

- **Análise para pequenos sinais de circuitos com dois Transistores**

Tipos de Configurações ou Conexões mais importantes:

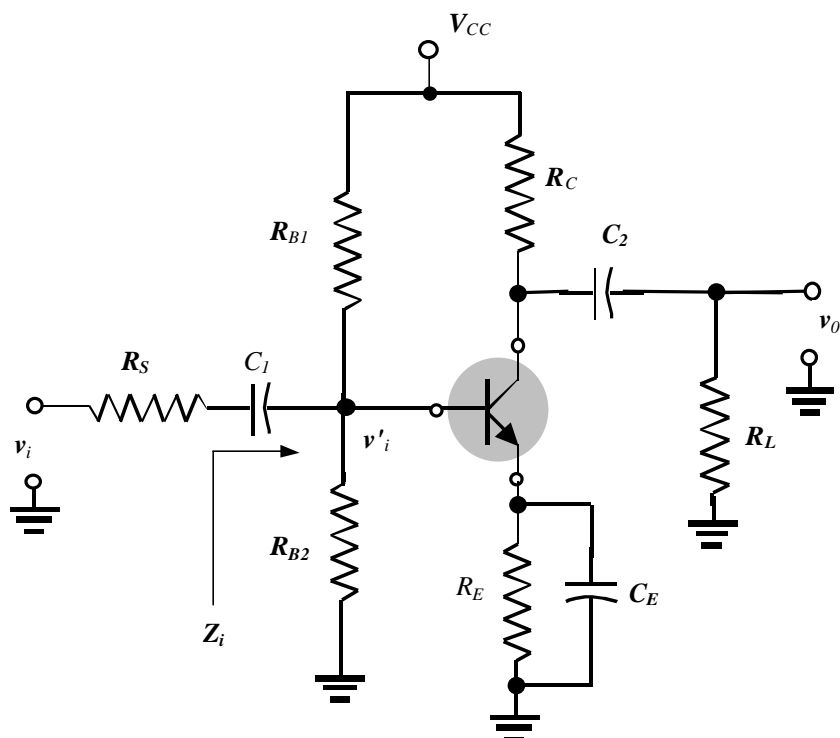
- 1) Cascata
- 2) Cascode
- 3) Darlington
- 4) Par realimentado
- 5) Espelho de corrente
- 6) Par diferencial

✓ Configuração em cascata

A principal função desta configuração é conseguir alto ganho sem detrimento da banda passante.

O arranjo mais comum desta configuração é cascatear dois (estágios) amplificadores emissor comum, como mostrado na figura abaixo. Mais que dois estágios podem ser cascateados, mas a análise com apenas dois estágios pode ser generalizada para qualquer números.

Antes de iniciarmos análise desta configuração vamos verificar o efeito da impedância da fonte (R_S) e da carga (R_L) em amplificadores já que (para simplicidade) estes foram analisados sem estes efeitos. Como mostrados abaixo

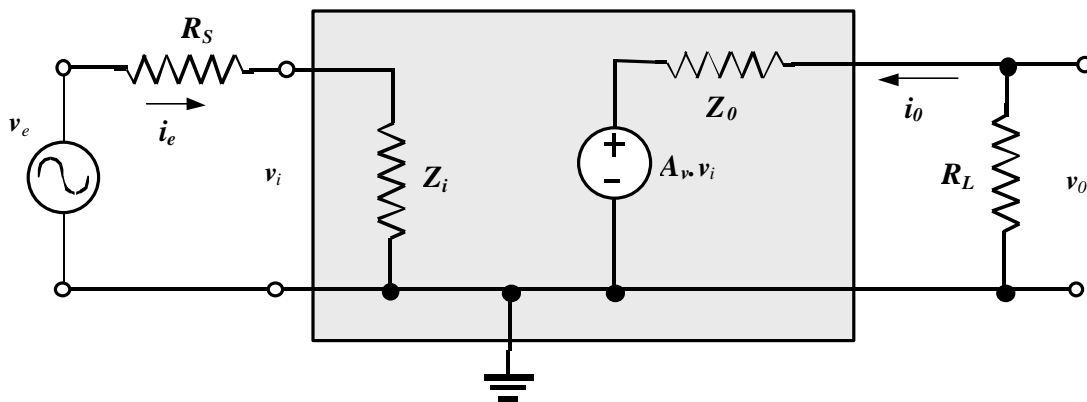


Amplificador emissor comum com resistência de fonte e de carga

Efeitos de R_S e R_L

- ✓ O efeito da resistência de carga é de **reduzir a impedância na saída** e consequentemente **reduzir o ganho de tensão do amplificador**. Esta resistência pode modificar a impedância de entrada. Esta ainda também modifica a máxima excursão do sinal de saída devido a mudança na reta de carga.
- ✓ O efeito da **resistência de fonte R_S** é de **reduzir a tensão** de entrada aplicada ao amplificador (v_i) por divisor resistivo R_S e Z_i , e consequentemente reduzir o ganho de tensão do amplificador. Em **algumas configurações a resistência de fonte R_S modifica a resistência de saída** do amplificador.

Para exemplificar, vamos representar um amplificador por um quadripolo como mostrado abaixo.



Considerando os efeitos de R_S e R_L no ganho do amplificador

No lado da entrada temos,

$$v_i = Z_i / (R_S + Z_i) v_e \quad \text{ou}$$

$$v_i / v_e = Z_i / (R_S + Z_i)$$

No lado da saída temos,

$$v_o = R_L / (R_L + Z_o) A_v v_i \quad \text{ou}$$

$$v_o / v_i = R_L / (R_L + Z_o) A_v$$

O ganho geral do amplificador (A_{vG}) é dado por:

$$A_{vG} = v_o / v_e = v_o / v_i \cdot v_i / v_e \quad \text{que resulta em,}$$

$$A_{vG} = R_L / (R_L + Z_o) \cdot Z_i / (R_S + Z_i) \cdot A_v$$

(79)

Como pode ser observado na expressão (79) o ganho A_{vG} menor do que o ganho do amplificador (A_v) devido a R_S e R_L .

Além disso, como

$$i_e = v_e / (R_S + Z_i) \quad e$$

$$i_0 = -v_0 / R_L \quad \text{então,}$$

$$A_{iG} = i_0 / i_e = - (R_S + Z_i) / R_L v_0 / v_e$$

$$A_{iG} = - (R_S + Z_i) / R_L A_{vG}$$

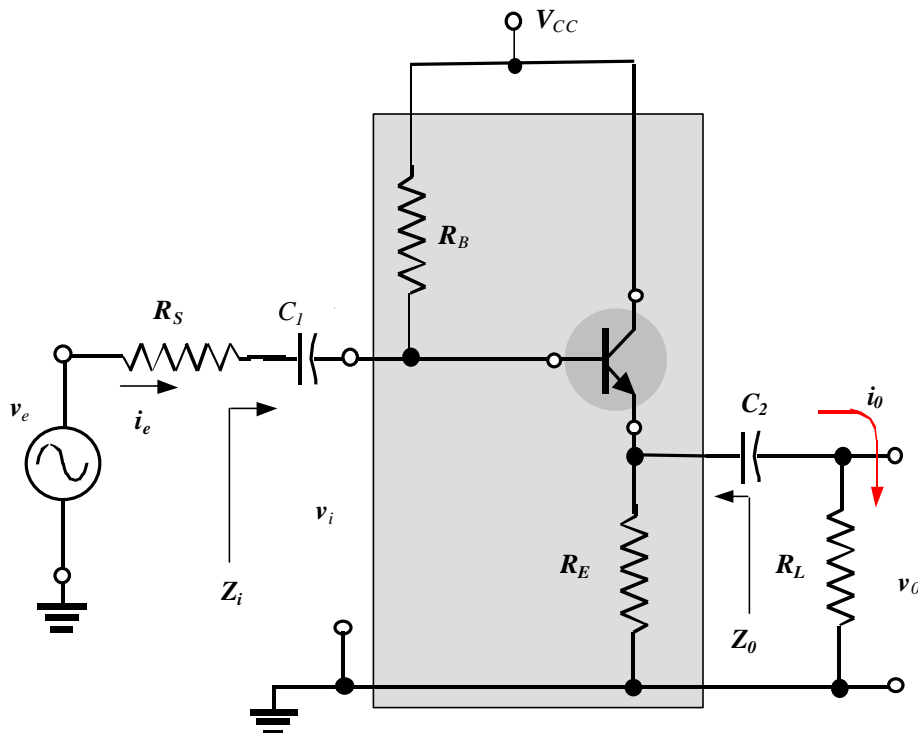
Substituindo a equação (79) resulta

$$A_{iG} = - A_v Z_i / (R_L + Z_0) \quad (80)$$

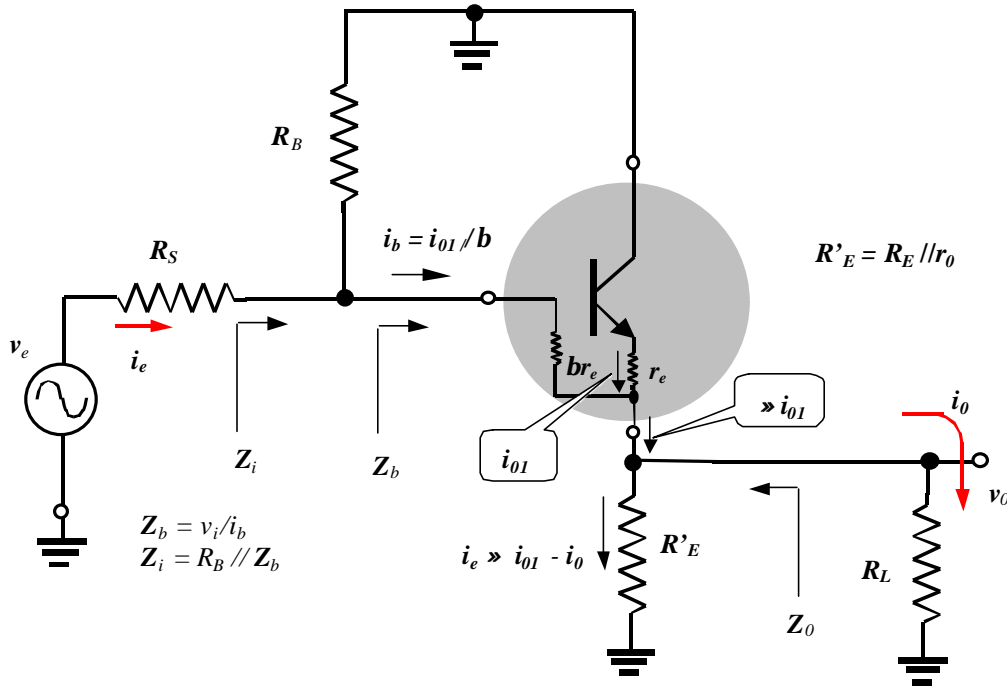
Note que agora o ganho de corrente também foi reduzido.

Como exercício vamos novamente determinar as impedâncias de entrada e saída e os ganho de corrente e de tensão de amplificador seguidor de emissor, agora, levando-se em conta as resistências de fonte e de carga.

Configuração seguidor de emissor



Na Banda de interesse, XC_1 , XC_2 estão em curto e para análise incremental (AC) toda fonte de tensão constante está em curto com o terminal comum.



Da figura inicial vemos que r_o está em paralelo com R_E de maneira que chamaremos $R'_E = R_E // r_o$.

Note que aproximamos a corrente que sai do terminal de emissor para i_{o1} , isto é o mesmo que aproximar $b+1$ para b .

Note ainda que, R_L está em paralelo com R_E . Da figura acima vemos (baseado em análises anteriores) que a impedância no terminal do emissor ($R'_E // R_L$) “aparece refletida” na base multiplicado por $(b+1)$, assim

$$Z_B = b r_e + (b+1) R^*_E$$

$$Z_B \gg b(r_e + R^*_E)$$

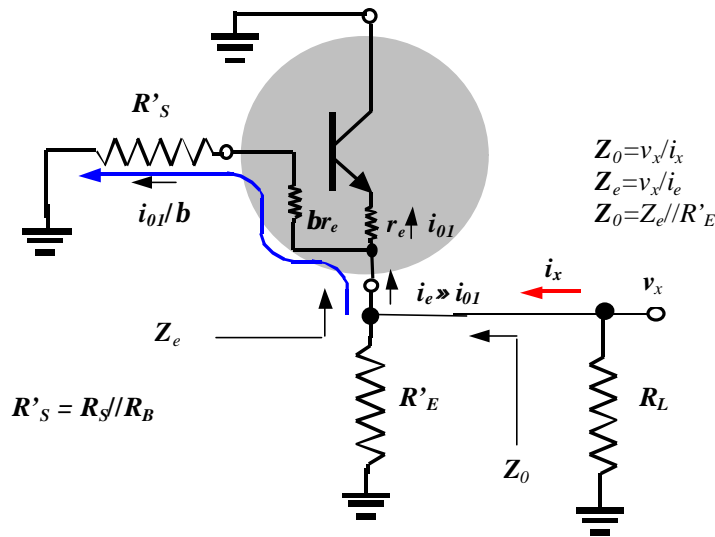
(81)

sendo $R^*_E = R'_E // R_L$

e

$$Z_i = R_B // Z_B$$

Para a determinação de Z_0 , vamos redesenhar a porção de saída do circuito com v_e em zero.



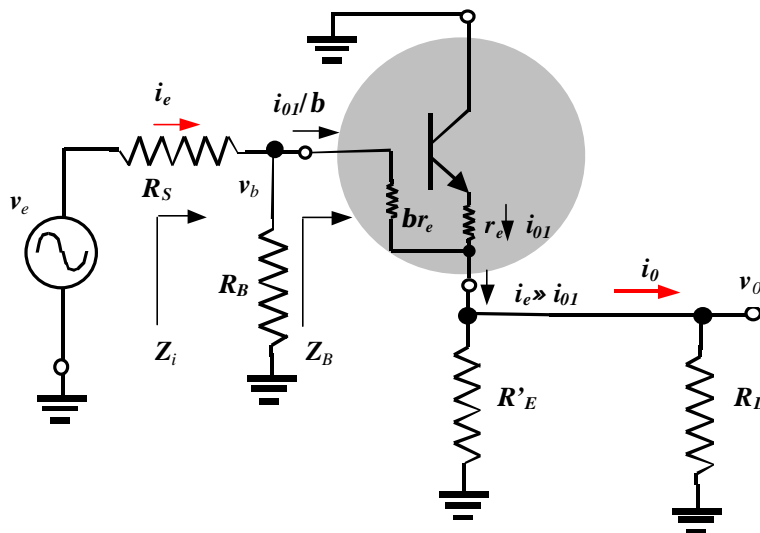
Da figura acima percorrendo a malha emissor base (azul) e já aproximando i_e para i_{01} que equivale a fazer $b+1 \gg b$ temos,

$$v_x = b r_e i_{01} / b + R_S i_{01} / b \gg r_e i_e + R_S i_e / b \quad \text{logo}$$

$$Z_e = v_x / i_e \gg r_e + R_S / b \quad (82)$$

A equação (82) mostra que a impedância no terminal de base “aparece refletida” no emissor dividida por b (de fato $b+1$ sem aproximação).

Para a determinação do ganho de tensão vamos nos referenciar a figura abaixo.,



Da figura temos,

$$v_b = Z_i / (Z_i + R_S). v_e = R_B // Z_B / (R_B // Z_B + R_S). v_e \quad (83)$$

e como a saída v_0 é claramente a o sinal v_b dividido pelo do divisor resistivo r_e e $R'_E // R_C = R^*_E$ então

$$v_0 = R^*_E / (R^*_E + r_e) v_b \quad (84)$$

Substituindo (84) em (83) resulta,

$$v_0 = Z_i / (Z_i + R_S). R^*_E / (R^*_E + r_e). v_e$$

logo

$$A_{vG} = v_0 / v_e = Z_i / (Z_i + R_S). R^*_E / (R^*_E + r_e) \quad (85)$$

Para a determinação do ganho de corrente, nos reportando ainda à figura anterior temos,

1. A corrente i_{01} / \mathbf{b} é igual a corrente i_e dividida pelo divisor resistivo R_B e Z_B .
2. A corrente i_0 é igual a corrente $i_e \gg i_{01}$ ($\mathbf{b}+1 \gg \mathbf{b}$) dividida pelo divisor resistivo R'_E e R_L .

Então,

$$i_{01} / \mathbf{b} = R_B / (Z_B + R_B). i_e \quad (86)$$

e

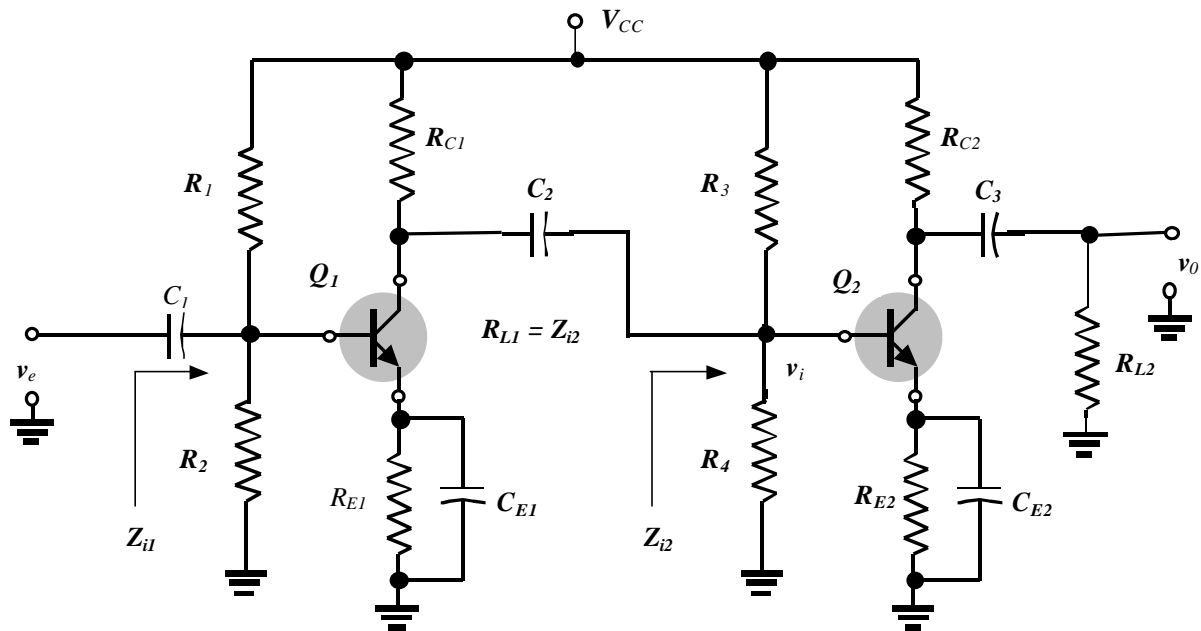
$$i_0 = R'_E / (R_L + R'_E). i_{01} \quad (87)$$

então, substituindo (87) em (86) resulta,

$$A_{iG} = i_0 / i_e = \mathbf{b} [R'_E / (R_L + R'_E)] [R_B / (Z_B + R_B)] \quad (88)$$

Ou seja, o ganho de corrente é reduzido pelo de seu valor máximo \mathbf{b} , pelos divisores de corrente da entrada e saída do circuito.

A figura abaixo mostra uma configuração típica de um amplificador com dois transistores montados em emissor comum em cascata.



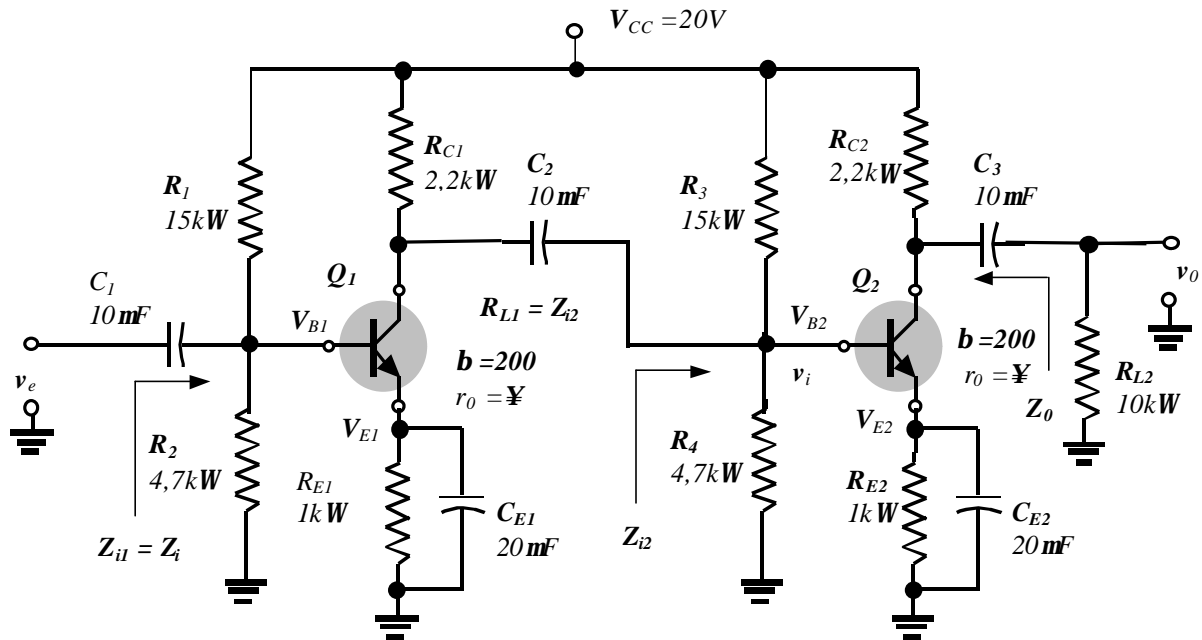
Amplificador em cascata

- Para calcular os parâmetros desta configuração a melhor abordagem é separarmos em duas configurações emissor comum, onde a impedância de entrada do segundo estágio é igual a impedância de carga do primeiro.
- O conhecimento de configurações mais básicas devem ser amplamente explorados a fim de rapidamente fazer a análise.
- Nesta instante é importante as aproximações, pois isto simplifica bastante a análise do circuito. Note que o importante para o projetista de circuito é entender de forma qualitativa como um certo elemento de circuito influencia em seu comportamento.
- Uma vez feita a análise mais aproximada possível, esta pode ser refeita com alto grau de precisão utilizando-se de simuladores elétrico.

Como exemplo, faremos a análise de um amplificar em cascata abaixo.

• **Exercício:**

Calcule o ganho de tensão, impedância de entrada e a impedância de saída para o amplificador a transistor bipolar em cascata mostrado abaixo.



• **Solução:**

1) **Análise DC**

A análise dc para os dois estágios é idêntica (propositalmente). Observando que:

$$R_1 // R_2 = 15k\Omega // 4,7k\Omega \gg 3,57k\Omega \ll (b+1)R_{E1} = (201)1k\Omega = 201k\Omega$$

então a tensão na base dos transistores, $V_{B1} = V_{B2}$ será dada por:

$$V_{B1} = V_{B2} \gg R_2 / (R_2 + R_1) V_{CC} = 4,7k\Omega / (15k\Omega + 4,7k\Omega) 20V \gg 4,7V$$

e

$$V_{E1} = V_{E2} = V_{B1} - V_{BE} = 4,7V - 0,7V = 4,0V$$

$$I_{E1} = I_{E2} \gg I_{C1} = I_{C2} = V_{E1} / R_{E1} = 4,0V / 1k\Omega = 4mA$$

Logo

$$r_{e1} = r_{e2} = V_T / I_C = 26mV / 4mA = 6,5\Omega$$

2) Análise AC

a) A impedância de entrada do amplificador é:

$$Z_i = Z_{i1} = R_1 // R_2 // (b+1)r_{e1}$$

$$= 4,7k\Omega // 15k\Omega // (201)6,5\Omega \gg 955\Omega$$

b) A impedância de saída do amplificador é:

$$Z_o = Z_{o2} = R_C = 2,2k\Omega$$

c) O ganho de tensão do amplificador será igual ao ganho de tensão do primeiro estágio multiplicado pelo ganho de tensão do segundo estágio.

Observando que a impedância de carga do primeiro estágio (R_{L1}) é igual a impedância de entrada do segundo estágio então,

$$R_{L1} = Z_{i2} = Z_{i1} = R_3 // R_4 // (b+1)r_{e2} \gg 955\Omega$$

Assim o ganho de tensão do primeiro estágio é dado por

$$A_{v1} = - R_{L1} // R_{C1} / r_{e1} = -955\Omega // 2,2k\Omega / 6,5\Omega \gg -102,4$$

O ganho do segundo estágio é imediato

$$A_{v2} = - R_{L2} // R_{C2} / r_{e2} = -10k\Omega // 2,2k\Omega / 6,5\Omega \gg -277,4$$

Logo o ganho total é

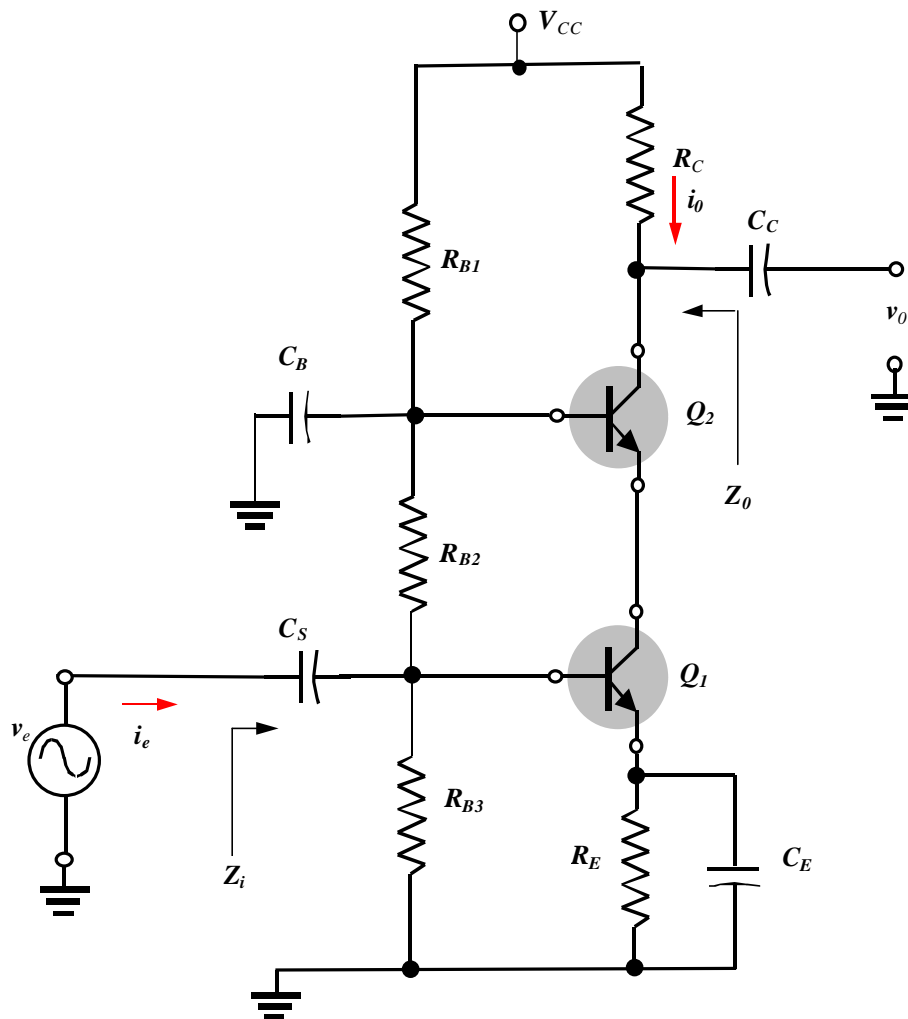
$$A_{vG} = A_{v1} \cdot A_{v2} = (-102,4)(-277,4) = 28.405$$

❖ Note que o ganho é positivo e muito maior do que um simples estágio.

✓ Configuração cascode

A principal função desta configuração é conseguir alta impedância de entrada com ganho de tensão moderado em altas frequências.

O arranjo mais comum desta configuração é cascatear (estágios) um amplificador emissor comum com um estágio base comum, como mostrado na figura abaixo. Esta configuração permite que a capacitância base coletor do transistor do primeiro estágio não seja amplificada pelo efeito miller ilustrado abaixo.



Amplificador – Circuito cascode

Função dos componentes

C_S, C_E, C_C ----- Já conhecidos. Bloqueio de nível DC

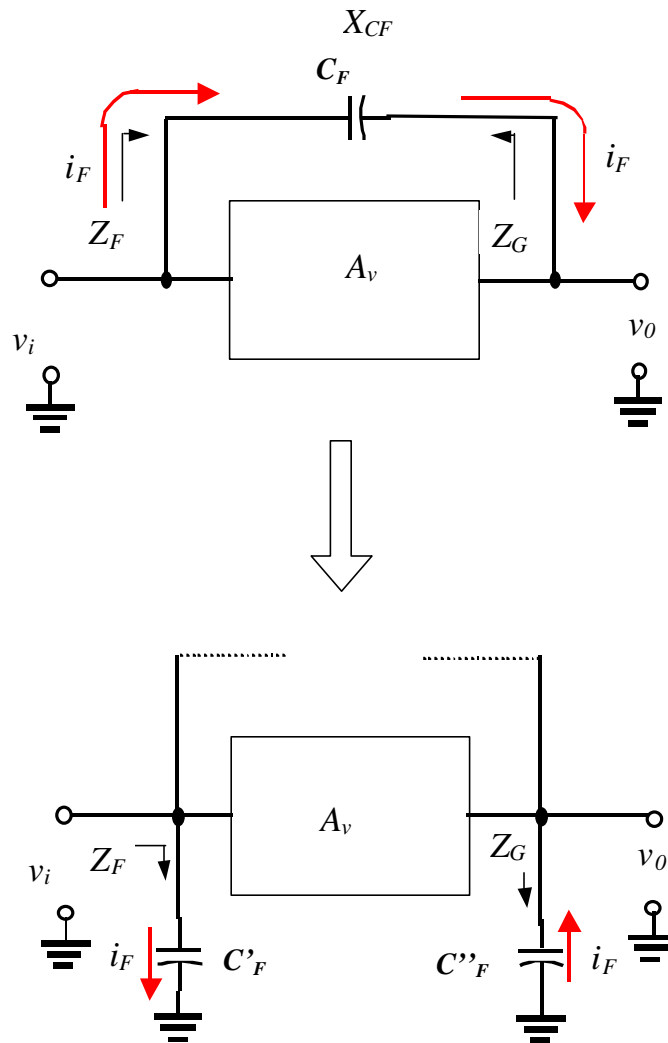
C_B ----- Aterrar (AC) a base de Q_2

R_{B1}, R_{B2}, R_{B3} ----- Definir tensões nas bases dos transistores (polarização DC)

R_E ----- Definir a corrente de polarização (I_C)

R_C ----- Carga (também define o ganho de tensão)

Efeito Miller para capacitância



$$Z_F = v_i / i_F \quad e \quad v_0 = A_v v_i$$

$$X_{CF} = 1 / j\omega C_F$$

Da malha entrada saída temos,

$$v_i = X_{CF} i_F + v_0 = X_{CF} i_F + A_v v_i$$

$$v_i(1 - A_v) = X_{CF} i_F \quad \text{logo}$$

$$Z_F = X_{CF} / (1 - A_v) = 1 / j\omega (1 - A_v) C_F$$

$$C'_F = (1 - A_v) \cdot C_F$$

Por outro lado,

$$v_0 = v_i - X_{CF} i_F$$

$$= [X_{CF} / (1 - A_v) - X_{CF}] i_F$$

$$= X_{CF} / (1 - 1/A_v) (-i_F) \quad \text{como}$$

$$Z_G = v_0 / (-i_F) \quad \text{então}$$

$$Z_G = X_{CF} / (1 - 1/A_v) = 1 / j\omega (1 - 1/A_v) C_F$$

$$C''_F = (1 - 1/A_v) \cdot C_F$$

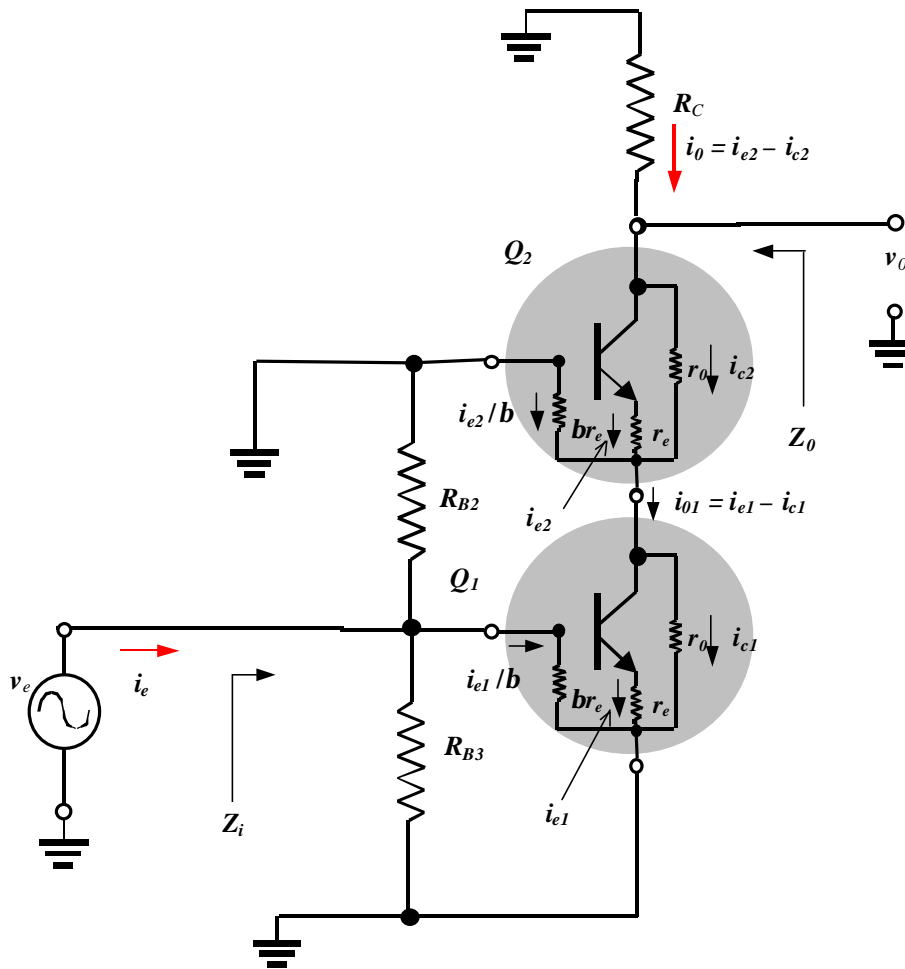
Para analisar esta configuração podemos seguir dois caminhos; o primeiro é analisar o circuito sem considerar nenhuma análise já feita em alguma configuração com um transistor na qual esta inclua (configuração nova); a segunda é considerar esta configuração como uma combinação de configurações mais simples que já são profundamente conhecidas (configuração combinada).

Apenas para ilustrar qual o melhor faremos a análise desta configuração das duas formas.

1) Configuração nova

A figura abaixo mostra o amplificador para fins de análise para pequenos sinais.

Vamos supor que os transistores sejam idênticos.



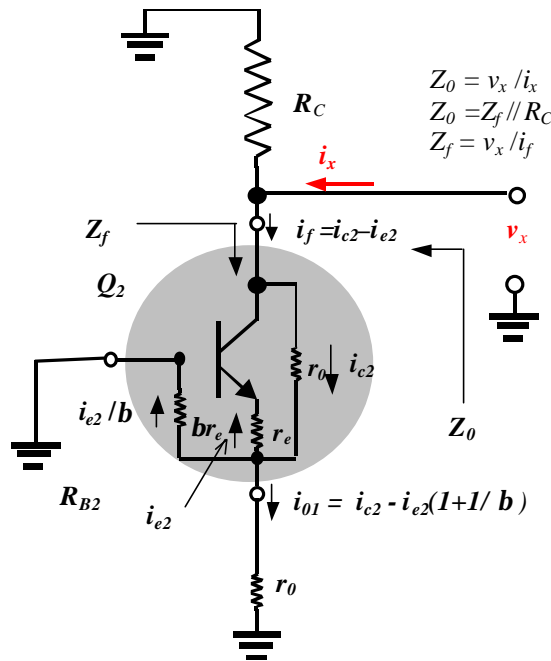
1) A impedância de entrada é obtida facilmente pela inspeção da figura acima.

$$Z_i = v_e / i_e = R_{B3} // R_{B3} // \mathbf{b} r_e$$

(89)

Que é semelhante a impedância de entrada de um amplificador emissor comum.

2) Para determinar a impedância de saída vamos redesenhar a porção de saída do circuito com $v_e = 0V$.



Da malha base emissor, temos

$$-r_e i_{e2} + r_0 [i_{c2} - (1 + 1/\mathbf{b}) i_{e2}] = 0 \quad \mathbf{P}$$

$$i_{e2} = r_0 / [r_0 (1 + 1/\mathbf{b}) + r_e] i_{c2} \quad (90)$$

ou seja, a corrente i_{c2} é dividida pelo divisor resistivo - r_e e $r_0 // \mathbf{b} r_e$

Temos ainda,

$$i_f = i_{c2} - i_{e2} = i_{c2} - r_0 / [r_0 (1 + 1/\mathbf{b}) + r_e] i_{c2}$$

$$i_{c2} = [(\mathbf{b} + 1) r_0 + \mathbf{b} r_e] / (r_0 + \mathbf{b} r_e) * i_f \quad e \quad (91)$$

substituindo (91) em (90) resulta,

$$i_{e2} = \mathbf{b} r_0 / (r_0 + \mathbf{b} r_e) * i_f \quad (92)$$

Da malha coletor emissor, temos

$$v_x = r_0 i_{c2} + r_e i_{e2} \quad (93)$$

substituindo (91) e (92) em (93) resulta,

$$v_x = \{r_0 [(b+1)r_0 + br_e] / (r_0 + br_e) + br_e r_0 / (r_0 + br_e)\} i_f$$

$$v_x / i_f = \{r_0 [(b+1)R_E + br_e] + br_e R_E\} / (R_E + br_e) \quad \text{ou}$$

$$v_x / i_f = r_0 + b(r_0 + r_e) r_0 / (r_0 + br_e)$$

ou, como sempre $r_0 \gg r_e$

$$Z_f \gg r_0 [1 + b r_0 / (r_0 + br_e)] \quad (94)$$

e

$$Z_0 = R_c // Z_x \quad (95)$$

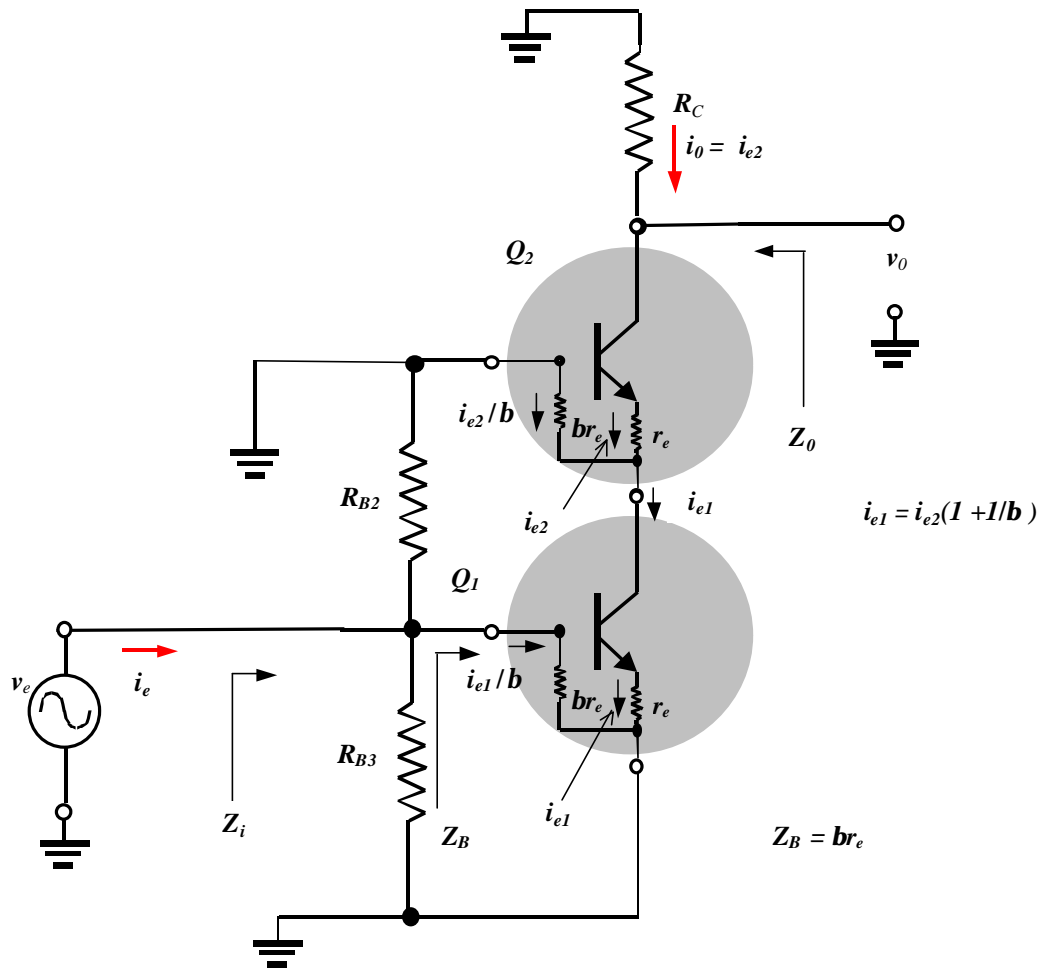
Como ainda, $r_0 \gg br_e$ então, a equação (94) pode ser muito bem aproximada por:

$$Z_f \gg r_0 (1 + b) \quad (96)$$

Que é igual a impedância de saída de um amplificador base comum com um resistor r_0 no emissor.

3) Para determinar o ganho de tensão sem aproximação a priori torna a análise muito complicada. Para isto vamos redesenhar o circuito admitindo que as correntes que passam pelos resistores de saída dos transistores são muito pequenas quando comparadas aquelas do emissor. Esta suposição será confirmada na segunda análise.

Então, redesenhando o circuito não incluindo os resistores de saída dos transistores.



Da figura temos:

$$v_0 = -R_C i_0 = -R_C i_{e2} \quad (97)$$

$$e \quad v_e = Z_B i_b = Z_B i_{e1}/b \quad \text{logo}$$

$$i_{e1} = b v_i / Z_B = v_i / r_e \quad (98)$$

A corrente $i_0 = i_{e2}$ está relacionada com i_{e1} como dado pela equação abaixo

$$i_{e1} = i_{e2} + i_{e2} 1/b = (1 + 1/b) i_{e2} \quad (99)$$

Substituindo (98) em (99) e o resultado em (97) resulta,

$$v_0 = -R_C b / (b+1) v_i / r_e$$

Então

$$v_o/v_i = A_v = -R_C \mathbf{b}/(\mathbf{b}+1)/r_e$$

$$A_v = \gg -R_C/r_e \quad (100)$$

Que é igual ao ganho de tensão de um amplificador emissor comum.

4) Para determinar o ganho de corrente, vamos, novamente, admitir que as correntes que passam pelos resistores de saída dos transistores são muito pequenas quando comparadas aquelas do emissor. Esta suposição será confirmada na segunda análise.

Então, reportando ao circuito acima temos,

$$i_b = i_{e1}/\mathbf{b} \quad (101)$$

$$i_{e1} = i_{e2} + i_{e2} 1/\mathbf{b} = (1 + 1/\mathbf{b}) i_{e2} = (1 + 1/\mathbf{b}) i_o \quad (102)$$

A corrente i_b é a corrente de entrada i_e dividida pelo divisor de corrente resistivo $R_B = R_{B3}/R_{B2}$ e $\mathbf{b}r_e$. Logo,

$$i_b = R_B / (R_B + \mathbf{b}r_e) i_e \quad (102)$$

Substituindo (102) em (101) e o resultado em (102) resulta,

$$R_B / (R_B + \mathbf{b}r_e) i_e = (\mathbf{b} + 1)/\mathbf{b} \cdot \mathbf{b} i_o = 1/\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} i_o \quad \text{assim}$$

$$A_i = i_o/i_e = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} R_B / (R_B + \mathbf{b}r_e)$$

$$A_i \gg \mathbf{b} R_B / (R_B + \mathbf{b}r_e) \quad (103)$$

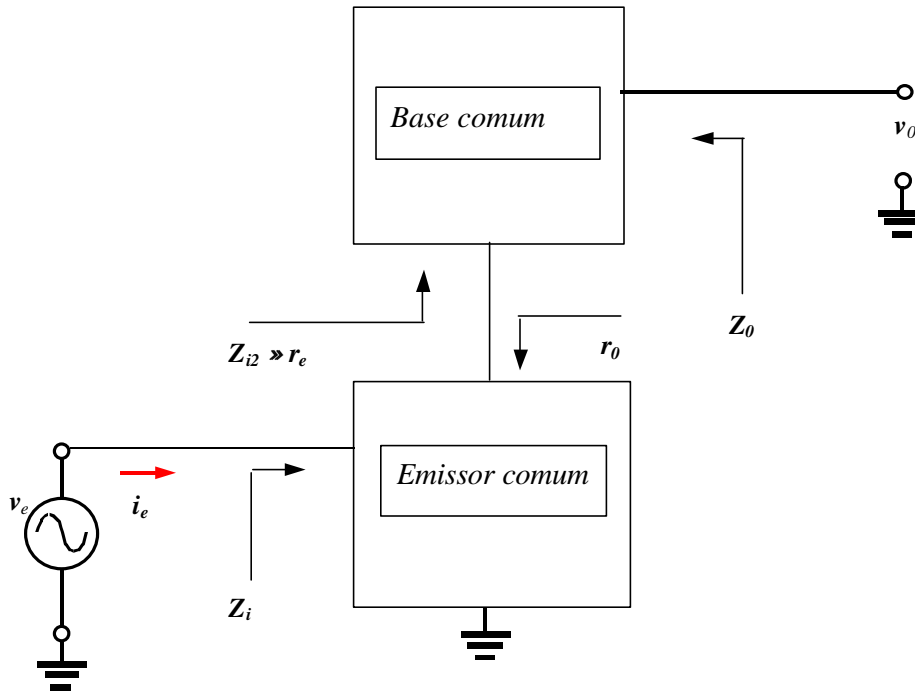
O ganho de corrente máxima (\mathbf{b}) foi reduzido devido ao divisor de corrente resistivo.

Que é semelhante ao ganho de corrente de um amplificador emissor comum.

2) Configuração combinada

Considerando esta configuração como uma combinação de duas configurações, um amplificador emissor comum tendo como carga um amplificador na configuração base comum.

A figura abaixo esquematiza esta abordagem.



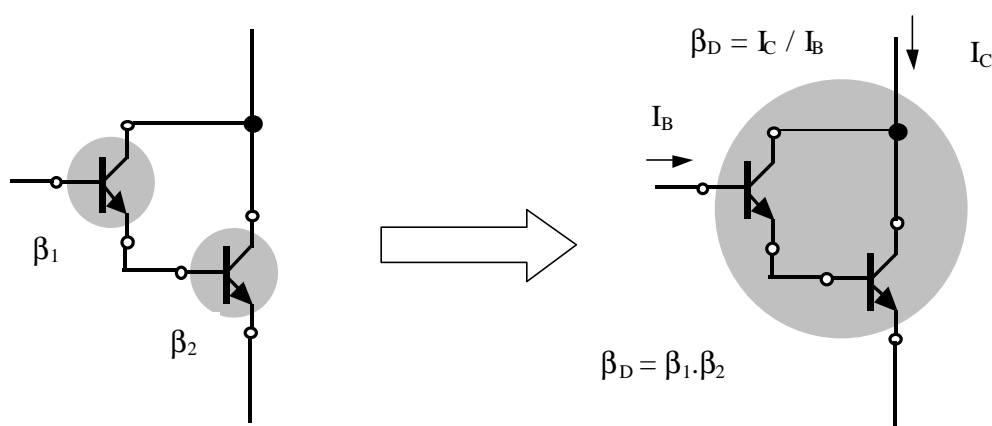
Assim,

1. A impedância de entrada desta configuração é igual a impedância de entrada de um emissor comum.
2. A impedância de saída desta configuração é igual a impedância de saída de um base comum com resistor de emissor r_0 em paralelo com a carga no terminal do coletor.
3. O ganho de tensão será igual ao ganho de tensão de um emissor comum com carga r_e ($-Z_{i2}/r_0/r_e = -r_e/r_0/r_e \gg -r_e/r_e - 1$) vezes o ganho de tensão de um base comum (R_C/r_e).
4. O ganho de corrente será igual ao ganho de corrente de emissor comum vezes o ganho de corrente de um base comum ($\gg 1$).

✓ Configuração Darlington

A principal função desta configuração é conseguir alta impedância de entrada e alto ganho de corrente.

O arranjo desta configuração é conectar dois transistores do mesmo tipo de maneira que se o ganho de corrente de um transistor for β_1 e o do outro for β_2 então o ganho de corrente do arranjo será igual a $\beta_D = \beta_1 \cdot \beta_2$. A conexão Darlington atua como um novo dispositivo, cujo ganho de corrente é o produto dos ganhos individuais. A figura abaixo mostra esta configuração.

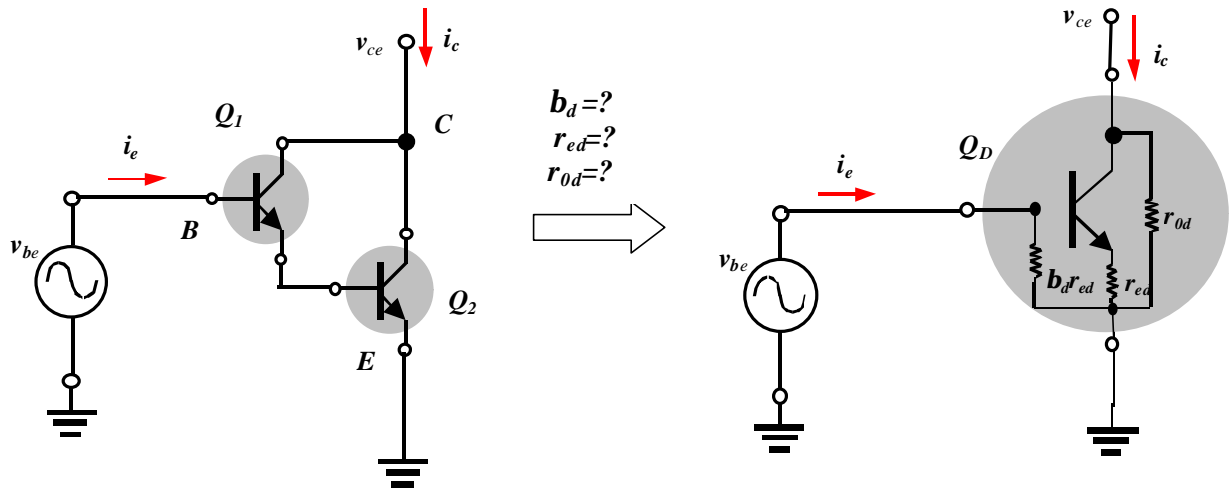


A figura abaixo fornece as especificações de data sheets para um par Darlington típico.

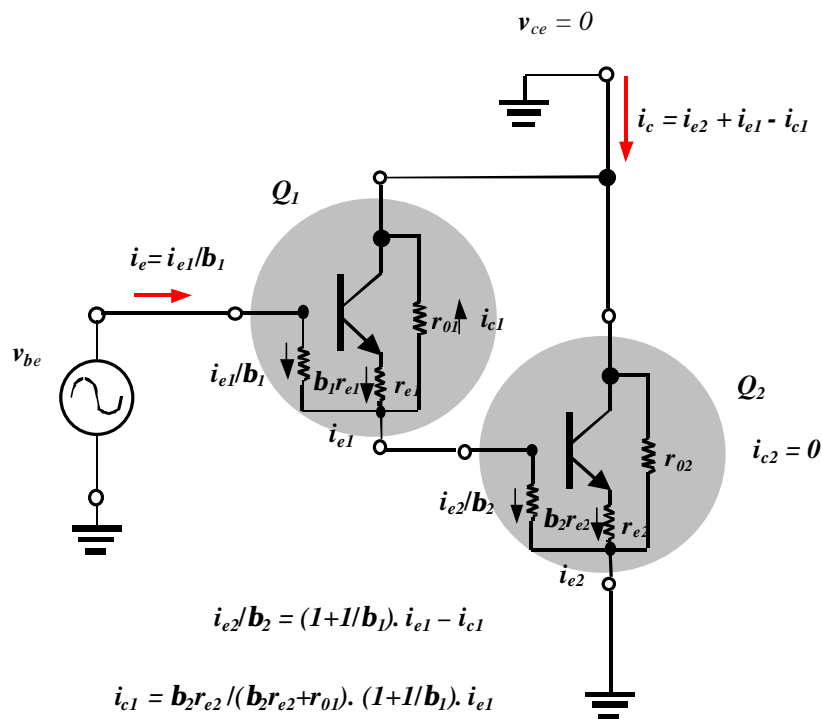
Tipo 2N999 – Transistor Darlington NPN

Parâmetro	Condições de teste	Mim.	Max.
V_{BE}	$I_C = 100mA$		1,8V
h_{FE}	$I_C = 10mA$	4000	
(b_D)	$I_C = 100mA$	7000	70.000

Podemos representar esta conexão da mesma forma que fazemos para um transistor. Para isto, considere a figura abaixo e vamos determinar a sua impedância de entrada, a sua transresistência ($r_{ed} = v_{be}/i_c$ com $v_{ce} = 0$), o seu ganho de corrente AC ($b_d = i_c/i_e$ com $v_{ce} = 0$) e sua impedância de saída (r_{od}).



Utilizando o modelo do transistor para determinar inicialmente o ganho de corrente AC (b_d) e a transresistência do par. Então,



Da figura temos, a corrente de entrada é dada por:

$$i_e = i_{e1} / \mathbf{b}_1 \quad (104)$$

A corrente i_{c1} é igual a corrente que sai do emissor de Q_1 ($(1+1/\mathbf{b}_1) \cdot i_{e1}$) dividida pelo divisor resistivo r_{01} e $\mathbf{b}_2 r_{e2}$ então,

$$i_{c1} = \mathbf{b}_2 r_{e2} / (\mathbf{b}_2 r_{e2} + r_{01}) \cdot (1+1/\mathbf{b}_1) \cdot i_{e1} \quad (105)$$

Esta equação pode ser bem aproximada usando o fato de que:

$$\mathbf{b}_2 r_{e2} = \mathbf{b}_2 V_T / I_{C2} \text{ mas}$$

$$I_{C2} = \mathbf{b}_{2DC} I_{B2} = \mathbf{b}_{2DC} I_{E1} \gg \mathbf{b}_{2DC} I_{C1} \gg \mathbf{b}_2 I_{C1} \text{ logo}$$

$$\mathbf{b}_2 r_{e2} \gg V_T / I_{C1} = r_{e1} \quad (106)$$

Substituindo (106) em (105) resulta,

$$i_{c1} \gg r_{e1} / (r_{e1} + r_{01}) \cdot (1+1/\mathbf{b}_1) \cdot i_{e1}$$

$$i_{c1} \gg r_{e1} / r_{01} \cdot i_{e1} \quad (107)$$

A corrente de base de Q_2 é dada por:

$$i_{e2} / \mathbf{b}_2 = (1+1/\mathbf{b}_1) \cdot i_{e1} - i_{c1}$$

$$i_{e2} \gg \mathbf{b}_2 i_{e1} - \mathbf{b}_2 i_{c1} \quad (108)$$

Substituindo (107) em (108) resulta,

$$i_{e2} \gg \mathbf{b}_2 (1 - r_{e1} / r_{01}) \cdot i_{e1} \gg \mathbf{b}_2 i_{e1} \quad (109)$$

A corrente de saída é dada por:

$$i_c = i_{e2} + i_{e1} - i_{c1} \quad (110)$$

Substituindo (107) e (109) em (110) resulta,

$$i_c \gg \mathbf{b}_2 i_{e1} + i_{e1} - r_{e1} / r_{01} \cdot i_{e1} = (\mathbf{b}_2 + 1 - r_{e1} / r_{01}) \cdot i_{e1}$$

$$i_c \gg \mathbf{b}_2 \cdot i_{e1} \quad (111)$$

Substituindo (104) em (111) resulta,

$$\mathbf{b}_d = i_c / i_e \gg \mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{b}_2 \quad (112)$$

Para determinar a transresistência (r_{ed}) nos reportamos novamente a figura anterior. Assim, da malha base de Q_1 ao emissor de Q_2 temos,

$$v_e \gg r_{e1}i_{e1} + r_{e2}i_{e2} \quad (113)$$

Substituindo (106) e (109) em (113) resulta,

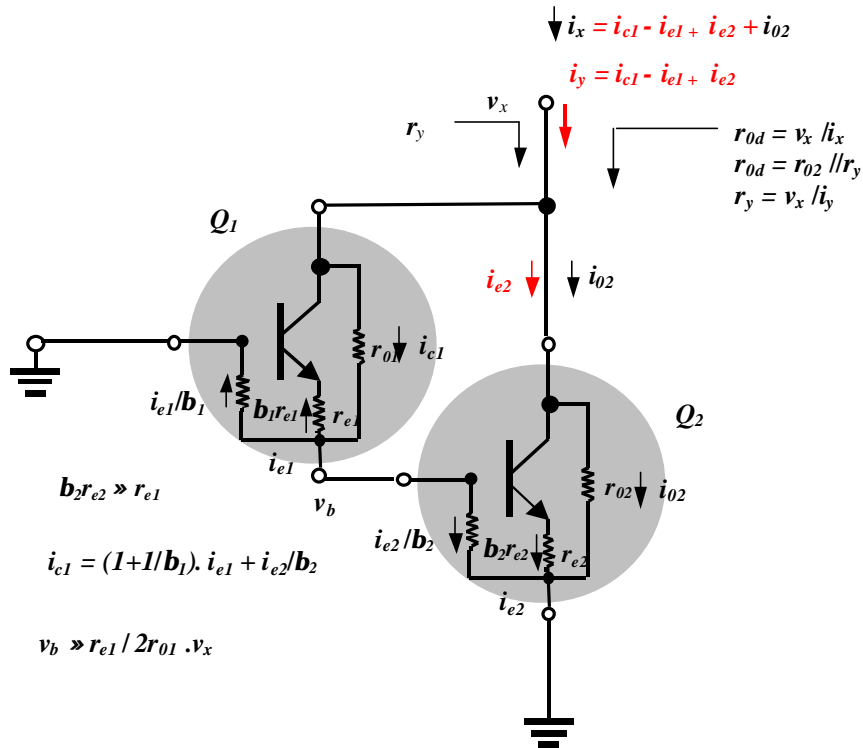
$$v_e = r_{e1}i_{e1} + r_{e1}i_{e1} = 2 r_{e1}i_{e1} = 2b_2r_{e2} i_{e1} \quad (114)$$

Substituindo (111) em (114) resulta,

$$v_e \gg 2r_{e2} i_c \text{ então}$$

$$r_{ed} = v_e / i_c \gg 2r_{e2} \quad (115)$$

Para determinar a impedância de saída (r_{od}) nos reportamos agora a figura abaixo. Assim, da malha base de Q_1 ao emissor de Q_2 temos,



Da figura temos

$$v_b = [r_{e1} // \mathbf{b}_1 r_{e1} // \mathbf{b}_2 r_{e2}] / [r_{e1} // \mathbf{b}_1 r_{e1} // \mathbf{b}_2 r_{e2} + r_{01}] \cdot v_x$$

como $\mathbf{b}_2 r_{e2} \gg r_{e1}$ e $r_{01} \gg r_{e1}$

$$v_b \gg r_{e1} / 2r_{01} \cdot v_x \quad (116)$$

Agora as correntes i_{e1} , i_{e2} e i_{c1} podem ser facilmente obtidas

$$i_{e1} = v_b / r_{e1} = v_x / 2r_{01} \quad e \quad (117)$$

$$i_{e2} = \mathbf{b}_2 v_b / \mathbf{b}_2 r_{e2} = \mathbf{b}_2 v_b / r_{e1} = \mathbf{b}_2 i_{e1} \quad (118)$$

e, finalmente

$$i_{c1} = (v_x - v_b) / r_{01} = (1 - r_{e1} / 2r_{01}) v_x / r_{01} \gg v_x / r_{01} \quad (119)$$

temos ainda que,

$$i_y = i_{c1} - i_{e1} + i_{e2} = i_{c1} + (\mathbf{b}_2 - 1) i_{e1}$$

$$i_y = v_x / r_{01} + (\mathbf{b}_2 - 1) v_x / 2r_{01}$$

$$i_y = v_x / r_{01} (1 + (\mathbf{b}_2 - 1) / 2) \gg v_x \mathbf{b}_2 / r_{01}$$

Mas $\mathbf{b}_2 / r_{01} = \mathbf{b}_2 I_{C1} / V_A \gg I_{C2} / V_A = 1 / r_{02}$ então

$$i_y = v_x / r_{02} \quad e$$

$$r_y = v_x / i_y = r_{02} / 2 \quad e \quad portanto$$

$$r_{0d} = r_y // r_{02} = r_{02} / 2 // r_{02}$$

$$r_{0d} = 2/3 \cdot r_{02}$$

(120)