

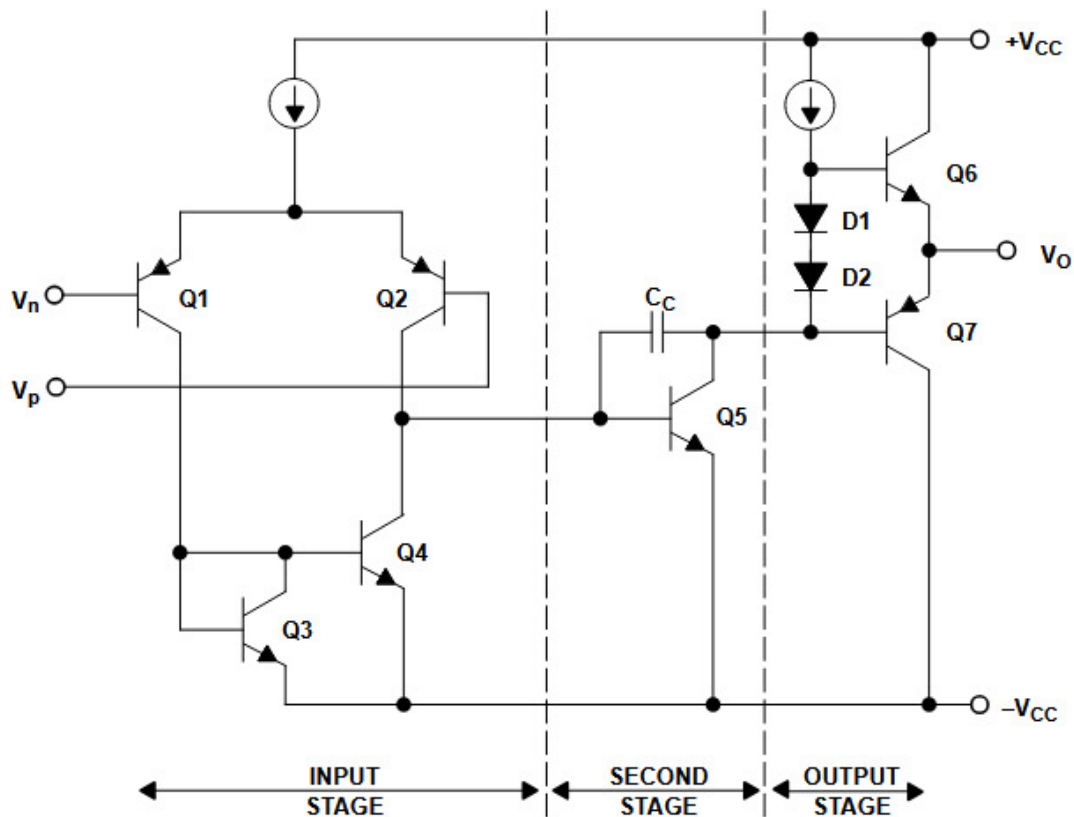
Sistemas Lineares_12-NegativeFeedback

November 6, 2025

1 Realimentação Negativa: Amplificadores Operacionais

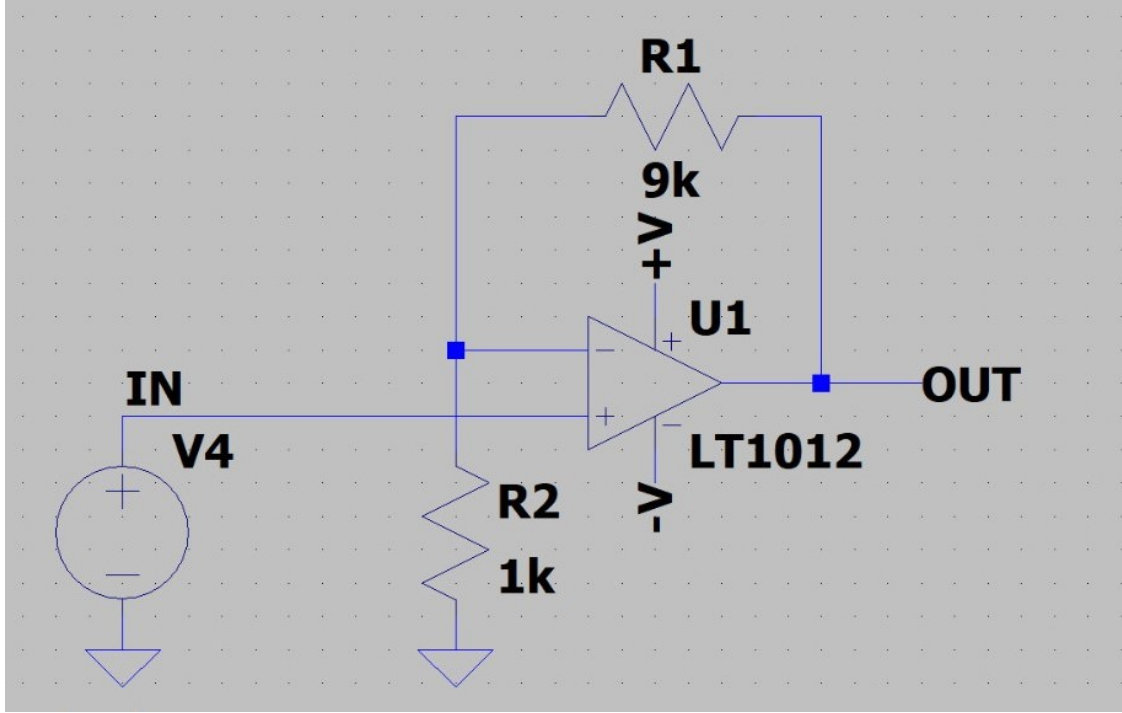
Neste *notebook* aplicaremos os conceitos estudados até aqui para o estudo introdutório à uma técnica importante em Teoria de Controle e análise de Sistemas Lineares em geral, a realimentação negativa. Usaremos o Amplificador Operacional como caso exemplo neste estudo, e como é um elemento não linear as simulações serão feitas com **LTspice**, um *software* de simulação de circuitos eletrônicos analógicos baseado em SPICE, produzido pela fabricante de semicondutores Analog Devices. Dois efeitos benéficos serão mostrados aqui, a extensão da largura de banda e a redução dos efeitos de distorção não linear em circuitos amplificadores.

Um amplificador operacional é formado, de forma simplificada por três estágios, como mostrado na figura abaixo(extraída de “OP AMPs for everyone”, de Bruce Carter e Ron Mancini, Newnes, 2017) :



1.1 Sensibilidade de Ganho e Largura de Banda

Um amplificador operacional configurado como amplificador não inversor com realimentação negativa é mostrado na figura abaixo:



No circuito acima, o ganho de malha aberta em baixas frequências A é aproximadamente 2M, ou 126 dB. O Ganho de realimentação negativa, β é dado pelo divisor de tensão com os resistores R_1 e R_2 , ou seja, $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,1$. Assim, o ganho em malha fechada pode ser calculado como abaixo:

$$H(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta}$$

Note que como será mostrado em seguida, normalmente $A(s)$ varia (diminui) com a frequência enquanto o ganho de realimentação é constante. Enquanto $A(s)$ é grande, o produto $A(s)\beta$ é consideravelmente maior que 1, e a expressão acima pode ser aproximada como

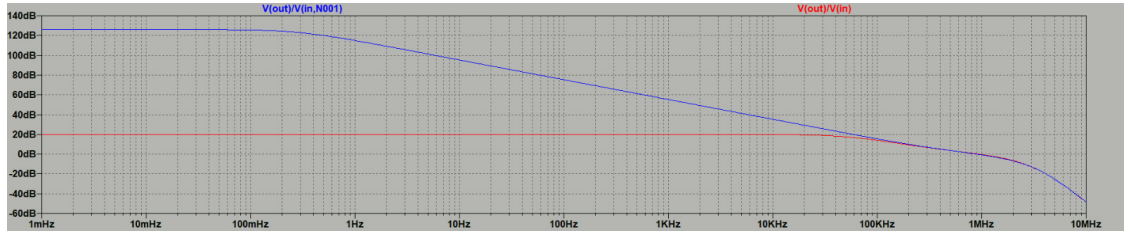
$$H(s) \approx \frac{A(s)}{A(s)\beta} = \frac{1}{\beta}.$$

No exemplo acima, teremos $H(s) \approx 10$, ou 20 dB, portanto uma redução de 106 dB em relação ao ganho de malha aberta. Entretanto, o fato importante aqui é que $A(s)$ começa a ser reduzido em frequências muito baixas, com uma redução de 20 dB por década, aproximadamente, como um filtro passa baixas de primeira ordem. A redução do ganho de malha aberta é causada primariamente pela presença de capacitâncias parasitas que inserem polos na função de transferência, causando um comportamento pouco regular. Um capacitor de compensação (C_c , na figura) adiciona um polo dominante, causando a redução aproximadamente constante de 20dB por década. Assim, para frequências maiores que a frequência de corte em malha aberta, $A(s)$ pode ser escrita como :

$$A(s) = \frac{A}{\omega} = A \frac{\omega_c}{\omega}$$

onde A é o ganho $A(s)$ em baixas frequências e ω_c é a frequência de corte em malha aberta. Na

figura abaixo é mostrado o diagrama de Bode para o os ganhos de malha aberta e fechada:



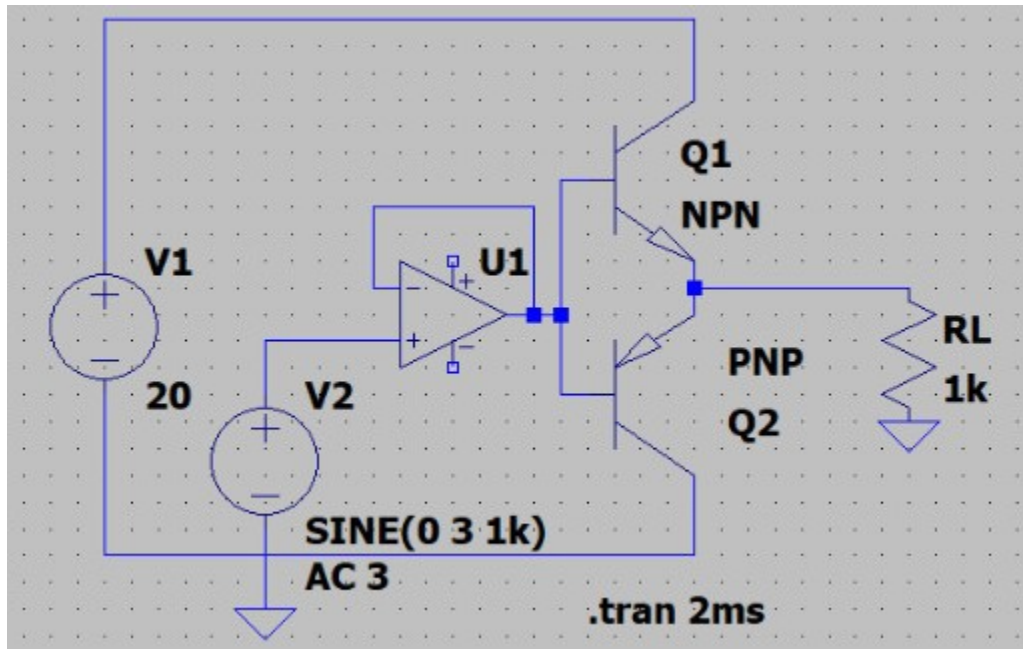
No diagrama, a linha azul é o ganho em malha aberta enquanto a linha vermelha é o ganho de malha fechada. O diagrama mostra que apesar da redução do ganho este é constante até $\omega = \omega' \approx 100KHz$, enquanto $\omega_c \approx 0,5Hz$. Verifique que $\frac{\omega'}{\omega_c} = 200.10^3$, que é a mesma relação na qual o ganho é reduzido, isto é, $\frac{2.10^6}{10} = 200.10^3$. Este resultado pode ser confirmado observando que na frequência ω' podemos escrever

$$\frac{A}{1+A\beta} = A \frac{\omega_c}{\omega'} \rightarrow \omega' = (1 + A\beta)\omega_c.$$

Portanto, diminuir o ganho do amplificador por um determinado fator faz com que a largura de banda aumente pelo mesmo fator. Como resultado, um dos parâmetros mais importantes em um amplificador operacional é o produto ganho x largura de banda, ou GBP na sigla em ingles, fornecido nas especificações do componente, e com o qual dada uma largura de banda desejada se encontra o ganho correspondente ou vice-versa.

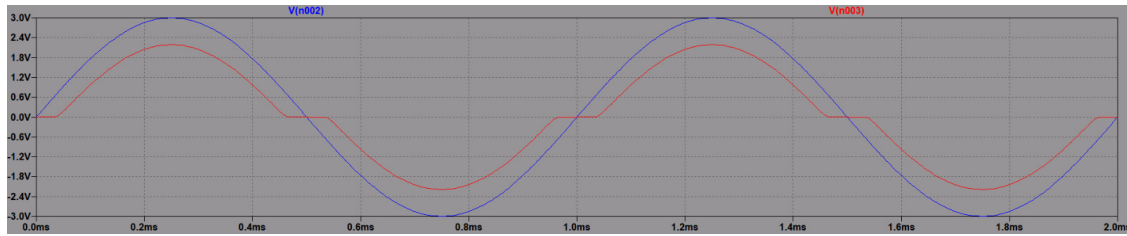
1.2 Distorção Não Linear

O estágio de saída de um amplificador de potência normalmente amplifica a corrente de saída através de um par de transistores na configuração *push-pull*, como mostrado na figura abaixo:



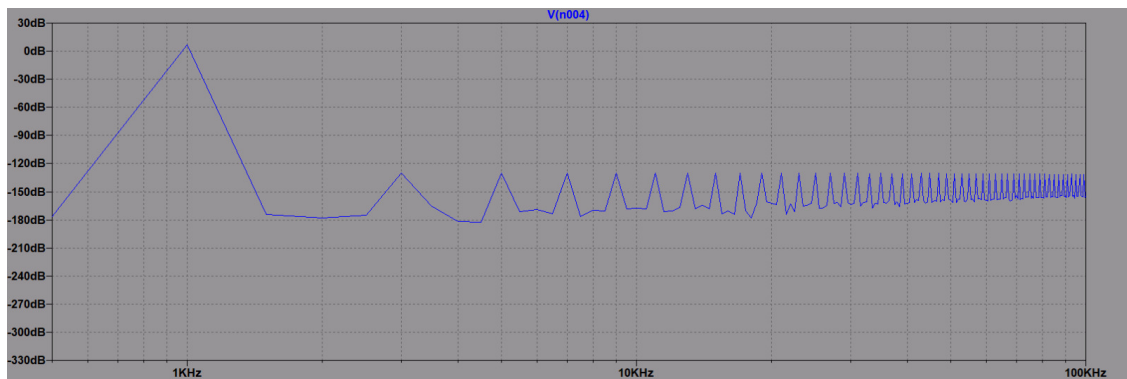
No circuito o amplificador operacional é um amplificador de ganho unitário acionando um estágio de

saída classe B. Nesta classe de amplificadores, cada transistor só é acionado quando a tensão de base supera a tensão base-emissor, causando a distorção mostrada na figura abaixo.

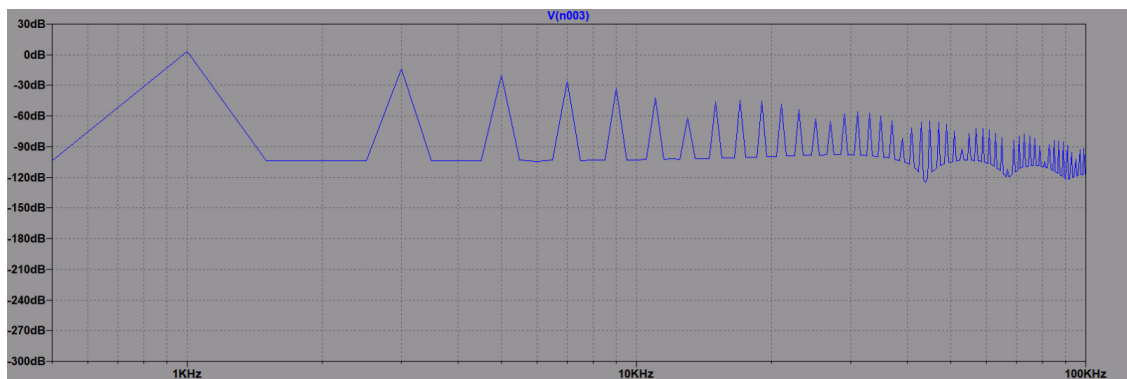


Na figura, a curva azul corresponde à tensão de entrada no circuito, enquanto a curva vermelha corresponde à tensão sobre o resistor de carga. A distorção nesta última pode ser bem apreciada comparando as transformadas de Fourier (FFT) das duas tensões:

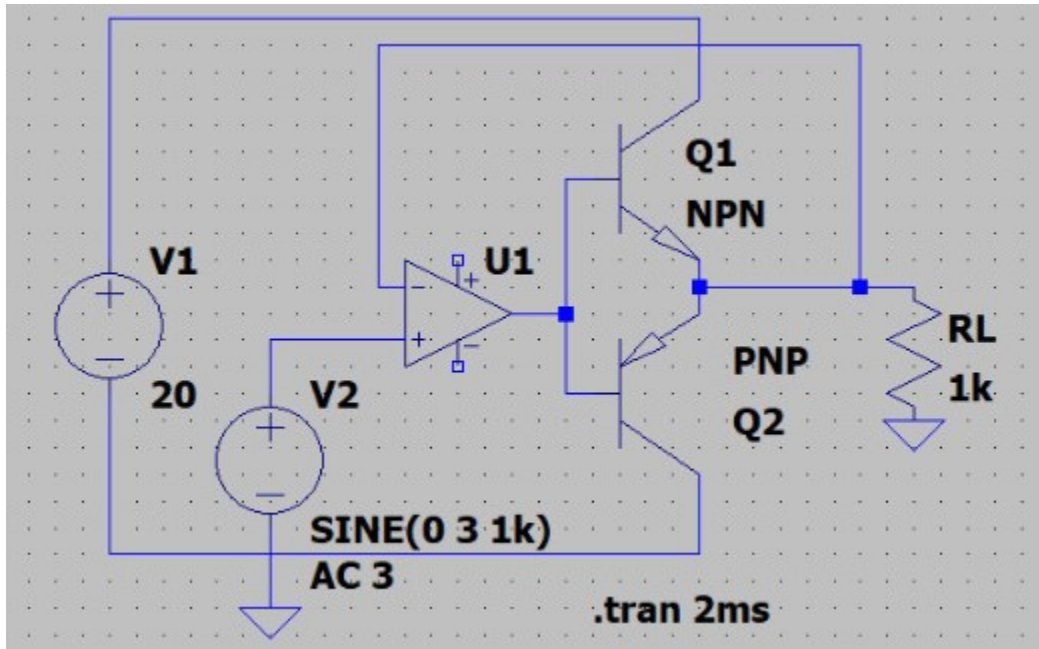
Tensão de entrada:



Tensão de saída:



O circuito acima é modificado com a inserção de uma realimentação global:



Com base na equação de ganho de malha fechada, sabemos que para frequências dentro da largura de banda a saída deverá ser uma cópia da tensão de entrada. Com efeito, na próxima figura é mostrado como a diferença entre elas é imperceptível. A redução da distorção é apreciada na figura seguinte, através do gráfico da FFT.

