

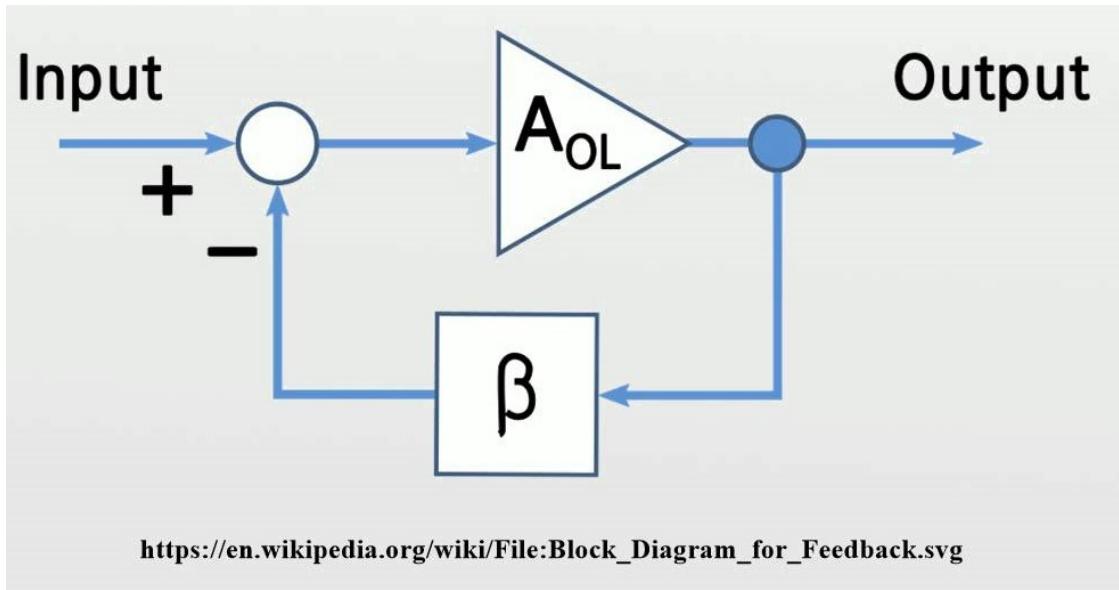
Sistemas Lineares_12-NegativeFeedback

November 7, 2025

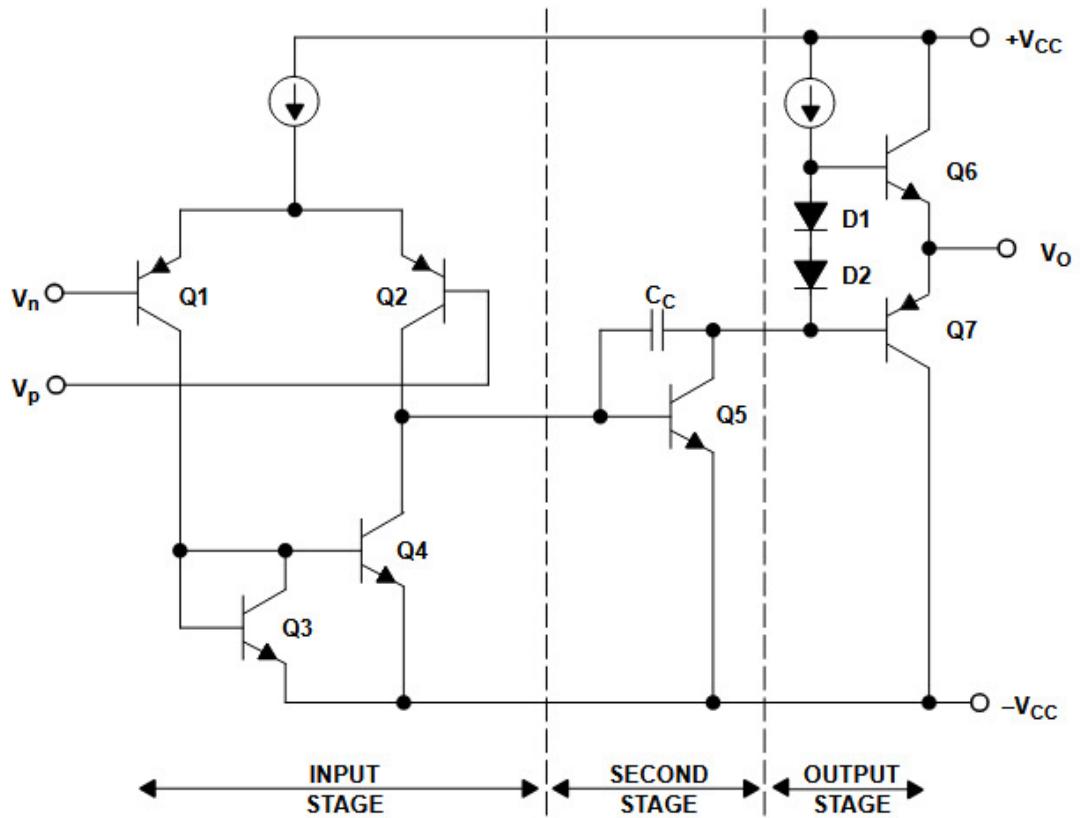
1 Realimentação Negativa: Amplificadores Operacionais

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 com realimentação negativa é representado na figura abaixo, onde A_{OL} é ganho de malha aberta (open loop) e β é o ganho do circuito de realimentação. O ganho de malha aberta é tal que $V_{out} = A_{OL}(s)V_{diff}$, onde V_{diff} é a diferença entre a tensão de entrada e a tensão realimentada. Como será mostrado abaixo, $A_{OL}(s)$ é idealmente infinito, mas em circuitos ideais seu valor depende da frequência do sinal de entrada.

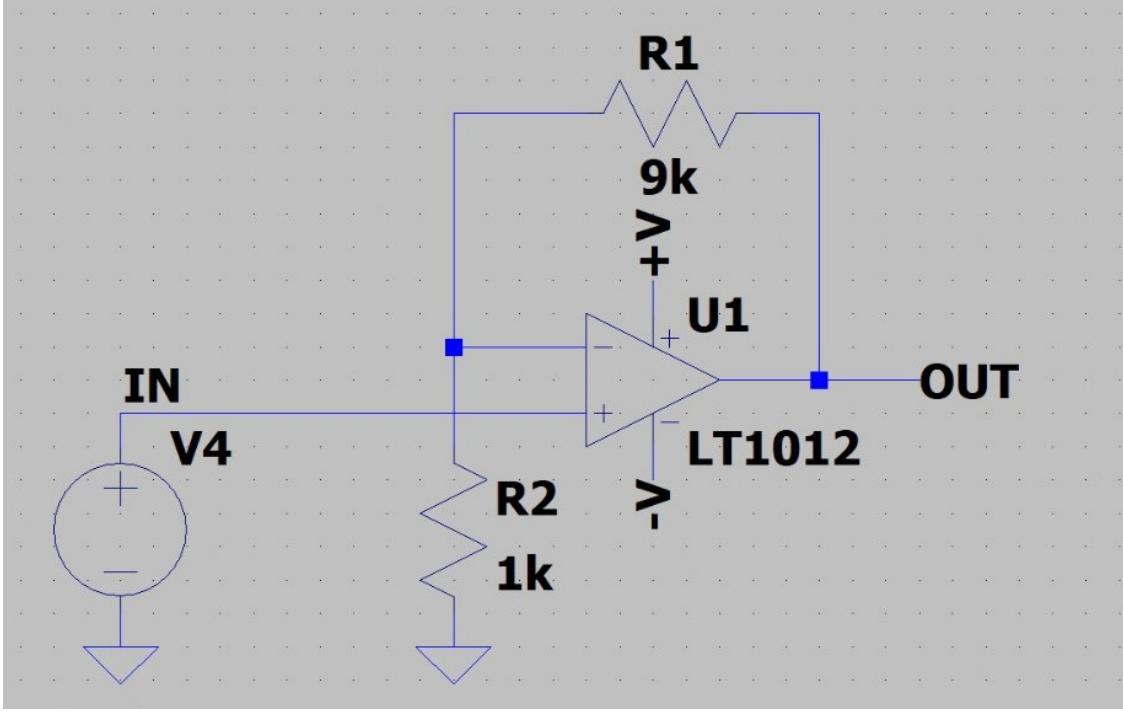


Um amplificador operacional é formado, de forma simplificada, por três estágios, como mostrado na figura abaixo(extraída de “OP AMPS for everyone”, de Bruce Carter e Ron Mancini, Newnes, 2017) :



1.1 Sensibilidade de Ganhos 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 freqüências A_{OL} 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:

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

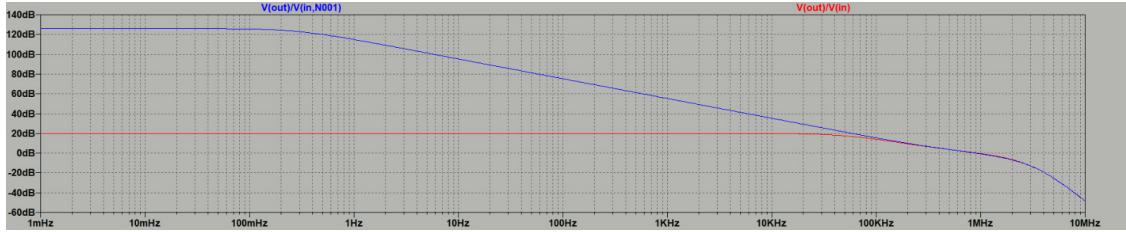
Como já foi dito, normalmente $A_{OL}(s)$ varia (diminui) com a frequência enquanto o ganho de realimentação é constante. Enquanto $A_{OL}(s)$ é grande, o produto $A_{OL}(s)\beta$ é consideravelmente maior que 1, e a expressão acima pode ser aproximada como

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

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 $A_{OL}(s)$ começa a ser reduzido em aproximadamente 20 dB por década, analogamente à 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 20 dB por década. Assim, para freqüências maiores que a freqüência de corte em malha aberta, $A_{OL}(s)$ pode ser escrita como :

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

onde A é o ganho $A_{OL}(s)$ em baixas freqüências e ω_c é a freqüência de corte em malha aberta. Na figura abaixo é mostrado o diagrama de Bode para os ganhos de malha aberta e fechada:



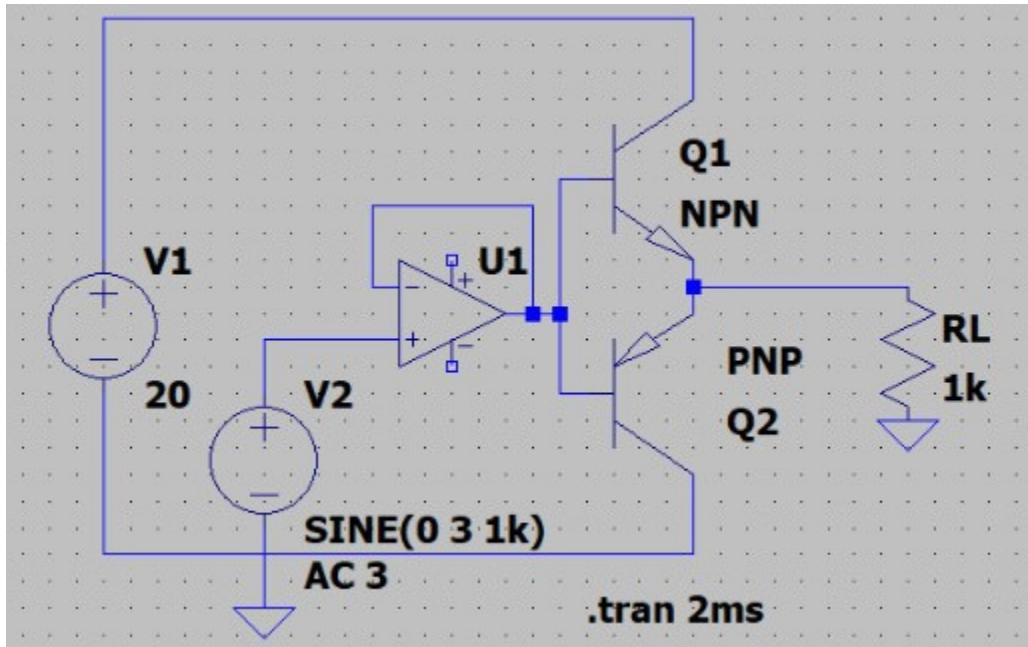
No diagrama, a linha azul é o ganho em malha aberta enquanto a linha vermelha é o ganho de malha fechada. O diagrama mostra que apesar da redução do ganho este é constante até $\omega = \omega' \approx 100\text{kHz}$, enquanto $\omega_c \approx 0,5\text{Hz}$. Verifique que $\frac{\omega'}{\omega_c} = 200 \cdot 10^3$, que é a mesma relação na qual o ganho é reduzido, isto é, $\frac{2 \cdot 10^6}{10} = 200 \cdot 10^3$. Este resultado pode ser confirmado observando que na frequência ω' podemos escrever

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

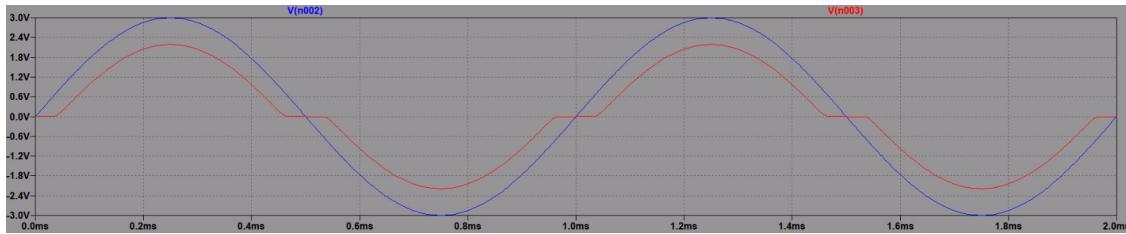
Portanto, diminuir o ganho do amplificador por um determinado fator faz com que a largura de banda aumente pelo mesmo fator. Como resultado, um dos parâmetros mais importantes em um amplificador operacional é o produto ganho x largura de banda, ou GBP na sigla em inglês, fornecido nas especificações do componente, e com o qual dada uma largura de banda desejada se encontra o ganho correspondente ou vice-versa. Finalmente, pode ser visto que um novo polo exibe uma nova frequência de corte em torno de 1 MHz, e isso é comum em amplificadores operacionais, podendo levar a instabilidade do amplificador como será mostrado no final deste *notebook*.

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:

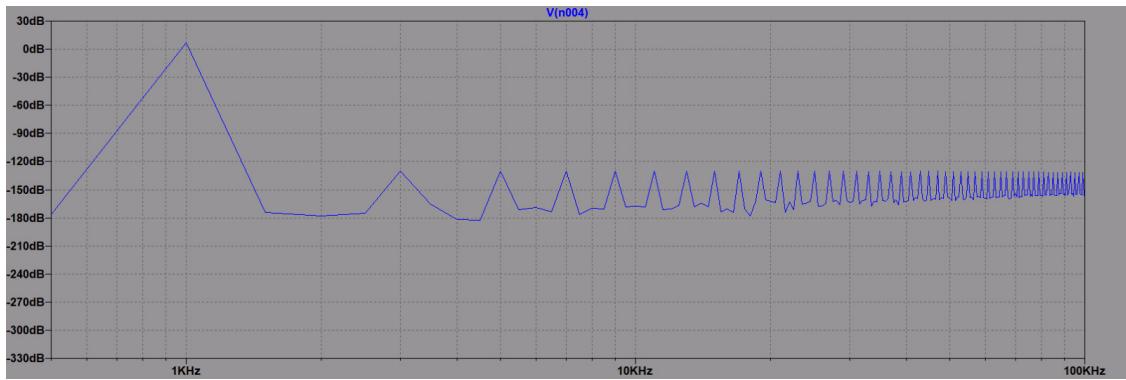


No circuito o amplificador operacional é um amplificador de ganho unitário acionando um estágio de saída classe B. Nesta classe de amplificadores, cada transístor só é acionado quando a tensão de base supera a tensão base-emissor, causando a distorção mostrada na figura abaixo.

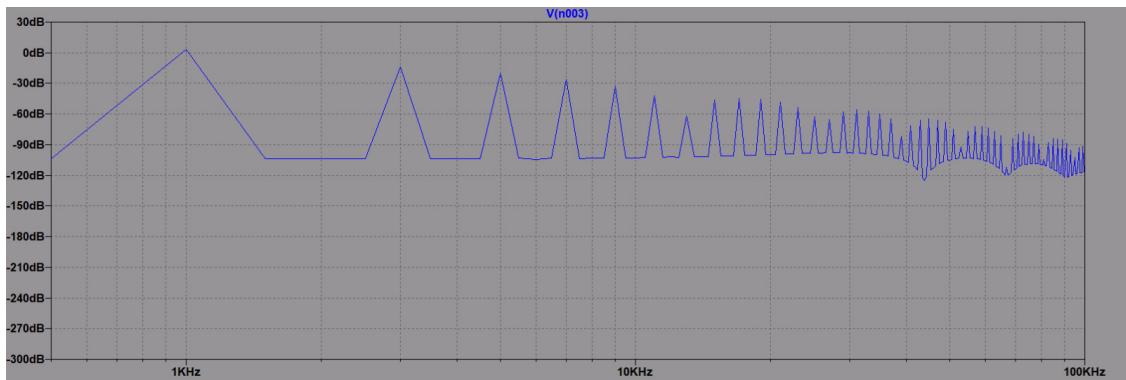


Na figura, a curva azul corresponde à tensão de entrada no circuito, enquanto a curva vermelha corresponde à tensão sobre o resistor de carga. A distorção nesta última pode ser bem apreciada comparando as transformadas de Fourier (FFT) das duas tensões:

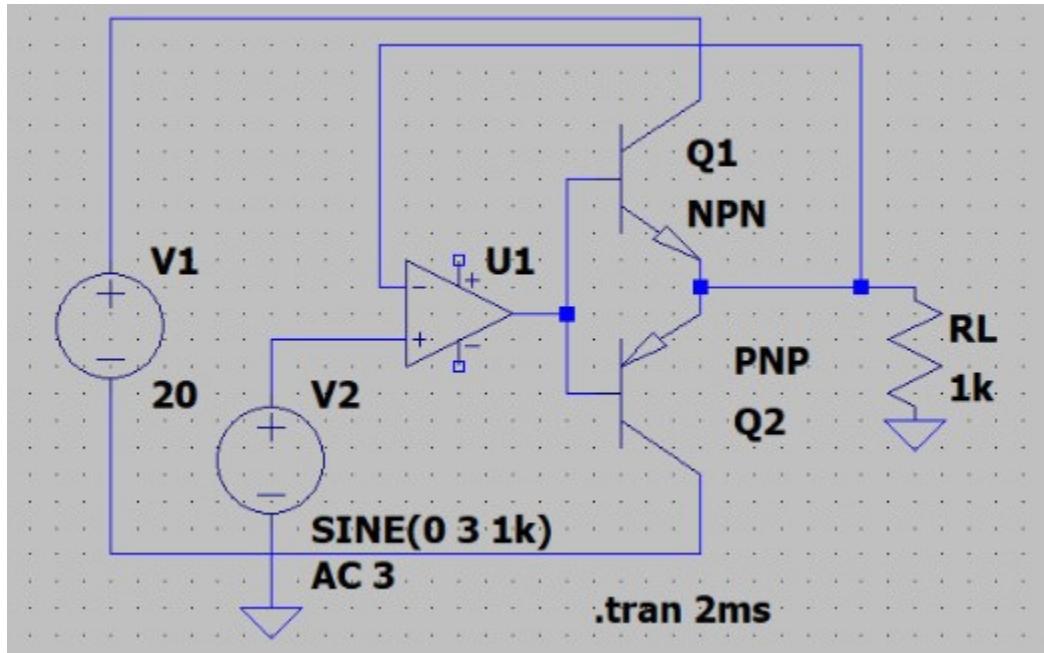
Tensão de entrada:



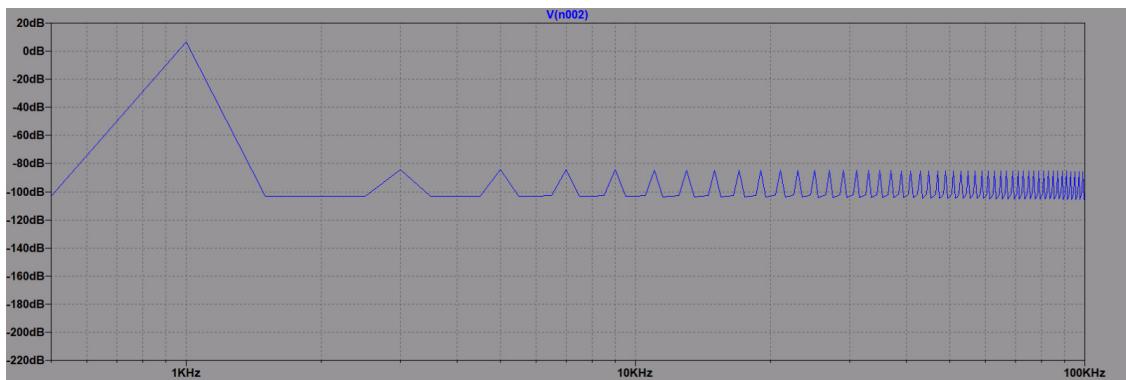
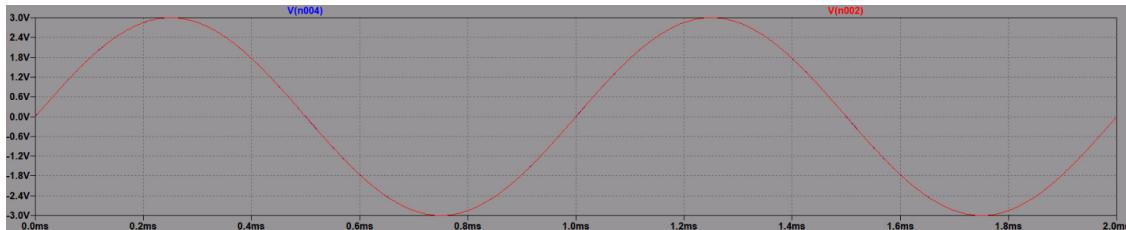
Tensão de saída:



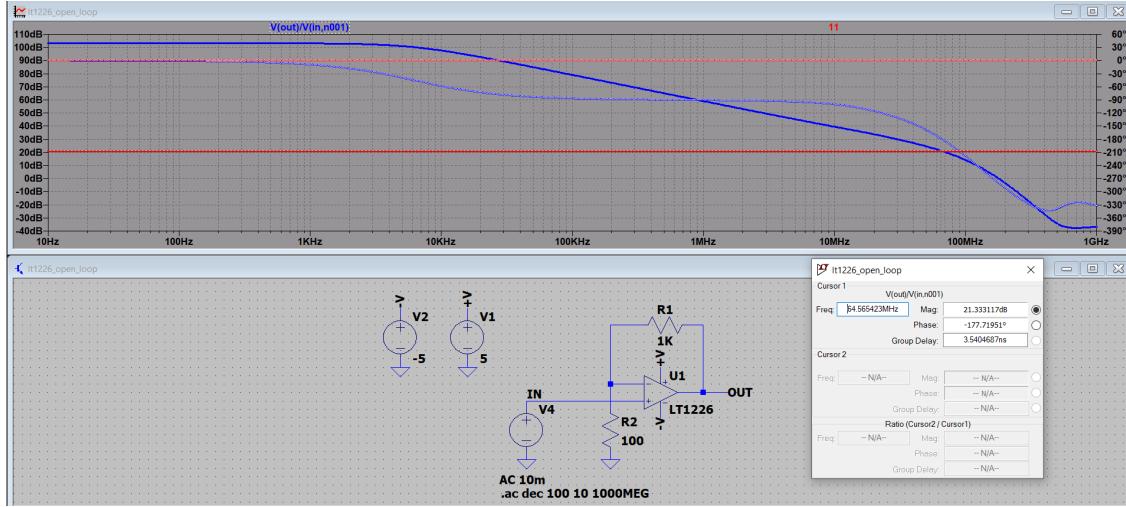
O circuito acima é modificado com a inserção de uma realimentação global:



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 entrarada. 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.



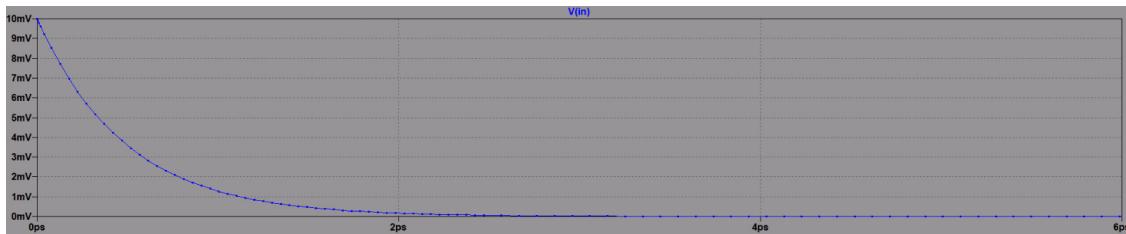
1.3 Instabilidade e Auto-Oscilação



Na figura acima vemos que O LT1226 apresenta seu primeiro ponto de inflexão em 6,5 kHz (onde a atenuação é de 20 dB por década) e um segundo em cerca de 30 MHz, onde a inclinação muda de 20 dB por década para 40 dB por década. O traçado em azul é o ganho de malha aberta A_{OL} , enquanto que a linha vermelha é uma aproximação de $\frac{1}{\beta}$ por uma reta. Dois fato são importantes nesta simulação, e podem ser vistos na figura: Na frequência de aproximadamente 65 MHz, $A_{OL}(s) = \frac{1}{\beta}$, ou seja, $A_{OL}\beta = 1$, por um lado, e por outro nesta frequência o atraso de fase de $A_{OL}(s)$ é perigosamente próximo de 180° , de forma que

$$H(s) = \frac{A_{OL}(s)}{\beta} = \infty,$$

o que significa que nesta frequência ocorrerão oscilações auto-sustentadas. Para mostrar este comportamento, considere uma excitação súbita com decaimento exponencial, semelhante à um impulso com amplitude de 10 mV, como mostrado abaixo.



A partir de 4 ps não há mais sinal de entrada no circuito. Por outro lado, analogamente ao impulso, o espectro de frequências da entrada se estende continuamente até frequências maiores que 10 GHz, excitando assim a ocorrência de oscilações em $\omega = 65$ Mhz. O resultado pode ser constatado na figura seguinte, onde a oscilação surge aparentemente sozinha, sem sinal na entrada do amplificador.

