

# Resumo

- Realimentação
  - Dessensibilização do Ganho
  - Extensão de Largura de Banda
  - Redução de Ruído
  - Redução de Distorção não Linear
- As quatro tipologias básicas
  - Amplificadores de Tensão
  - Amplificadores de Corrente
  - Amplificadores de Transcondutância
  - Amplificadores de Transresistência

# Realimentação

A realimentação foi inventada por um engenheiro electrónico, Harold Black, em 1928, ao procurar obter repetidores telefónicos com ganho estável.

A realimentação pode ser negativa ou positiva. A realimentação negativa é usada para conseguir as seguintes propriedades:

- Dessensibilizar o ganho: fazer o ganho menos sensível aos valores dos componentes do circuito.
- Reduzir a distorção não linear: tornar a saída proporcional à entrada, ou seja, tornar a saída proporcional à entrada independentemente do nível de sinal.
- Reduzir o efeito do ruído: minimizar a contribuição na saída de sinais gerados tanto por os componentes do circuito como interferências externas.

(continua)

# Realimentação

- Controlar as impedâncias de entrada e saída: aumentar ou diminuir as impedâncias de entrada e saída pela selecção de topologia de realimentação apropriada.
- Extender a largura de banda do amplificador

Todas estas propriedades são obtidas à custa de redução de ganho. Vai ser mostrado que o factor de redução de ganho é o factor pelo qual o circuito é dessensibilizado ou seja o factor que a resistência de entrada dum amplificador de tensão é aumentado ou a largura de banda é extendida e por aí adiante.

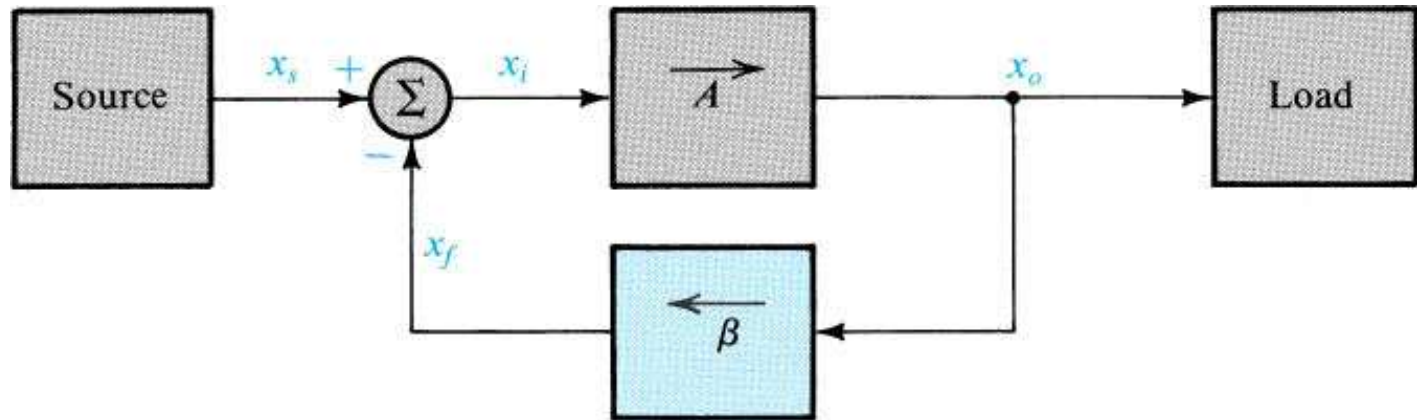
*A ideia básica de realimentação negativa é trocar ganho pelas características desejadas.*

# Realimentação

A realimentação dum amplificador pode ser positiva aumentando o seu ganho podendo levar a que ele oscile. A realimentação positiva é usada no projecto de osciladores, circuitos biestáveis e filtros activos (neste caso sem instabilidade).

Qualquer circuito envolvendo circuitos operacionais é utilizado com realimentação. Outra aplicação já estudada de realimentação negativa é a utilização da resistência de emissor para estabilizar o ponto de polarização, aumentar a resistência de entrada a largura de banda e linearidade do transístor bipolar.

# Realimentação



A figura mostra a estrutura básica do amplificador realimentado. As grandezas representadas podem ser tensões ou correntes. Está implícito que a fonte, a carga e a malha de realimentação ( $\beta$ ) não fazem carga sobre o amplificador ( $A$ ). Em termos práticos a fonte, a carga e a malha de realimentação vão alterar o ganho  $A$  (vamos lidar com este problema mais tarde)

$$x_o = Ax_i \quad x_f = \beta x_o \quad x_i = x_s - x_f \quad (1)$$

das três expressões acima podemos deduzir o ganho em malha fechada

$$A_f = \frac{x_o}{x_s} = \frac{A}{1+A\beta} \quad (2)$$

# Realimentação

A quantidade  $A\beta$  é chamado o ganho da malha. Para a realimentação ser negativa o ganho da malha  $A\beta$  deve ser positivo. Nesse caso é a subtração que torna a realimentação negativa. A equação (2) no acetato 5 indica que para  $A\beta$  positivo o ganho com realimentação  $A_f$  será menor que o ganho em malha aberta  $A$  pela quantidade  $1 + A\beta$ .

Como em muitos circuitos, quando o ganho da malha  $A\beta$  é grande  $A\beta \gg 1$  o ganho em malha fechada é  $A_f \simeq 1/\beta$  isto é, *O ganho do amplificador realimentado é praticamente determinado pela malha de realimentação.* O ganho final então terá pouca dependência do ganho em malha aberta o que é desejado já esse ganho depende grandemente das tolerâncias dos componentes.

Uma vez que a malha de realimentação é formada por componentes passivos, estes podem ser escolhidos com a precisão necessária.

# Realimentação

Das equações em (1) no acetato 5 pode-se deduzir que

$$x_f = \frac{A\beta}{1+A\beta}x_s \quad x_i = \frac{1}{1+A\beta}x_s$$

Se  $A\beta \gg 1$  então  $x_f \simeq x_s$  o que quer dizer que  $x_i$  é quase zero. Isto quer dizer que para uma realimentação grande,  $x_f$  é uma réplica do sinal de entrada  $x_s$ . O sinal  $x_i$  é muitas vezes indicado como o sinal de erro. Observe que a realimentação negativa reduz o sinal que aparece na entrada do amplificador de malha aberta em  $(1 + A\beta)$

# Dessensibilização do Ganho

$$A_f = \frac{x_o}{x_s} = \frac{A}{1+A\beta} \quad (1)$$

Supondo  $\beta$  constante. Derivando ambos os lados da equação em relação a  $A$ ), obtém-se:

$$\partial A_f = \frac{\partial A}{(1+A\beta)^2}$$

Dividindo por (1)

$$\frac{\partial A_f}{A_f} = \frac{1}{(1+A\beta)} \frac{\partial A}{A}$$

A percentagem de mudança do ganho em malha fechada  $A_f$  devido a algum parâmetro de circuito é menor que a percentagem de mudança do ganho em malha aberta  $A$  pela quantidade de realimentação  $1 + A\beta$ .



# Extensão de Largura de Banda

Considerando um amplificador cuja resposta em alta frequência é caracterizada por um pólo único

$$A(s) = \frac{A_M}{1+s/w_H}$$

em que  $A_M$  é o ganho da banda média e  $w_H$  é a frequência de corte superior. A aplicação de realimentação negativa, com um factor independente da frequência  $\beta$  resulta num ganho em malha fechada  $A_f(s)$  dado por

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1+\beta A(s)} = \frac{A_M/(1+A_M\beta)}{1+s/(w_H(1+A_M\beta))}$$

Por isso o amplificador realimentado terá um ganho de banda média  $A_M/(1+A_M\beta)$  e uma frequência de corte dada por

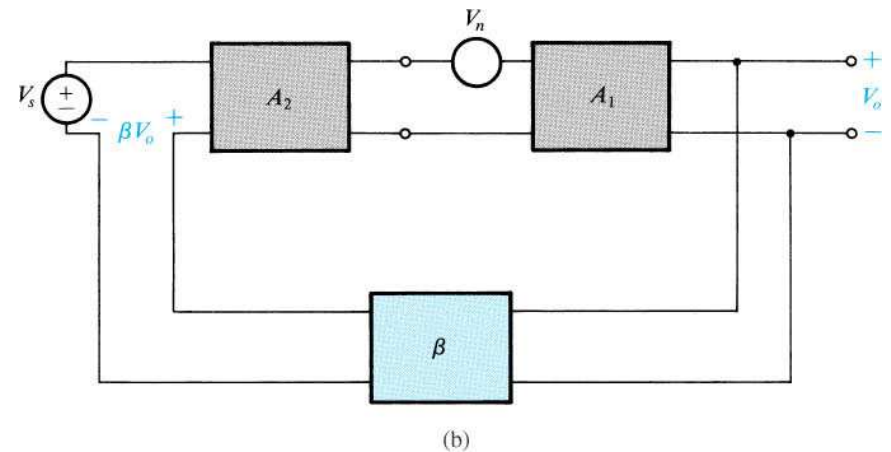
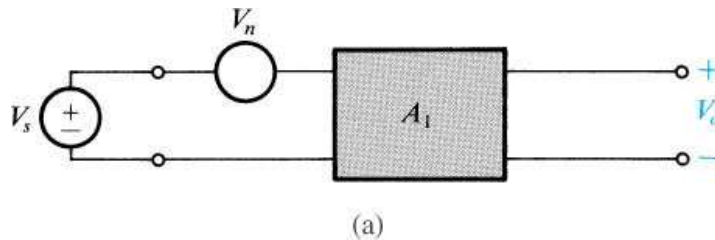
$$w_{Hf} = w_H(1+A_M\beta)$$

Similarmente se tivermos um pólo de baixa frequência  $w_L$  o correspondente pólo em malha fechada é

$$w_{Lf} = \frac{w_L}{1+A_M\beta}$$

De notar que a largura de banda do amplificador é aumentada pelo mesmo factor pela qual o ganho de banda média é diminuída *mantendo o produto ganho-largura de banda constante*.

# Redução de Ruído



A realimentação negativa pode ser utilizada para aumentar a relação sinal-ruído. A figura (a) mostra um amplificador com ganho  $A_1$ , um sinal de entrada  $V_s$  e ruído ou interferência  $V_n$ . A relação sinal-ruído é dada por  $S/N = V_s/V_n$ . Se for possível construir um andar amplificador com ganho  $A_2$  que não esteja sujeito a interferência ou ruído (ou cuja interferência seja muito menor), então, aplicando realimentação a estes dois amplificadores em cascata obtém-se (a tensão de saída é dada por sobreposição):

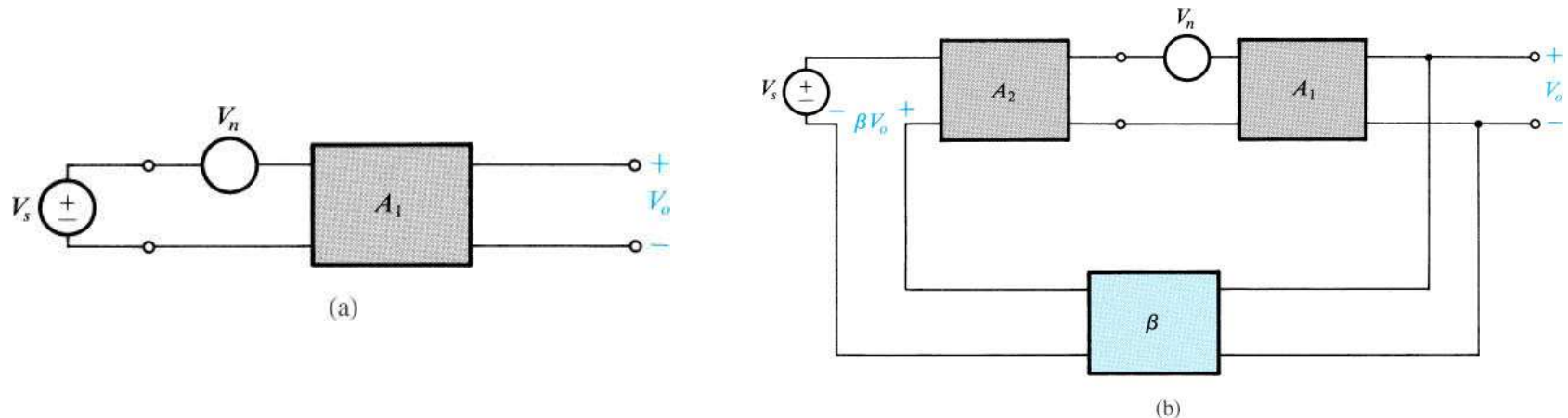
$$V_o = V_s \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} + V_n \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 \beta}$$

O relação sinal ruído à saída é

$$\frac{S}{N} = \frac{V_s}{V_n} A_2$$

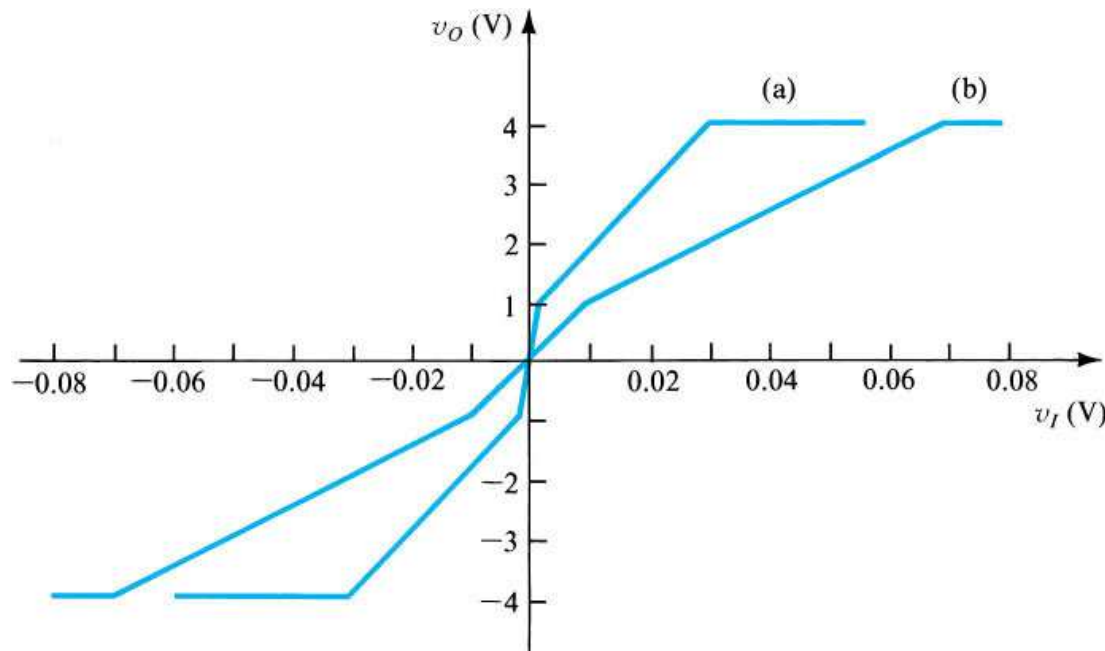
que é multiplicada por  $A_2$ .

# Redução de Ruído



O aumento da relação sinal-ruído pela aplicação de realimentação é possível se podermos preceder um andar ruidoso por um praticamente livre de ruído. Uma aplicação é o andar de saída do amplificador de audio. Esse andar sofre de ruído introduzido pela fonte de alimentação (em geral má filtragem da fonte) pelo facto de pedir correntes de saída elevadas. O andar de saída tem grande ganho de potência mas pouco ganho ou nenhum ganho de tensão. Então o andar de saída é precedido por um amplificador de pequeno sinal de grande ganho e é aplicada realimentação a estes dois andares (com o mesmo ganho de tensão do andar de saída original). Este amplificador de pequeno sinal é alimentado por uma fonte de alimentação com melhor regulação (o que é mais fácil pois a corrente pedida é pequena).

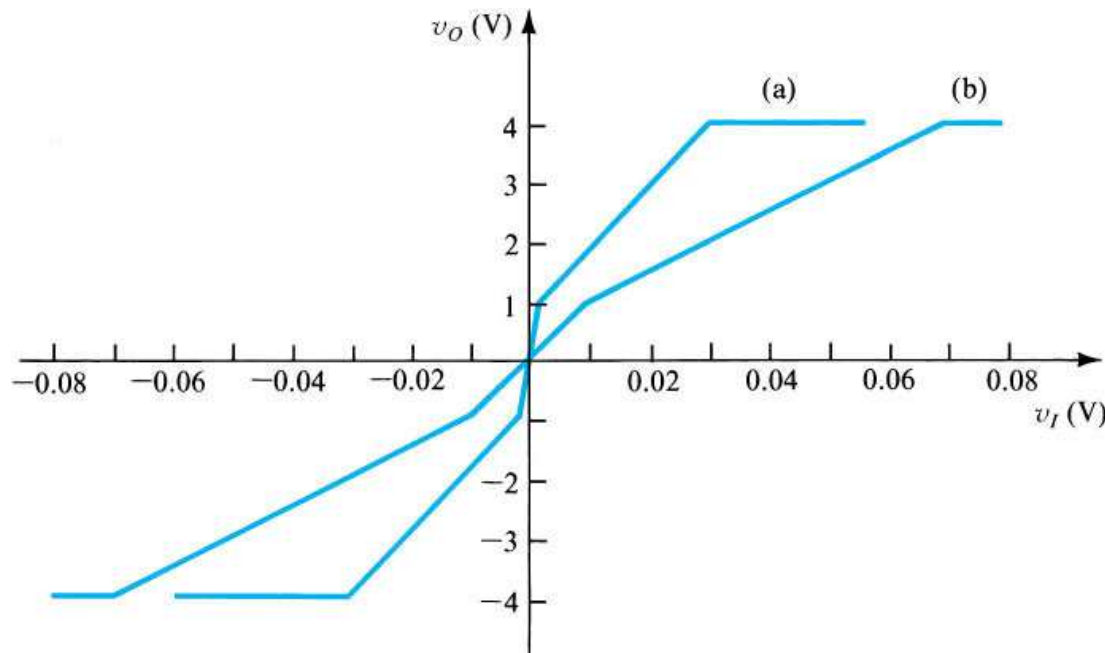
# Redução de Distorção não Linear



A característica da curva é linear por segmentos (ganho 1000, 100, 0). Estes diferentes declives no gráfico de ganho introduzem bastante distorção não linear. A não-linearidade da característica pode ser

reduzida através de introdução de realimentação negativa. Isto não é de admirar já que a realimentação negativa reduz a dependência do ganho em malha fechada do ganho em malha aberta. Se aplicarmos uma realimentação negativa com  $\beta = 0.01$  ao amplificador com curva (a) obtemos uma característica de transferência da curva (b).

# Redução de Distorção não Linear



Obtém-se

o declive (ganho)

de cada segmento de (b)

$$A_{f1} = \frac{1000}{1+1000 \times 0.01} = 90.9$$

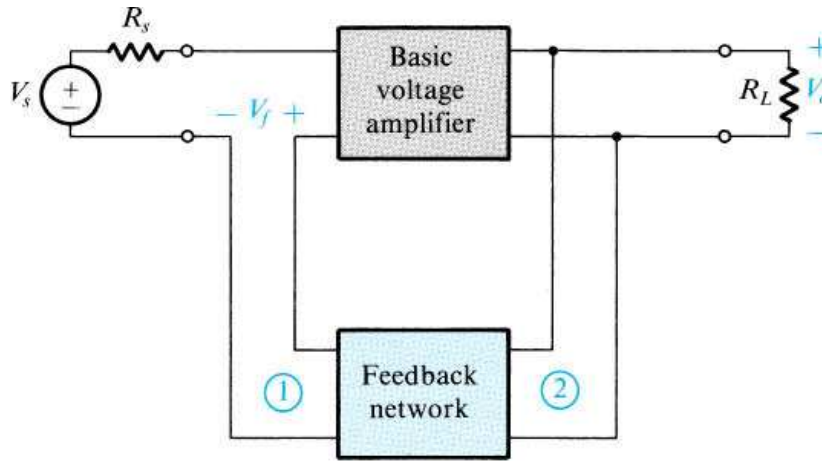
$$A_{f2} = \frac{100}{1+100 \times 0.01} = 50$$

A razão dos declives é bastante reduzido à custa do ganho. O ganho total deve ser restabelecido

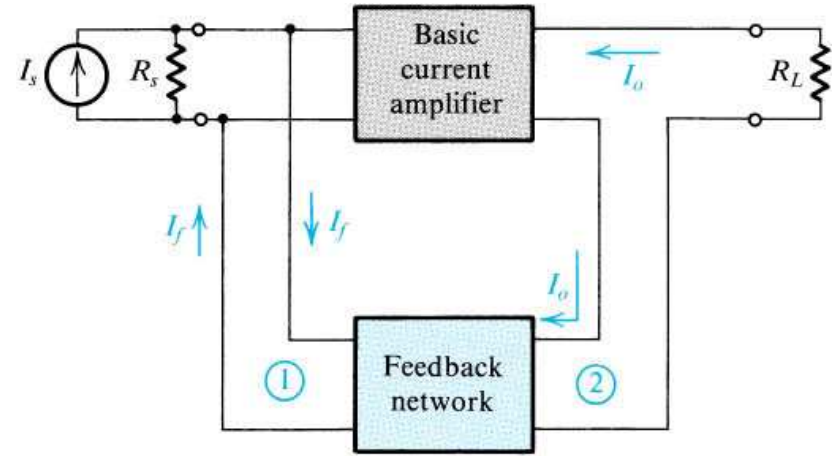
através dum preamplificador que não sofre de não linearidades já que os sinais a amplificar são mais pequenos.

A realimentação negativa não pode fazer nada acerca da saturação do amplificador já que nesse ponto o ganho é pequeno e então a quantidade de realimentação é muito pequena.

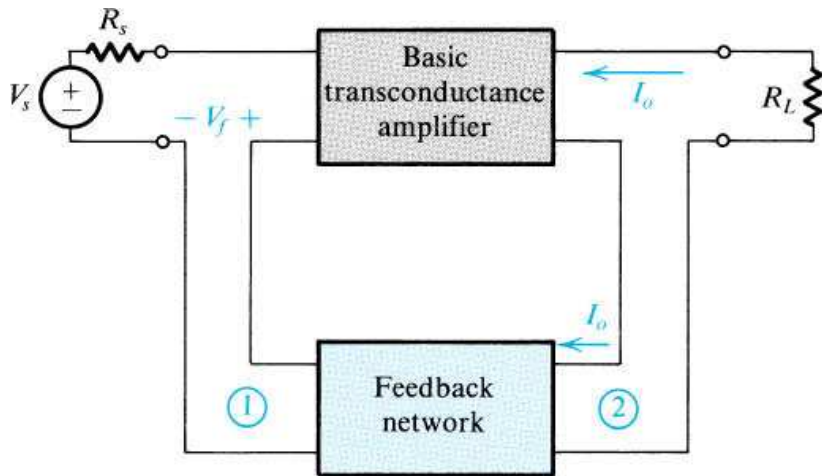
# As quatro tipologias básicas



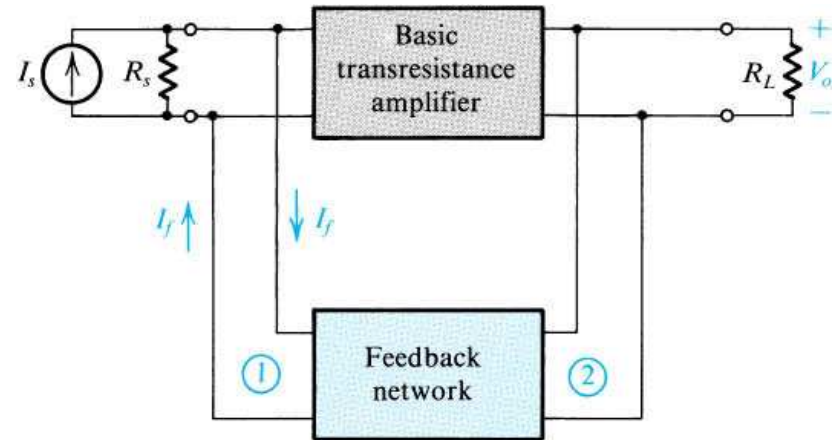
(a)



(b)

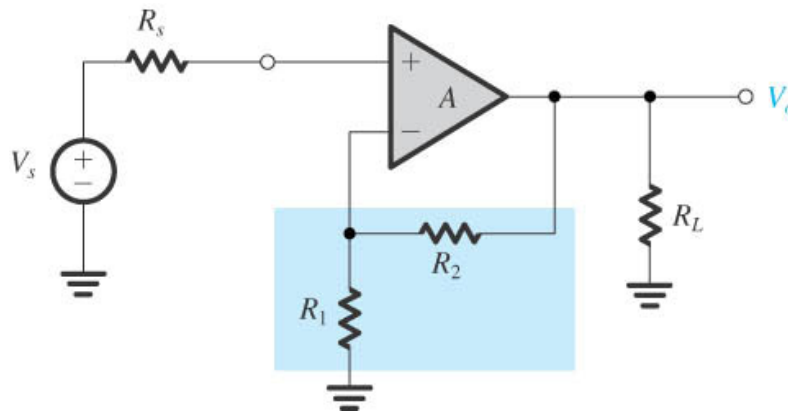


(c)



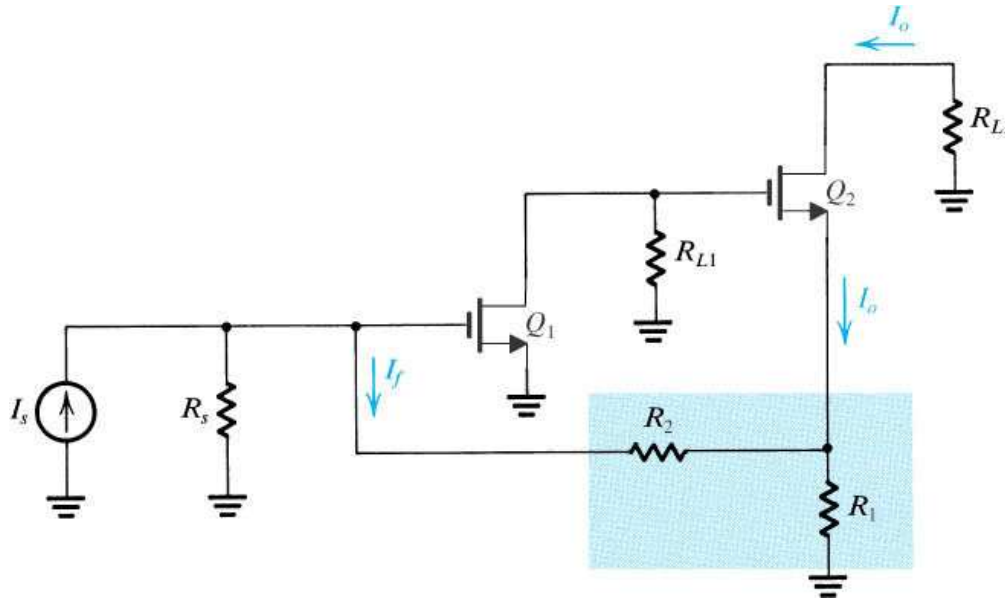
(d)

# Amplificadores de Tensão



Os amplificadores de tensão são essencialmente uma fonte de tensão controlada por tensão. A impedância de entrada deverá ser alta e a impedância de saída pequena. A malha de realimentação deve amostrar a tensão de saída. Por causa da representação de Thévenin da fonte o sinal de realimentação deverá ser uma tensão que pode ser misturada com a tensão da fonte em série. A topologia de realimentação para o amplificador de tensão deverá ser série-paralelo (Mistura de Tensão-Amostragem de Tensão, Figura (a) do acetato 14). Esta tipologia não só estabiliza o ganho de tensão como resulta numa maior resistência de entrada (um resultado da ligação série na entrada) como uma menor resistência de saída (um resultado da ligação paralela na saída). Estas características são as desejáveis. A figura mostra como exemplo o caso do amplificador não inversor.

# Amplificadores de Corrente

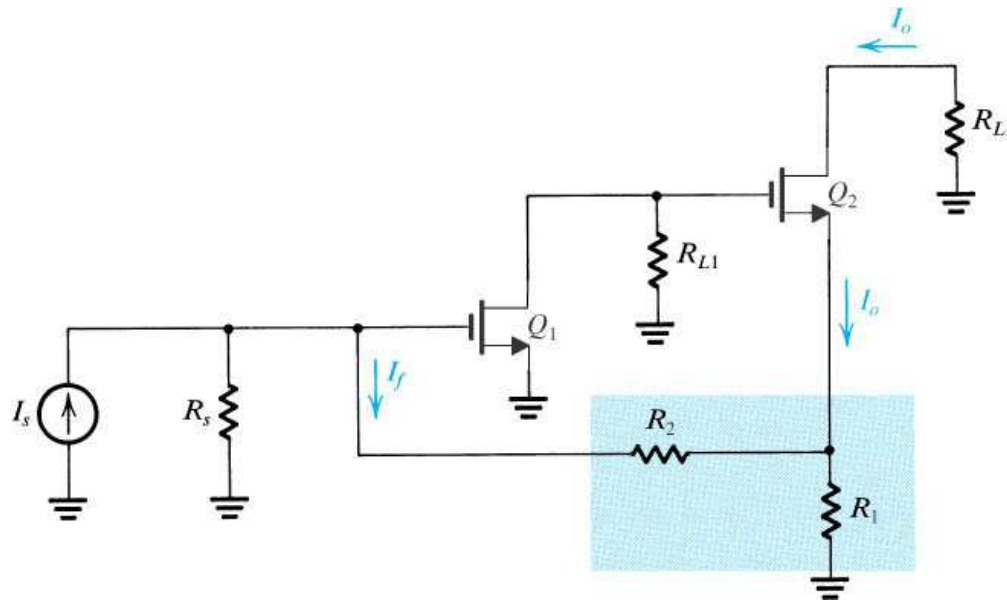


O sinal de entrada é uma corrente por isso a fonte de corrente deve ser representada pelo equivalente de Norton. A saída de interesse é uma corrente por isso a malha de realimentação deve amostrar uma corrente. O sinal de

realimentação deverá ser uma corrente de forma a poder ser misturada em paralelo com a corrente da fonte. A topologia de realimentação para o amplificador de corrente deverá ser paralelo-série (Mistura de Corrente-Amostragem de Corrente, Figura (b) do acetato 14). Esta topologia não só estabiliza o ganho de corrente como resulta numa menor impedância de entrada (por causa da mistura em paralelo) e uma alta impedância de saída (por causa da amostragem série). Estas características são as desejáveis.



# Amplificadores de Corrente

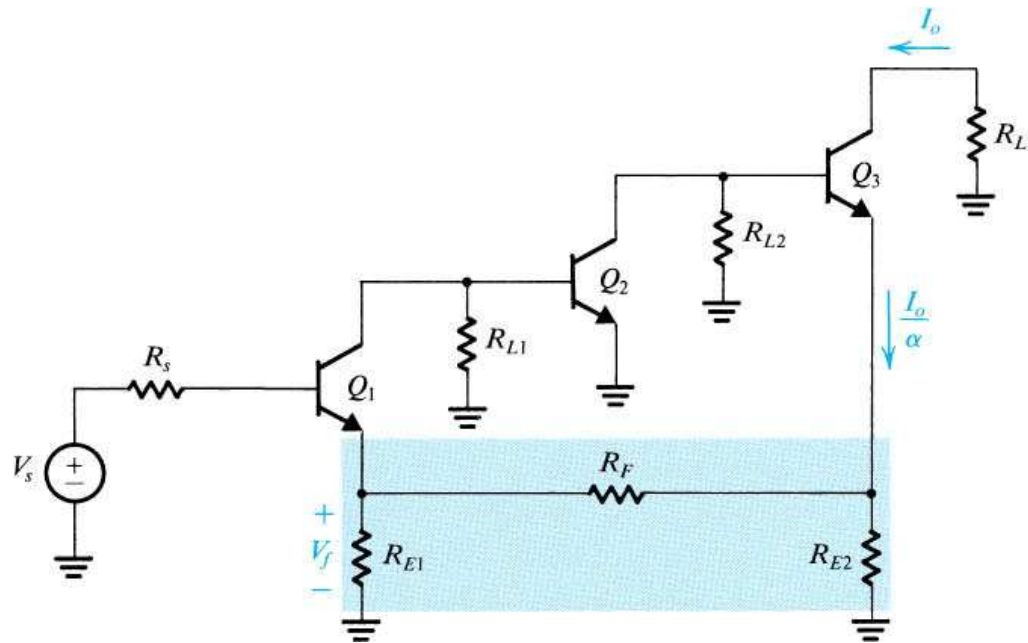


Na figura  $A$  é negativo e  $\beta$  é também negativo. Se  $I_s$  aumentar. A tensão na porta de  $Q_1$  aumenta e por isso a corrente de dreno aumenta. Isto faz que a tensão da porta de  $Q_2$  diminuir por isso  $I_o$  diminui. Em consequência  $I_f$  aumenta. O aumento de  $I_f$  é

subtraído de  $I_s$  causando um aumento menor visto pelo amplificador.

Portanto a realimentação é negativa.

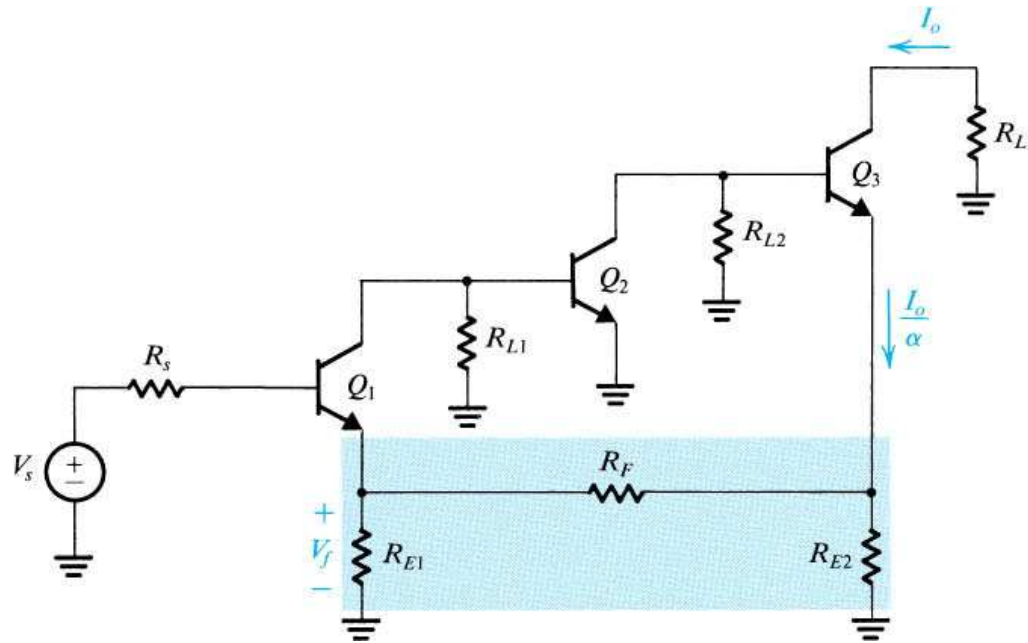
# Amplificadores de Transcondutância



Nos amplificadores de transcondutância o sinal de entrada é uma tensão e o sinal de saída é uma corrente. A topologia de realimentação para o amplificador de transcondutância deverá ser série-série (Mistura de Tensão-Amostragem de

Corrente, Figura (c) do acetato 14). Esta topologia não só estabiliza ganho de transcondutância como resulta uma maior impedância de entrada e uma maior impedância de saída. Estas características são as desejáveis.

# Amplificadores de Transcondutância



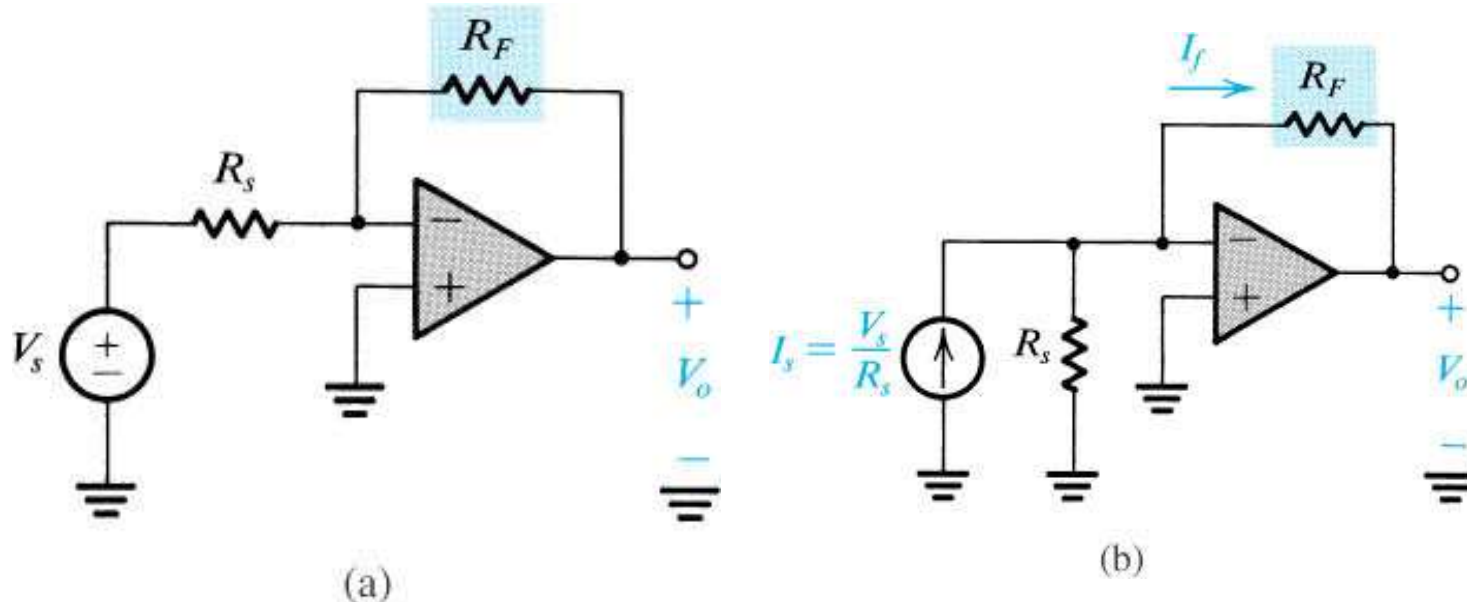
fonte de sinal está na base de  $Q_1$ .

Estas duas aproximações são feitas por conveniência de projecto.

Deve notar-se

que a corrente amostrada não é a corrente de saída mas a corrente de emissor. Também a malha de mistura não é a convencional já que o sinal de realimentação é fornecido à resistência de  $R_{E1}$  que está no emissor de  $Q_1$  enquanto a

# Amplificadores de Transresistância



No amplificador de transresistância o sinal de entrada é uma corrente e o sinal de saída é uma tensão. A topologia de realimentação para o amplificador de transresistância deverá ser paralelo-paralelo (Mistura de corrente-Amostragem de Tensão, Figura (d) do acetato 14). Esta topologia não só estabiliza ganho de transresistância como resulta numa menor impedância de entrada e uma menor impedância de saída. Estas características são as desejáveis. A figura mostra o amplificador inversor que é um exemplo deste tipo de realimentação.