

O Amplificador Operacional e suas principais configurações

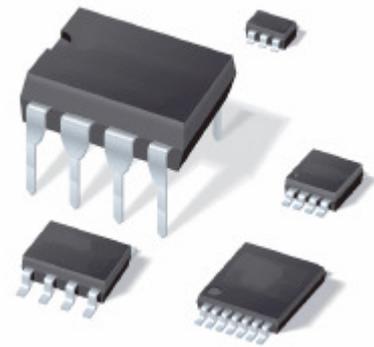
Introdução.

O amplificador operacional ou simplesmente Amp-OP, foi introduzido na década de 40, inicialmente com objetivo de realizar operações matemáticas, necessárias à computação analógica.

Em aproximadamente cinco décadas, o Amp-OP sofreu inúmeras melhorias, ganhando assim, posição de destaque entre os componentes eletrônicos.

Este grande sucesso deve-se à grande variedade de circuitos, executando as mais variadas funções, com um único circuito integrado e poucos componentes externos.

Hoje, o mercado disponibiliza milhares de amplificadores operacionais de baixo custo, altamente confiáveis e o mais importante, praticamente pronto para o uso.



Um pouco da história.

K2-W → Lançado em 1952 pela George A. Philbrick Researches, com objetivo de realizar operações matemáticas, úteis à computação analógica. O K2-W foi o pioneiro no que diz respeito a amplificadores operacionais, porém possuía muitos inconvenientes.

- ◇ Era valvulado, o que acarretava em grandes dimensões;
- ◇ Dissipava muita potência;
- ◇ Possuía altas tensões de trabalho;
- ◇ Custo difícil de ser reduzido.



A invenção ou co-invenção do primeiro Amp-OP, foi creditada a George A. Philbrick e outros integrantes, incluindo C. A. Lovell e Loebe Julie.

O transistor, a nova era da eletrônica → Em meados de 1947, Walter Brattain e John Bardeen criaram o transistor de contato, mais tarde aperfeiçoado por William B. Shockley, que o apresentou em 1951. Porém, o transistor ainda era um componente caro comparado as válvulas que dominavam o mercado.

Shockley, Brattain e Bardeen receberam o premio Nobel de Física em 1956, pela criação do transistor.

O circuito integrado, a revolução tecnológica → Em 1959, Jack Kilby, desenvolveu e patenteou um circuito eletrônico miniaturizado, que mais tarde seria chamado de circuito integrado. Neste momento nascia uma indústria bilionária, que mudaria o comportamento e estilo de vida das pessoas. Em 2000 ele ganhará o prêmio Nobel de física pela sua invenção.

○ **μA702**→ Em 1963, utilizando o transistor de Shockley e técnica de integração de Kilby, o engenheiro Robert Widlar, da Fairchild semicondutores, desenvolve o primeiro amplificador operacional, o μA702. Este Amp-OP não obteve grande aceitação por varias razões.

- ◇ Operava com alimentação dupla, porém assimétrica (+12V e -6V);
- ◇ Baixo ganho de tensão (3600 ou 71dB);
- ◇ Baixa impedância de entrada (40kΩ),
- ◇ Dissipava muita potência e possuía altas tensões de trabalho;
- ◇ Pouca rejeição em modo comum;
- ◇ Não possuía proteção contra curto;
- ◇ Custo difícil de ser reduzido.

○ **μA709**→ Três anos mais tarde, 1965, a Fairchild Semicondutores, lança o amplificador operacional μA709, este ao contrário de seu antecessor, fazia grande sucesso. É reconhecido como o primeiro amplificador operacional de qualidade, mas longe do que os pesquisadores idealizavam.

- ◇ A assimetria das fontes, já havia sido resolvida, agora operava com fonte simétrica de ±15V;
- ◇ A baixa impedância fora melhorada, agora 400kΩ contra os 40kΩ de seu antecessor;
- ◇ O ganho ultrapassava 45000 ou 93dB;
- ◇ O custo já baixará bastante;
- ◇ Continuava sem proteção de curto.

Embora a indústria de circuitos integrados tenha evoluído bastante, ainda não era possível o encapsulamento de capacitores, necessários a compensação de frequência e fase, assim havia necessidade de compensação externa.

○ **μA741**→ Em 1968, Fairchild lança o amplificador operacional μA741, surge um padrão industrial para amplificador operacional, já compensado internamente, este alcançaria grande sucesso e é usado até os dias atuais.

Novas tecnologias, uma nova geração de amp-OP.

Com o passar dos anos surgem novas tecnologias, e estas trazem consigo amplificadores operacionais modernos, de alto desempenho, muitos destes, compatíveis com o μA741.

- ◇ BIFET → construído com tecnologia BIPOLAR (transistores bipolares) e JFET (transistores de efeito de campo), nesta geração destacam o LF356;
- ◇ BIMOS → utilizam a tecnologia BIPOLAR e MOSFET (Metal-Óxido Semicondutor), destacamos o CA3130;

O amplificador operacional esteve presente em todas as gerações tecnológicas do passado, esta no presente e sem dúvida alguma estará no futuro.

Sistema digital x analógico

Estamos, sem dúvida, na era digital. Muitos sistemas, antes analógicos, agora são digitais, isto é inegável. Porém, as grandezas físicas são analógicas. Assim, estas grandezas devem ser convertidas em sinais elétricos, através de transdutores, serem amplificadas e então digitalizadas, por conversores A/D, ou seja, os amplificadores estão sempre presentes e são considerados como interface, entre o mundo analógico e os sistemas digitais.

A arquitetura interna do Amp-OP.

Um amplificador operacional possui internamente vários componentes, como transistores, diodos, resistores e capacitores, formando um circuito bastante complexo. Abaixo, representado pela figura 01, temos um esquema simplificado do amplificador operacional 741, que nos ajudará a entender alguns parâmetros que requerem um pouco de atenção.

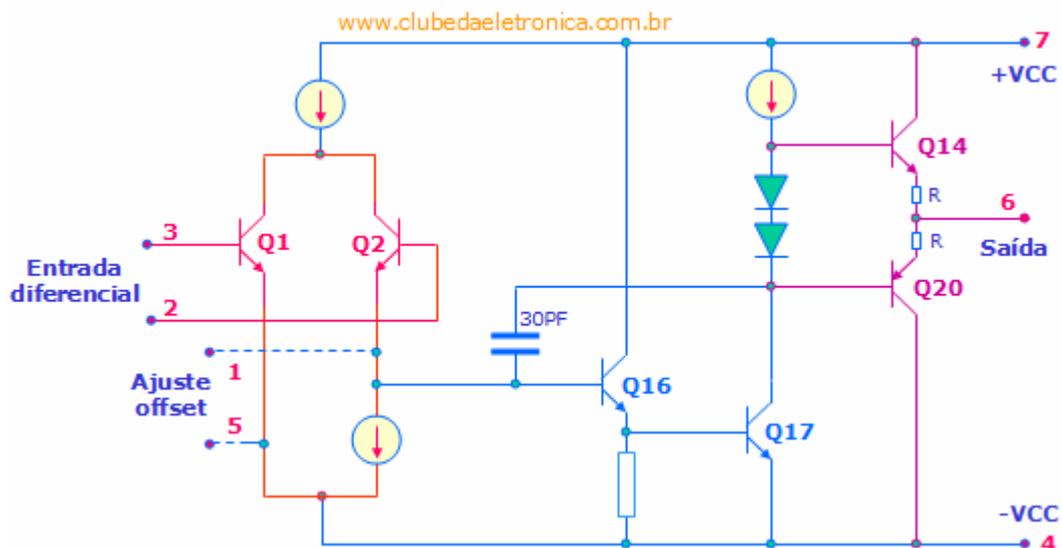


Figura 1.01 – Diagrama esquemático simplificado

Para facilitar a compreensão o circuito representado pela figura 01, foi dividido em três partes, são elas:

- **Entrada diferencial** ⇒ O Amp-OP possui internamente um estágio diferencial, constituído pelos transistores **Q1** e **Q2**, de acoplamento direto com e entrada e com saída simples. A diferença entre as tensões VBE destes transistores, provoca um desequilíbrio interno, chamado **offset**, que pode ser corrigido através de seus pinos de ajuste.
 - **Entrada inversora (-)**: um sinal aplicado nesta entrada aparecerá amplificado e com polaridade invertida.
 - **Entrada não inversora (+)**: um sinal aplicado nesta entrada aparecerá amplificado e com a mesma polaridade.

Outro ponto que merece atenção é uma pequena corrente que deve circular pelos transistores Q1 e Q2, chamada de correntes de polarização ou **bias**. Estas correntes são necessárias, caso contrário os

transistores operariam na região de corte, porém são responsáveis por desequilíbrios internos, que dependendo da aplicação deve ser corrigido.

- ❑ **Estágio intermediário** ⇒ A saída do estágio diferencial é reforçada por um seguidor de emissor formado pelos transistores **Q16** e **Q17**, compensando assim, eventuais distúrbios operacionais entre entrada e saída como, perda de amplitude de sinal, casamento de impedâncias, etc. Neste estágio, um capacitor de 30pF é responsável pela compensação de frequência, tornando o amplificador operacional 741, estável em praticamente todas as aplicações.
- ❑ **Seguidor de emissor push pull** ⇒ O terceiro estágio é par complementar de transistores Q14 e Q20, formando uma configuração de baixa impedância na saída chamada “push pull”, os diodos evitam o efeito “crossover” e dois pequenos resistores entre os transistores limitam a corrente, causando também uma queda de tensão e fazendo com que a saturação seja um pouco menor que ±VCC.

Um amplificador ideal à sua aplicação.

O amplificador operacional é considerado por muitos um amplificador ideal, ou seja, é tratado como uma “caixa preta” onde seus parâmetros internos não têm efeito na relação entrada/saída do sinal. Em muitas aplicações, é assim mesmo que ele deve ser considerado, porém, um amp-op ideal é utopia, se analisado com cuidado o amplificador real não possui características ideais, mas estão muito próximas, ou seja, possui alguns parâmetros altíssimos, idealmente infinitos e outros baixíssimos, idealmente zero.

O modelo do Amp-op ideal e real além de alguns parâmetros importantes:

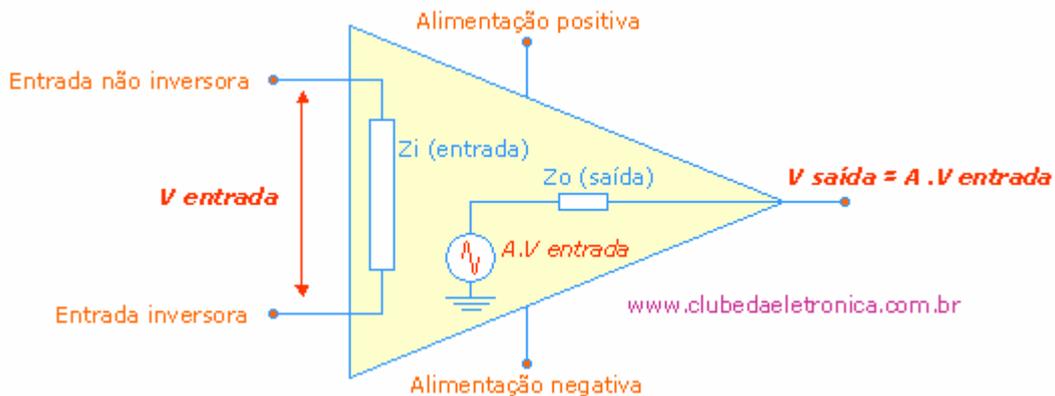


Figura 1.02 – representação simplificada do amp-OP.

Parâmetros	Ideal	Real (µA741A)	AOPs modernos
❑ Ganho (A)	Infinito	Acima de 100000	-
❑ Resposta em frequência (BW)	De zero a infinito	-	Acima de 15MHz
❑ Impedância de entrada (Zi)	Infinita	2 MΩ	Acima de 2,0 TΩ
❑ Impedância de saída (Zo)	Nula	75Ω	Inferior a 1,0 Ω
❑ Razão de rejeição em modo comum	Infinito	90dB	-

Nota: Entre milhares de amplificadores operacionais, sempre haverá um que será considerado ideal para sua aplicação.

Simbologia simplificada e completa

O amplificador operacional, assim como qualquer amplificador, é representado por um triângulo que aponta em direção ao fluxo de sinal, porém, é caracterizado pelos sinais de (+) e (-) presentes na simbologia. Dependendo do circuito o símbolo pode ser simplificado omitindo alguns terminais.

Os sinais (+) e (-) presentes em ambos os símbolos representam as entradas, inversora e não inversora do amplificador operacional e não devem ser omitidas.

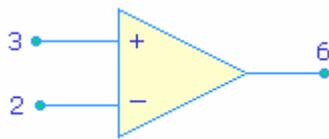


Figura 1.03 - Simbologia simplificada

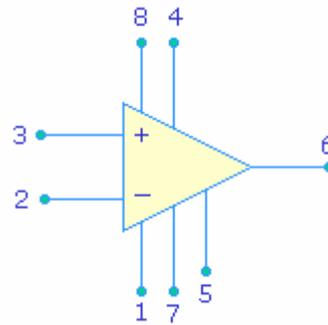


Figura 1.04 - Simbologia completa

O amplificador operacional real

Entre milhares de amplificadores operacionais disponíveis no mercado destaca-se o 741, que após ter sido criado pela Fairchild semicondutores, tornou-se referência e sinônimo de amplificador operacional.

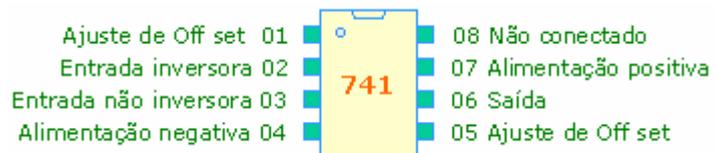


Figura 1.05 – O amplificador operacional real

Características elétricas do amplificador operacional (LM741C)

O amplificador operacional mostrado pela figura 06 é um clássico entre os operacionais, suas aplicações são imensuráveis, embora o LM741 seja um amplificador praticamente pronto, ele requer alguns componentes e instrumentos externos, e estes deverão ser ligados e conectados corretamente, caso contrário, o amp-OP poderá ser destruído.

Valores absolutos máximos

- ☑ Alimentação $\Rightarrow \pm 18$ VDC – máxima tensão que se pode alimentar o Amplificador operacional com segurança. O LM741A pode ser alimentado com até ± 22 VDC.

Pino 7 - alimentação positiva e pino 4 - alimentação negativa.

- ☑ Tensão diferencial das entradas $\Rightarrow \pm 30$ V – máxima tensão que pode ser aplicada nas entradas Inversora e não inversora.

Tensões diferenciais são da entrada não inversora com relação à entrada inversora.

- ☑ Potência dissipada \Rightarrow 500mW – máxima potência dissipada em condições normais de temperatura. Temperatura ao ar livre ou menor que 25°C, para temperaturas acima as curvas de redução de capacidade de dissipação, deverão ser consultadas na folha de dados (datasheets).
- ☑ Tensão de entrada para qualquer entrada \Rightarrow ± 15 V – A amplitude da tensão de entrada não deve exceder a amplitude da tensão da fonte.
- ☑ Corrente de saída \Rightarrow 25mA – Máxima corrente que pode ser drenada do operacional.

Importante: Para outros modelos o manual do fabricante deve ser consultado.

Nota: Os principais parâmetros do operacional serão vistos à medida que estiverem sendo usados, o que torna mais fácil sua explicação e menos cansativa para o leitor.

Os terminais do Amp-OP

O amplificador operacional dispõe de oito terminais sendo:

Pinos 07 e 04 \rightarrow Alimentação simétrica

O Amp-Op dispõe de dois terminais para sua alimentação, pino 7 +VCC e pino 4 -VCC. A alimentação dupla é a mais comum, porém em algumas aplicações a alimentação simples, também pode ser usada.

Não é muito comum encontrar fonte simétrica em laboratórios, porém deve-se improvisar com duas fontes comuns, ao lado o exemplo mais comum.

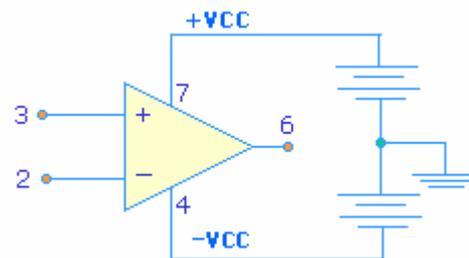


Figura 1.06 – Improvisando alimentação simétrica

Pinos 01 e 05 \rightarrow O ajuste de off-set

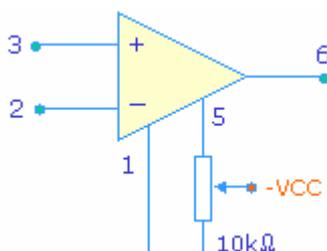


Figura 1.07 – Ajustando off-set

O amplificador operacional é constituído por componentes discretos e a desigualdade entre estes componentes provocam um desbalanceamento interno, o que resulta em uma tensão de saída denominada tensão de offset ou de desequilíbrio.

Muitos amplificadores operacionais disponibilizam os terminais Offset Null ou balance para o “zeramento” desta tensão.

O ajuste pode ser feito conectando um resistor variável entre os pinos 01 e 05 (741) e a alimentação negativa.

Pinos 03 e 02 → Entradas de sinais

O amplificador operacional possui internamente um estágio amplificador diferencial, portanto disponibiliza ao usuário duas entradas sendo uma inversora (pino 02) e uma não inversora (pino 03).

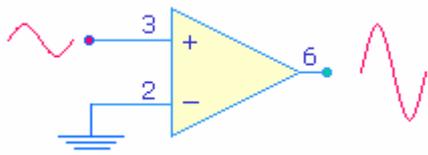


Figura 1.08 – Somente amplificado

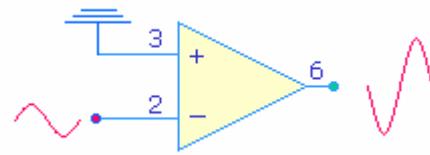


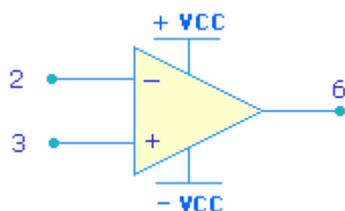
Figura 1.09 – amplificado e invertido

Configurações básicas

O Amp-OP isoladamente executa poucas funções. Os elementos externos como resistores, capacitores e diodos é que determinarão o comportamento do circuito. Basicamente, podemos afirmar que quase todos os circuitos derivam de uma de suas configurações básicas.



Sem realimentação: Nessa configuração o Amp-OP utilizado sem nenhum componente externo, ou seja, o ganho é estipulado pelo fabricante. Assim, a saída do operacional tende a saturar em valores inferiores a +VCC e -VCC.

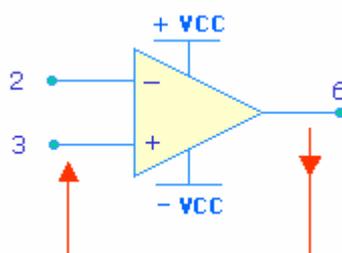


Algumas aplicações:

- Comparadores
- Detectores de nível
- Detectores de passagem por zero

Figura 1.10 – Amp-Op sem realimentação

Realimentação positiva: É como a realimentação negativa, porém parte do sinal de saída retorna à entrada não inversora. Esta configuração apresenta alguns inconvenientes, pois esse tipo de realimentação conduz o circuito à instabilidade.



Algumas aplicações:

- Comparadores com histerese
- Multivibradores
- Osciladores

Figura 1.12 – Com realimentação positiva

Realimentação negativa: Em um sistema realimentado, a saída é amostrada e parte dela é enviada de volta para a entrada inversora. O sinal de retorno é combinado com a entrada original e o resultado é uma relação saída / entrada definida e estável.

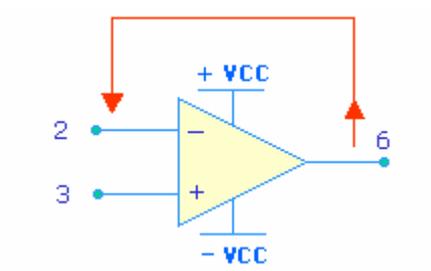


Figura 1.11 – Com realimentação negativa

Algumas aplicações:

- Inversores, não inversores e buffers
- Somadores e subtratores,
- Integradores e diferenciadores
- Filtros ativos
- Conversores V/I e I/V
- Retificadores de precisão
- Ceifadores, limitadores e grampeadores
- Etc..

Circuitos básicos

O Amplificador Inversor

Este circuito é sem dúvida, um dos mais utilizados na prática, por vários motivos:

- Permite o ajuste de ganho desde zero
- Inversão de fase
- Baixa tensão em modo comum
- Terra virtual
- Permite a instalação de limitadores

O circuito inversor básico

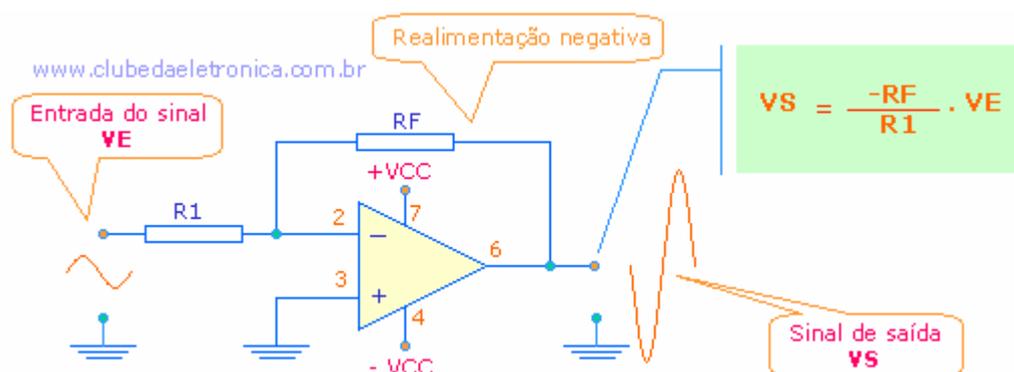


Figura 1.13 – Circuito inversor básico

O ganho de tensão diferencial do circuito inversor

O ganho é a relação entre a tensão da saída e a tensão de entrada.

Onde:

$$\frac{VS}{VE} = \frac{-RF}{R1}$$

- AV = ganho de tensão (adimensional)
- VS = tensão de saída
- VE = tensão de entrada
- RF = Resistor de realimentação
- R1 = Resistor de entrada

Logo, se $RF = 10k\Omega$ e $R1 = 1k\Omega$ o ganho será:

$$AV = -RF \div R1$$

$$AV = -10k\Omega \div 1k\Omega$$

$$AV = -10$$

Geralmente esse ganho é fornecido em decibéis.

$$AV_{(dB)} = 20 \cdot \log \left| \frac{VS}{VE} \right|$$

Onde:

- AV(dB) = ganho de tensão em decibéis
- VS = tensão de saída
- VE = tensão de entrada

Então, o ganho em decibel será:

$$AV \text{ (dB)} = 20 \cdot \text{Log}|AV|$$

$$AV \text{ (dB)} = 20 \cdot \text{log}10$$

$$AV \text{ (dB)} = 20\text{dB}$$

As correntes no circuito inversor

O conceito Terra virtual \Rightarrow O amplificador operacional apresenta em sua entrada diferencial uma elevada impedância, idealmente infinita, impedindo a passagem da corrente elétrica.

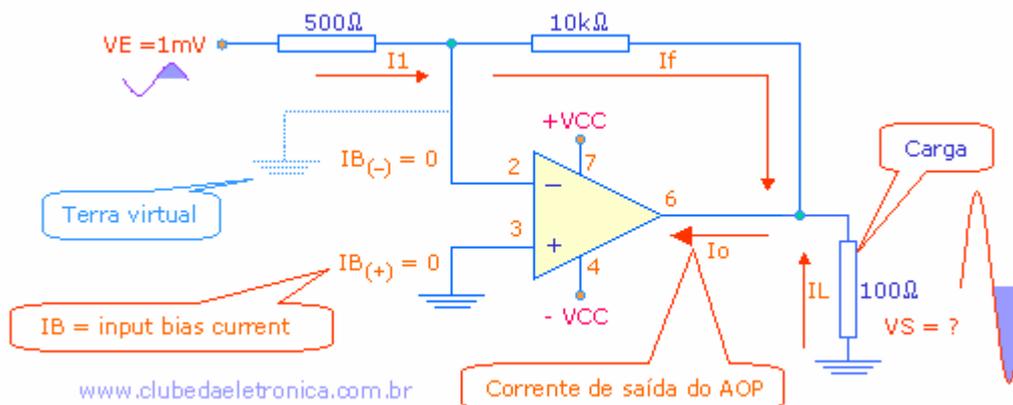


Figura 1.14 – O conceito de terra virtual

A resistência de entrada \Rightarrow Como o terminal inversor está aparentemente aterrado, o sinal de entrada VE aparece integralmente sobre R1, de modo que:

$$I1 = VE \div R1$$

$$I1 = 1\text{mV} \div 500\Omega$$

$$I1 = 2\mu\text{A}$$

Assim, se $IB(-) = 0$, conclui-se que a corrente que passa por R1 é a mesma que passa por RF. Logo:

$$IF = I1$$

$$IF = 2\mu\text{A}$$

A corrente de saída do AOP dependerá da carga e da tensão de sobre ela, logo.

$$VS = - (RF \div R1) \cdot VE$$

$$VS = - (10\text{K}\Omega \div 500\Omega) \cdot 1\text{mV}$$

$$VS = - 20\text{mV}$$

Assim, a corrente na carga pode ser calculada.

$$IL = |VS| \div RL$$

$$IL = 20\text{mV} \div 100\Omega$$

$$IL = 200\mu\text{A}$$

E, finalmente a corrente de saída do AOP:

$$IO = IF + IL$$

$$IO = 2\mu\text{A} + 200\mu\text{A}$$

$$IO = 202\mu\text{A}$$

As correntes de polarização **BIAS** ⇒ Para que os transistores Q1 e Q2 operem adequadamente, é necessária uma pequena corrente de polarização e estas correntes são responsáveis por erros DC, que muitas vezes podem ser ignorados, mas também podem ser corrigidos.

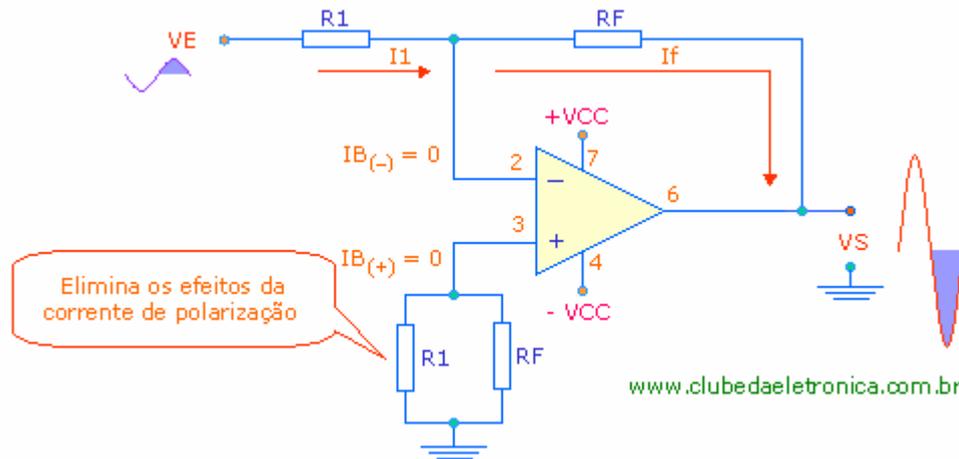


Figura 1.15 – Eliminando os erros provocados pela corrente de polarização

O sinal de saída/entrada

Ajustando os equipamentos

Ajuste do gerador de sinal	Ajuste do osciloscópio
<input type="checkbox"/> Amplitude do sinal = 1mV	<input type="checkbox"/> Tempo de base = 0,5ms
<input type="checkbox"/> Freqüência = 1kHz	<input type="checkbox"/> Canal A = 1mV / divisão (entrada)
	<input type="checkbox"/> Canal B = 5mV / divisão (saída)

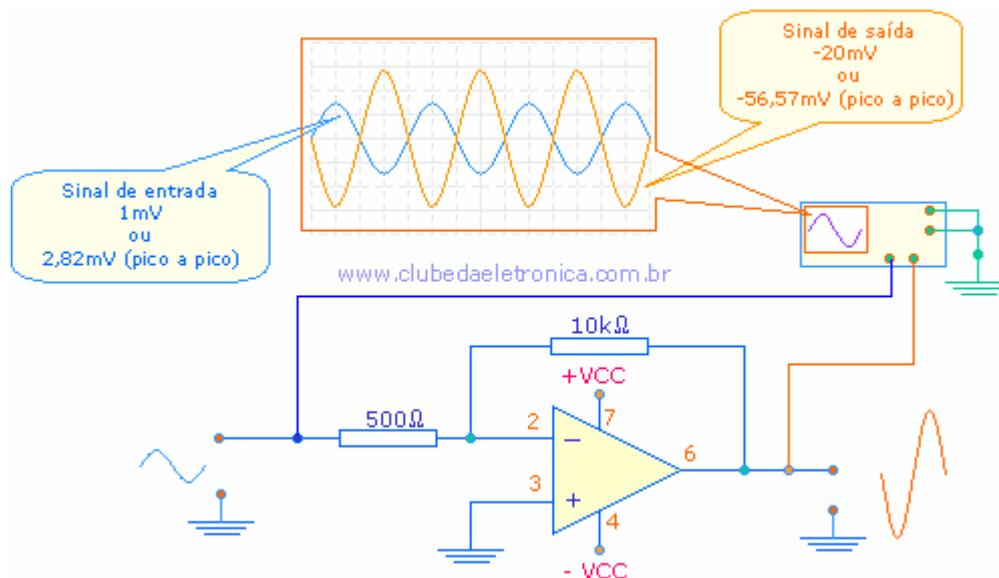


Figura 1.16 – Verificando os sinais de saída e entrada

Mais conceitos sobre Amp-OP

Saturação

A saturação ocorre quando o sinal de saída atinge seu valor máximo, que é relativamente próximo de $\pm VCC$.

Notas:

1- Os cálculos acima não serão reais se a saída do Amp-OP estiver saturada.

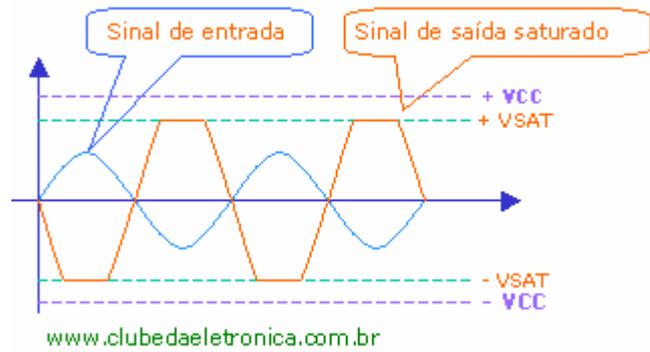


Figura 1.17 – Sinal de saída saturado

2- A excursão máxima do sinal é entre $+V_{SAT}$ e $-V_{SAT}$ e denominada “output voltage swing”, $V_{o(p-p)}$. Como exemplo, o 741 alimentado com $\pm 15V$: o sinal de saída poderá excursionar entre ± 14 (típico) e ± 13 (mínimo) para uma carga de $10k\Omega$ e entre ± 12 (típico) e ± 10 (mínimo) para uma carga de $2k\Omega$.

Resposta em frequência

O amplificador operacional ideal teria uma resposta em frequência infinita, ou seja, pode amplificar sinais de zero a infinitos hertz, sem atenuação do sinal.

Resposta em freqüência – Malha aberta

O amplificador operacional real, por exemplo, o $\mu A741C$, apresenta em malha aberta um ganho de 100000 ou 100dB para frequências abaixo de sua frequência de corte (tipicamente 10Hz). Acima desta freqüência, o ganho diminui 20dB/dec, até que seu ganho seja reduzido unidade.

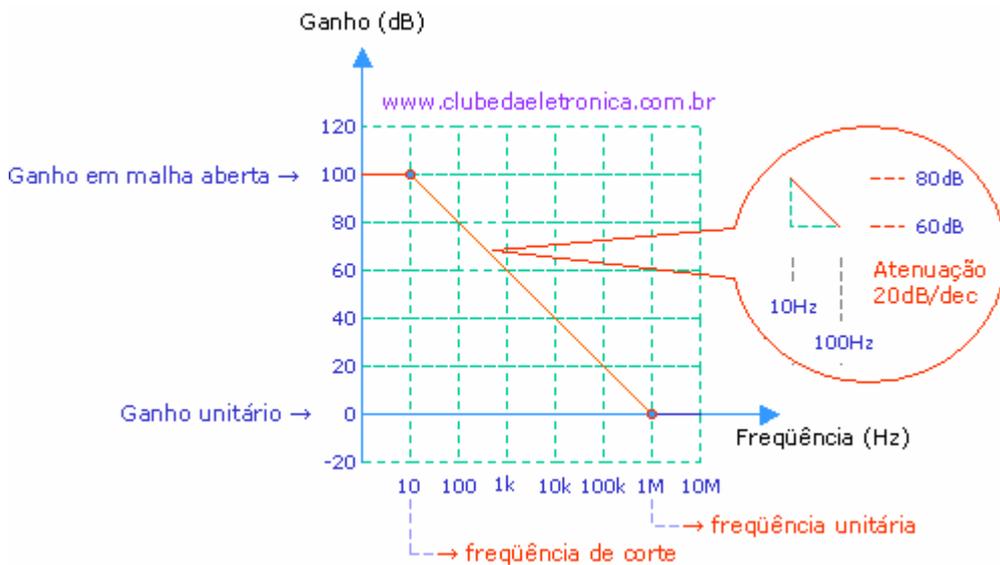


Figura 1.18 – Gráfico da resposta em freqüência malha aberta.

Os amplificadores operacionais são em sua grande maioria compensados internamente, o que resulta em uma taxa de atenuação constante de 20dB/década até que o ganho se torne unitário.

Rise Time (Tr) e Overshoot

Rise time ⇒ É o tempo de subida, durante a transição de desligado para ligado o sinal demora certo tempo para atingir o valor máximo, que pode variar de 10 a 90% de seu valor final.

Overshoot ⇒ É a sobre-passagem, também ocorre na transição, neste momento ocorre uma oscilação, da ordem de $\pm 5\%$ e logo atinge o regime permanente.

Funity ⇒ É a frequência para qual o ganho do amplificador operacional é reduzido à unidade. Pode-se, utilizar o rise time para especificar essa frequência. O “RISE TIME”, ou tempo de subida é normalmente fornecido pelo fabricante, sendo da ordem de $0,3\mu\text{s}$.

$$f_{\text{UNIT}} = 0,35 \div \text{Tr}$$

Onde:

f_{UNIT} = frequência unitária

Tr = rise time



Figura 1.19 – Gráfico rise time e overshoot

Exemplo:

O fabricante do amplificador operacional especifica em sua folha de dados, um tempo de subida (rise time) $t_r = 0,35\mu\text{s}$. Determine:

a) a frequência unitária (f_{UNIT})

$$f_{\text{UNIT}} = 0,35 \div \text{Tr}$$

$$f_{\text{UNIT}} = 0,35 \div 0,35\mu\text{s}$$

$$f_{\text{UNIT}} = 1\text{MHz}$$

b) a frequência de corte (f_c)

A frequência de corte (f_c) é a relação entre a frequência unitária (f_{UNIT}) e o ganho de tensão (A_v). Assim,

$$f_c = f_{\text{UNIT}} \div A_v$$

$$f_c = 1\text{MHz} \div 100000$$

$$f_c = 10\text{Hz}$$

Resposta em frequência – Malha fechada

O amplificador operacional em malha aberta apresenta um alto ganho, porém uma baixa resposta em frequência. Para melhorar a resposta em frequência maior o circuito deve ser realimentado.

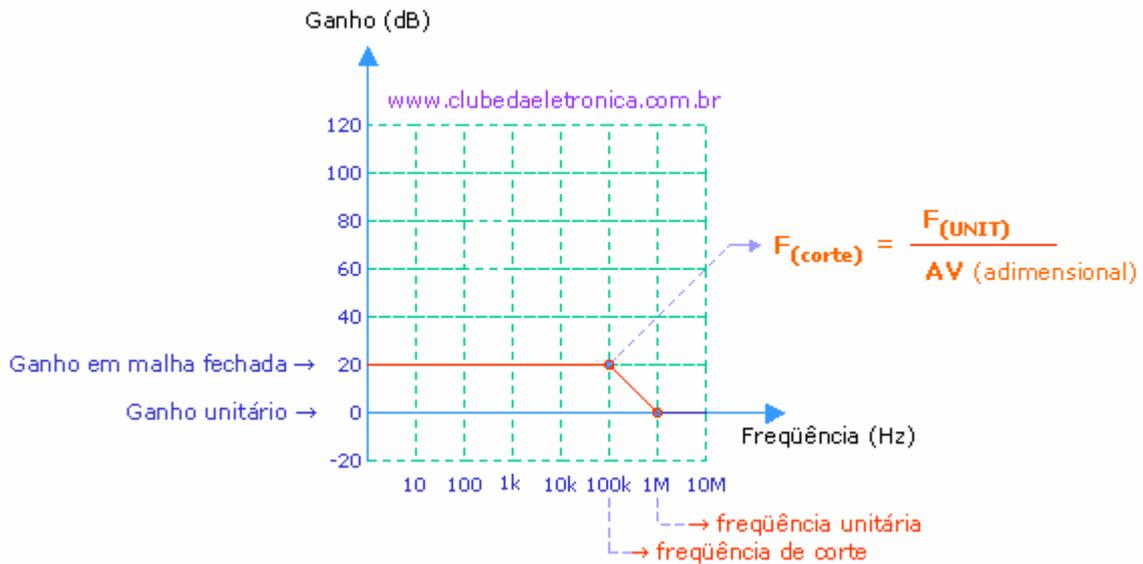


Figura 1.20 – Gráfico da resposta em frequência malha fechada. (ganho 20 dB)

Exemplo:

O fabricante do amplificador operacional especifica em sua folha de dados para um ganho em malha aberta, uma frequência de corte de 10Hz e uma frequência unitária de 1MHz. Qual a resposta em frequência para o ganho 100 estipulado pelo projetista?

fc = fUNIT ÷ Av

fc = 1MHz ÷ 100

fc = 10kHz

“Slew rate” (SR) – Taxa de inclinação

O tempo que o sinal de saída do AOP demora a atingir o valor máximo provoca uma inclinação, que será mais evidente em grandes sinais. Neste caso, o projetista deverá atentar para o slew rate que provocará uma distorção indesejada no sinal.

SR = 2.π.f.VP

Esse valor é normalmente fornecido pelo fabricante, para o μA741 é 0,5V/μs.

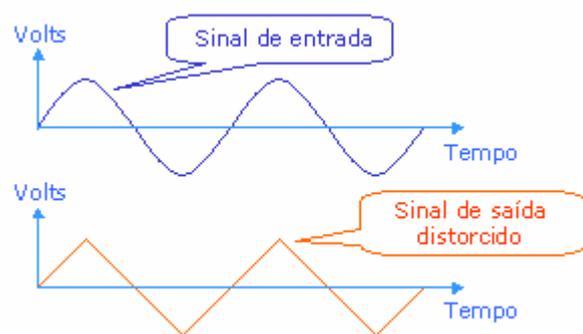


Figura 1.21 – Sinal de saída distorcido

Exemplo:

O amplificador operacional LM 10C da national semicondutores, especifica em sua folha de dados um slew rate (SR) de $0,12\text{V}/\mu\text{s}$. Qual a máxima frequência, sem distorção, para uma tensão de saída de 10V de pico?

$$f = \text{SR} \div 2 \cdot \pi \cdot \text{VP}$$

$$f = 0,12\text{V}/\mu\text{s} \div 2 \cdot \pi \cdot 10\text{V}$$

$$f = 120000\text{V/s} \div 62,8\text{V}$$

$$f = 1910,82\text{Hz}$$

O Amplificador não inversor

Se o projetista não desejar a inversão de polaridade, uma nova configuração pode montada, trata-se do amplificador não inversor. Suas principais características são:

- Ganho de tensão positivo
- Alta impedância de entrada (maior que a do Amp-OP)
- Baixa impedância de saída (menor que a do Amp-OP)

O circuito não inversor básico

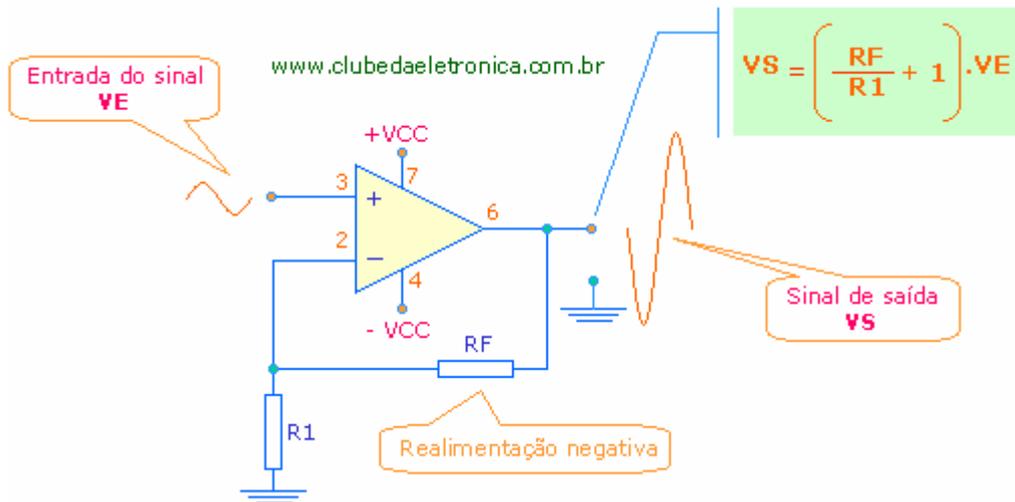


Figura 1.22 – Circuito não inversor básico

O ganho de tensão diferencial do circuito não inversor

O ganho é dado pela seguinte expressão:

$$AV = \frac{V_S}{V_E} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

Onde:

- AV = ganho de tensão (adimensional)
- VS = tensão de saída
- VE = tensão de entrada
- RF = Resistor de realimentação
- R1 = Resistor de entrada

Logo, se $R_F = 9k\Omega$ e $R_1 = 1k\Omega$ o ganho será:

$$AV = (R_F \div R_1) + 1$$

$$AV = (9k\Omega \div 1k\Omega) + 1$$

$$AV = 10$$

Em decibéis:

$$AV_{(dB)} = 20 \cdot \log \left| \frac{V_S}{V_E} \right|$$

Onde:

- AV(dB) = ganho de tensão em decibéis
- VS = tensão de saída
- VE = tensão de entrada

Então, o ganho em decibel será:

$$AV \text{ (dB)} = 20 \cdot \log|AV|$$

$$AV \text{ (dB)} = 20 \cdot \log 10$$

$$AV \text{ (dB)} = 20 \text{ dB}$$

As correntes no circuito não inversor

Uma carga de $1\text{k}\Omega$ é ligada à saída do amplificador operacional, assim podemos calcular as correntes.

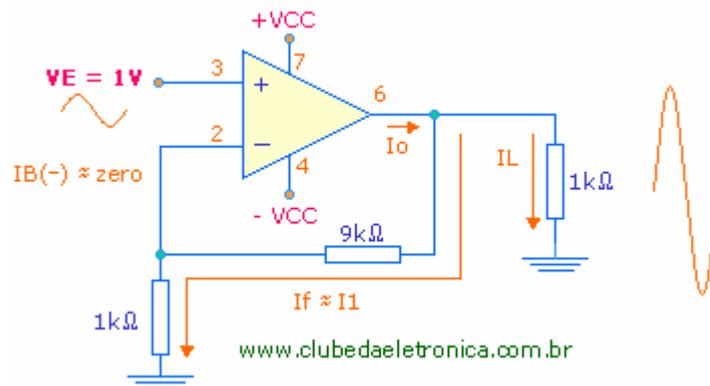


Figura 1.23 – Correntes no circuito não inversor

Devido ao curto virtual, a corrente que passa por R_1 também passará por R_F , assim podemos calcular através da seguinte expressão:

$$I_1 = V_E \div R_1$$

$$I_1 = 1\text{V} \div 1\text{k}\Omega$$

$$I_1 = 1\text{mA}$$

Logo,

$$I_F = I_1$$

$$I_F = 1\text{mA}$$

A corrente de saída do AOP dependerá da carga e da tensão de sobre ela, logo.

$$V_S = [(R_F \div R_1) + 1] \cdot V_E$$

$$V_S = [(9\text{k}\Omega \div 1\text{k}\Omega) + 1] \cdot 1\text{V}$$

$$V_S = 10\text{V}$$

Assim, a corrente na carga pode ser calculada.

$$I_L = V_S \div R_L$$

$$I_L = 10\text{V} \div 1\text{k}\Omega$$

$$I_L = 10\text{mA}$$

E, finalmente a corrente de saída do AOP:

$$I_O = I_F + I_L$$

$$I_O = 1\text{mA} + 10\text{mA}$$

$$I_O = 11\text{mA}$$

O sinal de saída

Ajustando os equipamentos

Ajuste do gerador de sinal	Ajuste do osciloscópio
<input type="checkbox"/> Amplitude do sinal = 1V (rms)	<input type="checkbox"/> Tempo de base = 0,5ms
<input type="checkbox"/> Freqüência = 1kHz	<input type="checkbox"/> Canal A = 1V / divisão (entrada)
	<input type="checkbox"/> Canal B = 5V / divisão (saída)

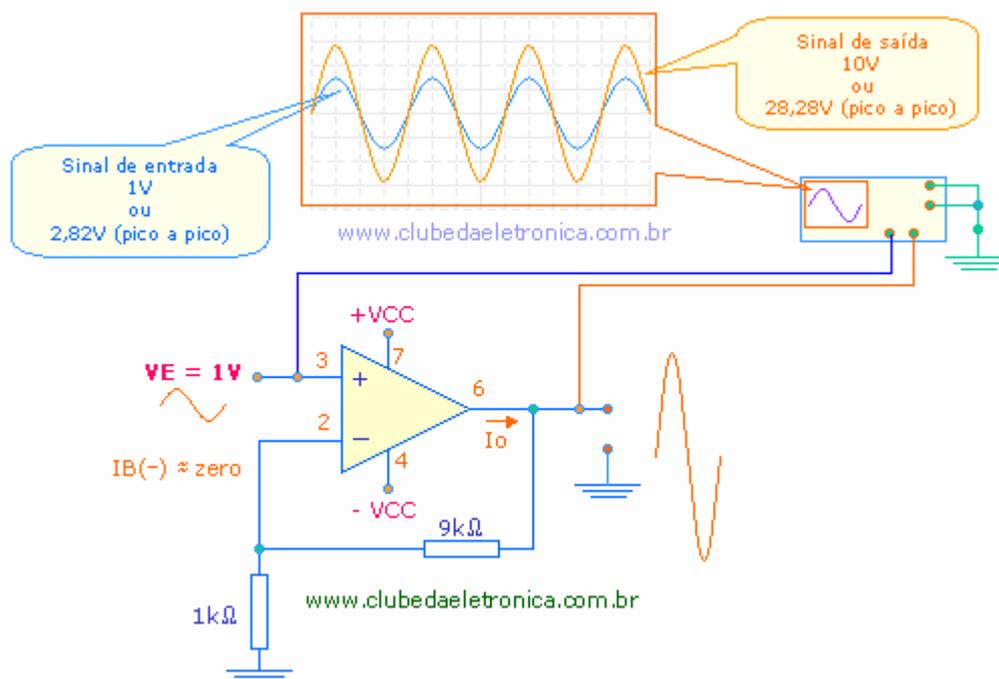


Figura 1.24 – Verificando os sinais de saída e entrada

Reforçadores de corrente

A folha de dados do AOP LM 741C especifica que a corrente de saída máxima (lout máxima) é de 25mA. Assim, alguns cuidados devem ser tomados ao especificar o ganho e a carga.

Exemplo:

Um circuito não inversor foi configurado para um ganho de tensão 10, a tensão de entrada é de 1V. É possível ligar uma carga de 50Ω, diretamente à saída deste circuito?

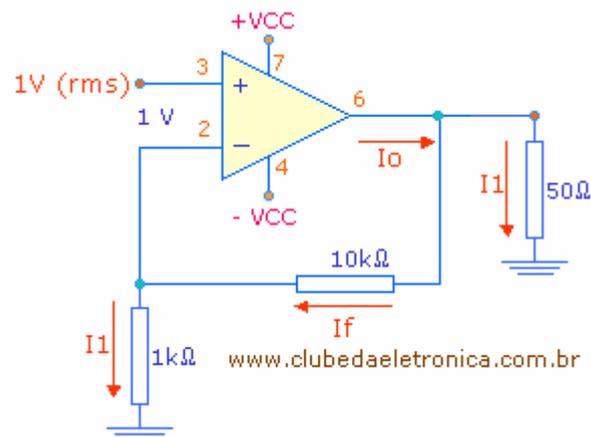


Figura 1.25 – Analisando os efeitos de dreno de corrente excessivo

Solução:

Encontrando $I_1=I_F$

$$I_F = I_1 = V_E \div R_1$$

$$I_F = I_1 = 1V \div 1k\Omega$$

$$I_F = I_1 = 1mA$$

A tensão na carga:

$$V_S = [(R_f \div R_1) + 1] \cdot V_E$$

$$V_S = [(10k\Omega \div 1k\Omega) + 1] \cdot 1V$$

$$V_S = 11V$$

A corrente na carga:

$$I_L = V_S \div R_L$$

$$I_L = 11V \div 50\Omega$$

$$I_L = 220mA$$

E finalmente a corrente de saída do AOP:

$$I_O = I_F + I_L$$

$$I_O = 1mA + 220mA$$

$$I_O = 221mA$$

Essa situação não seria possível na prática, pois o AOP seria destruído.

“Boosters” - Reforçadores de corrente

O circuito acima mostra claramente que o operacional será destruído, caso o projetista tente drenar mais corrente que ele suporta. Uma das maneiras de solucionarmos tal problema é adicionando ao circuito reforçador de corrente ou boosters.

Circuito reforçador simples

No circuito reforçado, representado pela figura 26, o AOP não mais precisa fornecer corrente à carga e sim para a base do transistor, esta será amplificada β_{DC} vezes.

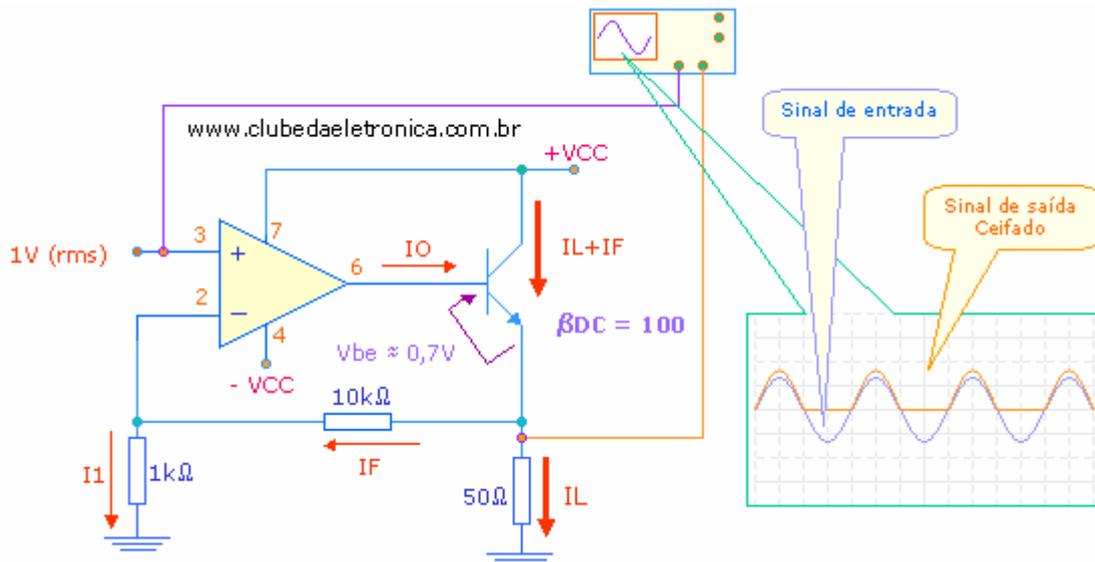


Figura 1.26 – O circuito não inversor reforçado

Encontrando $I_1 = I_F$

$$I_F = I_1 = V_E \div R_1$$

$$I_F = I_1 = 1V \div 1k\Omega$$

$$I_F = I_1 = 1mA$$

A tensão na saída do AOP:

$$V_S = [(R_f \div R_1) + 1] \cdot V_E$$

$$V_S = [(10k\Omega \div 1k\Omega) + 1] \cdot 1V$$

$$V_S = 11V$$

A tensão na carga:

$$V_{carga} = V_S - V_{be}$$

$$V_{carga} = 11V - 0,7V$$

$$V_{carga} = 10,3V$$

A corrente na carga:

$$I_L \approx I_{coletor} = V_{carga} \div R_L$$

$$I_L \approx I_{coletor} = 10,3V \div 50\Omega$$

$$I_L \approx I_{coletor} = 206mA$$

Assim, se o β_{DC} do transistor for de 100, temos:

$$\beta_{DC} = I_C \div I_B$$

$$100 = 206\text{mA} \div I_B$$

$$I_B = 2,06\text{mA}$$

Com pouca noção sobre transistores, é possível perceber que nosso sinal de saída terá seu lado negativo ceifado, isso ocorre porque o transistor NPN só conduz o semiciclo positivo. É óbvio que o projetista também deverá atentar as especificações do transistor.

O reforçador classe B

Uma forma de conseguir uma corrente de carga bidirecional é utilizar o seguidor de emissor push-pull classe B, assim cada transistor conduzirá meio ciclo. A realimentação negativa ajusta automaticamente os valores de V_{BE} .

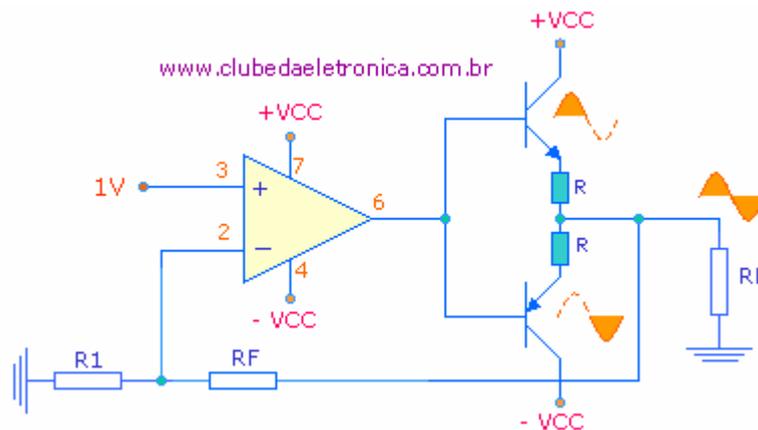


Figura 1.27 – O circuito não inversor reforçado com push-pull

Nota: Este tipo de configuração requer alguns cuidados, devemos colocar dois resistores de pouca resistência e alta potência a fim de limitar a corrente que circula pelos transistores. Os resistores deverão ser dimensionados de acordo com a capacidade de corrente da fonte.

O Amplificador inversor somador

Uma característica do amplificador operacional é poder amplificar simultaneamente sinais provenientes de diversas fontes.

O circuito somador básico

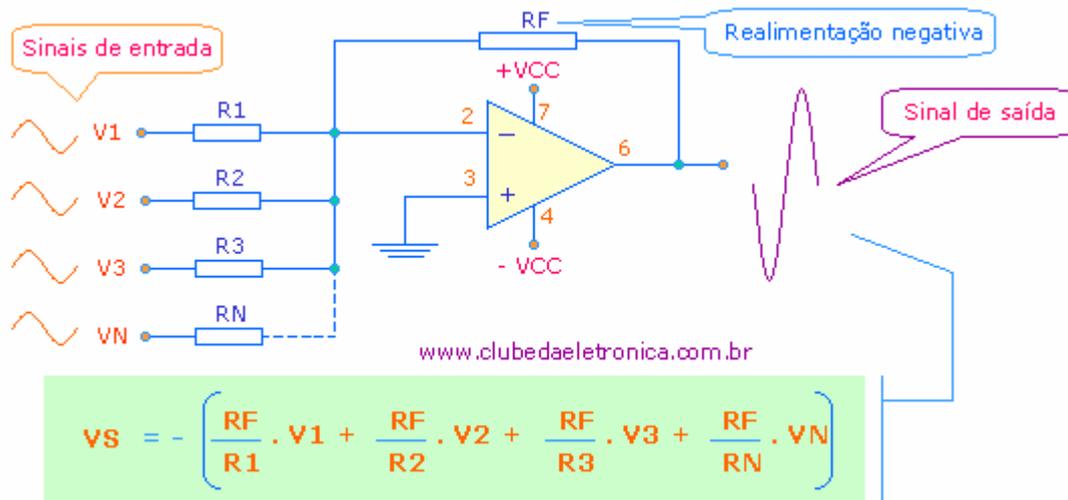


Figura 1.28 – O circuito somador inversor

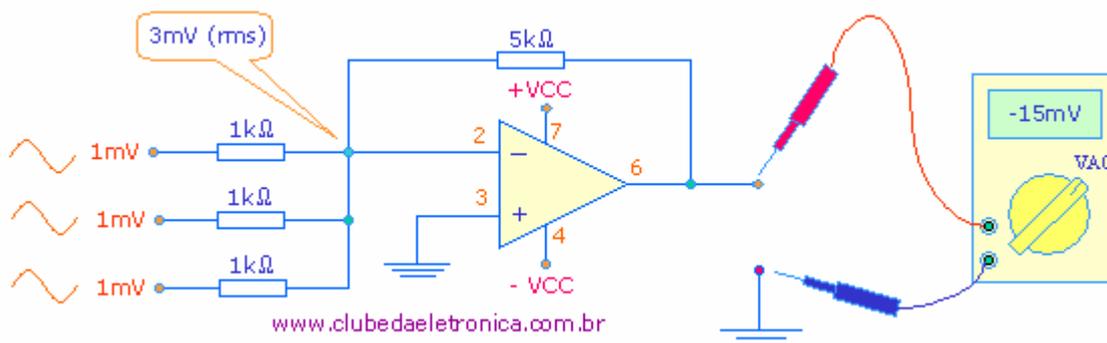


Figura 1.29 - Medindo o sinal de saída com multímetro.

Calculando o sinal de saída (multímetro)

$$V_S = - R_F \cdot [(V_1 \div R_1) + (V_2 \div R_2) + (V_3 \div R_3)]$$

$$V_S = - 5k\Omega \cdot [(1mV \div 1k\Omega) + (1mV \div 1k\Omega) + (1mV \div 1k\Omega)]$$

$$V_S = - 15mV$$

Calculando o sinal de saída (osciloscópio)

$$V_{S(Pico)} = V_{S(RMS)} \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{S(Pico)} = 15V_{(RMS)} \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{S(Pico)} = 21,21V$$

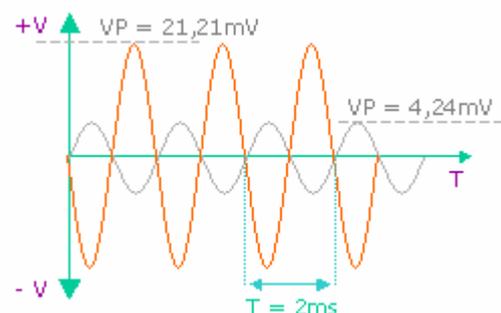


Figura 1.30 - Medindo a saída com osciloscópio

Circuito misturador de áudio – Mixer

Misturar sinais provenientes de diversas fontes ou instrumentos é de grande interesse para os amantes da música, principalmente eletrônica.

O circuito somador é capaz de misturar, amplificar e com alguns ajustes até conseguir gerar efeitos sonoros interessantes.

Os potenciômetros servem para gerar os efeitos individuais, os capacitores são para acoplamento.

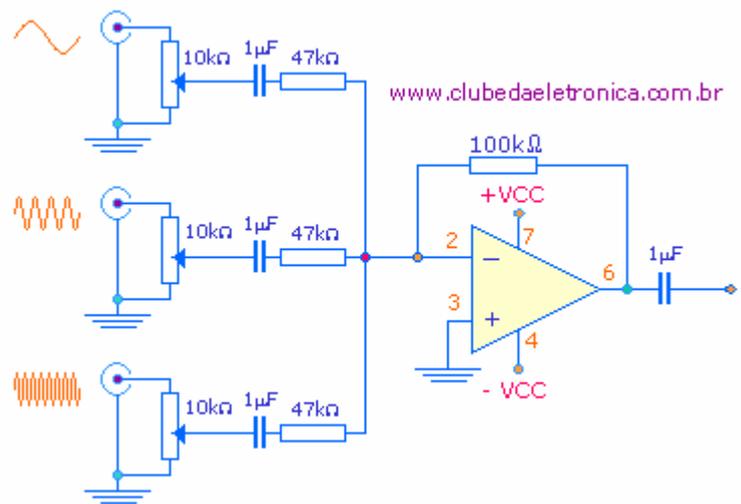


Figura 1.31 – Circuito misturador de áudio

Mais conceitos sobre AOPs

Entradas diferenciais e comuns

O amplificador operacional tem duas entradas, que podem ser usadas em modo diferencial ou em modo comum.

Em modo diferencial → O amplificador diferencial deve responder apenas a diferença de potencial que houver em suas entradas.

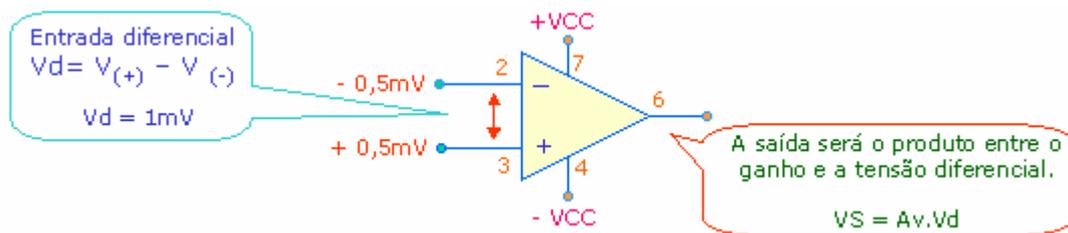


Figura 1.32 – Sinal diferença x sinal de saída

Em modo comum → O amplificador diferencial ideal não deve responder as entradas comuns, isso porque, não haverá diferença de potencial em suas entradas.

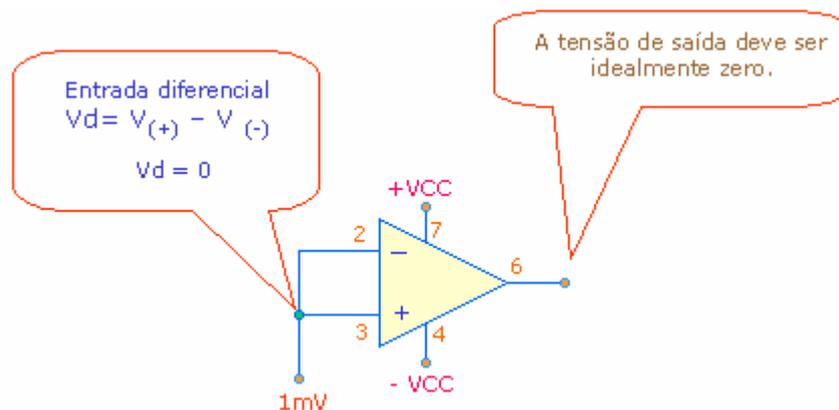


Figura 1.33 – Sinal comum x sinal de saída

Qual o interesse do projetista em utilizar as entradas em modo comum?

O amplificador operacional capta sinais indesejados em modo comum. Assim, amplificador operacional ideal irá eliminar qualquer interferência comum as suas entradas e amplificar apenas a diferença entre suas entradas.

RRMC ou CCMR (common mode rejection ratio).

Devido ao não casamento de impedâncias e diferença entre seus elementos internos, o amplificador operacional real, apresenta um ganho e, portanto, uma saída para entradas comuns.

O fabricante especifica em sua folha de dados a razão de rejeição em modo comum (RRMC), que é a capacidade que o operacional tem de eliminar sinais em modo comum.

$$RRMC = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{Ganho diferencial (Ad)}}{\text{Ganho modo comum (Ac)}} \right)$$

Exemplo:

Um amplificador operacional apresenta em sua folha de dados uma razão de rejeição em modo comum de 90 dB.

Assim,

$$RRMC = 20 \cdot \log (Ad \div Ac)$$

$$90\text{dB} \div 20 = \log (Ad \div Ac)$$

$$4,5\text{dB} = \log (Ad \div Ac)$$

$$(Ad \div Ac) = \text{Antilog } 4,5$$

$$(Ad \div Ac) = 31622,78$$

Isto significa que o sinal diferencial será amplificado 31622,78 vezes mais que o sinal comum ou indesejado.

O Amplificador subtrator

O Amplificador operacional configurado como subtrator é sem dúvida, o circuito mais usado em circuitos de instrumentação, principalmente para amplificar sinais de baixa amplitude, provenientes de sensores transdutores etc. Possui inúmeras vantagens:

- Pode amplificar sinais flutuantes (não aterrados)
- Pode operar como inversor ou não inversor
- Oferece maior imunidade à interferências devido a RRMC, ou seja, é ideal para ambientes de grande interferência.

O circuito subtrator básico

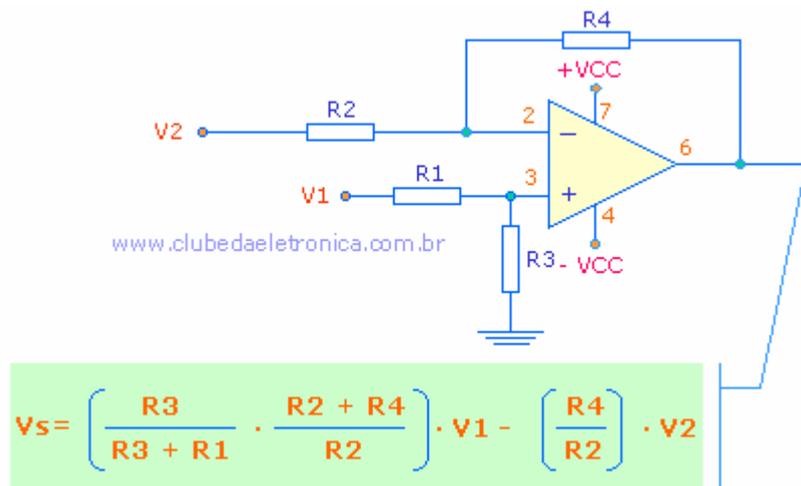


Figura 1.34 – circuito subtrator

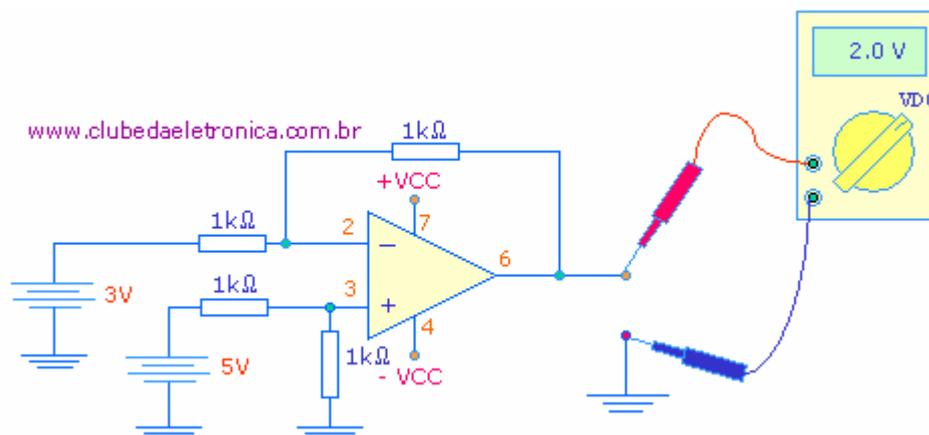


Figura 1.35 – Medindo o sinal de saída com multímetro.

O subtrator na instrumentação

O circuito abaixo é um subtrator simples, em suas entradas foi colocado um divisor resistivo alimentado por uma fonte de 12V. O sensor apresenta resistência $R_{(sensor)}$ que de ser igual a $P_{(ajuste)}$. Assim, $V1$ será igual a $V2$, um ajuste para eliminar ganhos em modo comum é necessário, então, finalmente a saída será zero.

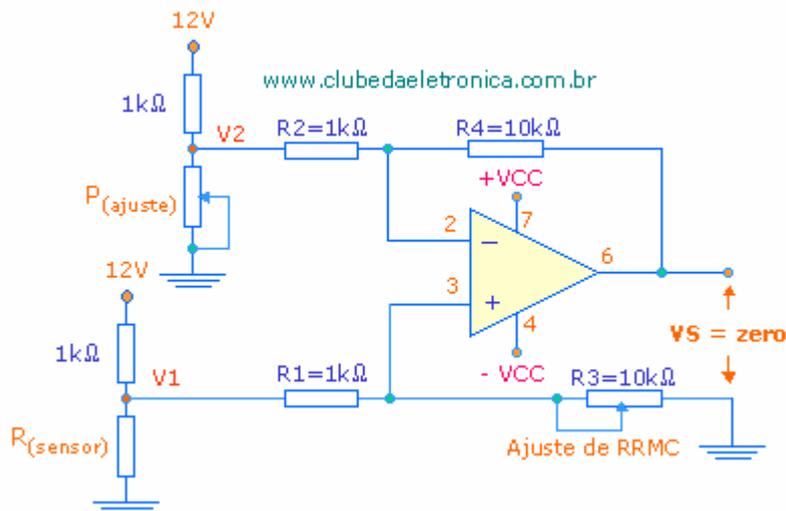


Figura 1.36 – capturando sinais de um transdutor.

Qualquer variação apresentada $R_{(sensor)}$ será detectada e amplificada 10 vezes (valor determinado pelo projetista), podendo ligar ou desligar um outro circuito.

O circuito buffer

O buffer é um seguidor de tensão, não amplifica não inverte fase ou polaridade, talvez por essa razão muitos não lhe dêem o devido valor.

O circuito buffer básico

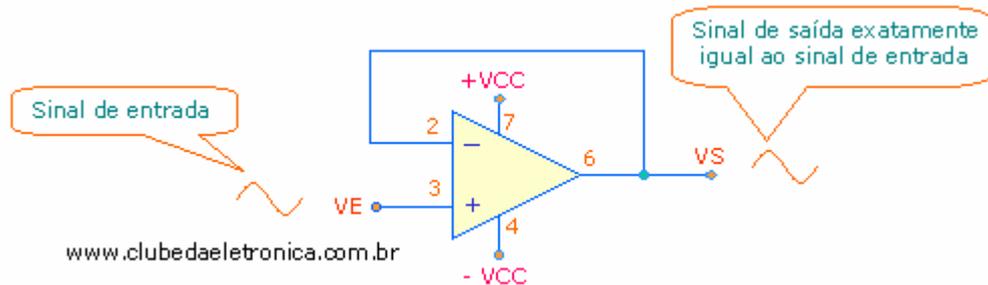


Figura 1.37 – Buffer.

Na verdade, o buffer deve ser usado como interface entre circuitos com alta impedância e cargas com baixa impedância. Isto porque, se ligarmos uma fonte de alta impedância a uma carga de baixa impedância o maior parte do sinal ficará sobre a impedância da fonte. O buffer eleva a impedância reduzindo as perdas no sinal.

A maior recompensa do nosso trabalho não é o que nos pagam por ele, mas aquilo em que ele nos transforma.
(John Ruskin)

www.clubedaeletronica.com.br

Referências bibliográficas

- ❑ Pertence, A. Amplificadores Operacionais – 5ª edição. São Paulo: Makron Books, 1996.
- ❑ Gluiter, A .F. Amplificadores Operacionais fundamentos e aplicações. São Paulo: McGraw Hill , 1988.
- ❑ Malvino, A.P. Eletrônica - volume II. São Paulo: Makron Books, 1997.
- ❑ Boylestad, R. e Nashelsky, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos. R. Janeiro: Prentice-Hall, 1994.
- ❑ O' Marley, John. Análise de circuitos - 2ª edição. São Paulo: Makron Books, 1994.
- ❑ Lalond, D.E. e Ross, J.A. Princípios de dispositivos e circuitos eletrônicos. São Paulo: Makron Books, 1999.
- ❑ Notas de aula: Professor: Álvaro Murakami, 1991.
- ❑ Handbook of operational amplifier applications – Texas Instruments