

AMPLIFICADORES OPERACIONAIS APLICADOS À INDÚSTRIA

A necessidade da leitura de pequenos sinais analógicos (provenientes de sensores e transdutores) é muito comum no meio industrial. Temperatura, umidade e campos eletromagnéticos são apenas alguns dos fatores que influenciam o funcionamento de uma máquina. Por outro lado, é incrível como, com apenas um pequeno amplificador operacional podemos monitorar essas grandezas, e gerar pequenos sinais de controle muito úteis ao técnico (ou usuário).

Quando falo sobre esse assunto estou me referindo a relação custo-benefício de um instrumento dedicado à análise de uma grandeza, e um pequeno circuito que pode ser tão eficiente quanto ele (dependendo do caso).

Por exemplo: Qual é o instrumento clássico para medir-se EMI? Resposta: O analisador de espectro.

Segunda pergunta: Você precisa, efetivamente, medir a EMI, ou apenas detectar se ela está ou não em um nível aceitável?

Bom, se o caso for "medir" a EMI, você precisa de um analisador de espectro (que pode custar cerca de U\$ 10.000,00), mas, se você necessita apenas verificar se o nível de EMI é ou não aceitável, um pequeno circuito de U\$ 10,00 poderá resolver o caso.

O objetivo deste artigo é proporcionar ao leitor algumas idéias práticas utilizando amplificadores operacionais, que podem resolver vários problemas comuns na indústria de forma simples e, principalmente, econômica. Para que o leitor possa aproveitar melhor essas idéias, vamos fazer antes uma revisão objetiva sobre amplificadores operacionais. Boa leitura!



Alexandre Capelli

DEFINIÇÃO DE AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O amplificador operacional (que doravante será chamado "A. O.") foi originalmente desenvolvido para executar operações matemáticas, daí o seu nome "operacional". Com o surgimento da tecnologia digital, esse tipo de utilização deixou de ser interessante; por outro lado, o A.O tornou-se um dos principais componentes para tratamento de sinais analógicos.

A idéia do amplificador operacional é antiga. Na época das válvulas, um amplificador operacional era construído com 14 válvulas triodo. Com o desenvolvimento dos semicondutores, alguns A.Os eram circuitos formados por 20 transistores e algumas dezenas de outros componentes. As pesquisas para o desenvolvimento de um circuito integrado como amplificador operacional ganharam ênfase na corrida espacial. Em 1967, a Fairchild construiu o primeiro A. O como um CI: o μ A 702. Esse foi o primeiro A.O a ir para a Lua, em 1969.

Pouco tempo depois, a National aperfeiçoou o projeto, e criou o μ A 709, mais versátil e robusto. Na época, esse CI era vendido por US\$ 75, 00 cada!

Na verdade, várias empresas tomaram parte no desenvolvimento do amplificador operacional. Dentre elas podemos citar: Zeltex; Burr-Brown; Nexus; Philbrick; Fairchild; e National.

Atualmente podemos encontrar centenas de tipos de amplificadores operacionais no mercado, e a maioria deles custa menos de US\$ 1,00.

Uma das aplicações mais comuns para o A. O é como conversor analógico / digital, que é o "elo" entre os sinais analógicos externos (sensores) e a CPU.

Fisicamente, o A.O é um circuito integrado utilizado como "amplificador" de tensões. O símbolo do A.O pode

e_1 = entrada não inversora
 e_2 = entrada inversora

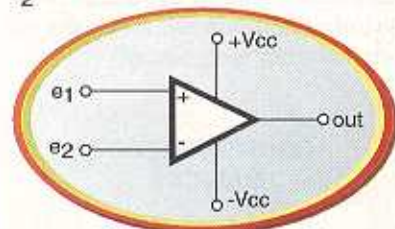


Fig. 1 - Símbolo do amplificador operacional.

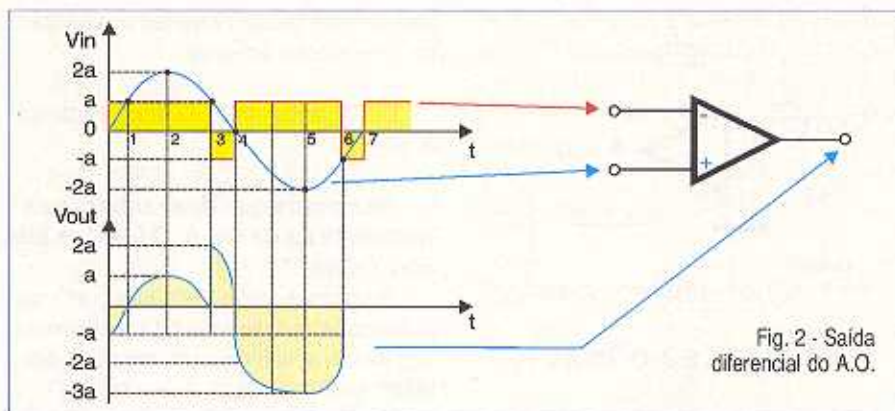


Fig. 2 - Saída diferencial do A.O.

ser visto na **figura 1**, onde também encontramos a descrição dos seus pinos básicos.

Elétricamente, o A.O comporta-se como um amplificador diferencial, isto é, sua saída é dada pela expressão: $V_o = A (V_{(+)} - V_{(-)})$, onde:

V_o = tensão de saída

A = ganho

V_{+} = tensão da entrada não inversora

V_{-} = tensão da entrada inversora.

Nos próximos tópicos deste artigo estudaremos as diversas formas de se calcular o ganho. Antes de abordá-los, entretanto, vamos analisar o comportamento dinâmico de um A.O através do exemplo da **figura 2**.

A entrada V_{+} (não inversora) tem uma fonte de tensão senoidal, já a entrada V_{-} (inversora) é alimentada com um sinal quadrado.

Suponha que o ganho para essa configuração seja 1 ($A = 1 \rightarrow$ não amplifica e nem atenua a tensão). Como seria a forma-de-onda na saída?

Para responder essa questão vamos decompor em pontos as duas formas-de-onda da entrada do A. O, em função dos pontos de intersecção e máximos (ou mínimos). Para cada ponto vamos utilizar a expressão tensão de saída do A. O:

$$V_o = A (V_{+} - V_{-}).$$

Como o ganho (A) é unitário, então teremos: $V_o = V_{(+)} - V_{(-)}$.

Ponto 0:

Iniciaremos nossa análise pela origem dos eixos coordenados.

Nesse ponto o valor da entrada não inversora é 0 V, e a entrada inversora é igual a "a" volts.

Aplicando a expressão $V_o = A (V_{(+)} - V_{(-)})$ teremos: $V_o = 1 (0 - a) = -a$.

A saída para o ponto 0, portanto, é igual a $-a$.

Ponto 1:

No ponto 1 temos $V_{+} = a$, e $V_{-} = a$, portanto: $V_o = (a - a)$

$$V_o = 0 \text{ V.}$$

Ponto 2:

O ponto 2 apresenta $V_{+} = 2a$, e $V_{-} = a$, portanto: $V_o = 1 (2a - a)$

$$V_o = a.$$

Ponto 3:

Novamente temos $V_{+} = a$, e $V_{-} = -a$, portanto: $V_o = 1 (a - (-a))$

$$V_o = 2a.$$

Ponto 4:

O ponto 4 tem $V_{+} = 0$, e $V_{-} = a$, portanto: $V_o = 1 (0 - a)$

$$V_o = -a.$$

Ponto 5:

No ponto 5 temos uma situação invertida quanto a polaridade, isto é, $V_{+} = -2a$, e $V_{-} = a$, portanto: $V_o = 1 (-2a - a)$

$$V_o = -3a.$$

Ponto 6:

Temos $V_{+} = -a$, e $V_{-} = -a$, portanto: $V_o = 1 (-a - (-a))$

$$V_o = 0 \text{ volts.}$$

A análise dos demais pontos será análoga.

Cabe lembrar que a configuração para ganho unitário não é a apresentada na **figura 3**, conforme veremos mais adiante.

O ganho 1 foi atribuído apenas para facilitar o entendimento do comportamento dinâmico de um A. O, tendo em vista sua natureza diferencial.

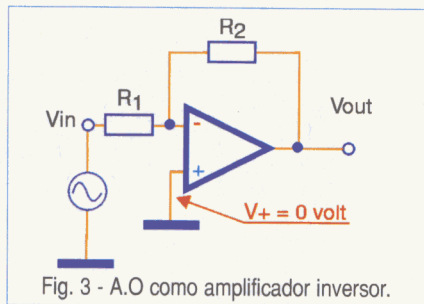


Fig. 3 - A.O como amplificador inversor.

A.O IDEAL E A.O REAL

Quando utilizamos A.Os, sempre os consideramos como componentes ideais, isto é, sem perdas, limitações de frequência ou ganho. Embora o componente real possua limitações físicas, elas não são significativas na “lógica” do projeto, mas sim, na escolha do melhor tipo de amplificador operacional. Para melhor compreensão desse conceito, vamos analisar as características do A. O ideal.

A) O A.O ideal deve ser um componente linear, isto é, não saturar. Essa é a razão pela qual sua tensão de saída é expressa por: $V_o = A (V(+)-V(-))$. Tal expressão não é válida nos pontos de saturação. Para que o A. O seja puramente linear, ele deve amplificar apenas a diferença dos sinais da entrada, e nunca o sinal comum às duas.

Essa característica, que será estudada neste artigo, denomina-se CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) ou razão de rejeição de modo comum.

B) A impedância de entrada de um A.O ideal é infinita, isto é, $Z_i = \infty$.

Isso significa que não há consumo de corrente pelas entradas do A.O, fazendo com que esse componente não interfira nos sinais aplicados a ele. Apenas como exemplo prático, essa é uma característica fundamental nos circuitos utilizados na instrumentação eletrônica.

C) O A. O ideal tem impedância de saída nula, ou seja $Z_{out} = 0$. Fisicamente, isto quer dizer que, independentemente da intensidade da corrente elétrica drenada pela sua saída, não haverá queda de tensão interna no A.O.

D) A resposta em frequência de um A. O ideal deve ser ilimitada, isto é,

seu ganho não deve variar em função da frequência do sinal.

E) O ganho do A. O ideal é infinito $A = \infty$.

“Mas, para que devo saber as características de um A. O ideal se ele não existe?”

Dependendo da aplicação, uma ou outra característica do A.O real é mais significativa. Vamos a um exemplo prático:

Características do A. O 741:

- razão de rejeição de modo comum = 90 dB
- impedância de entrada (Z_{in}) $\cong 10^7 \Omega$
- impedância de saída (Z_{out}) $\cong 75 \Omega$
- frequência média de trabalho $\cong 100$ kHz
- ganho = 200. 000.

Notem que nenhum dos parâmetros apresenta o valor ideal, mas mesmo com as limitações de um A.O real, podemos escolher o tipo mais indicado para nossa aplicação, tendo como referência os valores ideais.

Ainda falando sobre exemplos práticos, imaginem um circuito que deva operar em 1 GHz. Com certeza, o CI 741 não é o componente indicado para esse circuito, e nesse caso um A.O para frequências mais altas seria necessário. Por outro lado, se estivéssemos monitorando um sensor Hall em 10 kHz, e que fornecesse 1 mV de saída, para um circuito de leitura operando com 10 V, o CI 741 serviria para amplificar esse sinal em 10.000 vezes para estabelecer um elo entre essas etapas.

GANHO DO A. O E TERRA VIRTUAL

Um dos conceitos “polêmicos” nos cursos de Eletrônica é o “terra virtual”, também conhecido como “curto-circuito virtual”. Por experiência própria, sei que esse tópico costuma transformar parte da nota nas avaliações de eletrônica aplicada em uma parcela também “virtual”.

Para uma melhor compreensão desse assunto, vamos considerar o A. O como sendo ideal, portanto, a expressão: $V_o = A (V(+)-V(-))$ é válida, o que significa que ele é um compo-

nente perfeitamente linear.

Como já dissemos anteriormente, para um A..O ideal o ganho é infinito ($A = \infty$). Por outro lado, uma outra forma de escrever a expressão da tensão de saída do A.O é

$$V(+)-V(-) = \frac{V_o}{A}$$

Como $A = \infty$, e qualquer número dividido por infinito tende a zero, teremos:

$$V(+)-V(-) = \frac{V_o}{\infty} \cong 0.$$

E, portanto: $V+ = V-$.

“Mas, o que isso tem a ver com terra ou curto-circuito virtual?”

Ora, pelos cálculos acima podemos notar que o potencial da entrada não inversora ($V+$) é igual ao da inversora ($V-$).

Elétricamente, quando um ponto do circuito tem o mesmo potencial de outro ponto é porque eles estão ligados, ou seja, em curto-circuito.

Normalmente, quando colocamos dois pontos de um circuito em “curto” temos uma corrente circulando. Aliás, esse é o conceito de curto-circuito, isto é, a presença de uma corrente elétrica no condutor na ausência de diferença de potencial ($ddp = \text{tensão} = 0$). Porém, na prática, observamos que não há corrente circulando entre as entradas do A. O, e esse é justamente o motivo pelo qual atribuiu-se o termo “curto-circuito virtual”, pois embora com as entradas em “curto”, não há corrente. Outro modo de analisar esse fenômeno pode ser visto através da **figura 3**.

Como veremos mais adiante, esse circuito é um amplificador inversor, uma configuração muito utilizada nos circuitos eletrônicos em geral. Notem que a entrada não inversora ($V+$) está aterrada, portanto, $V+ = 0$. Mais uma vez aplicamos o termo “virtual”, visto que embora essa entrada tenha o mesmo potencial do terra (zero volt), não temos corrente circulando por ela, portanto é um “terra virtual”.

CONFIGURAÇÕES BÁSICAS

Os amplificadores operacionais podem operar em uma enorme varie-

dade de configurações. As mais comuns são: amplificador inversor; não inversor; somador; integrador; diferenciador; e comparador.

A) Amplificador inversor:

A **figura 4** mostra como devemos ligar um A.O para que ele funcione como amplificador inversor.

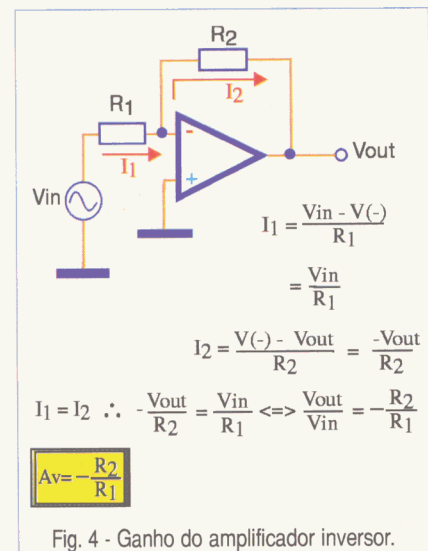


Fig. 4 - Ganho do amplificador inversor.

Nessa configuração, seu ganho é dado por $-R_2/R_1$, e o sinal negativo significa que há uma inversão de fase de 180° da saída em relação a entrada.

Aplicando ainda o conceito de curto-circuito ou terra virtual, fica fácil entender o porque do ganho (A) pode ser expresso por $-R_2/R_1$.

Entende-se por ganho de tensão de um amplificador a razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada, isto é,

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Como a impedância de entrada do A. O pode ser considerada infinita (na prática ela varia de 10^5 a $10^{12} \Omega$), a corrente da fonte de tensão V_{in} produz uma corrente (I_1) que é igual a I_2 . Por sua vez a corrente I_1 , pode ser expressa (lei de Ohm) por

$$I_1 = \frac{V_{in} - V(-)}{R_1} = \frac{V_{in}}{R_1}$$

$$V(-) = 0.$$

Analogamente

$$I_2 = \frac{V(-) - V_{out}}{R_2} = \frac{-V_{out}}{R_2}$$

$$V(-) = 0 \text{ ("terra virtual").}$$

Como I_1 é igual a I_2 , teremos:

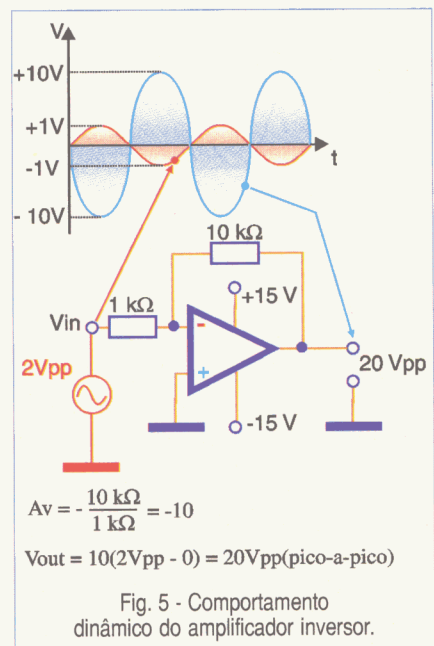
$$\frac{V_{in}}{R_1} = \frac{-V_{out}}{R_2}$$

$$\text{e portanto } \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$\text{onde } \frac{V_{out}}{V_{in}} = \text{ganho} = A.$$

“Como um A. O na configuração de amplificador inversor comporta - se dinamicamente?”

Observando a **figura 5** podemos ver um exemplo prático onde o A. O, alimentado com uma fonte simétrica de ± 15 V, possui um sinal de entrada alternado de 2 Vpp aplicado a sua entrada inversora. Notem que a forma-de-onda da saída, amplificada em 10 x, está defasada de 180° em relação a entrada. Essa é a principal característica da entrada inversora.

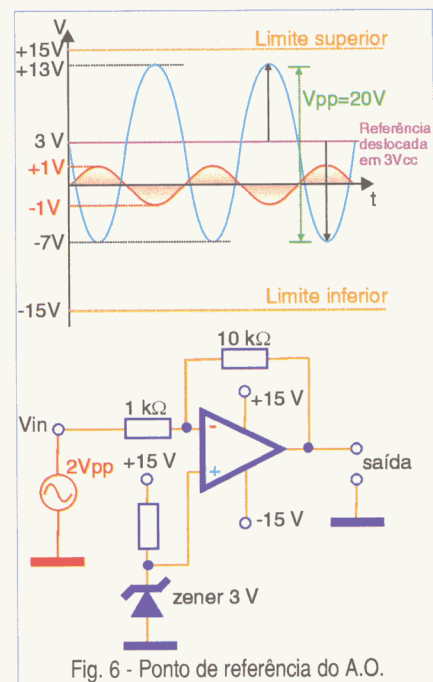


Outro fator muito importante a ser considerado quando desenvolvemos circuitos com amplificadores operacionais é o ponto de referência. O ponto de referência de um A. O depende do potencial aplicado a sua entrada não inversora. Aliás, alguns autores atribuem o nome dessa entrada como entrada de referência.

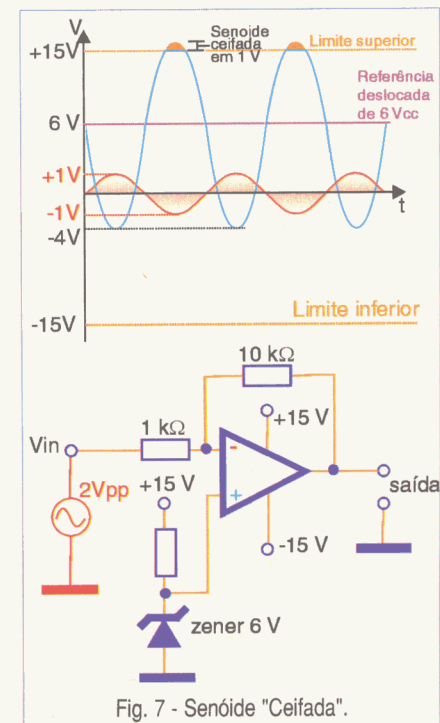
A **figura 6** ilustra o mesmo exemplo da **figura 5**, porém, operando com uma nova referência de 3 V.

Podemos notar que o ganho, defasagem e forma-de-onda da saída

permanecem os mesmos, entretanto, a saída agora tem um nível CC de 3 V agregado, isto é, sua referência (*threshold*) agora é 3 Vcc, e não mais 0 volt.



A referência do A. O deve ser cuidadosamente analisada no desenvolvimento de circuitos, pois ela está “intimamente”ligada ao limite da tensão de saída do amplificador operacional. A **figura 7** mostra como a forma-de-onda de saída ficaria se o circuito da **figura 6** tivesse uma referência de 6 Vcc (ao invés de 3 Vcc).



Notem que a senóide de saída foi “ceifada”, pois ultrapassou o limite superior de alimentação do A. O.

Na prática, o A. O real possui uma limitação da tensão de saída ligeiramente menor que sua alimentação (aproximadamente $2 V_{cc}$). Isso ocorre devido a perda interna do componente (impedância de saída).

B) Amplificador não inversor:

O amplificador não inversor é outra configuração muito utilizada na eletrônica. As principais características desse circuito são: Sinal de saída em fase com a entrada, e o ganho nunca pode ser menor do que 1.

Aplicando sinais pela entrada não inversora, a saída amplificada estará em fase com a entrada, e o ganho dessa configuração é dado por:

$$A_v = 1 + R_2/R_1$$

Notem pela fórmula que, por menor que seja a razão R_2/R_1 (zero, por exemplo), o ganho permanecerá (no mínimo) unitário. Esse tipo de circuito, portanto, não pode atenuar sinais (A_v menor que 1).

Observando a **figura 8**, e considerando o A. O como ideal, ao aplicarmos o conceito de “curto-circuito virtual”, fica bem fácil determinarmos a expressão do ganho.

Como $I_1 = I_2$ (impedância de entrada do A. O infinita), e $I_+ = 0$ (pela mesma razão), temos:

$$I_1 = \frac{0 - V_{in}}{R_1} = -\frac{V_{in}}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_{in} - V_{out}}{R_2} = \frac{V_{in} - V_{out}}{R_2}$$

$$-\frac{V_{in}}{R_1} = \frac{V_{in} - V_{out}}{R_2}$$

$$-\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_{in} - V_{out}}{V_{in}}$$

$$-\frac{R_2}{R_1} = +1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

A **figura 9** apresenta um exemplo

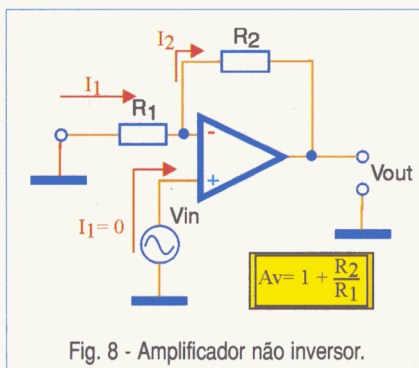


Fig. 8 - Amplificador não inversor.

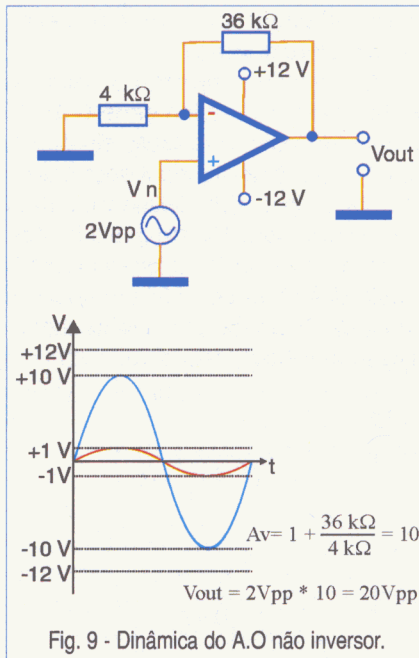


Fig. 9 - Dinâmica do A.O não inversor.

do comportamento dinâmico dessa configuração.

“Como posso atenuar um sinal sem inverter sua fase em relação a entrada?”

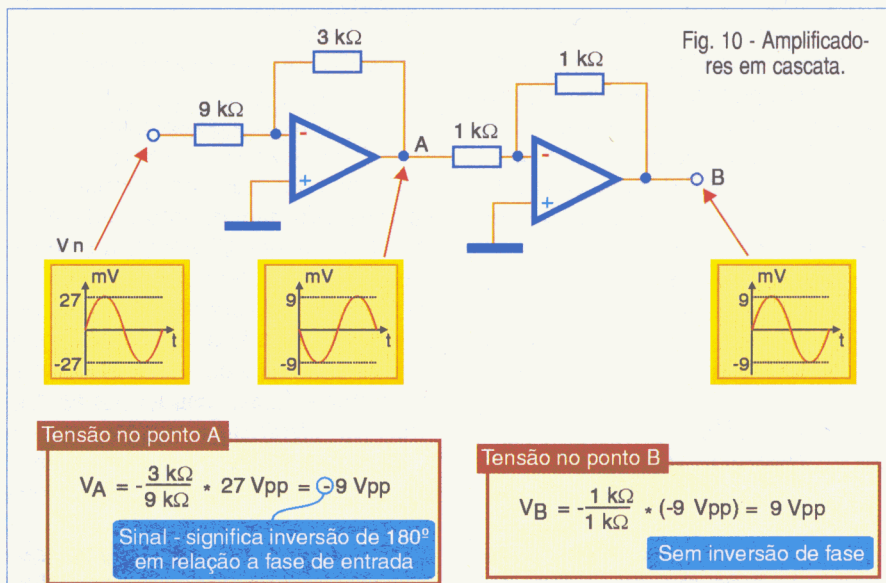


Fig. 10 - Amplificadores em cascata.

Tensão no ponto A

$$V_A = -\frac{3 \text{ k}\Omega}{9 \text{ k}\Omega} \cdot 27 \text{ Vpp} = -9 \text{ Vpp}$$

Sinal - significa inversão de 180° em relação a fase de entrada

Tensão no ponto B

$$V_B = -\frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \cdot (-9 \text{ Vpp}) = 9 \text{ Vpp}$$

Sem inversão de fase

Nem sempre (aliás, quase nunca!), conseguimos “tratar” um sinal conforme desejado com apenas um A.O.

Imaginem que em determinado circuito o sinal de saída deva ser 1/3 do sinal de entrada, e com mesma fase.

Como o sinal de saída deve ser menor que o sinal de entrada, significa que nosso amplificador deve funcionar como atenuador, ou seja, seu ganho deve ser menor que 1. Imediatamente, sabemos que uma configuração não inversora não poderá ser utilizada, pois seu ganho mínimo é igual a 1 ($A_v = 1 + R_2/R_1$, portanto, mesmo que R_2 seja zero, A_v será igual a 1).

Por outro lado, a configuração inversora pode assumir valores de ganho menores que 1 ($A = -R_2/R_1$), porém a saída do sinal será defasada de 180° em relação a entrada.

Isoladamente, nenhuma delas serve. A **figura 10** mostra como podemos resolver o problema de modo bem simples, utilizando dois operacionais em cascata (saída de um na entrada de outro). Notem que o primeiro deles tem o ganho igual a 1/3, o que atende a primeira necessidade do “projeto”.

Embora com o sinal atenuado devidamente (ponto A), sua fase está invertida. Para voltar à mesma fase do sinal de entrada, basta invertê-la novamente.

A segunda etapa do circuito faz exatamente isso, pois trata-se de um amplificador inversor com ganho unitário. A tensão no ponto B está atenuada (1/3 da tensão de entrada), e com mesma fase.

C) Comparador de tensão:

Nós já podemos concluir que, para controlarmos o ganho do operacional, temos que ter um resistor de realimentação (R_2).

A razão entre esse resistor e o resistor de entrada (R_1) determina o ganho do circuito.

Quando construímos configurações desse tipo, dizemos que o circuito está em "malha fechada".

Fica fácil entender como o ganho de um amplificador operacional torna-se infinito ("idealmente" falando) na ausência do resistor de realimentação R_2 , isto é, em "malha aberta". A **figura 11** fornece um exemplo de um amplificador inversor utilizado em malha aberta. O ganho dessa configuração é $-R_2/R_1$, portanto não havendo R_2 , significa que R_2 tem resistência infinita ($R_2 = \infty$). O ganho, então, é igual a $-\infty$.

Independente do valor de R_1 , o ganho será sempre infinito, pois infinito dividido por qualquer número continua sendo infinito. Ora, dinamicamente, como o ganho é infinito, então, a tensão de saída também tenderá a infinito pois $V_{out} = V_{in} \cdot A_v$, e $A_v = \infty$.

Portanto: $V_{out} = V_{in} = \infty \Leftrightarrow V_{out} = \infty$.

E o que significa saída com tensão infinita para o A.O?

Significa que o limite da tensão de saída será estabelecido pela fonte-de-alimentação do A. O. Resumindo, quando um A. O está em malha aberta, na sua saída, ou temos a tensão mínima da fonte, ou a tensão máxima. Nesse caso o A. O trabalha como um transistor no corte ou saturação. Nesses pontos o A. O deixa de ser um componente linear.

Ainda no exemplo da **figura 11** podemos notar que o fator determinante para a saída estar em $+V_{cc}$ ou zero volt é o maior potencial aplicado

em cada entrada. Caso o maior potencial seja o da entrada não inversora, a saída estará em $+V_{cc}$, caso o maior potencial seja o da entrada inversora, a saída estará em $-V_{cc}$ (ou zero volt para fontes não simétricas).

Essa configuração é muito útil, pois podemos estabelecer a tensão de saída, segundo uma comparação de duas tensões na entrada do A. O. Esse é o motivo pelo qual o nome da configuração em malha aberta é "comparador de tensão".

Notem que a tensão adotada como referência no exemplo foi $1V_{cc}$. Toda vez que o sinal senoidal aplicado na entrada inversora assumir valores maiores que $1V_{cc}$, a saída do operacional estará em 0 volt.

Toda vez que esse sinal for inferior a $1V_{cc}$, a saída estará em $5V_{cc}$.

Além de comparar duas tensões, essa configuração converte sinais analógicos em digitais.

O próprio circuito da **figura 11** é (na essência) um conversor A/D de 1 bit.

Como não existe um A.O ideal, pode-se notar que a transição de 0 para $5V$, na realidade, não ocorre de imediato. O tempo que o A.O demora para responder a variação do sinal gera uma inclinação (rampa) nas bordas da forma-de-onda. Essa característica é denominada "slew-rate" (taxa de inclinação), e quanto menor ela for, maior a frequência que o componente poderá trabalhar. Ainda levando em conta as limitações do A.O real em relação ao ideal, se montássemos o circuito da **figura 11** de fato, observaríamos que nunca a tensão de saída atingiria $5V_{cc}$. Na verdade, ela seria ligeiramente menor, pois, devido a impedância de saída, temos algumas perdas internas no A.O.

O "tamanho" dessa perda depende do tipo e do fabricante do componente.

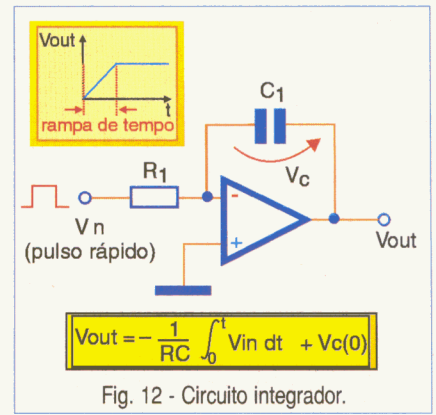


Fig. 12 - Circuito integrador.

D) Integrador:

A **figura 12** ilustra um circuito muito utilizado na indústria, que é o amplificador integrador. Podemos notar que, no lugar do resistor de realimentação, temos um capacitor. Isso significa que no decorrer do tempo, o ganho dessa configuração mudará, pois, inicialmente, o capacitor está descarregado. Quando o capacitor está descarregado ele comporta-se como um curto-circuito, isto é, $R_2 = 0 \Omega$. Porém, aos poucos, ele inicia o processo de carga, e sua "resistência" aumentará segundo uma constante de tempo dada por $1 / \omega RC$.

Fisicamente, é como se ao invés de colocarmos um resistor fixo R_2 , colocássemos um potenciômetro R_2 , o qual teria sua resistência aumentada proporcionalmente à rotação do seu eixo. Dessa forma o ganho aumentará até atingir o valor de infinito, o que ocorrerá quando o capacitor estiver totalmente carregado.

A tensão de saída dessa configuração pode ser dada por

$$V_{out} = -1/RC \int V_{in} dt + V_c(0)$$

Na prática, esse circuito é muito utilizado nos acionamentos de motores elétricos, e faz parte das malhas de controle PI (Proporcional e Integral) e PID (Proporcional Integral e Diferencial), onde necessitamos que a potência não seja entregue de imediato ao motor, tanto na partida como na reversão do movimento. Com esse tipo de controle, podemos "atrasar" (através de uma rampa) o ganho da malha de controle, fazendo com que o motor parta de modo suave, respeitando as limitações elétricas da instalação, e as mecânicas da inércia da carga.

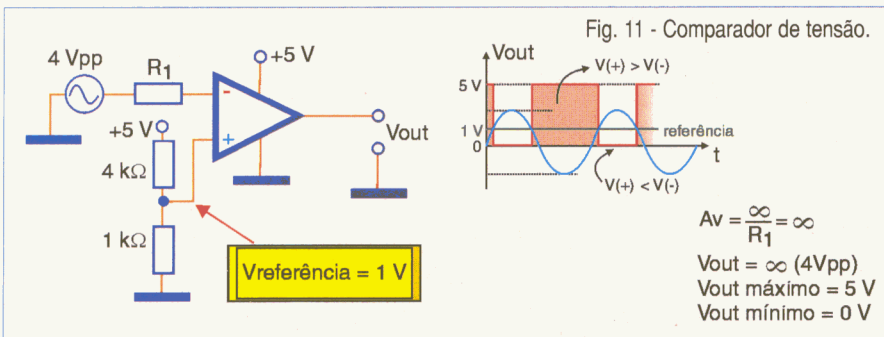


Fig. 11 - Comparador de tensão.

A **figura 13** mostra que o circuito integrador pode trabalhar nos acionamentos de motores tanto CA como CC. Notem que logo no início do processo, ocorre uma oscilação subamortecida, até que o acionamento encontre seu ponto ideal de operação.

E) Circuito diferenciador ou derivador:

O circuito diferenciador, também conhecido como derivador, tem uma característica muito interessante: o ganho depende da frequência do sinal de entrada.

O ganho desse circuito é expresso por $A_v = \omega RC$.

Como o capacitor (**figura 14**) encontra-se logo na entrada do circuito, quanto maior a frequência de entrada, tanto maior será o ganho, visto que a "impedância" do capacitor (que faz papel de R) diminui com o aumento da frequência.

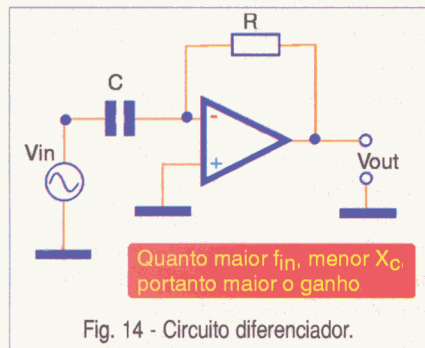


Fig. 14 - Circuito diferenciador.

Uma aplicação prática desse circuito é como conversor frequência / tensão, e seu grande problema é a sensibilidade a ruídos elétricos.

Cuidado para não confundir o circuito diferenciador (ou derivador) com o circuito amplificador de diferenças, que será estudado ainda neste artigo.

F) Circuito Somador:

A **figura 15** apresenta a penúltima configuração a ser analisada por este artigo, e trata-se do circuito somador. Como sempre fazemos, para determinar sua tensão de saída, basta termos em mente três conceitos básicos:

- Considerar o A.O como ideal ($A = \infty$);
- Curto-circuito, ou terra virtual ($V (+) = V (-) = 0$);
- Lei das correntes, de Kirchhoff.

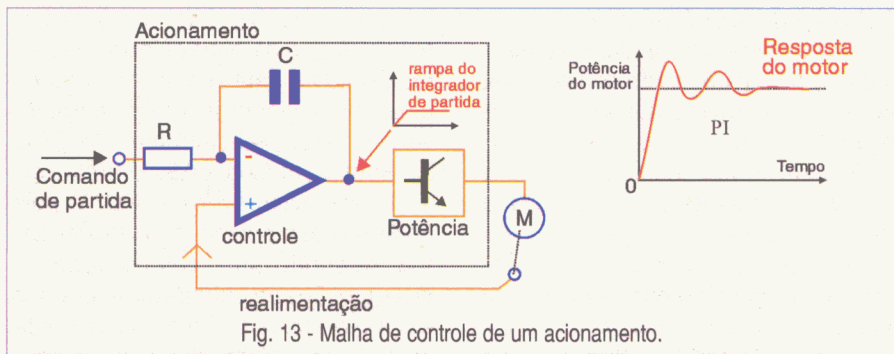


Fig. 13 - Malha de controle de um acionamento.

Pela lei de Kirchhoff (conservação das correntes pelo "nó"), temos:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = I$$

Como $U = R I$ (lei de Ohm), temos:

$$\frac{V_{in 1} - V(-)}{R_1} + \frac{V_{in 2} - V(-)}{R_2} + \dots + \frac{V_{in n} - V(-)}{R_n} = \frac{V(-) - V_{out}}{R_f}$$

O curto-circuito virtual nos diz que $V(-) = V(+)$, $V(-)$ é um terra virtual. Através desse conceito, podemos reescrever a equação acima do seguinte modo:

$$\frac{V_{in 1}}{R_1} + \frac{V_{in 2}}{R_2} + \dots + \frac{V_{in n}}{R_n} = - \frac{V_{out}}{R_f}$$

$$\text{Portanto } V_{out} = - \left(\frac{R_f}{R_1} V_{in 1} + \frac{R_f}{R_2} V_{in 2} + \dots + \frac{R_f}{R_n} V_{in n} \right)$$

Notem que cada entrada é somada as demais, amplificada com seu próprio ganho. Não esqueçam que o sinal negativo antes da expressão significa apenas a inversão da fase de saída em 180° em relação à entrada.

AMPLIFICADOR OPERACIONAL NA INSTRUMENTAÇÃO

O conceito de "instrumentação", quando analisado no meio industrial, é bastante amplo. Quando nos referimos a esse termo, não quer dizer que devamos ter um instrumento convencional (multímetro, osciloscópio, etc.) realizando determinada medida. Um sensor termopar ligado a entrada analógica de um PLC (por exemplo), para a indústria, é uma técnica de "instrumentação". Monitorar sinais de pequena amplitude (faixa dos mV) exige certos cuidados, principalmente se esses sinais estão em um ambiente industrial.

Por melhor que seja a instalação da planta industrial, seu ambiente é rico em interferências eletromagnéticas (EMI).

Os inversores de frequência, máquinas de eletroerosão, motores CC e CA, pontes rolantes, entre outros, são dispositivos comuns em uma indústria, e também geradores de dois principais tipos de EMI: a transmitida pela rede de alimentação, e a irradiada pelo ar.

Ambas podem induzir ruídos elétricos centenas de vezes maiores que o sinal que se pretende monitorar. Como se isso não fosse suficiente, a impedância de entrada do A. O é ex-

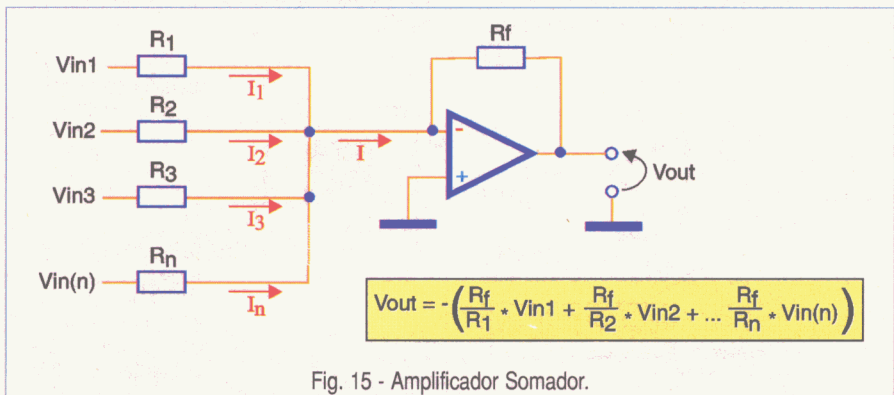


Fig. 15 - Amplificador Somador.

tremamente alta, o que o torna uma "porta aberta" para captação de ruídos.

"Como então utilizar o A. O na indústria sem que ele sofra com as interferências do ambiente?"

A resposta para essa pergunta será dada com análise de cinco principais aspectos: configuração a ser utilizada; tensão de *off-set*; circuitos em cascata; tipos de componentes, e cuidados na construção do circuito.

A) Configuração utilizada: Amplificador de diferenças

A figura 16 mostra um exemplo da leitura de um sensor "genérico" (sensor Hall, termopar, ou semelhante) cuja saída de tensão é da ordem de alguns milivolts.

Esse sensor está em um ambiente de alta EMI, que induz ruídos de 60 Hz de amplitude muito maior que o sinal do sensor.

Caso utilizássemos um A. O na configuração inversora (ou não inversora) convencional, o ruído seria amplificado em uma proporção muito maior que o sinal em questão, pois esse é de pequena amplitude.

O circuito amplificador de diferença, por sua vez, amplifica apenas a diferença dos potenciais aplicados em cada entrada. O ruído, por ser comum às duas entradas, desaparece. Essa propriedade denomina-se CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*), ou

TENSÕES SIMÉTRICAS

Até agora quase sempre analisamos o A. O funcionando com fontes simétricas, porém, caso a construção desse tipo de fonte seja inconveniente, alguns artifícios podem ser utilizados para que não haja deterioração do sinal.

A figura abaixo mostra um exemplo onde não temos fonte simétrica, porém seu sinal é recuperado sem problemas.

Como o valor mínimo é zero volt, caso deixássemos o ponto de referência (entrada não inversora V (+)) em zero volt, todo o semiciclo negativo seria perdido, o que acarretaria em uma grave distorção do sinal. A técnica é colocar a entrada de referência em $V_{cc} / 2$, através de um divisor resistivo.

Notem que, embora sem simetria, a senóide está íntegra na saída do operacional. O problema agora é que a senóide apresenta um nível DC de 10 V. Caso esse fosse um circuito de áudio, por exemplo, conseguiríamos ouvir no alto-falante apenas um forte "ronco". O que fazemos então é colocar um capacitor em série com a saída, que elimina o nível CC da senóide. No caso do alto-falante, o som seria reproduzido sem maiores problemas.

razão de rejeição em modo comum. Quanto maior for o CMRR de um operacional, e de sua configuração, tanto maior será a capacidade de rejeição às tensões comuns as duas entradas, e sua saída será função apenas da

diferença de potencial entre as entradas.

O CMRR típico para um A. O é de 80 dB. Quando utilizamos a configuração amplificador de diferença, todo o circuito fica com o valor CMRR próximo ao do próprio operacional.

A figura 17 ilustra essa configuração, bem como a expressão da sua tensão de saída. Notem que, para R_4 / R_3 igual a R_2 / R_1 , o CMRR tende a infinito, sendo limitado apenas pelas características internas do próprio CI.

Fig. 16 - Amplificador de diferença utilizado na instrumentação industrial.

e para $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$, temos $CMRR = \infty$.

Fig. 17 - Amplificador de diferenças.

B) Tensão de off-set:

Alguns CIs necessitam do ajuste da tensão de *off-set*. O 741 é um exemplo, pois possui um pino exclusivo para essa função. Uma grande parte dos A.Os, entretanto, dispensam esse tipo de ajuste, visto que ele já é feito internamente no CI.

Quando trabalhamos com instrumentação, devemos optar por tipos como esse, pois a tensão de *off-set* pode atingir valores bem maiores que o próprio sinal a ser monitorado.

A tensão de *off-set* é uma tensão residual, oriunda do desbalanceamento dos transistores de entrada do A.O. Esses transistores formam o amplificador diferencial do A. O, e ambas as entradas devem estar em curto-circuito e aterradas para que o ajuste possa ser realizado. O leitor poderá notar que, em alguns casos (o CI 741, por exemplo), o ajuste de *off-set* não é eficaz, e a tensão de saída nunca atinge zero volt. Esses CIs, definitivamente, não são indicados para instrumentação.

C) Tipos de componentes:

"Qual CI devo utilizar como amplificador operacional para instrumentação?"

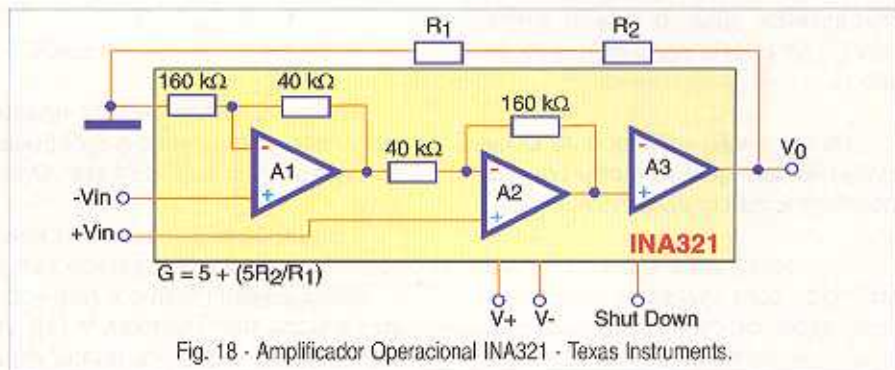
Quando desejamos trabalhar com sinais de pequena amplitude, as características internas do CI são fundamentais ao bom funcionamento do circuito. Podemos encontrar no mercado "n" modelos de CIs, voltados ao "tratamento" desses sinais, e, geralmente, eles são formados por mais de um A.O no mesmo CI.

A **figura 18** apresenta a estrutura básica de um CI muito utilizado para instrumentação, e trata-se do INA 321, da Texas Instruments.

Podemos observar 3 amplificadores operacionais dentro do mesmo CI. Essa técnica (ligação de A.Os em cascata) aumenta significativamente o CMRR, que no caso desse CI é 94 dB.

D) Circuitos em cascata:

Normalmente necessitamos de circuitos com altos ganhos quando trabalhamos em instrumentação. Uma técnica de aumentar o CMRR, e diminuir a tensão de *off-set* é "parcelar" o ganho em etapas. Vamos tomar como exemplo um circuito não inversor com



ganho de 100 000. Ao invés de utilizarmos um único A. O com esse ganho, utilizamos 2 A. Os em cascata (saída de um, na entrada de outro). Cada A. O fica responsável por uma parcela do ganho, o que não significa que mais de um CI seja necessário. O LM 324, por exemplo, é um circuito integrado que possui 4 A.Os internamente.

A **figura 19** mostra em blocos gerais essa técnica, onde podemos notar que o ganho final é o produto dos dois ganhos anteriores.

Outra vantagem dessa técnica é a maior precisão. Os resistores de alto valor tem maior tolerância relativa, conseqüentemente, o circuito com etapa única de amplificação torna-se menos preciso.

E) Cuidados na construção do circuito:

Uma vez definido o circuito (tipo de configuração, tipo de CI, etc.) a montagem pode influenciar muito a performance do projeto. A **figura 20** fornece a primeira das três "dicas" para diminuir as tensões e correntes parasitas no circuito de instrumentação, e trata-se do "anel de guarda", cujo princípio de funcionamento é a gaiola de Faraday.

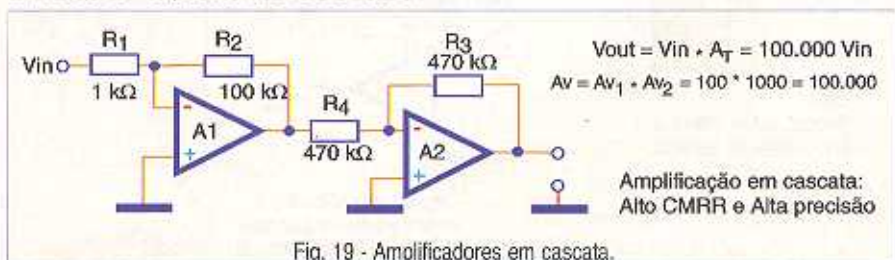
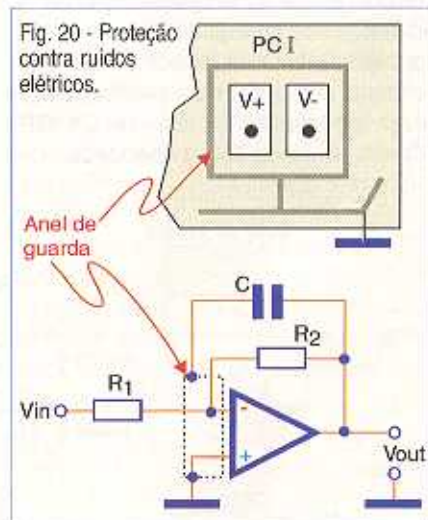
As entradas do A. O ficam confinadas a um quadrado metálico feito na placa de circuito impresso que, se for dupla-face, torna-se ainda mais eficiente. O capacitor deve ser da or-

dem de alguns pF, para que não haja um efeito integrador indesejável.

A segunda dica é composta por filtros eletrostáticos e eletromagnéticos. A **figura 21** mostra alguns capacitores ligados próximos ao A. O. Não importa que a fonte-de-alimentação já tenha uma boa filtragem, pois o ruído pode ser introduzido pelo cabo de alimentação dela ao circuito. Portanto, é importante que esses capacitores estejam próximos (elétrica e mecanicamente) ao CI.

Também um núcleo de ferrite deve ser acrescentado à linha de alimentação do circuito, pois é uma boa proteção contra EMI.

A última dica é utilizar, sempre que possível, cabos blindados para ligar o sensor (ou fonte de baixa amplitude) as entradas do A.O.



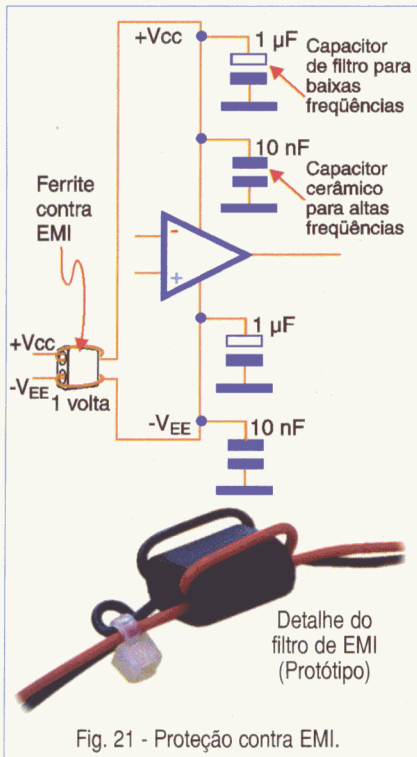


Fig. 21 - Proteção contra EMI.

TRÊS CASOS REAIS NA INDÚSTRIA

A) Circuito para alarme de sobretemperatura (até 80° C) com sensor tipo NTC.

Certo cliente reclamava que as chaves estáticas da sua injetora para termoplásticos queimavam com frequência, mesmo quando substituídas por outras de maior potência.

De posse de um alicate amperímetro, comecei a análise das correntes. Com um multímetro TRUE RMS verifiquei as tensões. Tudo parecia estar dentro da normalidade, até que reparei na fita térmica (indicadora de temperatura) colocada no dissipador das chaves, e ela acusava uma sobretemperatura de 85°C. Quando verifiquei o filtro de ar da máquina, constatei que ele estava muito sujo, o que causou a parada do ventilador. O ventilador que refrigerava as chaves estava travado de tanta sujeira. Sem ventilação, as chaves ultrapassavam 85°C, o que diminuía sensivelmente o MTBF do sistema.

Estava claro que o problema era da máquina para fora, isto é, falta de manutenção preventiva.

O chefe da manutenção pediu-me então um acessório, que gerasse um alarme no painel do operador, toda vez que a temperatura ultrapassasse o va-

lor máximo indicado. A **figura 22** ilustra como com apenas um A.O e alguns poucos componentes periféricos o problema foi resolvido.

O A.O do circuito funciona como comparador de tensão. Toda vez que a temperatura ultrapassa 65° C (máximo permitido pelas chaves) um bit é enviado à IHM da máquina, que gera a mensagem **"sobretemperatura nas chaves estáticas, verifique o filtro de ar e o ventilador"**. O funcionamento do circuito é bastante simples, visto que, ao subir a temperatura no NTC, sua resistência cai. Conseqüentemente, a tensão sobre ele também. Quando essa tensão for menor que a tensão de referência (entrada não inversora), o A.O satura para + Vcc (12 volts). O transistor então, conduz, e um bit de 24 Vcc (tensão retirada da própria fonte do PLC) é enviado para a IHM da máquina. O relé tem a função de isolar a máquina do circuito.

B) Alarme de sobretemperatura com sensor termopar:

Outro cliente reclamava que o parafuso de injeção da sua injetora para termoplástico quebrava constantemente. Analisado em nossos laboratórios, constatou-se que o parafuso encontrava-se dentro das especificações, e a sua dureza estava correta. Como de costume, peguei alguns equipamentos e fui ver o que ocorria.

O operador da máquina comanda a primeira plastificação sem aquecer (e "derreter") o plástico residual dentro do canhão. Obviamente, isso poupa tempo, porém gera esforços mecânicos acima das especificações sobre o parafuso, causando sua quebra prematura.

A máquina possui um sistema de proteção Standard contra essa prática, porém ele tinha sido desativado pelo próprio operador.

Para evitar novos "erros", fiz um circuito bem parecido com o primeiro, porém utilizei dois A.Os, sendo que o primeiro deles é um amplificador não inversor com ganho máximo 1.000 (**figura 23**). Isso foi necessário porque nessa temperatura, o sensor teve de ser modificado para um termopar (mV de tensão de saída). O restante do circuito é igual ao primeiro projeto, e a mensagem da IHM é: **"Cuidado, o canhão não está pronto para a plastificação!"**.

C) Detector de EMI:

Os dois circuitos anteriores me deram uma grande idéia: "podemos monitorar qualquer sinal, de qualquer natureza, e não importa qual condição, com apenas A.Os".

Claro que não estamos falando de casos onde grande precisão é fundamental, mas para as demais situações, um único A.O pode nos dizer muita

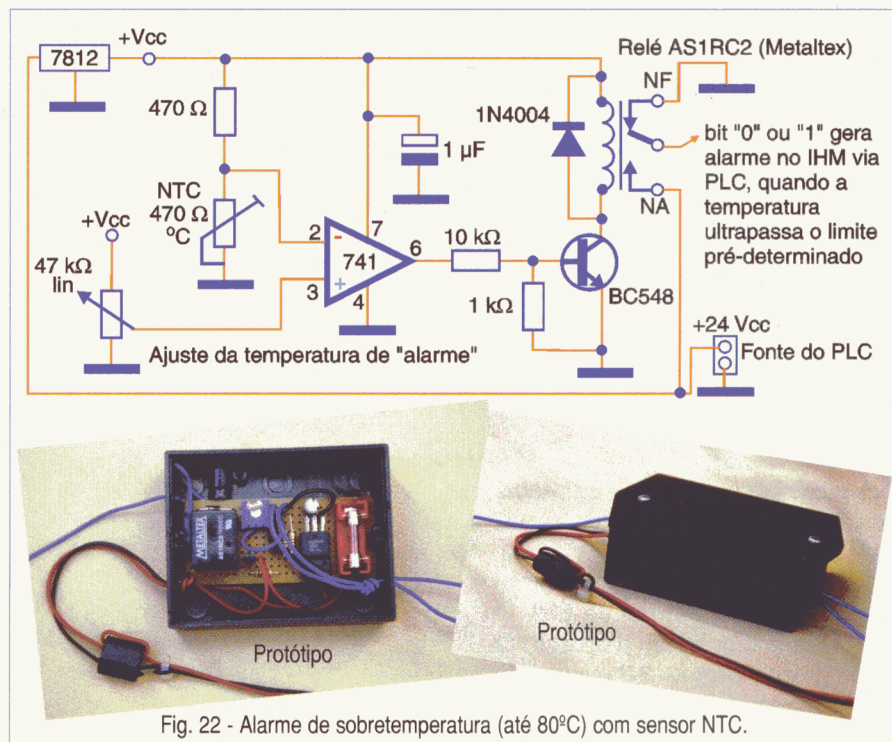
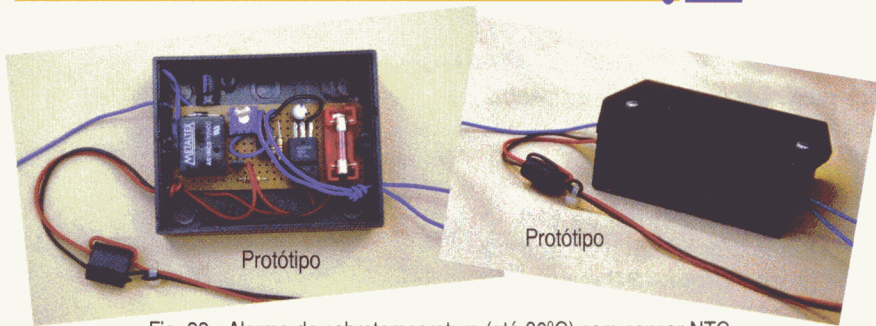


Fig. 22 - Alarme de sobretemperatura (até 80°C) com sensor NTC.



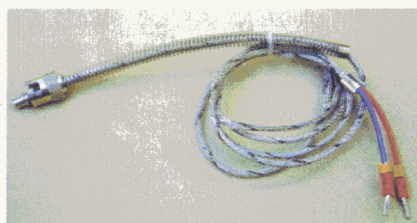
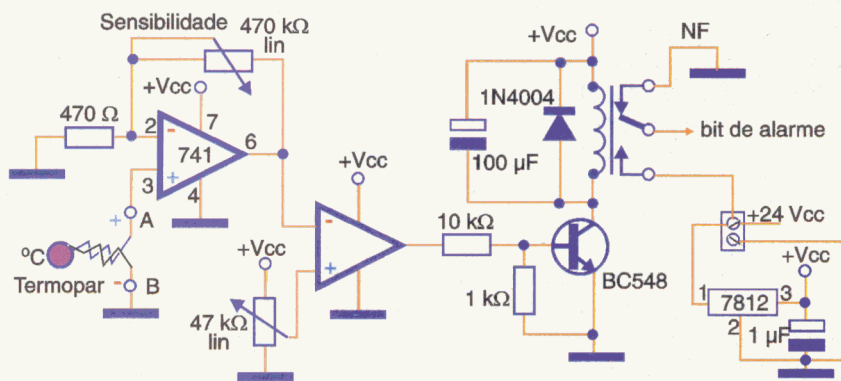
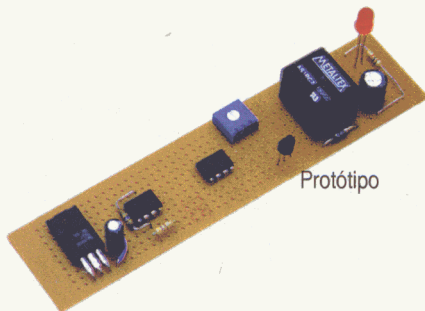


Fig. 23 - Alarme de sobretemperatura (acima de 80°C) com sensor tipo termopar.



Protótipo

coisa. Foi esse conceito que utilizei para desenvolver um alarme de EMI.

Um cliente possuía em sua instalação muitas máquinas de eletroerosão. Elas geravam tanta EMI, que um centro de usinagem equipado com CNC perdia a comunicação com o PC.

Sugestão 1:

Alternar a utilização das máquinas para que a média da EMI diminuísse.

Pergunta do cliente:

“Até quantas máquinas eu posso ligar ao mesmo tempo?”

Minha resposta:

Não sei!!!

Na verdade, a EMI não dependerá apenas do número de máquinas ligadas, mas sim, do trabalho que cada uma estiver fazendo. Tentei explicar que uma única máquina, dependendo da tarefa, poderia gerar EMI suficiente para causar a falha. Por outro lado, dez delas poderiam trabalhar com outra peça, sem causar problemas.

Sugestão 2:

Construir um alarme de EMI.

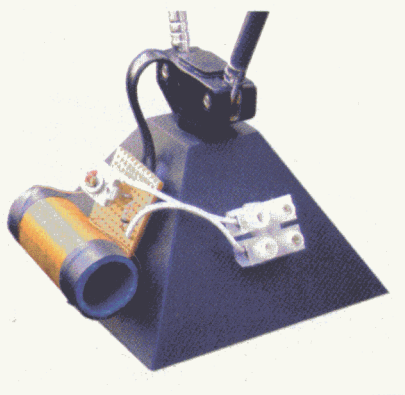
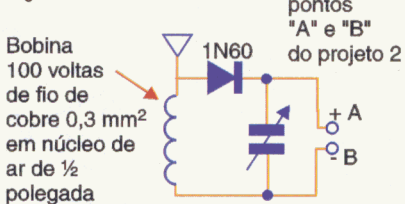
Para isso montei um pequeno “rádio de galena” (figura 24) mas, ao invés de um fone-de-ouvido, liguei sua saída na entrada do projeto 2, visto

que temos mV na saída do diodo 1N60. Sintonizei o circuito para próximo de 1100 kHz (frequência crítica de EMI para máquinas-ferramenta) e, toda vez que a EMI chegava próxima ao limite admissível, o relé atuava um sono/alarme e uma lâmpada.

Quando conto essa experiência para meus colegas, eles insistem em perguntar como achei o limite máximo admissível de EMI.

Sempre respondo que realizei um estudo profundo com um analisador

Fig. 24 - Detector de EMI.



de espectro, mas eles dizem que, na verdade, eu liguei as diversas máquinas de eletroerosão até o defeito manifestar-se e, então, utilizei esse valor como referência. “Ora, eu jamais utilizaria métodos tão anti-acadêmicos”.

CONCLUSÃO

Várias configurações envolvendo amplificadores operacionais não foram vistas neste artigo, porém, o leitor pode utilizá-lo como “ponto de partida” para estudos mais profundos. As análises matemáticas também foram superficiais, visto que nossa intenção é transmitir algumas experiências práticas do nosso pessoal de campo.

Lembrem-se que o bom técnico é aquele que sabe utilizar a teoria como “ferramenta” do seu trabalho prático.

Limitar-se a estudos puramente teóricos, ou apenas a técnicas práticas pode ser um erro fatal.

Eu me lembro bem de uma experiência acadêmica que tive na Universidade: a matéria de Eletromagnetismo. Logo no início dessa disciplina, no curso de Engenharia, fiquei muito entusiasmado, pois pensava que, finalmente, iria entender os princípios elementares das telecomunicações. Qual não foi a minha surpresa em perceber que essa disciplina era, na essência, uma “pós-graduação” em cálculo integral e diferencial.

Bem, ao final da disciplina eu fiquei com meu conhecimento em cálculo sensivelmente aumentado, porém ainda sem saber como funcionava uma antena de fato!

Até hoje acredito que, primeiramente, o assunto deve ser tratado fisicamente (mostrar como ele realmente funciona) e, somente então, partir para a análise matemática.

Os amplificadores operacionais não fogem a regra.

REFERÊNCIAS

São 2 sites bem interessantes para informações sobre amplificadores operacionais: www.linear-tech.com/go/edes/ltc1881 e www.ti.com/sc/ina321.

Esses sites disponibilizam catálogos e “data-sheets” bastante úteis.

Até a próxima!