

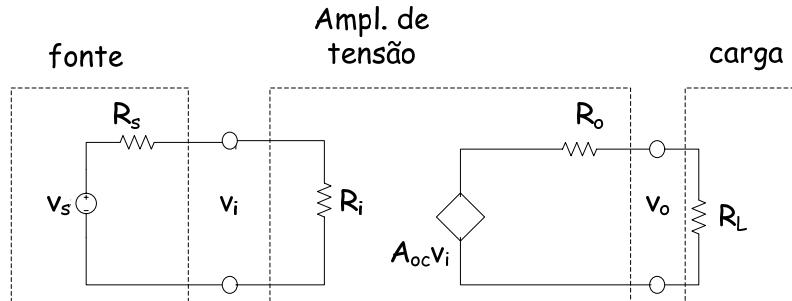
Amplificadores operacionais

O termo amplificador operacional designou, inicialmente, um tipo de amplificador que, mediante a escolha adequada de componentes do circuito em que era inserido, podia desempenhar uma série de operações tais como amplificação (multiplicação), adição, subtração, diferenciação e integração. A primeira aplicação dos amplificadores operacionais foi, por isso, em computadores analógicos.

Os primeiros protótipos de amplificadores operacionais (AmpOp) eram tubos de vácuo pelo que gastavam muita energia, eram grandes e caros. A primeira miniaturização surgiu com o transístor bipolar de junção e levou ao uso mais generalizado dos AmpOps. No entanto o seu uso correto só ocorreu com o aparecimento dos circuitos integrados, na década de 60.

Um amplificador é um dispositivo com uma entrada e uma saída. A saída está relacionada com a entrada através da equação: *saída = entrada x ganho* em que o ganho é uma constante de proporcionalidade. Por este facto também é designado por amplificador linear.

O modelo mais comum é o amplificador de tensão no qual a entrada e a saída são sinais de tensão. Quer a entrada quer a saída podem ser substituídas pelo circuito equivalente de Thévenin, ou seja, um gerador de tensão em série com uma resistência. A entrada desempenha normalmente um papel passivo de modo que o seu equivalente é apenas uma resistência que designamos por R_i e que designamos por resistência de entrada do amplificador. A saída será uma fonte de tensão V_o controlada pela tensão de entrada V_i em série com uma resistência R_o , designada por resistência de saída. A_{oc} na figura é o ganho em tensão e exprime-se em volts/volt. A fonte também é substituída pelo gerador de Thévenin com V_s e R_s ; a carga à saída também desempenha um papel passivo e é substituída por uma resistência R_L .



Modelo do amplificador de tensão

$$\text{Vejamos uma expressão para } V_0 \text{ em função de } V_s. V_0 = \frac{R_L}{R_o + R_L} A_{oc} V_i$$

Notar que se $R_L = \infty$ então $V_0 = A_{oc} V_i$ por isso A_{oc} designa-se por ganho em malha aberta (open loop gain).

$$\text{Em termos de } V_s \text{ temos } V_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} V_s \text{ e } \frac{V_o}{V_s} = \frac{R_L}{R_i + R_s} A_{oc} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

À medida que o sinal progride da fonte para a carga sofre primeiro uma atenuação na entrada, depois é amplificado de A_{oc} dentro do amplificador e depois de novo atenuado à saída. Estas atenuações são normalmente designadas por "carga". Constituem um efeito indesejável na medida em que tornam o ganho dependente da fonte e da carga de saída, para além de implicarem uma redução no ganho. A origem do efeito deriva do facto de quando o amplificador está ligado à fonte, R_i recebe corrente e gera uma queda de tensão em R_s . É este valor que é subtraído a V_s , levando a V_i . Igualmente à saída a amplitude de V_o é inferior a $A_{oc} V_i$ pela queda de tensão em R_o .

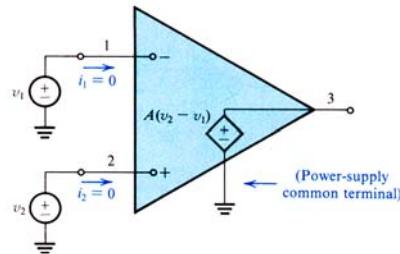
Se se eliminasse o efeito da carga então teríamos $\frac{V_o}{V_s} = A_{oc}$ independentemente da fonte e da carga à saída. Para chegar a esta condição as quedas de tensão em R_s e R_o deviam ser 0 independentemente de R_s e R_L . A única forma de obter este efeito é exigindo que $R_i = \infty$ e $R_o = 0$. Embora estas condições não sejam, obviamente exequíveis, são consideradas realizadas desde que $R_i \gg R_s$ e $R_o \ll R_L$. Para tal utilizam-se circuitos com realimentação (ver secções seguintes).

Outro tipo de amplificador de uso comum é o amplificador de corrente. Neste caso o equivalente de Thévenin é substituído pelo equivalente de Norton fala-se de ganho em corrente em vez de ganho em tensão.

O Amplificador Operacional

O amplificador operacional é um amplificador de tensão com ganho muito elevado. Um exemplo típico é o amplificador do circuito integrado 741 que tem um ganho de 200000V/V. Há ganhos superiores a este.

As entradas designadas por + e - são respectivamente a entrada não inversora e inversora. V_{cc} e V_{EE} são as alimentações e são normalmente + e - 15V. $V_d (=V_p-V_n)$ é a tensão diferencial de entrada. E o ganho α é o ganho em malha aberta $V_o=\alpha V_d=\alpha(V_p-V_n)$.



O ampop ideal

Amplificador operacional ideal

Para minimizar a carga um amplificador de corrente bem desenhado não deve receber corrente da fonte e deve apresentar uma resistência ~ 0 à saída. Para todos os amplificadores operacionais (e não só para o amplificadores de tensão) se passa o mesmo, e portanto define-se o ampop ideal como um amplificador de tensão ideal com ganho de malha aberta ∞ . As condições são então: $r_d=\infty$, $r_o=0$, $i_p=i_N=0$ em que i_p e i_N são as correntes que entram nas entradas não inversora e inversora.

Chama-se a atenção para o facto de $a=\infty$ implicar $v_d=v_0/\infty$, ie ~ 0 . Então como pode um amplificador com entrada 0 ter saída $\neq 0$? À medida que a se aproxima de ∞ v_d aproxima-se de 0 mas de modo a que o produto $av_d \neq 0$. Os modelos reais dos ampops afastam-se ligeiramente do modelo ideal, como seria de esperar.

O ampop ideal pode ser analisado como um componente com três zonas de operação distintas: *zona de saturação negativa*, *zona linear*, *zona de saturação positiva*.

A zona linear é a mais usada. Na zona linear a tensão no terminal de saída do ampop é proporcional à diferença de potencial entre os seus terminais de entrada, com uma constante de proporcionalidade (ganho) - aqui definida como a - de valor elevado. Sendo assim, nesta zona de funcionamento, a diferença de tensão entre os terminais de entrada é muito pequena, por ser inversamente proporcional a a . Daqui resulta a simplificação na análise do seu comportamento de considerar que v é aproximadamente igual a v .

$$V_0 = a(V_+ - V_-) \quad \Rightarrow \quad V_+ \approx V_- \quad (\text{considerando que o ganho } a \text{ é muito elevado})$$

As zonas de saturação negativa e positiva correspondem às situações em que a tensão no terminal de saída é limitada pelas tensões de alimentação inferior e superior do ampop. Quer isso se deva ao facto de o amplificador não estar realimentado ou estar realimentado positivamente, quer seja consequência de a tensão de saída tentar superar os extremos de alimentação do circuito (aqui definidos com V_{dd} e V_{ss}), saindo portanto da zona de operação linear. Nestas duas zonas será válida uma das seguintes expressões:

$$V_0 \approx V_{dd} \iff V_+ > V_-$$

$$V_0 \approx V_{ss} \iff V_+ < V_-$$

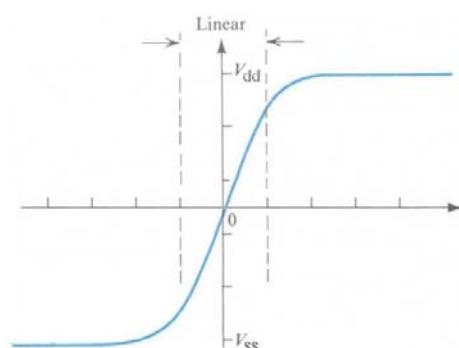
Equações do AmpOp Ideal

$$I_+ \approx I_- \approx 0 \quad \iff \text{zona linear ou saturação}$$

$$V_0 = a(V_+ - V_-) \iff V_+ \approx V_- \iff \text{zona linear}$$

$$V_0 \approx V_{dd} \iff V_+ > V_-$$

$$V_0 \approx V_{ss} \iff V_+ < V_-$$



Realimentação negativa

Na realimentação podemos considerar os seguintes blocos

1. amplificador (com ganho a) que recebe um sinal e produz uma saída.
2. a malha de realimentação que produz o sinal que vai ser realimentado $x_f = \beta x_o$ em que β é o ganho da malha de realimentação
3. Uma malha de adição que gera a diferença $x_d = x_i - x_f$. Designa-se por realimentação negativa porque parte (β) do sinal de saída é subtraída do sinal de entrada. Se fosse somada a realimentação seria **positiva**.

Eliminando x_f e x_d das eq. acima fica $A = x_o/x_i = a/(1+a\beta)$ e A é o ganho em malha fechada do circuito. A será, portanto, menor do que $a(1+\alpha\beta)$ que se designa por quantidade de feedback.

À medida que o sinal se propaga na malha (amplificador+realimentação, etc) sofre um ganho total de $\alpha\beta(-1)$ ou $-\alpha\beta$. É um valor negativo que se designa por ganho do circuito, $T = \alpha\beta$. Quando $T \rightarrow \infty$ fica $A_{ideal} = 1/\beta$ ie A torna-se independente de a e é fixado apenas pela malha de realimentação. A escolha das componentes do circuito permitem adequar o circuito a uma grande variedade de situações.

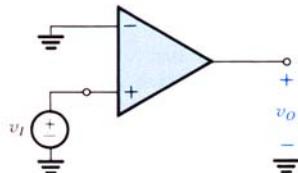
Um problema que se põe é saber como é que as variações no ganho de malha aberta, a , não afectar o ganho de malha fechada A . Derivando a equação $A = a/(1+a\beta)$ em ordem a a teremos que $dA/da = 1/(1+T)da/a$. Ou seja $100\Delta A/A = [1/(1+T)](100\Delta a/a)$ i.e. o efeito de uma variação percentual de a em A é reduzido de um factor $(1+T)$. Se T for suficientemente grande uma variação (ainda que significativa) em a , causará uma variação insignificante em A .

Então, torna-se óbvio que a realimentação torna o ganho do circuito A insensível a variação de a e $(1+T)$ é o factor de des-sensibilização do ganho. Esta estabilização de A é extremamente importante, dadas as flutuações de a com a temperatura, etc. Um raciocínio análogo leva à conclusão de que a realimentação não estabiliza A relativamente a β (a quantidade de realimentação) daí que seja importante a preocupação com a qualidade das componentes na malha de realimentação.

Montagens Típicas

De seguida apresentam-se os circuitos típicos que utilizam ampops.

O amplop usado como comparador



Círcuito comparador com amplop

A aplicação mais simples do amplop é na realização de um circuito comparador como o apresentado na figura anterior. Consiste em ligar um dos terminais a um nível de referência e o outro terminal ao sinal a analisar. Neste exemplo, o terminal v_- do amplop é ligado à terra e o terminal v_+ é ligado a uma fonte de sinal sinusoidal. Como acontece nos demais circuitos sem realimentação, o amplop opera na zona não linear (saturação). Neste caso, para valores de v_+ inferiores a 0 V, a diferença de potencial ($v_+ - v_-$) à entrada é negativa pelo que o dispositivo satura negativamente. Reciprocamente, para valores de v_+ superiores a 0 V, a diferença de potencial à entrada ($v_+ - v_-$) é positiva e o dispositivo satura positivamente. Tipicamente este circuito é usado para comparar dois sinais (ou níveis de tensão) e gerar um bit com a informação correspondente à ordem relativa dos valores de tensão dos sinais (e.g. High - A maior que B, Low - A menor que B).

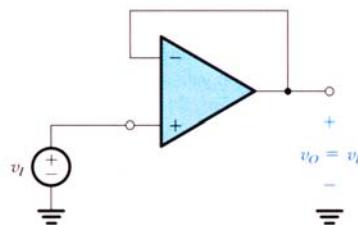
Montagens realimentadas negativamente

As montagens em que o amplop está realimentado negativamente são as mais comuns. Em circuitos não diferenciais, é usual o terminal v_+ estar ligado à terra pelo que, devido ao ganho elevado do amplop, v_+ tem um potencial próximo de 0 V. Nesta situação é comum referir o terminal v_- como *terra virtual*, dado que, embora não esteja ligado à massa (como acontece com v_+) a sua tensão é aproximadamente 0 V. Algumas montagens com funções lineares genéricas como somar, subtrair e amplificar (i.e. multiplicar por um

ganho) podem ser realizadas à custa de circuitos simples com um ampop e algumas resistências.

Montagem seguidora

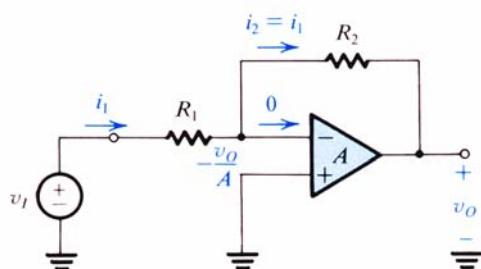
O circuito seguidor representado na figura seguinte é um circuito simples e prático. É composto apenas por um ampop em que a saída está ligada ao terminal v_- . Facilmente se deduz que a tensão de saída, que é igual a v_- , acompanha a tensão no terminal v_+ desde que não sejam atingidas as tensões de alimentação do ampop (caso em que o dispositivo entra na zona de saturação). Assim temos que $v_o = v_- = v_+ = v_i$.



Montagem seguidora de tensão

Esta montagem tem como principal função tirar partido da alta impedância de entrada (e/ou baixa impedância de saída) do ampop de modo a isolar electricamente dois blocos de circuito independentes ligados. É vulgarmente usada como bloco de saída de variados circuitos eléctricos ou como *circuito tampão/interface* entre dois circuitos.

Montagem de inversor com ganho



Montagem de inversor com ganho

Esta montagem é usada para amplificar um sinal. O sinal de entrada é multiplicado por um ganho (negativo), pelo que a polaridade é invertida. O circuito é composto por um ampop em que a saída está ligada ao terminal v_- através da resistência de realimentação R_2 .

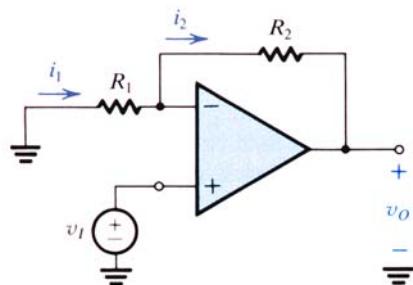
Facilmente se deduz que a tensão de saída é igual à tensão de entrada multiplicada pela razão $-R_2/R_1$. O terminal v_- tem uma tensão muito baixa (tipicamente desprezável) cujo valor será $-v_o/a$, e pode ser considerada uma massa virtual. Desde que a tensão de saída não atinja as tensões de alimentação, o amplop está na zona linear, e são válidas as seguintes equações:

$$v_- \approx v_+ \approx 0V$$

$$i_1 = \frac{v_i}{R_1} \quad i_1 = i_2 = -\frac{v_o}{R_2}$$

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_i$$

Montagem de não inversor com ganho



Montagem de não inversor com ganho

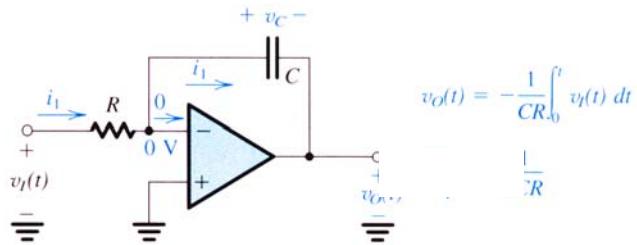
Esta montagem é semelhante à montagem anterior, no entanto, o sinal de entrada é neste caso multiplicado por um ganho positivo, pelo que a polaridade não é invertida. O terminal v_- acompanha a tensão de entrada v_i , pelo que facilmente se deduz que a tensão de saída é igual à tensão de entrada multiplicada pela razão $(R_2+R_1)/R_1$. Assim, desde que a tensão de saída não atinja as tensões de alimentação, são válidas as seguintes equações:

$$v_- \approx v_+ \approx v_i$$

$$i_1 = -\frac{v_i}{R_1} \quad i_1 = i_2 = \frac{v_i - v_o}{R_2}$$

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v_i$$

Circuito Integrador



Círculo integrador

O circuito integrador é um bloco fundamental na implementação de filtros. Esta montagem pode ser analisada de um modo muito simples se for comparada com a montagem inversora. Assim, substituindo R_2 pela impedância equivalente do condensador C podemos rapidamente chegar à fórmula final dada por:

$$v_- \approx v_+ \approx 0V$$

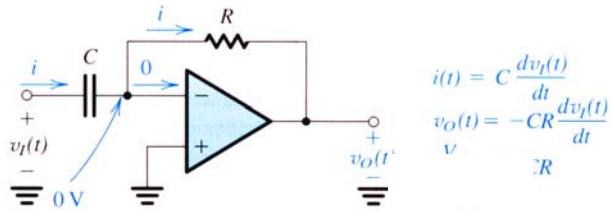
$$i_1 = \frac{v_I}{R} \quad i_1 = i_2 = -\frac{v_O}{Z_C}$$

$$v_O = -\frac{1}{RC} \int v_I dt$$

(É claro que teremos que $v_1 = Ri_1$ e $v_o = q/C$ com $i = dq/dt$. Como $i_1 = i_2$ e $dv_o/dt = i_2/C$ ou $i_2 = Cdv_o/dt$, então $v_1/R = Cdv_o/dt$ de onde $v_O = -\frac{1}{RC} \int v_I dt$.)

Deste modo, a tensão de saída é proporcional ao integral da tensão de entrada. O ganho do integrador é $-1/RC$, pelo que a saída será simétrica ao sinal de entrada integrado no tempo.

Círcuito Diferenciador



Círcuito diferenciador

O circuito diferenciador também é usado na implementação de filtros RC. O circuito pode igualmente ser analisado como uma montagem inversora em que R_1 é substituindo pela impedância equivalente do condensador C , pelo que:

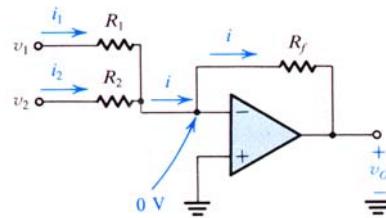
$$V_- \approx V_+ \approx 0V$$

$$i_1 = \frac{v_i}{Z_C} : \quad i_1 = i_2 = -\frac{v_o}{R}$$

$$v_o = -RC \frac{dv_1}{dt}$$

Deste modo, a tensão de saída é proporcional à derivada da tensão de entrada em ordem ao tempo. O ganho é $-RC$, pelo que também neste caso a saída será simétrica à derivada do sinal de entrada.

Círcuito somador



Círcuito somador

Esta montagem é usada para somar dois ou mais sinais. Neste caso consideram-se v_1 e v_2 como dois sinais genéricos à entrada do circuito. Tendo em conta a lei dos nós, verifica-se que as correntes i_1 e i_2 , proporcionais às entradas v_1 e v_2 respectivamente, são somadas no nó v , dando origem à corrente i , que impõe a tensão de saída ao atravessar a resistência de realimentação R_f . O terminal v_+ está ligado à massa pelo que o terminal v pode ser

considerado uma massa virtual. Assim, e desde que a tensão de saída não atinja as tensões de alimentação, são válidas as seguintes equações:

$$v_- \approx v_+ \approx 0V$$

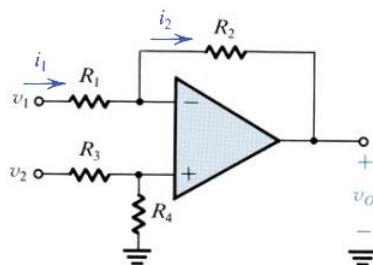
$$i_1 = \frac{v_1}{R_1} \quad i_2 = \frac{v_2}{R_2}$$

$$v_o = -i \cdot R_f$$

$$i = i_1 + i_2 \quad \text{por isso} \quad v_o = -\left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2}\right) \cdot R_f$$

O comportamento é muito semelhante ao da montagem inversora. Como se verifica, a saída é uma soma ponderada das tensões de entrada (embora com polaridade invertida). Tipicamente são utilizados valores de R_1 , R_2 e R_f iguais de modo que v_o seja igual à soma de v_1 com v_2 .

Círcuito de subtração



Círculo de subtração

Este circuito é semelhante ao somador e é usado para subtrair dois sinais v_1 e v_2 . O terminal v_+ tem uma tensão imposta pelo divisor resistivo R_3 e R_4 . A tensão no terminal v_- é igual à tensão em v_+ desde que o amplop não entre na zona de saturação. Assim são válidas as seguintes equações:

$$v_- \approx v_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot v_2$$

$$i_1 = \frac{v_1 - v_-}{R_1} \quad i_1 = i_2 = \frac{v_- - v_o}{R_2}$$

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_1 + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_2 + R_1}{R_1} \cdot v_2$$

A saída é uma subtração ponderada das tensões de entrada. Se os valores das resistências utilizadas forem todos iguais (i.e. $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$), a saída v_o é igual a $v_2 - v_1$, implementando assim a subtração entre os dois sinais de entrada.

Montagens realimentadas positivamente

As montagens em que os ampops são realimentados positivamente, i.e. montagens em que há uma realimentação entre a saída e o terminal positivo do ampop, são geralmente instáveis. Nestas, o ampop opera nas zonas de saturação e, possivelmente, oscila. Há situações em que se tira partido deste comportamento por exemplo os circuitos multivibradores (oscilador de Wien, o comparador Schmitt-triggered, etc). Este último circuito tem dois estados estáveis e uma zona de histerese sendo por vezes referido como circuito bi-estável.

Principais limitações dos amplificadores operacionais

Tensão de offset

Diferença de potencial aplicada à entrada do ampop. (entre o terminal v_+ e v_-) de modo a obter uma tensão de saída igual a zero Volt.

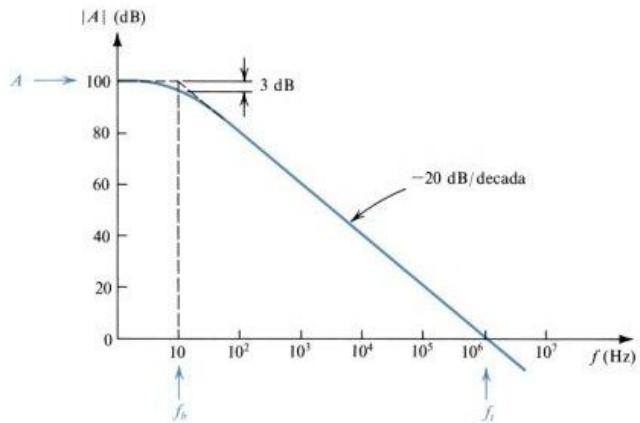
Limitação de ganho

O valor do ganho estático - ganho a (ganho à frequência zero, i.e. ganho DC) do ampop não é infinito, tipicamente varia entre 40 dB (100) e 100 dB (100000). O erro na tensão de saída associado a esta limitação é inversamente proporcional ao valor do ganho.

Largura de banda finita

A existência de capacidades parasitas nos terminais do ampop e nos seus nós internos faz com que, a partir de determinada frequência (representada na figura seguinte como f_b , tipicamente entre 10kHz e 10MHz), o ganho do amplificador desça consideravelmente até

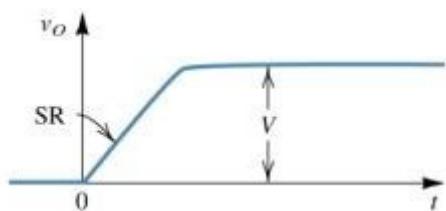
que desce mesmo abaixo dos 0 dB. Define-se como largura de banda do ampop a frequência à qual o ganho é unitário, ou seja 0 dB, na figura seguinte corresponde à frequência f_t .



Largura de banda e ganho estático do ampop

Slew-rate

Esta é uma característica não linear do ampop que está relacionada com a corrente máxima que o ampop consegue fornecer na saída. Esta limitação traduz-se na existência de um máximo para a derivada da tensão de saída em ordem ao tempo, ou seja por um declive máximo da tensão de saída do ampop. Valores típicos são da ordem dos $10V/\mu s$ a $1000V/\mu s$. A forma mais comum de medir o *slew-rate* é observando a resposta do ampop em montagem seguidora de tensão. A máxima derivada da tensão de saída - na figura assinalada como SR - corresponde ao *slew-rate*.



Slew-rate de um ampop

Impedância de saída

Apesar de ser desejável que os ampop tenham baixa impedância de saída, isso implica um elevado consumo de potência. Desta forma, geralmente são dimensionados de forma a chegar a um bom compromisso entre o valor da impedância de saída e o consumo. Sendo

assim, os ampop comuns têm frequentemente impedâncias de saída relativamente elevadas (da ordem de $1\text{k}\Omega$ a $100\text{k}\Omega$). A escolha do ampop correcto para cada aplicação deve ter em conta a impedância da carga que o ampop vai atacar, de forma a que a operação do ampop não seja prejudicada por uma impedância de carga demasiado baixa (quando comparada com a impedância de saída do ampop).