

SEL-EESC-USP

Fontes e Espelhos de Corrente

Resumo de Aplicações Bipolares

P. R. Veronese
2018

Fontes de Corrente Bipolares

Fontes e espelhos de corrente são subcircuitos eletrônicos que funcionam como cargas ativas em arquiteturas analógicas modernas. Podem ser construídas com transistores de efeito de campo, *JFET* ou *MOS*, ou com transistores bipolares, *BJT*. Neste texto estão apresentadas as mais corriqueiras arquiteturas bipolares desse tipo de circuito com um resumo das equações matemáticas usadas em cada uma delas, objetivando consultas rápidas. A Figura 1 apresenta o circuito representativo genérico de uma fonte de corrente. Estaticamente, isto é, em *DC*, essa fonte gera uma corrente constante I_o . Dinamicamente, isto é, em *AC*, o circuito é visto unicamente por sua resistência interna r_{of} . Fontes de corrente ideais possuem $r_{of} \rightarrow \infty$ e, portanto, são circuitos totalmente abertos para *AC* e fornecem correntes absolutamente constantes independentemente da tensão aplicada entre seus terminais, isto é, para $0 \leq V_{ins} \leq \infty$. Fontes práticas, no entanto, possuem valores finitos, tanto para r_{of} , como para V_{ins} . Fontes de alta qualidade, porém, devem possuir r_{of} muito elevado e devem permanecer fornecendo corrente constante para tensões V_{ins} muito pequenas. A faixa de tensão V_{ins} é conhecida como compliância da fonte e melhor será quanto mais extensa for. Algumas arquiteturas de circuitos bipolares que cumprem essas funções com eficiência, são apresentadas a seguir.

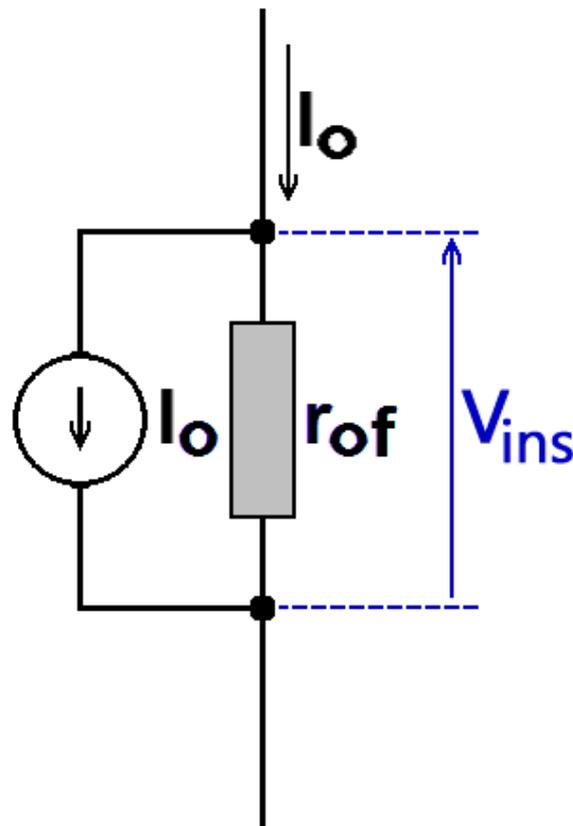


Figura 1 – Fonte de Corrente Genérica, com Resistência Interna Finita.

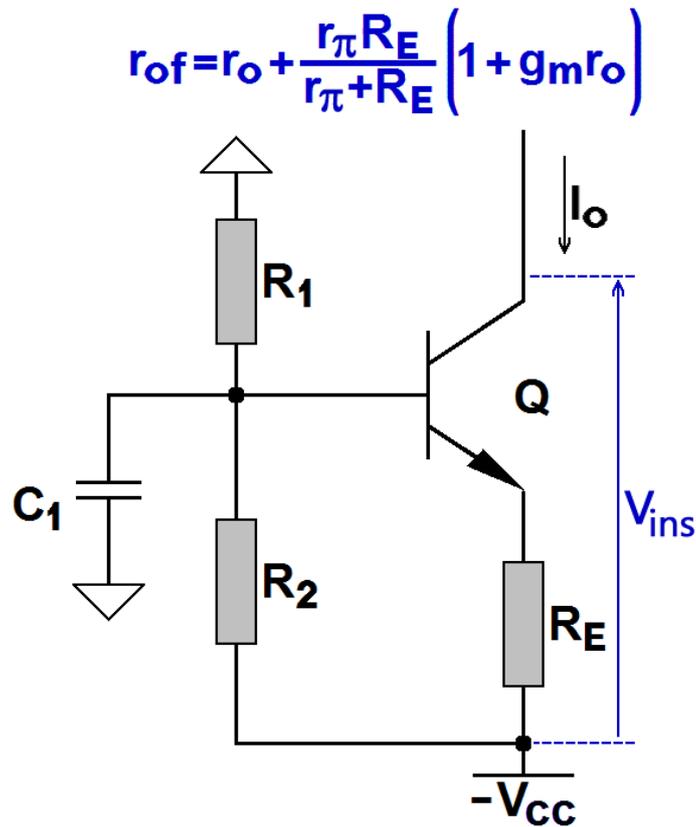


Figura 2 – Fonte de Corrente Bipolar com Tensão de Referência Obtida por Circuito Resistivo.

a.) Fonte de Corrente com Referência Resistiva

O circuito da Figura 2 apresenta uma fonte de corrente construída com um *BJT npn* e com a tensão de referência obtida por um simples divisor resistivo. Na realidade, é um sorvedouro de corrente, porque absorve corrente de um circuito externo, mas o nome genérico continua sendo fonte de corrente. A corrente dessa fonte vale:

$$I_o = \frac{V_B - V_{BE} + V_{CC}}{R_E} \times \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (1a)$$

Onde:

$$V_B = - \left(\frac{V_{CC}}{R_2} + \frac{I_o}{\beta} \right) \times \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1b)$$

Como I_o depende de V_{CC} , o circuito exige ser alimentado por uma tensão estabilizada, muito estável e muito bem filtrada. Em um problema de síntese, deve-se calcular o valor do resistor R_E para a obtenção da corrente I_o desejada. Os valores de V_{CC} , de β e de V_{BE} são supostamente conhecidos. Os resistores do divisor (R_1 e R_2) devem ser estipulados. Em um problema de análise, todos os valores dos componentes são supostamente conhecidos, menos os de I_o e de V_B , que devem ser calculados.

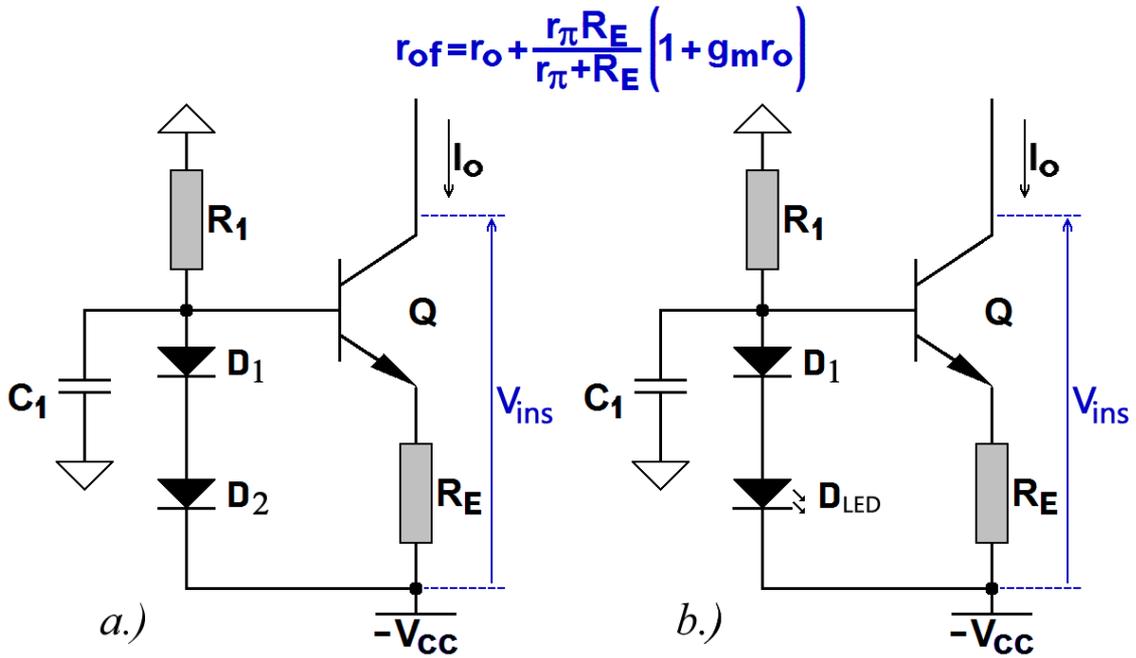


Figura 3 – Fontes de Corrente Bipolares com Tensões de Referência Obtidas por Diodos.

O capacitor C_1 age como um filtro adicional de ruídos e pode ser usado optativamente. A resistência interna, vista pelo sinal AC, vale, para essa fonte:

$$r_{of} = r_o + \frac{r_\pi R_E}{r_\pi + R_E} \times (1 + g_m r_o) \quad (2)$$

As grandezas g_m , r_π e r_o , que aparecem na Equação 2, são os parâmetros incrementais de pequenos sinais e baixas frequências do transistor Q , calculados no ponto quiescente, isto é, com $I_{CQ} = I_o$ e $V_{CEQ} = V_{ins} - R_E [(\beta+1)/\beta]I_o$. Essa fonte possui coeficiente térmico positivo, isto é, a corrente I_o cresce com o aumento da temperatura da junção, graças à diminuição de $V_{BE} \times \theta$, agindo na Equação 1a.

b.) Fonte de Corrente com Referência Obtida por Diodos

Os circuitos da Figura 3 apresentam fontes de corrente construídas com BJT 's **npn** e com tensões de referência obtidas por diodos, de junção de silício na Figura 3a ou por um LED na Figura 3b. O diodo D_1 , em ambos os casos, serve para compensar a queda de tensão V_{BE} do transistor e fazer com que a tensão sobre o resistor R_E seja aproximadamente igual à tensão sobre os diodos V_{D2} ou V_{LED} , respectivamente. Assim:

- No circuito da Figura 3a:

$$I_o \cong \frac{V_{D2}}{R_E} \times \frac{\beta}{\beta+1} \quad (3a)$$

- No circuito da Figura 3b:

$$I_o \cong \frac{V_{LED}}{R_E} \times \frac{\beta}{\beta+1} \quad (3b)$$

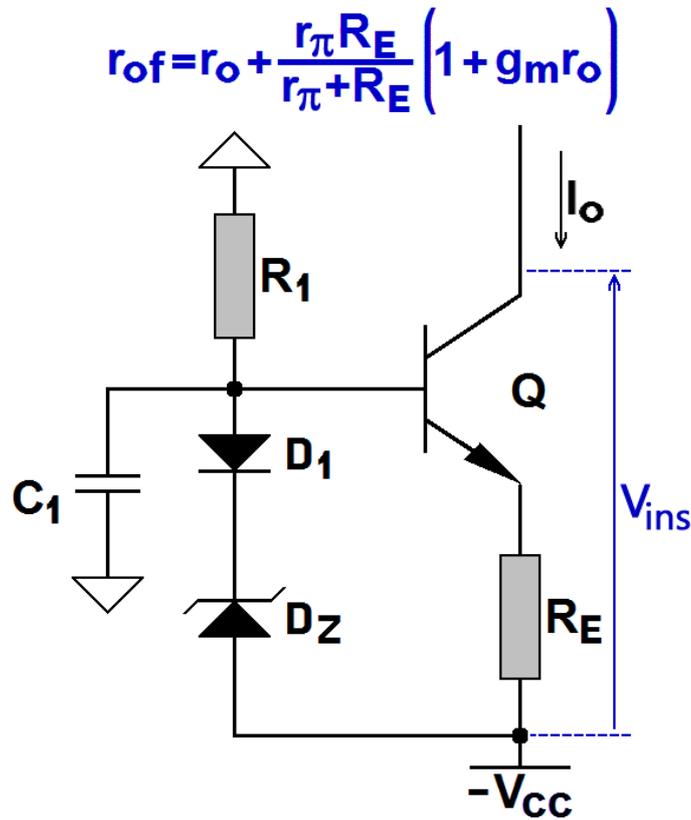


Figure 4 – Fonte de Corrente Bipolar com Tensão de Referência Obtida por Diodo Zener.

As fontes da Figura 3 possuem maior independência de V_{CC} do que a fonte da Figura 2 e possuem, também, maior compliância. E, embora o cálculo seja igualmente feito pela Equação 2, numericamente o valor da resistência interna dessas fontes poderá ser inferior ao da Figura 2, para a mesma corrente I_o , porque os resistores R_E normalmente também serão menores. A compliância da fonte da Figura 2a é a maior de todas, pois $V_{ins(min)} = V_{D2} + V_{BE} \approx 2V_{BE}$. As fontes da Figura 3 possuem coeficiente térmico negativo, tanto graças à diminuição de $V_{BE} \times \theta$, quanto graças à diminuição de $V_{LED} \times \theta$. A estabilidade do valor de $I_o \times V_{CC}$ dessas fontes é melhor do que a da fonte da Figura 2, mas, como as tensões diretas sobre diodos variam levemente com a corrente, essa estabilidade não é absoluta.

c.) Fonte de Corrente com Referência Obtida por Diodo Zener

O circuito da Figura 4 apresenta uma fonte de corrente construída com *BJT npn* e com tensão de referência obtida por diodo Zener. O diodo D_1 cumpre o mesmo papel executado nas fontes da Figura 3. Com isso, tem-se que:

$$I_o \cong \frac{V_Z}{R_E} \times \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (4)$$

Como diodos Zener viáveis possuem tensões de ruptura normalmente superiores a 3,9 V, a compliância dessa fonte é ruim, pois $V_{ins(min)} = V_Z + V_{BE} \geq 4,6$ V.

$$0,9\beta_1 r_{o1} \leq r_{of} \leq \beta_1 r_{o1}$$

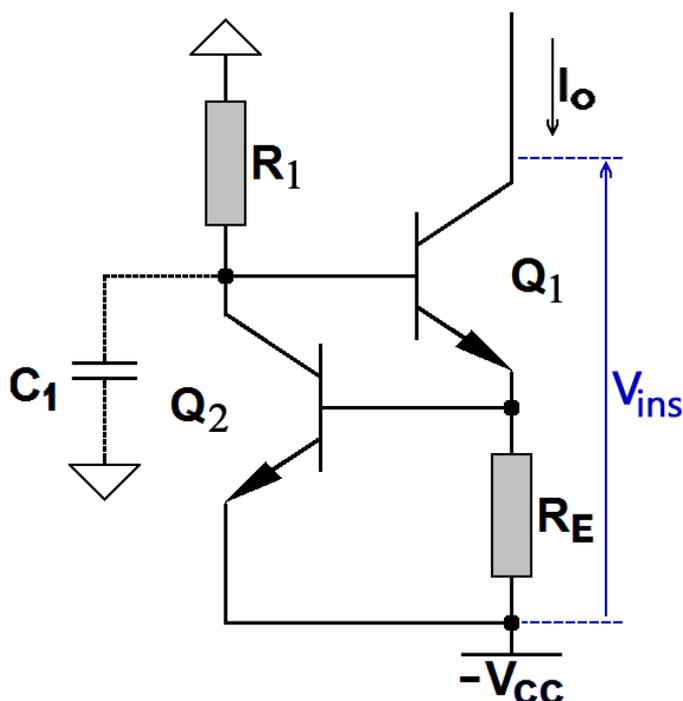


Figure 5 – Fonte de Corrente de Wilson Modificada.

A resistência interna, também calculada pela Equação 2, é, no entanto, mais elevada para uma mesma corrente I_o . Essa fonte pode ter coeficiente térmico virtualmente nulo se $V_Z = 5,1$ V. A estabilidade de $I_o \times V_{CC}$ é muito elevada graças à grande habilidade que o diodo Zener possui de apresentar tensões $V_Z \times I_Z$ muito estáveis. Um problema dessa fonte, porém, além da baixa compliância, é a transferência de ruído para a corrente I_o . Diodos Zener, que trabalham em regiões de ruptura e avalanche, são os componentes eletrônicos mais ruidosos que existem, sendo eficazes geradores de ruído branco.

d.) Fonte de Corrente de Wilson Modificada

O circuito da Figura 5 apresenta uma fonte de corrente construída com *BJT's npn*, com tensão de referência igual a V_{BE2} e com realimentação negativa. A corrente dessa fonte vale:

$$I_o = \left(\frac{V_{BE2}}{R_E} + \frac{I_{C2}}{\beta_2} \right) \times \frac{\beta_1}{\beta_1 + 1} \cong \frac{V_{BE2}}{R_E} \quad (5)$$

A realimentação negativa funciona da seguinte forma: se a corrente I_o tender a crescer por algum motivo, a tensão V_{BE2} tenderá a crescer fazendo com que I_{C2} cresça. O aumento de I_{C2} , no entanto, tira a excitação de base de Q_1 fazendo com que I_o diminua e volte teoricamente ao seu valor inicial.

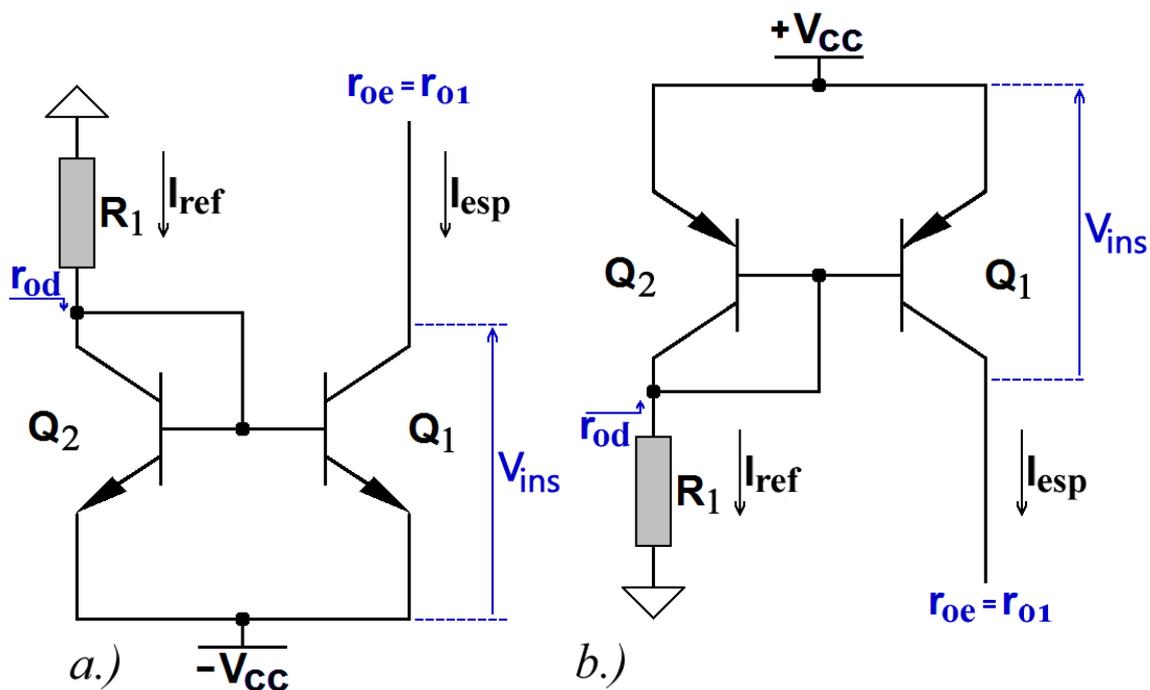


Figura 6 – Espelhos de Corrente. a.) Com Transistores *nnp*. b.) Com Transistores *ppn*.

Essa ação corretiva não acontece, porém, se V_{BE2} variar espontaneamente. Por isso, essa fonte possui coeficiente térmico negativo, isto é, $\Delta I_o / \Delta \theta < 0$. A resistência interna dessa fonte, vista no coletor de Q_1 , é muito elevada e vale:

$$r_{of} = \frac{(1+g_{m2}r_{o2}^*)(\beta_1+1)r_{o1}R_E^*+(r_{\pi1}+r_{o2}^*)(r_{o1}+R_E^*)}{r_{\pi1}+r_{o2}^*+(1+g_{m2}r_{o2}^*)R_E^*} \quad (6)$$

Onde:

$$R_E^* = R_E // r_{\pi2} \quad e \quad r_{o2}^* = r_{o2} // R_1$$

A variação apresentada na inequação 6 depende do valor da impedância externa agregada ao coletor de Q_2 e só é válida se $C_1 = 0$ e $R_1 \geq 10 \text{ k}\Omega$. Essa fonte é de alta compliância, pois $V_{ins(min)} \approx 2V_{BE}$, sendo que, se $V_{ins(min)} = V_{BE}$, a resistência interna ainda se mantém adequadamente alta.

e.) Espelho de Corrente Elementar

Espelhos de corrente são circuitos que refletem uma determinada corrente de referência (I_{ref}) para um ou mais ramos, criando correntes de espelhamento (I_{esp}) com valores iguais ou proporcionais ao da corrente de referência. A Figura 6 mostra um circuito elementar de espelho de corrente construído com transistores **nnp**, na Figura 6a, e com transistores **ppn**, na Figura 6b. Em um espelho desse tipo, a relação $I_{esp} = I_{ref}$ só acontece se os transistores forem casados ($I_{S1} = I_{S2}$ e $N_{F1} = N_{F2}$) e se possuírem ganhos de corrente e tensões Early muito elevados ($\beta_1 = \beta_2 \rightarrow \infty$ e $V_{AF1} = V_{AF2} \rightarrow \infty$). Como em circuitos práticos discretos dificilmente isso acontece, pode-se considerar que $I_{esp} \approx I_{ref}$ só se alguns cuidados de casamento forem adotados. A compliância desse tipo de espelho é elevada, isto é, $V_{ins(min)} = V_{BE}$ e o coeficiente térmico de espelhamento é essencialmente nulo.

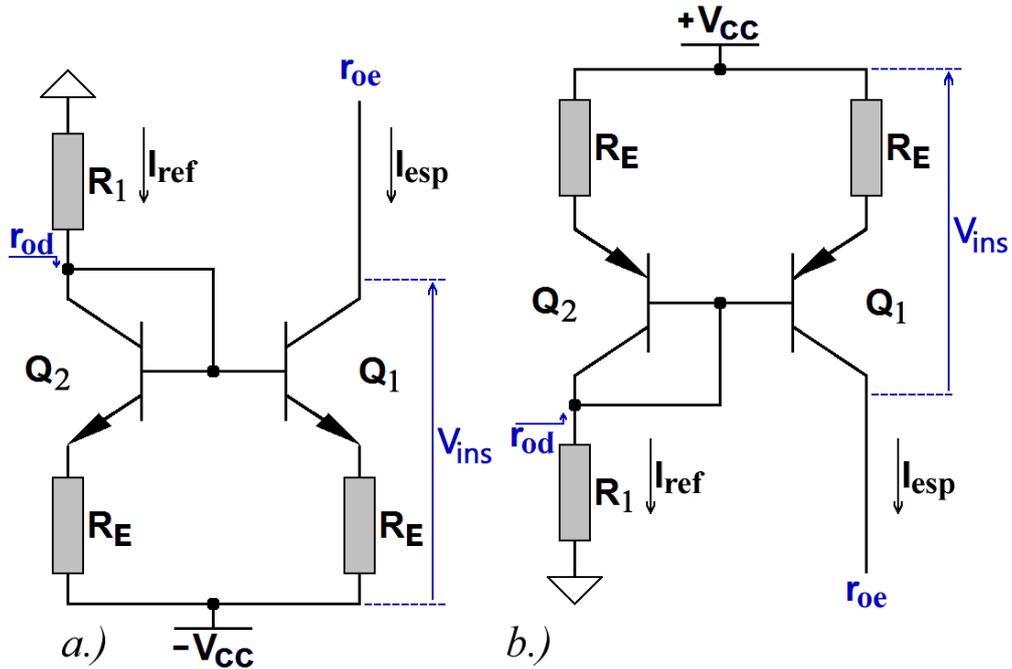


Figura 7 - Espelhos de Corrente com Resistências de Emissor. a.) BJT's npn. b.) BJT's pnp.

A resistência interna, vista no ramo de espelhamento, é relativamente elevada e vale $r_{oe} = r_{o1}$. No ramo de referência, no entanto, como Q_2 está ligado como um diodo, a resistência interna (r_{od}) é muito baixa e vale:

$$r_{od} = \frac{r_{\pi}^* R_1}{R_1(1 + g_{m2} r_{\pi}^*) - r_{\pi}^*}$$

Onde:

$$r_{\pi}^* = r_{\pi 1} // r_{\pi 2} // r_{o2} // R_1$$

Se R_1 for muito elevado, então:

$$r_{od} = \frac{r_{\pi}^*}{(1 + g_{m2} r_{\pi}^*)} \approx \frac{1}{g_{m2}}$$

Os circuitos da Figura 6 funcionam como fontes de corrente de um ou mais ramos para distribuir correntes de polarização para um ou mais braços de circuitos analógicos integrados. Se a proporção de corrente espelhada não for de 1:1, então transistores com vários emissores deverão ser usados. Por exemplo, se Q_2 possuir dois emissores e se Q_1 possuir um emissor, então a razão de espelhamento será igual a 2:1 e se Q_2 possuir um emissor e se Q_1 possuir dois emissores, então a razão de espelhamento será igual a 1:2.

Se houver necessidade de um espelho com maior estabilidade de espelhamento e com maior resistência interna, dois resistores de emissor, com valores inferiores ou iguais a 2,2 k Ω , podem ser usados, como mostra a Figura 7. Nesse caso, a resistência interna, vista no ramo de espelhamento, é muito mais elevada e vale:

$$r_{oe} = r_{o1} + R_E^* \times \left(1 + \frac{g_{m1} r_{\pi1} r_{o1}}{r_{\pi1} + r_{od}}\right) \quad (7)$$

Onde:

$$r_{od} = \frac{[r_{\pi2}^* + R_E \times (1 + g_{m2} r_{\pi2}^*)] R_1}{r_{\pi2}^* + (R_1 + R_E) \times (1 + g_{m2} r_{\pi2}^*)}$$

$$r_{\pi2}^* = \frac{r_{\pi2} \times r_{o2}}{r_{\pi2} + r_{o2}}$$

e

$$R_E^* = \frac{R_E \times (r_{\pi} + r_{od})}{R_E + r_{\pi} + r_{od}}$$

Se $R_E = 0$ o circuito volta ao estado do circuito da Figura 6. Quanto maior for o valor de R_E , maior será a resistência interna r_{oe} e maior será a precisão do espelhamento. A compliância, no entanto, cai com o aumento de R_E .

Esses espelhos poderão ser usados como cargas ativas de amplificadores diferenciais, como mostra a Figura 8. Nesse caso, devido ao efeito de espelhamento mútuo entre os dois ramos, pode-se afirmar que a resistência vista no ramo de espelhamento, pelo amplificador diferencial, dobra, em relação aos espelhos normais das Figuras 6 e 7. Então, nesses casos:

$$r_{oe} = 2 \times [r_{o1} + R_E^* \times \left(1 + \frac{g_{m1} r_{\pi1} r_{o1}}{r_{\pi1} + r_{od}}\right)] \quad \text{e} \quad r_{od} \rightarrow 0$$

O espelho usado em amplificadores diferenciais tem dois objetivos:

- Balancear as correntes de polarização dos coletores de Q_1 e de Q_2 em $\approx I_o/2$, cada um.
- Aumentar o ganho de tensão do estágio através do aumento de $R_{C(AC)}$ de Q_1 .

A fonte de corrente de lastro (I_o) também tem dois objetivos:

- Estabilizar o ponto quiescente de Q_1 e de Q_2 .
- Aumentar a razão de rejeição a modo comum ($CMRR$).

O espelho usado na Figura 8 possui $R_E = 0$, mas o espelho da Figura 7 também pode ser usado com vantagens, desde que o valor de R_E não seja muito grande, para não degradar a compliância.

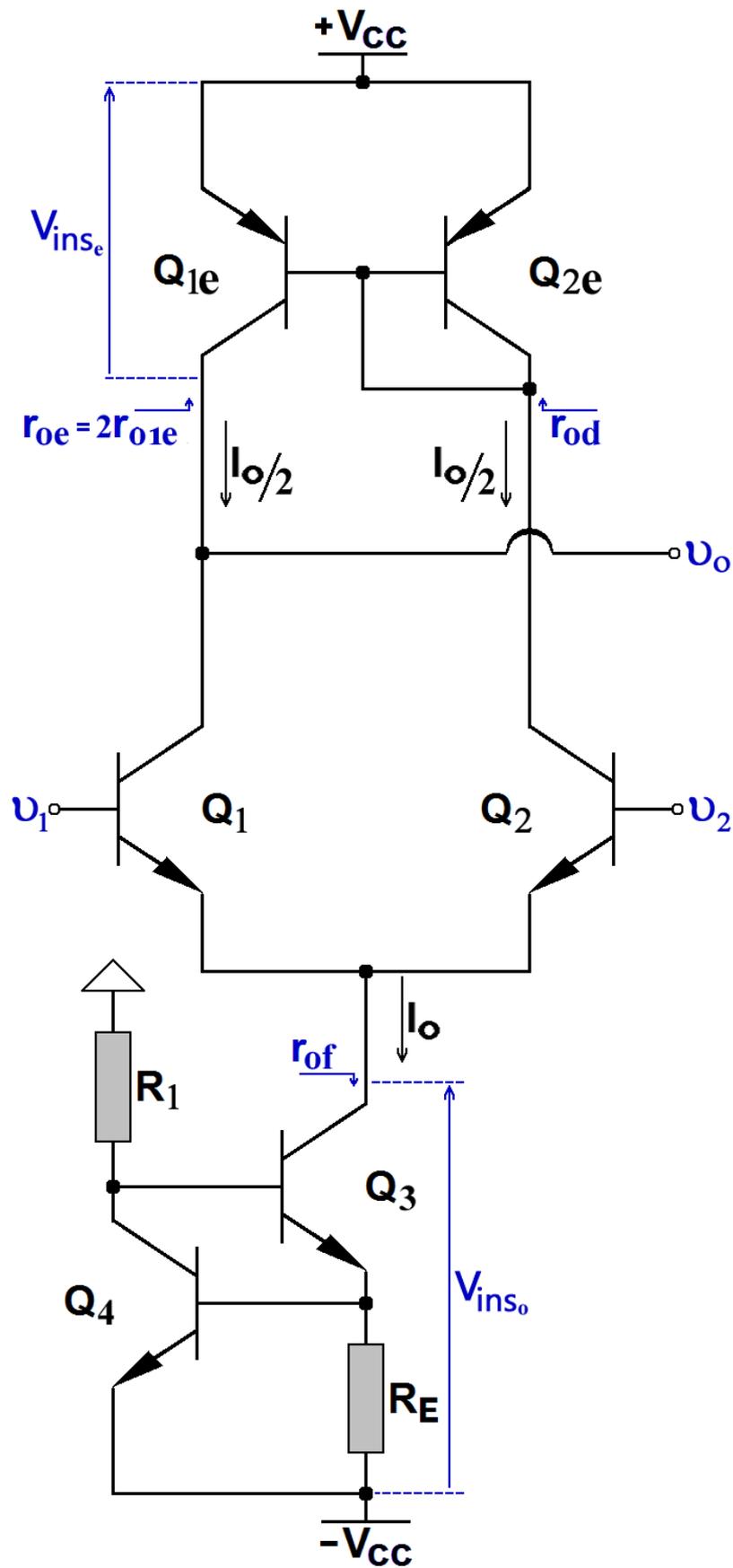


Figura 8 - Amplificador Diferencial com Espelho de Corrente e Fonte de Corrente de Lastro.