Deduzir as expressões para o circuito da fog. 7.88.

Resposta:

29. Deduzir as expressões para o circuito da fig. 7.89.

Resposta:

30. Determinar A_v , A_i e Z_i para o circuito da fig. 7.90 com $R_C = 5,6K\Omega$, $R_F = 120K\Omega$, $V_{CC} = 12V$ e $\beta = 100$.

Resposta: $A_v = -361,52$, $A_i = 21,42$, $Z_i = 283,77\Omega$.

31. Determinar A_v , A_i e Z_i para o circuito da fig. 7.92 com $R_C = 6,8K\Omega$, $R_F = 180K\Omega$, $R_E = 2,2K\Omega$, $V_{CC} = 16V$ e $\beta = 150$.

Resposta: $A_v = -3,09$, $Z_i = 49,5K\Omega$, $A_i = -22,5$.

32. Deduzir as expressões para o circuito da fig. 7.92, isto é, deduzir as Eqs. (7.62)-(7.65).

Resposta:

33. (a) Determinar A_{iT} e A_{VT} para um sistema em cascata com ganho de potência $12,8 \times 10^3$, $Z_L = 4K\Omega$ e impedância de entrada do primeiro estágio $Z_{i1} = 2K\Omega$.

(b) Sendo o sistema da parte (a) de dois estágios idênticos, determinar os ganhos de tensão e de corrente de cada estágio.

Resposta: (a) $A_{iT} = 80$, $A_{VT} = 160$ (b) $A_i = 8,94$, $A_V = 12,65$

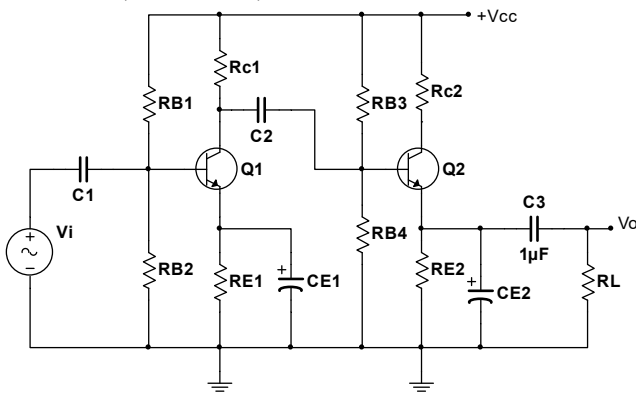
34. A figura a seguir mostra um amplificador com acoplamento RC e dois estágios.

(a) Determinar Z_i e Z_o .

(b) Calcular o ganho de tensão $A_V = V_o/V_i$.

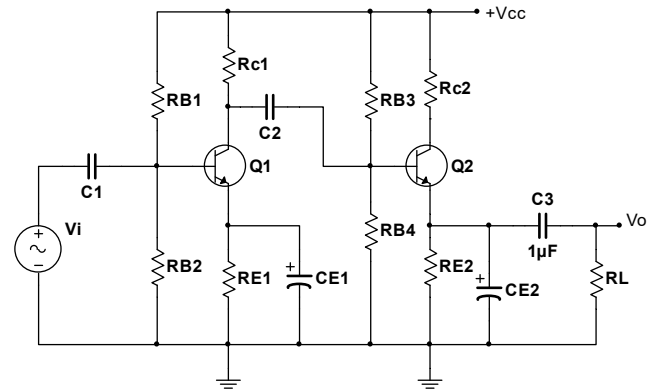
(c) Determinar o ganho de corrente $A_i = I_o/I_i$.

Dados: $R_{B1} = R_{B3} = 100K\Omega$, $R_{B2} = R_{B4} = 10K\Omega$, $R_{C1} = 5K\Omega$, $R_{C2} = 2,5K\Omega$, $R_{E1} = 1K\Omega$, $R_{E2} = 0,5K\Omega$, $R_L = 2K\Omega$, $h_{ie} = 2K\Omega$, $h_{fe} = 60$.



Resposta: (a) $Z_i = 1,64K\Omega$ $Z_o = 2K\Omega$
 (b) $A_V = 1234,63$ $A_i \cong 1012,4$.

35. Determinar Z_i , Z_o , A_{Vt} , A_{iT} , e A_{pT} para o amplificador com acoplamento RC da figura com $R_{B1} = R_{B3} = 56K\Omega$, $R_{B2} = R_{B4} = 5,6K\Omega$ para cada transistor e $R_{C1} = 6,8K\Omega$, $R_{C2} = 3,3K\Omega$, $V_{CC} = 20V$, $R_{E1} = R_{E2} = 0,5K\Omega$, $R_L = 2,2K\Omega$. Todos os capacitores são iguais. Para cada transistor $\beta = 120$. Como h_{ie} não é dado, deve-se determinar r_e para cada transistor. Use todas as aproximações possíveis.

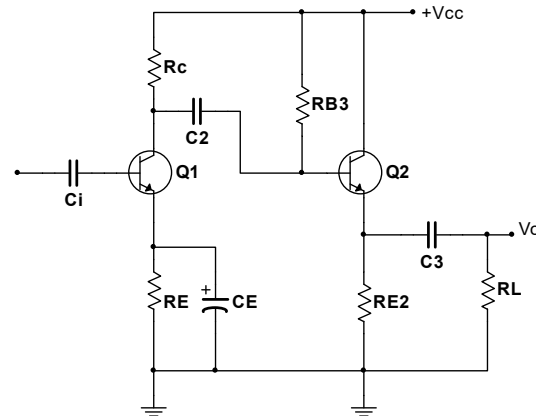


Resposta: $r_e = 13,33\Omega$, $Z_i = 1,217K\Omega$, $Z_o \cong 3,3K\Omega$
 $A_{VT} = 7662,6$, $A_{iT} = 4238,81$, $A_{pT} = 32,5 \times 10^6$.

36. Repetir o Problema 35 se ambos os capacitores C_E forem retirados.

Resposta:

37. Calcular Z_i , Z_o , A_{VT} e A_{iT} se C_E for retirado. Dados: $R_{B1} = 82K\Omega$, $R_{B2} = 20K\Omega$, $R_C = 2K\Omega$, $R_E = 1K\Omega$, $R_{B3} = 200K\Omega$, $Z_L = 1K\Omega$, $V_{CC} = 18V$, $\beta = 100$, $r_{e1} = 11,61\Omega$, $r_{e2} = 4,51\Omega$.

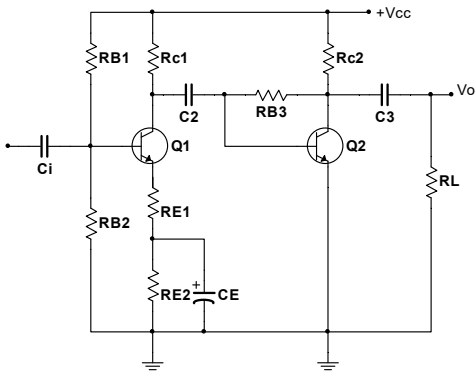


Resposta: $Q_1: r_e = 11,61\Omega$, $Q_2: r_e = 4,51\Omega$,
 $Z_i = 13,85K\Omega$, $Z_o = 24,51\Omega$, $A_{VT} = -2$, $A_{iT} = 27,7$.

38. Repetir o problema 37 se C_E for retirado e a carga Z_i na saída for conectada, através de um capacitor, ao coletor de Q_2 .

Resposta:

39. Calcular Z_i , Z_o , A_{VT} e A_{iT} se R_{E1} for retirado e R_L , reduzido ao valor significativamente menor que $0,5K\Omega$.



Resposta: $r_{e1} = 14,86\Omega$, $r_{e2} = 24,53\Omega$, $Z_i \cong 1,19K\Omega$, $Z_o \cong 10K\Omega$, $A_{VT} = 16,4$, $A_{iT} = 39,03$, $A_{PT} = 640,09$.

40. Projetar um amplificador de dois estágios com acoplamento RC que tenha um ganho total de $\cong 2000$. O circuito deve operar com uma carga de $10K\Omega$, o sinal é fornecido de uma fonte de tensão perfeita ($R_S = 0\Omega$). Mostrar os valores típicos (disponíveis comercialmente) dos componentes e calcular o ganho de tensão do circuito resultante para verificar. A lista de resistores disponíveis comercialmente pode ser encontrada em qualquer publicação de produtos eletrônicos.

Resposta:

41. Repetir o Exemplo 9.3 se C_{S1} , e C_{S2} forem retirados e $R_S = 2K\Omega$ com $R_{S2} = 1K\Omega$.

Resposta:

42. Calcular a impedância vista quando se olha para o primário de um transformador abaixador de 5:1 conectado a uma carga de 20Ω .

Resposta:

43. Calcular a relação necessária entre o número de espiras de um transformador para casar uma carga de 50Ω a uma impedância de fonte de $20K\Omega$.

Resposta:

44. (a) Calcular o ganho de tensão (V_o/V_i) do amplificador com acoplamento por transformador da Fig. 9.60.

(b) Qual será o ganho de tensão do circuito da Fig. 9.60 se a carga for reduzida para $0,5K\Omega$?

Resposta:

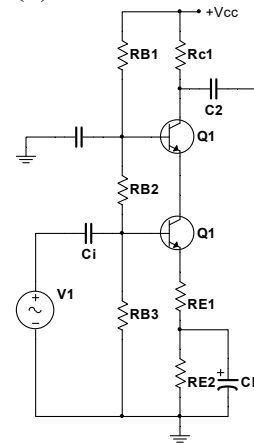
46. Determinar os novos níveis DC na Fig. 9.13 se as baterias de 12V forem substituídas por fontes de 16V. Além disso, determinar o novo valor de r_e para cada transistor. Como são afetados os ganhos de

tensão a corrente AC? Quais serão seus novos valores se forem diferentes?

Resposta:

47. Dado o amplificador em cascata da Fig. 9.61, determinar:

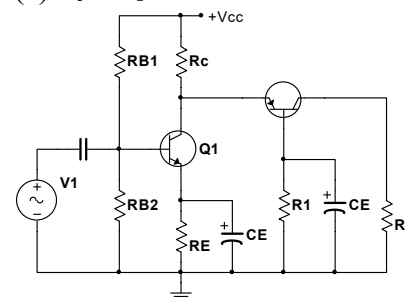
- (a) V_o .
- (b) Z_i , Z_o .
- (c) I_o , I_i , e A_i .
- (d) A_{PT} .



Resposta:

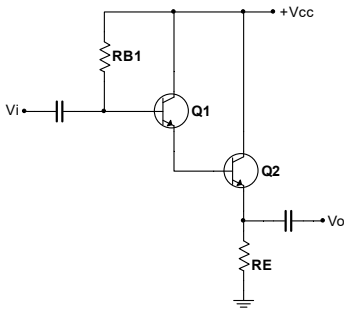
48. Dado o amplificador em cascata da figura a seguir. Dados: $V_{CC} = 20V$, $R_{B1} = 15K\Omega$, $R_{B2} = 3K\Omega$, $R_C = 2,2K\Omega$, $R_1 = 100K\Omega$, $Z_L = 2,5K\Omega$, $R_E = 470\Omega$.

- (a) r_{e1} e r_{e2} para $\beta = 50$.
- (b) A_{VT} e V_o se $V_i = 10mV$.
- (c) Z_i e Z_o .



Resposta: $r_{e1} = 5,29\Omega$, $r_{e2} = 6,1\Omega$, $A_v = 473,48$, $V_o = 4,73V$, $Z_i = 239\Omega$, $Z_o = 2,5K\Omega$.

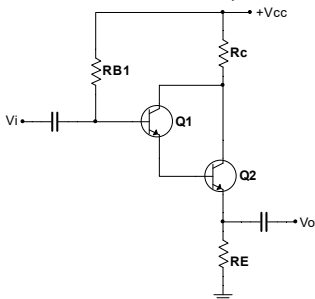
49. Determinar A_i , Z_i , Z_o e A_v para a configuração de Darlington da figura: $V_{CC} = 20V$, $R_B = 2,5M\Omega$.



Para Q₁ e Q₂,
 $h_{oe} = 10\mu S$
 $h_{fe} = 60$
 Q₁: $h_{ie1} = 2,5k\Omega$
 Q₂: $h_{ie2} = 1,5k\Omega$
 $R_E = 500\Omega$.

Resposta: $A_i = 3600$, $Z_i = 0,891M\Omega$, $Z_o = 0,47K\Omega$ e $A_v \cong 1$.

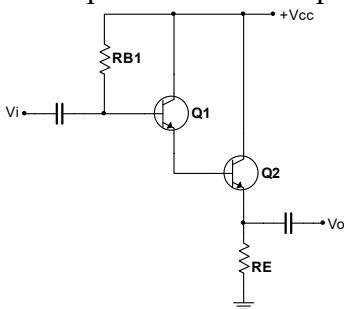
50. Repetir o Problema 49 se for acrescentado um resistor de $0,47K\Omega$ entre o coletor de Q₁ e V_{CC} e a saída for tomada no coletor da configuração de Darlington. I_O é a corrente no resistor R_C acrescentado de $0,47K\Omega$.



Para Q₁ e Q₂,
 $h_{oe} = 10\mu S$
 $h_{fe} = 60$
 Q₁: $h_{ie1} = 2,5k\Omega$
 Q₂: $h_{ie2} = 1,5k\Omega$
 $R_E = 500\Omega$.

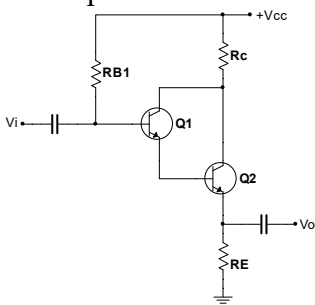
Resposta: $Z_i = 0,89M\Omega$, $Z_o \cong 2,2K\Omega$, $A_{iT} = 1783,38$, $A_{VT} = 4,4$.

51. Repetir o Problema para R_E igual a 150Ω .



Resposta:

52. Repetir o Problema 17 para R_E igual a 150Ω .



Resposta:

53. Calcular o ganho de potência em decibéis para:
 (a) $P_o = 100W$, $P_i = 5W$.
 (b) $P_o = 100 mW$, $P_i = 5mW$.
 (c) $P_o = 100\mu W$, $P_i = 20\mu W$.
Resposta: 13dB, 13dB, 7dB.

54. São feitas duas medidas de tensão nos terminais de um resistor: $V_i = 25V$ e $V_s = 100V$. Calcular o ganho de potência em decibéis da segunda leitura em relação à primeira.

Resposta:

55. São feitas as seguintes medidas de tensão de entrada e saída: $V_i = 10mV$ e $V_o = 25V$. Qual o ganho de tensão em decibéis?

Resposta:

56. (a) O ganho total em decibéis de um sistema de três estágios é 120 dB. Determinar o ganho em decibéis de cada estágio, sendo que o ganho do segundo é duas vezes o do primeiro e o do terceiro 2,7 vezes o do primeiro.

(b) Determinar o ganho de tensão de cada estágio.

Resposta: (a) $A_{v1} = 21,05dB$, $A_{v2} = 42,10dB$ e $A_{v3} = 56,835dB$

(b) $A_{v1} = 11,288$, $A_{v2} = 127,35$, $A_{v3} = 694,62$.

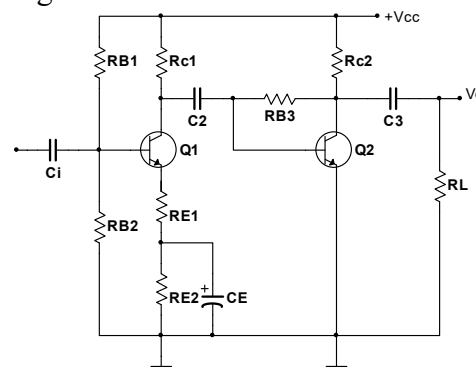
57. Dado o circuito da figura: $R_{E1} = 0$, $V_{CC} = 22V$, $R_{B1} = 47K\Omega$, $R_{B2} = 4,7K\Omega$, $R_C = 5,6K\Omega$, $R_E = 1K\Omega$ e $R_L = 3,3K\Omega$, $\beta = 100$, $C_{W1} = 8pF$, $C_{W2} = 4pF$, $C_{BC} = 2pF$, $C_{BE} = 30pF$, $V_s = 1mV$ e $R_s = 0,5K\Omega$.

(a) Determinar as frequências de corte f_{LS} , f_{LC} e f_{LE} .

(b) Calcular o ganho de tensão na banda média.

(c) Determinar as frequências de corte f_{Hi} e f_{Ho}

(d) Esboçar o gráfico de A, V/V, com escalas logarítmicas.



Resposta:

58. Repetir o Problema 57 se o capacitor C_E for retirado.

Resposta:

59. Repetir o Problema 58 para $C_E = 1\mu\text{F}$.

Resposta:

60. Calcular o ganho total de tensão para um amplificador de quatro estágios idênticos, sendo que cada um possui ganho 20.

Resposta: $A_V = 160 \times 10^3$ ou 104dB.

61. Calcular a frequência de 3 dB superior para um amplificador de quatro estágios, sendo que $f_2 = 2,5$ MHz para cada estágio separadamente.

Resposta:

62. A frequência de 3 dB inferior de cada estágio de um amplificador de quatro estágios é $f_1 = 40\text{Hz}$. Qual o valor de f_1 para todo o amplificador?

Resposta:

63. (a) Determinar as frequências de corte na região de frequências baixas para o amplificador de dois estágios da Fig. 9.65.

(b) Determinar as frequências de corte na região de frequências altas para o circuito da Fig. 9.65 ($f_\beta = 5$ MHz).

(c) Calcular o ganho de tensão na banda média e esboçar o gráfico de $A_V = V_O / V_i$ em função da frequência (escalas logarítmicas).

Resposta:

BIBLIOGRAFIA:

Referência: Livro Texto: Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.

Autores: Robert Boylestad e Louis Nashelsky, editora Pearson, Prentice Hall, 11.a edição, ano 2013.

OUTRAS REFERÊNCIAS

Microeletrônica – Sedra, A.S e Smith, K.C – 5.a edição Pearson.

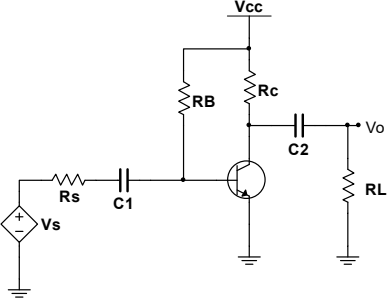
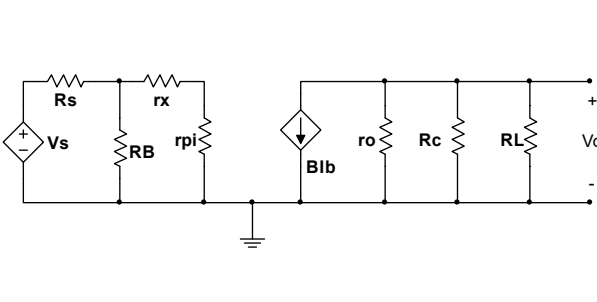
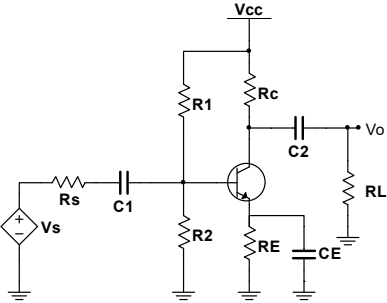
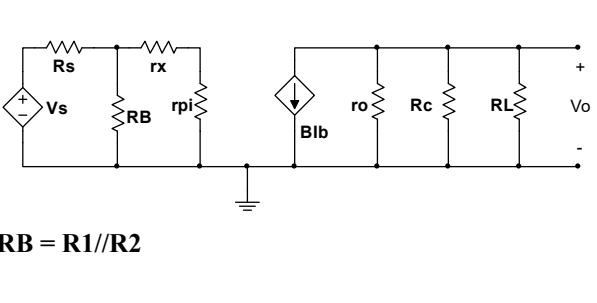
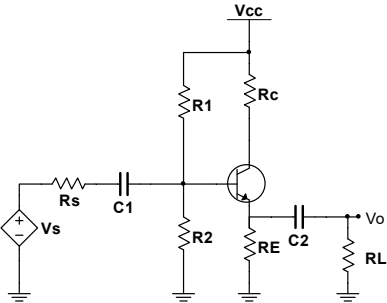
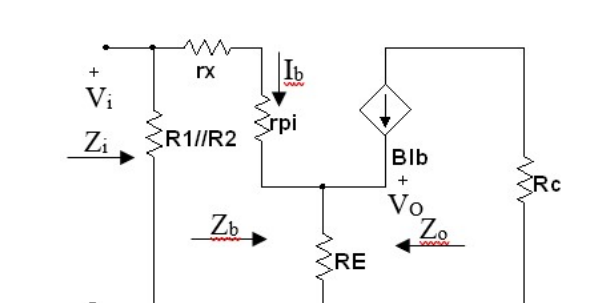
Eletrônica Vol.1 – Malvino, A.P – 14.a edição, Editora Makron,

Circuitos Elétricos - Nilsson, J. W. / Riedel, S. A. / Marques, A. S., ano de 2008 Prentice Hall Brasil.

Circuitos com transistores Bipolares e MOS - Silva, M. M./Calouste, G., ano de 2010.

Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.1 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.

Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.2 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.

Configuração	Modelo π -Híbrido	Z_i	Z_o	A_v
		$= R_B // \beta r_e$ $\cong \beta r_e$ <p>Condições: ($R_B \geq 10\beta r_e$)</p>	$= R_C // r_o$ $\cong R_C$ <p>Condição: ($r_o \geq 10R_C$)</p>	$= - \frac{R_C // R_L // r_o}{r_e}$ $= - \frac{R_C // R_L}{r_e}$ <p>Condição: ($r_o \geq 10R_C$)</p>
	 <p>$R_B = R_1 // R_2$</p>	$= R_1 // R_2 // \beta r_e$	$= R_C // r_o$ $\cong R_C$ <p>Condição: ($r_o \geq 10R_C$)</p>	$= - \frac{R_C // R_L // r_o}{r_e}$ $= - \frac{R_C // R_L}{r_e}$ <p>Condição: ($r_o \geq 10R_C$)</p>
	 <p>$R_B = R_1 // R_2$</p>	$R'_E = R_E // R_L$ $R_1 // R_2 // (\beta(R'_E + r_e))$	$R'_s = R_s // R_1 // R_2$ $= R_E // (r_e + R'_s / \beta) \cong r_e$ <p>Condição: ($R_E \geq 10r_e$)</p>	$\cong 1$

		$R_1 // R_2 // (\beta(R_E + r_e))$	<p style="text-align: center;">R_C</p> <p style="text-align: center;">Condição: $(R_E \geq 10r_e)$</p>	$= - \frac{R_C // R_L}{R_E}$
		$R_E = R_{E1} + R_{E2}$ $R_1 // R_2 // (\beta(R_E + r_e))$	<p style="text-align: center;">R_C</p>	$= - \frac{R_C // R_L}{R_{E1}}$
		$= \beta r_e // \frac{R_F}{(1 - A_V)}$	<p style="text-align: center;">$R_C // R_F // r_o$</p>	$= - \frac{R_C // R_L // r_o}{r_e}$

		$= \beta R_E // \frac{R_F}{(1 - A_V)}$	$R_C // R_F$	$= - \frac{R_C // R_L}{R_E}$
--	--	--	--------------	------------------------------

ESTUDO DOS REGULADORES DE TENSÕES.

Objetivo: Este módulo introduz conceitos de regulação de entrada e de saída e projeto de reguladores de tensões. O módulo aborda uma terminologia utilizada pelos fabricantes de fontes reguladas de tensões e mostra o cálculo dos fatores de regulação. É demonstrado que para se obter a função de regulação é necessário introduzir um elemento de referência no circuito, o qual produz nos seus terminais de saída uma tensão constante dentro de limites estabelecidos de corrente, tensão e potência. O circuito regulador de tensão estudado é composto de um resistor e um diodo zener. A carga de saída R_L deverá ter limite inferior e superior, a fim de que o circuito opere em situações de carga máxima e mínima tendo um bom desempenho com respeito à regulação de entrada e de saída.

TERMINOLOGIA

Regulador – É um circuito capaz de controlar uma ou mais variáveis de saída em resposta às variações de variáveis de entrada. Um regulador pode ser elétrico, mecânico, pneumático entre outros, mas a sua resposta é o resultado da comparação com uma referência de entrada.

Fonte de tensão CC – Uma fonte de alimentação de tensão C.C, é um equipamento capaz de produzir nos terminais de saídas, uma tensão desejada. Podem ser ou de tensões fixas ou ajustáveis.

Fonte de corrente CC – Uma fonte de alimentação de corrente CC. É um equipamento capaz de produzir nos terminais de saídas, uma corrente desejada. Pode ser de correntes fixas ou ajustáveis.

Regulador de tensão CC – O regulador de tensão CC. é um circuito capaz de produzir nos terminais de saídas, uma tensão constante. Esses circuitos reguladores mantêm a tensão constante na saída, mesmo tendo uma variação da entrada e uma variação na carga de saída. Essa propriedade dos reguladores aceita dentro de limites pequenas variações nas suas variáveis de controle.

Regulador de corrente CC – O regulador de corrente CC. é um circuito capaz de produzir nos terminais de saídas, uma corrente constante. Esses circuitos reguladores mantêm a corrente constante na saída, mesmo tendo uma variação da entrada e uma variação na carga de saída. Essa propriedade dos reguladores aceita dentro de limites pequenas variações nas suas variáveis de controle.

Regulação de entrada – É um termo usado para especificar na fonte de alimentação o quanto pode-se ter de variação na saída do regulador, em virtude da variação da tensão de entrada do regulador.

Fator de regulação de entrada – O fator de regulação de entrada é um parâmetro que mede o desempenho do regulador com respeito à variação da tensão de entrada. É um índice de qualidade e são considerados bons reguladores aqueles os quais estão na faixa de variação de 0,1% a 0,01%.

Regulação de saída – É um termo usado para especificar na fonte de alimentação o quanto pode-se ter de variação na saída do regulador, em virtude da variação da carga no regulador.

Fator de regulação de saída – O fator de regulação de saída é um parâmetro que mede o desempenho do regulador com respeito à variação da carga de saída. É um índice de qualidade e são considerados bons reguladores aqueles os quais estão na faixa de variação de 0,1% a 0,01%.

EMI – Eletromagnetic Interference – Indica interferência eletromagnética.

ESR – Equivalent serie resistance – É uma série de um elemento reativo com um resistor puro. O equivalente dessa associação é denominado ESR.

Ripple ou fator de ondulação – É um fator que mede o desempenho do filtro que recebe um sinal composto de componente alternada e contínua. O filtro é considerado de bom desempenho quando produz na saída uma maior quantidade de componentes contínuas.

CA – É um termo utilizado para a forma da tensão ou corrente que circula no circuito e significa corrente alternada. .

CC – É um termo utilizado para a forma da tensão ou corrente que circula no circuito e significa corrente contínua.

Corrente (inrush) – É uma quantidade de corrente produzida quando o equipamento é energizado. Esse pico de corrente pode chegar a 5 vezes a corrente nominal do equipamento.

Surto – Um surto de tensão é produto de um transiente da tensão CA. de entrada.

RMS – Root Measurge Square – É um parâmetro que mede o valor eficaz da tensão ou da corrente.

Fator de crista – É a relação entre o valor máximo ou de pico da tensão ou da corrente sobre o valor eficaz.

Tensão em vazio – Quando a fonte não tem nenhuma carga aplicada na sua saída. A corrente de saída da fonte é igual a zero. A tensão em vazio corresponde à tensão nominal da fonte ou a tensão máxima,

Plena carga – Quando a fonte está submetida à carga total da fonte. A corrente de saída da fonte é máxima. A tensão de saída da fonte em plena carga corresponde a uma tensão mínima fornecida.

CONCEITO MATEMÁTICO DA REGULAÇÃO

Um circuito simples de regulação é usado para introduzir o conceito de regulação pela entrada e pela saída. Um cálculo do desempenho do regulador será realizado no ensaio do circuito. Sendo a equação de regulação dada por:

$$\partial V_L = \frac{\partial V_L}{\partial V_E} \Delta V_E + \frac{\partial V_L}{\partial I_L} \Delta I_L + \frac{\partial V_L}{\partial \theta} \Delta \theta + \dots$$

Onde V_L é a tensão que se deseja regular, V_E é a tensão de entrada e I_L a corrente de saída. Da equação são gerados dois parâmetros de regulação A e B, respectivamente relativo à regulação pela entrada e regulação pela saída. Os dois parâmetros são mensuráveis e medem o desempenho do regulador. A variável θ temperatura, um dos fatores que prejudicam a regulação do sistema é desprezada na análise de regulação realizada no circuito regulador a resistor e zener.

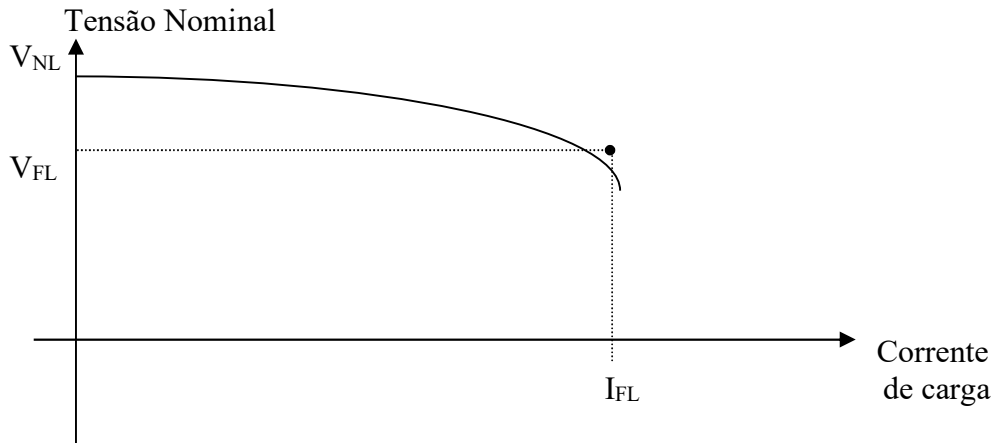
A fonte de alimentação ideal mantém constante a tensão de saída nos seus terminais independente da variação da corrente de saída. Uma fonte de alimentação prática, sempre varia a tensão de saída com a carga. Quanto menor for a variação da tensão na saída maior será a regulação de saída da fonte. Definem-se alguns termos que serão úteis na implementação dos projetos são eles:

Corrente na plena carga é a corrente total que a fonte pode fornecer ou carga total (I_{FL});

Tensão a plena carga é a tensão total que a fonte pode fornecer ou tensão total (V_{FL});

Tensão em vazio é a tensão sem carga (V_{NL}).

A figura a seguir mostra o gráfico da variação da tensão de saída com a carga na saída.



1.1 PORCENTAGEM DE REGULAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA

$$\%Reg. = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100$$

2. FONTES DE TENSÃO – TEORIA E PROJETO

1. Introdução: As fontes de tensão ou as fontes de alimentação têm como princípio de funcionamento, regular a tensão (manter a tensão constante) dentro de limites estabelecidos no projeto para a variação da tensão de entrada, para a variação da corrente de saída e outros parâmetros como temperatura de operação etc...

2.1 EQUAÇÃO GERAL DA REGULAÇÃO DA SAÍDA

$$\partial V_L = \frac{\partial V_L}{\partial V_E} \Delta V_E + \frac{\partial V_L}{\partial I_L} \Delta I_L + \frac{\partial V_L}{\partial \theta} \Delta \theta + \dots$$

3. Diagrama de bloco de uma Fonte de Alimentação de Tensão.

O diagrama abaixo apresenta em bloco a fonte onde:

- V_E = Tensão de entrada da fonte (Não Regulada);
- V_L = Tensão de saída (Regulada)
- I_L = Corrente de Saída (Corrente na Carga)
- R_L = Resistência de saída (Carga da fonte)



3.1 FATORES DE REGULAÇÃO

Denominando de A o fator de regulação da entrada de B o fator de regulação de saída, teremos:

$$A = \frac{\partial V_L}{\partial V_E} \quad e \quad B = \frac{\partial V_L}{\partial I_L}$$

A equação de geral de regulação da fonte de tensão fica:

$$\Delta V_L = A \Delta V_E + B \Delta I_L$$

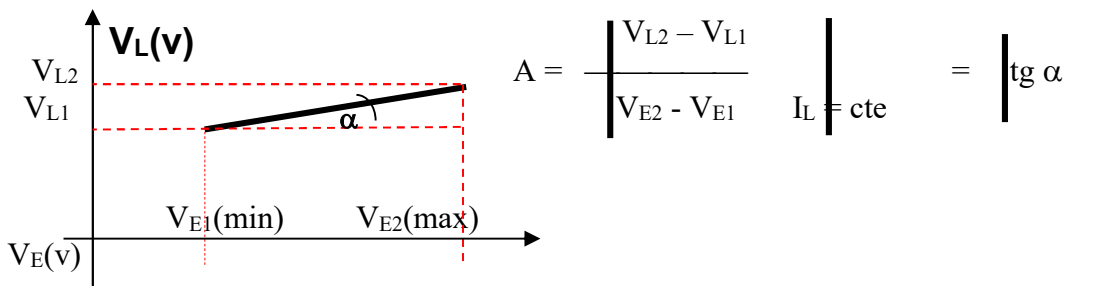
4. CÁLCULO DOS FATORES DE REGULAÇÕES.

a) Pela Variação da tensão de entrada (Regulação de entrada)

Variando-se a tensão de entrada, mantendo R_L constante e medindo a tensão de saída.



a.1 CURVA CARACTERÍSTICA DA REGULAÇÃO PELA ENTRADA



a.2 CÁLCULO DA PORCENTAGEM DE REGULAÇÃO PELA ENTRADA

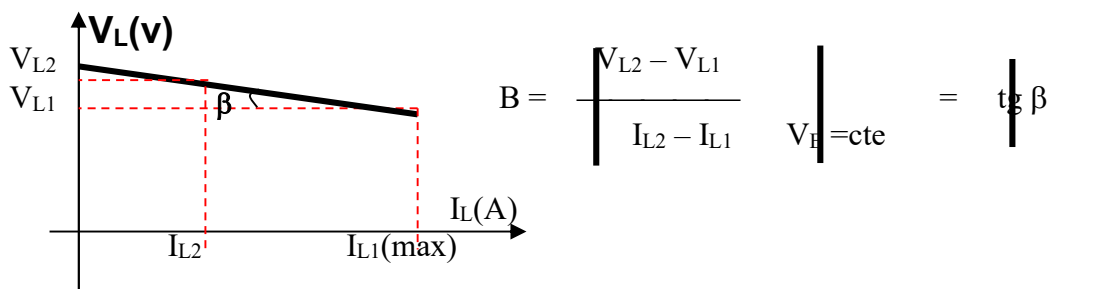
$$\% \text{Reg. Entrada} = A \times 100$$

b) Pela variação da corrente de saída (Regulação de saída)

b.1 Variando-se a corrente de carga através de R_L e mantendo-se a tensão de entrada constante.



a.3 CURVA CARACTERÍSTICA DA REGULAÇÃO PELA SAÍDA



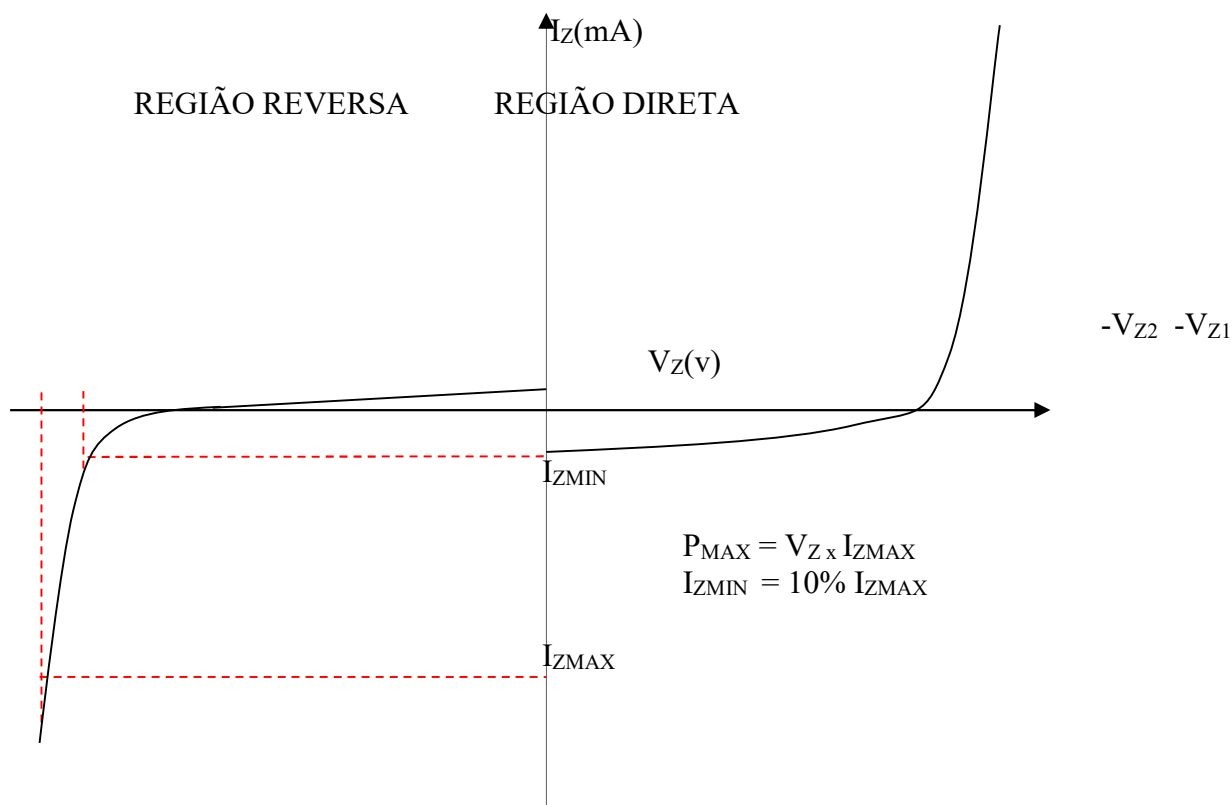
a.4 CÁLCULO DA PORCENTAGEM DE REGULAÇÃO PELA SAÍDA

$$\% \text{Reg. Saída} = B \times 100$$

5. DISPOSITIVO REGULADOR DE TENSÃO

5.1 DIODO ZENER - Pela curva característica do dispositivo é possível entender o seu comportamento dinâmico, suas limitações, faixa admissível de trabalho, suas variações com a temperatura etc...

CURVA CARACTERÍSTICA DO DIODO ZENER



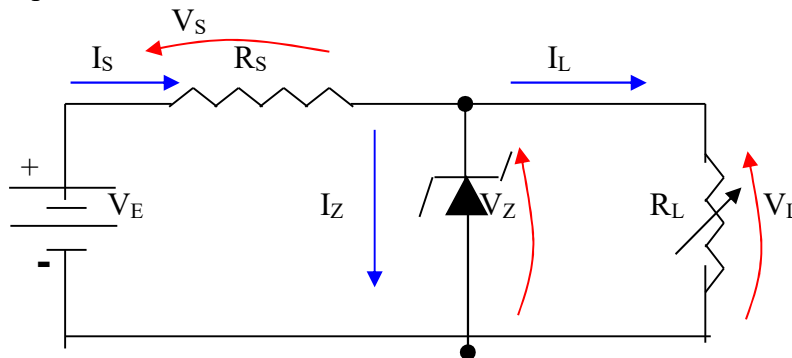
5.2 PORCENTAGEM DE REGULAÇÃO E IMPEDÂNCIA DO ZENER

$$\% \text{Reg. Zener} = \frac{\Delta V_Z}{V_Z} \times 100$$

$$\text{Impedância do Zener} = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z} \Omega$$

6. REGULADOR DE TENSÃO SIMPLES

a) Circuito para análise.



b) RELAÇÕES DE TENSÃO E CORRENTE DO CIRCUITO

$V_Z = \text{constante se } I_{Z\text{MIN}} \leq I_Z \leq I_{Z\text{MAX}}$

$V_Z = V_L$ (Mesmo ponto de medida)

$V_E = V_S + V_Z$ (1) e $I_S = I_Z + I_L$ (2) como $R_S = \text{constante}$.

Isso implica que $V_S = \text{constante}$, ou em (1) $V_E - V_Z = V_S = \text{constante}$ (3)

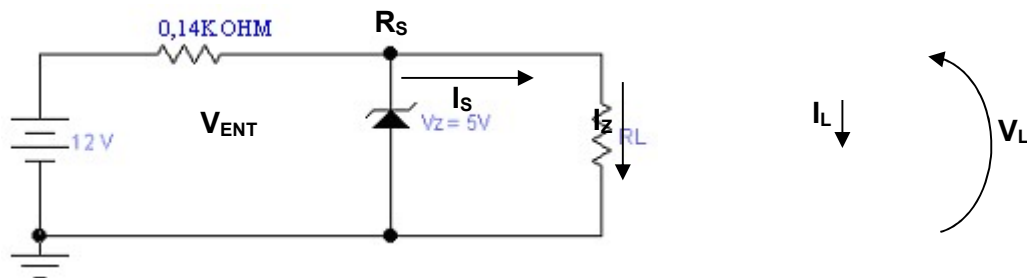
$$I_L = \frac{V_L}{R_L} \quad (4). \text{ Se } R_L = \text{Constante} \Rightarrow I_L = \text{Constante}$$

Obs.: $I_{Z\text{MAX}}$ deve ser uma corrente maior ou igual a corrente máxima de carga.

CONCLUSÃO: Este circuito não permite grandes variações na tensão de entrada e na corrente de saída. Estas variações podem implicar na perda de regulação da tensão de saída (caso a corrente caia abaixo de $I_{Z\text{MIN}}$) ou ultrapassar a dissipação máxima do dispositivo zener, conseqüentemente na sua destruição. A limitação desse circuito é proveniente das correntes de polarização e de carga, as quais são produzidas no mesmo ponto de fornecimento e assim uma flutuação na corrente de carga provoca uma flutuação na corrente de polarização fazendo com que o ponto de trabalho seja altamente dependente da corrente de carga. A inclusão de um Amplificador diminui estes efeitos no zener pelo fator de amplificação do transistor e, portanto o ponto de polarização do zener é praticamente fixo e independente da flutuação da corrente de carga. Alguns circuitos se utilizam da configuração Darlington no transistor de saída, cujo fator ganho é muito alto e assim a influência sobre o ponto de polarização do zener fique reduzida à zero.

REGULADOR DE TENSÃO A ZENER.

Exemplo: Calcular o valor de R_{LMAX} e R_{LMIN} , sabendo-se que a $P_Z = 100mW$?

**SOLUÇÃO:**

1) Cálculo de I_{ZMAX} e I_{ZMIN} . Utilizando de uma fórmula prática experimental para o zener. Pode-se retirar da especificação do fabricante do diodo zener os dados referentes às correntes máximas e mínimas I_{ZMIN} e I_{ZMAX} . Para o problema usaremos a fórmula prática, então:

$$P_Z = I_{ZMAX} \cdot V_Z \Rightarrow I_{ZMAX} = \frac{P_Z}{V_Z} = \frac{100mW}{5V} = 20mA.$$

Sabendo-se que $I_{ZMIN} = 10\%$ de I_{ZMAX} , teremos:

$$I_{ZMIN} = 10\% \text{ de } 20mA = 2mA.$$

2) Cálculo de I_S

$$I_S = \frac{V_{ENT} - V_Z}{R_S} = \frac{12V - 5V}{0,14K\Omega} = \frac{7V}{0,14K} = 50mA.$$

3) Cálculo de R_{LMIN}

Quando R_L é mínimo, a corrente no resistor R_L é máxima, pois no zener a corrente será mínima possível I_{ZMIN} .

$$R_{LMIN} = \frac{V_L}{I_{LMAX}}, \text{ onde } I_{LMAX} = I_S - I_{ZMIN} = 50mA - 2mA = 48mA \text{ e } V_L = V_Z$$

Assim:

$$R_{LMIN} = \frac{5V}{48mA} = 104,1\Omega$$

4) Cálculo de R_{LMAX}

Quando R_L é máximo, a corrente no resistor R_L é mínima, pois no zener a corrente será máxima possível I_{ZMAX} .

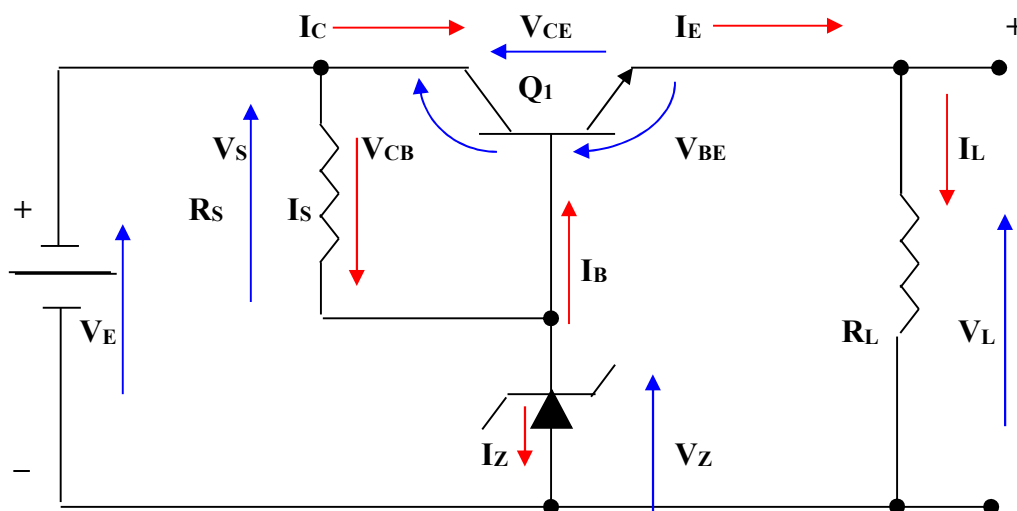
$$R_{LMAX} = \frac{V_L}{I_{LMIN}}, \text{ onde } I_{LMIN} = I_S - I_{ZMAX} = 50\text{mA} - 20\text{mA} = 30\text{mA} \text{ e } V_L = V_Z$$

$$R_{LMAX} = \frac{5\text{V}}{30\text{mA}} = 166,7\Omega$$

ESTUDO DOS REGULADORES DE TENSÕES DE POTÊNCIA MÉDIA.

1. Introdução: O regulador de tensão a transistor permite manipular uma maior potência de saída na carga. O transistor possui um ganho alto de corrente e por isso as variações da corrente I_Z são pequenas, com ou sem carga de saída.

2. CIRCUITO REGULADOR DE TENSÃO A DIODO ZENER E TRANSISTOR



2. ANÁLISE DO CIRCUITO

A) TENSÕES

$$V_E = V_L + V_{CE} \quad (1)$$

$$V_E = V_Z + V_S \quad (2)$$

$$V_S = V_{CE} - V_{BE} \quad (3)$$

$$V_L = V_Z - V_{BE} \quad (4)$$

B) CORRENTES

$$I_C = I_E \text{ (} I_B \text{ desprezível, pois } \beta \text{ é grande)} = I_L \quad (5)$$

$$I_S = I_Z + I_B \quad (6)$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B \quad (7)$$

3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TRANSISTOR E DO ZENER

$$V_{CE\ SAT} = 0,3V, V_{BESAT} = 0,7V.$$

BV_{CEO} = Tensão de ruptura coletor emissor.

$P_{C\ MAX}$ = Potência Máxima do transistor = $V_{CE} \times I_C$.

β = Ganho do transistor.

$P_{Z\ MAX}$ = Potência máxima no zener.

V_Z = Tensão Nominal do zener.

I_C = Corrente máxima do transistor.

4. DIMENSIONAMENTO DA FAIXA DE VALORES PARA O RESISTOR R_S , $I_L = cte$.

Quando I_L é constante, temos $I_B = I_L/\beta$.

$$R_{S\ MIN} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Z\ MAX} + I_B} \text{ e } R_{S\ MAX} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Z\ MIN} + I_B}$$

Adota-se um valor para: $R_{S\ MIN} \leq R_S \leq R_{S\ MAX}$.

5. ANÁLISE DA REGULAÇÃO DE TENSÃO DO CIRCUITO PARA AS SITUAÇÕES DE VARIAÇÕES NA ENTRADA E NA SAÍDA.

Para cada situação deveremos analisar para os efeitos desta variação no transistor e no zener e escolher a condição que satisfaz ambas as situações.

a) Mantendo-se $R_L = constante$ e variando-se V_E para valor mínimo e máximo.

a.1 - Para o zener

$$V_{E\ MIN1} = R_S (I_{Z\ MIN} + I_B) + V_Z \quad (8)$$

$$V_{E\ MAX1} = R_S (I_{Z\ MAX} + I_B) + V_Z \quad (9)$$

a.2 - Para o transistor

$$V_{E\ MIN2} = V_{CE\ MIN} + V_L = V_{CE\ MIN} + V_Z - V_{BE}$$

$$V_{E\ MAX2} = V_{CE\ MAX} + V_L = BV_{CEO} + V_L$$

$$V_{E\text{ MAX3}} = \frac{P_{C\text{ MAX}}}{I_C} + V_L$$

a.3 - Escolha dos valores de entrada $V_{E\text{ MIN}}$ e $V_{E\text{ MAX}}$

- Entre os valores de $V_{E\text{ MIN}}$ escolher o **Maior** valor de $V_{E\text{ MIN}}$.
- Entre os valores de $V_{E\text{ MAX}}$ escolher o **Menor** valor de $V_{E\text{ MAX}}$.

c) Mantendo-se $V_E = \text{constante}$ e variando-se R_L para valor mínimo e máximo.

c.1 - $R_{L\text{ MIN}}$

$$R_{L\text{ MIN}} = \frac{V_L}{I_{L\text{ MAX}}}$$

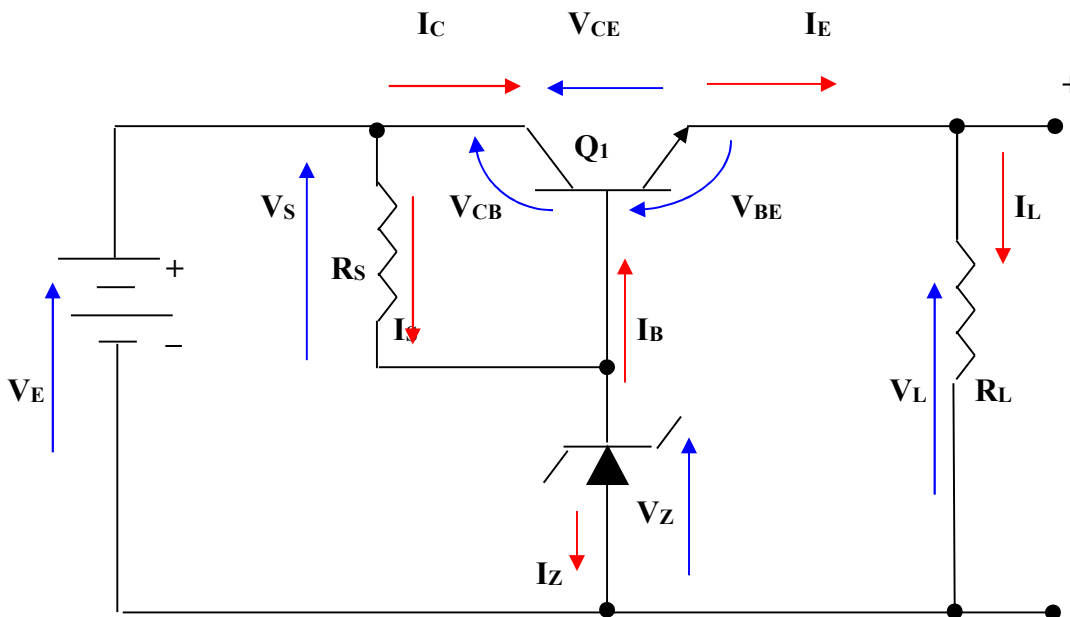
$$I_{L\text{ MAX}} = I_C \therefore I_{L\text{ MAX}} = \frac{V_Z - V_{BE}}{P_{C\text{ MAX}}} \cdot V_{CE} \Rightarrow R_{L\text{ MIN}} = \frac{V_Z - V_{BE}}{P_{C\text{ MAX}}} \cdot V_{CE}$$

c.2 - $R_{L\text{ MAX}} = \infty$

Exemplo: Para os dados fornecidos abaixo, calcular a tensão mínima e máxima da tensão de entrada, carga mínima e máxima de saída, a corrente que circula em R_S e a tensão de saída de uma fonte de tensão, conforme circuito a seguir.

Dados fornecidos: $V_E = 12V$, $R_S = 100\Omega$, $V_Z = 6,2V$, $V_{BESAT} = 0,7V$, $V_{CESAT} = 0,3V$, $BV_{CEO} = 80V$, $I_{C\text{ MAX}} = 1A$, $P_{Z\text{ MAX}} = 1W$, $P_{C\text{ MAX}} = 2W$, $I_{SAÍDA} = 200mA$ e $\beta = 50$.

O REGULADOR DE TENSÃO A DIODO ZENER E TRANSISTOR.



a) Cálculo da corrente de base de Q₁

$$I_B = \frac{I_{SAÍDA}}{\beta} = \frac{200}{50} = 4 \text{ mA}$$

b) Cálculo da corrente de Zener

$$I_{ZMAX} = \frac{P_{ZMAX}}{V_Z} = \frac{1 \text{ W}}{6,2} = 161,2 \text{ mA e } I_{ZMIN} = 10\% I_{ZMAX}.$$

Assim $I_{ZMIN} = 16,12 \text{ mA}$.

c) Mantendo-se $R_L = \text{constante}$, calcula-se V_{EMIN} e V_{EMAX} , para os transistor e zener.

a.1) Para o zener

$$V_{EMIN} = V_Z + R_S (I_{ZMIN} + I_B) = 6,2 + 100(16,13 + 4) \cdot 10^{-3} \cong 8,21 \text{ V}.$$

$$V_{EMAX} = V_Z + R_S (I_{ZMAX} + I_B) = 6,2 + 100(161,3 + 4) \cdot 10^{-3} = 22,73 \text{ V}.$$

a.2) Para o transistor

$$V_{EMIN} = V_{CESAT} + V_L = 0,3 + V_Z - V_{BESAT} = 5,8 \text{ V}.$$

$$V_{EMAX} = V_{CEMAX} + V_L = BV_{CEO} + V_Z - V_{BE} = 85,5 \text{ V}.$$

$$V_{EMAX} = \frac{P_{CMax}}{I_{SAÍDA}} + V_L = \frac{2}{200} = 10 + 5,5 = 15,5 \text{ V}$$

$$\boxed{V_{EMIN} = 8,21 \text{ V e } V_{EMAX} = 15,5 \text{ V}}$$

b) Cálculo de R_{LMIN} e R_{LMAX} , para $V_E = \text{cte}$.

$$R_{LMIN} = \frac{V_L}{I_{LMAX}} = \frac{V_E - V_L}{I_{LMAX}} = \frac{5,5}{(12 - 5,5)} = 17,88 \Omega.$$

$$R_{LMAX} = \frac{V_L}{I_{LMIN}} = \frac{P_{CMAX}}{V_Z - V_{BE}} = \frac{2}{0} = \infty$$

$$\boxed{R_{LMIN} = 17,88 \Omega \text{ e } R_{LMAX} = \infty}$$

REGULADOR DE CORRENTE

Introdução: As fontes de corrente, conhecidas como geradores de corrente, ou cargas ativas, tem como princípio de funcionamento, regular a corrente (manter a corrente constante) dentro de limites estabelecidos no projeto para a variação da tensão de entrada, para a variação da corrente de saída e outros parâmetros como temperatura de operação etc...

1. EQUAÇÃO GERAL DA REGULAÇÃO DA SAÍDA

$$\partial I_L = \frac{\partial I_L}{\partial V_E} \Delta V_E + \frac{\partial I_L}{\partial V_L} \Delta V_L + \frac{\partial I_L}{\partial \theta} \Delta \theta + \dots$$

2. DIAGRAMA DE BLOCO DE UMA FONTE DE CORRENTE.

O diagrama abaixo apresenta em bloco a fonte onde:

V_E = Tensão de entrada da fonte (Não Regulada);

V_L = Tensão de saída (Regulada)

I_L = Corrente de Saída (Corrente na Carga)

R_L = Resistência de saída (Carga da fonte)



3. FATORES DE LINEARES DE ESTABILIDADE

Denominando de **A** o fator de estabilidade da entrada e de **B** o fator de estabilidade de saída, teremos:

$$A = \frac{\partial I_L}{\partial V_E} \quad \text{e} \quad B = \frac{\partial I_L}{\partial V_L}$$

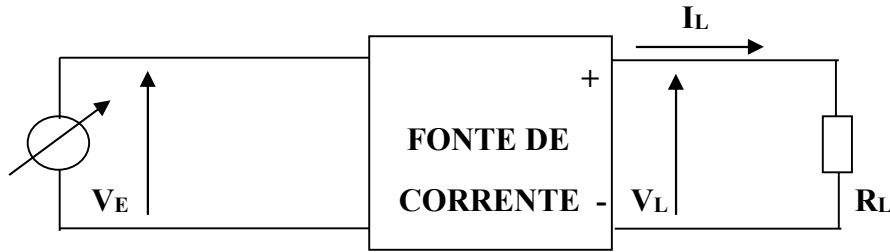
A equação de geral de estabilidade da fonte de corrente fica:

$$\Delta I_L = A \Delta V_E + B \Delta V_L$$

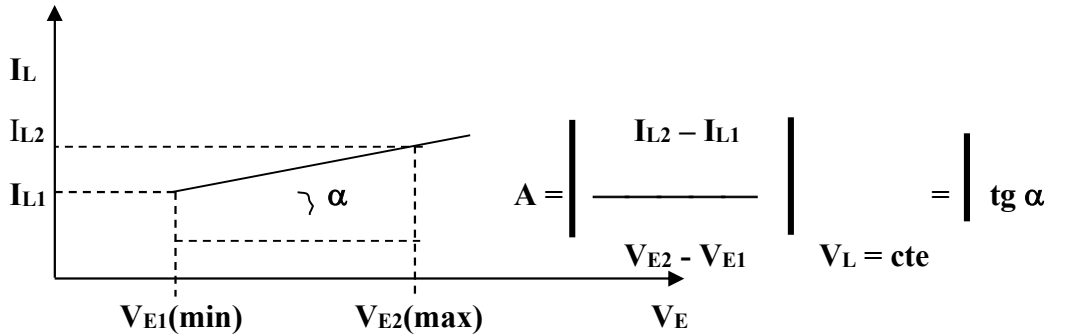
4. CÁLCULO DOS FATORES DE ESTABILIDADES PELA CURVA CARACTERÍSTICA DA CORRENTE DE SAÍDA EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE ENTRADA E TENSÃO DE SAÍDA.

a) Pela Variação da tensão de entrada (Estabilidade de entrada)

Variando-se a tensão de entrada, mantendo R_L constante e medindo a corrente de saída.



5. CURVA CARACTERÍSTICA DA ESTABILIDADE PELA ENTRADA

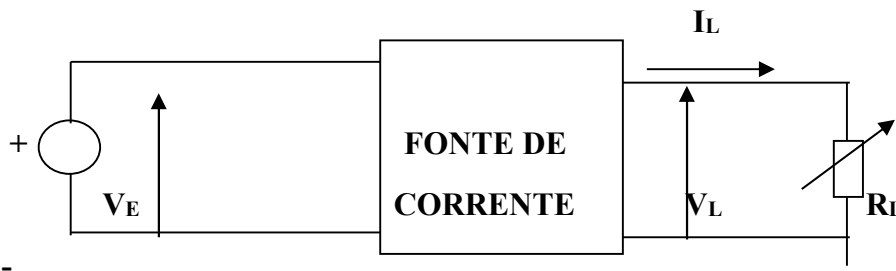


6. CÁLCULO DA PORCENTAGEM DE ESTABILIDADE PELA ENTRADA

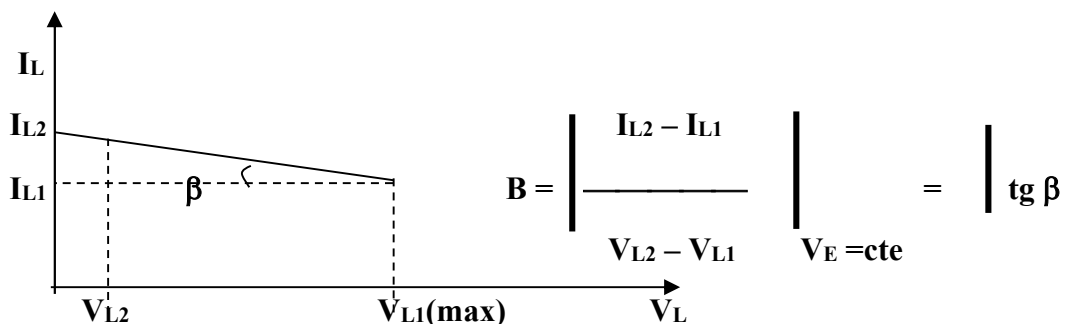
$$\% \text{ Regulação de Entrada} = A \times 100$$

b) Pela variação da corrente de saída (Estabilidade de saída)

Variando-se a corrente de carga através de R_L e mantendo-se a tensão de entrada constante.



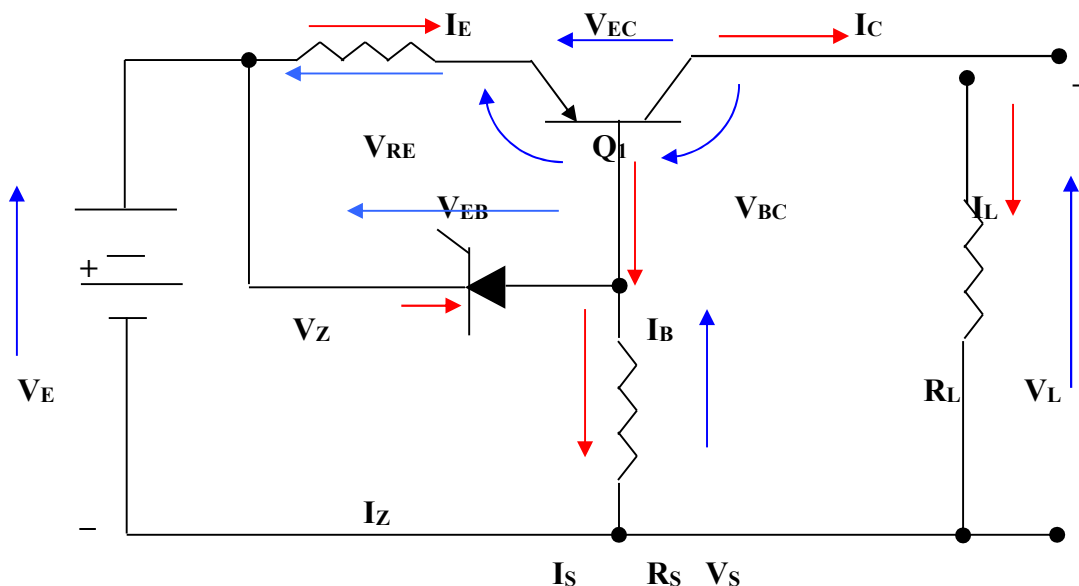
7. CURVA CARACTERÍSTICA DA ESTABILIDADE PELA SAÍDA



8. CÁLCULO DA PORCENTAGEM DE ESTABILIDADE PELA SAÍDA

$$\% \text{Regulação de Saída} = B \times 100$$

9. GERADOR DE CORRENTE A DIODO ZENER E TRANSISTOR



10. ANÁLISE DO CIRCUITO

A) TENSÕES

$$V_E = V_L + V_{EC} \quad (1)$$

$$V_E = V_Z + V_S \quad (2)$$

$$V_Z = V_{RE} + V_{EB} \quad (3)$$

$$V_L = V_S - V_{BC} \quad (4)$$

B) CORRENTES

$$I_C = I_E \quad (I_B \text{ desprezível, pois } \beta \text{ é grande}) = I_L \quad (5)$$

$$I_S = I_Z + I_B \quad (6)$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B \quad (7)$$

11. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TRANSISTOR E DO ZENER

$$V_{EC \text{ SAT}} = 0,3V, \quad V_{EB \text{ SAT}} = 0,7V.$$

BV_{ECO} = Tensão de ruptura coletor emissor.

$P_{C \text{ MAX}}$ = Potência Máxima do transistor = $V_{EC} \cdot I_C$.

β = Ganho do transistor.

$P_{Z \text{ MAX}}$ = Potência máxima no zener.

V_Z = Tensão Nominal do zener.

I_C = Corrente máxima do transistor.

12. DIMENSIONAMENTO DA FAIXA DE VALORES PARA O RESISTOR R_S , $I_L = \text{cte}$.

Quando I_L é constante, temos: $I_B = I_L / \beta$.

$$R_{S \text{ MIN}} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Z \text{ MAX}} + I_B} \quad e \quad R_{S \text{ MAX}} = \frac{V_E - V_Z}{I_{Z \text{ MIN}} + I_B}$$

Adota-se um valor para: $R_{S \text{ MIN}} \leq R_S \leq R_{S \text{ MAX}}$.

13. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE CORRENTE DO CIRCUITO PARA AS SITUAÇÕES DE VARIAÇÕES NA ENTRADA E NA SAÍDA.

Para cada situação deveremos analisar para os efeitos desta variação no transistor e no zener e escolher a condição que satisfaz ambas as situações.

a) Mantendo-se $R_L = \text{constante}$ e variando-se V_E para valores mínimo e máximo.

a.1 - Para o zener

$$V_{E \text{ MIN}1} = R_S (I_{Z \text{ MIN}} + I_B) + V_Z \quad (8)$$

$$V_{E \text{ MAX}1} = R_S (I_{Z \text{ MAX}} + I_B) + V_Z \quad (9)$$

a.2 - Para o transistor

$$V_{E \text{ MIN}2} = V_{EC \text{ MIN}} + V_L + V_{RE} = V_{CE \text{ MIN}} + I_L(R_E + R_L)$$

$$V_{E \text{ MAX}2} = \frac{V_{EC \text{ MAX}} + V_L}{P_{C \text{ MAX}}} = BV_{ECO} + I_L(R_E + R_L)$$

$$V_{E \text{ MAX}3} = \frac{V_{EC \text{ MAX}} + V_L}{I_L} + I_L(R_E + R_L)$$

a.3 - Escolha dos valores de entrada $V_{E \text{ MIN}}$ e $V_{E \text{ MAX}}$

- Entre os valores de $V_{E \text{ MIN}}$ escolher o **Maior** valor de $V_{E \text{ MIN}}$.
- Entre os valores de $V_{E \text{ MAX}}$ escolher o **Menor** valor de $V_{E \text{ MAX}}$.

c) Mantendo-se $V_E = \text{constante}$ e variando-se R_L para valor mínimo e máximo.

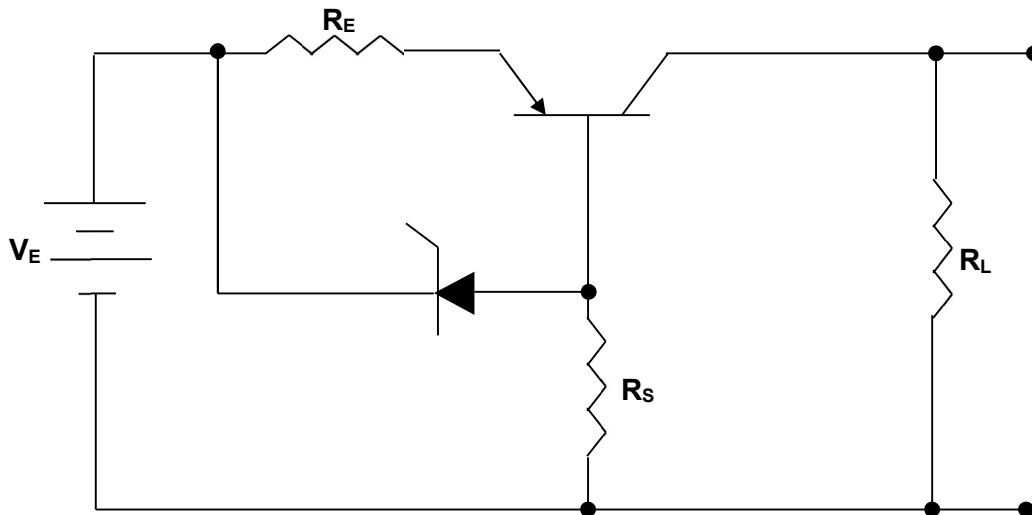
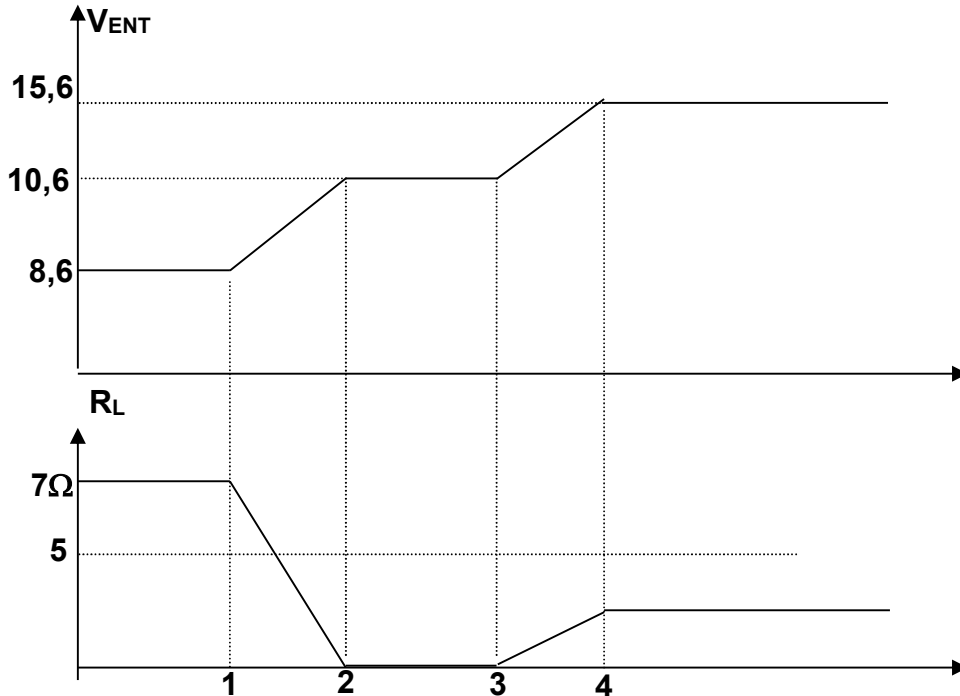
c.1 – $R_{L \text{ MIN}}$

$$R_{L \text{ MIN}} = \frac{V_E - V_{EC \text{ MAX}} - R_E I_L}{I_L}$$

$$V_E - V_{EC \text{ SAT}} - R_E I_L$$

$$c.2 - R_{L \text{ MAX}} = \frac{V_E - V_{EC \text{ SAT}} - R_E I_L}{I_L}$$

Exercício: De acordo com o gráfico apresentado, determinar para estas condições apresentadas se os componentes estão de acordo com a faixa de operação permitida. São dados: $R_S = 100 \Omega$, $V_Z = 5,6V$, $P_Z = 560mW$, $\beta = 50$, $V_{CEMAX} = 80V$, $V_{BE} = 0,6V$, $P_{C_{MAX}} = 4W$, $I_{C_{MAX}} = 1A$, $V_{EB} = 0,6V$ e $R_E = 10\Omega$.



Solução: Para a fonte de corrente, temos:

I - ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA TENSÃO DO CIRCUITO.

Para cada situação deveremos analisar para os efeitos desta variação no transistor e no zener e verificar se estas não provocam situações fora do limite de operação dos dispositivos.

Pela relação de potência e tensão no zener, calcula-se:

$I_{ZMAX} = 100\text{mA}$ e $I_{ZMIN} = 10\text{mA}$.

Do gráfico de R_L , calcularemos as correntes de saída e de base.

$$V_{RE} = 5\text{V}$$

$$V_{RE} = V_Z - V_{EB} = 5,6 - 0,6 = 5,0\text{V}. \quad I_{SAÍDA} = \frac{V_{RE}}{R_E} = \frac{5,0\text{V}}{10\Omega} = 0,5\text{A}.$$

$$I_{SAÍDA} = 500\text{mA}$$

Como $I_{SAÍDA} = \text{Constante} \Rightarrow I_B = \frac{I_{SAÍDA}}{\beta} = \frac{500\text{mA}}{50} = 10\text{mA}$.

1) $R_L = 7\Omega \Rightarrow V_{SAÍDA} = 7 \cdot 0,5 = 3,5\text{V} \quad V_{EC} = V_E - V_{RE} - V_{SAÍDA} = 8,6 - 5 - 3,5 = 0,1\text{V}$.

2) $R_L = 0\Omega \Rightarrow V_{SAÍDA} = 0 \cdot 0,5 = 0,0\text{V} \quad V_{EC} = V_E - V_{RE} - V_{SAÍDA} = 10,6 - 5 - 0 = 5,6\text{V}$.

3) $R_L = 5\Omega \Rightarrow V_{SAÍDA} = 5 \cdot 0,5 = 2,5\text{V} \quad V_{EC} = V_E - V_{RE} - V_{SAÍDA} = 15,6 - 5 - 2,5 = 7,6\text{V}$.

Do gráfico de V_E , calcularemos a corrente I_S .

$$I_S = \frac{V_E - V_Z}{R_S} = \frac{8,6 - 5,6}{100} = 30\text{mA}.$$

$$I_S = \frac{V_E - V_Z}{R_S} = \frac{10,6 - 5,6}{100} = 50\text{mA}.$$

$$I_S = \frac{V_E - V_Z}{R_S} = \frac{15,6 - 5,6}{100} = 100\text{mA}.$$

$$I_S = \frac{V_E - V_Z}{R_S} = \frac{15,6 - 5,6}{100} = 100\text{mA}.$$

a) Para o zener.

$$I_S = I_Z + I_B$$

1) $I_Z = I_S - I_B = 30\text{mA} - 10\text{mA} = 20\text{mA}$.

2) $I_Z = I_S - I_B = 50\text{mA} - 10\text{mA} = 40\text{mA}$.

3) $I_Z = I_S - I_B = 100\text{mA} - 10\text{mA} = 90\text{mA}$.

Pelos itens acima o zener opera dentro das condições normais e na faixa de operação I_{ZMAX} e I_{ZMIN} .

1) $PC_{MAX} = V_{ECMAX} \cdot I_L = 0,1 \cdot 500\text{mA} = 50\text{mW}$.

2) $PC_{MAX} = V_{ECMAX} \cdot I_L = 5,6 \cdot 500\text{mA} = 2,8\text{W}$.

4) $PC_{MAX} = V_{ECMAX} \cdot I_L = 7,6 \cdot 500\text{mA} = 3,8\text{W}$.

Pelo item 3 acima, vemos que o transistor opera dentro da especificação, pois a potência dissipada real máxima é de 3,8W contra 4W de potência teórica.

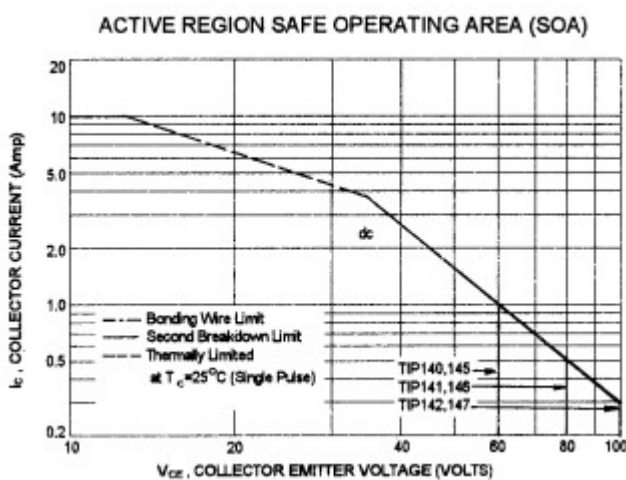
DISSIPACÃO EM POTÊNCIA

CÁLCULO DE POTÊNCIA EM TRANSISTORES

I – Em regime de pulsos.

Os transistores de potência em regime de pulsos seguem uma curva de limitação que é chamada de SOA – Safety Operating Area. Quando opera dentro desta área o transistor está fora da área de risco e está garantida a operação segura.

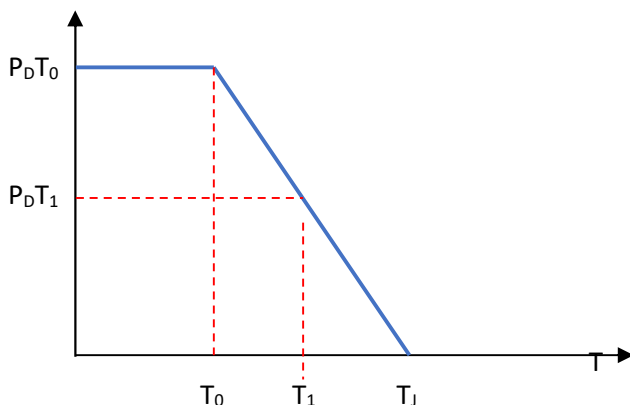
O transistor a seguir TIP 142 apresenta a curva SOA – polarização direta.



Nos IGBTs são apresentadas duas curvas FBSOA e RBSOA – polarização reversa.

Dissipação de Calor

Num projeto de amplificadores de potência é muito importante o dimensionamento dos transistores. Para isso alguns conceitos devem ser introduzidos para um efetivo projeto. A curva apresentada a seguir é delimitação da potência pela temperatura para um transistor de potência.



P_{DT_0} = Potência máxima (W)

P_{DT_1} = Potência na temperatura T_1 (W)

T_0 = Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

T_1 = Temperatura de trabalho ($^{\circ}C$)

Os dados de potência, temperatura inicial e de encapsulamento (junção), bem como a curva de delimitação de potência são fornecidos pelo fabricante.

Da curva de delimitação temos:

$$P_D T_1 = P_D T_0 - (T_1 - T_0) \cdot \text{fator de delimitação.}$$

Fator de delimitação é dado pelo fabricante, mas pode ser calculado da curva de delimitação, como:

$$\frac{W}{^\circ\text{C}} = \frac{\Delta P}{\Delta T}$$

Onde $\Delta P = P_D T_0$ e $\Delta T = T_J - T_0$.

Exemplo: Os dados a seguir são referentes ao transistor de potência, onde $P_D(\text{max}) = 80\text{W}$, na temperatura ambiente de 25°C e o fator de delimitação é de $0,5\text{W}/^\circ\text{C}$. Pede-se:

a) Qual a potência disponível para a temperatura de 125°C ?

b) Qual a temperatura de junção (encapsulamento).

a) $P_D T_1 = P_D T_0 - (T_1 - T_0) \cdot \text{fator de delimitação} = 80\text{W} - (125^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \cdot 0,5\text{W}/^\circ\text{C} = 30\text{W}$.

b) $P_D T_J = 0 \Rightarrow P_D T_0 = (T_J - T_0) \cdot \text{fator de delimitação}$.

$$T_J = P_D T_0 / \text{fator de delimitação} + T_0 = 80 / 0,5 + 25 = 185^\circ\text{C}.$$

Resistências térmicas

θ_{JA} = resistência térmica entre junção e ambiente.

θ_{JC} = resistência térmica entre junção e encapsulamento.

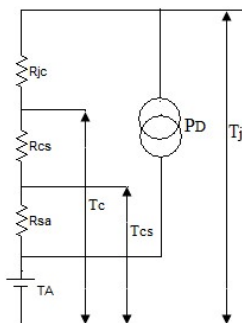
θ_{CS} = resistência térmica entre encapsulamento e dissipador ou radiador.

θ_{SA} = resistência térmica entre radiador e ambiente.

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{AS}$$

Sendo $T_J = P_D \theta_{JA} + T_A$, onde $\theta_{JC} = ^\circ\text{C}/\text{W}$.

Modelo térmico



$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}$$

$$T_J - T_C = P_D \theta_{JC}$$

Exemplo: Para $P_D = 50\text{W}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $T_C = 50^\circ\text{C}$ e $\theta_{JC} = 0,5 ^\circ\text{C}/\text{W}$. Determinar a temperatura de junção.

$\theta_{JA} = 40^\circ\text{C}/\text{W}$ sem dissipador de calor. Para 1W de potência a temperatura de junção sofrerá um acréscimo de 40W .

Para $\theta_{SA} = 2^{\circ}\text{C}/\text{W}$ e $\theta_{CS} = 0,8^{\circ}\text{C}/\text{W}$, determinar o aumento de temperatura no transistor, sabendo-se que $\theta_{JC} = 0,5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ e o transistor está operando com uma potência de 2W.

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{AS} = 0,5^{\circ}\text{C} + 0,8^{\circ}\text{C}/\text{W} + 2,0^{\circ}\text{C}/\text{W} = 3,3^{\circ}\text{C}/\text{W}.$$

$$T_J - T_A = P_D \theta_{JA} \Rightarrow T_J - T_C = 2\text{W} \times 3,3^{\circ}\text{C}/\text{W} = 6,6^{\circ}\text{C} \text{ Acréscimo de temperatura.}$$

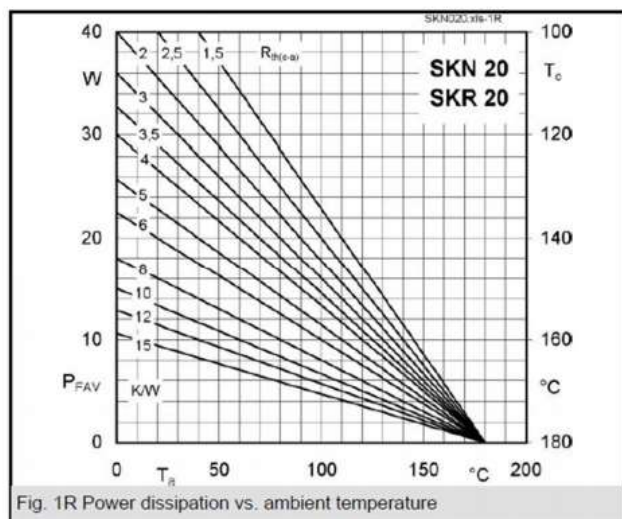
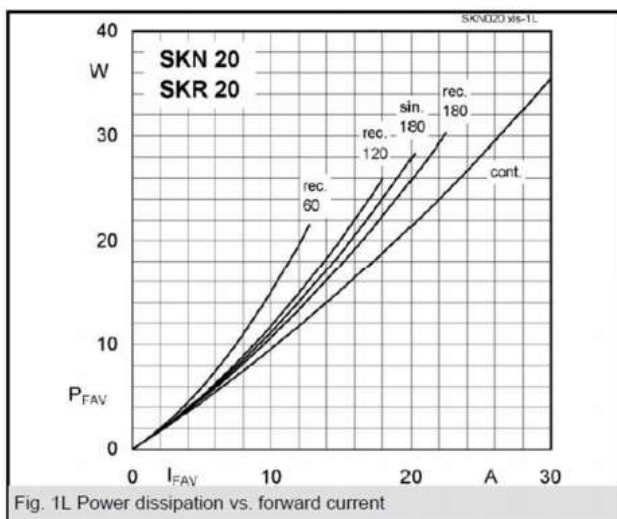
$$\text{Para } T_A = 25^{\circ}\text{C} \Rightarrow T_J = 25 + 6,6 = 31,6^{\circ}\text{C}.$$

Isolantes térmicos e radiadores A seguir para a dissipação de potência é recomendado que a resistência térmica seja mínima e para isso é necessário seguir alguns dos procedimentos.

1. Pasta térmica – Deve-se aplicar no dispositivo para que não crie bolhas de ar entre o dispositivo e o radiador e diminuir a resistência térmica, pois a pasta é um bom condutor térmico;
2. Isolante – Por exemplo mica, um bom condutor térmico e ótimo isolante elétrico para que o dispositivo fique isolado do dissipador, pois pode ter outros dispositivos sejam colocados no mesmo dissipador e, portanto, um fechamento elétrico seria provocado pela falta de isolamento entre os dispositivos. A mica faz o papel de isolante elétrico e deve-se isolar parafusos de fixação do dispositivo no dissipador para evitar o fechamento elétrico.



■ **Curvas para cálculo térmico de diodos**



- (a) Potência dissipada P_{FAV} em função da corrente direta média $I_{med}(I_{FAV})$
- (b) Temp. da cápsula T_c em função da temp. ambiente T_a para diferentes resistências térmicas

BIBLIOGRAFIA

Referência: Livro Texto: Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.

Autores: Robert Boylestad e Louis Nashelsky, editora Pearson, Prentice Hall, 11.a edição, ano 2013.

OUTRAS REFERÊNCIAS

Microeletrônica – Sedra, A.S e Smith, K,C – 5.a edição Pearson.

1. Eletrônica Vol.1 – Malvino, A.P – 14.a edição, Editora Makron,
2. Circuitos Elétricos - Nilsson, J. W. / Riedel, S. A. / Marques, A. S., ano de 2008 Prentice Hall Brasil.
3. Circuitos com transistores Bipolares e MOS - Silva, M. M./Calouste, G., ano de 2010.
4. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.1 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.
5. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.2 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.