• *Operational amplifiers (Opamp)*

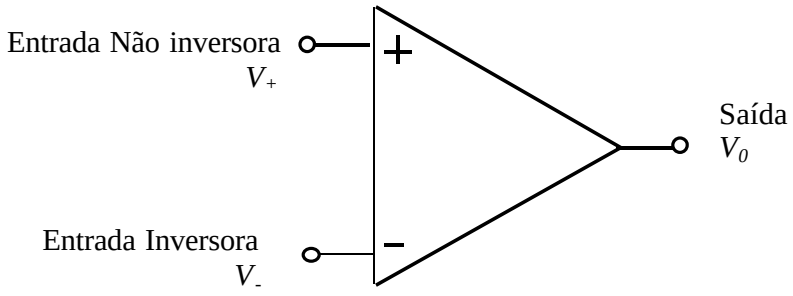
• *Introdução:*

Um amplificador operacional, ou opamp (do inglês), é um amplificador diferencial, isto é, amplifica diferença de tensões, de altíssimo ganho com alta impedância de entrada e baixa impedância de saída. Quase sempre se utiliza este amplificador com uma realimentação em tensão negativa.

Na última década surgiu uma nova classe de amplificadores operacionais que utiliza uma realimentação em corrente e são conhecidos como ***"Current Feedback Amplifiers"*** *(CF) ou amplificadores com realimentação em corrente.O surgimento deste novo tipo ou classe de amplificadores forçou a mudança do nome do amplificador operacional clássico para* ***"Voltagem Feedback Amplifiers"*** *(VF) ou amplificadores com realimentação em tensão.*

Neste curso nos limitaremos a estudar o amplificador com realimentação em tensão. Para simplificar a nomenclatura chamaremos de opamp.

A figura abaixo mostra o símbolo de um opamp básico com duas entradas e uma saída. É claro que existem outros terminais como os de alimentação, ajuste, compensação e outros que neste momento foram omitidos.



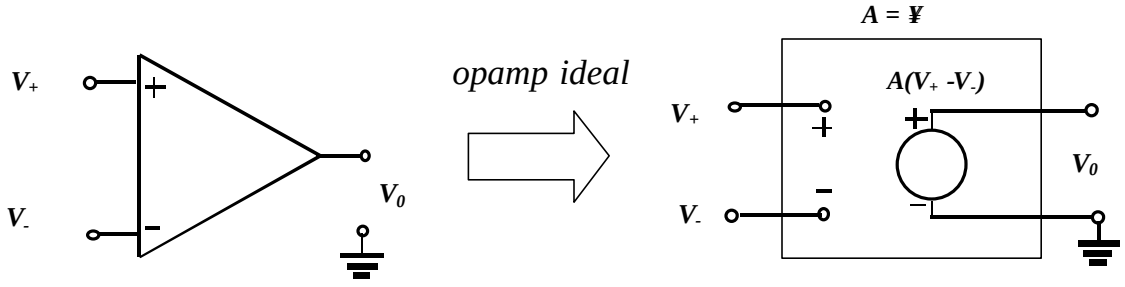
Símbolo do opamp básico

• *Amplificador operacional ideal*

Um opamp ideal apresenta as seguintes características:

- ✓ ***Impedância de entrada = infinita***
- ✓ ***Corrente de entrada = zero***
- ✓ ***Ganho de tensão (A) = infinito***
- ✓ ***Tensão de offset = zero***
- ✓ ***Impedância de saída = zero***
- ✓ ***Resposta em freqüência = largura da banda infinita.***

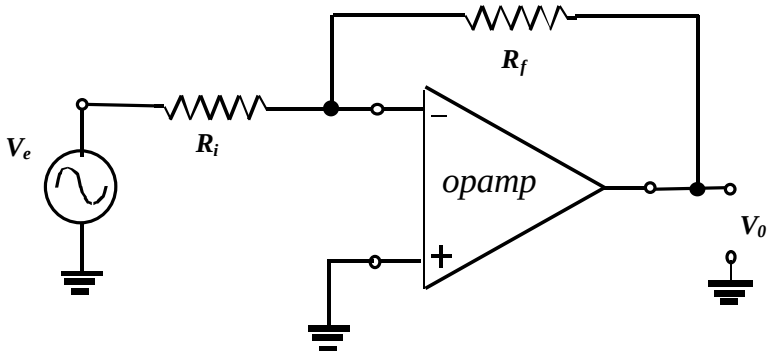
Assim podemos representar este amplificador pelo circuito equivalente abaixo.



Circuito equivalente (DC e AC) de um opamp ideal

• *Conceito de curto virtual em opamp*

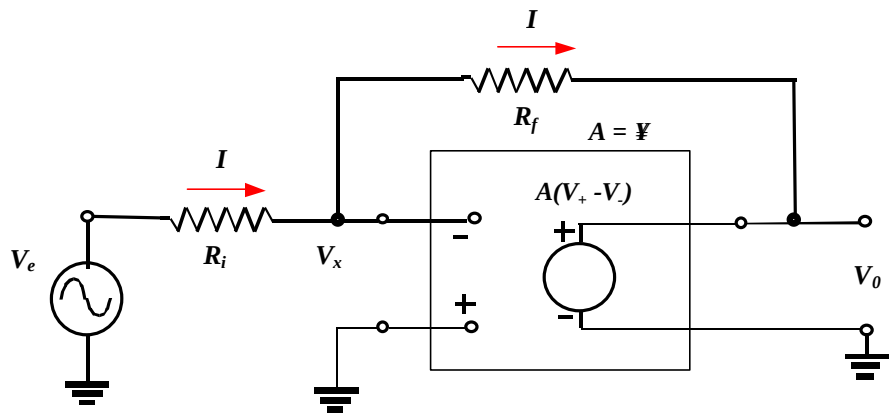
Para apresentar o conceito de curto virtual em opamp vamos analisar um dos circuitos mais básicos de aplicação do opamp que é o amplificador inversor. A figura abaixo mostra este amplificador. O opamp será considerado ideal como deve ser feito na maioria das análises.



Amplificador inversor

Note que as variáveis de entrada e saída são assinaladas com letras maiúsculas o que significa que esta análise é válida não só para pequenos mas também para grandes sinais.

A figura mostra o amplificador acima com o opamp substituído pelo seu circuito equivalente.



Circuito equivalente do amplificador inversor

Da figura, temos

$$I = (V_e - V_x)/R_i = (V_x - V_0)/R_f \qquad (376)$$

$$V_0 = A(V_+ - V_-) = A(0 - V_x) = -A\ V_x \qquad (377)$$

Substituindo a equação (376) em (377), resulta

$$(V_e + V_0/A)/R_i = -(V_0/A + V_0)/R_f$$

$$V_0\ (1/R_f\ A + 1/R_f + 1/R_iA) = -\ V_e/R_i$$

Portanto o ganho do sistema (ganho de malha fechada), A_v

$$\boxed{A_v = V_0/V_e = -R_f/R_i\ 1/[1 + 1/A + R_f/R_iA]} \qquad (378)$$

Fazendo A $\longrightarrow$ ¥

$$\boxed{A_v = -R_f/R_i} \qquad (379)$$

Ou seja, o ganho de malha fechada só depende dos elementos da malha externa ao opamp.

Por outro lado das equações (376) e (377) nós temos

$(V_e - V_x)/R_i = (V_x - V_0)/R_f = (V_x + AV_x)/R_f$

$V_e/R_i = (1/R_f + A/R_f + 1/R_i)V_x$

$V_x = 1/[R_i/R_f + A\,R_i/R_f + 1]V_e$

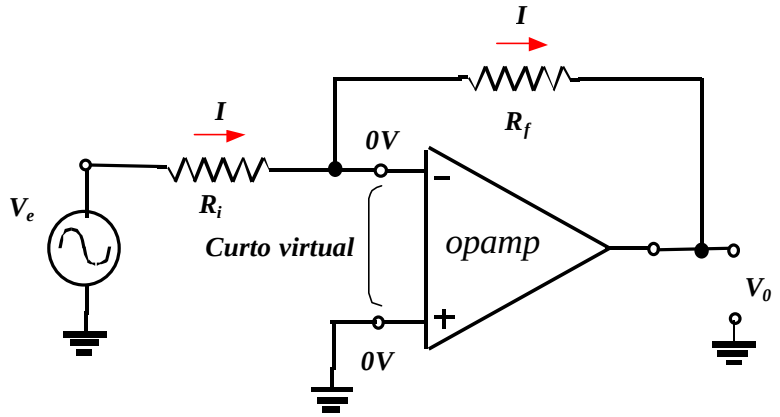
Como V_e é finito então

$\lim V_x \big|_{A \to \infty} = \lim 1/[R_i/R_f + A\,R_i/R_f + 1]V_e = 0$ *p/ qualquer V_e finito.*

Isto é, a fato do ganho de tensão A (de malha aberta) ser muito elevado faz com que a tensão na entrada inversora será muito próxima de zero volts. Generalizando de fato é a diferença de tensão entre o terminal não inversor e o terminal inversor que tende a zero volts, ou seja, a corrente nos terminais são diferente mas a tensão é a mesma. A isto damos o nome de ***curto virtual.***

No caso particular *do amplificador inversor acima como o terminal não inversor está aterrado, assim o curto virtual faz com que a entrada inversor esteja em um* ***terra virtual***

Vamos novamente determinar o ganho do amplificador acima utilizando o conceito de curto virtual. A figura abaixo mostra novamente este amplificador.



Da figura, temos

$I = V_e/R_i = (0 - V_0)/R_f$ *então*

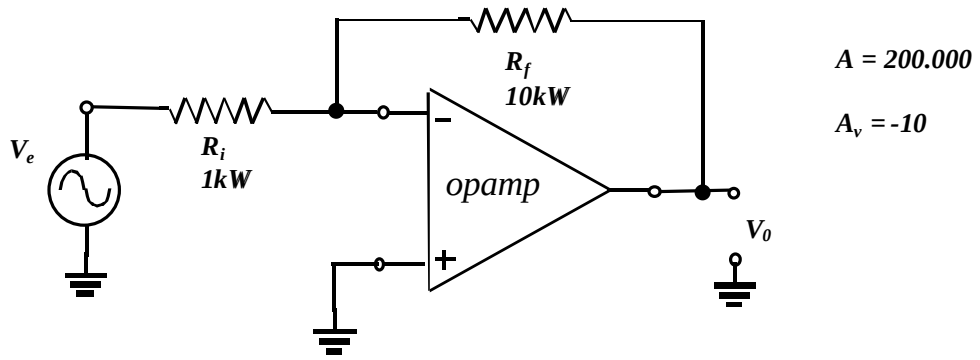
$A_v = V_0/V_e = -R_f/R_i$

Que é igual ao mesmo resultado anterior obtido com o mínimo esforço.

Quanto maior o ganho (A, de malha aberta) do opamp maior será a precisão na expressão do ganho de malha fechada.

Para exemplificar isto vamos determinar qual é erro em se utilizar o conceito de curto virtual em um circuito amplificador inversor com opamp de ganho de malha aberta igual a 200.000 (LM741) e ganho de malha fechada igual a -10. (Obs: estamos admitindo que todos os outros parâmetros do opamp são ideais)

A figura abaixo mostra o desenho deste amplificador com dois possíveis valores de resistência. Note que como quem determina o ganho de tensão é a razão dos resistores então existem infinitas soluções. É claro que outras considerações como veremos adiante determinam os valores absolutos mais adequados para estes resistores.



V_e

Utilizando a expressão (379), temos

$$A_v = -R_f/R_i = -10kW/1kW = \mathbf{-10}$$

E utilizando a expressão (378), temos

$$A_v = -R_f/R_i \; 1/[1 + 1/A + R_f/R_iA] = -(10)1/[1+ (1+10)/200.000)] = \mathbf{-9.99945}$$

Assim o erro em utilizar o curto virtual é de - 0,0055%. Só pra ter uma idéia deste erro não existe resistor comercial com tolerância menor do que 0,01%.

A expressão (378) pode ser rescrita na forma

$$A_v = -R_f/R_i \; 1/[1 + 1/A + R_f/R_iA] = -R_f/R_i \; 1/[1 + (1 + R_f/R_i)/A]$$

$$\boxed{A_v = -R_f/R_i \; 1/[1+1/bA]} \;\; » \; -R_f/R_i \; [1-\underbrace{1/bA}_{erro}] \quad se \; bA >>0 \qquad (380)$$

Onde

$$b = 1/(1+ R_f/R_i) = R_i/(R_f + R_i) \qquad (381)$$

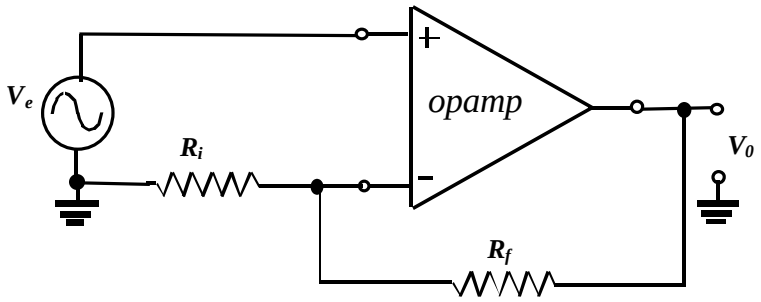
O parâmetro b (não confundir o ganho de corrente do transistor bipolar) representa o fator de realimentação. É fácil de ver na figura que se V_e igual a zero a tensão V_b que é realimentada no terminal da entrada inversora devido a V_0 é dada por

$$V_b = R_i/(R_f + R_i)V_0 = b\ V_0 \qquad (382)$$

Ou seja, b representa quanto da tensão de saída é realimentada para o terminal da entrada não inversora.

Como veremos no tópico realimentação, o produto bA representa o ganho da malha. Portanto da expressão (380) o erro no ganho de malha fechada é o termo 1/bA, logo quanto maior o ganho de malha (bA) menor será o erro.

Vamos utilizar outro exemplo para deixar bem claro o conceito de curto virtual e erro associado. A figura abaixo mostra outro amplificador bem conhecido que é o amplificador não inversor.Faremos análise deste com o conceito de curto virtual e a análise exata.

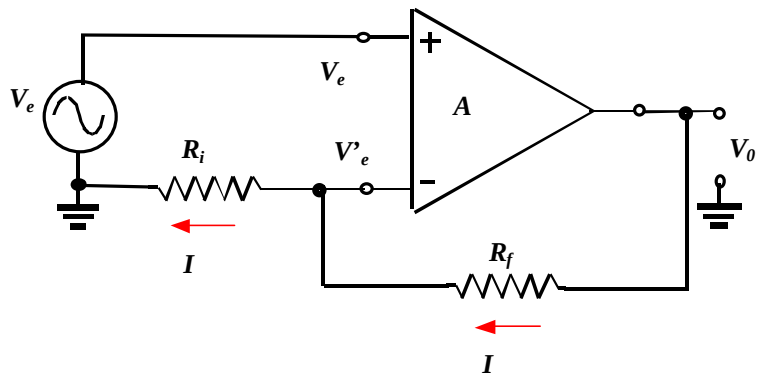


Amplificador não inversor

Vamos admitir duas situações:

1) *O opamp é ideal.*
2) *O opamp é ideal exceto que o ganho A é finito.*

A figura mostra o circuito equivalente do amplificador não inversor que será utilizado para determinar o ganho nas duas situações.



1) Opamp ideal

Se o opamp for ideal existe um curto virtual entre as entrada deste, portanto as tensões nestes terminais são iguais, ou seja, $V'_e = V_e$. *Desta forma da figura, temos*

$I = V'_e/R_i = V_e/R_i = (V_0 - V_e)/R_A$

$$A = V_0/V_e = 1+R_f/R_i \qquad (383)$$

2) Opamp com ideal ,mas o ganho A é finito

Se o opamp for ideal mas o ganho A for finito, haverá uma pequena diferença de tensão entre as entradas, ou seja, V'_e ¹ V_e. *Desta forma da figura, temos*

$$A(V_e - V'_e) = V_0 \quad e \qquad (384)$$

$$V'_e = R_i /(R_i + R_f)\, V_0 = b\, V_0 \qquad (385)$$

Substituindo a equação (385) em (384), resulta

$A(V_e - b\, V_0) = V_0$

$AV_e = (1+ bA)V_0$

$$A_v = V_0/V_e = A/(1+ bA) \qquad (385)$$

Se A tende a infinito

$A_v = A/(1+ bA) = 1/b = (R_i + R_f)/R_i = 1+ R_f/R_i$

Que é igual ao resultado anterior.

O ganho de tensão A_v acima também pode ser escrito na forma

$$A_v = A/(1+ bA) = 1/b\ [1/(1 +1/bA)]$$

Se $1/bA << 1$, *então*

$$A_v \approx 1/b[1-\underbrace{1/bA}_{erro}]$$

Como $1/b$ é igual ao ganho obtido no caso ideal, novamente o termo $1/bA$ representa o erro no ganho em admitir o curto virtual. Observe que aqui também b é o fator de realimentação (quanto do sinal de saída retorna para entrada inversora). Assim o produto bA é o ganho de malha. Resumindo ***quanto maior for o ganho de malha melhor será aproximação de curto virtual.***

• *Amplificador operacional real*

Apesar de que para fins de análise usamos no primeiro momento o modelo do opamp ideal (curto virtual) é importante para o projetista de circuito compreender este componente profundamente já que um dos passos importante durante o projeto com opamp é determinar qual opamp é mais adequado as especificações do seu circuito. Para isto vamos estudar estas características.

Um opamp real apresenta as principais características:

- ✓ ***Ganho de tensão (A) = entre centenas de milhares a milhões***
- ✓ ***Impedância de entrada = entre centenas de kW a 10^{12}W***
- ✓ ***Impedância de saída = algumas dezenas de W***
- ✓ ***Correntes de entrada = entre alguns pA a dezenas de nA***
- ✓ ***Tensão de offset = entre dezenas de nV a alguns mV***
- ✓ ***Drift de offset = entre alguns nV/° C a dezenas de mV/° C***
- ✓ ***Rejeição de modo comum = entre 80dB a 120dB***
- ✓ ***Rejeição a fonte = entre 80dB a 120dB***
- ✓ ***Slew rate = entre alguns V/s a kV/s***
- ✓ ***Setling time = entre alguns ns a dezenas de ms***
- ✓ ***Produto ganho banda = entre algum MHz a gigaHz***

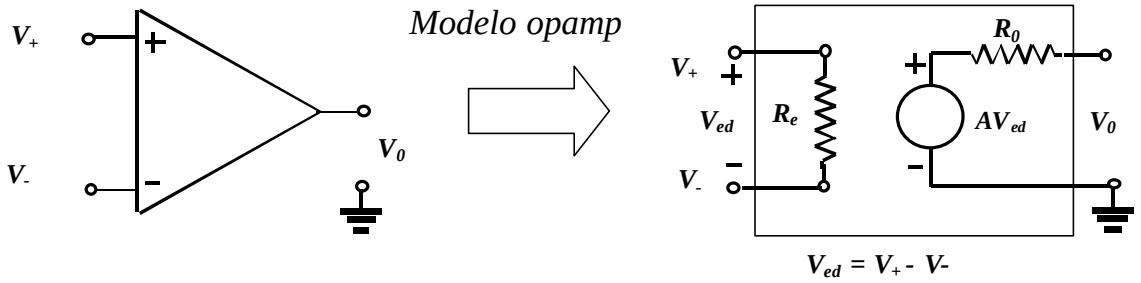
Como podemos observar quase todas as principais características de um opamp real se entendem em uma grande faixa de valores. Além disso, não encontramos no mesmo opamp os melhores valores para todas as caractectícas. Felizmente, a grande maioria das aplicações não exige que o opamp seja ideal ou ótimo em todas as suas características.

- ***Impedância de entrada e de saída.***

A impedância de entrada (diferencial) do opamp varia entre centenas de kW e milhares de giga W dependendo da tecnologia utilizada na construção do opamp. Por exemplo, em tecnologia bipolar onde os transistores bipolar formam o do par diferencial de entrada que é é primeiro estágio do opamp, possuem uma relativa baixa impedância de entrada. Já em tecnologias JFET e MOSFET, a impedância é extremamente elevada.

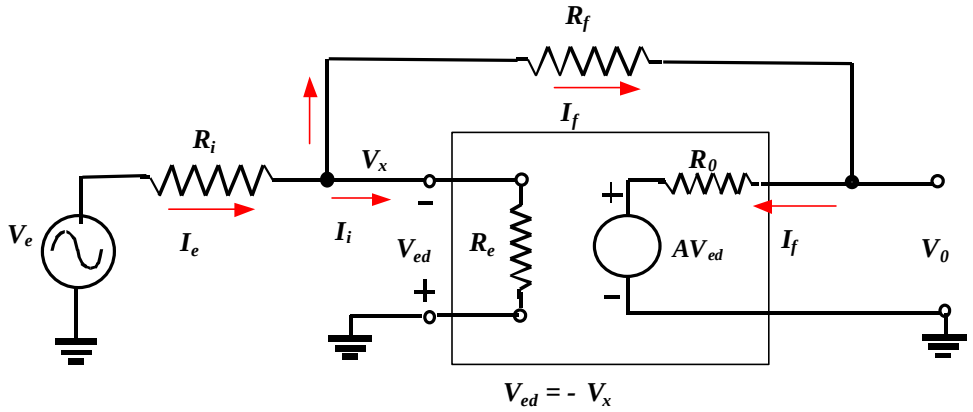
A impedância de saída do opamp normalmente é muito baixa da ordem de dezenas de ohms e praticamente somente da configuração interna do estágio de saída do opamp.

A figura abaixo mostra o modelo do opamp quando se leva em conta estas impedâncias.



Modelo opamp com R_e e R_0

Para verificar o efeito de R_e e R_0 no ganho de malha fechada vamos novamente analisar o amplificador inversor. A figura abaixo mostra este inversor com o modelo do incluindo R_e e R_0.



Circuito equivalente de um amplificador inversor com R_e e R_f

Da figura, temos

$$V_0 = AV_{ed} + R_0 I_f = - AV_x + R_0 I_f \quad (386)$$

$$I_f = (V_x - V_0)/R_f \quad (387)$$

Substituindo (387) em (386) resulta

$$V_0 = - A[R_f + R_0/A]/[R_f + R_0] = - A' = A\,k \quad (388)$$

onde

$$k = [R_f + R_0/A]/[R_f + R_0] \;\; » \;\; R_f/(R_f + R_0) = 1/(1 + R_f/R_0)$$

ou seja, o efeito das impedâncias de entrada e saídas é de reduzir ganho de malha aberta do opamp A é pelo fator k. Note que como quase sempre $R_f >> R_0$, esta redução não é significante.

Continuando a nossa análise, temos

$$I_e = I_i + I_f$$

Substituindo as expressões destas correntes, resulta

$$(V_e - V_x)/R_i = V_x/R_e + (V_x - V_0)/R_f$$

$$V_e/R_i = V_x\,[1/R_i + 1/R_e + 1/R_f] - V_0/R_f \quad (389)$$

Substituindo a equação (388) em (389), resulta

$$V_e/R_i = -V_0/A'[[1/R_i + 1/R_e + 1/R_f] - V_0/R_f$$

Assim

$$A_v = V_0/\,V_e = -R_f/R_i\;1/[1 + b'A'] \quad (390)$$

Onde

$$b' = 1/[1 + R_f/R_i + R_f/R_e] \quad (391)$$

Note que a expressão (390 é exatamente igual à expressão do ganho de malha fechada (380) com A reduzido para A' e b reduzido para b'. Sendo que b' novamente representa o fator de realimentação ($V_x = b'\,V_0$ com $V_e = 0$) como pode ser demonstrado abaixo.

A parcela da voltagem de saída V_0 que retorna a entrada inversora (V_e=0) da figura é dada por:

$$V_x = R_i //R_e /[R_i //R_e + R_f] \; V_0 = R_iR_e /[R_iR_e + R_f(R_i+R_e)] \; V_0$$

$$V_x = 1/[1 + + R_f/R_i + R_f/R_e] \; V_0 = b' \; V_0$$

A expressão de b' em (391) pode ser expressa na forma

$$b' = 1/[1 + R_f /R_i + R_f /R_e]$$

$$b' = 1/[1 + R_f /R_i] \; 1/[1+ R_f //R_i /R_e]$$

$$b' = b /[1+ R_f //R_i /R_e] = ab \qquad (392)$$

onde

$$a = 1/[1+ R_f//R_i /R_e]$$

Como quase sempre $R_e >> R_f //R_i$

Então

$$a \gg 1 \; e \quad b' \gg b$$

ou seja, se a impedância vista pelo terminal inversor, que é igual à $R_f //R_i$ *, for muito menor que a impedância de entrada do opamp então fator de realimentação b praticamente não se altera.*

Como vimos anteriormente é o ganho da malha (o produto de A vezes o fator de realimentação) que determinação o erro no ganho de malha fechada ou quão preciso somos em aplicar o conceito de curto virtual.

O ganho de malha agora (chamaremos a partir de agora de A_m *) é dado por*

$$A_m = A'. \; b' \qquad (393)$$

Substituindo a equação (388) e (392) em (393), resulta

$$A_m = k \; A.ab = = A.b /[(1+ R_f /R_0)(1+ R_f//R_i /R_e)] \qquad (394)$$

onde $A.b$ é o ganho de malha sem o efeito de impedância de entrada e saída.

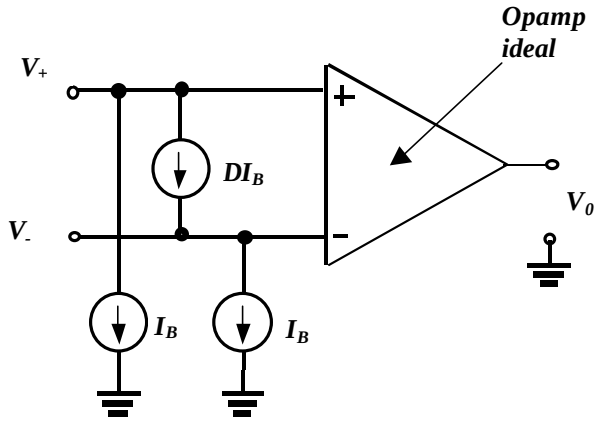
Resumindo, a impedância de entrada finita é a impedância de saída diferente de zero tem o efeito de reduzir o ganho de malha fechada do amplificador.

- ***Correntes de entrada diferente de zero.***

As correntes de entrada ou correntes de polarização ("current of bias", do inglês) opamp variam entre dezenas de nA a dezenas de pA, dependendo da tecnologia utilizada na construção do opamp. Por exemplo, opamp construídos em tecnologia bipolar onde os transistores bipolar formam o do par diferencial de entrada que é o primeiro estágio do opamp, apresentam correntes de polarização da ordem de nA. Já em tecnologias JFET e MOSFET, as correntes de polarização são extremamente pequenas, da ordem de pA, apesar de dobrar de valor a cada 10° C.

As correntes de polarização das duas entradas do opamp são ligeiramente diferentes e a esta diferença dar-se o nome de offset (ou resíduo) de corrente de polarização. Em geral para tecnologia bipolar este offset de corrente é em geral 10% do valor dos valores médios (I_B) das correntes de polarização.

A figura abaixo mostra o modelo do opamp quando se levam em conta estas correntes.



Modelo do opamp levando-se em conta as correntes de polarização

O sentido das correntes depende do tipo de transistor do par diferencial de entrada. Por exemplo, se for transistores bipolar NPN o sentido é como indicado na figura acima. Por outro lado, se for PNP o sentido inverte.