

REALIMENTAÇÃO NEGATIVA

Introdução

Devido à grande dispersão dos parâmetros dos elementos ativos e à variação de suas características com a temperatura e ponto de operação, os amplificadores sem realimentação normalmente apresentam forte não linearidade além de ganho impreciso e instável. Estas características indesejáveis podem ser substancialmente minimizadas construindo amplificadores com realimentação negativa, técnica inventada em 1927 pelo engenheiro eletrônico Harold S. Black (1898-1983) da Western Electric's West Street Labs. Além destas vantagens, que por si só justificariam a aplicação da técnica, o projetista pode ajustar as impedâncias de entrada e de saída do amplificador realimentado, bastando escolher a estrutura de circuito mais conveniente para um determinado problema.

Estrutura básica

Para se construir um amplificador realimentado, além do **amplificador básico** é necessário introduzir dois elementos ao circuito, uma **rede de realimentação** e um **comparador**, conectados conforme indicado no diagrama de fluxo de sinal da Fig.1.

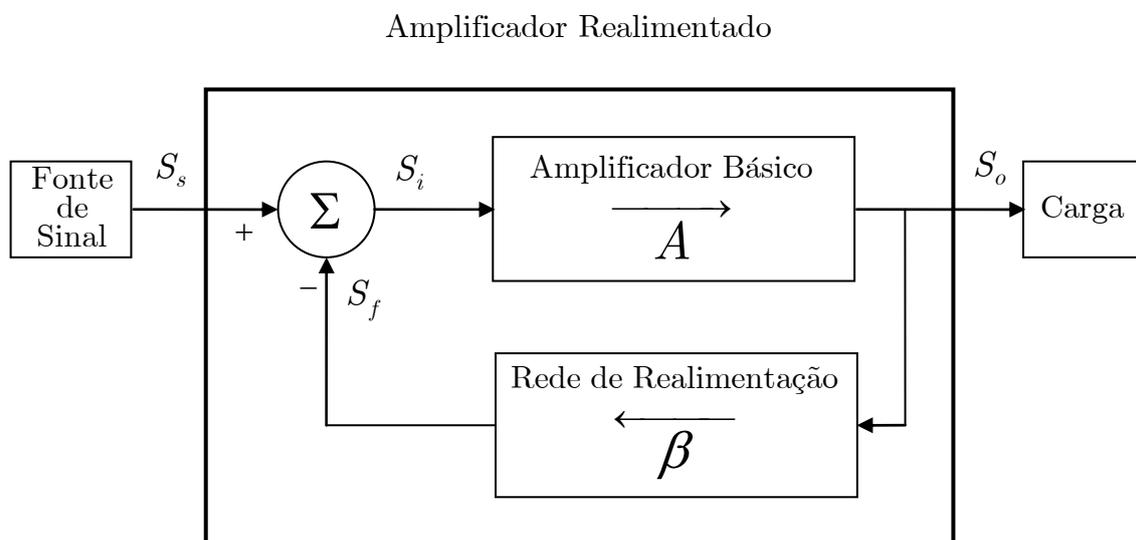


Fig.1: Estrutura básica de um amplificador realimentado. Diagrama de fluxo de sinal.

Para melhor compreensão da técnica em estudo, os blocos são assumidos como ideais, isto é, suas características de ganho (ou atenuação) são bem definidas e não afetam o funcionamento dos demais blocos aos quais estão conectados. Na prática, sabemos que os níveis de impedância de entrada e saída de cada bloco interferem nas características de ganho dos demais blocos. Estes efeitos serão estudados com detalhes mais adiante.

Deve-se observar, também, que o fluxo de sinal no sentido direto passa totalmente pelo amplificador básico e, no sentido reverso, pela rede de realimentação.

O **ganho do amplificador básico** (A) é também chamado de **ganho em malha aberta** (*open-loop gain*). A rede de realimentação, geralmente formada por um atenuador de precisão, produz um sinal S_f que é uma amostra do sinal de saída S_o . Estes sinais estão relacionados pelo **fator de realimentação** (β). O sinal S_i , que é a diferença entre o sinal de entrada S_s e S_f é comumente chamado de **sinal de erro** e o circuito que implementa esta diferença é conhecido por **circuito comparador**.

O ganho do amplificador realimentado ($A_f = S_o/S_s$) é denominado **ganho em malha fechada** (*closed-loop gain*).

Diz-se que a realimentação é negativa quando o sinal de erro (S_i) é menor que o sinal de entrada (S_s).

Deve-se observar que a amostragem na saída e a comparação na entrada podem ser arbitrária e independentemente escolhidas como sendo de tensão ou corrente. Conclui-se que o diagrama de fluxo da Fig 1 representa quatro possíveis topologias de realimentação.

Propriedades básicas da realimentação negativa

Efeito sobre o ganho

O ganho do amplificador realimentado A_f é obtido pela relação S_o/S_s , então

$$\left. \begin{array}{l} S_o = AS_i \\ S_f = \beta S_o \\ S_i = S_s - S_f \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{S_o}{A} = S_s - \beta S_o \quad \Rightarrow \quad \boxed{A_f = \frac{S_o}{S_s} = \frac{A}{1 + \beta A}} \quad (1.1)$$

A quantidade βA é denominada **ganho de malha** (*loop-gain*). Deve-se observar que, para consistência da Eq. (1.1), este termo é adimensional e, para caracterizar a realimentação negativa, é sempre positivo, isto é, A e β têm o mesmo sinal. O fator $1 + \beta A$ é denominado de **quantidade de realimentação**.

Da Eq. (1.1) tem-se que, em condições ideais ($A \rightarrow \infty$) ou ($\beta A \gg 1$), o ganho do amplificador realimentado ($A_{f \text{ ideal}}$) depende somente da atenuação (β) da rede de realimentação, ou seja

$$\left. \begin{array}{l} A \rightarrow \infty \\ \text{ou} \\ \beta A \gg 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \quad \boxed{A_{f \text{ ideal}} \approx \frac{1}{\beta}} \quad (1.2)$$

Portanto, da Eq.(1.2) verificamos que se a atenuação (β) da rede de realimentação for ajustada com precisão, o ganho do amplificador realimentado será preciso desde que o ganho do amplificador básico seja suficientemente elevado de modo a se obter $\beta A \gg 1$. Como a rede de realimentação é, geralmente, constituída de componentes passivos que podem ser escolhidos de modo a obter a sua atenuação (β) com a precisão desejada, a realimentação negativa assume grande importância, uma vez que viabiliza o projeto de amplificadores com ganhos precisos e estáveis.

Deve-se observar na Eq. (1.1), que o ganho do amplificador básico (A) pode ser obtido assumindo que não há realimentação, ou seja, $\beta = 0$.

Redução da sensibilidade do ganho

Já é de nosso conhecimento que o ganho de amplificadores sem realimentação (A) é muito dependente das características do elemento ativo. Portanto, é desejável conhecer o comportamento do ganho (A_f) do amplificador realimentado, considerando as variações do ganho (A).

Diferenciando ambos os lados da Eq. (1.1), e assumindo β constante, obtém-se

$$dA_f = \frac{dA}{(1 + \beta A)^2} \quad (1.3)$$

Dividindo a Eq. (1.3) pela Eq. (1.1) resulta

$$\boxed{\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{(1 + \beta A)} \cdot \frac{dA}{A}} \quad (1.4)$$

Pode-se ver pela Eq. (1.4) que a variação percentual do ganho do amplificador realimentado (A_f) é sensivelmente menor. Equivale à variação percentual do amplificador sem realimentação (A) reduzida pelo fator $1 + \beta A$.

Esta equação se aplica somente para variações incrementais do ganho A . Para grandes variações, uma estimativa mais precisa pode ser obtida comparando as variações percentuais em duas situações de ganho, ou seja

$$A_{f1} = \frac{A_1}{1 + \beta A_1} \quad e \quad A_{f2} = \frac{A_2}{1 + \beta A_2}$$

$$\Delta A_f = A_{f2} - A_{f1} = \frac{A_2}{1 + \beta A_2} - \frac{A_1}{1 + \beta A_1} = \frac{\Delta A}{(1 + \beta A_1)(1 + \beta A_2)} \quad (1.5)$$

Dividindo a Eq.(1.5) por A_{f1} , tomado como referência, vem

$$\frac{\Delta A_f}{A_{f1}} = \frac{1}{(1 + \beta A_2)} \cdot \frac{\Delta A}{A_1} \quad (1.6)$$

Muitas vezes é conveniente estimar a variação do ganho do amplificador realimentado (A_f) não em relação ao ganho sem realimentação, mas em relação ao ganho realimentado ideal ($A_{f\text{ideal}}$). Assim,

$$\frac{A_f}{A_{f\text{ideal}}} = \frac{A}{1 + \beta A} \bigg/ \frac{1}{\beta}$$

$$\frac{A_f}{A_{f\text{ideal}}} = \frac{\beta A}{1 + \beta A} \quad (1.7)$$

Alternativamente, pode-se determinar o ganho de malha (βA) quando se conhece a relação entre os ganhos realimentados, real e ideal. Da Eq. (1.7) obtém-se :

$$\beta A = \frac{\frac{A_f}{A_{f\text{ideal}}}}{\left(1 - \frac{A_f}{A_{f\text{ideal}}}\right)} \quad (1.8)$$

Efeito sobre a banda passante

Freqüência de corte superior

Seja um amplificador sem realimentação com freqüência de corte superior ω_H , modelado conforme a Eq.(1.9), onde A_o é o ganho na faixa média.

$$A(s) = \frac{A_o}{1 + s/\omega_H} \quad (1.9)$$

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + \beta A(s)} = \frac{\frac{A_o}{1 + s/\omega_H}}{1 + \beta \frac{A_o}{1 + s/\omega_H}} = \frac{\frac{A_o}{1 + \beta A_o}}{1 + s/(1 + \beta A_o)\omega_H} \quad (1.10)$$

$$A_f(s) = \frac{A_{fo}}{1 + s/\omega_{Hf}} \quad \text{onde} \quad \begin{cases} A_{fo} = \frac{A_o}{1 + \beta A_o} \\ \omega_{Hf} = (1 + \beta A_o)\omega_H \end{cases} \quad (1.11)$$

Pode-se observar pela Eq.(1.11) que, no amplificador realimentado, a freqüência de corte superior ω_{Hf} fica aumentada pelo fator $1 + \beta A_o$.

Freqüência de corte inferior

Analogamente, pela Eq.(1.14) pode-se observar que, no amplificador realimentado, a freqüência de corte inferior ω_{Lf} fica reduzida pelo fator $1 + \beta A_o$.

$$A(s) = \frac{A_o}{1 + \omega_L/s} \quad (1.12)$$

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + \beta A(s)} = \frac{\frac{A_o}{1 + \omega_L/s}}{1 + \beta \frac{A_o}{1 + \omega_L/s}} = \frac{\frac{A_o}{1 + \beta A_o}}{1 + \omega_L/(1 + \beta A_o)s} \quad (1.13)$$

$$A_f(s) = \frac{A_{fo}}{1 + \omega_{Lf}/s} \quad \text{onde} \quad \begin{cases} A_{fo} = \frac{A_o}{1 + \beta A_o} \\ \omega_{Lf} = \omega_L / (1 + \beta A_o) \end{cases} \quad (1.14)$$

Efeito sobre a distorção

Os amplificadores não realimentados, normalmente apresentam distorção do sinal de saída devido à não linearidade do elemento ativo usado na amplificação. Esta distorção é consideravelmente reduzida com o uso da realimentação.

Suponha um amplificador não realimentado com ganho variando com a amplitude do sinal de entrada, conforme pode ser nitidamente observado em amplificação de grandes sinais.

Por simplicidade, vamos admitir que este amplificador tenha um ganho de 500 para tensão de saída de pico de 0 até 3V, ganho de 200 entre 3 e 6V e, ganho 0 para maiores do que 6V, conforme Fig. 2.

A aplicação de realimentação neste amplificador, com $\beta = 0,05$, transforma o ganho da seguinte forma:

$$A_1 = 500 \quad \Rightarrow \quad A_{f1} = \frac{500}{1 + 500 \times 0,05} = 19,23$$

$$A_2 = 200 \quad \Rightarrow \quad A_{f2} = \frac{200}{1 + 200 \times 0,05} = 18,19$$

$$A_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad A_{f3} = 0 \quad (\text{saturação})$$

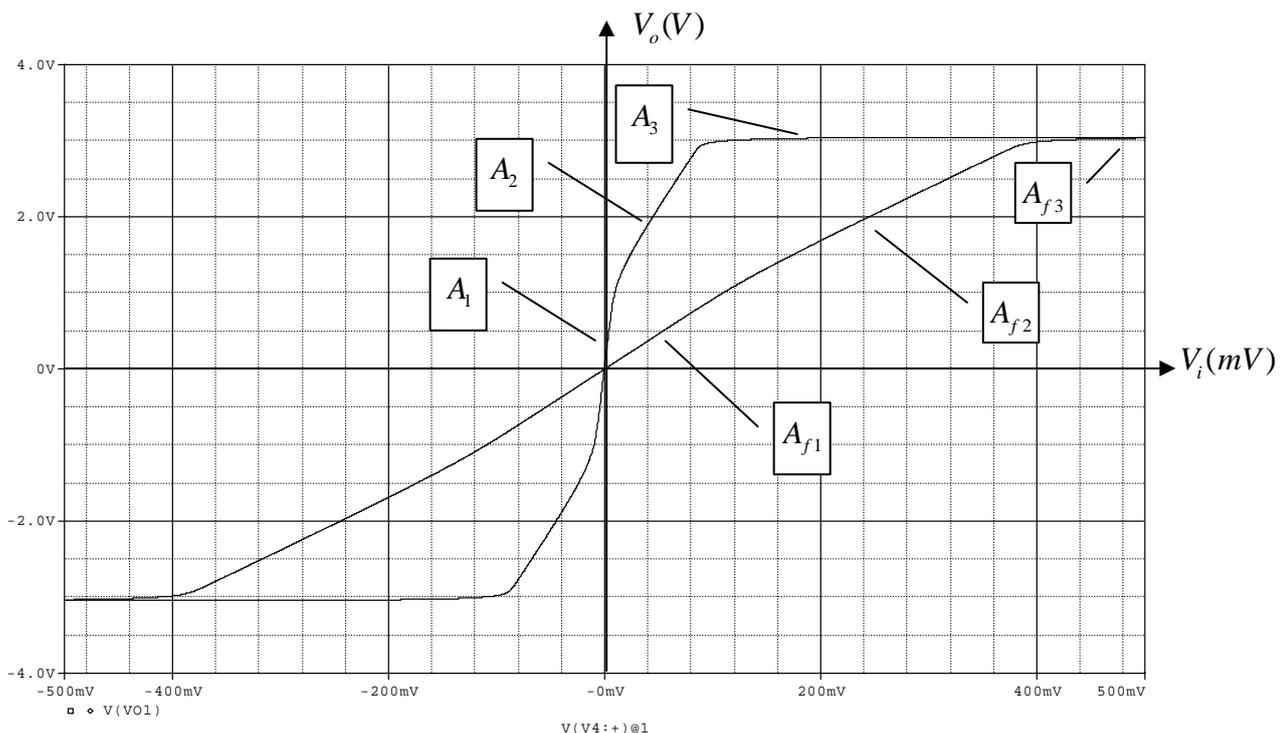


Fig. 2 Comparação das curvas de transferência entrada/saída para os amplificadores sem e com realimentação.

Observe que uma redução de 60% no ganho (de 500 para 200) do amplificador básico (sem realimentação) provocou uma redução de apenas 5,4% no ganho do amplificador realimentado; desta forma, como o ganho está mais constante com a amplitude, o sinal de saída apresenta menor distorção. Na Fig. 2 pode-se observar a linearização da curva de transferência entrada /saída para o amplificador realimentado.

Redução de ruído ou sinais espúrios

A realimentação negativa pode ser usada para reduzir o efeito indesejável de ruído ou de sinais espúrios nos amplificadores. Para quantificar esse efeito vamos utilizar um dos fatores de qualidade para comparação de amplificadores, a relação sinal/ruído (S/N) medida na saída. Este parâmetro é obtido pela razão entre a amplitude do sinal e a amplitude do sinal espúrio no mesmo ponto do circuito.

Para a verificação do efeito da realimentação na redução de ruído ou sinais espúrios, consideremos dois amplificadores com ganhos iguais (A_1), sendo um deles realimentado e o outro não, conforme Fig. 3a e Fig. 3b.

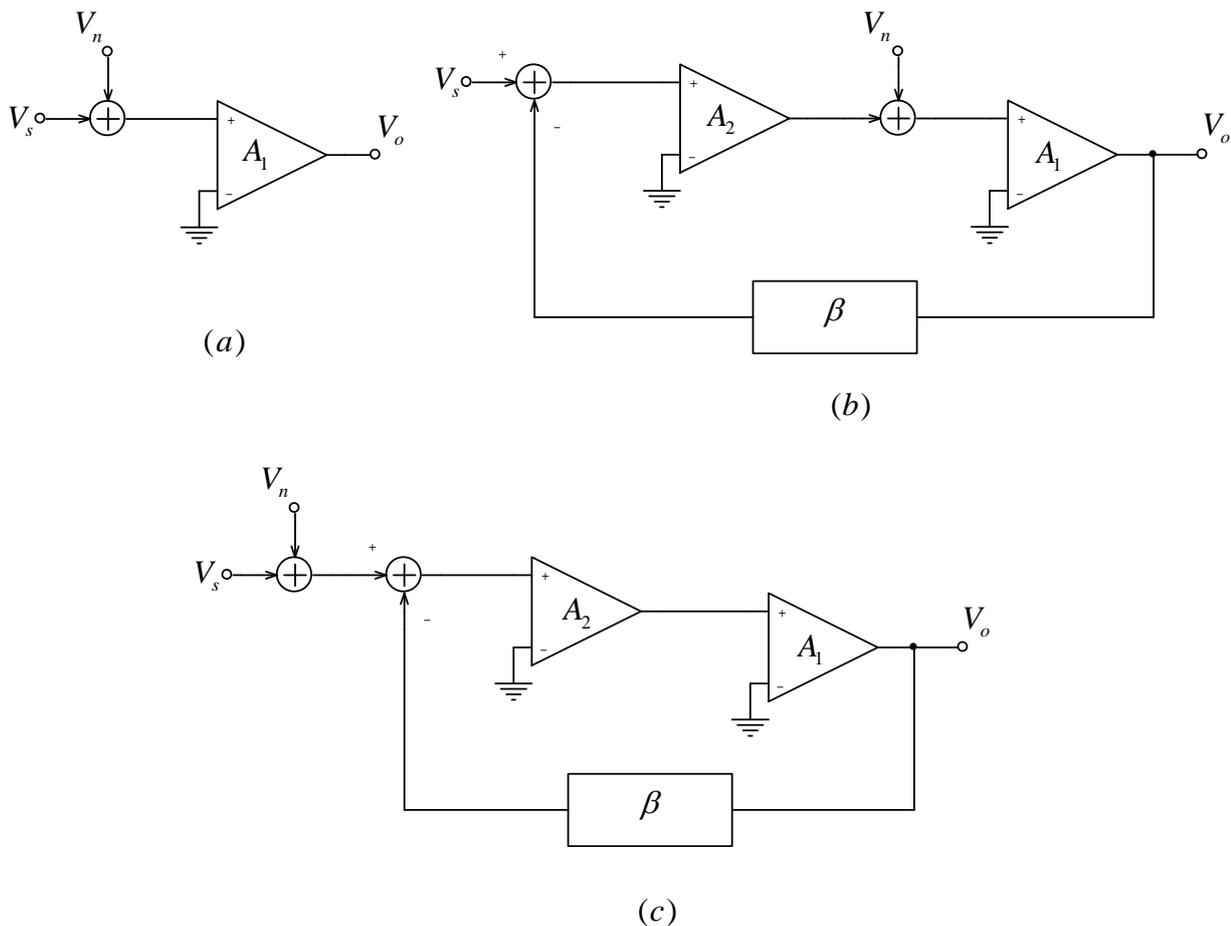


Fig. 3 Efeito sobre sinais espúrios: a) amplificador sem realimentação. b) amplificador com realimentação com fonte de sinal espúrio intermediária. c) amplificador com realimentação com fonte de sinal espúrio na entrada.

Para compensar a redução de ganho causada pela realimentação negativa é necessário adicionar um estágio com ganho A_2 de forma que $A_f = A_2 A_1 / (1 + \beta A_2 A_1)$. A condição de $A_f = A_1$ será satisfeita se $\beta A_1 = 1$ e $A_2 \gg 1$. A diferença entre os amplificadores realimentados é a localização da fonte de ruído. No primeiro caso (Fig. 3b) a fonte de ruído é introduzida na entrada do estágio A_1 e, no segundo caso (Fig. 3c), na entrada do amplificador.

A relação sinal/ruído (S/N) para o amplificador sem realimentação (Fig. 3a) é:

$$V_o = A_1 V_s + A_1 V_n \Rightarrow \frac{S}{N} = \frac{V_s}{V_n} \quad (1.15)$$

Para o amplificador com realimentação da Fig. 3b, temos:

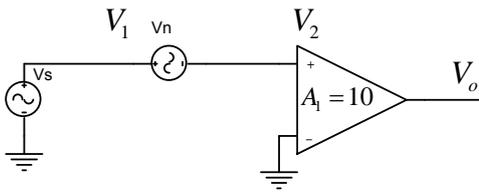
$$V_o = \frac{A_2 A_1}{1 + \beta A_2 A_1} V_s + \frac{A_1}{1 + \beta A_2 A_1} V_n \Rightarrow \frac{S}{N} = \frac{A_2 V_s}{V_n} \quad (1.16)$$

Para o amplificador com realimentação da Fig. 3c, temos:

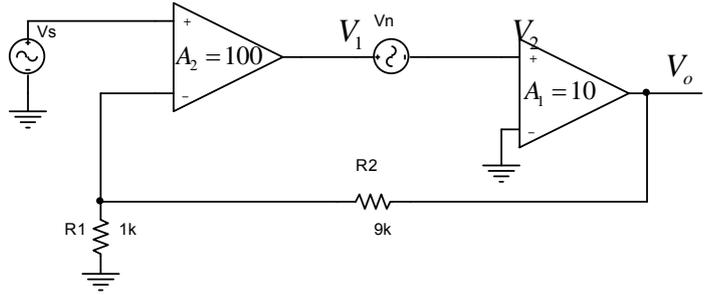
$$V_o = \frac{A_2 A_1}{1 + \beta A_2 A_1} V_s + \frac{A_2 A_1}{1 + \beta A_2 A_1} V_n \Rightarrow \frac{S}{N} = \frac{V_s}{V_n} \quad (1.17)$$

Pode-se observar pela comparação das relações sinal/ruído, que se o ruído ou sinal espúrio for introduzido num estágio intermediário do amplificador básico, haverá uma redução significativa da interferência. Por outro lado, se o ruído ou sinal espúrio for adicionado na entrada do amplificador junto com o sinal a ser amplificado, não é observada nenhuma melhora. Este resultado era esperado uma vez que o amplificador não tem como distinguir o que é sinal e o que é sinal espúrio, amplificando ambos da mesma forma resultando, portanto, na mesma relação S/N .

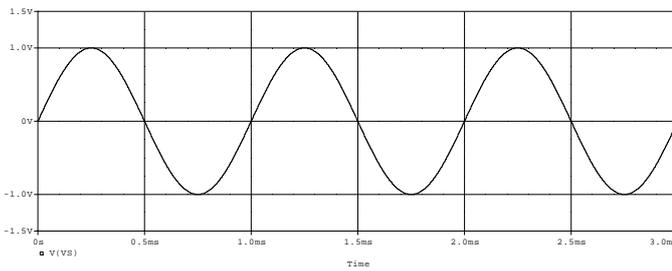
Para exemplificar, suponha um amplificador com ganho $A_1 = 10V/V$ que tem uma fonte de sinal espúrio de V_n associada à sua entrada (Fig. 4a). Nas Fig. 4b a Fig. 4d são mostradas as formas de onda, respectivamente, em V_1 , V_n e V_2 . O sinal de saída é $V_o = 10V_2$.



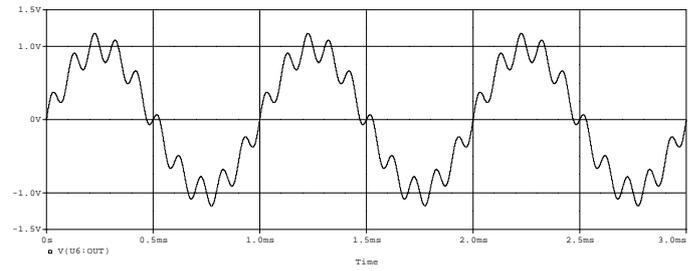
(a)



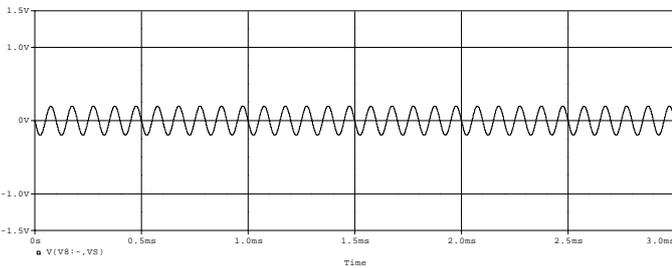
(e)



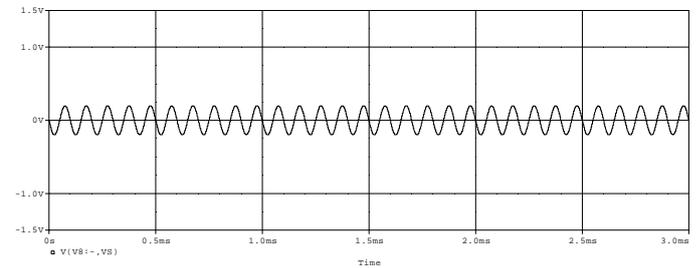
(b) sinal V_1



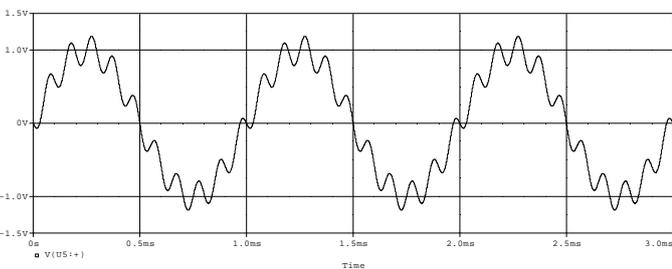
(f) sinal V_1



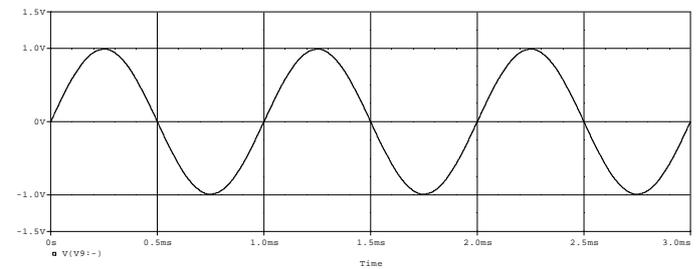
(c) sinal V_n



(g) sinal V_n



(d) sinal V_2



(h) sinal V_2

Fig. 4

Consideremos, agora, que para formar o amplificador realimentado com ganho $A_f = A_1 = 10 V/V$, é acrescentado um estágio isento de sinais espúrios e com ganho $A_2 = 100 V/V$, conforme Fig. 4e. Analogamente, nas Fig. 4f a Fig. 4h são mostradas as formas de onda, respectivamente, em V_1 , V_n e V_2 . O sinal de saída é $V_o = 10V_2$.

No amplificador realimentado o sinal espúrio é reduzido pelo valor de A_2 . Observe que V_1 é a soma do sinal de entrada com o sinal espúrio invertido. Ao somar com V_n , o sinal espúrio é drasticamente reduzido, produzindo o sinal V_2 mais limpo.

Topologias básicas da realimentação

O amplificador básico (A) e a rede de realimentação (β) podem ter suas entradas e saídas associadas em série ou paralelo, dependendo do tipo de amostragem e de comparação. Então, são possíveis quatro topologias de realimentação, que veremos a seguir:

- **Amostragem de tensão, comparação de tensão - (ganho de tensão A_v)**

A Fig. 5a mostra o diagrama em blocos de um amplificador ligado na configuração amostragem de tensão/comparação de tensão.

Na saída, como o sinal amostrado é a tensão V_o , a rede de realimentação e o amplificador básico estão conectados em paralelo, ou seja, ambos os blocos têm os mesmos terminais de saída, caracterizando uma conexão em nó.

Na entrada, como os dois blocos estão conectados em série, a comparação de tensão é implementada pela malha única de conexão dos dois blocos. O sinal aplicado ao amplificador básico (V_i) é a diferença entre os sinais de entrada (V_s) e a amostra (V_f) fornecida pela rede de realimentação. Para a representação do sinal de entrada foi escolhida uma fonte de tensão, que, como veremos adiante, simplifica a análise e facilita a aplicação da técnica ora em estudo.

Alguns autores se referem a este tipo de realimentação como **série-paralelo** ou **malha-nó**, numa alusão ao tipo de conexão entrada-saída. A denominação **tensão-série** também é empregada referindo-se ao tipo de amostragem e a conexão utilizada na entrada.

Neste caso, o ganho do amplificador realimentado é dado pela relação entre o sinal amostrado na saída (V_o) e o sinal de entrada (V_s), caracterizando um ganho de tensão (A_{vf}). Como a comparação é de tensão, o sinal aplicado à entrada do amplificador básico é, também,

uma tensão (V_i), caracterizando um ganho de tensão (A_V), uma vez que o sinal amostrado é o mesmo (V_o).

- **Amostragem de tensão, comparação de corrente - (ganho de transresistência A_R).**

A Fig. 5b mostra o diagrama em blocos de um amplificador ligado na configuração amostragem de tensão/comparação de corrente.

Na saída, como o sinal amostrado é a tensão V_o , a rede de realimentação e o amplificador básico estão conectados em paralelo, ou seja, ambos os blocos têm os mesmos terminais de saída, caracterizando uma conexão por nó.

Na entrada, os dois blocos estão conectados em paralelo caracterizando, também, uma conexão por nó, que implementa a comparação de corrente. O sinal aplicado ao amplificador básico (I_i) é a diferença entre os sinais de entrada (I_s) e a amostra (I_f) fornecida pela rede de realimentação. Para a representação do sinal de entrada foi escolhida uma fonte de corrente.

Outros nomes: realimentação **paralelo-paralelo, nó-nó** ou **tensão-paralelo**.

Neste caso, o ganho do amplificador realimentado é dado pela relação entre o sinal amostrado na saída (V_o) e o sinal de entrada (I_s), caracterizando um ganho de transresistência (A_{Rf}). Como a comparação é de corrente, o sinal aplicado à entrada do amplificador básico é, também, uma corrente (I_i), caracterizando um ganho de transresistência (A_R), uma vez que o sinal amostrado é o mesmo (V_o).

- **Amostragem de corrente, comparação de tensão - (ganho de transcondutância A_G)**

A Fig. 5c mostra o diagrama em blocos de um amplificador ligado na configuração amostragem de corrente/comparação de tensão.

Na saída, como o sinal amostrado é a corrente comum a ambos os blocos I_o . A rede de realimentação e o amplificador básico estão conectados em série, caracterizando uma conexão por malha.

Na entrada, como os dois blocos estão conectados em série, a comparação de tensão é implementada pela malha única de conexão dos dois blocos. O sinal aplicado ao amplificador básico (V_i) é a diferença entre os sinais de entrada (V_s) e a amostra (V_f) fornecida pela rede de realimentação. Para a representação do sinal de entrada foi escolhida uma fonte de tensão.

Outros nomes: realimentação **série-série, malha-malha** ou **corrente-série**.

Neste caso, o ganho do amplificador realimentado é dado pela relação entre o sinal amostrado na saída (I_o) e o sinal de entrada (V_s), caracterizando um ganho de transcondutância (A_{Gf}). Como a comparação é de tensão, o sinal aplicado à entrada do amplificador básico é, também, uma tensão (V_i), caracterizando um ganho de transcondutância (A_G), uma vez que o sinal amostrado é o mesmo (I_o).

- **Amostragem de corrente, comparação de corrente - (ganho de corrente A_I)**

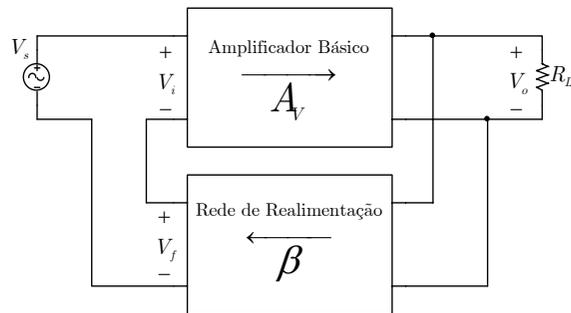
A Fig. 5d mostra o diagrama em blocos de um amplificador ligado na configuração amostragem de corrente/comparação de corrente.

Na saída, como o sinal amostrado é a corrente comum a ambos os blocos I_o . A rede de realimentação e o amplificador básico estão conectados em série, caracterizando uma conexão por malha.

Na entrada, os dois blocos estão conectados em paralelo caracterizando, também, uma conexão por nó, que implementa a comparação de corrente. O sinal aplicado ao amplificador básico (I_i) é a diferença entre os sinais de entrada (I_s) e a amostra (I_f) fornecida pela rede de realimentação. Para a representação do sinal de entrada foi escolhida uma fonte de corrente.

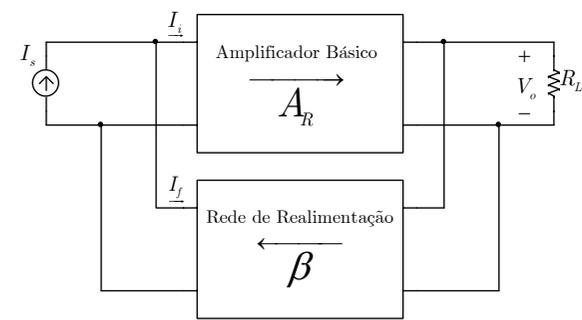
Outros nomes: realimentação **paralelo-série**, **nó-malha** ou **corrente-paralelo**.

Neste caso, o ganho do amplificador realimentado é dado pela relação entre o sinal amostrado na saída (I_o) e o sinal de entrada (I_s), caracterizando um ganho de corrente (A_{If}). Como a comparação é de corrente, o sinal aplicado à entrada do amplificador básico é, também, uma corrente (I_i), caracterizando um ganho de corrente (A_I), uma vez que o sinal amostrado é o mesmo (I_o).



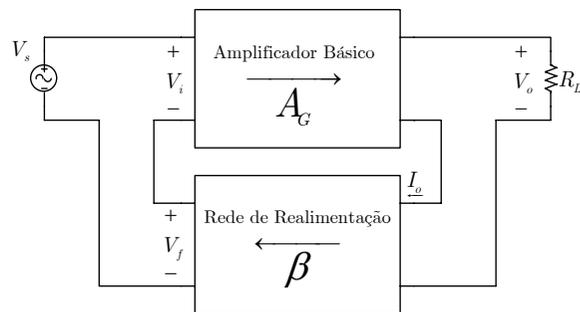
$$\left. \begin{array}{l} V_o = A_V V_i \\ V_f = \beta V_o \\ V_i = V_s - V_f \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{V_o}{A_V} = V_s - \beta V_o \Rightarrow \boxed{A_{Vf} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{A_V}{1 + \beta A_V}}$$

(a)



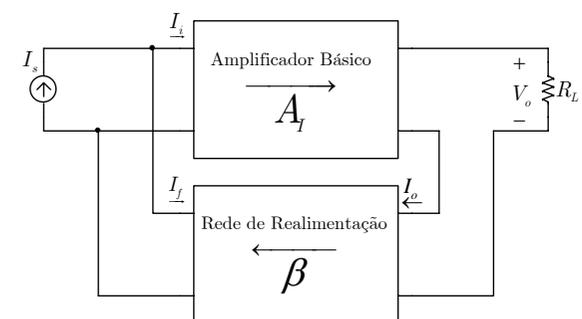
$$\left. \begin{array}{l} V_o = A_R I_i \\ I_f = \beta V_o \\ I_i = I_s - I_f \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{V_o}{A_R} = I_s - \beta V_o \Rightarrow \boxed{A_{Rf} = \frac{V_o}{I_s} = \frac{A_R}{1 + \beta A_R}}$$

(b)



$$\left. \begin{array}{l} I_o = A_G V_i \\ V_f = \beta I_o \\ V_i = V_s - V_f \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{I_o}{A_G} = V_s - \beta I_o \Rightarrow \boxed{A_{Gf} = \frac{I_o}{V_s} = \frac{A_G}{1 + \beta A_G}}$$

(c)



$$\left. \begin{array}{l} I_o = A_I I_i \\ I_f = \beta I_o \\ I_i = I_s - I_f \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{I_o}{A_I} = I_s - \beta I_o \Rightarrow \boxed{A_{If} = \frac{I_o}{I_s} = \frac{A_I}{1 + \beta A_I}}$$

(d)

Fig. 5: As quatro topologias da realimentação negativa: (a) amostragem de tensão/comparação de tensão; (b) amostragem de tensão/comparação de corrente; (c) amostragem de corrente/comparação de tensão; (d) amostragem de corrente/comparação de corrente;

Análise de amplificadores realimentados

Obviamente a análise de amplificadores realimentados pode ser feita pela aplicação direta das leis de Kirchhoff o que, geralmente, conduz a soluções demoradas e trabalhosas. Até o momento, o estudo das propriedades da realimentação negativa mostra que um amplificador realimentado e o não realimentado correspondente (amplificador básico), têm suas características, direta ou inversamente, relacionadas pelo fator $(1 + \beta A)$. Mais adiante será visto que as impedâncias de entrada e saída, com e sem realimentação, também ficam relacionadas pelo mesmo fator. Desta forma, a utilização da técnica da realimentação negativa se torna um método rápido e sistemático de previsão de comportamento do circuito realimentado, bastando determinar as características do circuito não realimentado, que são facilmente obtidas.

O problema consiste em identificar, no circuito real, os componentes que formam os blocos do amplificador básico e da rede de realimentação (Fig. 1), de forma a possibilitar o cálculo do ganho (A) e das impedâncias de entrada e de saída do amplificador básico, bem como da atenuação (β) da rede de realimentação e, conseqüentemente, do fator $(1 + \beta A)$. Assim, o ganho e impedâncias de entrada e saída do amplificador realimentado podem ser determinados a partir do ganho e impedâncias do amplificador sem realimentação.

Por hora devemos considerar que, de alguma forma, no circuito do amplificador realimentado foram identificados a fonte de sinal, o circuito amplificador, a rede de realimentação, a carga, bem como o tipo de amostragem e de comparação (o procedimento de identificação será detalhado posteriormente).

Um amplificador realimentado com amostragem de tensão e comparação de tensão tem a sua estrutura conforme indicado na Fig. 6.

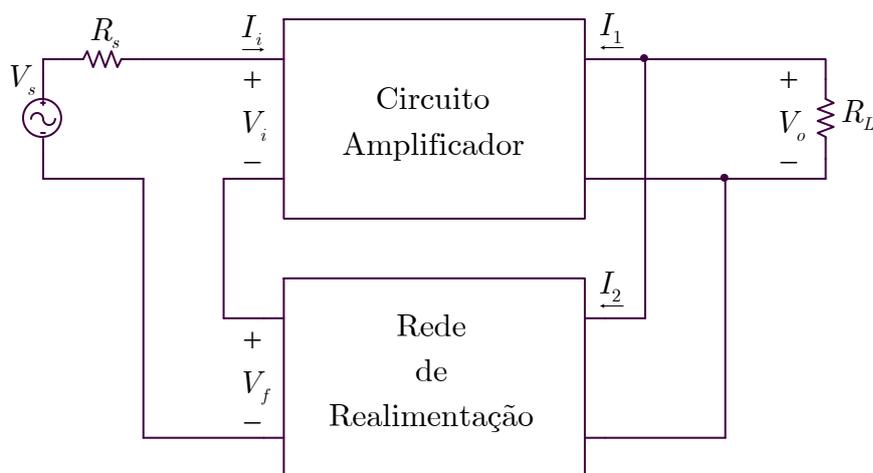


Fig. 6

Claramente se observa que I_i e V_o são variáveis comuns aos dois blocos. Nesta análise, I_i é a corrente da malha de entrada que circula pelos dois blocos conectados em série (malha) e V_o é a tensão de saída comum a ambos os blocos conectados em paralelo (nó). Como o circuito amplificador e a rede de realimentação são circuitos lineares, podemos representá-los em termos de quadripolos. Assumindo I_i e V_o como variáveis independentes, a matriz H é o modelo linear adequado para a representação de ambos os blocos.

O bloco do circuito amplificador é modelado pela Eq. (1.18).

$$\begin{cases} V_i = h_{ia}I_i + h_{ra}V_o \\ I_1 = h_{fa}I_i + h_{oa}V_o \end{cases} \quad (1.18)$$

O bloco da rede de realimentação é modelada pela Eq. (1.19).

$$\begin{cases} V_f = h_{if}I_i + h_{rf}V_o \\ I_2 = h_{ff}I_i + h_{of}V_o \end{cases} \quad (1.19)$$

A Fig. 7 representa o amplificador realimentado onde os blocos do circuito amplificador e da rede de realimentação foram substituídos pelos respectivos quadripolos.

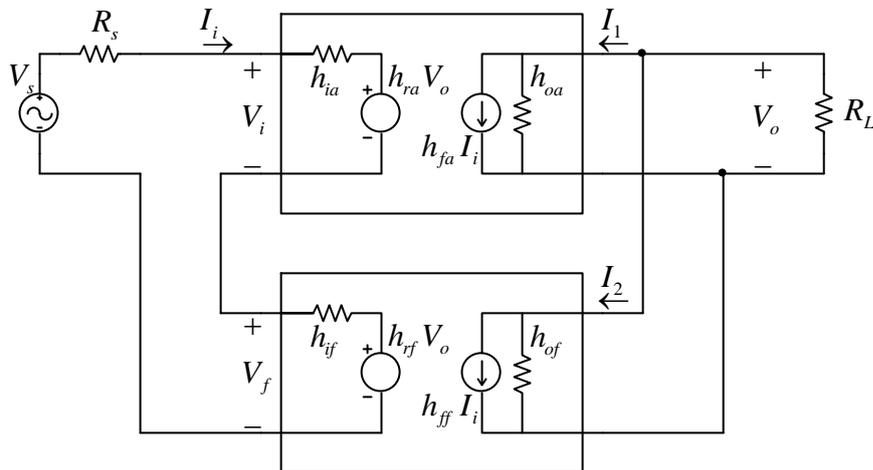


Fig. 7

Da Fig. 7 pode-se escrever:

$$\begin{aligned} V_o &= -\frac{(h_{fa} + h_{ff})I_i}{Y_{to}} \\ I_i &= \frac{V_s - (h_{ra} + h_{rf})V_o}{R_{ti}} \end{aligned} \quad (1.20)$$

onde $Y_{to} = \left(h_{oa} + h_{of} + \frac{1}{R_L} \right)$ é a admitância total de saída e $R_{ti} = (h_{ia} + h_{if} + R_s)$ é a resistência total de entrada.

Da Eq. (1.20) pode-se calcular o ganho ($A_{vf} = V_o/V_s$) do amplificador realimentado, resultando na expressão dada pela Eq. (1.21)

$$A_{vf} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{-\frac{(h_{fa} + h_{ff})}{R_{ti}Y_{to}}}{1 + (h_{ra} + h_{rf})\left[-\frac{(h_{fa} + h_{ff})}{R_{ti}Y_{to}}\right]} \equiv \frac{A_v}{1 + \beta A_v} \quad (1.21)$$

Por analogia, vem :

$$A_v = -\frac{(h_{fa} + h_{ff})}{R_{ti}Y_{to}} \quad e \quad \beta = (h_{ra} + h_{rf}) \quad (1.22)$$

Agora, se observarmos a estrutura geral de um amplificador realimentado (Fig. 1), algumas simplificações podem ser feitas para tornar a técnica da realimentação negativa de fácil compreensão e aplicação.

Primeiramente, como o fluxo de sinal da entrada para a saída passa, predominantemente, pelo circuito amplificador, que é projetado para introduzir um alto ganho no sistema, pode-se assumir que $h_{fa} \gg h_{ff}$. Analogamente, como o fluxo de sinal da saída para entrada passa, predominantemente, pelo atenuador passivo da rede de realimentação, pode-se dizer que $h_{rf} \gg h_{ra}$. Desta forma, a Eq.(1.22) pode ser simplificada conforme indicado na Eq.(1.23).

$$A_v \simeq -\frac{h_{fa}}{R_{ti}Y_{to}} \quad e \quad \beta \simeq h_{rf} \quad (1.23)$$

Feitas estas simplificações, o amplificador realimentado ficará representado pelo diagrama e ganho apresentados, respectivamente, na Fig. 8 e Eq.(1.24).

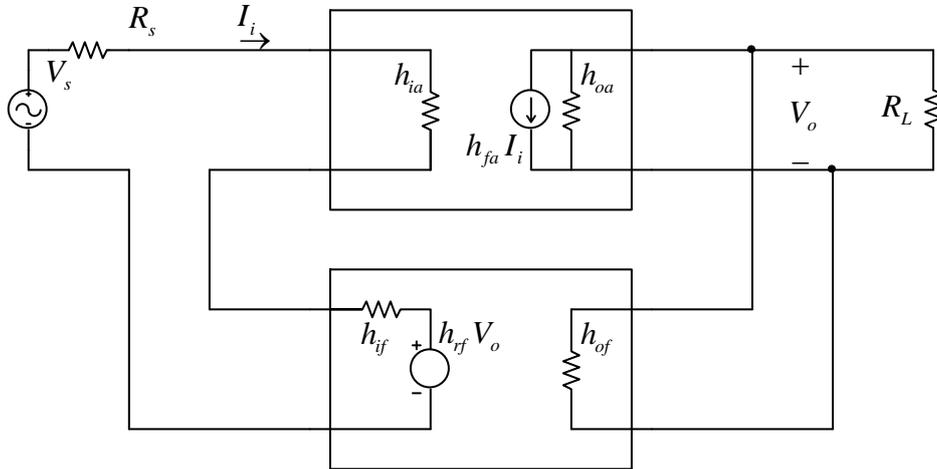


Fig. 8

$$A_{Vf} = \frac{V_o}{V_s} \approx \frac{-\frac{h_{fa}}{R_{ti} Y_{to}}}{1 + h_{rf} \left(-\frac{h_{fa}}{R_{ti} Y_{to}} \right)} \equiv \frac{A_V}{1 + \beta A_V} \quad (1.24)$$

O circuito da Fig. 8 pode ser redesenhado conforme Fig. 9 de forma a tornar ideal a rede de realimentação e a fonte de sinal de entrada e, desta forma, compatibilizar com o diagrama ideal mostrado na Fig 1.

É importante observar que, seja na amostragem ou comparação, se na representação dos quadripolos e fontes de sinal for adotado o equivalente Thevenin para as associações em série (malha) e o equivalente Norton para as associações em paralelo (nó), sempre será possível concentrar todas as impedâncias no amplificador básico, tornando ideais a rede de realimentação e a fonte de sinal.

Este procedimento nos permite concluir que o amplificador básico é composto pelo circuito amplificador acrescido do peso da rede de realimentação (impedâncias de entrada e saída), da impedância da fonte de sinal e da carga, independentemente do tipo de amostragem ou comparação.

Assim, o ganho do amplificador básico pode ser facilmente obtido assumindo $\beta = h_{rf} = 0$.

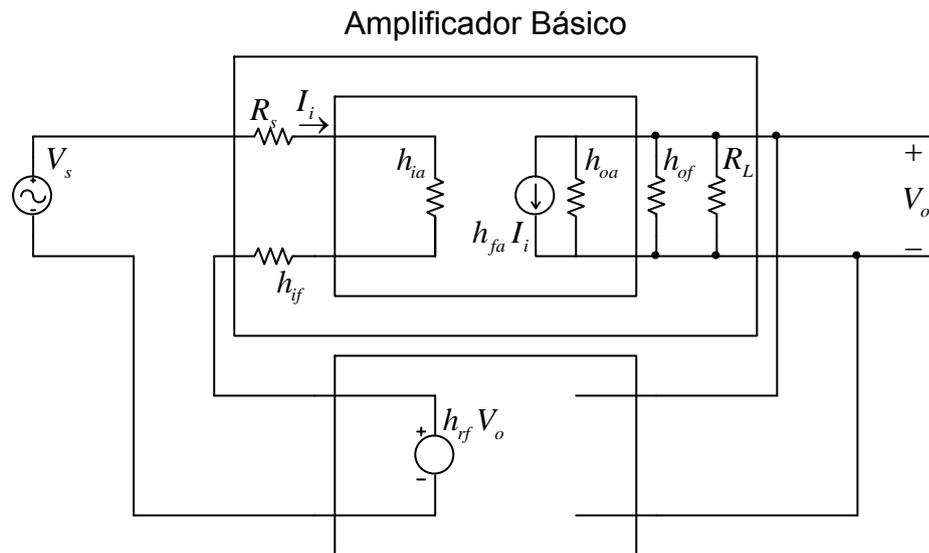


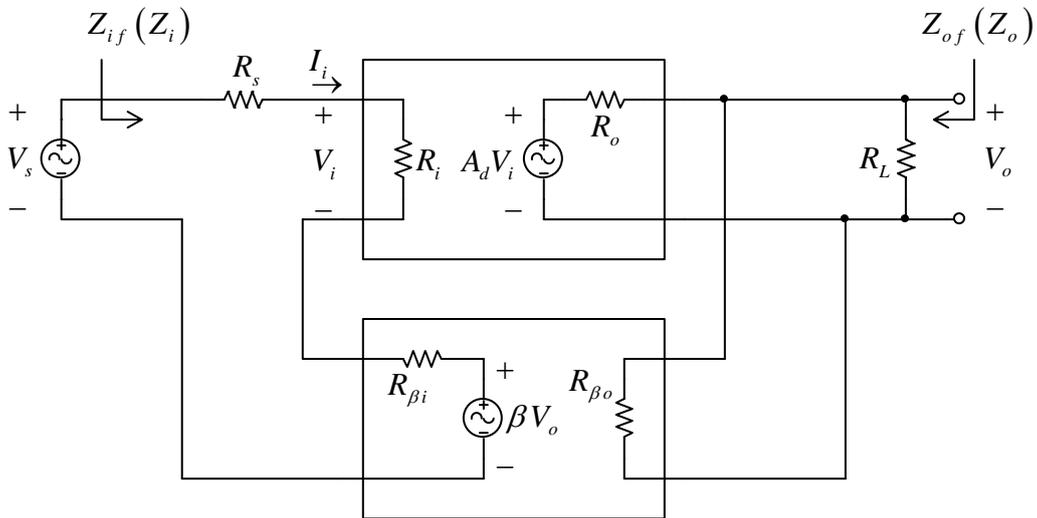
Fig. 9

LEMBRETE

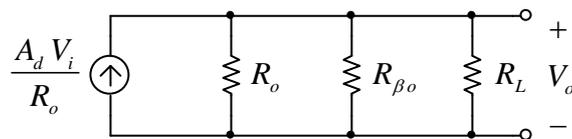
Amplificador básico = circuito amplificador + peso da rede de realimentação + impedância da fonte de sinal + impedância de carga (independentemente do tipo de amostragem ou comparação).

Efeito sobre as impedâncias de entrada e saída nas quatro configurações

1. Amostragem de tensão – comparação de tensão – (Ganho de tensão A_V)



Sem realimentação, ou seja, com $\beta = 0$ e, calculando o equivalente Norton de $A_d V_i$ com o resistor R_o , vem:



O ganho A_V do circuito é dado por $A_V = \frac{V_o}{V_s}$. Primeiro, calculamos V_o em função de $A_d V_i$. Do circuito temos:

$$V_o = A_d V_i \cdot \frac{R_L \parallel R_{\beta o} \parallel R_o}{R_o}$$

Agora precisamos calcular V_i . Como $\beta = 0$, teremos um divisor de tensão sobre R_i :

$$V_i = V_s \frac{R_i}{R_i + R_{\beta i} + R_s}$$

Substituindo V_i na equação anterior, temos:

$$\boxed{\frac{V_o}{V_s} = A_V = \frac{R_i}{R_i + R_{\beta i} + R_s} \cdot A_d \cdot \frac{R_L \parallel R_{\beta o} \parallel R_o}{R_o}}$$

Agora calcularemos o ganho $A_{Vf} = \frac{V_o}{V_s}$ com realimentação, ou seja, $\beta \neq 0$:

$$V_o = A_d V_i \cdot \frac{R_L \parallel R_{\beta o} \parallel R_o}{R_o}$$

$$V_i = (V_s - \beta V_o) \cdot \frac{R_i}{R_i + R_{\beta i} + R_s}$$

Substituindo V_i , vem:

$$V_o = (V_s - \beta V_o) \cdot \underbrace{\frac{R_i}{R_i + R_{\beta i} + R_s} \cdot A_d \cdot \frac{R_L \parallel R_{\beta o} \parallel R_o}{R_o}}_{A_V}$$

Desenvolvendo, chegamos à seguinte expressão:

$$V_o = (V_s - \beta V_o) \cdot A_V$$

$$V_o + \beta V_o A_V = A_V V_s \quad \Rightarrow \quad V_o (1 + \beta A_V) = A_V V_s$$

Então:

$$\boxed{\frac{V_o}{V_s} = A_{vf} = \frac{A_v}{1 + \beta A_v}}$$

O próximo passo é o cálculo das impedâncias de entrada e de saída, com e sem realimentação.

Impedância de entrada

- Sem realimentação (Z_i), considerando $\beta = 0$:

$$V_s = (R_i + R_{\beta i} + R_s) I_i$$

$$\frac{V_s}{I_i} = Z_i = R_s + R_i + R_{\beta i}$$

- Com realimentação (Z_{if}), considerando $\beta \neq 0$:

Agora definimos a impedância de entrada com realimentação como $Z_{if} = \frac{V_s}{I_i}$.

A partir daí, do circuito temos que:

$$\frac{(V_s - \beta V_o)}{I_i} = R_s + R_i + R_{\beta i} = Z_i$$

Substituindo V_o em função de V_s :

$$Z_i = \frac{\left(V_s - \beta \frac{A_v}{1 + \beta A_v} \cdot V_s \right)}{I_i} \Rightarrow Z_i = V_s \frac{\left(1 - \frac{\beta A_v}{1 + \beta A_v} \right)}{I_i} \Rightarrow Z_i = V_s \frac{\left(\frac{1 + \cancel{\beta A_v} - \cancel{\beta A_v}}{1 + \beta A_v} \right)}{I_i}$$

Portanto:

$$Z_i = \frac{V_s}{I_i} \left(\frac{1}{1 + \beta A_v} \right)$$

Como $Z_{if} = \frac{V_s}{I_i}$ podemos escrever:

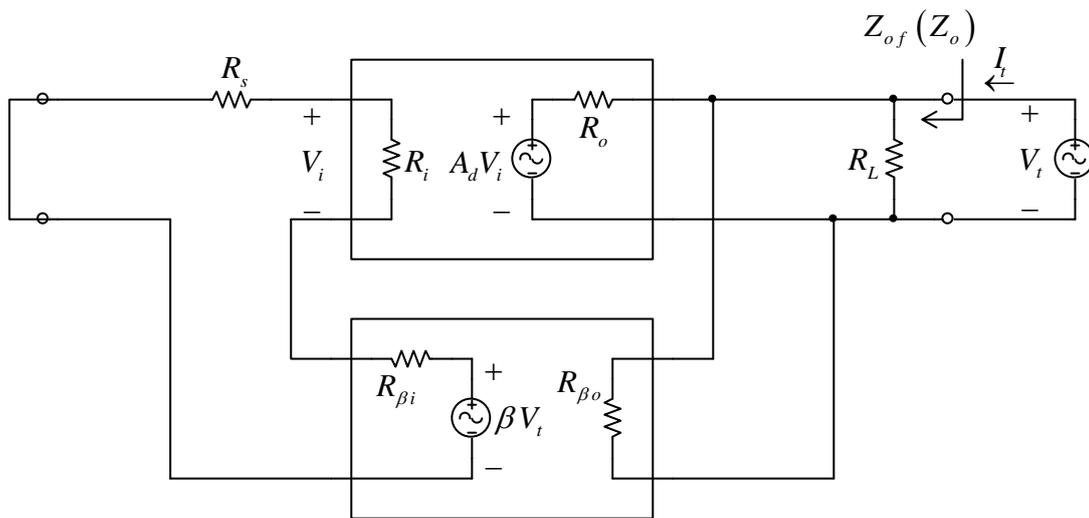
$$Z_i = Z_{if} \left(\frac{1}{1 + \beta A_V} \right)$$

e, finalmente:

$$Z_{if} = Z_i (1 + \beta A_V)$$

Observe que o efeito da comparação de tensão é o aumento da impedância de entrada pelo fator $(1 + \beta A_V)$.

Impedância de saída:



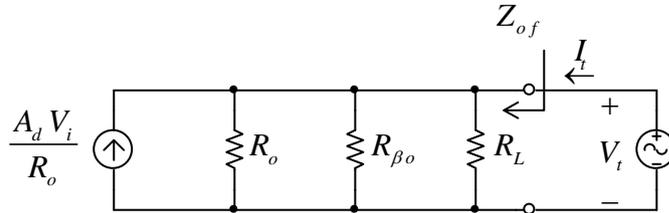
- Sem realimentação (Z_o), considerando $\beta = 0$:

Como $\beta = 0$, então $\beta V_t = 0$, portanto não há corrente circulando sobre R_i e consequentemente $V_i = 0$, e obviamente $A_d V_i = 0$. Daí, temos que a impedância de saída neste caso será dada por:

$$Z_o = R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta o}$$

- Com realimentação (Z_{of}), considerando $\beta \neq 0$

Calculando o equivalente Norton da fonte $A_d V_i$ com o resistor R_o , podemos calcular a impedância de saída com realimentação com o circuito equivalente :



Calculando a tensão sobre o paralelo dos três resistores e somando o efeito das correntes temos:

$$V_t = (R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta o}) \left(\frac{A_d V_i}{R_o} + I_t \right)$$

Como agora $\beta \neq 0$ calcularemos o valor de V_i :

$$V_i = -\beta V_t \frac{R_i}{R_s + R_i + R_{\beta i}}$$

Substituindo V_i , vem:

$$V_t = (R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta o}) \left(\frac{-A_d \beta V_t \frac{R_i}{R_s + R_i + R_{\beta i}}}{R_o} + I_t \right)$$

Arrumando,

$$V_t = -\beta \frac{R_i}{(R_s + R_i + R_{\beta i})} \cdot A_d \cdot \frac{(R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta o})}{R_o} V_t + (R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta o}) I_t$$

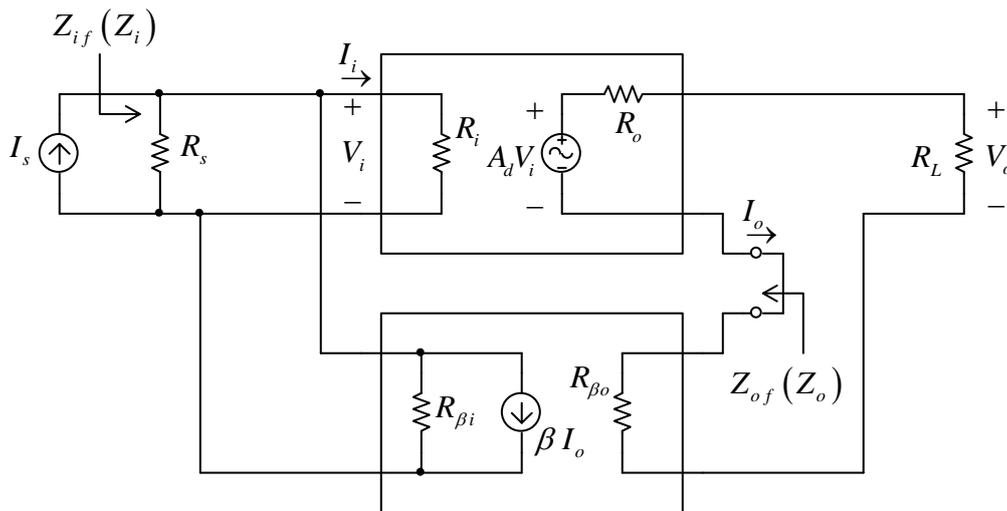
$$V_t = -\beta A_V V_t + I_t Z_o \quad \Rightarrow \quad V_t (1 + \beta A_V) = I_t Z_o$$

Como $Z_{of} = \frac{V_t}{I_t}$, podemos reescrever a equação:

$$Z_{of} = \frac{Z_o}{(1 + \beta A_V)}$$

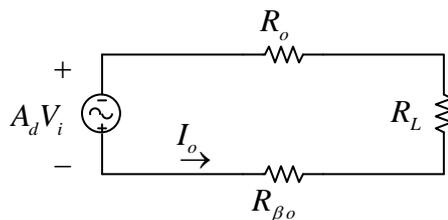
Observe que o efeito da amostragem de tensão é a redução da impedância de saída pelo fator $(1 + \beta A_V)$.

2. Amostragem de corrente – comparação de corrente – (Ganho de corrente A_I)



Primeiro vamos calcular o ganho de corrente sem realimentação, ou seja, $\beta = 0$:

O ganho é definido por $A_I = \frac{I_o}{I_s}$. Analisando o circuito abaixo:



Calculando a corrente I_O teremos:

$$I_O = -\frac{A_d V_i}{R_O + R_L + R_{\beta O}}$$

Calculando a tensão V_i em função de I_S temos:

$$V_i = I_S (R_i \parallel R_{\beta i} \parallel R_S)$$

Substituindo V_i na equação anterior, temos:

$$\boxed{\frac{I_O}{I_S} = A_I = -\left(R_i \parallel R_{\beta i} \parallel R_S\right) \cdot A_d \cdot \frac{1}{\left(R_O + R_L + R_{\beta O}\right)}}$$

A expressão anterior representa o ganho de corrente sem realimentação.

Agora calcularemos o ganho $A_{I_f} = \frac{I_O}{I_S}$ com realimentação, ou seja, $\beta \neq 0$:

$$I_O = -\frac{A_d V_i}{\left(R_O + R_L + R_{\beta O}\right)}$$

$$V_i = \left(I_S - \beta I_O\right) \cdot \left(R_i \parallel R_{\beta i} \parallel R_S\right)$$

Substituindo V_i , vem:

$$I_O = \left(I_S - \beta I_O\right) \cdot \underbrace{\left[-\left(R_i \parallel R_{\beta i} \parallel R_S\right) \cdot A_d \cdot \frac{1}{\left(R_L + R_{\beta O} + R_O\right)}\right]}_{A_I}$$

Desenvolvendo, chegamos à seguinte expressão:

$$I_O = \left(I_S - \beta I_O\right) \cdot A_I$$

$$I_O + \beta I_O A_I = A_I I_S \quad \Rightarrow \quad I_O (1 + \beta A_I) = A_I I_S$$

Então:

$$\boxed{\frac{I_o}{I_s} = A_{if} = \frac{A_I}{1 + \beta A_I}}$$

O próximo passo é o cálculo das impedâncias de entrada com e sem realimentação.

Impedância de entrada

- Sem realimentação (Z_i), considerando $\beta = 0$:

$$V_i = I_s (R_i \parallel R_{\beta i} \parallel R_s)$$

$$\frac{V_i}{I_s} = Z_i = (R_i \parallel R_{\beta i} \parallel R_s)$$

- Com realimentação (Z_{if}), considerando $\beta \neq 0$:

Agora definimos a impedância de entrada com realimentação como $Z_{if} = \frac{V_i}{I_s}$.

A partir do circuito, temos que:

$$V_i = (I_s - \beta I_o) \cdot (R_i \parallel R_{\beta i} \parallel R_s) = (I_s - \beta I_o) \cdot Z_i$$

Substituindo I_o em função de I_s , vem:

$$Z_i = \frac{V_i}{(I_s - \beta I_o)} \Rightarrow Z_i = \frac{V_i}{I_s \left(1 - \frac{\beta A_I}{1 + \beta A_I}\right)} \Rightarrow Z_i = \frac{V_i}{I_s \left(\frac{1 + \cancel{\beta A_I} - \cancel{\beta A_I}}{1 + \beta A_I}\right)}$$

Portanto:

$$Z_i = \frac{V_i}{I_s} \cdot (1 + \beta A_T)$$

Como $Z_{if} = \frac{V_i}{I_s}$ podemos escrever:

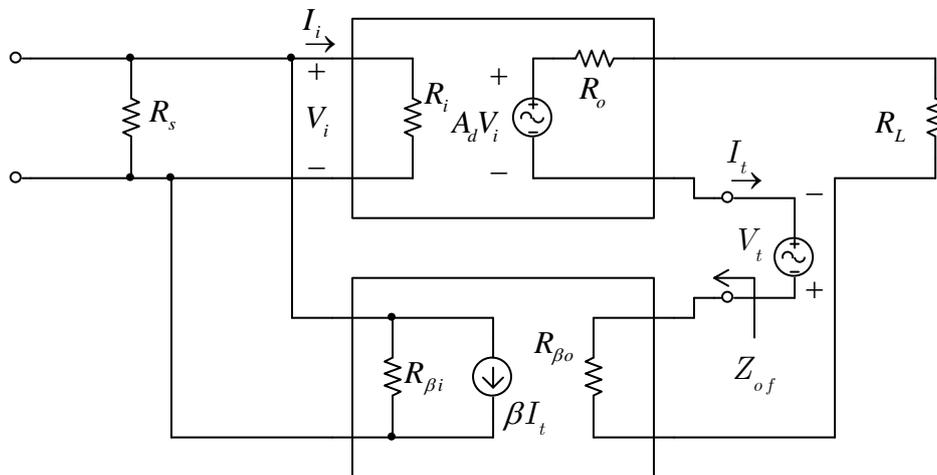
$$Z_i = Z_{if} \cdot (1 + \beta A_T)$$

e, finalmente:

$$Z_{if} = \frac{Z_i}{(1 + \beta A_T)}$$

Observe que o efeito da comparação de corrente é a redução da impedância de entrada pelo fator $(1 + \beta A_T)$.

Impedância de saída:



- Sem realimentação (Z_o), considerando $\beta = 0$:

Como $\beta = 0$, então $\beta I_t = 0$, portanto não há corrente circulando sobre R_i . Consequentemente, $V_i = 0$ e, obviamente, $A_d V_i = 0$.

Dáí, temos que a impedância de saída neste caso será dada por:

$$Z_o = \frac{V_t}{I_t} = (R_o + R_L + R_{\beta o})$$

- Com realimentação (Z_{of}), considerando $\beta \neq 0$

Da malha de saída do circuito, vem:

$$I_t = \frac{(V_t - A_d V_i)}{(R_o + R_L + R_{\beta o})}$$

Como agora $\beta \neq 0$ calcularemos o valor de V_i :

$$V_i = -\beta I_t (R_s \parallel R_i \parallel R_{\beta i})$$

Substituindo V_i na equação anterior, vem:

$$I_t = \frac{V_t - A_d [-\beta I_t (R_s \parallel R_i \parallel R_{\beta i})]}{(R_o + R_L + R_{\beta o})}$$

ou,

$$I_t = \frac{V_t}{(R_o + R_L + R_{\beta o})} - \beta \left[\underbrace{(R_i \parallel R_{\beta i} \parallel R_s) \cdot A_d \cdot \frac{1}{(R_L + R_{\beta o} + R_o)}}_{A_I} \right] I_t$$

$$I_t = \frac{V_t}{(R_o + R_L + R_{\beta o})} - \beta A_I I_t$$

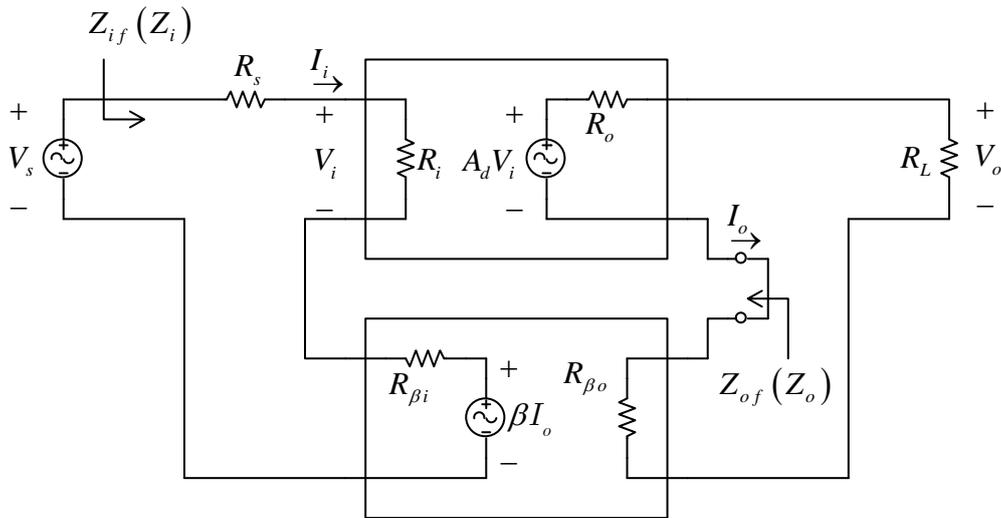
$$I_t (1 + \beta A_I) = \frac{V_t}{Z_o}$$

Como $Z_{of} = \frac{V_t}{I_t}$ podemos reescrever a equação:

$$Z_{of} = (1 + \beta A_I) Z_o$$

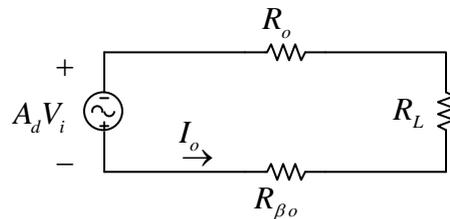
Observe que o efeito da amostragem de corrente é o aumento da impedância de saída pelo fator $(1 + \beta A_T)$.

3. Amostragem de corrente – comparação de tensão – (Ganho de transcondutância A_G)



Primeiro vamos calcular o ganho de transcondutância sem realimentação, ou seja, $\beta = 0$:

O ganho é definido por $A_G = \frac{I_o}{V_s}$. Analisando o circuito abaixo:



Calculando a corrente I_o teremos:

$$I_o = -\frac{A_d V_i}{R_o + R_L + R_{\beta o}}$$

Calculando a tensão V_i em função de V_s :

$$V_i = \frac{R_i V_s}{(R_s + R_i + R_{\beta i})}$$

Substituindo V_i e arrumando vem:

$$\boxed{\frac{I_o}{V_s} = A_G = -\frac{R_i}{(R_s + R_i + R_{\beta i})} \cdot A_d \cdot \frac{1}{(R_o + R_L + R_{\beta o})}}$$

A expressão representa o ganho de transcondutância sem realimentação.

Agora calcularemos o ganho $A_{Gf} = \frac{I_o}{V_s}$ com realimentação, ou seja, com $\beta \neq 0$:

$$I_o = -\frac{A_d V_i}{R_o + R_L + R_{\beta o}}$$

$$V_i = (V_s - \beta I_o) \cdot \frac{R_i}{(R_s + R_i + R_{\beta i})}$$

Substituindo V_i vem:

$$I_o = (V_s - \beta I_o) \cdot \underbrace{\left(-\frac{R_i}{(R_s + R_i + R_{\beta i})} \cdot A_d \cdot \frac{1}{(R_L + R_{\beta o} + R_o)} \right)}_{A_G}$$

Desenvolvendo chegamos à seguinte expressão:

$$I_o = (V_s - \beta I_o) \cdot A_G$$

$$I_o + \beta I_o A_G = A_G I_s \quad \Rightarrow \quad I_o (1 + \beta A_G) = A_G I_s$$

Então:

$$\boxed{\frac{I_o}{V_s} = A_{Gf} = \frac{A_G}{1 + \beta A_G}}$$

O próximo passo é o cálculo das impedâncias de entrada e saída com e sem realimentação.

Impedância de entrada

- Sem realimentação (Z_i), considerando $\beta = 0$:

$$I_i = \frac{V_s}{(R_s + R_i + R_{\beta i})}$$

$$\boxed{\frac{V_s}{I_i} = Z_i = (R_s + R_i + R_{\beta i})}$$

- Com realimentação (Z_{if}), considerando $\beta \neq 0$:

Agora definimos a impedância de entrada com realimentação como $Z_{if} = \frac{V_s}{I_i}$.

A partir do circuito, temos que:

$$I_i = \frac{(V_s - \beta I_o)}{(R_s + R_i + R_{\beta i})} = \frac{(V_s - \beta I_o)}{Z_i}$$

Substituindo I_o em função de V_s , vem:

$$Z_i = \frac{(V_s - \beta I_o)}{I_i} \Rightarrow Z_i = \frac{V_s \left(1 - \beta \cdot \frac{A_G}{1 + \beta A_G} \right)}{I_i} \Rightarrow Z_i = \frac{V_s \left(\frac{1 + \cancel{\beta A_G} - \cancel{\beta A_G}}{1 + \beta A_G} \right)}{I_i}$$

Portanto:

$$Z_i = \frac{V_s}{I_i} \cdot \frac{1}{(1 + \beta A_G)}$$

Como $Z_{if} = \frac{V_s}{I_i}$ podemos escrever:

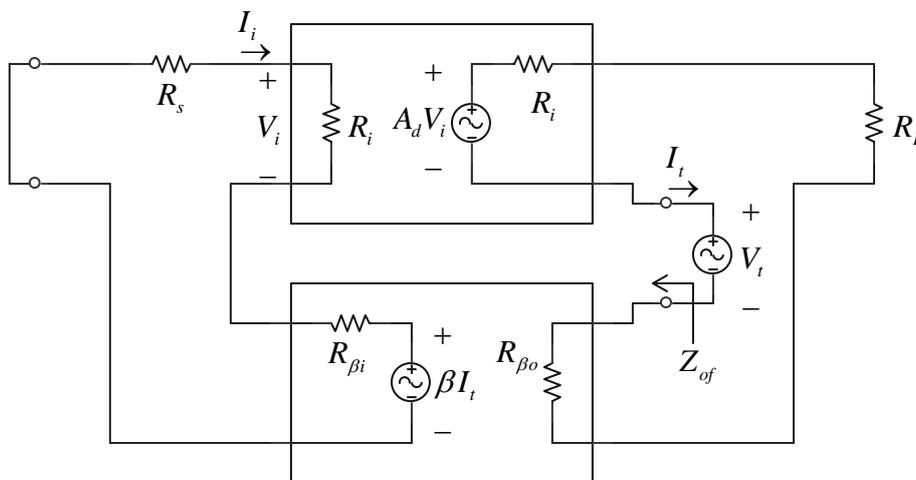
$$Z_i = \frac{Z_{if}}{(1 + \beta A_G)}$$

e, finalmente:

$$Z_{if} = (1 + \beta A_G) \cdot Z_i$$

Observe que o efeito da comparação de tensão é o aumento da impedância de entrada pelo fator $(1 + \beta A_G)$.

Impedância de saída:



- Sem realimentação (Z_o), considerando $\beta = 0$:

Como $\beta = 0$, então $\beta I_t = 0$, portanto não há corrente circulando sobre R_i . Consequentemente, $V_i = 0$ e, obviamente, $A_d V_i = 0$.

Daí, temos que a impedância de saída neste caso será dada por:

$$Z_o = \frac{V_t}{I_t} = (R_o + R_L + R_{\beta o})$$

- Com realimentação (Z_{of}), considerando $\beta \neq 0$

Da malha de saída do circuito, vem:

$$I_t = \frac{(V_t - A_d V_i)}{(R_o + R_L + R_{\beta o})}$$

Como agora $\beta \neq 0$ calcularemos o valor de V_i :

$$V_i = -\beta I_t \frac{R_i}{(R_s + R_i + R_{\beta i})}$$

Substituindo V_i na equação anterior, vem:

$$I_t = \frac{V_t - A_d \left[-\beta I_t \frac{R_i}{(R_s + R_i + R_{\beta i})} \right]}{(R_o + R_L + R_{\beta o})}$$

ou,

$$I_t = \frac{V_t}{(R_o + R_L + R_{\beta o})} - \beta \underbrace{\left[\frac{R_i}{(R_s + R_i + R_{\beta i})} \cdot A_d \cdot \frac{1}{(R_L + R_{\beta o} + R_o)} \right]}_{A_G} I_t$$

$$I_t = \frac{V_t}{(R_o + R_L + R_{\beta o})} - \beta A_G I_t$$

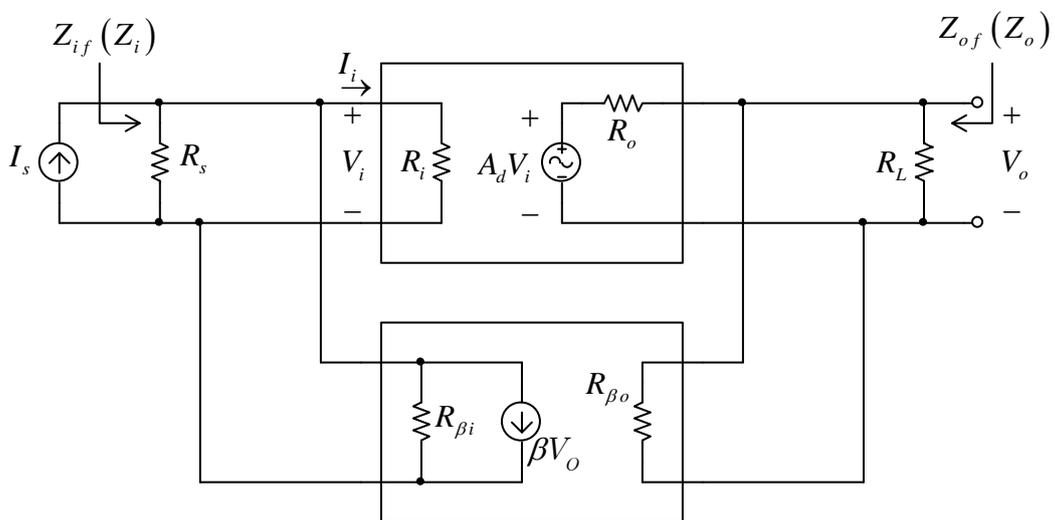
$$I_t (1 + \beta A_G) = \frac{V_t}{Z_o}$$

Como $Z_{of} = \frac{V_t}{I_t}$ podemos reescrever a equação:

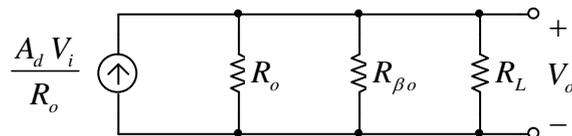
$$Z_{of} = (1 + \beta A_G) Z_o$$

Observe que o efeito da amostragem de corrente é o aumento da impedância de saída pelo fator $(1 + \beta A_G)$.

4. Amostragem de tensão – Comparação de corrente – (Ganho de transresistância A_R)



Sem realimentação, ou seja, com $\beta = 0$ e, calculando o equivalente Norton de $A_d V_i$ com o resistor R_o , vem:



O ganho A_R do circuito é dado por $A_R = \frac{V_o}{I_s}$. Primeiro, calculamos V_o em função de $A_d V_i$.

Do circuito temos:

$$V_o = A_d V_i \cdot \frac{R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta_o}}{R_o}$$

Calculando a tensão V_i em função de I_s temos:

$$V_i = I_s (R_s \parallel R_i \parallel R_{\beta_i})$$

Substituindo V_i na equação anterior, temos:

$$\boxed{\frac{V_o}{I_s} = A_R = (R_s \parallel R_i \parallel R_{\beta_i}) \cdot A_d \cdot \frac{R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta_o}}{R_o}}$$

Agora calcularemos o ganho $A_{Rf} = \frac{V_o}{I_s}$ com realimentação, ou seja, com $\beta \neq 0$:

$$V_o = A_d V_i \cdot \frac{R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta_o}}{R_o}$$

$$V_i = (I_s - \beta V_o) \cdot (R_s \parallel R_i \parallel R_{\beta_i})$$

Substituindo V_i , vem:

$$V_o = (I_s - \beta V_o) \cdot \underbrace{(R_s \parallel R_i \parallel R_{\beta_i}) \cdot A_d \cdot \frac{R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta_o}}{R_o}}_{A_R}$$

Desenvolvendo, chegamos à seguinte expressão:

$$V_o = (I_s - \beta V_o) \cdot A_R$$

$$V_o + \beta V_o A_R = A_R V_s \quad \Rightarrow \quad V_o (1 + \beta A_R) = A_R V_s$$

Então:

$$\boxed{\frac{V_o}{I_s} = A_{Rf} = \frac{A_R}{1 + \beta A_R}}$$

O próximo passo é o cálculo das impedâncias de entrada e de saída, com e sem realimentação.

Impedância de entrada

- Sem realimentação (Z_i), considerando $\beta = 0$:

$$V_i = I_s (R_S \parallel R_i \parallel R_{\beta i})$$

$$\frac{V_i}{I_s} = Z_i = (R_S \parallel R_i \parallel R_{\beta i})$$

- Com realimentação (Z_{if}), considerando $\beta \neq 0$:

Agora definimos a impedância de entrada com realimentação como $Z_{if} = \frac{V_i}{I_s}$.

A partir daí, do circuito temos que:

$$V_i = (I_s - \beta V_o)(R_S \parallel R_i \parallel R_{\beta i})$$

Substituindo V_o em função de I_s :

$$V_i = \left(I_s - \beta \cdot \frac{A_R}{1 + \beta A_R} \cdot I_s \right) (R_S \parallel R_i \parallel R_{\beta i})$$

Portanto:

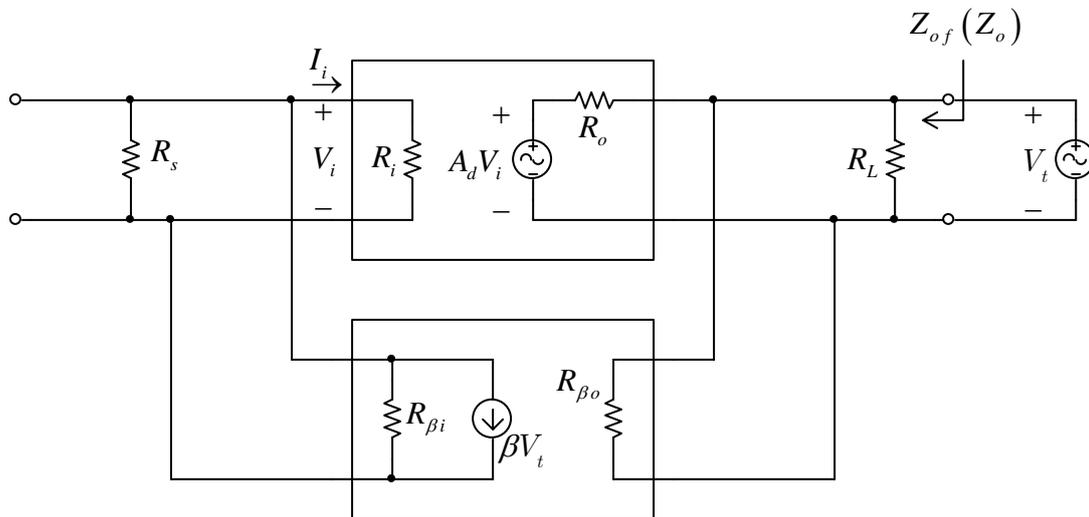
$$V_i = I_s \cdot \left(1 - \beta \frac{A_R}{1 + \beta A_R} \right) \cdot Z_i = I_s \cdot \frac{1}{1 + \beta A_R} \cdot Z_i$$

Como $Z_{if} = \frac{V_i}{I_s}$ podemos, finalmente, escrever:

$$Z_{if} = \frac{Z_i}{(1 + \beta A_R)}$$

Observe que o efeito da comparação de corrente é a redução da impedância de entrada pelo fator $(1 + \beta A_R)$.

Impedância de saída:



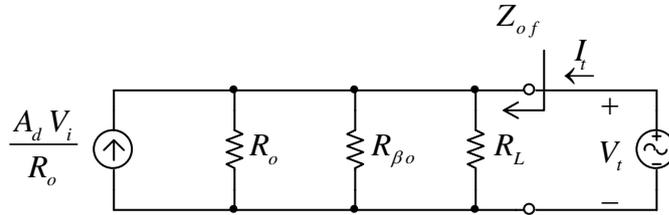
- Sem realimentação (Z_o), considerando $\beta = 0$:

Como $\beta = 0$, então $\beta V_t = 0$, portanto não há corrente circulando sobre R_i e conseqüentemente $V_i = 0$, e obviamente $A_d V_i = 0$. Daí, temos que a impedância de saída neste caso será dada por:

$$Z_o = R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta o}$$

- Com realimentação (Z_{of}), considerando $\beta \neq 0$

Calculando o equivalente Norton da fonte $A_d V_i$ com o resistor R_o , podemos calcular a impedância de saída com realimentação com o circuito equivalente :



Calculando a tensão sobre o paralelo dos três resistores e somando o efeito das correntes temos:

$$V_t = (R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta o}) \left(\frac{A_d V_i}{R_o} + I_t \right)$$

Como agora $\beta \neq 0$ calcularemos o valor de V_i em função de I_t :

$$V_i = -\beta V_t (R_s \parallel R_i \parallel R_{\beta i})$$

Substituindo V_i na equação anterior, vem:

$$V_t = (R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta o}) \left(\frac{-A_d \beta V_t (R_s \parallel R_i \parallel R_{\beta i})}{R_o} + I_t \right)$$

Ou

$$V_t = -\beta (R_s \parallel R_i \parallel R_{\beta i}) \cdot \underbrace{A_d}_{A_R} \cdot \frac{(R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta o})}{R_o} V_t + (R_o \parallel R_L \parallel R_{\beta o}) I_t$$

$$V_t = -\beta A_R V_t + I_t Z_o \Rightarrow V_t (1 + \beta A_R) = I_t Z_o$$

Como $Z_{of} = \frac{V_t}{I_t}$ podemos reescrever a equação:

$$Z_{of} = \frac{Z_o}{(1 + \beta A_R)}$$

Observe que o efeito da amostragem de tensão é a redução da impedância de saída pelo fator $(1 + \beta A_R)$.

RESUMO

			AMOSTRAGEM	
			V	I
			NÓ	MALHA
C O M P A R A Ç Ã O	V	M A L H A	$A_{Vf} = \frac{A_V}{1 + \beta A_V}$ $Z_i = R_s + R_i + R_{\beta i}$ $Z_o = R_L // R_o // R_{\beta o}$ $Z_{if} = (1 + \beta A_V) Z_i$ $Z_{of} = \frac{Z_o}{(1 + \beta A_V)}$	$A_{Gf} = \frac{A_G}{1 + \beta A_G}$ $Z_i = R_s + R_i + R_{\beta i}$ $Z_o = R_L + R_o + R_{\beta o}$ $Z_{if} = (1 + \beta A_G) Z_i$ $Z_{of} = (1 + \beta A_G) Z_o$
	I	N Ó	$A_{Rf} = \frac{A_R}{1 + \beta A_R}$ $Z_i = R_s // R_i // R_{\beta i}$ $Z_o = R_L // R_o // R_{\beta o}$ $Z_{if} = \frac{Z_i}{(1 + \beta A_R)}$ $Z_{of} = \frac{Z_o}{(1 + \beta A_R)}$	$A_{If} = \frac{A_I}{1 + \beta A_I}$ $Z_i = R_s // R_i // R_{\beta i}$ $Z_o = R_L + R_o + R_{\beta o}$ $Z_{if} = \frac{Z_i}{(1 + \beta A_I)}$ $Z_{of} = (1 + \beta A_I) Z_o$

- **Como identificar o tipo de realimentação?**

Tipo de amostragem

Uma primeira etapa para a utilização do conceito de realimentação na solução de problemas práticos é a identificação do tipo de realimentação empregada no circuito, isto é, o tipo de amostragem e o tipo de comparação.

Pode-se observar nos circuitos das Fig. 10 e Fig. 11, que o tipo de amostragem é caracterizado pela posição do ponto de tomada da realimentação (amostragem) em relação à saída do amplificador (carga). Ou seja:

Se o ponto de tomada da realimentação coincide com a saída do amplificador (V_o), então existe, na saída, um nó comum entre o amplificador básico, a rede de realimentação e a carga. Neste caso, a amostragem é de tensão. Observe que se R_L tender a variar, o circuito, automaticamente, se ajusta, variando a fonte de corrente controlada do amplificador, de modo a manter a tensão constante no ponto de amostragem (V_o).

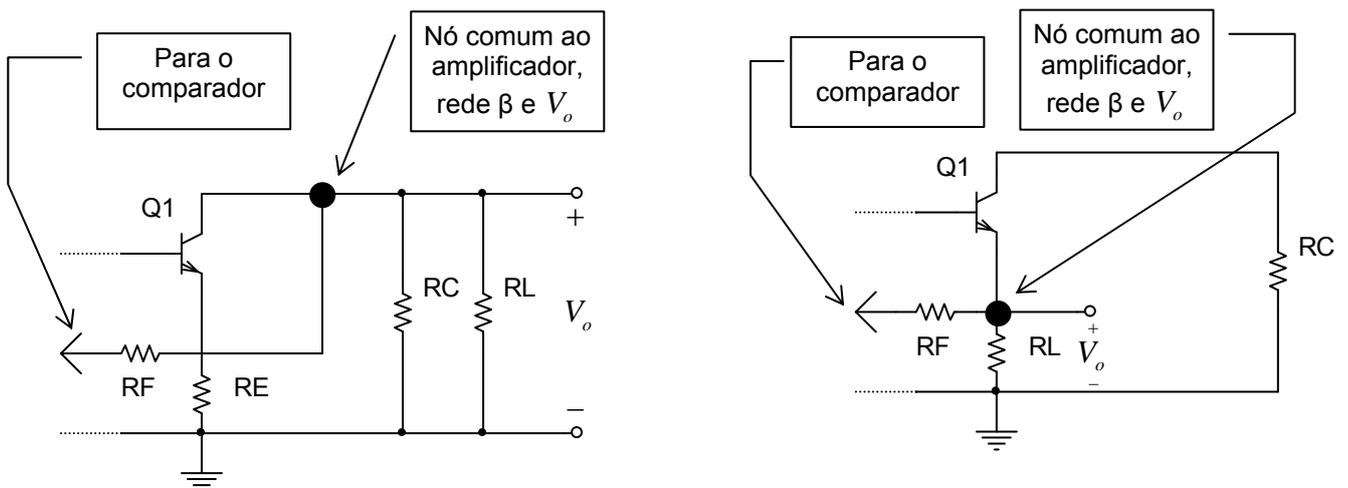


Fig. 10: Amostragem de tensão: nó comum ao amplificador, rede β e V_o .

Se o ponto de tomada da realimentação é feito em outro ponto da malha de saída, não coincidente com (V_o), então a amostragem é de corrente; Observe que se R_L (ou G_L) tender a variar, o circuito automaticamente se ajusta, de modo a manter a tensão constante no ponto de amostragem e, conseqüentemente, a corrente de saída (I_o) será estabilizada, permitindo a variação da tensão de saída (V_o).

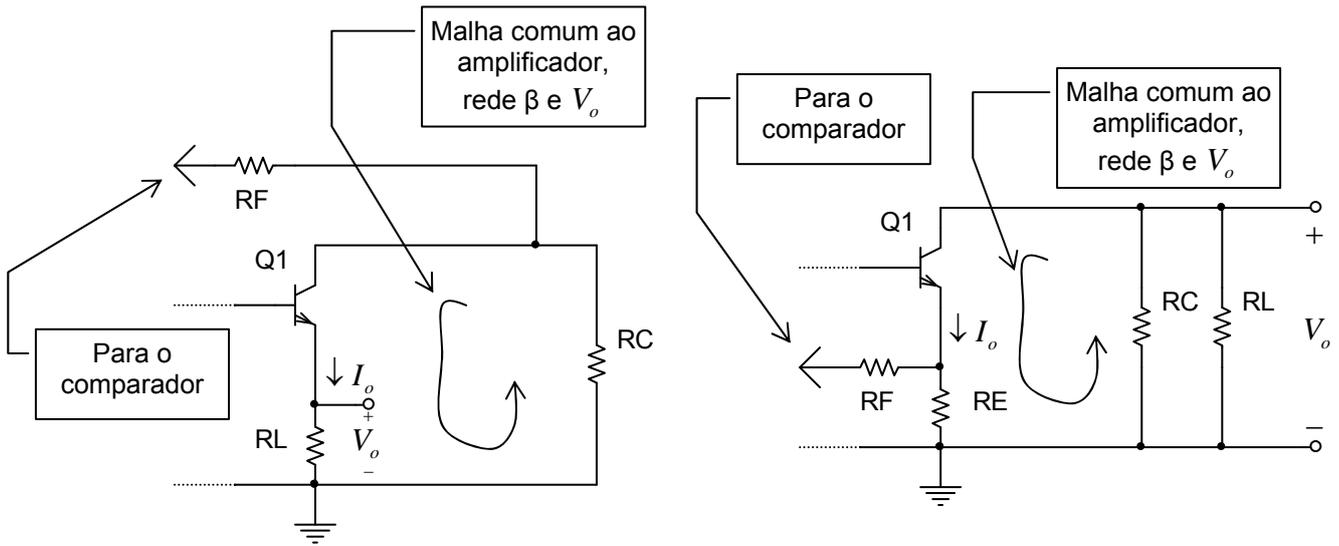


Fig. 11: Amostragem de corrente: não existe nó comum ao amplificador, rede β e V_o . A conexão é em série (malha).

Tipo de comparação

O tipo de comparação, também pode ser facilmente identificado, bastando observar como é feita a mistura do sinal do gerador com o sinal realimentado. Se a mistura for feita em nó, a comparação é de corrente. Por outro lado, se a mistura for feita em malha, a comparação é de tensão.

Para isto, partindo da fonte de sinal, basta acompanhar o circuito e verificar se, antes de chegar a entrada do circuito amplificador, é encontrado, ou não, um nó que tenha ligação com a rede de realimentação. Caso seja encontrado, a comparação é de corrente.

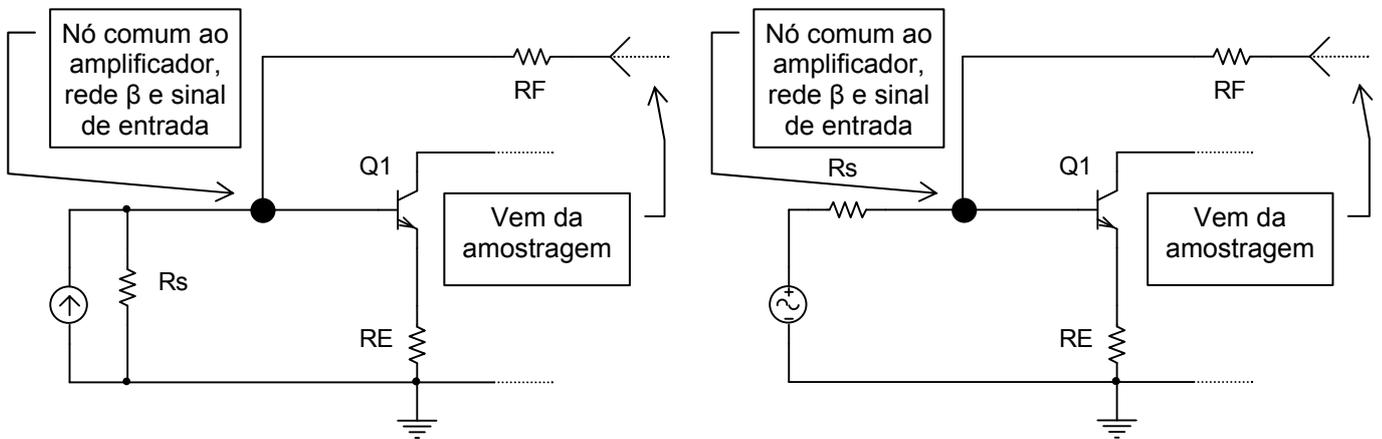


Fig. 12

Caso contrário será de tensão.

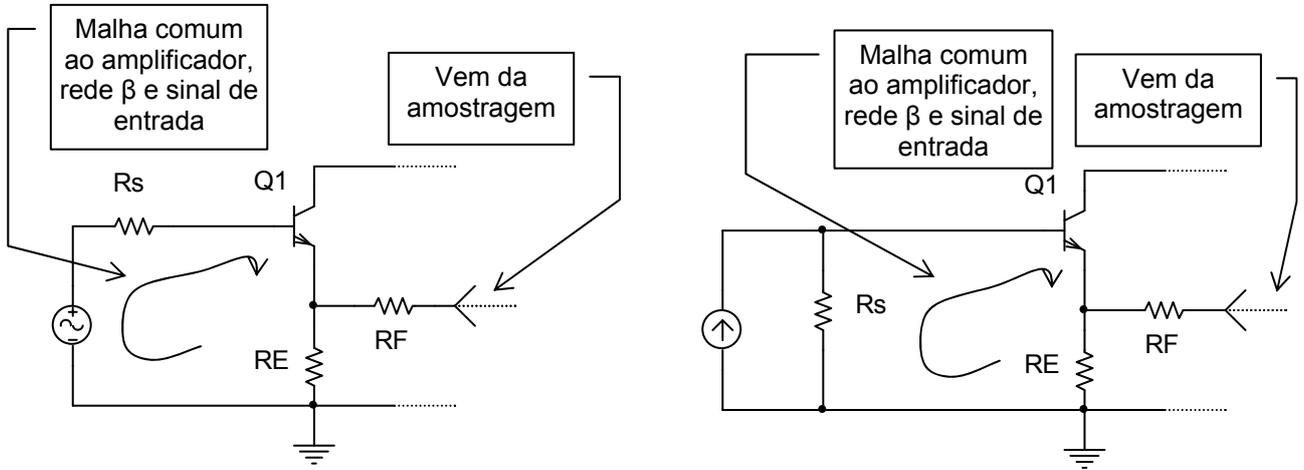
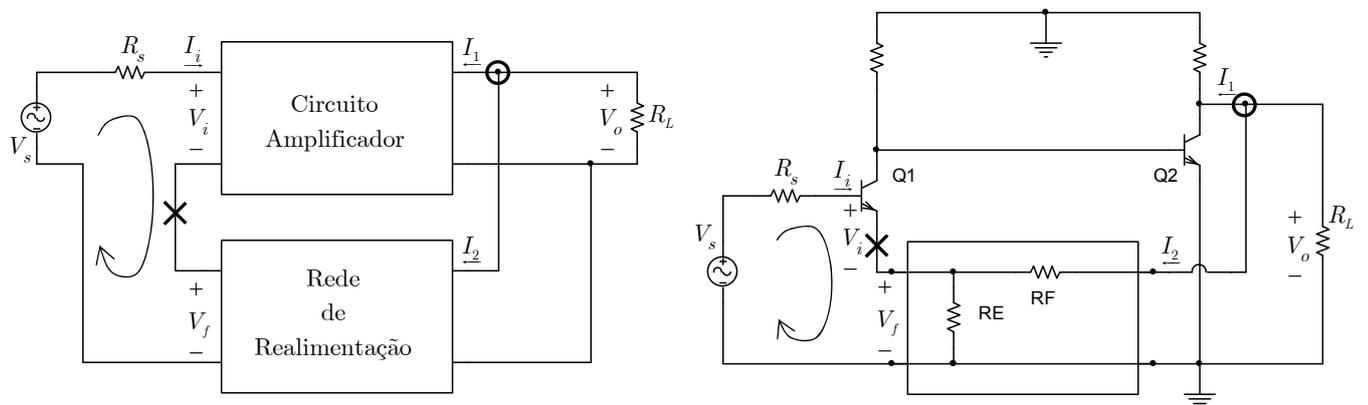


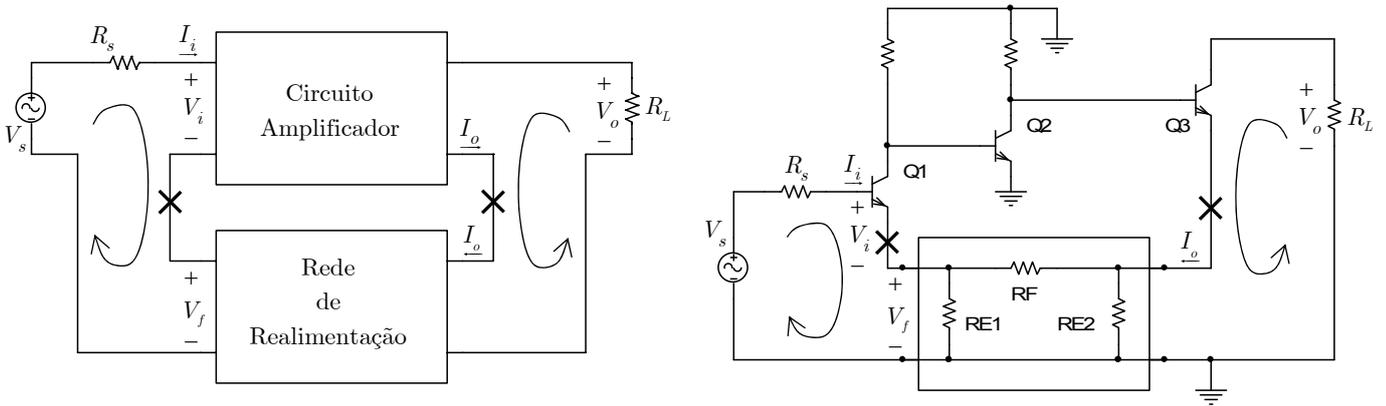
Fig. 13

Identificação da rede β nas quatro topologias

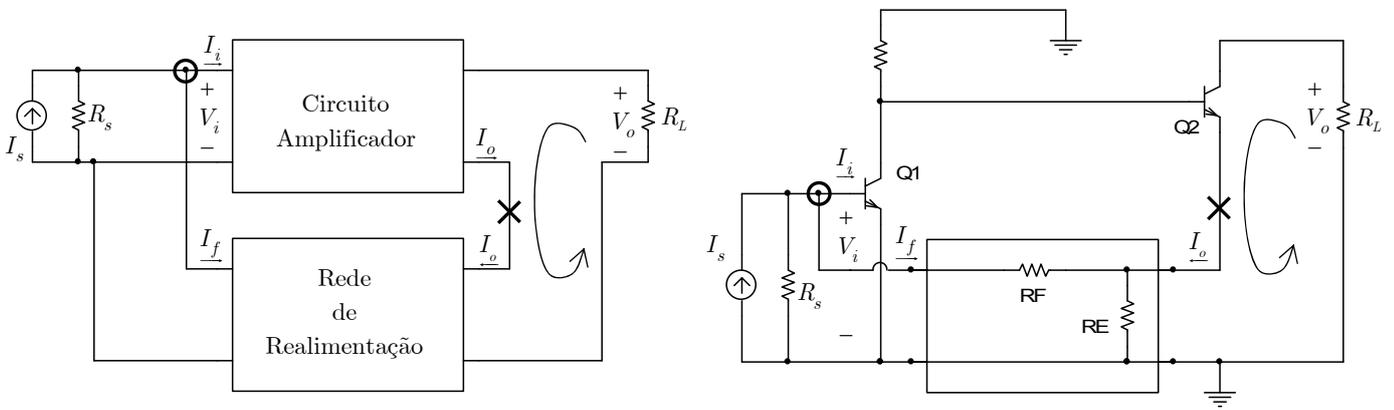
1. Amostragem de tensão, comparação de tensão - (ganho de tensão A_v)



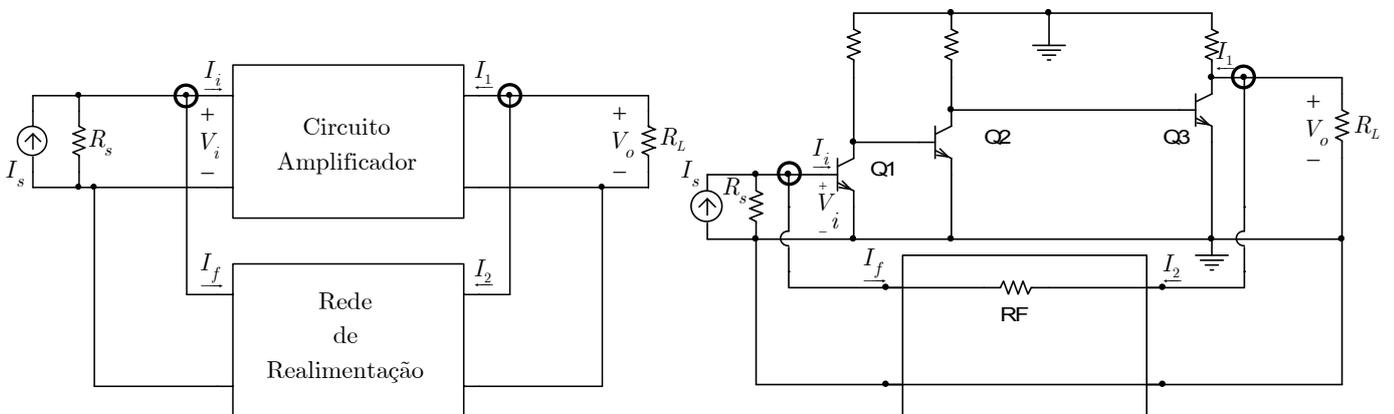
2. Amostragem de corrente, comparação de tensão - (ganho de transcondutância A_G)



3. Amostragem de corrente, comparação de corrente - (ganho de corrente A_I)



4. Amostragem de tensão, comparação de corrente - (ganho de transresistência A_R)



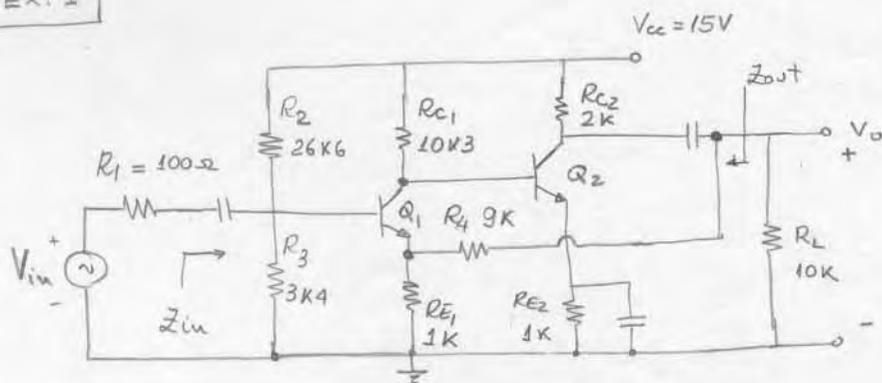
REALIMENTAÇÃO NEGATIVA

1. Identificar o tipo de realimentação: amostragem e comparação;
2. Definir o tipo de ganho apropriado para o amplificador básico (A_V, A_R, A_G ou A_I) e para a rede de realimentação ($\beta = 1/A$);
3. Identificar a rede β ;
4. Caracterizar a rede β por seus parâmetros $R_{\beta i}$, $R_{\beta o}$ e β ;
5. Definir o circuito do amplificador básico incorporando as impedâncias da fonte (R_S), da carga (R_L) e as da rede β : na entrada ($R_{\beta i}$) e na saída ($R_{\beta o}$);
6. Calcular ganho apropriado (A_V, A_R, A_G ou A_I), impedância de entrada (Z_i) e impedância de saída (Z_o) do amplificador básico (sem realimentação).
7. Calcular o ganho do amplificador realimentado (A_{Vf}, A_{Rf}, A_{Gf} ou A_{If}) aplicando a expressão:

$$A_f = A/(1 + \beta A)$$

8. Calcular as impedâncias de entrada (Z_{if}) e de saída (Z_{of}) do amplificador realimentado;
9. Cálculos complementares.

EX. 1



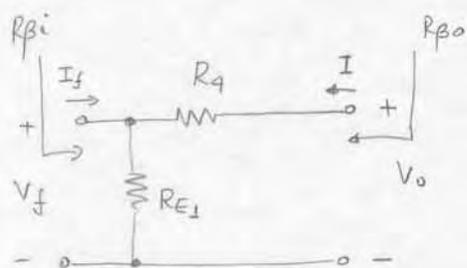
$h_{ie} = 2k$ $r_o \rightarrow \infty$
 $h_{fe} = 200$
 Calcular:
 $A_f = \frac{V_o}{V_{in}}$
 Z_{in}
 Z_{out}

i) Identificação do tipo de realimentação:

Amostragem: $V \rightarrow NO' \rightarrow$ curto
 Comparação: $V \rightarrow MALHA \rightarrow$ aberto

$$\Rightarrow A_v = \frac{V}{V} \Rightarrow \beta = \frac{V_f}{V_o}$$

ii) Identificação e caracterização da rede β :

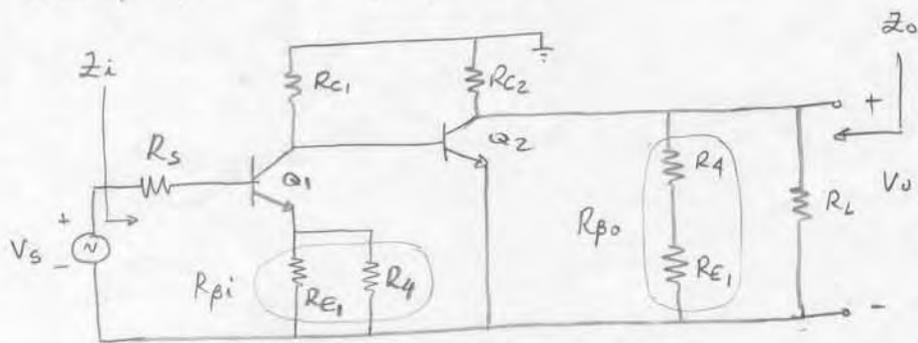


$$R_{pi} = \frac{V_f}{I_f} \Big|_{V_o=0 \text{ (curto)}} = R_{E1} \parallel R_4 = 1k \parallel 9k = 0,9k$$

$$R_{po} = \frac{V_o}{I} \Big|_{I_f=0 \text{ (aberto)}} = R_{E1} + R_4 = 1k + 9k = 10k$$

$$\beta = \frac{V_f}{V_o} \Big|_{I_f=0 \text{ (aberto)}} = \frac{R_{E1}}{R_{E1} + R_4} = \frac{1k}{10k} = 0,1$$

iii) Identificação do amplificador básico:



$$V_s = \frac{R_B}{R_1 + R_B} V_{in} \quad R_B = R_2 \parallel R_3 = 3k \parallel 26k \approx 3k \quad Z_{in2} = h_{ie} = 2k$$

$$R_s = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 = 100 \parallel 3k = 97\Omega$$

$$A_1 = - \frac{200 \cdot (2k \parallel 10,3k)}{0,097 + 2k + 201 \times 0,9k}$$

$$A_1 = - \frac{200 \cdot 1,67k}{182,99k}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_s} \Big|_{\beta=0} = A_1 \cdot A_2$$

$$A_1 = - \frac{h_{fe} R_{ac1}}{R_s + h_{ie} + (h_{fe} + 1) R_{pi}}$$

$A_1 = - 1,82$

$$A_2 = -\frac{h_{fe} R_{ac2}}{h_{ie}} = \frac{-200 \cdot 1,43k}{2k} \approx -143$$

$$A_2 \approx -143$$

$$R_{ac2} = R_{c2} \parallel R_L \parallel R_{\beta 0} = 2k \parallel 10k \parallel 10k = 1,43k$$

$$A_v = (-1,82)(-143)$$

$$A_v = 260,26$$

$$D = 1 + \beta A_v = 1 + 0,1 \times 260,26$$

$$D = 1 + \beta A_v = 27,03$$

iv) Cálculo dos parâmetros do amplificador realimentado:

$$A_{vf} = \frac{V_o}{V_s} \Big|_{\beta \neq 0} = \frac{A_v}{1 + \beta A_v} = \frac{260,26}{27,03}$$

$$A_{vf} \approx 9,63$$

$$Z_i = R_s + h_{ie} + (h_{fe} + 1) R_{\beta i} = 0,097k + 2k + 201 \cdot 0,9k \Rightarrow Z_i \approx 182,99k\Omega$$

$$Z_{if} \approx 4,95M\Omega$$

$$Z_{if} = (1 + \beta A_v) Z_i = 27,03 \times 182,99k$$

$$Z_o = R_{c2} \parallel R_L \parallel R_{\beta 0} \Rightarrow$$

$$Z_o = 1,43k\Omega$$

$$Z_{of} = \frac{Z_o}{(1 + \beta A_v)} = \frac{1,43k}{27,03}$$

$$Z_{of} \approx 53\Omega$$

v) Cálculos complementares:

$$A_f = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{V_s} \cdot \frac{V_s}{V_{in}} = A_{vf} \cdot \frac{V_s}{V_{in}} = A_{vf} \frac{R_B}{R_i + R_B} = 9,63 \times \frac{3k}{3,1k}$$

$$A_f = \frac{V_o}{V_{in}} \approx 9,32 \text{ V/V}$$

$$Z_{of} = Z_{out} \parallel R_L \Rightarrow Z_{out} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{of}} - \frac{1}{R_L}}$$

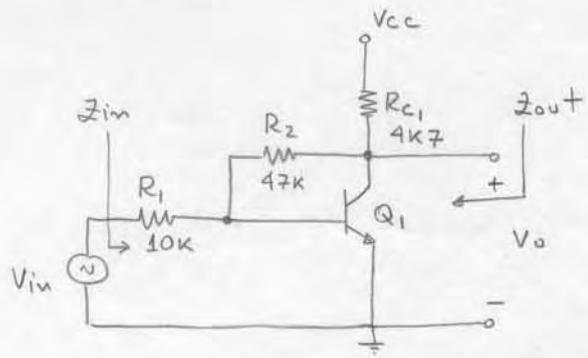
$$Z_{in} = (Z_{if} - R_s) \parallel R_B =$$

$$Z_{out} = 53,28\Omega$$

$$= (4,95M - 100) \parallel 3k =$$

$$Z_{in} \approx 3k$$

Ex. 2



$r_{\pi} = 1,67k$ $r_o = 20k$
 $h_{fe} = 100$
 Calcular!

$$A_f = \frac{V_o}{V_{in}}$$

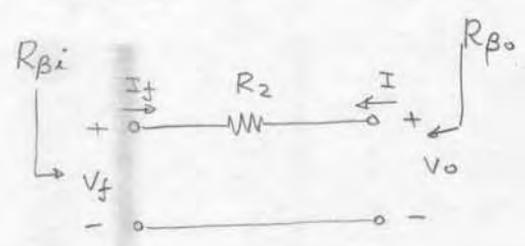
Z_{in}
 Z_{out}

i) Identificação do tipo de realimentação:

Amostragem: $V \rightarrow N_o' \rightarrow$ curto
 Comparação: $I \rightarrow N_o' \rightarrow$ curto

$$A_R = \frac{V}{I} \Rightarrow \beta = \frac{I_f}{V_o}$$

ii) Identificação e caracterização da rede β

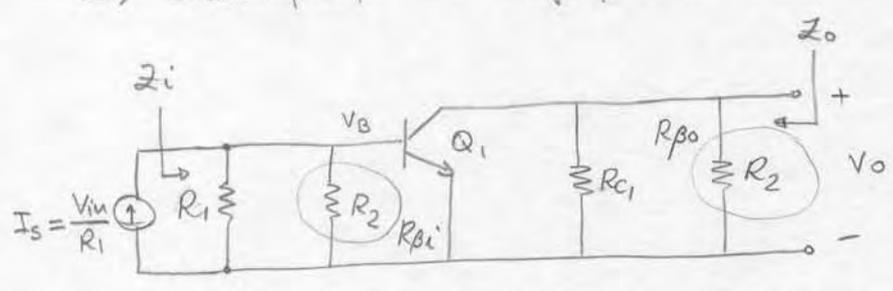


$$R_{\beta i} = \frac{V_f}{I_f} \Big|_{V_o=0 \text{ (curto)}} = R_2 = 47k\Omega$$

$$R_{\beta o} = \frac{V_o}{I} \Big|_{V_f=0 \text{ (curto)}} = R_2 = 47k\Omega$$

$$\beta = \frac{I_f}{V_o} \Big|_{V_f=0 \text{ (curto)}} = -\frac{1}{R_2} = -\frac{1}{47k\Omega}$$

iii) Identificação do amplificador básico



$$A_R = \frac{V_o}{I_s} \Big|_{\beta=0} = \frac{V_o}{V_B} \cdot \frac{V_B}{I_s}$$

$$R_{ac1} = r_o \parallel R_{c1} \parallel R_{\beta o} = 20k \parallel 4k7 \parallel 47k$$

$$R_{ac1} = 3,52k$$

$$\frac{V_o}{V_B} = -\frac{h_{fe} R_{ac1}}{h_{ie}} = \frac{-100 \cdot 3,52k}{1,67k}$$

$$\frac{V_o}{V_B} = -210,77$$

$$\frac{V_B}{I_S} = R_1 \parallel r_{\pi} \parallel R_{\beta i} = 10k \parallel 1,67k \parallel 47k$$

$$\frac{V_B}{I_S} = 1,39k\Omega$$

$$A_R = (-210,77) \cdot 1,39k$$

$$A_R = -292,97k \text{ V/A}$$

$$D = 1 + \beta A_R = 1 + \left(-\frac{1}{47k}\right) \cdot (-292,97k)$$

$$D = 1 + \beta A_R = 7,23$$

iv) Cálculo dos parâmetros do amplificador realimentado:

$$A_{Rf} = \frac{V_o}{I_S} \Big|_{\beta \neq 0} = \frac{A_R}{1 + \beta A_R} = \frac{-292,97k}{7,23}$$

$$A_{Rf} = -40,52k \frac{V}{A}$$

$$Z_i = R_1 \parallel R_{\beta i} \parallel r_{\pi}$$

 \Rightarrow

$$Z_i = 1,39k\Omega$$

$$Z_{if} = \frac{Z_i}{1 + \beta A_R} = \frac{1,39k}{7,23}$$

 \Rightarrow

$$Z_{if} = 192\Omega$$

$$Z_o = r_o \parallel R_{c1} \parallel R_{\beta o}$$

 \Rightarrow

$$Z_o = 3,52k\Omega$$

$$Z_{of} = \frac{Z_o}{1 + \beta A_R} = \frac{3,52k}{7,23}$$

 \Rightarrow

$$Z_{of} = 486\Omega$$

v) Cálculos complementares:

$$A_f = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{I_S} \cdot \frac{I_S}{V_{in}} = A_{Rf} \cdot \frac{I_S}{V_{in}} = -40,52k\Omega \cdot \frac{1}{R_1}$$

$$A_f = \frac{-40,52k}{10k}$$

 \Rightarrow

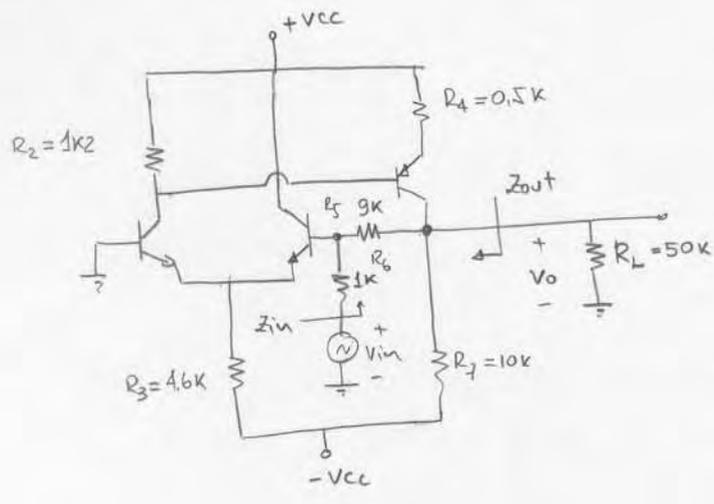
$$A_f = \frac{V_o}{V_{in}} = -4,05 \text{ V/V}$$

$$Z_{out} = Z_{of} = 486\Omega$$

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{if}} - \frac{1}{R_1}} + R_1 = 0,196k + 10k$$

$$Z_{in} = 10,196k\Omega$$

Ex 2a



$r_{\pi} = 2k$
 $r_o \rightarrow \infty$
 $\beta = 100$

Calcular:

$A_f = \frac{V_o}{V_{in}}$

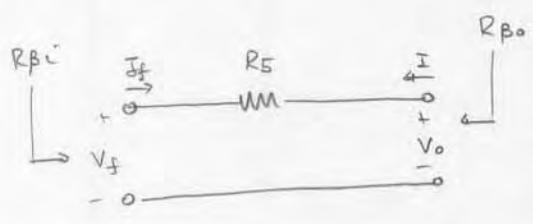
Z_{in}

Z_{out}

i) Identificação do tipo de realimentação:

Amostragem : $V \rightarrow N_o' \rightarrow$ curto } $A_R = \frac{V_o}{I_s} \Rightarrow \beta = \frac{I_f}{V_o}$
 Comparação : $I \rightarrow N_o' \rightarrow$ curto

ii) Identificação e caracterização da rede β

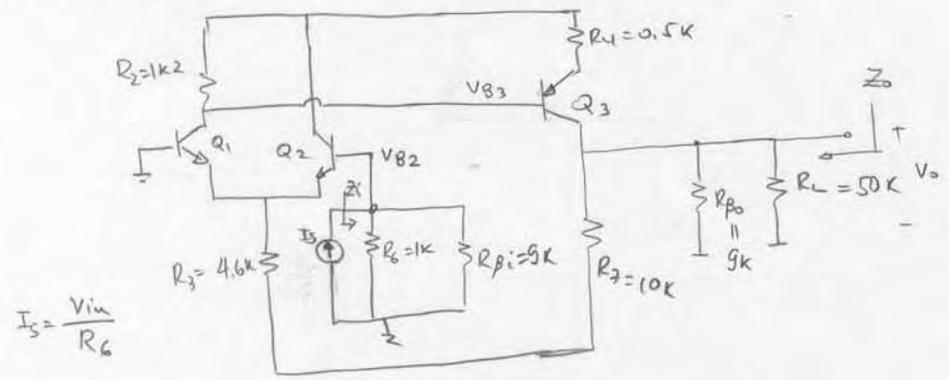


$R_{pi} = \frac{V_f}{I_f} \Big|_{V_o=0} = R_5 = 9k$

$R_{po} = \frac{V_o}{I} \Big|_{V_f=0} = R_5 = 9k$

$\beta = \frac{I_f}{V_o} \Big|_{V_f=0} = -\frac{1}{R_5} = -\frac{1}{9k}$

iii) Identificação do amplificador básico:



$A_R = \frac{V_o}{I_s} \Big|_{\beta=0} = \frac{V_o}{V_{B3}} \cdot \frac{V_{B3}}{V_{B2}} \cdot \frac{V_{B2}}{I_s}$

$$\frac{v_o}{v_{B3}} = - \frac{h_{fe} R_{ac3}}{r_{\pi} + (h_{fe} + 1) R_4} = - \frac{100 \cdot 4,33 \text{ k}}{2 \text{ k} + 101 \cdot 0,5 \text{ k}} = - 8,24 \text{ V/V}$$

$$R_{ac3} = R_7 \parallel R_{\beta o} \parallel R_L = 10 \text{ k} \parallel 9 \text{ k} \parallel 50 \text{ k} \Rightarrow R_{ac3} = 4,33 \text{ k}$$

$$\frac{v_{B3}}{v_{B2}} = \frac{h_{fe} R_{ac1}}{2 h_{ie}} = \frac{100 \times 1,17}{4 \text{ k}} = 29,32 \text{ V/V}$$

$$R_{ac1} = R_2 \parallel (r_{\pi} + (h_{fe} + 1) R_4) = 1 \text{ k} \parallel (2 \text{ k} + 101 \cdot 0,5) = 1,17 \text{ k}$$

$$\frac{v_{B2}}{I_s} = R_6 \parallel R_{\beta i} \parallel 2 h_{ie} = 1 \text{ k} \parallel 9 \text{ k} \parallel 4 \text{ k} = 0,73 \text{ k V/A}$$

$$A_R = - 8,24 \frac{\text{V}}{\text{V}} \times 29,32 \frac{\text{V}}{\text{V}} \times 1,17 \text{ k} \frac{\text{V}}{\text{A}} \Rightarrow \boxed{A_R = - 282,66 \text{ k} \frac{\text{V}}{\text{A}}}$$

$$D = 1 + \beta A_R = 1 + \left(- \frac{1}{9 \text{ k}} \right) (- 282,66 \text{ k})$$

$$\boxed{D = 1 + \beta A_R = 32,4}$$

iv) Cálculo dos parâmetros do amplificador realimentado:

$$A_{Rf} = \frac{v_o}{I_s} \Big|_{\beta \neq 0} = \frac{A_R}{1 + \beta A_R} = \frac{- 282,66 \text{ k}}{32,4} \Rightarrow \boxed{A_{Rf} = 8,72 \text{ k V/A}}$$

$$z_i = R_6 \parallel R_{\beta i} \parallel 2 r_{\pi} = 1 \text{ k} \parallel 9 \text{ k} \parallel 4 \text{ k} \Rightarrow \boxed{z_i = 0,73 \text{ k} \Omega}$$

$$z_o = R_7 \parallel R_{\beta o} \parallel R_L = 10 \text{ k} \parallel 9 \text{ k} \parallel 50 \text{ k} \Rightarrow \boxed{z_o = 4,32 \text{ k} \Omega}$$

$$z_{if} = \frac{z_i}{1 + \beta A_R} \Rightarrow z_{if} = \frac{0,73 \text{ k}}{32,4} \Rightarrow \boxed{z_{if} = 22,6 \Omega}$$

$$z_{of} = \frac{z_o}{1 + \beta A_R} \Rightarrow z_{of} = \frac{4,32 \text{ k}}{32,4} \Rightarrow \boxed{z_{of} = 0,13 \text{ k} \Omega}$$

v) Cálculo Complementares

$$A_f = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{I_S} \cdot \frac{I_S}{V_{in}} = X_{Rf} \cdot \frac{I_S}{V_{in}} = -8,72k \cdot \frac{1}{R_6} = -8,72k \cdot \frac{1}{1k}$$

$$A_f = -8,72 \text{ V/V}$$

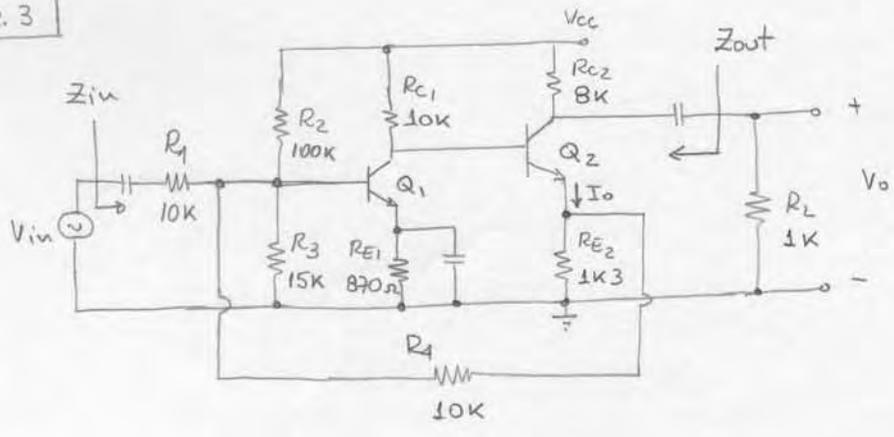
$$Z_{out} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{of}} - \frac{1}{R_L}} = \frac{1}{\frac{1}{0,13k} - \frac{1}{50k}} \Rightarrow$$

$$Z_{out} = 0,1303 \text{ k}\Omega$$

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{if}} - \frac{1}{R_6}} + R_6 = \frac{1}{\frac{1}{0,019k} - \frac{1}{1k}} + 1k$$

$$Z_{in} = 1,019 \text{ k}\Omega$$

Ex. 3

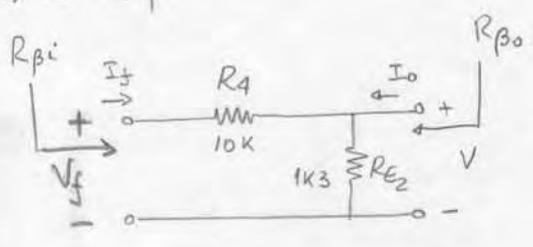


$h_{fe} = 100$
 $r_o = 20k$
 $r_{\pi} = 2k5$
 Calcular:
 $A_f = \frac{V_o}{V_{in}}$
 Z_{in}
 Z_{out}

i) Tipo de realimentação

Amostragem : $I \rightarrow$ MALHA \rightarrow aberto } $A_I = \frac{I}{I} \Rightarrow \beta = \frac{I_f}{I_o}$
 Comparações : $I \rightarrow$ No' \rightarrow curto

ii) Rede β



$$R_{\beta i} = \left. \frac{V_f}{I_f} \right|_{I_o=0} = R_4 + R_{E2} = 11,3k$$

(aberto)

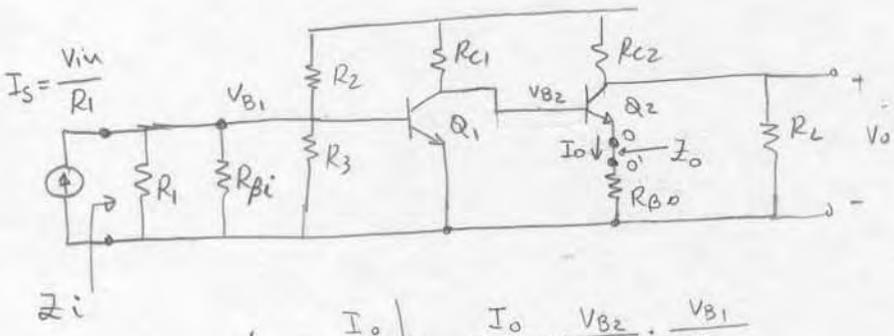
$$R_{\beta o} = \left. \frac{V}{I_o} \right|_{V_f=0} = R_{E2} \parallel R_4 = 1,15k$$

(curto)

$$\beta = \left. \frac{I_f}{I_o} \right|_{V_f=0} = - \frac{R_{E2}}{R_{E2} + R_4} = - \frac{1k3}{11,3k} = -0,115 A/A$$

(curto)

iii) Amplificador Básico



$$A_I = \left. \frac{I_o}{I_s} \right|_{\beta=0} = \frac{I_o}{V_{B2}} \cdot \frac{V_{B2}}{V_{B1}} \cdot \frac{V_{B1}}{I_s}$$

$$R_{ac1} = r_o \parallel R_{c1} \parallel (r_{\pi 2} + (h_{fe} + 1) R_{\beta o})$$

$$R_{ac1} = 20k \parallel 10k \parallel (2k5 + 101 \cdot 1,15k)$$

$$R_{ac1} = 20k \parallel 10k \parallel 118,65k$$

$$R_{ac1} = 6,31k$$

$$\frac{I_o}{V_{B2}} = \frac{1}{R_{\beta o} + r_e} = \frac{1}{1,15k + \frac{2k5}{101}} = \frac{1}{1,17k}$$

$$\frac{V_{B2}}{V_{B1}} = - \frac{h_{fe} R_{ac1}}{r_{\pi}} = - \frac{100 \cdot 6,31k}{2k5} = -252,4$$

$$A_I = - \frac{R_{i1} \cdot h_{fe} \cdot R_{c1}}{r_{\pi} \cdot Z_o}$$

$$\frac{V_{B1}}{I_s} = R_1 \parallel R_{\beta i} \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel r_{\pi} = 10k \parallel 11,3k \parallel 100k \parallel 15k \parallel 2k5 = 1k5$$

$$A_I = \frac{1}{1,17k} \cdot (-252,4) \cdot 1k5$$

$$A_I = -323,6 \text{ A/A}$$

$$D = 1 + \beta A_I = 1 + (-0,115)(-323,6) = 1 + 37,2$$

$$D = 1 + \beta A_I = 38,2$$

iv) Amplificador realimentado

$$A_{If} = \frac{I_o}{I_s} \Big|_{\beta \neq 0} = \frac{A_I}{1 + \beta A_I} = \frac{-323,6}{38,2}$$

$$A_{If} = -8,47 \text{ A/A}$$

$$Z_i = R_1 \parallel R_{\beta i} \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel r_{\pi} \Rightarrow$$

$$Z_i = 1k5 \Omega$$

$$Z_{if} = \frac{Z_i}{(1 + \beta A_I)} = \frac{1k5}{38,2}$$

\Rightarrow

$$Z_{if} = 39,3 \Omega$$

$$Z_o = R_{\beta o} + \frac{R_{c1} + r_{\pi}}{h_{fe} + 1} = R_{\beta o} + r_e + \frac{R_{c1}}{h_{fe} + 1} = 1,15k + 0,025k + \frac{10k}{101}$$

$$Z_o = 1,27 \text{ k}\Omega$$

$$Z_{of} = Z_o (1 + \beta A_I) = 1,27k \times 38,2$$

$$Z_{of} = 48,5 \text{ k}\Omega$$

v) Cálculos complementares:

$$A_f = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{I_o} \cdot \frac{I_o}{I_s} \cdot \frac{I_s}{V_{in}} = \frac{V_o}{I_o} \cdot A_I \cdot \frac{I_s}{V_{in}}$$

Considerando $I_c = I_E \Rightarrow I_c = I_o$

$$V_o = -I_o R_{ac2}, \text{ onde } R_{ac2} \cong R_{c2} \parallel R_L = 8k \parallel 1k = 0,89k\Omega$$

$$\frac{V_o}{I_o} = -R_{ac2}$$

$$A_f = -R_{ac2} \cdot A_{if} \cdot \frac{1}{R_1} = (-0,89k)(-8,47) \cdot \frac{1}{10k}$$

$$A_f = \frac{V_o}{V_{in}} = + 0,75 \frac{V}{V}$$

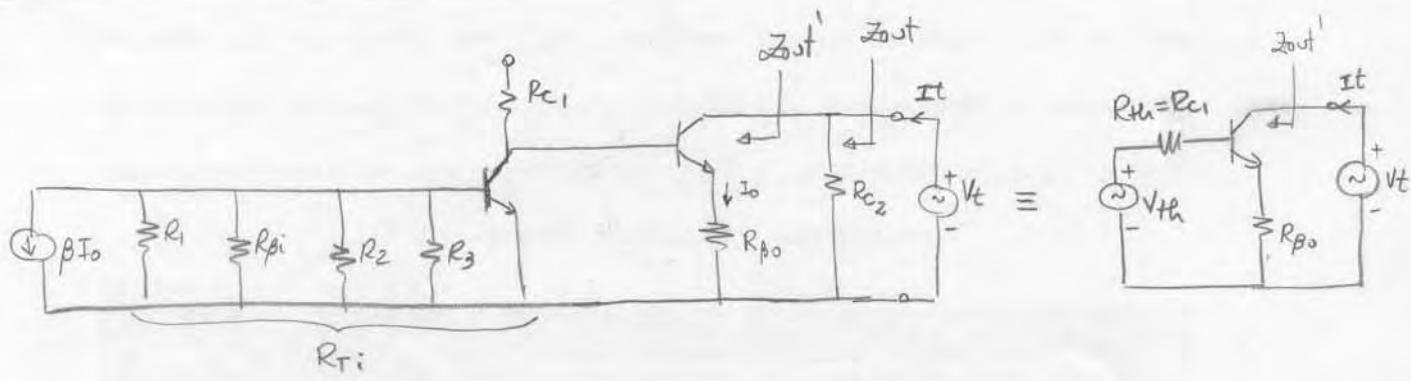
$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{if}} - \frac{1}{R_1}} + R_1 = \frac{1}{\frac{1}{39,3} - \frac{1}{10k}} + 10k$$

$$Z_{in} = 10,039k\Omega$$

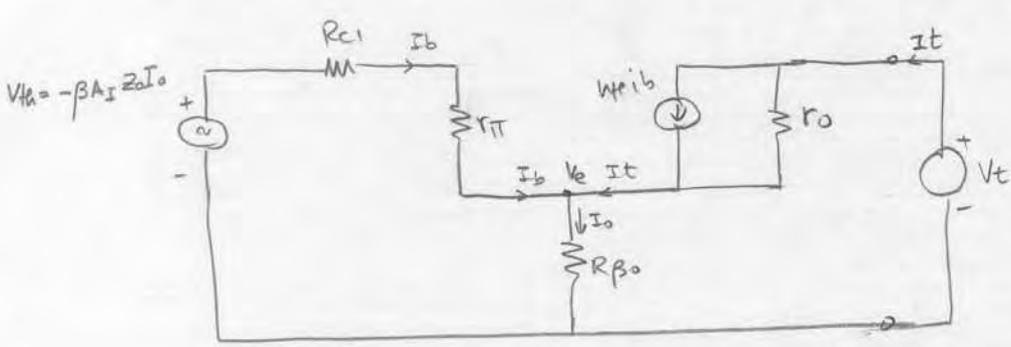
$$A_I = \frac{I_o}{I_s} = - \frac{R_{Ti}}{r_{\pi}} \cdot h_{fe} \cdot R_{c1} \cdot \frac{1}{R_{\beta o} + r_e} = - \frac{R_{Ti}}{r_{\pi}} \cdot h_{fe} \cdot \frac{R_{c1} \cdot (h_{fe} + 1)(R_{\beta o} + r_e)}{R_{c1} + (h_{fe} + 1)(R_{\beta o} + r_e)} \cdot \frac{1}{(R_{\beta o} + r_e)}$$

$$A_I = - \frac{R_{Ti}}{r_{\pi}} \cdot h_{fe} \cdot \frac{R_{c1}}{\frac{R_{c1}}{h_{fe} + 1} + R_{\beta o} + r_e} \Rightarrow \boxed{A_I = - \frac{R_{Ti}}{r_{\pi}} \cdot h_{fe} \cdot \frac{R_{c1}}{Z_o}}$$

Modelo para determinación de Z_{out} :



$$\begin{cases} V_{Th} = \beta I_o \frac{R_{Ti}}{r_{\pi}} \cdot h_{fe} \cdot R_{c1} = - \beta A_I Z_o I_o \\ R_{Th} = R_{c1} \end{cases}$$



$$\begin{aligned} I_o &= I_b + I_t \\ V_t &= V_e + (I_t - h_{fe} I_b) r_o \\ V_t &= (I_b + I_t) R_{\beta o} + (I_t - h_{fe} I_b) r_o \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_b &= \frac{V_{Th} - V_e}{R_{c1} + r_{\pi}} = - \frac{(\beta A_I Z_o + R_{\beta o}) I_o}{R_{c1} + r_{\pi}} \\ I_b &= - \frac{(\beta A_I Z_o + R_{\beta o})}{R_{c1} + r_{\pi}} (I_b + I_t) \\ I_b &= - \frac{\beta A_I Z_o + R_{\beta o}}{\beta A_I Z_o + R_{\beta o} + R_{c1} + r_{\pi}} I_t \end{aligned}$$

$$\frac{V_t}{I_t} = \left[1 - \frac{\beta A_I Z_o + R_{\beta o}}{\beta A_I Z_o + R_{\beta o} + R_{c1} + r_{\pi}} \right] R_{\beta o} + \left[1 + h_{fe} \frac{(\beta A_I Z_o + R_{\beta o})}{\beta A_I Z_o + R_{\beta o} + R_{c1} + r_{\pi}} \right] r_o$$

$$\frac{v_t}{I_t} = \frac{(R_{c1} + r_{\pi}) R_{\beta 0}}{\beta A_I z_0 + R_{\beta 0} + R_{c1} + r_{\pi}} + \left(1 + \frac{h_{fe}}{1 + \frac{R_{c1} + r_{\pi}}{\beta A_I z_0 + R_{\beta 0}}} \right) r_o$$

$$\frac{v_t}{I_t} = \frac{1}{\frac{\beta A_I z_0}{(R_{c1} + r_{\pi}) R_{\beta 0}} + \frac{1}{(R_{c1} + r_{\pi}) \parallel R_{\beta 0}}} + \left(1 + \frac{h_{fe}}{1 + \frac{R_{c1} + r_{\pi}}{\beta A_I z_0 + z_0 - \frac{(R_{c1} + r_{\pi})}{(h_{fe} + 1)}}} \right) r_o$$

$\approx (1 + \beta A_I) z_0 = z_{of}$

$$\frac{v_t}{I_t} = \frac{1}{\beta A_I \frac{R_{c1} + r_{\pi} + (h_{fe} + 1) R_{\beta 0}}{(R_{c1} + r_{\pi}) (h_{fe} + 1) R_{\beta 0}} + \frac{1}{(R_{c1} + r_{\pi}) \parallel R_{\beta 0}}} + \left(1 + \frac{h_{fe}}{1 + \frac{R_{c1} + r_{\pi}}{z_{of}}} \right) r_o$$

$$\frac{v_t}{I_t} = \frac{1}{\frac{\beta A_I}{(R_{c1} + r_{\pi}) \parallel (h_{fe} + 1) R_{\beta 0}} + \frac{1}{(R_{c1} + r_{\pi}) \parallel R_{\beta 0}}} + \left(1 + \frac{h_{fe}}{1 + \frac{R_{c1} + r_{\pi}}{z_{of}}} \right) r_o$$

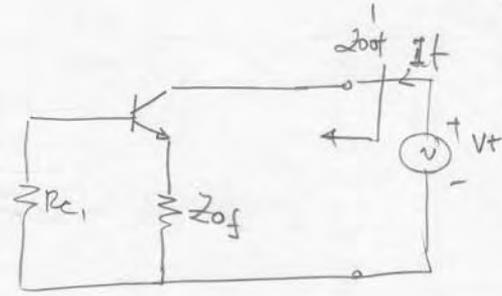
$$\frac{v_t}{I_t} = \frac{(R_{c1} + r_{\pi}) \parallel R_{\beta 0} \parallel \frac{(R_{c1} + r_{\pi}) \parallel (h_{fe} + 1) R_{\beta 0}}{\beta A_I}}{\beta A_I} + \left(1 + \frac{h_{fe}}{1 + \frac{R_{c1} + r_{\pi}}{z_{of}}} \right) r_o$$

$$\frac{v_t}{I_t} = \frac{(R_{c1} + r_{\pi}) \parallel \frac{(R_{c1} + r_{\pi})}{\beta A_I} \parallel R_{\beta 0} \parallel \frac{(h_{fe} + 1) R_{\beta 0}}{\beta A_I}}{\beta A_I} + \left(1 + \frac{h_{fe}}{1 + \frac{R_{c1} + r_{\pi}}{z_{of}}} \right) r_o$$

$$\frac{v_t}{I_t} = \frac{(R_{c1} + r_{\pi})}{1 + \beta A_I} \parallel \frac{R_{\beta 0}}{\frac{\beta A_I}{(h_{fe} + 1)} + 1} + \left(1 + \frac{h_{fe}}{1 + \frac{R_{c1} + r_{\pi}}{z_{of}}} \right) r_o$$

circuito equivalente

$$\frac{V_t}{I_t} \approx \left(1 + \frac{h_{fe}}{1 + \frac{R_{c1} + r_{\pi}}{Z_{of}}} \right) r_o \equiv$$



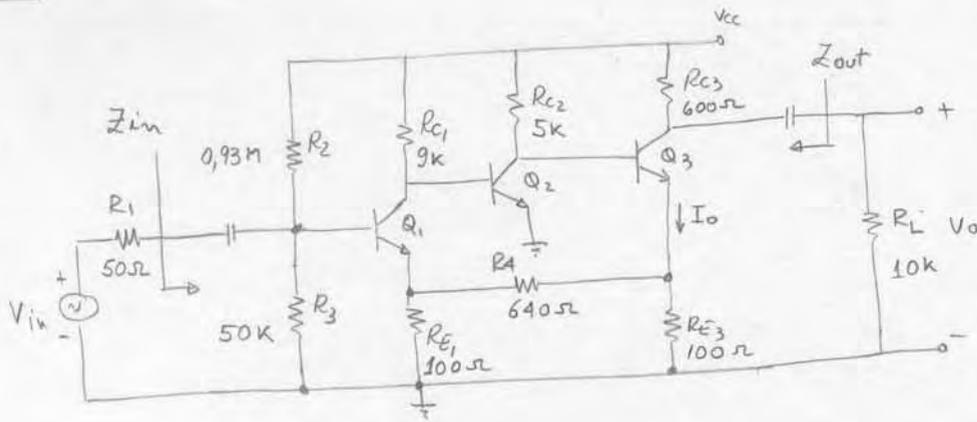
$$Z_{out}' = \left(\frac{100}{1 + 0,258} + 1 \right) 20k \Rightarrow Z_{out}' = 1,61 M\Omega$$

$$K = \frac{R_{c1} + r_{\pi}}{Z_{of}} = \frac{10k + 2k5}{48,5} = 0,258$$

$$Z_{out} = Z_{out}' // R_{c2} \approx R_{c2} \Rightarrow Z_{out} = 8k$$

OBS: A impedância Z_{out}' não aumenta de $(1 + \beta A_v)$ por estar fora de malha de realimentação.

EX 4



$h_{fe} = 100$
 $r_o = 50k$
 $r_{\pi} = 2k$
 Calcular:

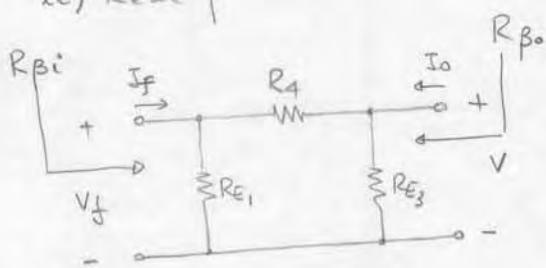
$A_f = \frac{V_o}{V_s}$

Z_{out}
 Z_{in}

i) Tipo de realimentação:

Amostragem: $I \rightarrow$ MALHA \rightarrow ABERTO
 Comparação: $V \rightarrow$ MALHA \rightarrow ABERTO
 $\Rightarrow A_G = \frac{I}{V} \Rightarrow \beta = \frac{V_f}{I_o}$

ii) Rede β

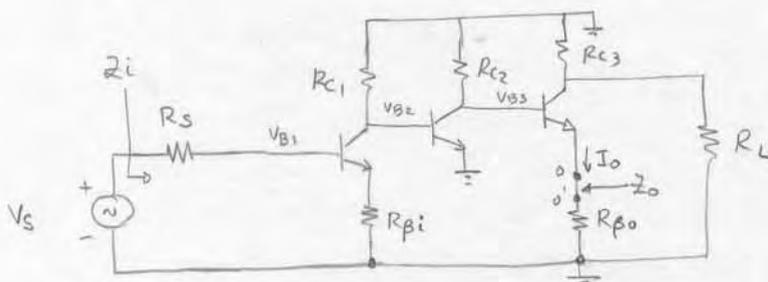


$R_{\beta i} = \frac{V_f}{I_f} \Big|_{I_o=0} = R_{E1} \parallel (R_4 + R_{E3}) = 100 \parallel (640 + 100) = 88,1 \Omega$
 (aberto)

$R_{\beta o} = \frac{V}{I_o} \Big|_{I_f=0} = R_{E3} \parallel (R_4 + R_{E1}) = 100 \parallel (640 + 100) = 88,1 \Omega$
 (aberto)

$\beta = \frac{V_f}{I_o} \Big|_{I_f=0} = \frac{R_{E3}}{R_{E1} + R_4 + R_{E3}} R_{E1} = \frac{100 \cdot 100}{100 + 640 + 100} = 11,9 \frac{V}{A}$
 (aberto)

iii) Amplificador Básico



$V_s = \frac{R_B}{R_B + R_1} V_{in}$, $R_B = R_2 \parallel R_3 = 47,45k$

$R_s = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 = 50 \Omega \parallel 930k \parallel 50k \approx 50 \Omega$

$$A_G = \frac{I_o}{V_s} \Big|_{\beta=0} = \frac{V_{B1}}{V_s} \cdot \frac{V_{B2}}{V_{B1}} \cdot \frac{V_{B3}}{V_{B2}} \cdot \frac{I_o}{V_{B3}}$$

$$\frac{V_{B1}}{V_s} = \frac{(h_{fe}+1)R_{\beta i} + r_{\pi}}{R_s + r_{\pi} + (h_{fe}+1)R_{\beta i}} = \frac{101 \cdot 88,1 + 2k}{50 + 2k + 101 \cdot 88,1} = \frac{10,90k}{10,95k} = 0,995$$

$$\frac{V_{B2}}{V_{B1}} = - \frac{h_{fe} R_{ac1}}{r_{\pi} + (h_{fe}+1)R_{\beta i}} = \frac{-100 \times 1,58k}{2k + 101 \cdot 88,1} = \frac{-158k}{10,90k} = -14,50$$

$$R_{ac1} = R_c \parallel r_o \parallel r_{\pi}$$

$$R_{ac1} = 9k \parallel 50k \parallel 12k$$

$$R_{ac1} = 1,58k$$

$$\frac{V_{B3}}{V_{B2}} = - \frac{h_{fe} R_{ac2}}{r_{\pi}} = \frac{-100 \times 3k2}{2k} = \frac{-320k}{2k} = -160,4$$

$$R_{ac2} = R_c \parallel r_o \parallel [r_{\pi} + (h_{fe}+1)R_{\beta o}]$$

$$R_{ac2} = 5k \parallel 50k \parallel [2k + 101 \cdot 88,1]$$

$$R_{ac2} = 5k \parallel 50k \parallel 10,9k$$

$$R_{ac2} = 3k2$$

$$\frac{I_o}{V_{B3}} = \frac{1}{r_e + R_{\beta o}} = \frac{1}{19,8 + 88,1} = \frac{1}{0,108k}$$

$$A_G = 0,995 \times (-14,50) \times (-160,4) \times \frac{1}{0,108k}$$

$$A_G = 21,42 \frac{A}{V}$$

$$D = 1 + \beta A_G = 1 + 11,9 \times 21,42 = 255,9$$

$$D = 1 + \beta A_G = 255,9$$

iv) Amplificador realimentado

$$A_{Gf} = \frac{I_o}{V_s} \Big|_{\beta \neq 0} = \frac{A_G}{1 + \beta A_G} = \frac{21,42}{255,9}$$

$$A_{Gf} = 0,0837 \frac{A}{V}$$

$$Z_i = R_s + h_{ie} + (h_{fe}+1)R_{\beta i} = 0,05k + 2k + 101 \times 0,0881 \Rightarrow$$

$$Z_i = 10,95k\Omega$$

$$Z_{if} = (1 + \beta A_G) Z_i = 255,9 \times 10,95k \Rightarrow$$

$$Z_{if} = 2,8M\Omega$$

$$Z_o = R_{\beta o} + \frac{R_c + h_{ie}}{h_{fe}+1} = R_{\beta o} + r_e + \frac{R_c}{h_{fe}+1} = 88,1 + 19,8 + 49,5$$

$$Z_o = 157,4\Omega$$

$$Z_{of} = (1 + \beta A_G) Z_o = 255,9 \times 157,4 \Rightarrow$$

$$Z_{of} = 40,3k\Omega$$

v) Cálculos complementares

$$A_f = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{I_o}{V_s} \cdot \frac{V_o}{I_o} \cdot \frac{V_s}{V_{in}} = A_{Gf} \cdot \frac{V_o}{I_o} \cdot \frac{V_s}{V_{in}}$$

Considerando $I_e = I_c \Rightarrow I_c = I_o$

$$V_o = I_o R_{ac3}, \text{ onde } R_{ac3} \cong R_{c3} \parallel R_L = 0,6k \parallel 50k = 566 \Omega$$

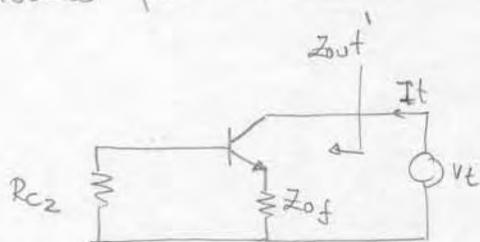
$$\frac{V_o}{I_o} = -R_{ac3} \quad \frac{V_s}{V_{in}} = \frac{R_B}{R_B + R_s}$$

$$A_f = A_{Gf} \cdot (-R_{ac3}) \cdot \frac{R_B}{R_B + R_s} = 0,0837 \cdot (-566) \cdot \frac{47,45k}{47,45k + 0,05k}$$

$$A_f = \frac{V_o}{V_{in}} = -47,32 \frac{V}{V}$$

$$Z_{in} = (Z_{if} - R_s) \parallel R_B = (2,8M\Omega - 50\Omega) \parallel 47,45k \Rightarrow Z_{in} \cong 47,45k\Omega$$

Modelo para determinação de Z_{out}



$$Z_{out}' \cong \left(\frac{h_{fe}}{K+1} + 1 \right) r_o$$

$$K = \frac{R_{\pi} + R_{c2}}{Z_{of}} = \frac{2k + 5k}{40,3k} = 0,174$$

$$Z_{out}' \cong \left(\frac{100}{1 + 0,174} + 1 \right) r_o$$

$$\Rightarrow Z_{out}' = 86,17 r_o$$

$$Z_{out}' = 4,3M\Omega$$

$$Z_{out} = Z_{out}' \parallel R_{c3} = 4,3M\Omega \parallel 600\Omega \Rightarrow Z_{out} = 600\Omega$$