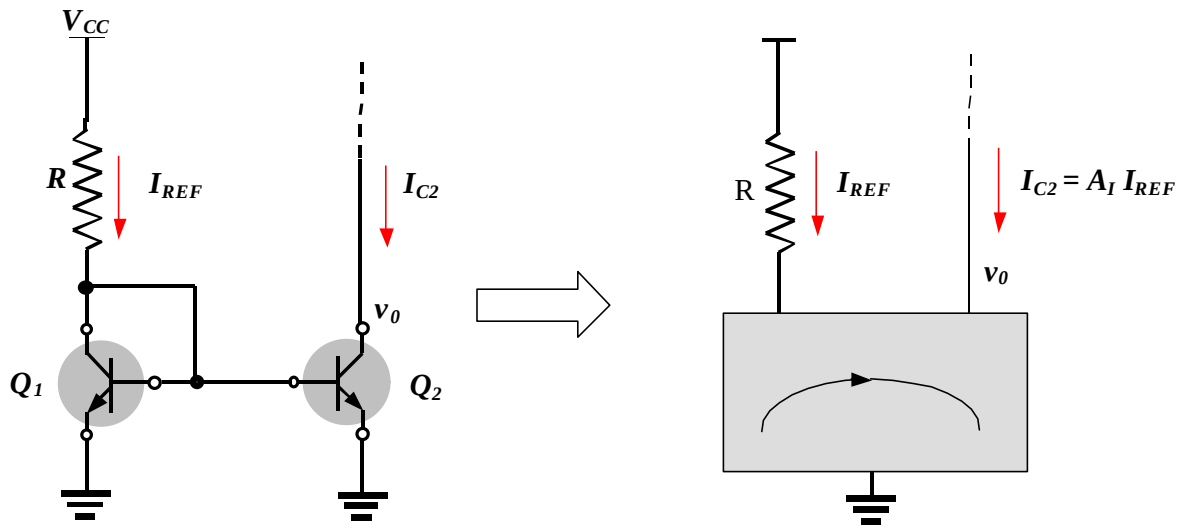
## ✓ Configuração Espelho de corrente (Fonte de corrente)

***A principal função desta configuração é conseguir "espelhar" uma corrente desenvolvida sobre um lado do circuito. Esta configuração é particularmente apropriada para projeto de circuitos integrados devido à semelhança (casamento) entre os dispositivos do mesmo tipo .***

*Esta configuração permite que dois transitores do mesmo tipo sejam conectado de tal forma que a corrente de coletor de um transistor seja relacionada de forma razoavelmente precisa com a corrente de coletor do outro.*

*A figura abaixo mostra esta configuração com transistor NPN. É claro este espelho de corrente pode ser feito com transistores PNP. Este tipo de conexão de circuito é a mais simples configuração de uma classe de circuitos analógicos conhecida como "**Circuitos Translineares**". Este nome se deve ao fato de que a transcondutância ($1/r_e$) do transistor ser linearmente proporcional à corrente DC.*




*Note que nesta conexão os parâmetros importantes são:*

1) ***Ganho de corrente $A_I$ ($I_{C2}/I_{C1}$).*** *(observe que é grande sinal)*
2) ***A impedância de saída do espelho de corrente $Z_0$*** *($v_0/i_{c2}$) (pequeno sinal)*
3) ***A excursão da saída*** *(Valor max. – Valor min. da tensão do terminal de saída)*

*Vamos determinar estes parâmetros. Incialmente, vamos determinar o ganho de corrente $A_I$ (note que a letra do subscrito é maiúscula indicado que é um ganho DC). Admitiremos nesta análise que:*

1. ***Os transistores são idênticos exceto na área de emissor;***
2. ***A corrente de coletor só depende da tensão $V_{BE}$;***
3. ***Os dois transistores estão na mesma temperatura.***

*A corrente de coletor pode expressa na seguinte forma (se desprezarmos o efeito early):*

$$I_C = I_S\ [exp(V_{BE}/V_T] - 1) \ » \ I_S\ exp V_{BE}/V_T \qquad (138)$$

*Onde $V_T = kT/q = 26mV$ (temperatura ambiente) e $I_S$ é uma constante usada para descrever a característica de transferência do transistor na região ativa.*

*Note que o valor $V_{BE}$ está na faixa de 600mV a 800mV.*

*Então,*

$exp(V_{BE}/V_T)$ ³ $exp(600mV/26mV)$ » $exp23$ » ***10.523.988.179***

*Ou seja, a equação (138) é* ***extremamente*** *bem aproximada.*

*A equação (138) pode incluir o efeito early , reescrevendo-a da seguinte forma:*

$$I_C = I_S\ exp V_{BE}/V_T\ [1 + V_{CE}/V_A] \qquad (139)$$

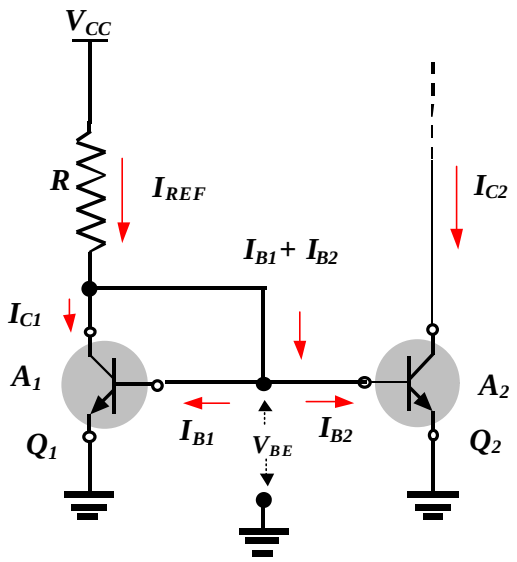
*Neste momento usaremos a equação (138). Notando que esta pode ainda ser expressa por:*

$$\mathbf{I_C = J_S\ A_E\ exp V_{BE}/V_T} \qquad ou \qquad (140)$$

$$\mathbf{V_{BE} = V_T\ Ln(I_C/J_S\ A_E)} \qquad (141)$$

*Onde $J_S$ (densidade de corrente) é uma constante que depende dos parâmetros de fabricação do transitor , como carga total na região de base, largura da região de base, etc., e $A_E$ é a área da secção transversal do emissor.*

*Assim da figura abaixo temos,*




$A_1$ e $A_2$ área de emissor

$b_1=b_2=b$

***Espelho de corrente***

$$I_{REF} = (V_{CC} - V_{BE})/R \qquad (143)$$

$$I_{C1} = I_{REF} - (I_{B1} + I_{B2}) = I_{REF} - 1/b(I_{C1} + I_{C2}) \quad ou$$

$$\mathbf{I_{C1} = (I_{REF} - I_{C2}/b)(1+1/b)} \qquad (144)$$

$$I_{C1} = J_S A_1 \exp V_{BE}/V_T \qquad (145)$$

$$I_{C2} = J_S A_2 \exp V_{BE}/V_T \qquad (146)$$

*Dividindo (145) por (146) resulta,*

$$I_{C2} = A_2/A_1 \, I_{C1} \qquad (147)$$

*Substituindo (144) em (147) resulta,*

$$I_{C2} = A_2/A_1 b \big/ (b+1+A_2/A_1) \, . I_{REF}$$

*Então, o ganho do espelho de corrente é,*

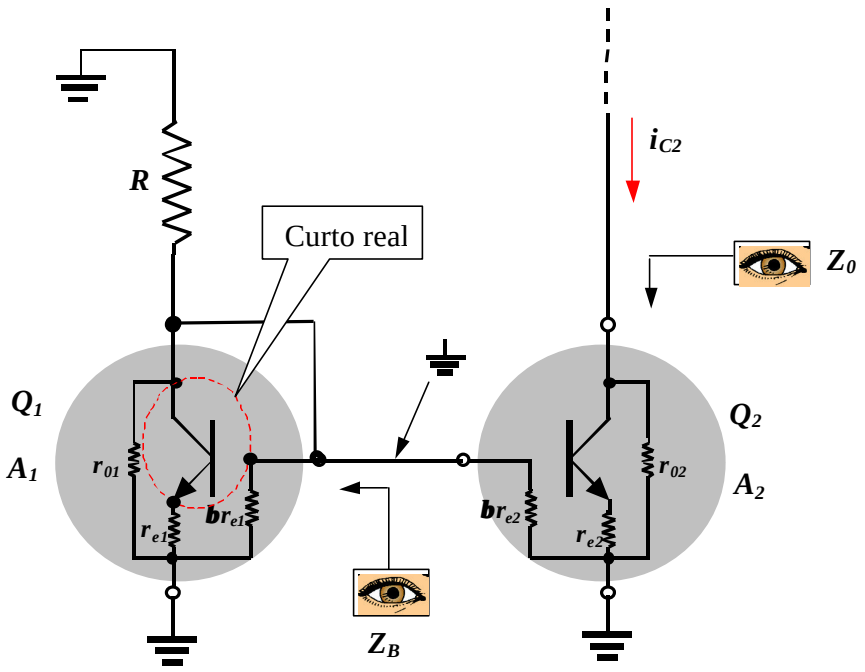
$$\mathbf{A_I = I_{C2} \big/ I_{REF} = A_2/A_1 \, . b/(b+1+A_2/A_1)} \qquad (148)$$

*Se as áreas dos transistores são iguais então,*

$$\boxed{\mathbf{A_I = b/(b+2)}} \qquad (149)$$

*Ou seja, muito próximo da unidade.*

*Para determinar a impedância de saída do espelho de corrente, vamos reportamos a figura abaixo.*




***$Z_B = R // \beta r_{e1} // r_{e1} // r_{01} \gg r_{e1}$ para $R >> r_{e1}$, condição que na prática é sempre satisfeita***

*A impedância vista pela base do transistor $Q_2$ é dada por:*

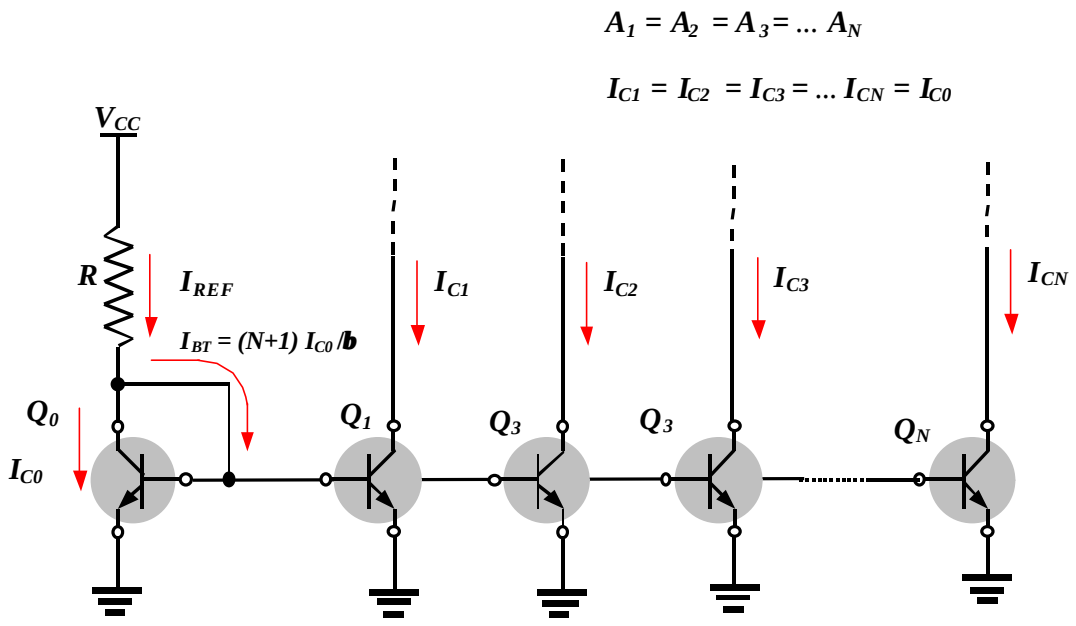
$Z_B \gg r_{e1}$

*Que é obtida usando o fato de que os tres pontos no círculo vermelho estão efetivamente em curto circuito. Aqui, esta impedância de nenhuma forma influência na impedância de saída do espelho.*

*E, por inspeção, a impedância de saída do espelho de corrente é dada por:*

$$\boxed{Z_0 = r_{02}}$$

*Este espelho de corrente por ser generalizado para N corrente de saída iguais, ou não, como mostrado na figura abaixo.*




***Espelho de corrente de N saídas iguais***

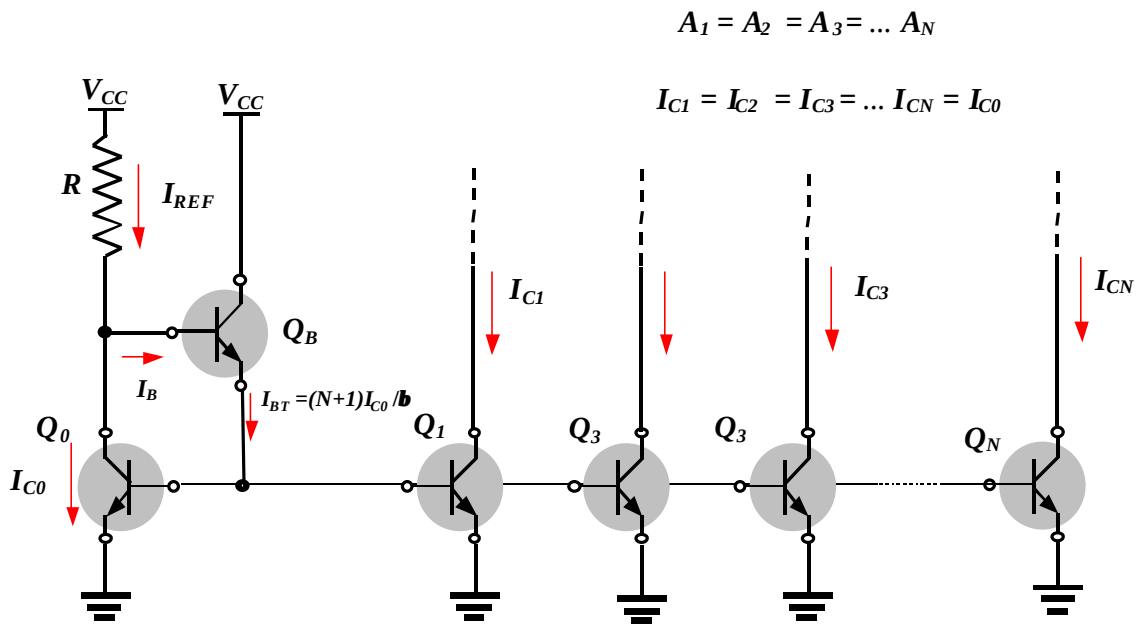
*No caso espelho de corrente acima (correntes de saída iguais) é fácil mostrar que o ganho de corrente é dado por:*

$$A_I = \beta / (\beta + N + 1) \qquad (150)$$

*A impedancia de saída de cada uma das saída do espelho continua sendo igual a impedância de saída do transistor ($r_0$).*

*Note agora que para um grande número de saídas o ganho de corrente começa a ficar menor que a unidade e muito dependente de* $\beta$*, o que é indesejável.*

*Para contornar este problema basta observarmos que a corrente de referência ($I_{REF}$) difere de $I_{C0}$ devido as correntes de base dos transistores ($I_{BT}$). Assim podemos "bufferizar" esta corrente $I_{BT}$ de maneira que esta nova configuração é mostrada a seguir.*




***Espelho de corrente com multiplas saídas e com buffer.***

*Da figura temos,*

$I_{C0} = I_{REF} - I_B = I_{REF} - I_{BT}/(1+b)$ *mas*

$I_{BT} = (N+1)I_{C0}/b$ *então* (151)

$I_{CJ} = I_{REF} - (N+1)I_{CJ}/(1+b)b$ $J = 0,1,=2..N$ (152)

$I_{CJ} = I_{REF}/(1+(N+1)/(1+b)b)$

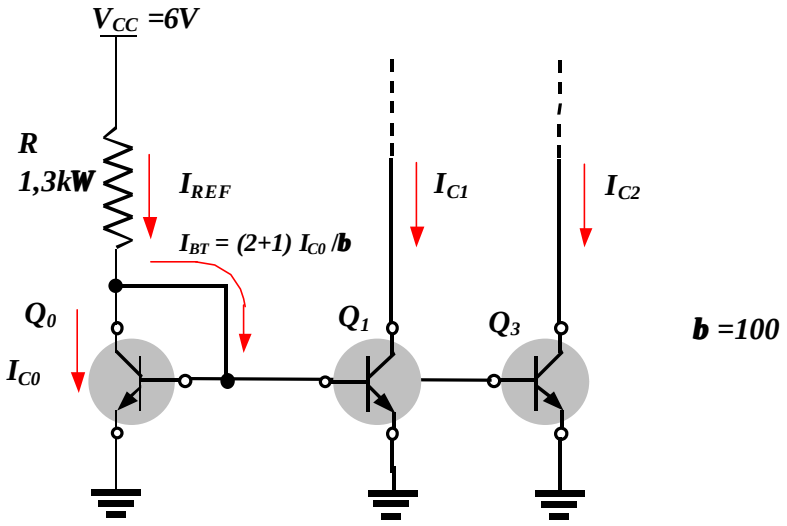
$I_{CJ} \approx I_{REF}/(1+(N+1)/b^2) = I_{REF}\, b^2(b^2+N+1)$ *logo*

$$\boxed{A_I = b^2/(b^2+N+1)} \quad (153)$$

*Note agora que mesmo para um grande número de saídas o ganho de corrente ainda é próximo da unidade e pouco dependente de b, o que é desejável.*

***Exercício:***

*Calcule as correntes, $I_{REF}$, $I_{C1}$ e $I_{C2}$ , através dos transistores $Q_0$ , $Q_1$ e $Q_2$ no espelho de corrente abaixo. Repita para a corrente $I_{BT}$ buferizada. Suponha que os transistores são idênticos e despreze o efeito early.*




***Solução:***

*a) Sem Bufer (como mostra a figura)*

*A corrente $I_{REF}$ é*

$I_{REF} = (V_{CC} - V_{BE})/R = (6{,}0V-0{,}7V)/1{,}3kW$ » **4,076mA**

*Portanto, as correntes é $I_{C1}$ , $I_{C2}$*

$I_{C1} = I_{C2} = I_{C0} = A_I\ I_{REF} = b/(b+3).\ I_{REF} = 100/(103).4{,}076mA =$ **3,958 mA**

*b) Com Bufer (+ um transistor no lugar da ligação base coletor de $Q_0$)*

*A corrente de referência será agora dada por*

$I_{REF} = (V_{CC} - 2V_{BE})/R = (6{,}0V-1{,}4V)/1{,}3kW$ » **3,538mA**

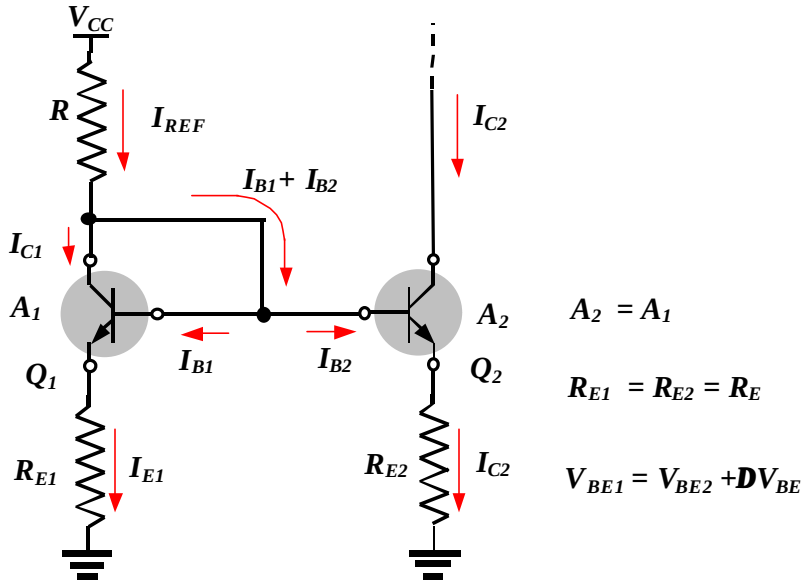
*Portanto, as correntes é $I_{C1}$ , $I_{C2}$*

$I_{C1} = I_{C2} = I_{C0} = A_I\ I_{REF} = b^2/(b^2+3).\ I_{REF} = 100^2/(100^2+3\ ).3{,}538\ mA =$ **3,537 mA**

- ***Espelho de corrente com resistor no emissor.***

*Como na prática os transistores não são perfeitamente casados (semelhantes) ou, quando se deseja implementar um espelho (ou fonte) de corrente discreto é necessário implementar um espelho de corrente com* ***resistor de degeneração de emissor****. A figura abaixo mostra esta configuração.*

*O objetivo desta configuração é deixar a corrente espelhada ($I_{C1}$ ou $I_{E1}$) independente principalmente da diferença de $V_{BE's}$.*




***Espelho de corrente com resistor de degeneração de emissor***

*Da figura temos,*

$V_{CC} = RI_{REF} + V_{BE1} + R_E I_{E1}$ *e*

$$V_{CC} = RI_{REF} + V_{BE2} + R_E I_{E2} \qquad (154)$$

*Supondo* $V_{BE1} = V_{BE2} + DV_{BE}$ *então*

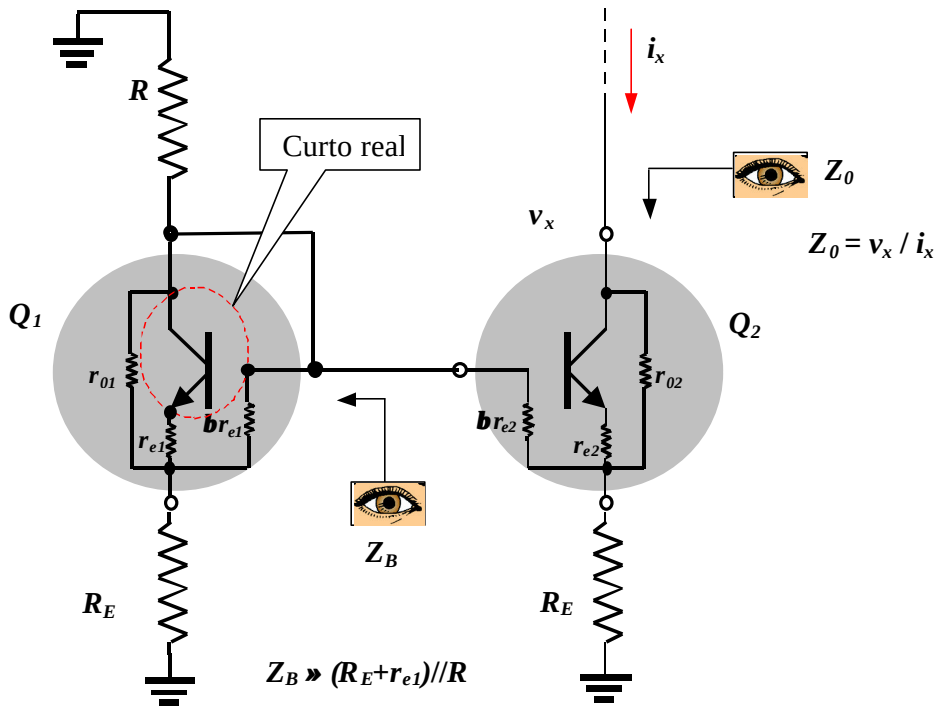
$$V_{CC} = RI_{REF} + V_{BE2} + DV_{BE} + R_E I_{E1} \qquad (155)$$

*Subtraindo (155) de (154) resulta*

$$\boxed{I_{E1} = DV_{BE} / R_E + I_{E2}} \qquad (156)$$

*A espressão (156) mostra que se a queda de tensão no resistor $R_E$ for muito maior que o descasamento de $V_{BE}$ dos transistores a corrente $I_{E1}$ será muito próxima de $I_{E2}$ e porconseguinte, $I_{C1} \gg I_{C2}$.*

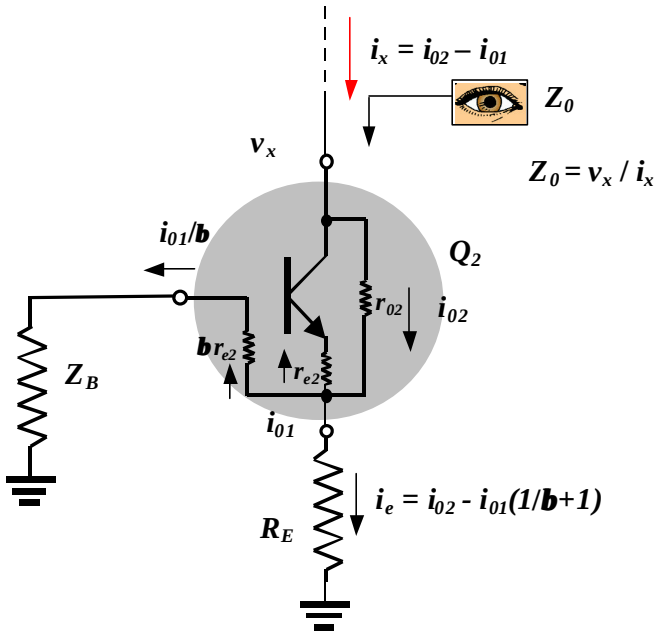
*Outra consequência desta da inserção dos resistores de degeneração de emissor é que a impedância de saída do espelho decorrente aumenta bastante. A figura abaixo mostra o circuito equivalente para pequenos sinais do o espelho.*




*A impedância vista pelo terminal da base do transistor $Q_2$ ($Z_B$ ) é por inspeção dada por:*

$Z_B \gg (R_E+r_{e1})//R$

*Então redesenhando a figura acima resulta,*



*Da malha base emissor temos,*

$R_E\ i_e = R_E\ (i_{02} - i_{01}(1/b+1)) = r_{e2} i_{01} + Z_B i_{01}/b$ *então*

$i_{02} = [(1/b+1+ (r_{e2}+ Z_B/b)/R_E]\ i_{01}$ (157)

*Temos ainda,*

$i_x = i_{02} - i_{01} = [(1/b+1+ (r_{e2}+ Z_B/b)/R_E\ -1]\ i_{01}$ *então*

$\mathbf{i_{01} = 1/[(1/b + (r_{e2}+ Z_B/b)/R_E\ ]\ .i_x}$ (158)

*e de (157) e (158) vem,*

$\mathbf{i_{02} = [(b+1)R_E + br_{e2}+ Z_B]/[b\ r_{e2} + Z_B + R_E].\ i_x}$ (159)

*Da malha coletor emissor resulta,*

$v_x = r_{02}\ i_{02} + \mathbf{R_E}\ (i_{02} - (1/b+1)\ i_{01}$

$v_x = (r_{02} + \mathbf{R_E})i_{02} - \mathbf{R_E}\ (1/b+1)\ i_{01}$ (160)

*Substituindo (158) e (159) em (160) resulta,*

$v_x/i_x = (r_{02} + R_E)\ [(b+1)R_E + br_{e2}+ Z_B]/[b\ r_{e2} + Z_B + R_E] - bR_E\ R_E/[(R_E + br_{e2} + Z_B]$

$Z_0 = v_x/i_x = r_{02}\ [(b+1)R_E + br_{e2}+ Z_B]/(R_E + br_{e2} + Z_B) + R_E$

$$Z_0 = r_{02}\ [1+ (bR_E + br_{e2}+ Z_B)/(R_E + br_{e2} + Z_B)] + R_E \quad (161)$$

*Como*

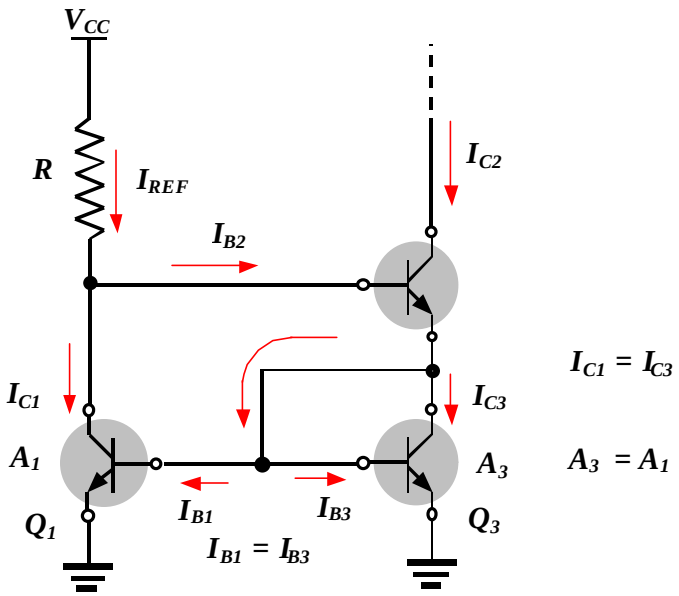
$(bR_E + br_{e2}+ Z_B)/(R_E + br_{e2} + Z_B) >> 1$

$Z_0 >> r_{02}$

*Portanto a impedância de saída é muito maior que a impedância de saída do de um espelho de corrente sem degeneração de emissor.*

- ***Espelho de corrente com alta impedância de saída.***

*Quando se deseja um espelho de corrente com alta impedância de saída sem utilizar resistores de degeneração de emissor, já que uma desvantagem de se utilizar estes resistores e diminuir a excursaõ de operação do espelho, pode-se utilizar a configuração mostrada abaixo.*




***Espelho de corrente com alta impedância de saída (Wilson)***

*Da figura temos,*

$$I_{C3} = I_{C2} + I_{B2} - (I_{B1} + I_{B3}) = I_{C2}\,(1+1/b) - 2\,I_{C3}/b$$

$$I_{C3} = I_{C2}\,(1+1/b)/(1+2/b) \qquad (162)$$

*Temos ainda,*

$$I_{C1} = I_{REF} - I_{B2} = I_{REF} - I_{C2}/b \qquad (163)$$

*Substituindo (162) em (163) resulta,*

$$\boxed{I_{C1} = I_{C2} = I_{REF}[1 - 2/(b^2+2b+2)]} \qquad (164)$$

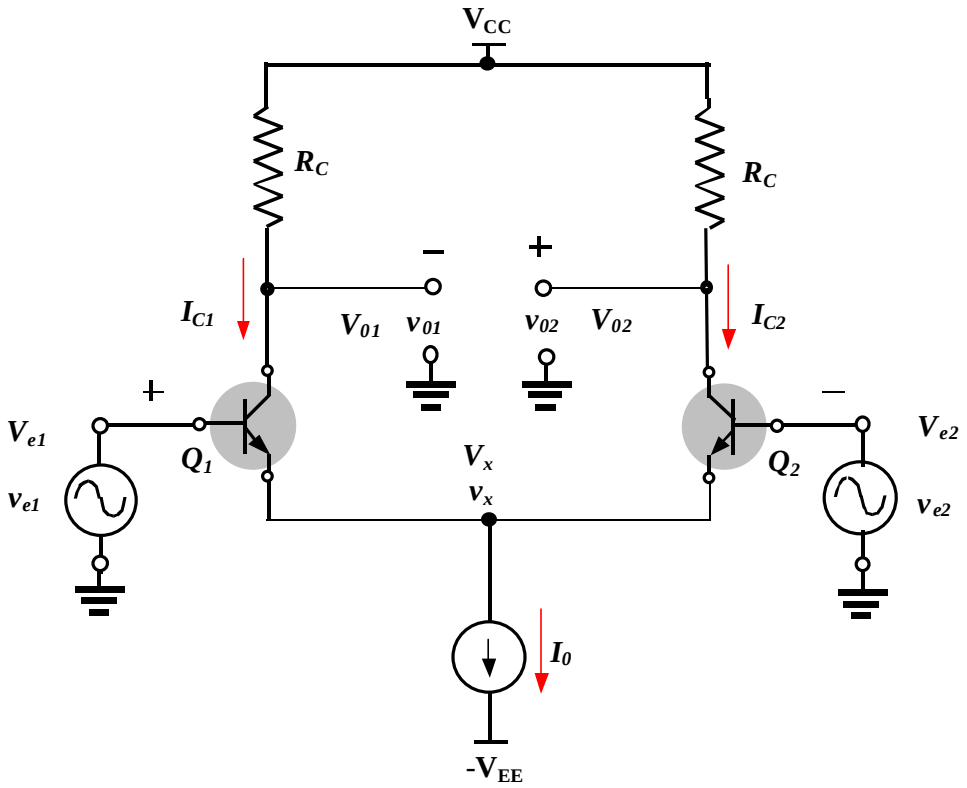
*É deixado como exercício para o aluno mostrar que a impedância de saída deste espelho é igual à*

$$\boxed{Z_0 \gg b r_{02}/2} \qquad (165)$$

## ✓ *Configuração par diferencial (amplificador diferencial)*

***A principal função desta configuração é amplificar a diferença (e somente a diferença) de dois sinais de entrada. Esta configuração é largamente utilizada em projeto de circuitos integrados.***

*Esta configuração permite que dois transitores do mesmo tipo sejam conectado de tal forma que uma tensão difenrencia ou não na saída seja proporcional a difenreça de duas tensões aplicadas.*




***Configuração par diferencial (amplificador diferencial)***

*Antes de analisarmos esta configuração vamos definir alguns conceitos. A principal característica do amplificador diferencial e a sua capacidade de amplificar a diferença dos sinais de entrada sem amplificar o sinal de modo comum. Estes sinais são definidos abaixo.*

***Sinal diferencial de entrada • $DVe = v_{ed} = v_{e1} - v_{e2}$***

***Sinal de modo comum de entrada • $v_{ec} = (v_{e1}+v_{e2})/2$***

***Sinal diferencial de saída • $DV_0 = v_{0d} = v_{01} - v_{02}$***

***Sinal de modo comum de saída • $v_{0c} = (v_{01}+v_{02})/2$***

***Estes sinais são relacionados entre si pelos seguintes parâmetros.***

***Ganho diferencial º*** $A_d = v_{0d} / v_{ed}$

***Ganho de modo comum º*** $A_c = v_{0c} / v_{0d}$

***Rejeição de modo comum º*** $A_d / A_c$

*Existem outros parâmetros que relacionam as entradas, diferencial e modo comum com as saídas, diferencial e modo comum. Como por exemplo, o ganho diferencial-comum ($A_{dc} = v_{0d} / v_{ec}$) e o ganho comum-diferencial $A_{cd} = v_{0c} / v_{ed}$),mas se o amplificador for simétrico estes ganhos serão iguais a zero.*

*O par diferencial merece uma atenção especial tendo em vista a sua larga aplicação principalmente em projeto de circuitos integrados. Para isto vamos dividir a nossa análise deste amplificador em uma análise para grandes sinais e uma análise para pequenos sinais.*

- ***Análise para grandes sinais (Característica de transferência DC)***

*Usaremos a expressão que relaciona a corrente de coletor com a tensão $v_{be}$ do transistor bipolar, já mostrada anteriormente e repetida aqui. Além disso vamos supor que os transistores são idênticos. Assim,*

$I_C = I_S \exp V_{BE} / V_T$ ou $V_{BE} = V_T \ln I_C / I_S$

*Da figura temos,*

$$V_{BE1} = V_{e1} - Vx = V_T \ln (I_{C1} / I_S) \quad e \qquad (166)$$

$$V_{BE2} = V_{e2} - Vx = V_T \ln (I_{C1} / I_S) \qquad (167)$$

*Combinando (166) com (167), resulta*

$$I_{C1} / I_{C2} = \exp (V_{e1} - V_{e2}) / V_T = \exp V_{ed} / V_T \qquad (168)$$

*onde* $V_{ed} = V_{e1} - V_{e2}$

*Temos ainda,*

$$I_{E1} + I_{E2} = I_0 = 1/a_{DC} [I_{C1} + I_{C2}\} \qquad (169)$$

*Combinando as equações (168) e (169):*

$$I_{C1} = \alpha_{DC}\, I_0 /[1+\exp(-V_{e1}/ V_T)] \quad (170)$$

$$I_{C2} = \alpha_{DC}\, I_0 /[1+\exp(V_{e2}/V_T)] \quad (171)$$

*A voltagem de saída* $V_0 = V_{02} - V_{01}$ *pode ser encontrada, desde que*

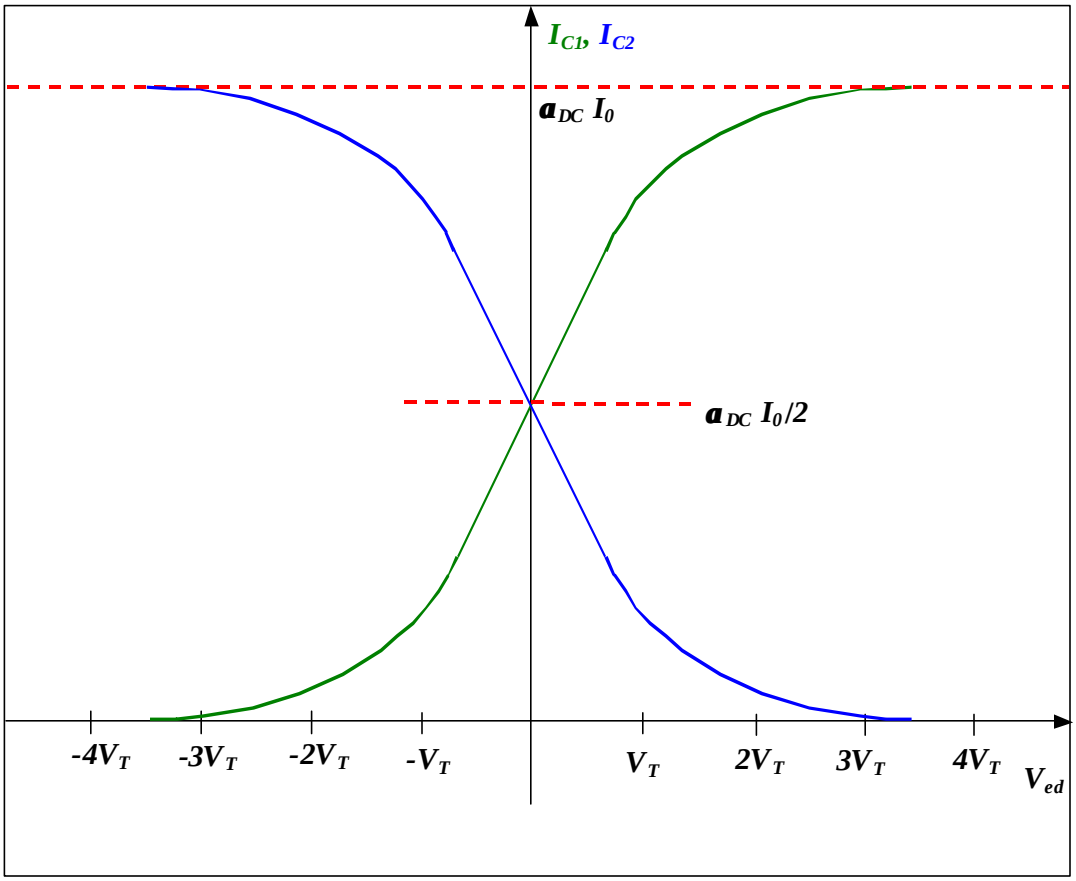
$V_{02} = V_{CC} - R_C\, I_{C2}$

$V_{01} = V_{CC} - R_C\, I_{C1}$

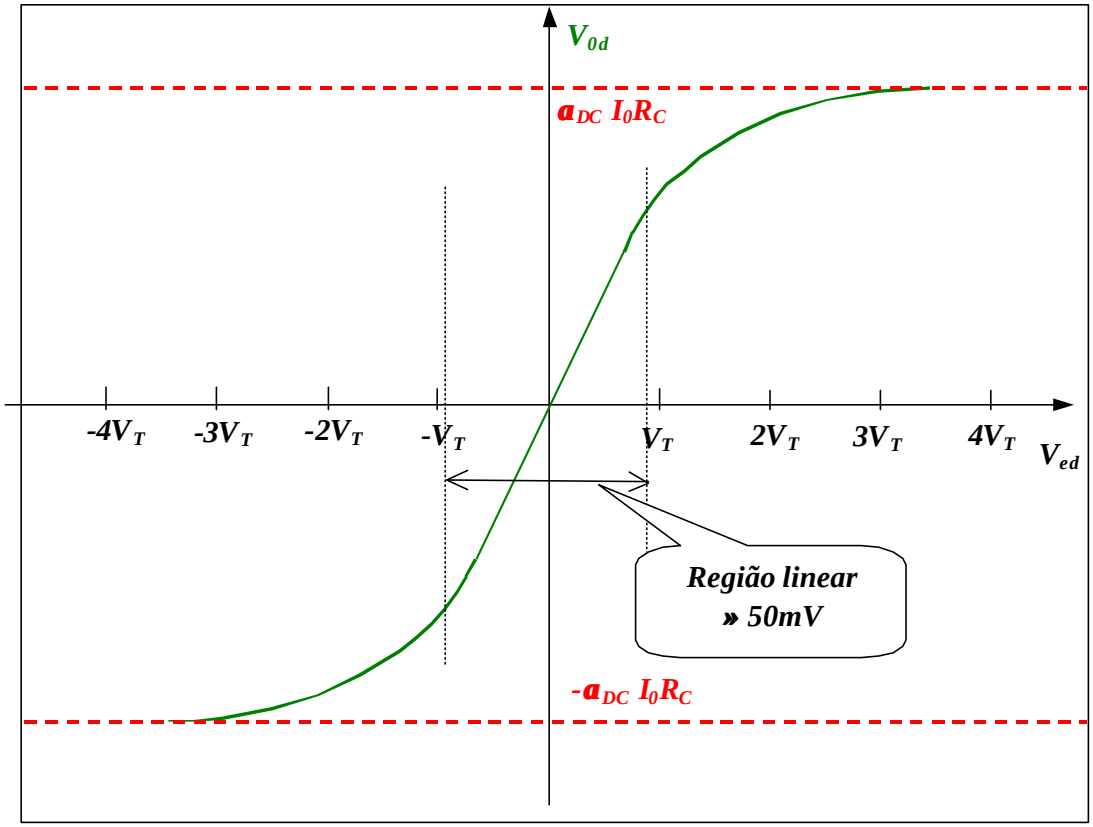
*Então*

$$V_0 = \alpha_{DC}\, I_0\, R_C \tanh V_{ed}/V_T \quad (172)$$

*As figuras abaixo mostram a dependência* $I_{C1}$ , $I_{C2}$ *e* $V_0$ *com* $\mathbf{V_{ed}}$.




***Correntes de saída em função da tensão diferencial de entrada***




***Voltagem de saída em função da tensão diferencial de entrada***

*Dois fatores são importantes notar aqui.*

1. ***Somente uma faixa de » 50mV da tensão entrada é linear;***
2. ***Quando a tensão diferencial de entrada é zero a saída é zero.***