Outra unidade que expressa de forma direta o efeito da CMRR. Pode ser obtida observando que a tensão de offset V_{CM} é expressa por:

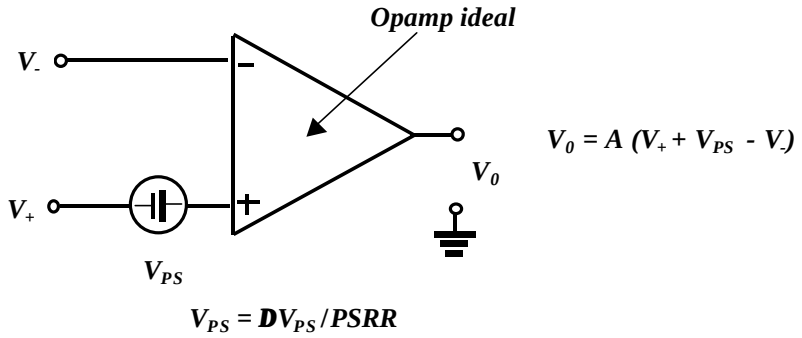
$$V_{CM} = V_C.\ 1/CMRR = V_C.CMRR^{-1}$$

Agora como $CMRR^{-1}$ é muito pequeno podemos (e adimensional) é comum expressa-lo em mV /V.

Por exemplo, um opamp com 120dB de CMR equivale a $CMRR = 10^6$, portanto $CMRR^{-1} = 10^{-6}$ =1mV/V, o que significa dizer que uma tensão de offset (V_{CM}) de 1uV aparece na entrada não inversora para cada volts de tensão de modo comum..

- ***Razão de Rejeição a Fonte de Potência (PSRR)***

Outra característica não tão menos importantes de um amplificador operacional, é a sua capacidade de ser insensível às variações da fonte de alimentação. A esta capacidade damos o nome de Razão de Rejeição a Fonte de Potência ou de alimentação (PSRR, do inglês). O efeito da variação da fonte de alimentação é de introduzir uma tensão de offset (chamaremos de V_{PS}) na entrada não inversora do opamp. A figura abaixo mostra o modelo do opamp para PSRR.



Modelo do opamp para PSRR

A Razão de rejeição a fonte de potência é expressa por

$$PSRR = V_{PS} / DV_{PS} \qquad (407)$$

onde

DV_{PS} = é variação na fonte de alimentação e V_{PS} é a tensão de offset introduzida.

Como PSRR é muito elevado este também pode ser expresso em termos de logarítmico e chamado Rejeição a fonte (PSR, do inglês) como

$$PSR(dB) = 20 \log PSRR \qquad (408)$$

Ou, de forma análoga a CMRR, a unidade de $PSRR^{-1}$ *que expressa de forma direta o efeito de PSRR em mV/V (*$PSRR^{-1}$*). Assim da expressão (407)*

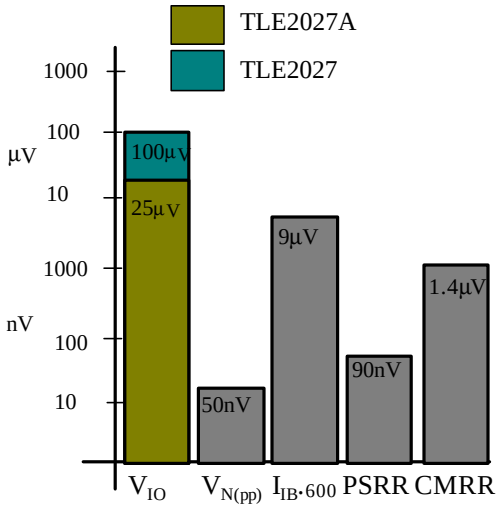
$$V_{PS} = DV_{PS} / PSRR = DV_{PS} . PSRR^{-1}$$

Por exemplo, ,um opamp com 100dB de PSR equivale a PSRR = 10^5*, portanto* $CMRR^{-1} = 10^{-=5}$ *=10mV/V, o que significa dizer que uma tensão de offset (*V_{PS}*) de 10uV aparece na entrada não inversora para cada volts de variação na fonte de alimentação .*

Para se ter uma noção do estado da arte em amplificadores de precisão para aplicação DC, a figura abaixo mostra os erros de um amplificador operacional de precisão fabricado pela Texas Instruments.

Amplificador de Precisão
TLE2027 (TEXAS)

- **Voltagem de Offset**
  TLE2027A.....25µV máx
  TLE2027 .....100µV máx
- **Ganho de malha aberta**
  45 V/µV ou 153 dB
- **Voltagem de ruído**
  3.3 nV/√Hz @ 10 Hz
  2.5 nV/√Hz @ 1 kHz
- **Produto Ganho Banda**
  15 Mhz
- **Corrente de Bias**
  Cancelamento de correntes de bias
  típica 15 nA



Obs: PSRR medido com 10% sobre ± 15V
CMRR medido com volt. de modo comum igual à 5 V

O Amplificador de precisão TLE2027

- ***Slew Rate (taxa de subida ou descida)***

Esta característica reflete a capacidade do opamp operar com grandes variações de sinal. Esta pode ser definida como

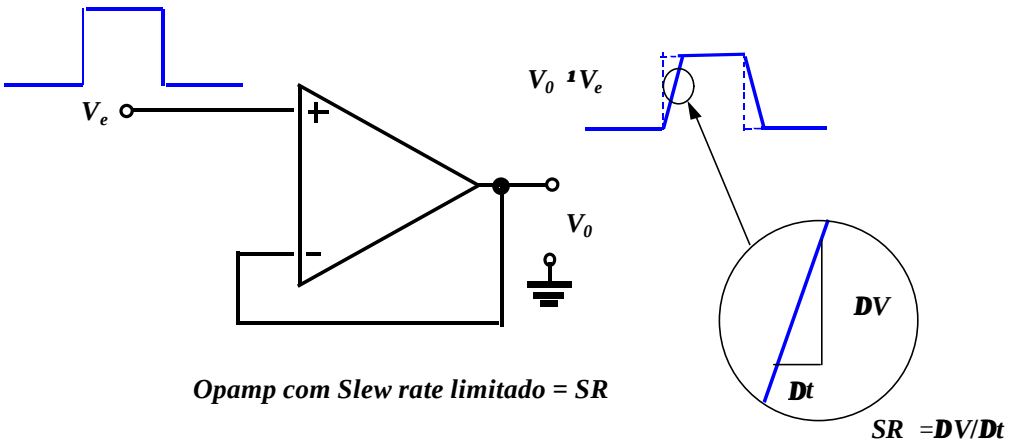
Slew Rate (SR) ≡ máxima taxa na qual a saída do opamp pode variar, normalmente dada em volts por micro segundo (V/ms)

$$SR = DV/Dt \quad (V//ms) \text{ com } t \text{ dado em } ms$$

O Slew rate fornece um parâmetro que especifica a máxima taxa de variação de tensão de saída quando é aplicado um sinal de grande amplitude na na forma de degrau . Normalmente o SR+ (taxa de subida) e igual ao SR- (taxa de descida).

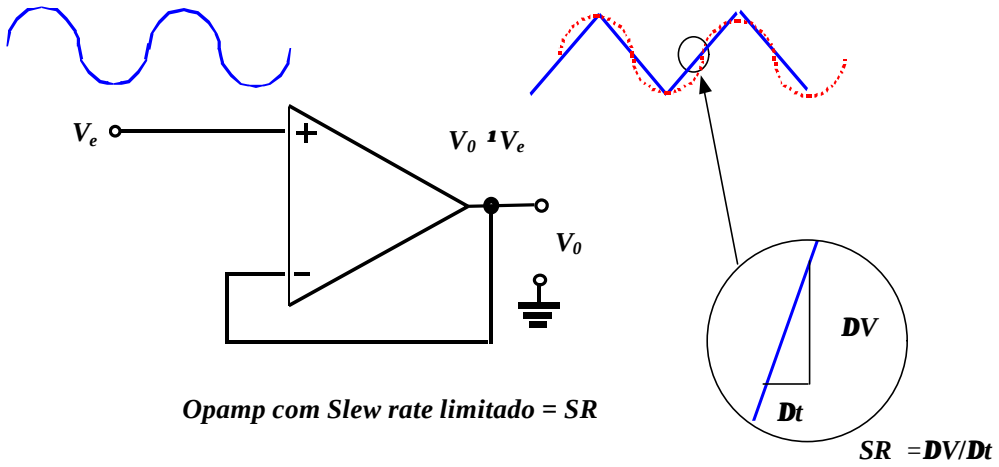
Se um sinal de entrada for aplicado em um "buffer" por exemplo, tiver uma taxa de variação maior que o SR do opamp, a saída não será capaz de variar suficientemente rápido, resultando em um sinal ceifado ou distorcido. De qualquer forma a saída não manterá inalterada a forma de onda do sinal de entrada.

A figura abaixo mostra o efeito do SR finito em um "buffer" para um sinal de entrada com forma de onda quadrada.



Efeito do Slew rate numa forma de onda quadrada .

A figura abaixo mostra o efeito do SR finito em um "buffer" para um sinal de entrada senoidal.



Efeito do Slew rate numa forma senoidal .

Note que para fortes limitações a senóide na saída do opamp transforma-se numa forma de onda triangular.

Exemplo 1:

Para um opamp coma Slew rate de 2V/ms, qual é o máximo ganho de tensão de malha fechada que pode ser usado quando o sinal de entrada varia 0,5V em 10ms.

Solução:

Como

$V_0 = A_v V_i$ *, podemos usar*

$DV_0/Dt = A_v DV_i/Dt$

Portanto

$A_v = DV_0/Dt \,/\, DV_i/Dt = SR\,/DV_i/Dt = 2V/ms/0{,}5V/10ms = \mathbf{40}$

A máxima freqüência de sinal que um opamp pode operar depende da banda passante (como veremos adiante) e também do Slew rate. Para um sinal senoidal da forma

$V_0 = Ksen(2pft)$

A máxima taxa de variação é encontrada derivando a expressão acima, assim

$dV_0 /dt = K2pfcos(2pft)$

$D V_0 /D t \big|_{max} = dV_0 /dt \big|_{max} = K2pf$

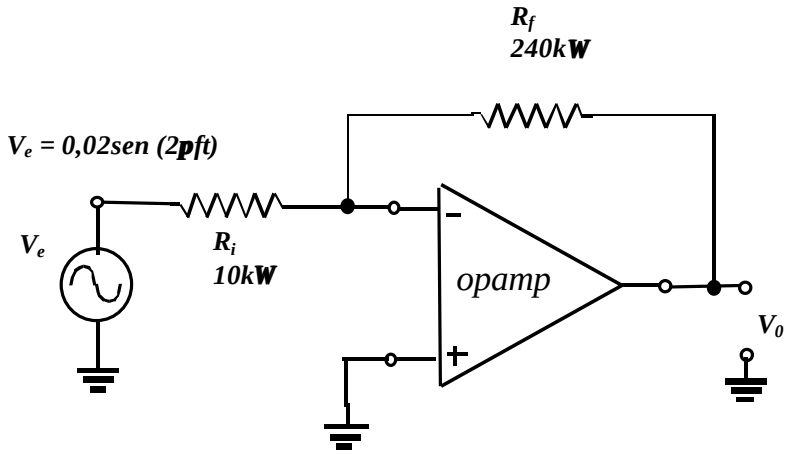
Para evitar distorções na saída, esta taxa deve ser menor ou igual que o Slew rate do opamp. Isto é,

$K2pf \leq SR$ *portanto*

$f \leq SR/ 2p K$

Exemplo 2:

Para o sinal e circuito da figura abaixo, determine a máxima freqüência que pode ser usada, a fim de evitar distorções. O SR do opamp é igual a 0,5V/ms.



Circuito inversor - opamp com SR limtado

Solução:

Para um ganho de tensão

$A_v = - R_f/R_i = 240kW/10kW = 24$

A tensão de saída é igual

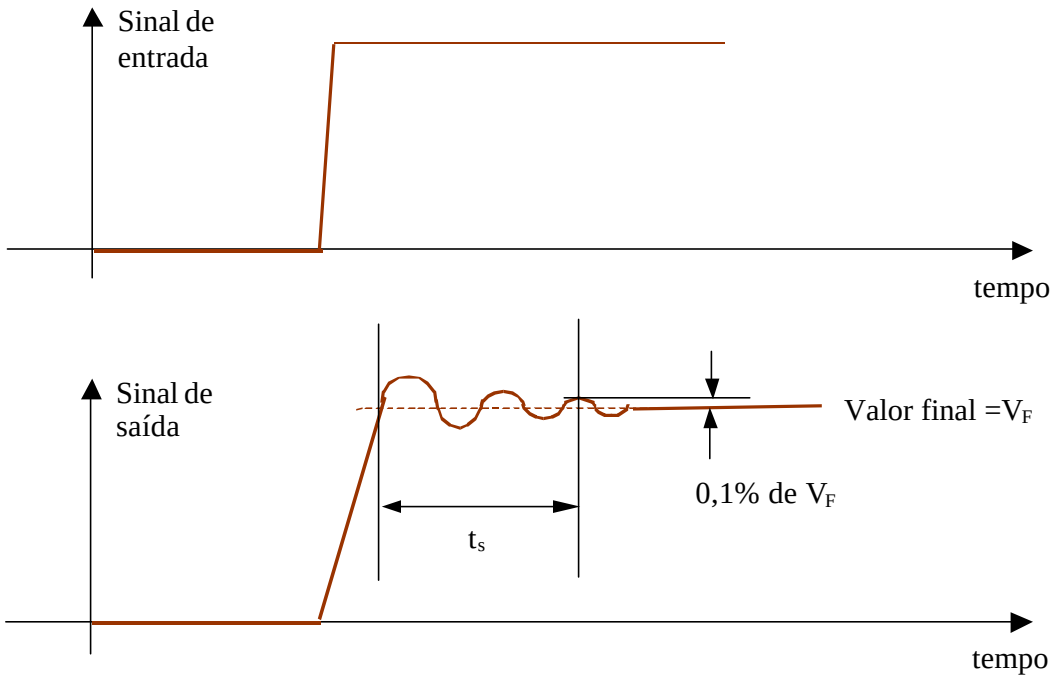
$V_0 = A_v V_e = 24 V_e = 0,48sen (2pft)$

Portanto K = 0,48V e

f £ SR/ 2p K = 0,5V/ms/2p(0,48) » ***165kHz***

- ***Settling time (tempo de acomodação)***

A característica "Settling time" (tempo de acomodação), t_s de um amplificador operacional, é o tempo necessário para o opamp atingir o valor final de tensão após uma mudança abrupta do sinal de entrada. Normalmente, uma precisão de 0,1% é utilizada para indicar a tolerância no valor final. A figura abaixo mostra graficamente a definição do tempo de acomodação.



Tempo de acomodação (Settling time)

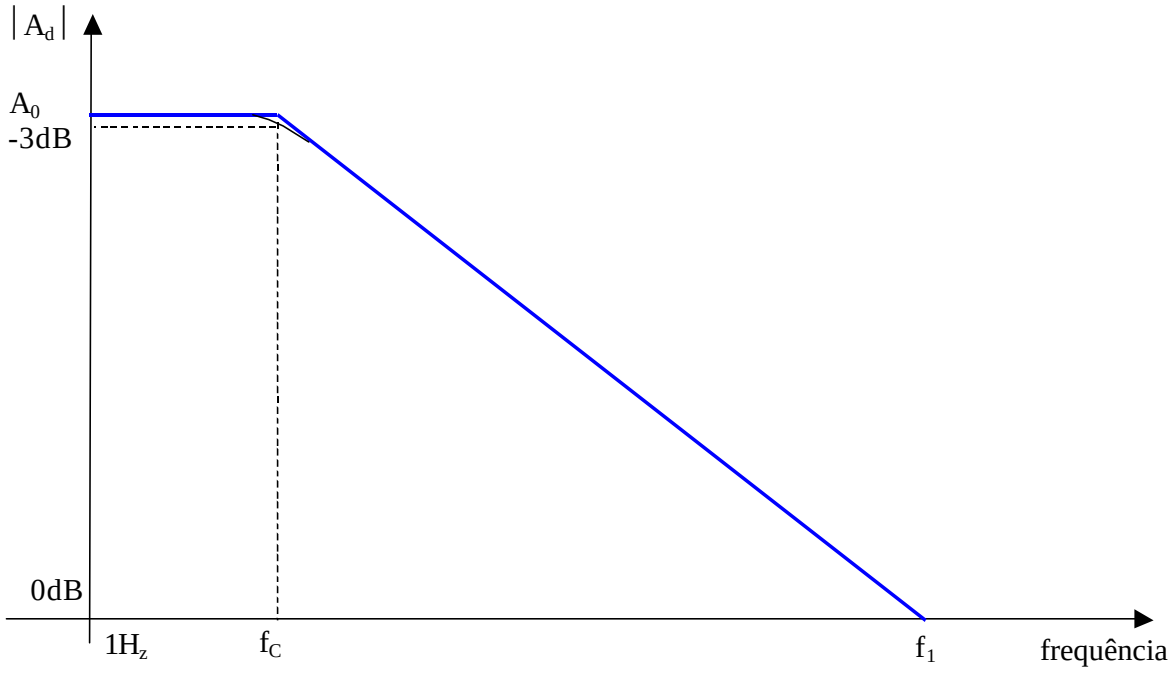
O tempo de acomodação do opamp é influenciado por cargas capacitivas, de maneira que o fabricante fornece este parâmetro e especifica para que carga capacitiva este tempo foi medido.

O tempo de acomodação é muito importante em sistemas de aquisição de sinais onde o conversor AD (análogo-digital) que converte o sinal analógico em digital recebe o sinal analógico de um amplificador deve fazer esta conversão com o sinal estabilizado para não introduzir erros na conversão.

- ***Produto ganho banda***

Um opamp é projetado é para ser um amplificador de alto ganho, com ampla faixa ou banda de freqüência. Esta combinação tende a ser instável (oscilar) devido aos efeitos de realimentação. Para que seja assegurada uma operação estável, a grande parte dos opamp's são construídos com circuitos de compensação interna de freqüência que pode reduzir o ganho de malha aberta do com o aumento de freqüência. Esta redução no ganho é chamada de "roll-off". Na grande maioria dos opamp's o roll-off ocorre numa taxa de –20dB/década ou –6dB/oitava. (o que caracteriza um filtro passa-baixas com um simples pólo).

Devido aos circuitos de compensação interna de freqüência, o ganho de malha aberta (diferencial)de um opamp normalmente pode ser representado pelo gráfico da figura abaixo.



Ganho versus freqüência de um opamp típico

Quando a freqüência aumenta o ganho diminui, até finalmente atingir o valor de 1 (unitário). A freqüência neste de ganho unitário é especificada pelo fabricante como produto ganho-banda já que nesta freqüência o produto ganho (=1) vezes a freqüência f_1 = o valor de f_1.

Um ganho de malha aberta (diferencial) descrito como o gráfico acima pode ser expresso pela equação

$$A_d = A_0/(1+jf/f_C) \qquad (409)$$

Onde

A_0 é ganho de malha aberta em baixas freqüências (próximo de DC) e f_C é a freqüência de corte (-3dB) do opamp.

Para altas freqüências a equação (409) pode ser bem aproximada por:

$$A_d \gg A_0 f_C/jf$$

e o seu módulo

$$|A_d| \gg A_0 f_C/f$$

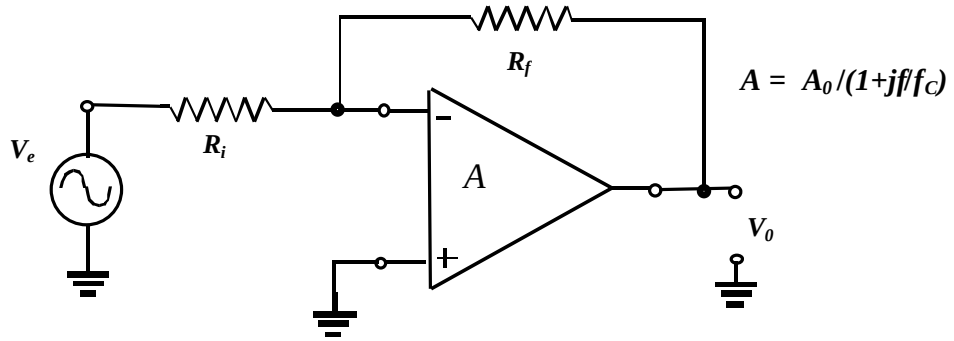
quando $|A_d|=1$, então

$$A_0 f_C/f_1 = 1 \Rightarrow f_1 = A_0 f_C$$

Note que o produto ganho-banda (f_1) é igual à área do retângulo de lados A_0 e f_C

Exemplo 3:

Mostre que o produto ganho x banda do amplificador inversor mostrador é praticamente constante para altos valores do ganho de malha fechada (A_v).



Solução:

De análise anteriores temos, que o ganho do amplificado inversor quando o ganho de malha aberta do opamp é considerado é dado por:

$$A_v = V_0 / V_e = -R_f/R_i \; 1/[1 + 1/A + R_f/R_i A]$$

Admitindo que a freqüência de corte do amplificador inversor é muito maior que a freqüência de corte do opamp, substituímos a expressão de A para alta frequência na equação acima, assim

$$A_v = -R_f/R_i \; 1/[1 + jf/A_0 f_C + R_f/R_i \, jf/A_0 f_C]$$

$$A_v = -R_f/R_i \; 1/\{1 + jf[1 + R_f/R_i \, jf/]A_0 f_C\}$$

$$A_v = -R_f/R_i \; 1//[1 + jf/f'_C]$$

onde

$$f'_C = [1 + R_f/R_i]^{-1} A_0 f_C = [1 + R_f/R_i]^{-1} f_1$$

se o ganho de malha fechada for elevado ($A_v = -R_f/R_i >> 1$)

$$f'_C \approx f_1 / |A_v| \qquad (410)$$

Isto é,

A freqüência de corte do amplificado inversor é igual ao produto ganho banda do opamp dividido pelo ganho de malha fechada (em módulo) .

Além disso, a expressão (410) mostra que o produto ganho x banda ($f'_C \; x \; |A_v|$) *do amplificado inverso é aproximadamente constante e igual ao produto ganho banda do opamp* (f_1).

A figura abaixo mostra o gráfico dos diversos ganhos em função da freqüência. Note que a área do retângulo praticamente não muda.

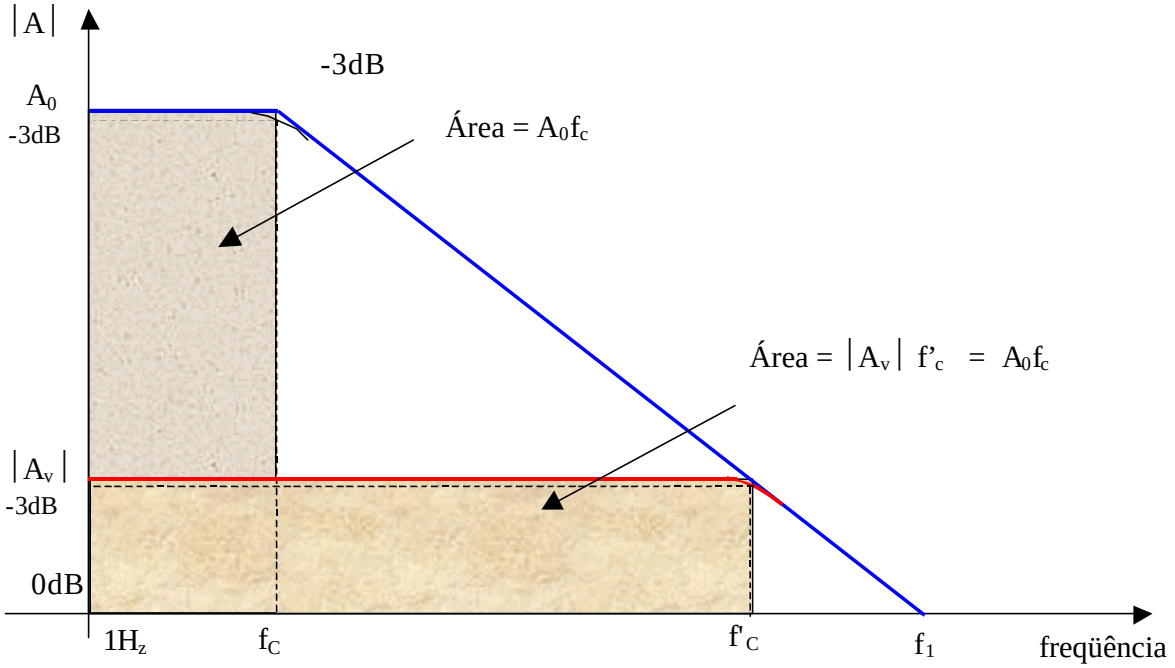


Gráfico produto ganho banda constante