

*U*

## Apresentação

O Objetivo deste trabalho foi reunir material sobre os principais componentes empregados hoje na automação industrial para um curso de técnicos em automação ou técnicos em mecatrônica.

Visando um curso prático, mas com um certo grau de aprofundamento, utilizou-se de muitas ilustrações de catálogos de fabricantes consagrados como Allen-Bradley, Siemens, Weg, que são líderes de mercado em seus segmentos e que fatalmente o aluno encontra em sua vida profissional na empresa.

O material é suficiente para a compreensão dos fenômenos que dão vida aos sensores e transdutores usados no processo, os principais atuadores usados no mercado de trabalho como servomotores e motores de passo.

Este material pressupõe que o leitor domina conhecimentos que devem ter sido adquiridos em outras disciplinas.

A parte de eletroválvulas e cilindros não foi muito explorada por ser tema de outro curso, cabendo neste trabalho apenas a menção destes dispositivos.

A parte de acionamento apenas descreve levemente o assunto, dada a complexidade do mesmo e a existência de um curso específico para isso.

Idem a parte de CLP e CNC.

De modo geral, espero que este trabalho possa contribuir de alguma forma para o enriquecimento do aluno no que tange ao conhecimento e aplicação dos principais dispositivos utilizados na automação, além é claro de dar uma idéia do estado da arte em que se encontra tal segmento.

Contamos com a colaboração dos mestres e alunos no sentido de apontarem eventuais erros neste material para que em versões futuras possamos corrigi-las e dessa forma concorrer para o melhoramento desta pequena contribuição.

## Índice

Sistemas de Controle .....	03
Teoria de Erros .....	03
Sistemas de Controle Industrial .....	04
Malha Aberta e Malha Fechada .....	04
Transitórios e Indicadores de Performance .....	06
Tipos de Controladores .....	07
Implementações de Blocos PID .....	14
Controle Analógico .....	14
Controle Digital .....	19
Dispositivos de Entrada .....	21
Técnicas de Blindagem .....	25
Transdutores .....	26
Temperatura .....	26
Fotoelétrico .....	35
Posição .....	37
Encoder .....	37
Régua Ótica .....	42
Resolver .....	43
LVDT .....	44
Capacitivo .....	46
Indutivo .....	47
Hall .....	49
Tensão Mecânica (StrainGauge) .....	50
Piezolétrico .....	55
Velocidade .....	55
Pressão .....	56
Pirômetria Ótica .....	56
Sensores .....	67
Nível .....	68
Pressão .....	68
Indutivo .....	69
Capacitivo .....	72
Ultrasônico .....	73
Fotoelétrico .....	74
Atuadores .....	77
Eletroválvulas e Cilindros .....	77
Servomotores .....	77
Motores de Passo .....	81
Acionamentos Elétricos .....	87
CLP .....	90
Princípios de Funcionamento .....	90
Módulos Básicos .....	94
Programação Básica .....	99
IHM .....	112
CNC .....	117
Interfaces Seriais .....	123
Redes Digitais .....	125

### 1. Sistemas de Controle:

#### Histórico

A necessidade de controlar um processo já é bastante antiga. Nasceu desde o momento em que o homem passou a manufaturar bens para suas necessidades. Da manufatura saiu o conceito de se sistematizar os procedimentos envolvidos na manufatura de um bem. Surge assim o conceito de processo de manufatura. Estes procedimentos são ordenadas e podem ser agrupadas em etapas ou fases.

A principal característica do processo de manufatura é que o homem era o responsável pelo controle e pela execução de todos os procedimentos envolvidos no processo. O problema era que a produtividade era baixa e a qualidade fortemente dependente do ser humano. Com o surgimento da máquina à vapor, começa a surgir a idéia de se usar máquinas para executar etapas do sistema produtivo. Entretanto as primeiras máquinas a vapor não tinham elementos de controle automático. Eram ainda dependentes do homem para o controle de suas ações, mas já representavam um avanço em termos de força e velocidade em relação ao ser humano.

Com invenção do regulador mecânico para a pressão do vapor, feito por James Watt, a máquina passou a ter um uso industrial importante, pois agora a pressão do vapor era regulada automaticamente por um dispositivo, podendo a máquina assim efetuar um trabalho ou uma etapa de um processo. Surge o processo industrial em substituição ao processo de manufatura, onde máquinas realizam parte do processo de produção.

Entretanto, ainda não existia o controle automático no processo, dado que toda ação da máquina dependia da supervisão e atuação do homem. A idéia era fazer com que a máquina ganhasse cada vez mais autonomia no processo de fabricação, tal qual o ocorreu com o controle do vapor. Ou seja, buscava-se o controle de automático de processo. Mas o controle de processo usando meramente elementos mecânicos era algo difícil de se conseguir e o controle automático de processo praticamente não avançou muito até o século XX. Com o século XX, vieram a eletricidade e os controles elétricos e eletrônicos, mais versáteis e dinâmicos que os controles mecânicos e assim a automação de processos adquiriu a dimensão que este até os dias de hoje.

#### **Teoria de Erros:**

O erro é caracterizado como algo indesejável no sistema, entre em sistemas de controle o estudo dos erros leva a formas mais eficientes e exatas de se efetuar um controle. O erro pode ser definido como um desvio entre um valor real e um valor efetivamente encontrado. Pode Ter várias origens, mas podem ser classificados de duas formas:

➤ **Erros determinísticos ou sistemáticos:** É aquele erro que decorre de um desvio fixo entre a grandeza lida e a esperada por motivo de uma folga ou desajuste. É um tipo de erro que é sempre repetitivo, desde que as condições sejam idênticas. Pode estar relacionada à uma grandeza física, como por exemplo, um erro de um extensômetro em virtude de temperatura. Pode ser eliminado por meio de compensação.

➤ **Erros aleatórios:** É aquele que ocorre devido a fatores imponderáveis e que não podem ser modelados. A dimensão de erro aleatório só pode ser estabelecida por meio de análise estatística.

Na natureza costumam ocorrer os dois tipos de erros simultaneamente.

Diante da natureza desta classificação dos erros, criou-se dois conceitos básicos para a caracterização dos desvios. A exatidão e a precisão.

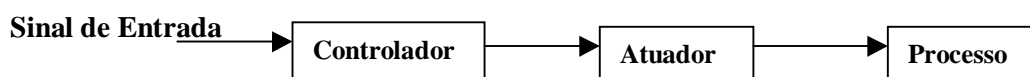
A **exatidão** dá uma idéia do desvio médio de uma medida em relação ao valor real. A baixa exatidão é causada por erros determinísticos.

A **precisão** é uma medida da variabilidade de uma medida em torno de um valor médio. É causada pelo erro aleatório.

## 2. Sistemas de Controle Industrial:

Existem várias formas de se implementar sistemas de controle automático, entretanto, a mais utilizada é usando sistemas eletroeletrônicos devido principalmente a versatilidade e dinamismo necessários à um controle de processo. Além disso, sistemas elétricos são mais fáceis de se implementar que sistemas dinâmicos. Dado que um sistema de controle é predominantemente elétrico e os processos envolvem transformações mecânicas, químicas e físicas, devemos converter o sinal de um controlador eletrônico no sinal adequado ao processo, tanto do ponto de vista da natureza, quanto do ponto de vista de magnitude. Este elemento é o atuador. É ele quem atua diretamente sobre o processo, sempre em resposta à saída do controlador.

Para que o controlador gere o sinal de controle para o atuador gerar o sinal de controle do atuador ele precisa de uma referência, ou seja, um sinal na sua entrada que diga ao controlador o que ele deve fazer com o processo. Este é o sinal de referência, ou sinal de entrada. A figura abaixo ilustra o relacionamento entre o controlador, o atuador e o processo.



Em um sistema de controle precisamos saber como anda o processo e obter informações a respeito de parâmetros do mesmo. Ou seja, precisamos de um dispositivo capaz de converter uma grandeza física do processo em uma grandeza elétrica para que possamos medir o andamento do processo. Este elemento é o transdutor e ele se relaciona com o processo conforme a figura abaixo:

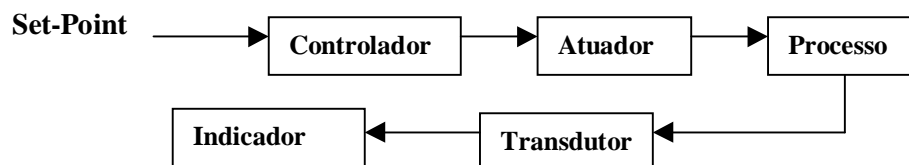


## 3. Sistemas de Controle em Malha Aberta e Malha Fechada:

Com relação a forma de implementação os sistemas de controle, podem ser classificados de duas formas: em malha aberta e em malha fechada.

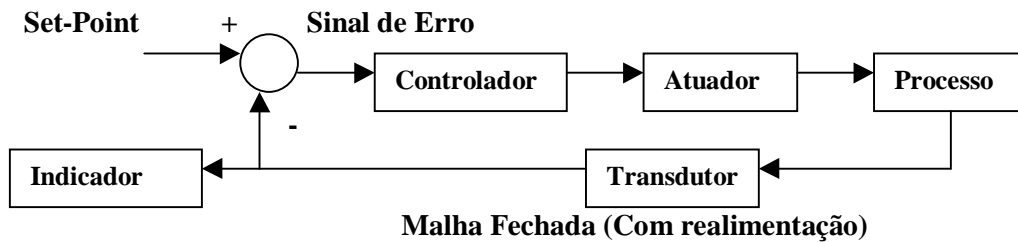
- **Malha aberta:** Quando o controlador gera o sinal para o atuador, com base no sinal piloto, sem obter nenhuma informação sobre o andamento do processo. Ou seja, é um sistema sem realimentação, sendo que o sinal de entrada é o próprio set-point.
- **Malha fechada:** Quando o controlador gera o sinal para o atuador, com base no sinal piloto, porém agora ele recebe informação sobre o andamento do processo, através de um transdutor. O sinal de entrada, no caso, corresponde a diferença entre o set-point e o sinal do transdutor, por isso, também é chamado de sinal de erro.

A figura abaixo ilustra as duas formas de controle:



**Malha aberta (Sem realimentação)**

**OBS:** Observe que no caso da malha aberta o transdutor e o indicador são itens opcionais não sendo importantes para o controle.



**OBS:** O indicador no caso da malha fechada é um item opcional.

A malha fechada apresenta algumas vantagens em relação a malha aberta, principalmente no que tange a menor sensibilidade a interferências e ruídos. Isto porque o sistema sendo realimentado, qualquer desvio do sistema, gera um erro que tende a ser compensado. Além disso, o sistema fica mais independente dos parâmetros da planta, já que ele passa a atuar sobre o sinal de erro.

Entretanto, também há desvantagens como o custo mais elevado e a possibilidade do sistema atingir a instabilidade quando o ganho do controlador é muito alto.

#### 4. Transitório e Indicadores de Performance:

Quando ajustamos o set-point a saída leva um tempo para atingir seu valor final. Este tempo é chamado de transitório e é muito importante seu conhecimento para fins de determinação do comportamento do sistema e avaliação da performance do controlador. Para fins de avaliação da performance de um sistema de controle, existem alguns indicadores básicos, muito utilizados para a especificação de um sistema de controle. São os principais:

- **Regulação:** É uma avaliação do sistema com relação à sua capacidade de reduzir o erro entre o valor real da grandeza física controlada e o valor esperado ao final do transitório. O erro no caso é chamado de **erro em regime permanente**. Se o erro for grande, a regulação do sistema é ruim, se o erro for pequeno a regulação será boa.
- **Estabilidade:** É a capacidade que um sistema tem de dada uma certa entrada limitada fornecer uma resposta limitada. Ou seja, se o processo converge para algum ponto, para uma dada entrada é um sistema estável. Se não, é um sistema instável.
- **Tempo de acomodação:** É o intervalo de tempo em que ajustada uma entrada, o sistema demora para convergir. Ou seja, é o intervalo de tempo em que dura a fase de transitório.
- **Tempo de subida:** É o tempo necessário para que a saída vá de 0 à 100%, ou de 10 à 90% do seu valor final.
- **Sobrelevação:** Conhecido como “overshoot” é o valor máximo atingido pela grandeza física da planta em relação ao valor esperado. É medida em percentagem da entrada ajustada. Ocorre na fase de transitório.
- **Sensibilidade:** Avaliação da mudança do comportamento do sistema frente à pequenas variações de parâmetros do sistema.
- **Rejeição de distúrbios:** Capacidade de um sistema de rejeitar distúrbios ou ruídos oriundos de perturbações no sistema.

## 5. Tipos de Controladores Industriais:

Há principalmente 5 tipos básicos de controladores usados largamente na indústria. São eles:

- Controle ON-OFF;
- Controle Proporcional ou P;
- Controle Proporcional e Integral ou PI;
- Controle Proporcional e Derivativo ou PD;
- Controle Proporcional, Integral e Derivativo ou PID.

### ➤ **Controle ON-OFF ou LIGA-DESLIGA ou de histerese:**

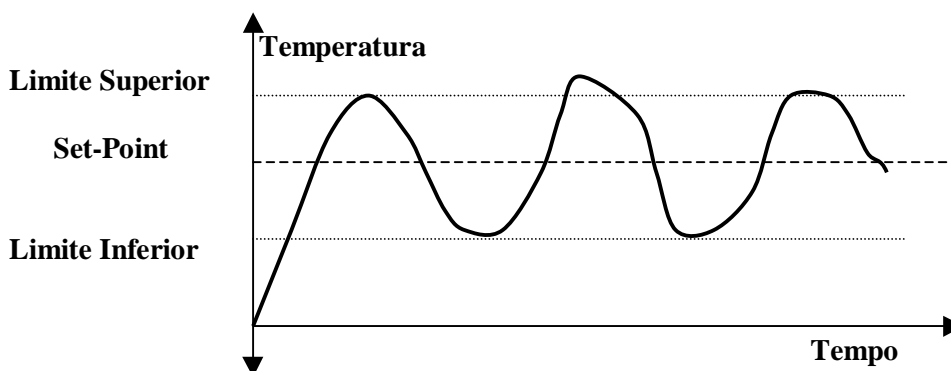
É a forma de controlador mais simples que existe e consiste em um circuito comparador que compara o sinal de entrada com dois sinais de referência, chamados de limite inferior e superior. Quando o sinal de entrada fica menor que o limite inferior, a saída do controlador é ativada e o atuador é acionado com sua potência máxima. Quando o sinal de entrada fica maior que o limite superior, a saída é desligada e o atuador desligado. A diferença entre o limite superior e o inferior é chamada de histerese. Normalmente, a histerese é ajustável de forma tal que o set-point fique entre o limite inferior e o superior. Desta forma o sistema controla fica oscilando de um valor máximo à um mínimo e não atinge nenhum valor específico.

Não é um controlador do tipo que você especifica por exemplo, 100°C e ele estabiliza nisso. É um controlador do tipo nível de água onde se tem um nível máximo e um nível mínimo. Quando o nível está no mínimo aciona o atuador, que no caso seria a bomba d'água, e esta e vai enchendo a caixa d'água. Quando o nível máximo é atingido, a saída será desligada e o atuador, no caso a bomba, é desligado. Aí consumo de água faz o nível baixar e atinge o nível inferior novamente e o ciclo se repete.

A grande vantagem deste sistema é o fato de que é um sistema muito barato e que como o atuador somente liga e desliga nos momentos em que os limites são atingidos, o controlador e o atuador sofrem pouco desgaste.

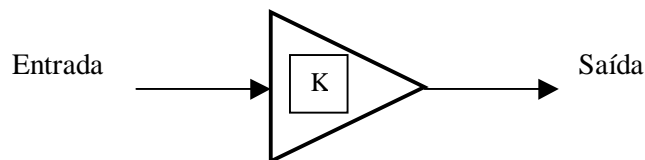
A grande desvantagem é que a grandeza controlada(temperatura, pressão, etc..) não estabiliza em nenhum ponto e sim oscila entre o ponto desejado, indo do limite inferior ao superior.

Abaixo vemos um controle simples de temperatura. O set-point foi de 100°C, o limite superior é 120°C e o inferior de 80°C. A histerese é de 40°C. Observe como a temperatura oscila em torno do valor desejado que é de 100°C, indo de 120°C à 80°C o tempo todo.

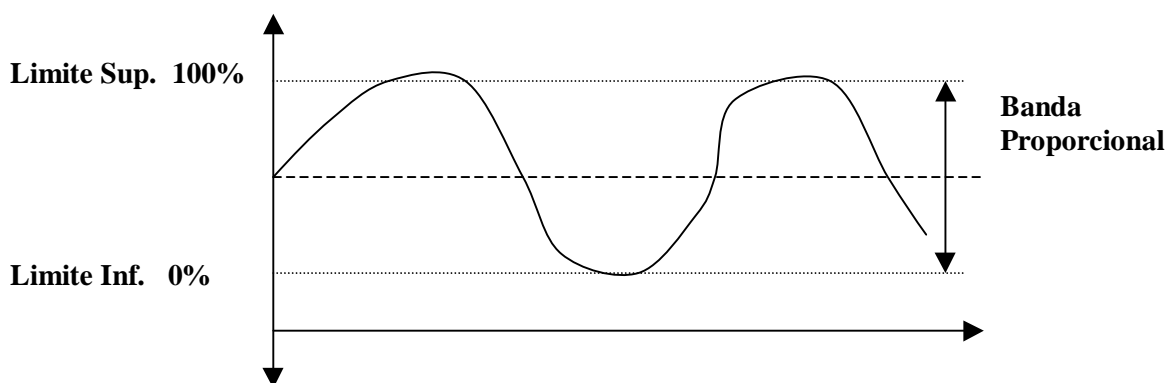


➤ **Controle Proporcional ou P:**

O controle proporcional já é mais sofisticado que o controlador ON-OFF, dado que a resposta do controle é proporcional ao sinal na sua entrada. Se o sinal na sua entrada é pequeno, a resposta será um valor pequeno também. Se a entrada for grande a saída será grande também. Em suma, um controlador proporcional é na verdade um amplificador. Ele é representado como abaixo:



No caso a saída é um sinal  $K$  vezes maior que a entrada. Entretanto o sinal de saída não pode crescer indefinidamente, porque há limite tanto inferior quanto superior. Quando estes limites são atingidos dizemos que o sistema saturou. Portanto, há uma região onde o sinal responde proporcionalmente ao sinal de entrada, e outra região onde o sistema satura e não ainda o sinal de entrada aumentar que o sistema não vai além daquele limite. Na figura abaixo, percebemos que acima do limite superior, o atuador está com 100% de sua capacidade e abaixo do limite inferior o atuador está com 0% de sua capacidade, ou seja, totalmente desligado. A região entre o limite inferior e superior o atuador está com uma saída proporcional a entrada, e esta região é chamada de **banda proporcional** do sistema.



A banda proporcional de um sistema é dada de forma percentual e está relacionada com o **ganho  $K$**  do controlador. Na verdade ele é determinado pela fórmula abaixo:

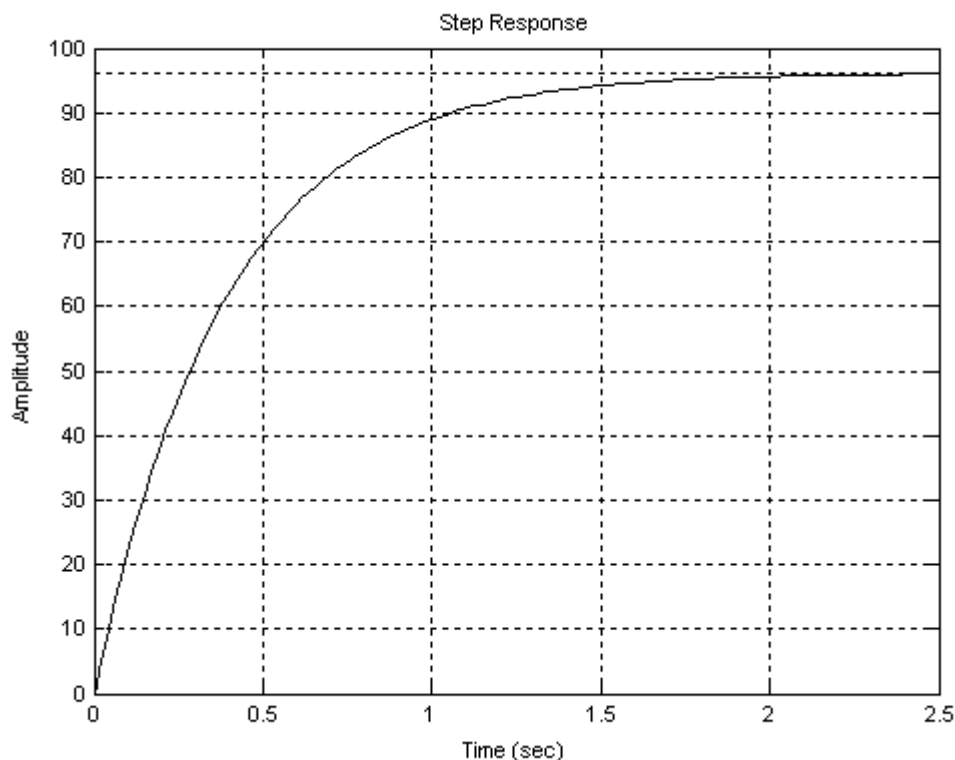
**Banda proporcional** =  $100\% / K$  ; onde  $K$  é o ganho do controlador.

Muitos controladores possuem o ajuste da banda proporcional disponível. A técnica mais recomendada é deixar a banda proporcional no máximo possível e verificar a resposta do sistema. Se não for satisfatória, deve-se ir reduzindo o valor do ajuste até que o desempenho fique adequado.

O grande problema do controlador Proporcional ou P é que ele permite erros em regime. Isto porque em sistemas realimentados, a entrada do controlador P é o sinal de erro. Como o sinal de erro vai ficando pequeno a medida que se aproxima do valor de set-point, a saída do controlador que é proporcional a entrada vai ficando pequena também. Sempre haverá um ponto em que o erro, por menor que seja será tão pequeno que não produzirá uma saída capaz de ativar o atuador. Assim o sistema para mesmo sem Ter atingido plenamente o set-point, permanecendo um erro sempre constante. Claro que aumentando o ganho  $K$  do controlador o erro será reduzido, mas sempre haverá um erro, porque há limites para aumentar o valor do ganho  $K$ , que se ultrapassados, levam o sistema a instabilidade.



Na simulação abaixo, temos uma estufa com um set-point de 100°C e um controlador tipo P com um ganho  $K=10$ . Repare que o sistema estabiliza em 96°C, permanecendo um erro de 4°C. Se aumentarmos o ganho, podemos diminuir o erro, mas sempre haverá um erro, por menor que seja.



### ➤ Controle Proporcional +Integral ou PI:

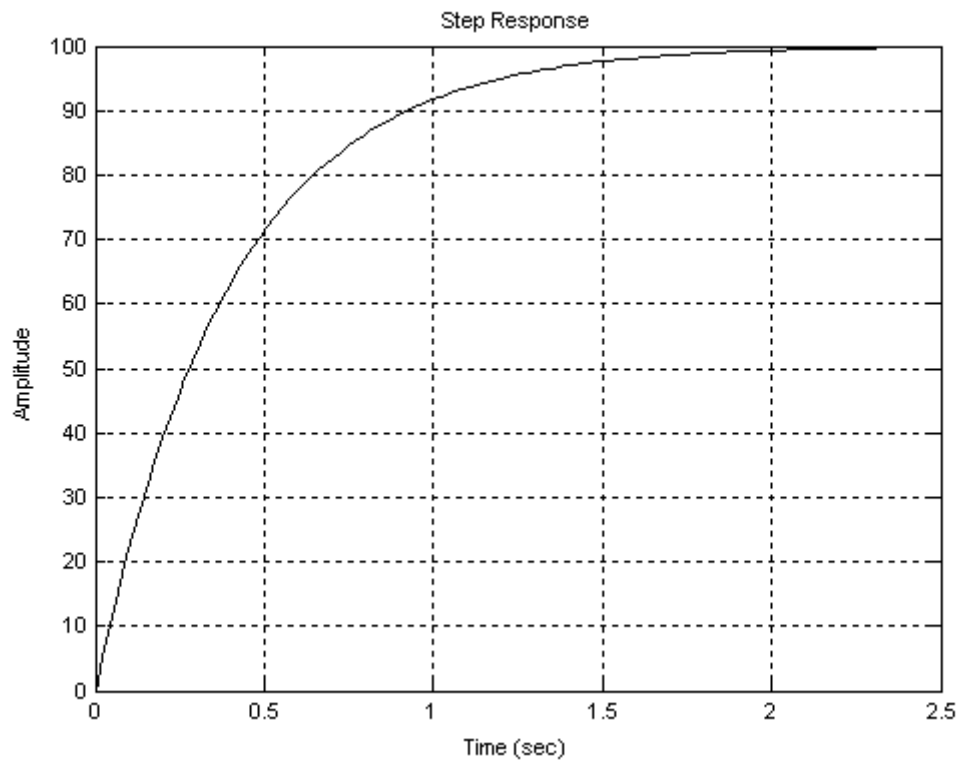
O controlador PI é uma combinação da ação proporcional com uma ação de integração. O integrador, dentre suas propriedades, permite com que o erro em regime do caso anterior seja zerado. Isto ocorre porque embora o erro possa ser pequeno, o integrador vai somando ao longo do tempo e a sua saída vai aumentando até que seja capaz de acionar o atuador. Assim sendo, quando o erro é grande o Proporcional fornece uma grande saída e predomina sobre o integrador. Mas a medida que o sistema vai chegando perto do objetivo, o erro vai diminuindo e assim a resposta do proporcional vai ficando cada vez mais fraca. A partir deste ponto o domínio passa a ser do integrador.

Dessa forma o bloco integrador é usado freqüentemente quando precisamos de uma convergência precisa do valor, com erro muito pequeno. Da mesma forma que existe um ganho  $K$  para o proporcional existe também um ganho  $K_i$  para o integrador. Quanto maior o valor de  $K_i$ , maior a resposta de um elemento integrador.

Entretanto, o ajuste do ganho de  $K_i$  não deve ser indiscriminado, pois ele pode levar o sistema a se tornar muito lento as transições ou até mesmo levar o sistema a instabilidade.

O melhor ajuste é uma combinação do ganho  $K$  e do ganho  $K_i$ . É possível mediante simulações e outras técnicas encontrar o melhor ajuste possível. Não há uma regra geral, cada caso poderá requerer um ajuste diferente, dessa forma dificilmente você poderá utilizar um ajuste que fora bem sucedido em outra empresa ou outro equipamento.

Na simulação abaixo, voltamos a verificar o caso da estufa que fora ajustada para uma temperatura de 100°C. Com o controlador somente proporcional, havia um erro de 4°C, ou seja a temperatura ficava a 96°C. Com o integrador há o zeramento do erro e a temperatura atinge exatamente os 100°C.



➤ **Controle Proporcional + Derivativo ou PD:**

Da mesma forma que o controle PI era uma combinação do controle Proporcional e o controle Integral, controle PD é uma combinação do controle Proporcional e o controle Derivativo. O derivativo é um bloco cuja saída é proporcional a variação do erro. Ou seja, se o erro estiver variando muito rápido ele atua fortemente visando a minimizar ou eliminar esta variação.

Portanto é um bloco adequado para sistemas que precisem de um ataque rápido as variações de erro. Entretanto, se houver um erro de grande valor, mas variando lentamente, o sinal na saída do derivativo será baixo. Por isso, o derivativo nunca é usado sozinho, pois ele só atua nos momentos em que o erro varia rapidamente.

Além disso, o derivativo é sensível a ruídos que podem enganá-lo fazendo-o acreditar que há uma transição brusca. Por isso o ganho do derivativo nunca é muito alto. Na verdade, evita-se ao máximo o uso de derivativos. Quando o sistema não pode responder bem à variações bruscas de sinal, então apela-se para o derivativo.

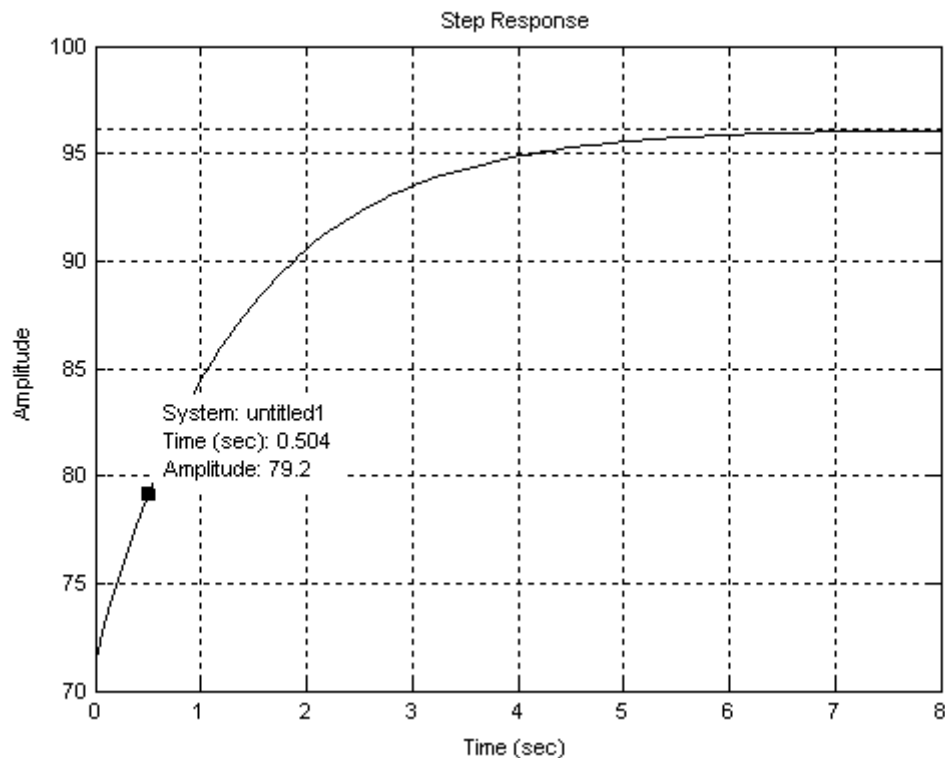
Ademais o bloco derivativo não tem nenhuma influência sobre o erro em regime. De modo geral, ele deixa o sistema mais rápido e reduz a máxima sobrelevação.

Como o Integrador, que tinha um ganho  $K_I$  o Derivativo também tem um ganho chamado  $K_D$

Na simulação abaixo, voltamos ao caso da estufa ajustada para 100°C, só que retiramos o Integrador e adicionamos um Derivativo. Perceba que como o derivativo não atua sobre o erro em regime, o erro de 4°C voltou e portanto, o sistema agora converge à 96°C como antes.

Em compensação, na região de 0 até 0.5 segundo, quando o erro varia muito rápido, o sistema atua muito mais rapidamente, pois em 0.5 segundo a temperatura já é de 79°C, e no caso do controlador P ou PI era de apenas 70°C. Mas é só até este que o derivativo vai bem, pois de 0.5 segundos em diante, o erro já passa a variar lentamente e a resposta do derivativo já não é mais adequada.

Nesta parte, onde a variação do erro é lenta, o Integrador responde melhor, além é claro do integrador atuar sobre o erro em regime.



➤ **Controle Proporcional + Integral + Derivativo ou PID:**

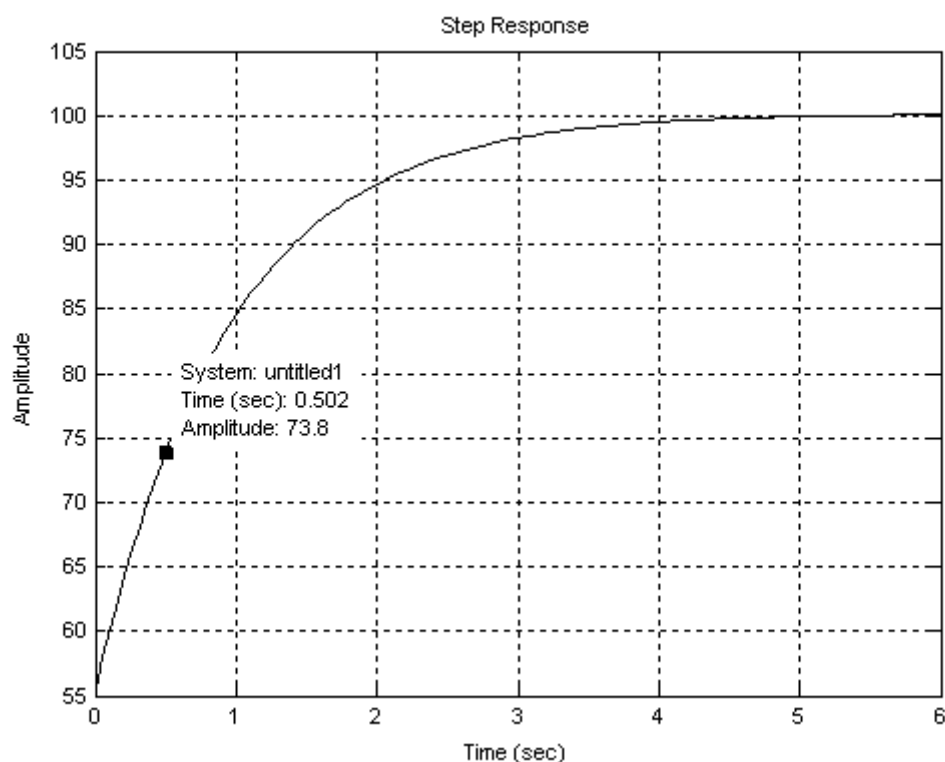
Pelos exemplos acima, fica bastante claro que uma combinação dos três elementos, explorando as propriedades de cada um, parece ser a opção mais adequada. Este é o chamado Controlador **PID**.

Na verdade, com um controlador PID, podemos obter os outros (P, PI ou PD), zerando-se aquele que não interessa. Exemplo: se queremos um controlador PI, basta zerar o ganho do Derivativo, se queremos um controlador P, basta zerar o ganho do Derivativo e do Integrador, e assim por diante.

O controlador PID, parece ser a opção ideal para se trabalhar, entretanto, esta é opção mais cara e a mais difícil de ajustar, pois agora temos três ganhos para ajustar ( $K$ ,  $K_I$  e  $K_D$ ). A combinação do ajustes pode determinar se o sistema será oscilatório ou não, se o sistema será rápido ou lento.

A determinação adequada do ajuste é feita por meio de modelagem e simulações, onde se leva em conta os parâmetros de performance do sistema (máxima sobrelevação, tempo de acomodação, erro em regime, etc..).

Na simulação abaixo, voltamos ao exemplo da estufa com set-point de 100°C. O controlador agora é um bloco PID. Vemos que na região de 0 a 0.5 segundo o sistema é rápido por causa do derivativo. Em 0.5 segundo a temperatura já é de 74°C, ao passo que no P e no PI era de apenas 70°, ou seja, 6% mais rápido. Verificamos que não há mais erro em regime, dado que a temperatura agora estabiliza em 100°C, que é o próprio set-point, por causa do Integrador.

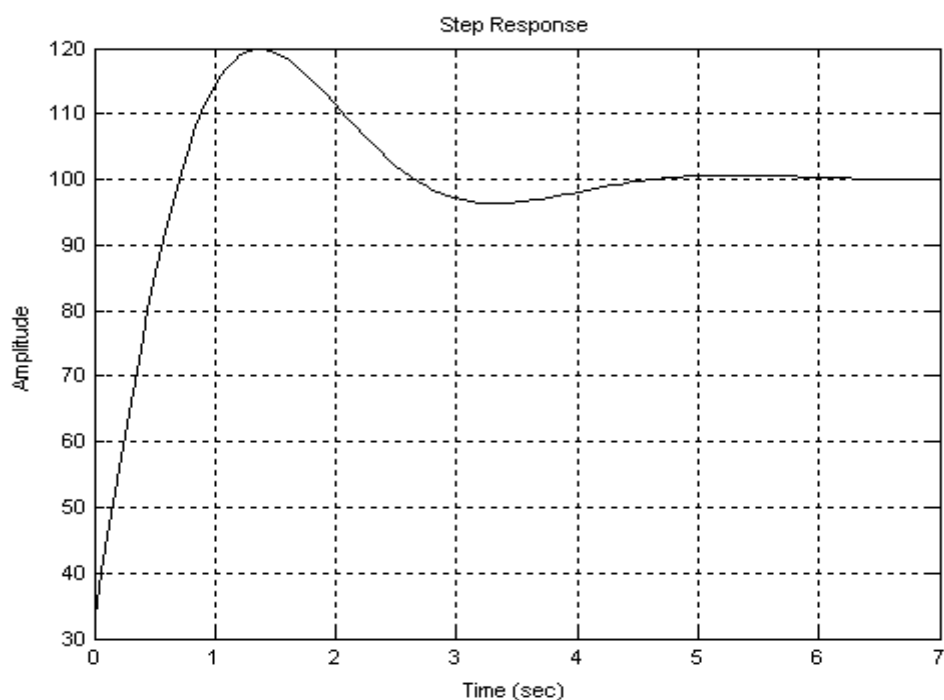


Os chamados parâmetros de performance são fortemente dependentes dos ajuste dos ganhos dos elementos que compõem o PID ( $K$ ,  $K_I$  e  $K_D$ ).

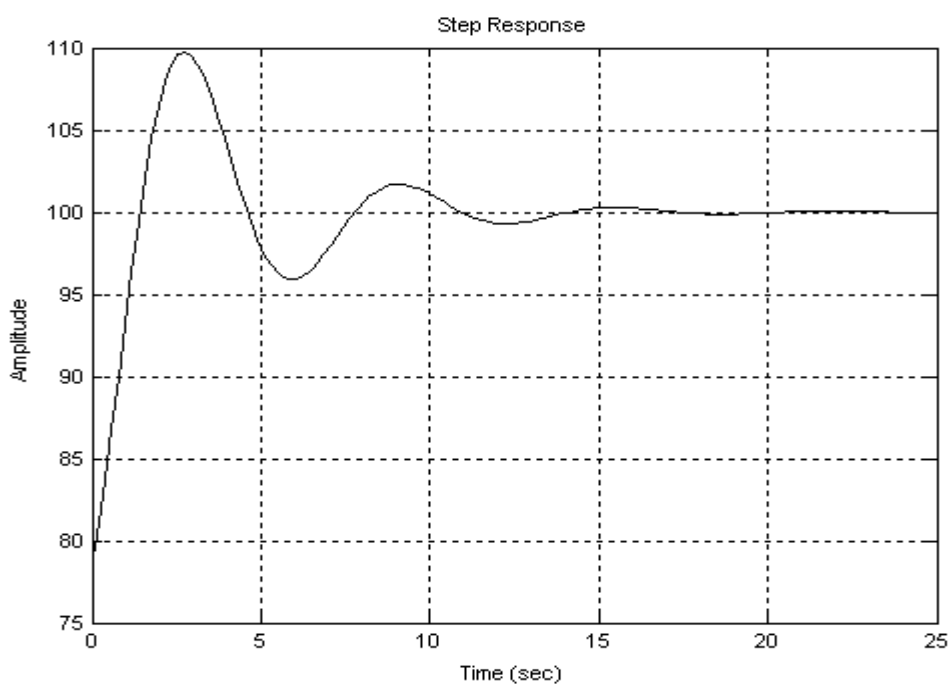
Na próxima simulação, temos um caso em que o controlador foi ajustado de forma tal que o ganho do Derivativo fosse baixo, menor que o do Integrador. O sistema utilizado ainda é a estufa, com set-point de 100°C.

Percebemos pelos ajustes o comportamento que o do sistema converge a temperatura em erro em regime, por causa do integrado.

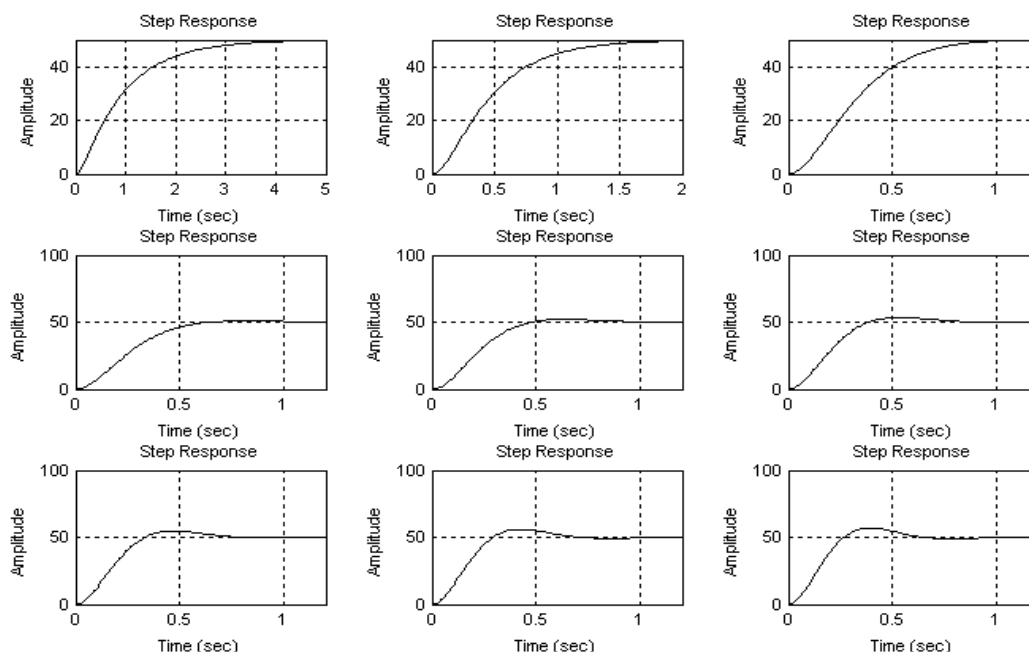
Mas o tempo de convergência é diferente do caso anterior. E além disso, agora a resposta é oscilatória. No caso anterior, dizemos que a resposta é superamortecida e no caso com oscilações é subamortecida. Quando o sistema passa exibir oscilações com amplitude decrescente e que demoram a sumir estamos chegando perto do limite de estabilidade. Observe a sobrelevação ou "overshoot" no gráfico, que é bem elevado. A temperatura está atingindo até 120°C, ou seja, 20°C a mais que o desejado



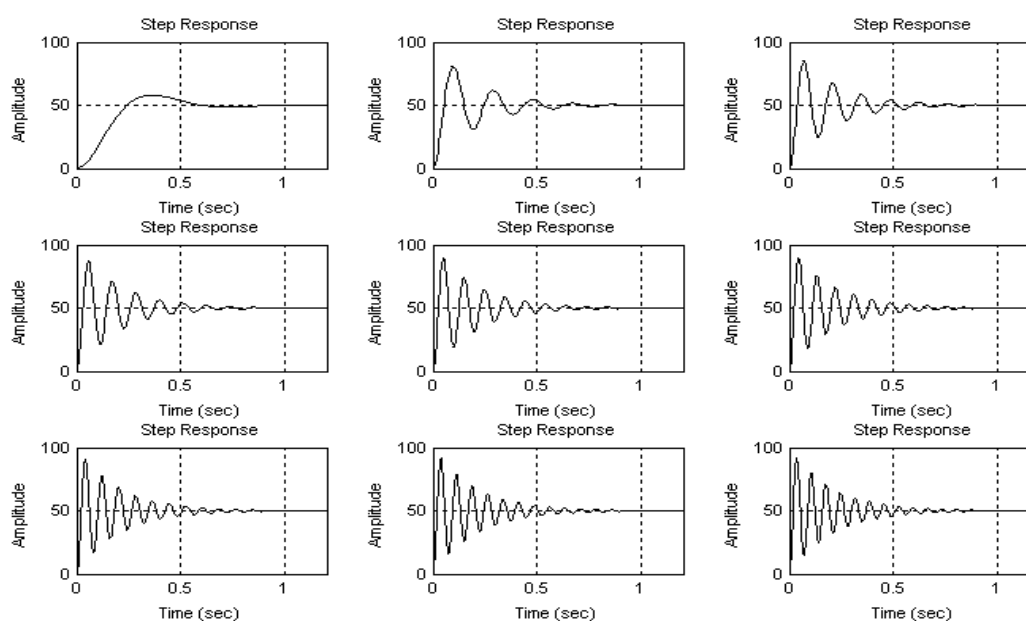
Aumentando-se agora o ganho do derivativo  $K_D$ , reduzimos o overshoot de 125°C para 112°C, mas o sistema ficou mais oscilatório. A combinação ideal depende de ajustes adequados dos ganhos, que influenciam fortemente na resposta do sistema. Não dá para simplesmente “chutar”.



Nas simulações abaixo, vemos a simulação para vários valores de ganho  $K$ . Vejam como a resposta a saída muda significativamente. A ordem é de  $K$  crescente, mas com valores pequenos.



Agora para  $K$  de valores mais elevados, veja como o sistema vai ficando mais oscilatório. Valores de  $K$  altos levam o sistema a oscilar e tendem a torná-lo instável. Por isso, há limites para aumentar o ganho.



## 6. Implementação dos Blocos PID

Os blocos PID podem ser implementados de forma analógica ou digital. Os de forma analógica, processam diretamente os sinais dos transdutores disponíveis usando circuitos de eletrônica analógica.

São muito utilizados os amplificadores operacionais, para implementar os blocos Proporcional, Derivativo e Integrador.

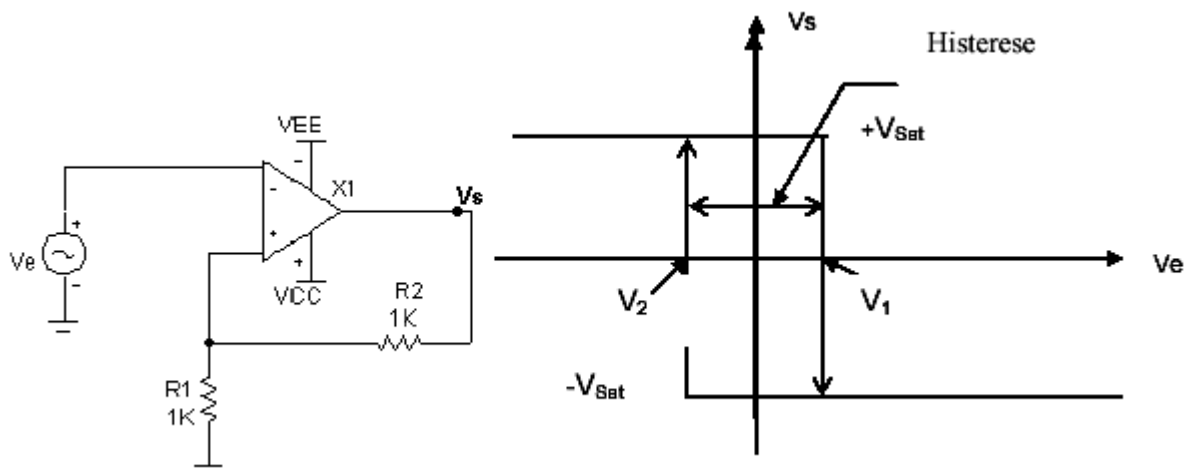
Já os sistemas digitais, podem se comunicar com os sistemas físicos diretamente. Isto porque os sinais físicos reais (Temperatura, pressão, etc..) são todos analógicos. Assim estes sinais devem ser convertidos em sinais digitais primeiro, processados e depois convertidos em sinais analógicos novamente. Neste caso, exigem sistemas baseados em microcontroladores e microprocessadores. Os blocos PID são meros “softwares” destes sistemas digitais. A tendência atual é o uso cada vez maior dos blocos PID digitais. Eles aparecem principalmente nos PLC's e CNC's.

Vamos tratar inicialmente de implementações analógicas e depois das digitais.

## 7. Sistemas de Controle Analógico:

### Controlador ON-OFF:

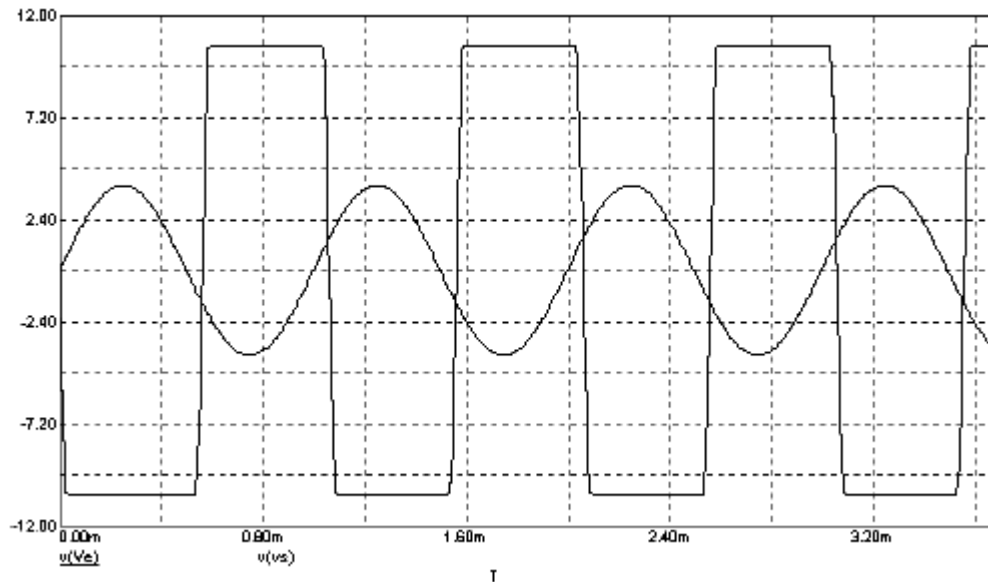
Na figura abaixo, vemos um comparador com histerese que é a base do controle ON-OFF. Ele usa um amplificador operacional e alguns resistores.



$$V_1 = + \frac{R_1 V_{Sat}}{R_1 + R_2} \quad V_2 = - \frac{R_1 V_{Sat}}{R_1 + R_2} \quad \text{a Histerese} = V_1 - V_2$$

O comparador de histerese é um amplificador operacional realimentado positivamente. O valor da histerese é definidos pelos valores dos resistores R1 e R2. No caso vemos que a saída (sinal quadrado) é ativa ou desativada conforme o sinal de entrada (no caso senoidal, mas podia ser outro) atinge os limites inferior e superior. Na simulação estes limites são representados pelas retas pontilhadas e indicados pelos valores de A1=2.2V e A2=-2.7V, no quadro negro sobre o gráfico. Estes valores são teoricamente iguais, mas na prática devido a tolerâncias de componentes e desequilíbrios eles podem ser um pouco diferentes, mas isto pode ser corrigido inserindo-se potenciômetros para fazer os ajustes. Veja que a histerese é de 5.2V. No caso, o atuador é ligado quando o erro for menor que - 2.7V e o atuador será desligado quando o erro for maior que 2.2V. De qualquer modo ele nunca estabiliza e sim oscila em torno do valor zero.

Como o erro oscila em torno de zero, isto implica que a saída oscila em torno do set-point. Ou seja, se ajustarmos um controlador de temperatura para 100°C, com histerese de 10°C, o limite inferior será de 90°C e o superior de 110°C. Ou seja, o atuador ligará com 90°C e desligará com 110°C.

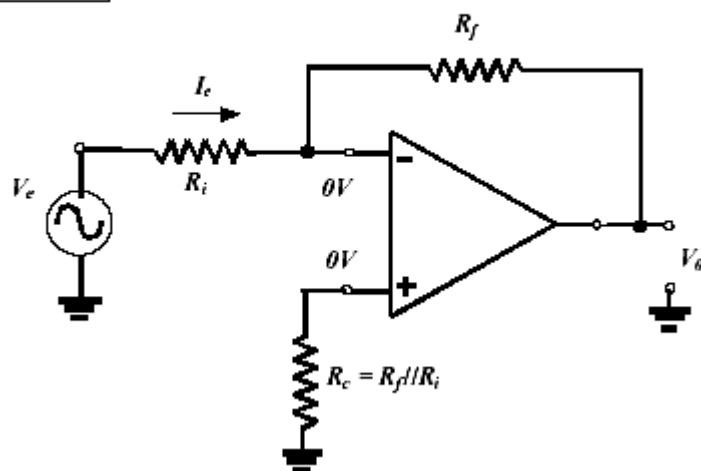


### Controlador PID:

O controlador PID e as variantes (P, PI e PD) são implementáveis por meio de amplificadores operacionais também. No caso são necessários três blocos: um para o proporcional, um para o derivativo e um para o integrador. No final precisamos de um quarto bloco somador para somar as saídas de cada bloco.

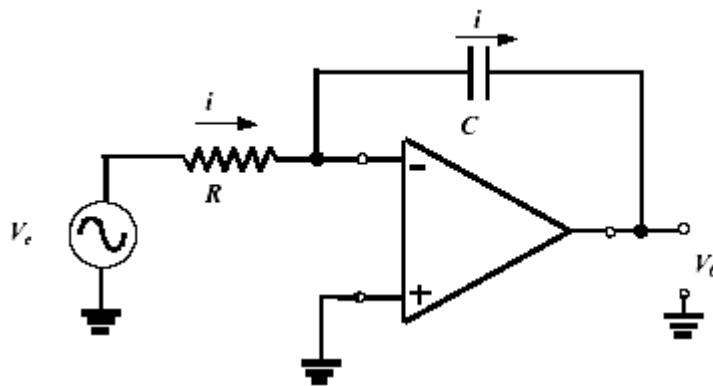
O circuito abaixo, ilustra o bloco Proporcional, perceba que ele não passa de um amplificador. O ganho é determinado pelos resistores e principalmente pelo potenciômetro.

$$A_v = -R_f/R_i$$





O bloco abaixo é um Integrador. O ganho é ajustado por um Potenciômetro R5.



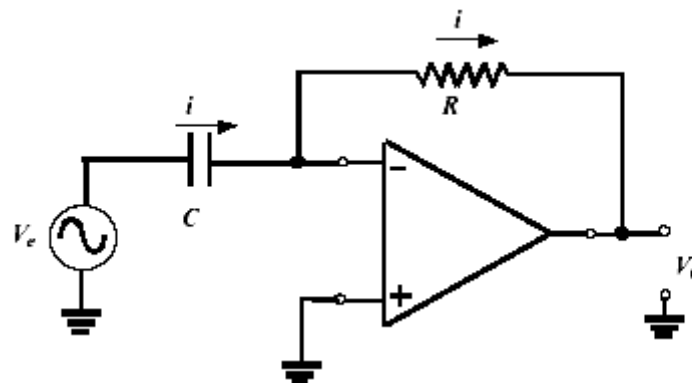
*Integrador básico*

Da figura, temos

$$i = V_e/R \quad e \quad V_o = -Q/C \quad \text{onde} \quad Q = \int i dt = \int V_e/R dt \quad \text{portanto}$$

$$V_o = -1/RC \int V_e dt$$

E finalmente abaixo, temos o bloco Derivativo. O ganho também é ajustado pelo Potenciômetro:



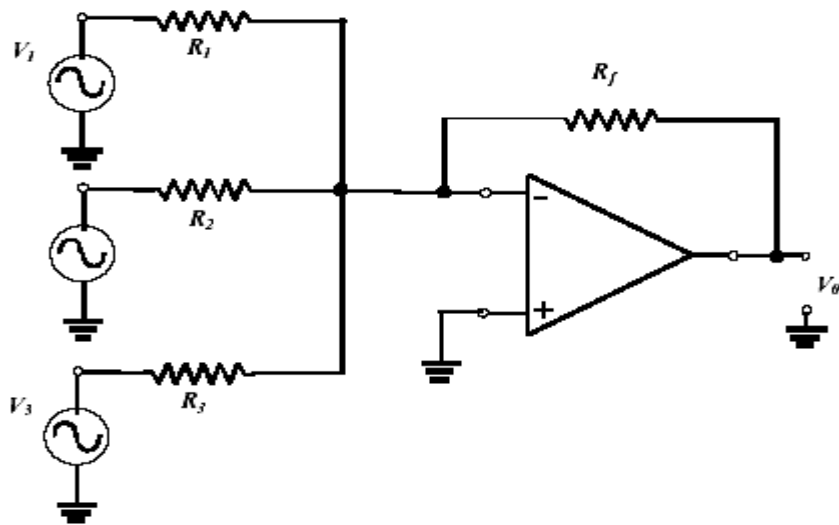
*Diferenciador básico*

Da figura, temos

$$V_o = Ri \quad e \quad V_e = Q/C \quad \text{onde} \quad i = dQ/dt = C dV_e/dt \quad \text{portanto}$$

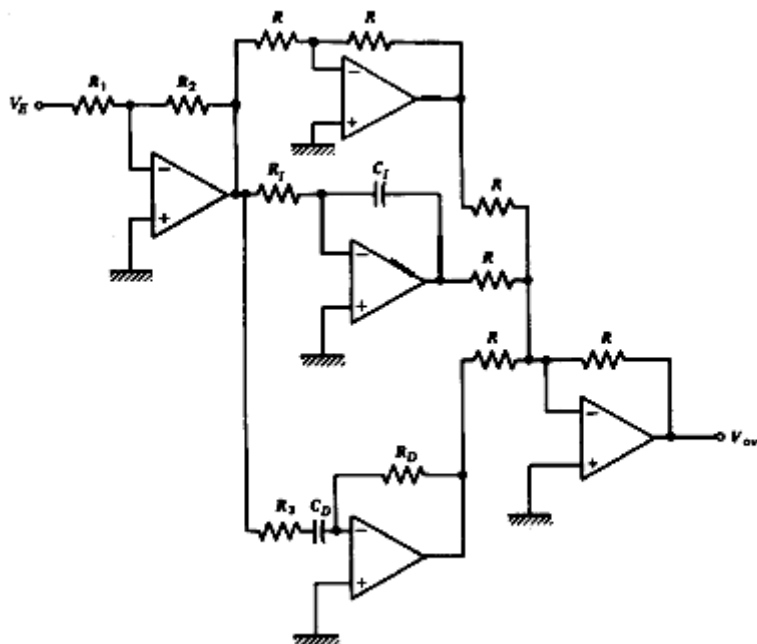
$$V_o = -RC dV_e/dt$$

E finalmente para se obter a saída correta, basta somar as saídas de cada bloco com um amplificador do tipo somador.

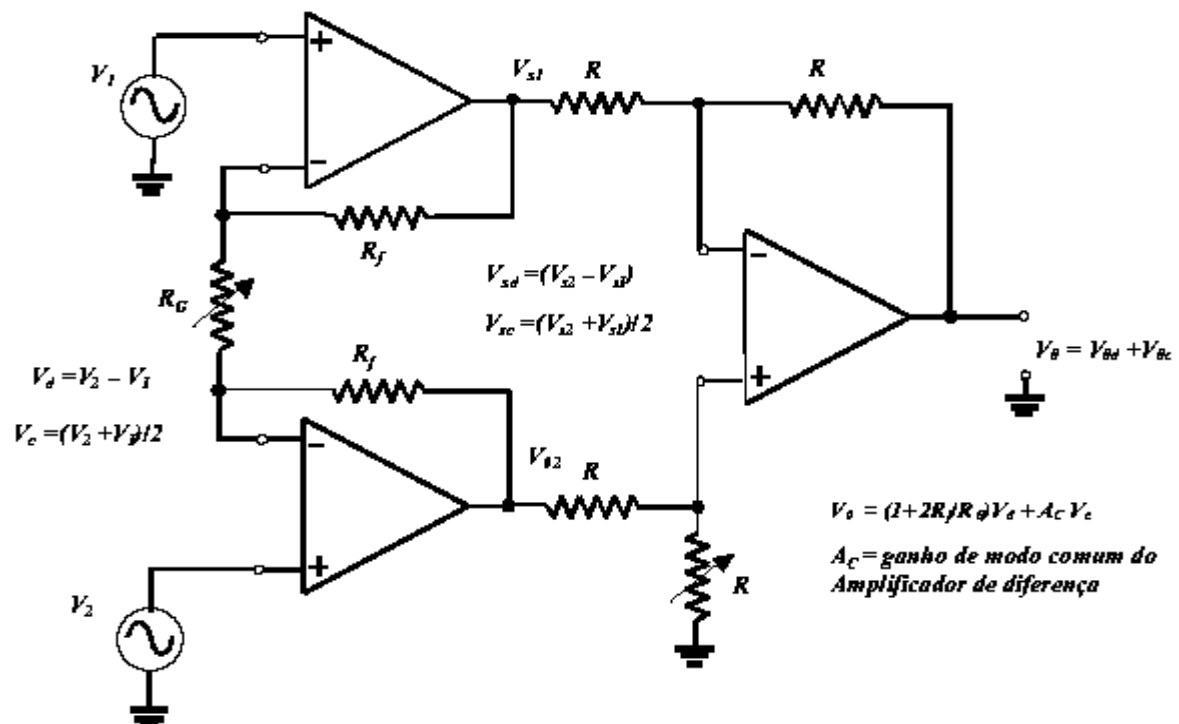


#### *Amplificador de soma*

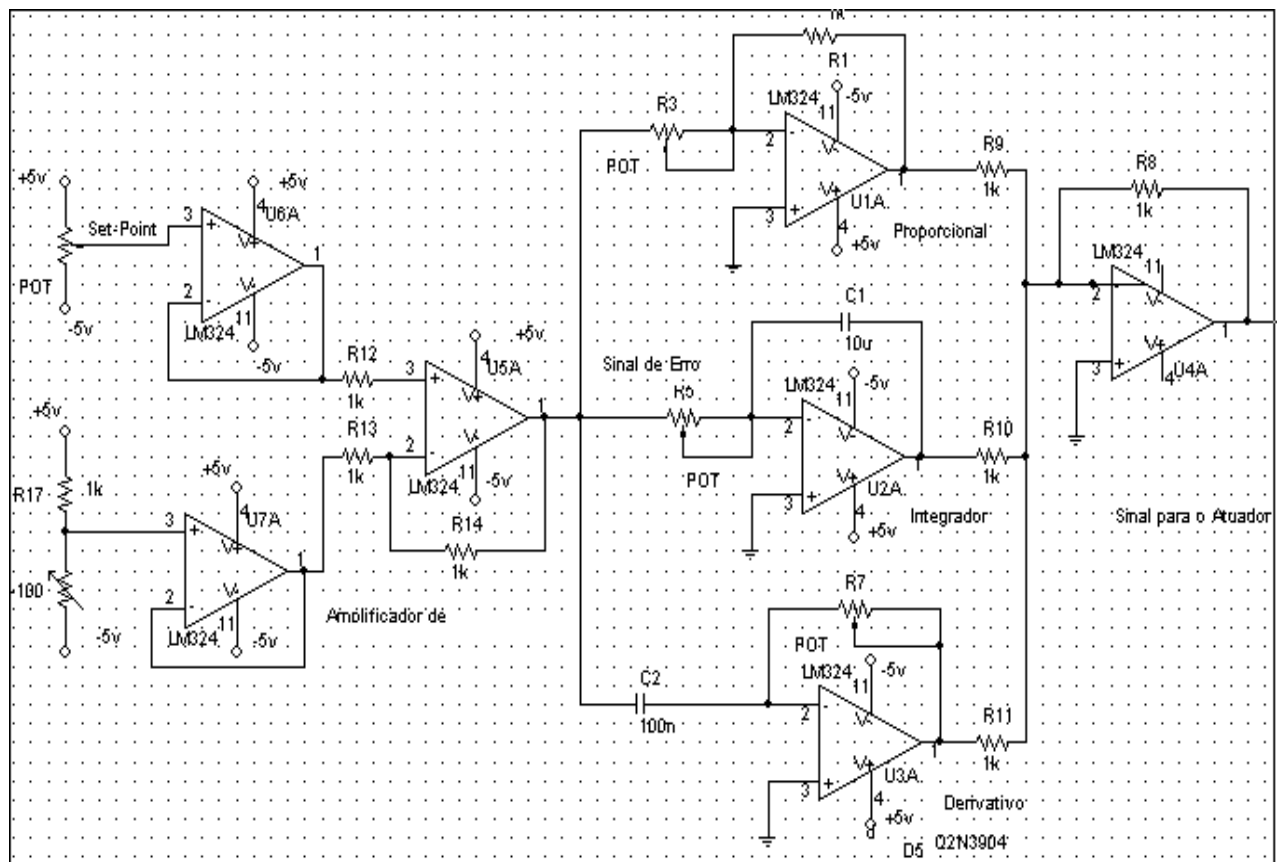
O resultado é o bloco PID completo exibido na próxima figura.



Resta agora, apenas verificar como o sinal de erro é gerado. Isto é feito por um circuito que um amplificador diferença. Ou sua versão mais sofisticada que é o amplificador de instrumentação. Perceba na entrada o sinal de set-point feito por meio de um potenciômetro. Na outra entrada é recebido o sinal do transdutor de temperatura, no caso, uma termoresistência ou RTD tipo Pt-100. O valor desta resistência varia com a temperatura, assim a tensão naquele ponto varia com a temperatura. O amplificador faz a diferença entre os dois sinais e assim o sinal de erro é gerado. Os valores dos componentes são apenas ilustrativos.



Abaixo um esquemático completo de um controlador de temperatura:



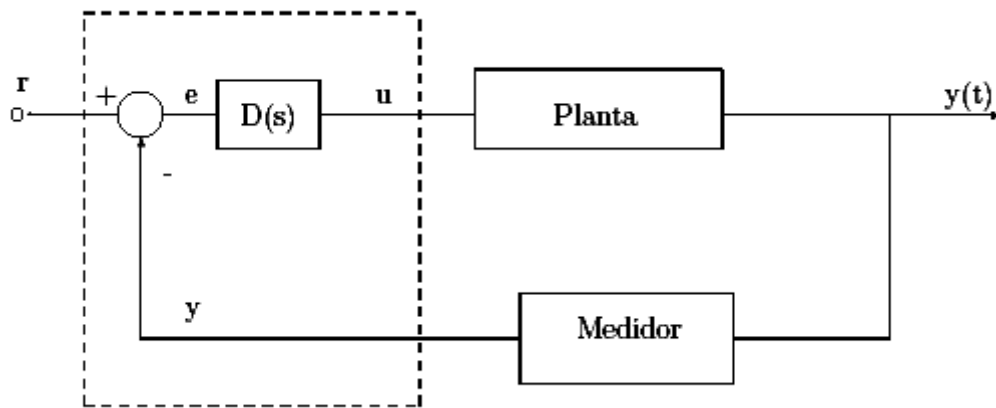
Os valores dos componentes acima são apenas ilustrativos.

Existem técnicas de controle mais sofisticadas que o PID, são chamadas de controle moderno baseado em espaço de estados. Há também o controle adaptativo, controle robusto, redes neurais artificiais e outras técnicas, mas são mais caras e aplicadas apenas em casos especiais, pelo menos por enquanto.

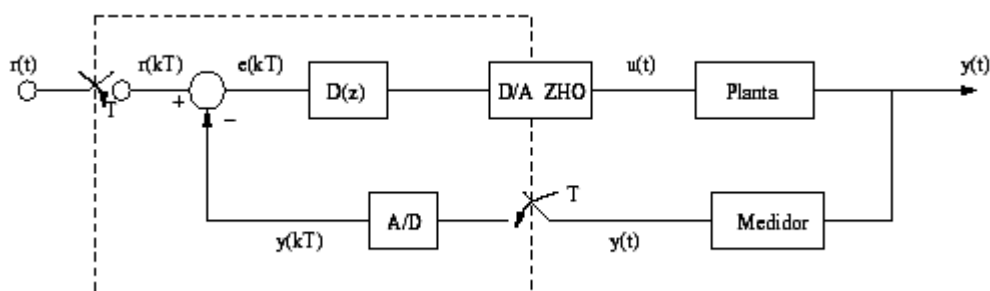
## 8. Sistemas de Controle Digital

A exemplo do ocorre com o controle analógico, podemos implementar um controlador digital e efetuar o mesmo processo de controle que o sistema analógico. Estes controladores são implementados por meio de microprocessadores e microcontroladores que rodam um software que implementa as funções de um bloco PID. A grande vantagem é a facilidade de se modificar o projeto do controlador, uma vez que o controlador é um software.

Entretanto, os sinais do mundo físico são analógicos então o controle digital não pode ser aplicado diretamente. É necessário converter os sinais analógicos dos transdutores em digitais, processá-los e então converter de novo os sinais digitais em analógicos. Ou seja, o controle digital exige blocos adicionais aos do sistema de controle.



Sistema analógico

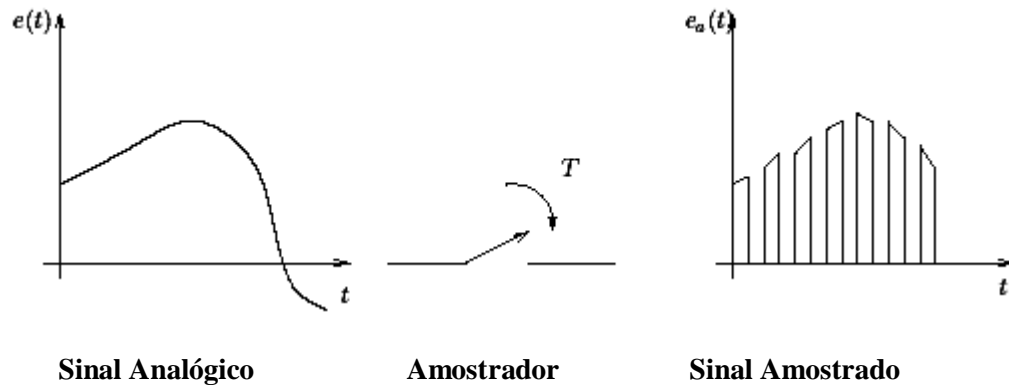


Sistema Digital

Os blocos responsáveis pela conversão do sinal analógico em digital são chamados de bloco A/D e trabalham pelo princípio de amostragem e quantização. E o circuito responsável pela conversão do sinal de Digital para Analógico é chamado de conversor D/A. Na figura acima pode-se identificar estes dois blocos. A chave representa a amostragem. O controlador propriamente dito é o bloco D(Z), que no caso é digital.

### Amostragem de Sinais:

Seja um sinal analógico como o da figura abaixo. Para podermos convertê-lo em digital não é possível aplicá-lo diretamente à entrada do conversor A/D, porque o processo de conversão leva um certo tempo. Assim o que se deve fazer é colher amostras do sinal analógico de tempos em tempos e então enviá-las para o conversor A/D. Assim o sinal analógico amostrado fica como na figura abaixo:

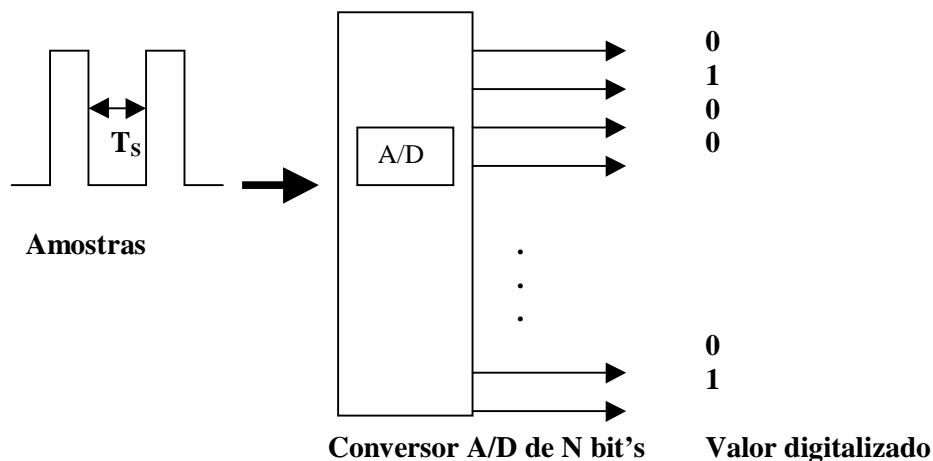


Percebe-se que cada amostra está espaçada da outra de um certo valor, chamado de  $T_s$ . Esse valor  $T_s$  é chamado de intervalo de amostragem. A fórmula abaixo define uma das propriedades mais importantes da amostragem a chamada frequência de amostragem, simbolizada por  $F_s$ .

$F_s = 1 / T_s$ , onde  $T_s$  é o intervalo entre as amostras.

Para que o controle digital funcione corretamente a amostragem deve ser bem feita, ou seja, ele deve “representar” bem o sinal que foi amostrado. Existe um critério para se amostrar sinais chamado de critério de Nyquist ou Shanon, que determina que a frequência de amostragem  $F_s$  deve ser pelo menos duas vezes a maior frequência do sinal que está sendo amostrado. Quando o sinal a ser amostrado não é senoidal, a frequência máxima do sinal pode ser verificada por meio de instrumentos especiais chamados de analisadores de espectro.

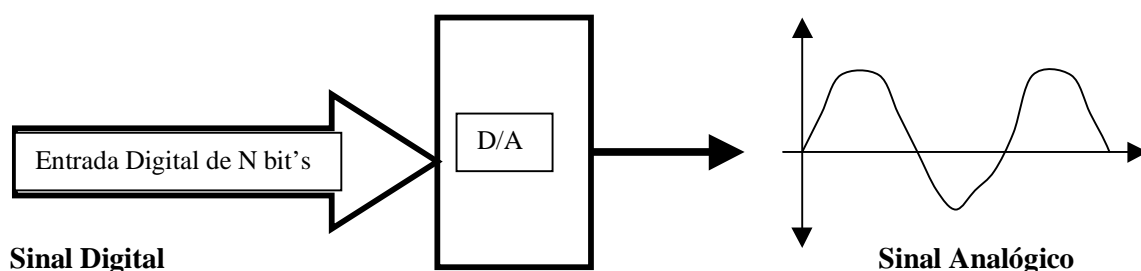
Uma vez que o sinal foi amostrado, à uma frequência igual a definida pelo critério de Nyquist, aplica-se cada amostra ao conversor A/D para a conversão propriamente dita. O processo de conversão consiste em comparar o sinal com uma série de pesos. Cada peso é sempre o dobro do anterior e cada peso corresponde-se um bit. Ou seja, existem tantos pesos quantos bit's no conversor A/D. Se a amostra for maior que o peso, o bit correspondente ao peso será igual a “1”, se for menor o bit será “0”. E isto é feito para cada peso. Assim na saída temos uma sequência de “0” e “1” que representam o valor digital da amostra, conforme a figura abaixo:



Este processo de comparação com pesos para obtenção do valor digital de uma amostra é chamado de quantização. Quanto mais pesos, ou seja, quanto mais bit's tem um conversor A/D, mais refinada fica a quantização e mais fidedigno é o processo de conversão. Outro parâmetro muito importante é tempo de conversão, que é o tempo necessário para converter a amostra num sinal digital. Como o intervalo entre uma amostra e outra é de  $T_s$  segundos, o conversor deve ser mais rápido que isto. Do contrário já chega a sua entrada a próxima amostra e ocorre um erro na saída do conversor. Existem vários tipos de conversores A/D no mercado, tem-se conversor de 8 bit's, 10 bit's, 12 bit's, 16 bit's e outros. Quanto mais bit's, melhor é a conversão e mais caro é o equipamento. A velocidade de conversão segue a mesma regra. Assim deve-se sempre Ter um compromisso entre a qualidade e o custo.

Muitos microcontroladores já possuem conversores A/D internamente. Alguns conversores tem mais de uma entrada, para que se possa amostrar mais de um sinal, mas cada entrada é amostrada uma de cada vez. Assim cada entrada é chamada de canal do conversor. Um conversor de 8 canais é um conversor de oito entradas analógicas.

O conversor D/A é um equipamento que faz o processo inverso. Ele converte um sinal digital num sinal analógico. Ele é composto por uma amplificador somador, de N entradas, correspondes ao bit's do sinal digital. Cada entrada tem um ganho de valor tal que é sempre 2 vezes o valor da anterior. Assim a soma dos valores dos bit's ponderados pelo ganho gera um sinal analógico proporcional ao valor do sinal digital, conforme vemos a figura abaixo:



Os blocos A/D e D/A permitem o interfaceamento dos circuitos digitais com o mundo analógico. Todo e qualquer equipamento que use sistema digital para o processamento e se comunique com o meio físico utilizam estes blocos. Como os equipamentos digitais vem ganhando espaço na indústria e até em nossas casas, estes equipamentos estão se tornando cada vez mais comuns. Exemplo de equipamentos são os multímetros e osciloscópios digitais, os termômetros digitais, os CLP's com entradas e saídas analógicas, os CNC's, as redes digitais industriais, os sensores digitais, etc..

Quanto ao funcionamento do bloco PID, é similar ao analógico que já foi estudado.

## 9. Dispositivos de Entrada (Sensores e Transdutores):

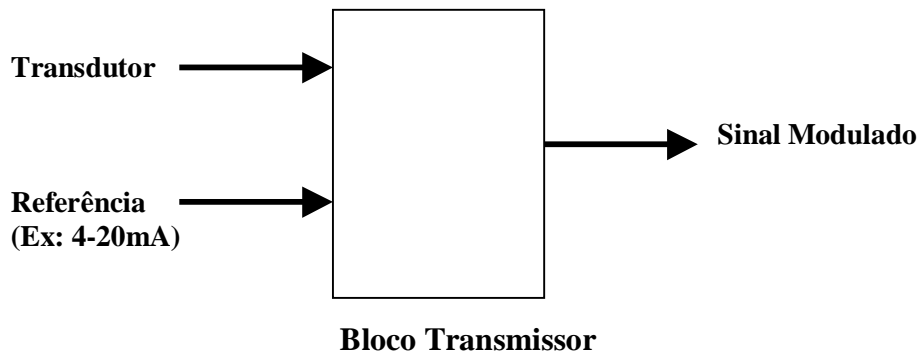
São dispositivos utilizados para realizar o interfaceamento entre o sistema físico e o sistema de controle eletrônico, levando informações do campo para o controlador.

Podem ser classificados da seguinte forma:

- **Sensores:** Dispositivos projetados para detectarem algum evento no campo e emitirem um sinal em resposta a este evento. Exemplo. Sensor de proximidade. Quando algum objeto atinge seu campo de visualização ele ativa um sinal em resposta a presença deste objeto.
- **Transdutores:** Dispositivos que convertem uma grandeza física em outra. No nosso caso nos interessam os transdutores elétricos que convertem grandeza física (temperatura, pressão, etc..) em sinal elétrico (normalmente tensão). Podem ser de dois tipos: direto e indireto.
  - **Direto:** Os do tipo direto convertem a grandeza física em sinal elétrico diretamente. É o caso dos termopares que convertem temperatura em tensão.

- **Indireto:** Os do tipo indireto modificam algum parâmetro interno, como resistência por exemplo, de forma proporcional à grandeza física. É o caso das termoresistências que aumentam sua resistência com o aumento da temperatura. Para fazer a conversão deve-se inseri-la num divisor resistivo e medir a tensão sobre a termoresistência, que será proporcional ao valor da resistência e por consequência, proporcional à temperatura.

Entretanto, sensores, mas principalmente transdutores tem alcance limitado poucas dezenas de metros. Isto porque o comprimento do fio que liga o sensor ou transdutor, que possui alguma resistência e indutância, pode interferir no valor da medida. Além disso pode captar ruídos e afetar a precisão da informação. Nesses casos faz-se necessário um equipamento específico para enviar informações a distância maiores, que é o **Transmissor**. Transmissor é um equipamento que recebe o sinal de um transdutor ou sensor e “modula” um sinal de referência( 4-20mA, 0-5V, etc..) de forma proporcional ao sinal do transdutor ou sensor. Abaixo vemos uma ilustração desta modulação.

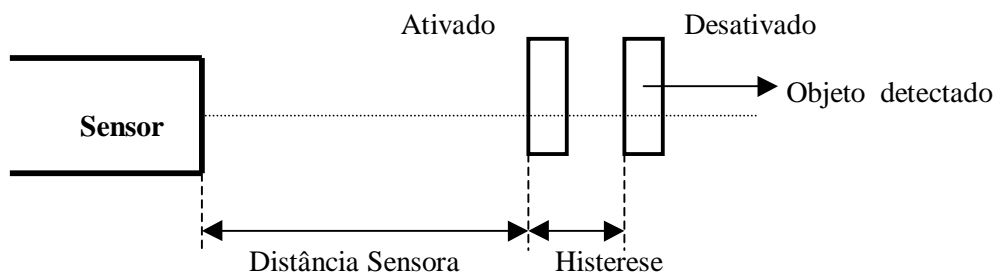


Existem ainda os Transmissores do tipo digital que não usam sinais digitais.

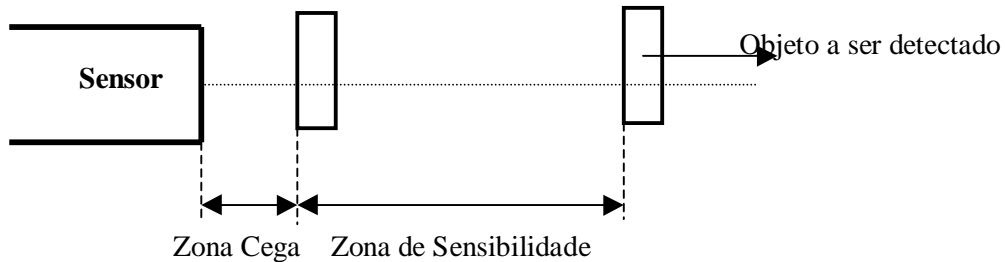
#### **Parâmetros Fundamentais de Sensores:**

Os sensores são caracterizados por diversos parâmetros, mas alguns são mais freqüentemente usados, pois são praticamente indispensáveis. Analisaremos alguns destes:

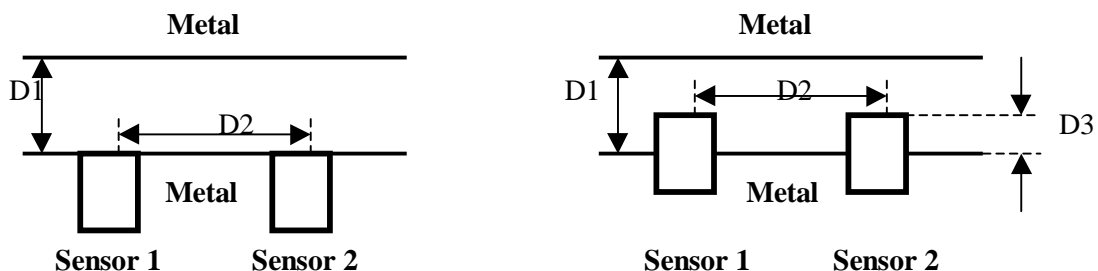
- **Distância Sensora:** É a distancia perpendicular da face sensora até o ponto onde o sensor atua. Tipicamente é simbolizada pelo símbolo  $S_n$ ;
- **Histerese:** É a diferença entre entre a distância onde o sensor é ativado quando objeto se aproxima dele e a distância na qual o sensor é desativado quando o objeto se afasta dele. Normalmente é dada de forma percentual. A figura abaixo ilustra bem estas propriedades:



- **Zona Cega:** Região dentro da distância sensora, que o sensor, por questões tecnológicas ou de montagem, não consegue detectar o objeto. Não se trata de uma falha do sensor, mas sim de característica do mesmo que deve ser levada em conta.
- **Zona de sensibilidade:** Região da zona detectável, onde o dispositivo é efetivamente sensibilizado.



- **Repetibilidade:** Pequena variação na distância sensora quando se procede duas ou mais tentativas de detecção. Normalmente é indicada de forma percentual. Não deve ser confundida com a histerese.
- **Frequência de Operação:** Nº máximo de comutações por segundo que um sensor consegue realizar. É medida em Hertz;
- **Corrente de Consumo:** Valor da corrente necessária ao funcionamento do sensor;
- **Corrente de Carga:** É a máxima corrente possível na saída de um sensor;
- **Corrente de Pico:** É o valor máximo de corrente consumido pelo sensor no momento da ativação;
- **Tensão de Ripple:** Máxima oscilação da tensão CC de alimentação permitida;
- **Tempo de Estabilização:** Tempo que se deve aguardar logo após a energização do sensor, para que as leituras sejam confiáveis;
- **Proteção Intrínseca ou IP:** Grau de proteção do sensor a penetração de sólidos e líquidos. É indicado por 2 dígitos (Ex. IP 66). O 1º refere-se à sólidos e o 2º à líquidos. Deve-se consultar a tabela de graus de proteção para verificar o significado de cada código.
- **Versão de Montagem:** Refere-se a forma como o sensor deve ser montado e as distâncias que devem ser respeitadas para assegurar o bom funcionamento do sensor. A figura abaixo ilustra isto:

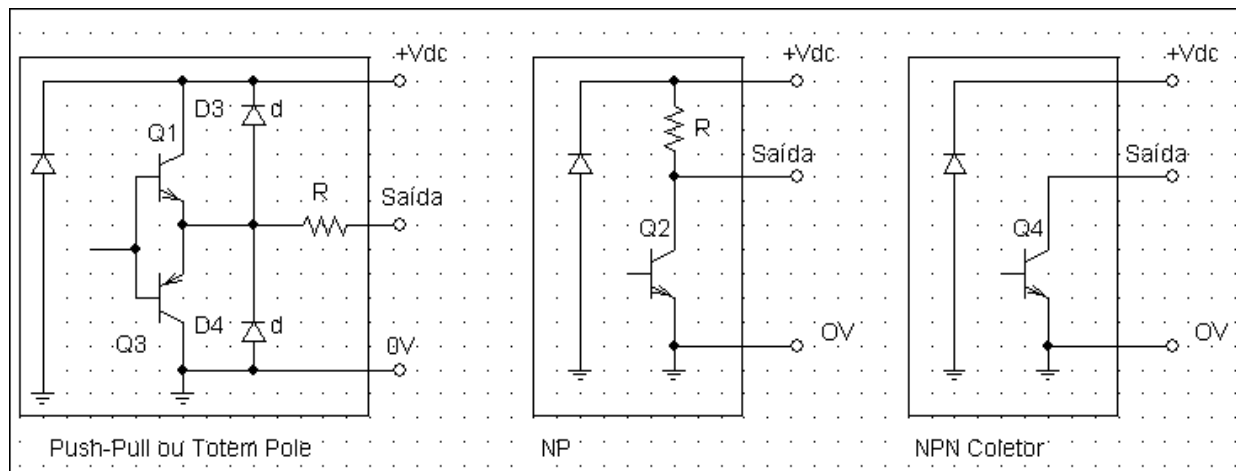




### Tipos de Saída de Sensores:

As saídas de um sensor dividem-se em dois grupos: As passivas e as ativas, a saber:

- **Passivas:** Também chamadas de contato seco, são compostas por um simples contato tipo NA ou NF, que é acionado quando o sensor é ativado. Pode operar com CA ou CC. Não possui grandes restrições a não ser a corrente máxima permissível.
- **Ativas:** São saídas eletrônicas, que usam transistores NPN ou PNP em várias configurações possíveis. São sempre em CC, pois são polarizadas. A figura abaixo ilustra alguns tipos possíveis:



A saída Push-Pull é a melhor do ponto de vista de corrente, pois não depende do Resistor R que no caso é menor do que nas outras duas modalidades. É a preferida para melhores performances.

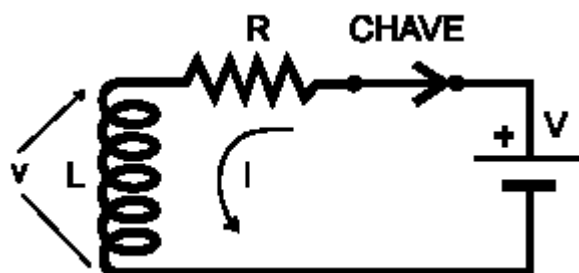
Na modalidade NPN, apenas um transistor é usado de forma que a saída sempre exibe nível tensão próximo de Vdc, quando o transistor está cortado. Quando saturado, a corrente flui pelo transistor. Neste caso o resistor R é chamado de pull-up, pois liga a saída ao Vdc.

No caso do NPN coletor aberto, não há o resistor de pull-up. Este deve ser adicionado externamente ou o circuito não funcionará. A principal vantagem desta montagem é que a potência dissipada sobre o resistor é externa ao sensor e que esta montagem permite fazer lógica “E” ou “AND” entre mais de um sensor, usando apenas o resistor de pull-up externo.

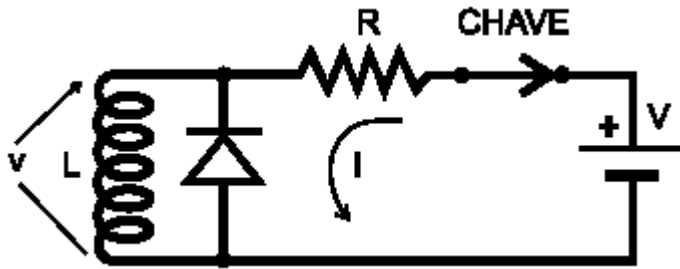
Na versão PNP, vale a mesma coisa só que o transistor agora é PNP e não NPN. O resistor e o transistor trocam de lugar na montagem. Agora o resistor R liga a saída ao terra (0V), assim ele passa a se chamar resistor de pull-down.

Atente para os diodos presentes em todas as montagens. Elas visam proteger contra inversão de polaridade e principalmente contra as sobretensões provocadas pelo chaveamento de bobinas de contadores e relés auxiliares.

Este efeito também ocorre em contatos secos, que podem ser danificados por estes chaveamentos.



Na figura ao lado, ilustra-se o efeito do chaveamento da bobina de um contator. A indutância é devido a bobina e a resistência é normalmente devido ao fio e a bobina. Durante a abertura da chave, a tensão V sobre a bobina cresce muito e esta força o aparecimento de um arco nos contatos da chave.



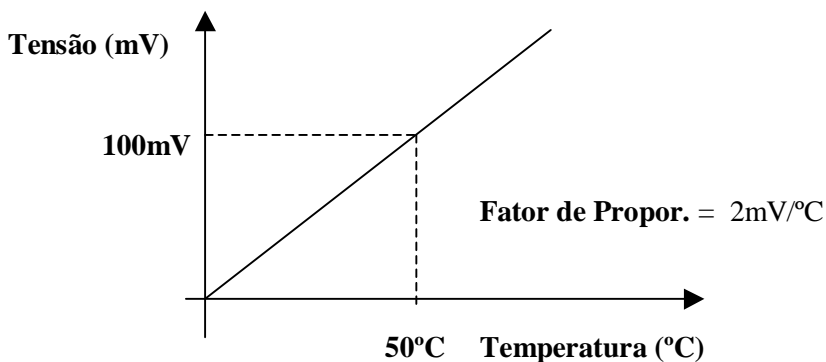
normalmente, recomendam os valores de corrente e os valores de R e C para cada tipo de sensor. A figura abaixo, ilustra o uso de diodos para desviar o surto de tensão.

A solução clássica, é reduzir a corrente em circuitos muito indutivos, usar diodos reversamente polarizados e usar um circuito RC em paralelo com o contato seco para desviar o surto do contator. Este conjunto RC é chamado de amaciador ou snubber de tensão. Os fabricantes,

### Parâmetros Fundamentais de Transdutores:

Alguns dos parâmetros utilizados pelos sensores se aplicam aos transdutores também como Tensão de Ripple, versão de montagem, etc.. Mas existem características que são peculiares aos transdutores. Dentre eles:

- **Linearidade:** Parâmetro importantíssimo, dado que uma conversão de grandezas, que é a função precípua do transdutor, somente pode ser feita se houver uma relação linear entre a grandeza física e elétrica. Quando isto não ocorre, pode-se lançar mão de técnicas de linearização para fins de obtenção da linearidade. É o caso de transdutores de temperatura do tipo NTC, que são funções exponenciais da temperatura e que com auxílio de amplificadores logarítmicos pode-se linearizar o transdutor. Normalmente os transdutores são lineares certas faixas de valores. Na figura a seguir, um gráfico mostrando a linearidade de um transdutor de temperatura com a tensão.
- **Região de atuação:** Faixa de valores da grandeza que se deseja converter onde o dispositivo efetivamente deve trabalhar. Normalmente estão relacionadas com a região onde vale a linearidade do transdutor, mas podem haver outros limitantes como integridade física do material, detalhes construtivos, entre outros.
- **Fator de Proporcionalidade:** Admitindo-se a linearidade do transdutor, a grandeza elétrica está relacionada com a grandeza física por um certo fator, chamado de fator de proporcionalidade. Exemplo: Um transdutor com  $1\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  de fator de proporcionalidade.
- **Precisão e Exatidão:** Parâmetros relacionados ao erro de conversão de uma da grandeza. Influenciado por vários fatores, tais como condições ambientais, posicionamento, presença de ruído elétrico, e outros.



Os transdutores podem ter saída analógica (termopares) ou digital (encoder). De qualquer forma, ruídos podem afetar a precisão de um transdutor, assim cuidados especiais devem ser tomados com estes dispositivos. Normalmente, os fabricantes sugerem medidas já consagradas para a eliminação ou redução destes problemas.

#### **10. Técnicas Básicas de Blindagem:**

As técnicas de blindagem, visam basicamente eliminar ou reduzir o ruído elétrico e interferências eletromagnéticas, gerados por dispositivos eletroeletrônicos e pelos equipamentos e processos no campo industrial. É uma área muito complexa, chamada de **Compatibilidade Eletromagnética**, que vai além do escopo deste curso, mas algumas recomendações clássicas podem ser feitas. São elas:

- Não utilizar os mesmos eletrodutos que passam fios de circuitos de força para passar fios de elementos sensores e transdutores;
- Em bandejas metálicas, os fios ficam paralelos por trechos bem longos, manter sempre um distanciamento entre os fios de circuitos de força e os fios dos sensores e transdutores, compatível com o recomendado por normas e fabricantes;
- Evitar cruzar fios de transdutores com fios de força, caso isto seja inevitável, efetuar o cruzamento de forma perpendicular para evitar a indução eletromagnética;
- Onde estiver constado que há a presença de forte interferência eletromagnética, utilizar eletrodutos metálicos para abrigar os fios dos transdutores e sensores. O eletroduto metálico tem um efeito de blindagem destes ruídos. Entretanto, para a blindagem ser efetiva, o eletroduto deve ser aterrado e a continuidade elétrica deve ser assegurada;
- Em casos mais graves, usar cabos blindados, que consistem em condutores envoltos por uma malha metálica. Esta deve ser aterrada na origem do circuito para ser efetiva.
- Não deixe fios sem uso com as pontas soltas, pois elas agem como antenas captando ruídos e afetando os outros condutores em uso. Mantenha as pontas de fios sem uso, sempre aterradas.
- Quando efetuar um aterramento de um conjunto de equipamentos interligados, sempre use o mesmo fio terra. Nunca puxe um terra para cada equipamento, principalmente de quadros de força diferentes, pois pode haver diferença de potencial e ocorrem danos aos equipamentos.

Nem sempre estas técnicas serão suficientes, mas com certeza resolveram boa parte dos problemas mais comuns, e lembre-se que são técnicas universais e que portanto, valem sempre.

#### **11. Transdutores mais usados na Indústria:**

Há vários tipos de transdutores disponíveis no mercado, eles variam conforme a grandeza que medem, classe de precisão e região de operação. A classificação mais comum é a por tipo de grandeza medida. Assim temos, principalmente:

- **Transdutores de Temperatura;**
- **Transdutores Fotoelétricos;**
- **Transdutores de Posição (Servomecanismos).**
- **Transdutores de Tensão Mecânica ou Extensômetros;**
- **Transdutores de Pressão;**
- **Transdutores de Vazão;**

## **Transdutores de Temperatura:**

### **Definição de temperatura:**

As materiais presentes na natureza são constituídos de agrupamentos de átomos. Cada um dos 92 elementos naturais da natureza é representado por um tipo particular de átomo. Os materiais que nos rodeiam normalmente não são puro, mais sim uma combinação de vários elementos que forma uma molécula. Assim, por exemplo, o hélio é um elemento natural composto de um tipo particular de átomo; a água, por outro lado, é composta de molécula cada molécula consistindo de dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio. Na análise das interações destas molécula é necessários olhar sob o ponto de vista do estados da materiais: sólido, líquido e gasoso.

#### ➤ **Sólido**

Em qualquer material sólido, os átomos ou as moléculas estão fortemente ligado uns com os outros, de maneira que estes são incapazes de move-se ou afasta-se de sua posições de equilíbrio.

Cada átomo, entretanto é capaz de vibrar em torno de sua posição particular. O conceito de energia térmica é considerado pela vibração das moléculas.

Considere um material particular no qual as moléculas não apresentam nenhum movimento; isto é, as moléculas estão em repouso. Tais materiais possuem energia térmica ( $W_{ter} = 0$ ) nula. Se nós adicionarmos energia para este material colocando-o num aquecedor, esta energia faz com que suas moléculas comecem a vibrar. Nós dizemos agora que este material tem alguma energia térmica ( $W_{ter} > 0$ ).

#### ➤ **Líquido**

Se mais e mais energia é adicionada ao material, as vibrações se tornam, mais e mais violenta quando a energia térmica aumenta. Finalmente, quando uma certa condição é alcançada onde as ligações que mantém as moléculas juntas se quebram e esta se movem ao longo do material. Quando isto ocorre, nós dizemos que o material fundiu e tornou-se líquido. Agora, embora as moléculas mantém atrações mútuas, a energia térmica é suficiente para mover-lhas de formas randômicas ao longo do material, e a velocidade com que se movem é a medida da energia térmica.

#### ➤ **Gás**

Um posterior aumento na energia térmica do material intensifica a velocidade das moléculas até que finalmente estas ganham energia suficiente para conseguir escapar completamente da atração das outras moléculas. Esta condição é manifestada pela ebulição do líquido. Quando um material consistido de tais moléculas movendo randômicamente através de um volume contido, nós chamamos este material de gás. A velocidade média das moléculas é novamente a medida da energia térmica do gás.

O objetivo dos sensores térmicos esta associado com a medida da energia térmica do material ou de um ambiente contendo diferentes materiais.

## **Temperatura**

A medida da energia térmica média por molécula de um material, expressa em **joules**, poderia ser usada para definir energia térmica; mas isto não é tradicionalmente feito. Ao invés disso um conjunto especial de unidade é, cujas origem estão contida na história de medidas de energia térmica, é empregado

para definir a **energia térmica de um material**. Nós escolhemos as três mais comuns unidade. Ao diferentes conjuntos de unidades são chamados de **escalas de temperatura**.

➤ **Calibração**

Para definir as escalas de temperatura, um conjunto de **pontos de calibração** é utilizado; para isto, a energia térmica média por molécula é definida através da condição de equilíbrio existente entre os estados sólido, líquido e gasoso de vários materiais puros da natureza. Alguns destes pontos de calibração padrão são:

1. **Oxigênio:** equilíbrio líquido/gás
2. **Água:** equilíbrio sólido/líquido
3. **Água:** equilíbrio líquido/gás
4. **Ouro:** equilíbrio sólido/líquido

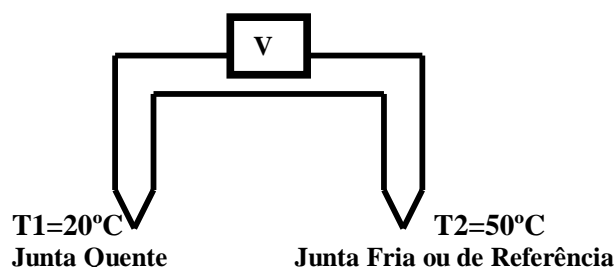
Existem vários tipos de transdutores de temperatura, mas basicamente podem ser agrupados em quatro grupos:

- **Termopares;**
- **Termistores:** Podem ser do tipo **NTC** e **PTC**;
- **Termoresistências** ou **RTD's**;
- **Semicondutores;**

**Termopares:** São basicamente dois fios metálicos, compostos por duas ligas metálicas, normalmente heterogêneas, unidas por um ponto de junção. A junção ao ser submetida ao calor, fornece uma tensão proporcional a temperatura. Termopares trabalham sobre ampla faixa de temperatura mantendo sua linearidade e são bastante robustos. Por esta razão são largamente empregados na indústria para a medição e controle de temperatura.

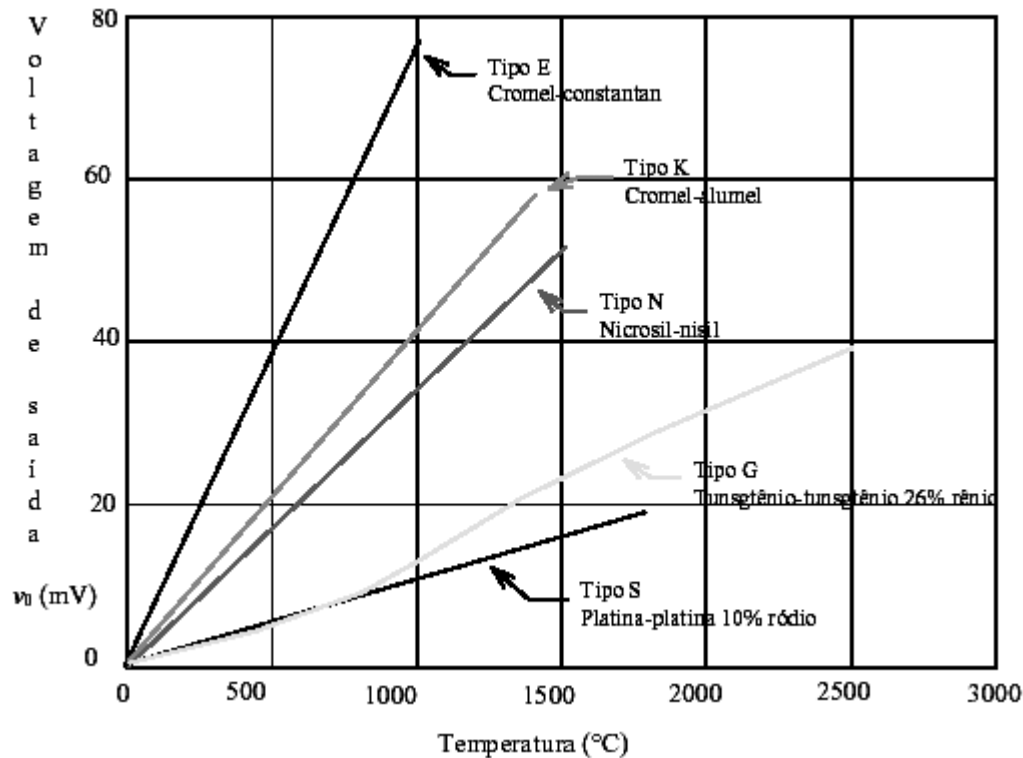
Seu ponto fraco é a que a tensão obtida em função da temperatura é bem baixa, da ordem de milivolts o que o torna muito vulnerável à ruídos.

O princípio de funcionamento dos termopares é o efeito **Seebeck**, que consiste no fato de que quando duas junções metálicas estão submetidas a temperaturas diferentes, surge uma FEM( Força Eletromotriz ), proporcional a diferença entre as temperaturas das duas junções. A figura abaixo ilustra este efeito.



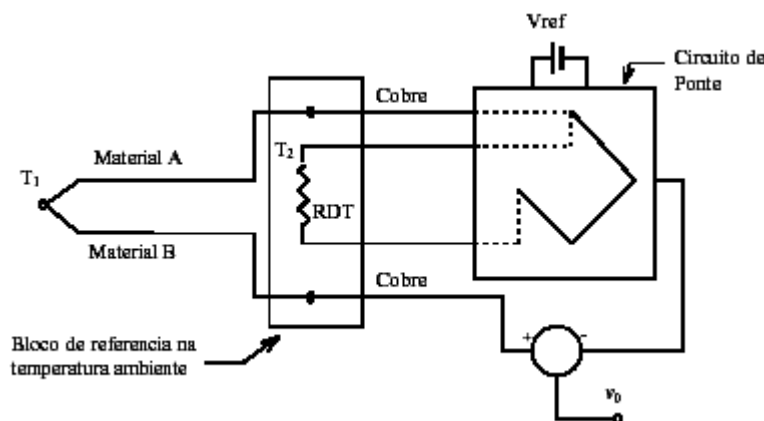
Suponha que a junta fria esteja à 20°C, e que a junta quente esteja à 50°C. O voltímetro medirá uma tensão  $V = K \cdot (T_2 - T_1)$ , onde **K** é um fator de proporcionalidade. Assim sendo o termopar somente mede a diferença de temperatura e não a temperatura absoluta da junção. Isso quer dizer que devemos sempre conhecer a temperatura da junção fria, que por esta razão, também é chamada de junção de referência.

Na figura abaixo, temos a FEM, em função da temperatura para diversos materiais:



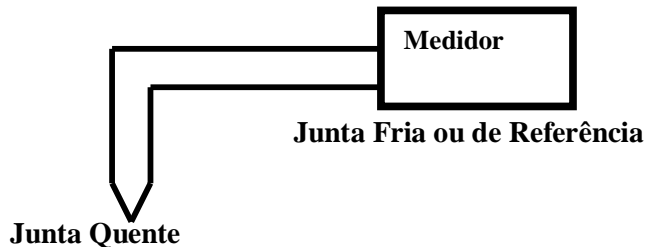
Entretanto, nos termopares usados na indústria não temos, normalmente, duas junções e sim apenas junção. Isto ocorre porque no termopar usado na indústria o ponto de medição da tensão do termopar é exatamente sobre a junção fria, que fica conectada ao equipamento. Dessa forma a temperatura da junção fria é a própria temperatura ambiente do aparelho. Internamente o aparelho que usa o termopar, usam normalmente diodos ou outro componente qualquer para fornecer a temperatura da junção fria.

A figura abaixo, ilustra um caso usando RTD como referência.

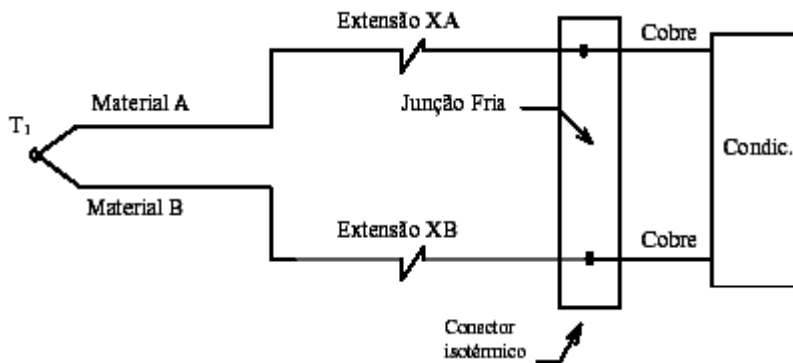


Enquanto na indústria é mais comum o uso de termopares de uma ponta ou uma junção, como os da figura acima, em laboratórios de calibração, entretanto, é mais comum o uso de duas juntas para dar mais precisão. Normalmente a junta fria fica solidamente conectada à fonte de 0°C, que pode ser uma garrafa térmica com gelo.

Na figura abaixo vemos a conexão de um termopar de uma junção, em um medidor de temperatura usado na indústria.



Observe que o cabo de um termopar nunca deve ser estendido, pois isto equivaleria à deslocar a junção fria da superfície do aparelho e haveria erro na leitura. Quando é necessário estender o cabo do termopar deve-se usar materiais iguais aos do termopar ou cabos especiais, recomendados pelos fabricantes e fazer uma operação chamada de compensação, que visa eliminar o erro introduzido pela extensão. A figura abaixo ilustra um caso de extensão.



Mesmo com todos estes cuidados o cabo do termopar não pode ser muito estendido em razão dos problemas de interferência eletromagnética que vão se tornando notáveis. Quando a informações está longe do ponto de medição, deve-se usar mesmo é o transmissor.

### Fontes de erros

Vários tipos de erros podem ser introduzido durante a medida de temperatura com o uso de termopares. Erros devidos a carregamento do circuito do termopar (já descrito) , precisão na leitura, ruído e resposta dinâmica devem ser minimizados afim de alcançar precisão desejada. Existe ainda outro tipo de erro inerente a sensores de temperatura, o chamado erro de inserção. O erro de inserção é o resultado do aquecimento ou resfriamento da junção que muda a temperatura da junção  $T$  do meio na temperatura  $T_m$  .

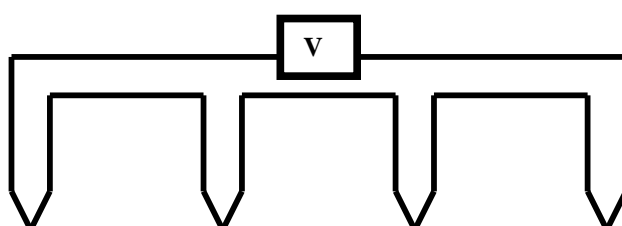
Este erro é classificado em três tipos:

- 1) Erro de condução
- 2) Erro de recuperação
- 3) Erro de radiação

O primeiro erro é devido a transferência ou absorção de calor por condução para o ambiente através do contato do termopar com o corpo a ser monitorado. Este erro é mais significativo quando a massa térmica do termopar é comparável com a do sistema. O segundo erro acontece sempre que um termopar é inserido no meio de um gás movimentando-se à alta velocidade, resultando na estagnação do gás próximo ao probe de medida. Finalmente, o terceiro erro é devido a perdas por radiação de calor. Este erro é mais significativo em altas temperaturas.

### Termopilha:

Outro recurso muito utilizado é a pilha de termopares que consiste em associar vários termopares do mesmo tipo em série, de forma tal que a tensão de leitura seja a soma algébrica das tensões dos vários termopares. Dessa forma consegue-se uma tensão de leitura mais elevada e maior imunidade ao ruído. Uma ressalva, os termopares devem medir sempre a mesma temperatura. A figura abaixo ilustra isto.



Os termopares são classificados em função da faixa de temperatura que atuam, dos materiais que compõem suas ligas e da precisão associada a eles. Abaixo tem uma tabela classificação de termopares:

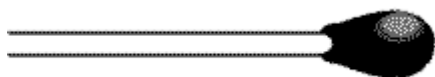
Tipo	Positivo	Negativo	Precisão	Faixa	Observações
<b>B</b>	Pt 30%Rh	Pt 6%Rh	0,5% >800°C	50 a 1820	Para altas temperaturas
<b>C</b>	W 5%Re	W 26%Re	1% >425°C	0 a 2315	Para temperaturas muito altas
<b>D</b>	W 3%Re	W 25%Re	1% >425°C	0 a 2315	Para temperaturas muito altas
<b>E</b>	Ni 10%Cr	Cu 45%Ni	0,5% ou 1,7°C	-270 a 1000	Uso geral para temperaturas médias e baixas
<b>G</b>	W	W 26%Re	1% >425°C	0 a 2315	Para temperaturas muito altas
<b>J</b>	Fe	Cu 45%Ni	0,75% ou 2,2°C	-210 a 1200	Alta temperatura em atmosfera redutora
<b>K</b>	Ni 10%Cr	Ni 2%Al 2%Mn 1%Si	0,75% ou 2,2°C	-270 a 1372	Uso geral, alta temperatura em atmosfera oxidante
<b>M</b>	Ni	Ni 18%Mo	0,75% ou 2,2°C	-50 a 1410	
<b>N</b>	Ni 14%Cr 1,5%Si	Ni 4,5%Si 0,1%Mg	0,75% ou 2,2°C	-270 a 1300	Substituto melhor para o tipo K
<b>R</b>	Pt 13%Rh	Pt	0,25% ou 1,5°C	-50 a 1768	De precisão para alta temperatura
<b>S</b>	Pt 10%Rh	Pt	0,25% ou 1,5°C	-50 a 1768	De precisão para alta temperatura
<b>T</b>	Cu	Cu 45%Ni	0,75% ou 1,0°C	-270 a 400	Uso geral p/ baixa temperatura, resistente à umidade

**OBS:** A liga de Cobre e Níquel (Cu-Ni) é mais conhecida como Constantan ou Constantã.



### Termistores:

Termistores são resistores sensíveis à temperatura. Os elementos resistivos são óxidos de metais como manganês, níquel, cobalto, cobre, ferro, titânio. A figura abaixo dá a ilustração de um tipo comum.



Com relação a forma como a resistência varia com a temperatura os termistores podem ser classificados de duas formas: NTC ou PTC.

- **NTC:** É quando a resistência do termistor diminui com o aumento da temperatura;
- **PTC:** É quando a resistência do termistor aumenta com o aumento da temperatura.

O tipo NTC é mais usual na medição e controle de temperatura. Mas não são muito usados em processos industriais, provavelmente pela falta de padronização entre os fabricantes.

O termistor NTC é um dos sensores de temperatura que dão a maior variação da saída por variação de temperatura, mas a relação não é linear.

A relação entre resistência e temperatura é dada pela equação de Steinhart & Hart:

$$T = 1/(a + b \ln R + c \ln R^3)$$

Onde os coeficientes a, b e c são característicos de cada modelo e informados pelos fabricantes. A tabela abaixo dá as principais características de um tipo comum 44004 fabricado pela YSI.

Nota-se a não-linearidade da temperatura com a resistência. Entretanto isto pode ser melhorado com o uso de amplificadores logarítmicos que linearizam o componente, tornando-o útil para a aplicações como transdutor de temperatura.

Pode-se também notar que a temperatura máxima não é das mais elevadas, outro fator que limita o uso industrial. Uma aplicação típica de termistores é na proteção de circuitos de potência.

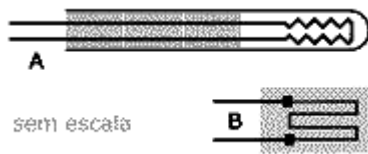
Parâmetro	Valores
Resistência a 25°C	2252 ohms
Faixa de medição	-80 a +120°C típico (250°C max)
Tolerância	±0,1 ou ±0,2°C
Estabilidade em 12 meses	< 0,02°C a 25°C e < 0,25°C a 100°C
Constante de tempo	< 1,0 s em óleo e < 60 no ar calmo
Auto-aquecimento	0,13 °C/mW em óleo e 1,0 °C/mW no ar
Coeficientes	a = 1,4733 10 <sup>-3</sup> b = 2,372 10 <sup>-3</sup> c = 1,074 10 <sup>-7</sup>
Dimensões	2,5 x 4 mm

PTC's apresenta limitação de uso pelo fato de que somente são PTC's dentro de uma faixa de temperatura, mais restrita que a dos NTC's. Assim sendo os NTC's são mais comuns. A aplicação típica de um PTC é como proteção por sobrecarga por corrente excessiva de componentes eletrônicos.

### Termoresistências:

RTD é abreviação inglesa de "Resistance Temperature Detector". A base do funcionamento é o conhecido fenômeno da variação da resistência elétrica dos metais com a temperatura. Embora os anteriores usem princípios similares, em geral eles não são classificados como RTDs, uma vez que os

elementos resistivos são óxidos e semicondutores. Os metais mais usados são platina, níquel, cobre, ferro, molibdênio e/ou ligas dos mesmos.

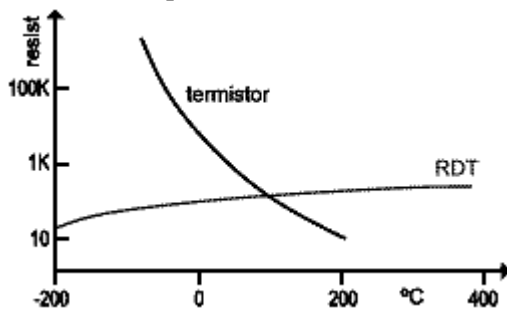


Na figura ao lado, esboços dos dois tipos comuns de RTD: em A o **RTD de fio** (o fio metálico é enrolado em forma de espiral dentro de um tubo cerâmico com suportes e outros detalhes não mostrados). Em B o **RTD de filme** (um filme metálico é depositado sobre uma placa de cerâmica). Na prática, o RTD de filme é também colocado no interior de um tubo para proteção. Ambos são desenhos sem escala.

A variação da resistência elétrica com a temperatura de um fio metálico é dada pela relação  $R(t) = R_0 (1 + a t + b t^2 + c t^3)$ , onde  $R_0$  é a resistência a  $0^\circ\text{C}$  e os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  são características do metal ou liga. É uma variação bastante pequena e circuitos adequados devem ser usados. Ver no gráfico abaixo a comparação com um termistor típico.

É praxe a especificação térmica de um RTD ser dada pelo coeficiente médio (alfa) de temperatura na faixa de  $0$  a  $100^\circ\text{C}$ . Assim,  $\alpha = (R_{100} - R_0) / (100 - R_0)$ . Unidade  $1/^\circ\text{C}$ .

Pequenas proporções de impurezas ou elementos de liga podem afetar consideravelmente o coeficiente de temperatura. Algumas vezes, impurezas são propositalmente adicionadas para contrabalançar o efeito de impurezas existentes de difícil remoção.



Embora neste caso seja desejável a maior variação possível de resistência com a temperatura, em outros casos deve ser o contrário. Exemplo: uma liga de 84% Cu, 12% Mn e 4% Ni quase não apresenta variação com a temperatura. É usada para fabricar resistores de precisão.

Abaixo, temos uma tabela comparativa para alguns metais e ligas mais usados:

Metal	Metal	$^\circ\text{C}$	Alfa	Observações
Cobre	Cu	-200/260	0,00427	Baixo custo
Molibdênio	Mo	-200/200	0,00300 e 0,00385	Opção de menor custo p/ Pt em faixa limitada
Níquel	Ni	-80/260	0,00672	O custo é baixo mas a faixa é limitada
Níquel-ferro	Ni-Fe	-200/200	0,00518	Baixo custo
Platina	Pt	-240/660	0,00385 e 0,00392	Boa precisão

### RTDs de cobre

Cobre é raramente usado para essa finalidade e parece não haver padrões internacionais. Quando usado, é comum um coeficiente  $\alpha = 0,00427 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ . Na faixa de temperatura  $0$  a  $200^\circ\text{C}$  e se não há necessidade de muita precisão, pode ser empregada uma relação simplificada:

$$R(t) = R_0 (1 + 0,00427 t).$$

### RTDs de molibdênio

O material cerâmico alumina (óxido de alumínio) tem coeficiente de expansão térmica próximo do

molibdênio e, portanto, formam um bom conjunto para o tipo filme metálico. O coeficiente do metal é  $\alpha = 0,00300 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ . Através de dopagem com outros metais, é também disponível com  $\alpha = 0,00385 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ , o que dá compatibilidade com a platina para uma faixa mais reduzida de temperaturas.

### RTDs de níquel

São usados em aplicações onde o baixo custo é importante. Em relação à platina, o níquel tem menor resistência à corrosão e é menos estável em temperaturas elevadas. Por isso, é geralmente usado para ar sem impurezas.

Alguns fabricantes sugerem uma fórmula modificada:  $R(t) = R_0 (1 + a t + b t^2 + d t^4 + f t^6)$ , onde  $a = 5,485 \cdot 10^{-3}$ ,  $b = 6,650 \cdot 10^{-6}$ ,  $d = 2,805 \cdot 10^{-11}$  e  $f = -2,000 \cdot 10^{-17}$ . O coeficiente  $\alpha$  é  $0,00672 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ . Se não há muita exigência de precisão, pode-se usar  $R(t) = R_0 (1 + a t)$  com  $a = \alpha$ .

### RTDs de níquel-ferro

Têm custo ainda menor que o de níquel e são usados em aplicações onde são possíveis e o custo é fundamental. O fator  $\alpha$  é  $0,00518 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ .

### RTDs de platina

Platina é o metal mais usado por sua resistência à corrosão e estabilidade em altas temperaturas. É usada uma fórmula modificada:  $R(t) = R_0 (1 + a t + b t^2 + c (t - 100) t^3)$ .

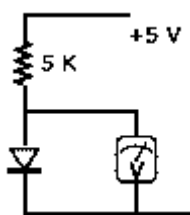
Existem dois padrões internacionais que diferem no nível de dopagem e, portanto, nos coeficientes:

1) Padrão Pt100:  $\alpha = 0,00385055 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ .  $R_0 = 100 \text{ ohms}$ .  $a = 3,90830 \cdot 10^{-3}$ ,  $b = -5,77500 \cdot 10^{-7}$  e  $c = -4,18301 \cdot 10^{-12}$  para  $t$  entre 0 e  $200^{\circ}\text{C}$ . Para  $t$  entre 0 e  $800^{\circ}\text{C}$ , mesmos  $a$  e  $b$  mas  $c = 0$ . O padrão é usado em muitos países.

2) Padrão USA:  $\alpha = 0,0039200 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ .  $R_0 = 98,129 \text{ ohms}$ .  $a = 3,97869 \cdot 10^{-3}$ ,  $b = -5,86863 \cdot 10^{-7}$  e  $c = -4,16696 \cdot 10^{-12}$ .

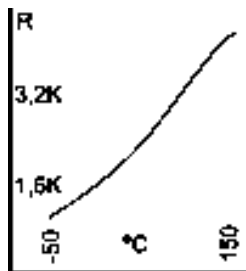
### Semicondutores:

É sabido que os parâmetros elétricos dos semicondutores variam com a temperatura. E eles podem ser usados como sensores térmicos.



Um simples diodo de silício diretamente polarizado conforme figura ao lado é provavelmente o mais barato sensor de temperatura que pode existir. A tensão lida no voltímetro varia com a temperatura na razão aproximada de  $2,3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ . A corrente de polarização deve ser mantida constante com uso de, por exemplo, uma fonte de corrente constante.

Na prática, o diodo funciona como um resistor cuja resistência varia com a temperatura. Diversos fabricantes desenvolveram diodos específicos para a função. A



curva ao lado é característica do tipo KTY81 da Philips. Alguns fabricantes também desenvolveram transistores para uso como sensores de temperatura.

Entretanto, sempre há necessidade de circuitos auxiliares para compensar falta de linearidade e para levar o sinal para níveis de operação do circuito de controle. Para isso, vários fabricantes produzem o conjunto sensor + circuitos auxiliares em forma de circuito integrado. Existem tipos analógicos com saída de tensão ou saída de corrente e os de saída digital para uso com microcontroladores.

No lugar de um diodo poderíamos ter utilizado um transistor NPN com os terminais de base e coletor interligados. A propriedade da dependência com a temperatura é função da junção PN feita de silício, por isso este efeito também ocorre em transistores. Outro parâmetro que varia com a temperatura é a corrente reversa da junção. Ela aproximadamente dobra para cada 10°C de aumento na temperatura.

O uso de transdutores à base de diodos semicondutores ou junção base emissor de Transistores, na prática, restringe-se a substituição de termômetros clínicos de mercúrio e aplicações de baixa temperatura e precisão razoável. A vantagem é o custo e a robustez.

### Transdutores Fotoelétricos

São dispositivos que convertem a luz em sinal elétrico. São utilizados em aparelhos de medição como luxímetros e em transmissão de sinais por meios óticos(fibra ótica). Podem ainda, ser específicos para uma determinada região do espectro, inclusive o infravermelho, que é a faixa de região das ondas de calor, que são utilizadas nos pirômetros à distância ou infravermelhos.

São basicamente utilizados os seguintes componentes:

- **Células Fotovoltaicas;**
- **Fotoresistores ou LDR's**
- **Fotodiodos;**
- **Fototransistores.**

#### ➤ **Células foto-voltaicas**

São dispositivos que convertem energia luminosa em elétrica.

O diodo iluminado intensamente na junção pode reverter a barreira de potencial em fonte de elétrons, produzindo energia. A eficiência do processo é baixa devido a pouca transparência da junção (somente as camadas superficiais são iluminadas), apenas alguns %.

Seu uso atual está mais restrito aos painéis solares.

Outro dispositivo é a foto-célula de selênio (um semicondutor), de operação similar. Usa-se em medidores de luminosidade e aparelhos de análise química (como fotolorímetros).

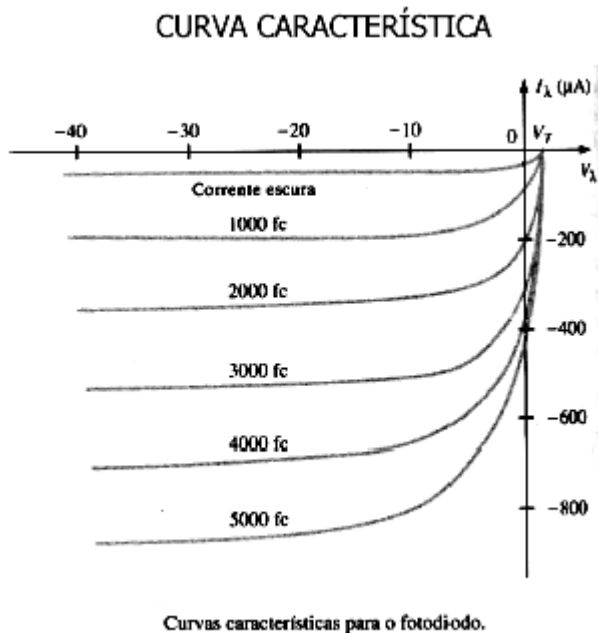
#### ➤ **LDR:**

O LDR (light dependent resistor, resistor dependente da luz) tem sua resistência diminuída ao ser iluminado. É composto de um material semicondutor, o sulfeto de cádmio, CdS. A energia luminosa desloca elétrons da camada de valência para a de condução (mais longe do núcleo), aumentando o número destes, diminuindo a resistência. A resistência varia de alguns Mw, no escuro, até centenas de W, com luz solar direta.

Os usos mais comuns do LDR são em relés fotoelétricos, fotômetros e alarmes. Sua desvantagem está na lentidão de resposta, que limita sua operação.

### ➤ Foto-diodo

É um diodo semiconductor em que a junção está exposta à luz. A energia luminosa desloca elétrons para a banda de condução, reduzindo a barreira de potencial pelo aumento do número de elétrons, que podem circular se aplicada polarização reversa.



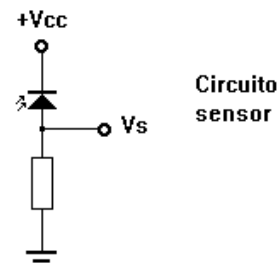
A corrente nos foto-diodos é da ordem de dezenas de mA com alta luminosidade, e a resposta é rápida. Há foto-diodos para todas as faixas de comprimentos de onda, do infravermelho ao ultravioleta, dependendo do material.

O foto-diodo é usado como sensor em controle remoto, em sistemas de fibra óptica, leitoras de código de barras, scanner (digitalizador de imagens, para computador), canetas ópticas (que permitem escrever na tela do computador), toca-discos CD, fotômetros e como sensor indireto de posição e velocidade (encoder's e tacômetros óticos).

Na figura acima, temos as curvas características de um fotodiodo. Verifique que a corrente reversa(em microAmpere) aumenta, com o aumento da intensidade luminosa. Verifique que existe sempre uma corrente mínima, na falta de luz, chamada corrente de escuro. Na figura abaixo, temos um circuito que utiliza o fotodiodo. Verifique que a informação é obtida através da leitura da tensão sobre o resistor, que será proporcional a corrente reversa e esta proporcional a luz..



**Símbolo do  
foto-diodo**



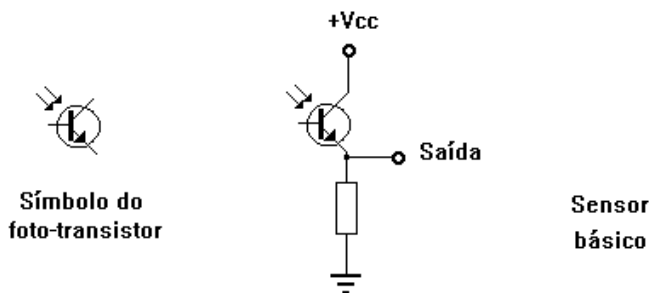
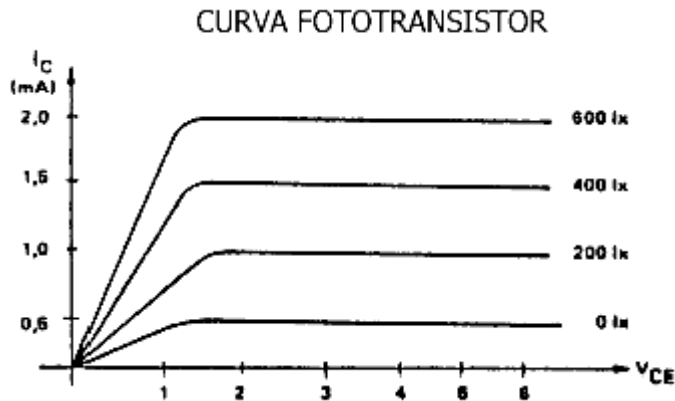
### ➤ Foto-transistor

É um transistor cuja junção coletor-base fica exposta à luz e atua como um fotodiodo. O transistor amplifica a corrente, e fornece alguns mA com alta luminosidade. Sua velocidade é menor que a do fotodiodo, mas trabalha com correntes maiores.

Suas aplicações são as do fotodiodo, exceto sistemas de fibraótica, pela operação em alta frequência.

Na figura ao lado, temos as curvas características de um fototransistor. Verifique que as curvas são iguais as de

um transistor comum, exceto que não temos a corrente de base e sim o nível de iluminamento em lux. Abaixo temos um circuito que usa o fototransistor. A informação também é colhida na tensão sobre um resistor, já que a corrente de emissor e coletor são proporcionais ao nível de iluminamento.



### Transdutores de Posição:

São transdutores que se destinam a converter posição em sinais elétricos. São muito utilizados no posicionamento de servomecanismos e por CNC's. São de vários tipos, mas os mais comuns são:

- **Encoder:** Convertem movimento angular em sinal elétrico;
- **Régua ótica:** Convertem movimento linear em sinal elétrico;
- **Resolver:** Convertem movimento angular em sinal elétrico;
- **LVDT:** Convertem movimento linear em sinal elétrico;

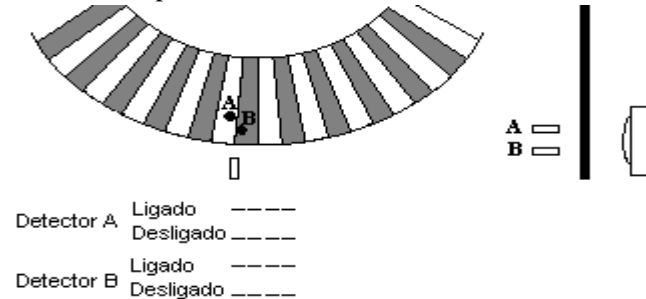
### Encoder:

São dispositivos que convertem a posição angular do seu eixo em sinal elétrico, usando para isto dispositivos eletroópticos (led's e fototransistores). São muito utilizados na indústria pela sua precisão e simplicidade. São classificados de duas formas, conforme sua construção e modo de operação, a saber:

- **Incremental:** que na verdade fornecem apenas a informação do deslocamento angular;
- **Absoluto:** que fornecem a posição absoluta do seu eixo.

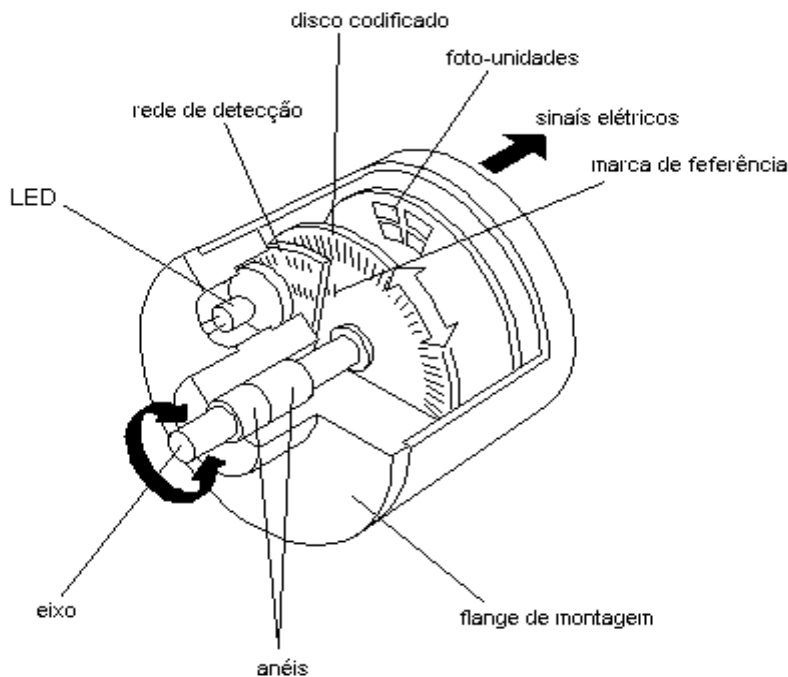
### Encoder Incremental:

O encoder incremental segue o princípio da figura ao lado, onde um disco com janela a intervalos regulares é iluminado por uma fonte de luz. Do outro lado do disco, fica um elemento fotosensível. Ao girar, alternam-se as áreas com janela e sem janela, gerando no elemento fotosensível uma sequência de pulsos. A contagem dos pulsos, permite a avaliação do deslocamento angular, tal qual ocorre no mouse do computador.



Usa-se sempre dois conjuntos de fotossensores, chamados canal A e B, deslocados na posição. Isto faz com que sinais defasados de 90° sejam gerados e permitam avaliar o sentido de rotação. Há ainda um terceiro sinal, que serve de

referência de zero, para saber quantas voltas o disco completou. Na figura abaixo, temos uma ilustração de um encoder incremental montado.



Encoders incrementais geram um certo número de impulsos por revolução. O número de cada impulso é a medida da distância movida (angular ou linear). Um disco codificado é montado no eixo. O disco é dividido em segmentos separados que são alternadamente opacos ou transparentes. Um led emite um feixe de luz orientado paralelamente e que ilumina todos os segmentos do disco codificado. Algumas foto-unidades recebem a luz modulada e a convertem em dois sinais sinusoidais que são alternados em fase por 90°. Eletrônicas de digitalização ampliam os sinais e os transformam em trens de impulsos de ondas quadradas que são geradas através de um driver do cabo na saída. Todos os encoders incrementais de nosso programa básico estão disponíveis com 3 sinais de saída (index 0, A,B). O design do TTL de 5V tem também sinais de saída complementar A,B, e 0-index. A diferença de fase entre os sinais é de 90° sempre o que serve para indicar o sentido do giro. Observando-se qual dos sinais (A ou B) vai a nível lógico 1, primeiro que o outro, sabe-se para qual lado o disco gira. O index 0,

indica que o disco está na referência ou marco zero. Os encoder incremental somente funciona quando está em movimento, não adianta ler os canais A e B, quando o encoder está parado, pois não haverá uma resposta conclusiva a respeito da posição do encoder. Na verdade, trabalhar com o encoder incremental significa “contar” os pulsos que os canais A e B enviam. Quando o equipamento é ligado, o encoder nunca sabe onde está. Deve ser feito um processo de posicionamento para buscar a posição zero. Isto é chamado de fazer o “homing” da máquina. Se por alguma razão, a contagem de pulsos for perdida, a máquina precisará fazer o zeramento de novo.

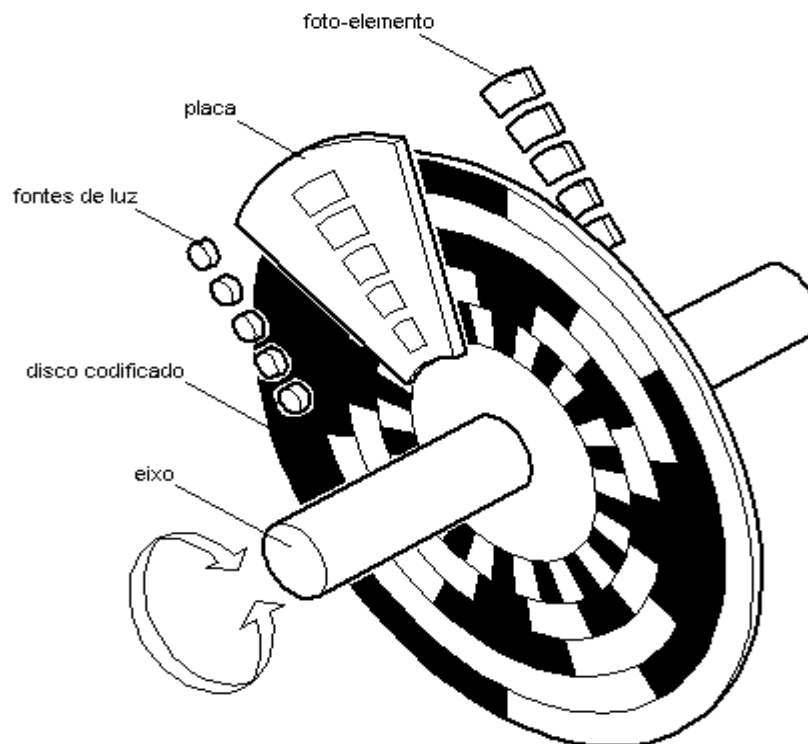
Para resolver este problema, desenvolveram o encoder absoluto.

### **Encoder Absoluto:**

Encoders absolutos fornecem um valor numérico específico (valor codificado) para cada posição angular, na forma de um dado binário como um byte ou uma palavra (dois ou mais bytes).

Esse código de valores está disponível imediatamente após o aparelho ser ligado. O disco codificado é firmemente montado ao eixo. O disco é dividido em segmentos separados que são alternadamente transparentes ou opacos. A fonte de luz emite um feixe de luz orientado paralelamente que ilumina todos os segmentos do disco codificado. Foto-unidades recebem a luz modulada e convertem-na em sinais sinusoidais.

Os sinais são em seguida digitalizados e fornecidos como uma saída via o driver do cabo.



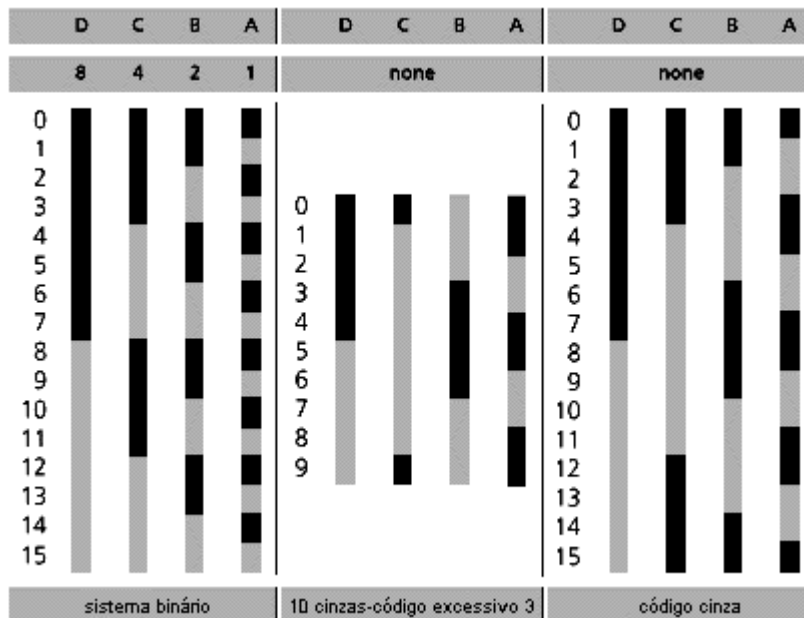
A figura acima, ilustra um encoder absoluto e seu disco codificado.

O código mais utilizado é o código cinza . Esse código trabalha por um passo, por exemplo, quando saí de um número e vai para um outro, somente um bit simples muda (de claro para escuro) no disco codificado. No código cinza o bit individual não corresponde ao valor numérico como no caso, por



exemplo, de um código binário, onde cada combinação de um bit recebe um certo número decimal. A combinação de bit no código cinza é convertida em códigos binários BCD por um controlador SSI e pode ser mais tarde processado. A grande vantagem deste código é que ele evita erros nos sensores ópticos.

Amostra de códigos de um disco codificado «desenrolado»



O código excessivo, corresponde à um código de gray com off-set ou deslocamento. Isto ocorre porque ao final do código de Gray, quando ele retorna a zero, mais que um bit pode variar. Neste casos usa-se o deslocamento que corrige este problema.

Um código cinza genuíno, que usa totalmente o número de bits, numera de zero a  $2^n - 1$ .

Exemplos:  $2^4 = 16$  contagem a partir de 0 a 15 ou  $2^{12} = 4096$  contagem de 0 a 4095

Resoluções nesse entremédio, são por exemplo 360 ou 1000, contadas de:

76 a 435 com uma dada solução de 360 ou 12 to 1011 em uma resolução de 1000 .

Para uma resolução requisitada de código cinza um número maior (que deve ter uma força de 2) é tomado como uma base, mas somente a seção do meio do código é usada, por exemplo, os códigos de excesso no início e no final são deletados. Isso assegura que para cada aumento nem um passo a mais irá mesmo contando-se após o zero.

Encoders absolutos são usados sempre que posições angulares têm que ser distribuídos para um certo valor ou quando a detecção de uma determinada posição é absolutamente necessária no caso de uma falha de força.

Encoders absolutos podem ser divididos em:

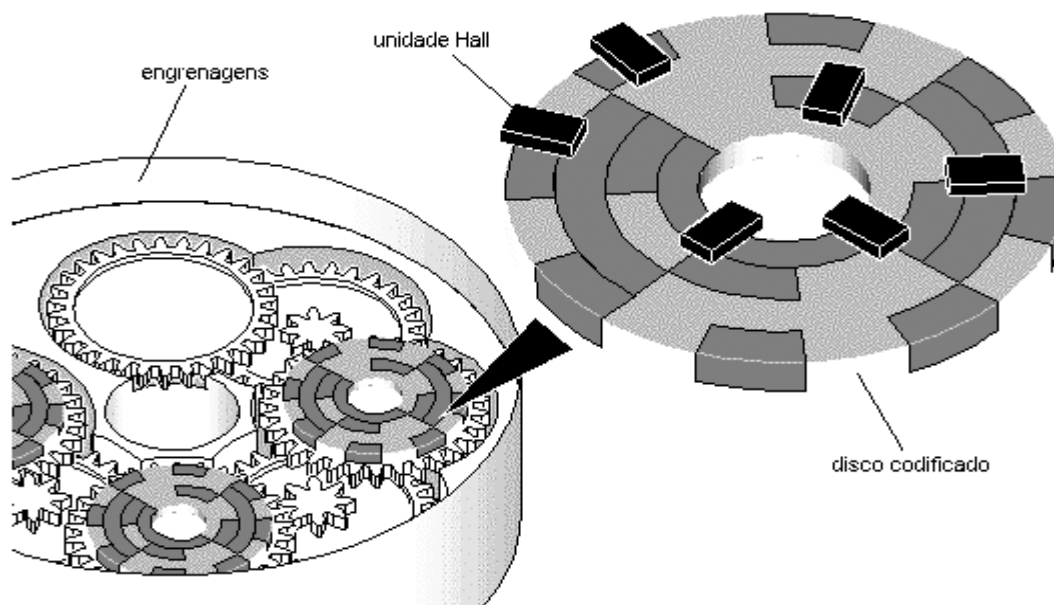
- encoder single-turn (giro simples), que funcionam da forma acima mencionada
- encoder multi-turn (giro múltiplo), são uma modificação dos acima mencionados.

### Princípio de detecção de giros múltiplos

Os encoders de giro múltiplo não detectam somente posições angulares, mas também distingue diversas revoluções. A posição dentro de uma revolução é determinada conforme o princípio do encoder de giro-simples. A fim de se distinguir entre um número de revoluções magnéticos permanentes encaixados no

disco são usados e conectados um ao outro. A detecção é feita via digital pelo sensor Hall. A resolução de um encoder de giros múltiplos é de 8192 passos x 4096 revoluções.

A figura abaixo ilustra a montagem de um encoder absoluto de múltiplo giro.



### Dados de transferência para um encoder de giros múltiplos

Como padrão, o protocolo de transferência de uma palavra de 25 bits de dados dos quais 12 bits são para revoluções (giros múltiplos) e 13 bits para passos por revolução (giros simples).

A transferência sempre inicia-se com bits de giro múltiplos (M12 - M1), em seguida, bits para a parte de giro simples (S13 - S1), começando-se com o S12.

Palavra quando n=25																													
M5B						Nº do bit na palavra																				LSB			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
4096	12	M12	M11	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	S13	S12	S11	S10	S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	8192	13	
2048	11	0	M11	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	S12	S11	S10	S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	0	4096	12	
1024	10	0	0	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	S11	S10	S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	0	0	2048	11		
512	9	0	0	0	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	S10	S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	0	0	0	1024	10	
256	8	0	0	0	0	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	0	0	0	0	512	9	
128	7	0	0	0	0	0	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	0	0	0	0	0	256	8	
64	6	0	0	0	0	0	0	M6	M5	M4	M3	M2	M1	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	0	0	0	0	0	0	128	7	
32	5	0	0	0	0	0	0	0	M5	M4	M3	M2	M1	S6	S5	S4	S3	S2	S1	0	0	0	0	0	0	0	64	6	
16	4	0	0	0	0	0	0	0	0	M4	M3	M2	M1	S5	S4	S3	S2	S1	0	0	0	0	0	0	0	0	32	5	
8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	M3	M2	M1	S4	S3	S2	S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	4	
4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	M2	M1	S3	S2	S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	3	
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	M1	S2	S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	

número de rev.	bit p/rev	bit giro-múltiplos												bit giro-simples												passos p/rev.	bit p/rev
----------------	-----------	--------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---------------	-----------

### Especificando um encoder:

É importante conhecer os métodos de especificação de um encoder, pois estes dispositivos são muito usados. Um dos parâmetros fundamentais de um encoder é o nº de pulsos por volta ou revolução. Vamos calcular esta informação usando um exemplo simples:

Uma máquina CNC que usa coordenadas incrementais, precisa de um encoder. Sabendo-se que:

- A resolução da máquina é igual à 1micrômetro (**Res=0.001mm**);
- Passo do fuso de esfera de 5mm(**PA=5mm**);
- Fator de interpolação de 4vezes (**Int=4**);

Assim o nº de pulsos por revolução  $N_p$  é dado por:

$$N_p = PA / (Res * Int), \text{ ou seja, } N_p = 5 \text{ mm} / (0.001\text{mm} * 4) ;$$

Assim  **$N_p = 1250$**  pulsos por revolução.

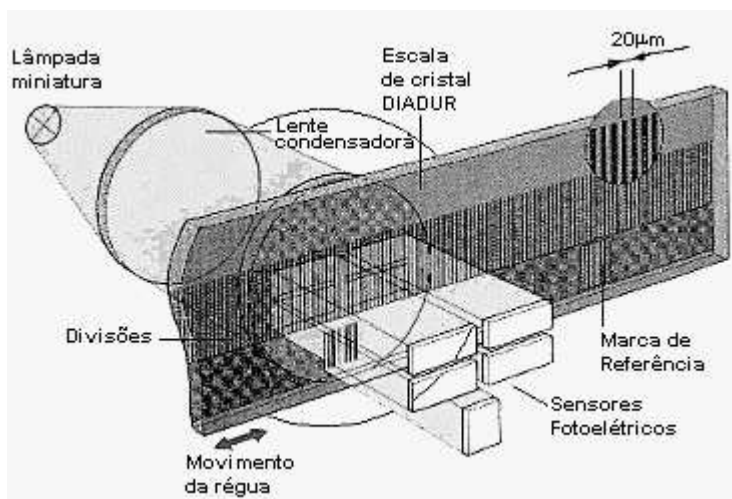
A interpolação é um algoritmo matemático que o equipamento faz, que consegue aumentar a resolução do transdutor. No nosso exemplo, com uma interpolação de 4x, a resolução do sensor foi aumentada de 4x. Sem a interpolação, teríamos que usar um sensor com  $N_p$  4x maior.

A interpolação é aplicada em vários tipos de transdutores, como por exemplo nos scanners, mas a limites para sua aplicação e o limite é o instante em que a precisão cai em função de uma interpolação muito alta.

Embora a metodologia matemática seja a mesma, não se deve confundir a interpolação para aumentar a resolução do encoder, com a interpolação de eixos de um CNC, são coisas diferentes.

### Régua ótica:

A régua ótica segue o princípio de funcionamento do encoder incremental, só que ela traduz

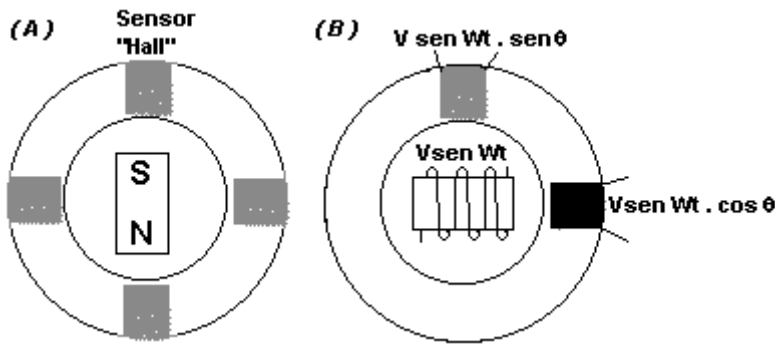


movimentos lineares ao invés de movimentos angulares. Conforme a figura ao lado, verificamos que se trata de uma placa com divisões que faz a função do disco no encoder. Ao se movimentar, a placa ou régua como é mais conhecida, interrompe o feixe de luz que ilumina o fotosensor. Dessa forma uma seqüência de pulsos é gerado. Novamente são usados dois conjuntos de fotosensores para gerar sinais defasados entre si que permitam distinguir o sentido do movimento.

Há também o sinal de referência ou zero, que é ativo quando o sensor passa pela marca de referência da régua ótica. Afora o fato de que trata-se de um movimento linear e não angular, não há nenhuma novidade em relação ao encoder.

### Resolver:

A utilização de encoder's tem limitações devido ao fato de que estes dispositivos são sensíveis a vibração e a temperatura, devido a natureza de sua construção e funcionamento. Entretanto, existem dispositivos mais robustos capazes de fornecer informações a respeito da posição angular de um eixo. São os Resolver's,



muito utilizados em servomotores de CA. Resolver são dispositivos similares à um pequeno motor, com estator e rotor tendo dois enrolamentos no estator e um enrolamento no rotor, tal qual a **figura B)** logo abaixo. Observe que as bobinas do estator estão dispostas de forma perpendicular entre si. Isto significa que o fluxo magnético de uma bobina não interfere no da outra, ou seja, acoplamento indutivo entre elas é nulo.

(A) Posicionamento por sensor de Efeito Hall

(B) Posicionamento por Resolver

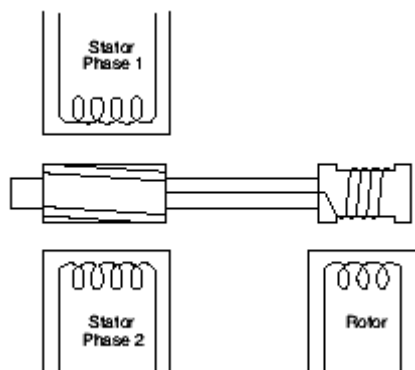
Já no rotor também há um enrolamento, que deve ser alimentado com um sinal alternado senoidal de uma determinada frequência angular, que na ilustração vale  $W$ . O eixo do rotor do resolver está sempre acoplado ao eixo de um servomotor e gira solidariamente a este.

Quando o rotor está parado, há um acoplamento entre a bobina do rotor e as bobinas do estator de forma tal que em cada bobina é induzida uma tensão alternada de mesma frequência do sinal do rotor. Entretanto o valor de pico da senóide de cada bobina do estator é diferente e depende do ângulo do rotor. Perceba que devido ao fato das bobinas serem perpendiculares, a tensão em uma depende do  $\cos(\theta)$  e a outra do  $\text{sen}(\theta)$ . É esta diferença de tensão proporcional à  $\cos(\theta)$  e a  $\text{sen}(\theta)$  que permite descobrir o ângulo do rotor. Na verdade, basta calcular o arco-cosseno e arco-seno, que é exatamente o que a máquina faz. Quando o eixo do resolver está girando, a tensão induzida nas bobinas do estator passa a ter a amplitude modulada por uma segunda senóide com frequência igual ao do giro do motor.

Outra forma de se implementar o resolver é com transdutores do tipo Hall, que convertem a informação do campo magnético em sinal elétrico (tensão). Neste caso o rotor deve ser do tipo ímã permanente e o estator deve ter 4 sensores tipo Hall, dispostos de forma perpendicular entre si, conforme a **figura A)** abaixo. A tensão em cada sensor é proporcional ao fluxo e depende do ângulo do rotor. Analisando-se assim as tensões em cada sensor Hall, conclui-se sobre o posicionamento do rotor.

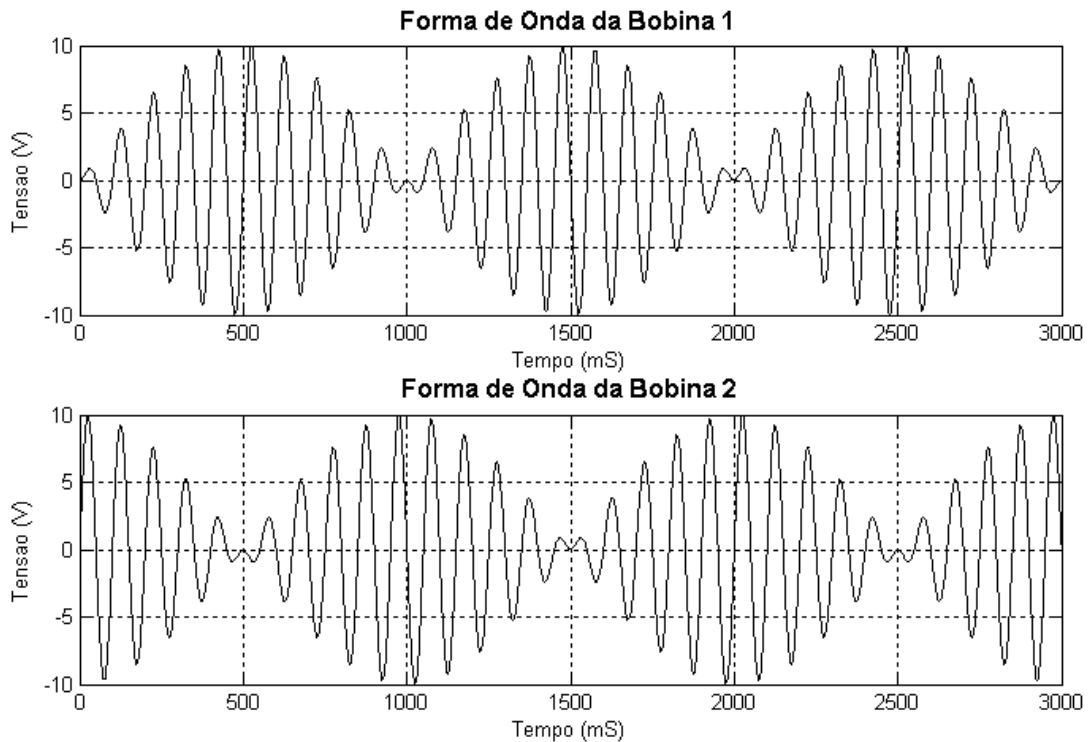
O resolver faz o mesmo trabalho que um encoder absoluto, mas com a vantagem de ser mais robusto e menos sensível a vibrações e temperaturas.

Sua grande desvantagem é a complexidade da montagem, principalmente no que tange ao alinhamento, que é crítico. Uma vez retirado o resolver, deve ser encaminhado para o fabricante para se fazer o alinhamento do mesmo.



Como o Resolver apresenta um enrolamento no rotor que deve ser alimentado, necessita-se de escovas e anéis, o que implica em manutenção periódica. Entretanto, há formas de se eliminar as escovas, que é o uso de acoplamentos indutivos como mostra a figura ao lado. Perceba que o rotor é alimentado por meio de um acoplamento a transformador entre uma bobina no estator e outra no eixo do rotor. Este último, por sua vez, alimenta o enrolamento do rotor propriamente dito. É o sistema brushless.

Abaixo temos as formas de onda das bobinas do estator de um resolver em movimento.

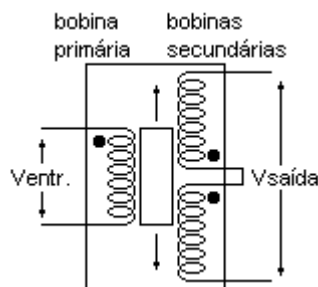


Verifique a formas da senóide parece haver uma Segunda senóide encavalada sobre a primeira. É o efeito modulador que o giro do rotor tem sobre a tensão induzida nas bobinas 1 e 2 do estator.

### LVDT:

Outro dispositivo muito útil e muito usado em posicionamentos de precisão é o LVDT. LVDT é uma sigla (Linear Variable Differential Transformer), transformador diferencial linear variável, eu tem esta característica de linearidade m, dentro de uma faixa em torno de metade do comprimento do núcleo móvel, ferromagnético.

A figura abaixo ilustra os aspecto físico de um LVDT e seu eixo móvel.

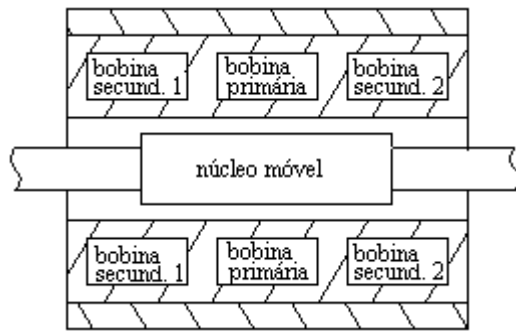


Um LVDT usa 3 enrolamentos fixos, alinhados, dispostos como o da figura abaixo e ao lado. Quando é aplicada a alimentação

no central, os 2 outros estão em série, mas com os terminais invertidos, de modo que as tensões se subtraem. Quando o núcleo fica na posição central, a tensão induzida nos 2 enrolamentos são iguais, se cancelando.

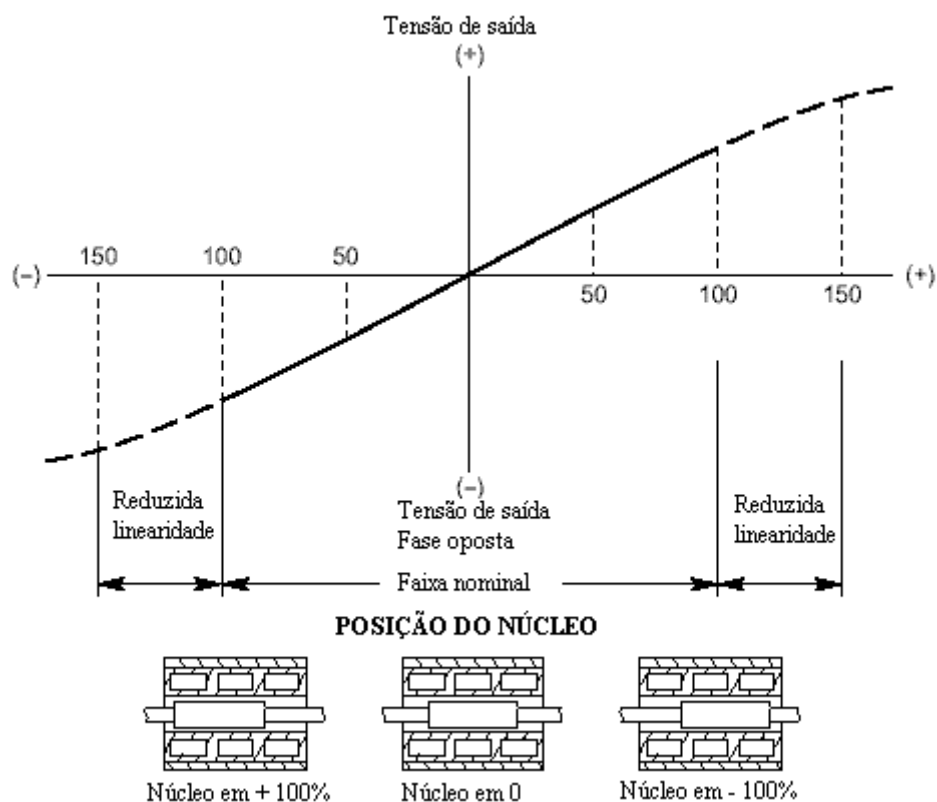
Ao se deslocar o núcleo, o acoplamento entre o enrolamento central e cada um dos outros varia, e as tensões não se cancelam, resultando uma tensão de saída cuja fase é diferente, conforme o núcleo penetre mais numa ou outra bobina.

A relação da tensão do LVDT com a distância é muito linear e é por isso que ele é usado em posicionadores de precisão, desde frações de mm até dezenas de cm, tanto em CNC quanto em robôs industriais.



Ao lado, vemos uma disposição física das bobinas de um LVDT. O eixo central é o eixo móvel do LVDT. Perceba que as tensões nas bobinas 1 e 2 ficam diferentes pelo fato de que o deslocamento do eixo móvel determina uma mudança nos fluxos das bobinas pela variação da relutância vista pelas duas bobinas. Assim sendo o fluxo entre elas passa a ser diferente e o resultado é um desequilíbrio na tensão que se traduz numa tensão não nula, de valor proporcional ao valor do deslocamento e de fase de acordo como sentido do mesmo.

N figura abaixo, vemos um gráfico da tensão de saída em função do deslocamento e a fase em função do sentido do mesmo.



Observa-se o comportamento linear do LVDT em função do deslocamento. Nota-se que com o eixo em zero a tensão é perfeitamente nula. Com o eixo deslocado totalmente a direita temos uma tensão de saída alternada de amplitude máxima saída com fase igual a da fase do sinal aplicado ao enrolamento central. Quando o deslocamento é total para a esquerda temos a tensão de saída alternada de amplitude máxima também e de mesmo valor o que indica a sua simetria em torno do zero, mas agora a fase é invertida em relação ao sinal aplicado ao enrola. central.

Uma aplicação bastante interessante para LVDT é o uso em posicionamento de mesas com zero central, como ocorre em algumas fresadoras.

### Transdutores Capacitivos:

Transdutor de posição capacitivo é utilizado para medida de posição de até alguns milímetro e bastante utilizado em medida de vibrações relativas. Um sensor típico capacitivo é ilustrado na figura abaixo e consiste de uma placa alvo e uma segunda placa chamada de cabeça do sensor. Estas duas placa são separadas por um “gap” de ar de espessura  $h$  e forma os dois terminais de um capacitor, que apresenta uma capacitância  $C$  dada por:

$$C = k K A/h$$

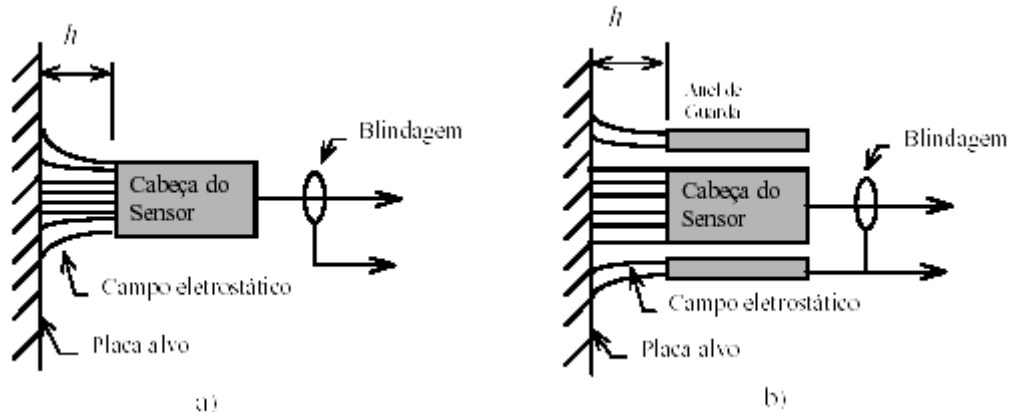
Onde

$C$  é a capacitância em picofarads (pF)

$A$  é a área do cabeça do sensor ( $\pi \cdot D^2/4$ )

$K$  é a constante dielétrica do meio ( $K = 1$  para o ar)

$k$  é uma constante de proporcionalidade;  $k = 0.225$  para dimensão em polegada e  $0.00885$  para dimensão em milímetro)



$$\frac{\Delta Z_c}{Z_c} = \frac{\Delta h}{h}$$

Da equação acima é claro que a impedância capacitiva é linear com  $h$  e o um método de medida de impedância de  $Z_c$  permitirá, através de duas placas simples (O alvo com terra e a cabeça do sensor com terminal positivo), a medida do deslocamento  $h$ .

A cabeça do sensor normalmente tem um formato cilíndrico e a equação (2.8) é válida desde que  $0 < h < D/4$  onde  $D$  é o diâmetro da cabeça do sensor. O intervalo de linearidade poder ser estendido para  $h > D/2$  se um anel de guarda ao redor do sensor é usado, como mostra a figura b) acima.

A sensibilidade do sensor é obtida e é expressa por:

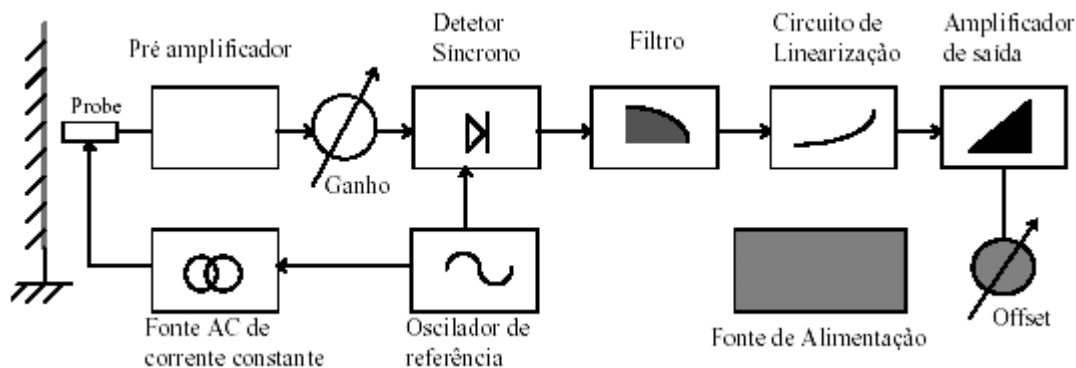
$$S = \frac{\Delta Z_c}{\Delta h} = \left| \frac{Z_c}{h} \right| = \left| \frac{1}{\omega \cdot C \cdot h} \right| = \left| \frac{1}{\omega \cdot k \cdot K \cdot A} \right|$$

Como pode ser observado a sensibilidade pode ser melhorada pela redução da área  $A$  do sensor; entretanto, como foi visto anteriormente, é limitada pela linearidade. De maneira que claramente existe um **compromisso entre sensibilidade e linearidade**. Da mesma forma existe um compromisso entre a

sensibilidade (aumenta quando  $\omega$  diminui) e a resposta em frequência do sensor (aumenta quando  $\omega$  aumenta).

O sensor capacitivo tem várias vantagens. Ele realiza uma medida sem nenhum contato e pode ser usado com qualquer material para o alvo, desde que este apresente uma resistividade menor do que 100 Ohms-cm. O sensor é robusto e pode ser sujeito a choque operar em ambiente de muita vibração. Pela o exame da equação para sensibilidade  $S$ , mostra que a constante dielétrica  $K$  é somente o parâmetro que pode mudar com a temperatura. Desde que  $K$  é constante para o ar para um grande intervalo de temperatura, o sensor de capacitivo tem excelente características de temperatura.

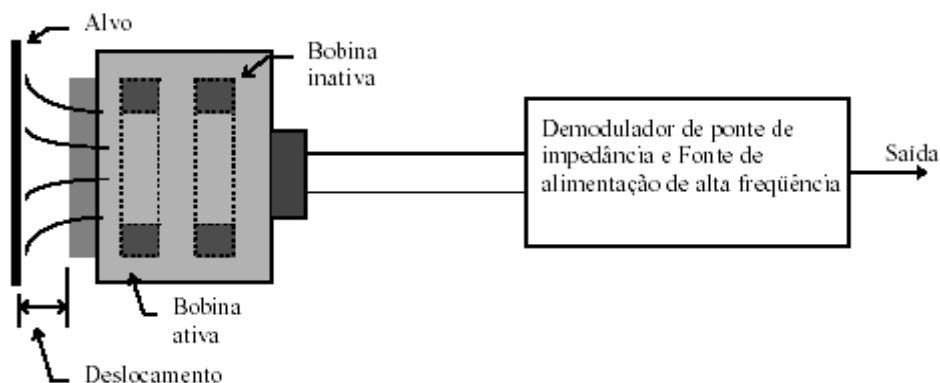
A mudança da impedância capacitiva  $Z_C$  é normalmente medida com o circuito mostrado na figura abaixo. A cabeça, a blindagem e o anel de guarda são alimentado com uma fonte de voltagem AC com corrente constante. Um oscilador digital fornece uma frequência constante em 15.6 kHz utilizado para alimentar esta fonte e como referência de frequência para o detector síncrono. A queda de voltagem através da cabeça é sentida com o um pré-amplificador de baixa capacitância. O sinal do pré-amplificador é então amplificado com um ganho fixo por um amplificador de instrumentação. O sinal do amplificador de instrumentação é retificado e fornecido ao detector síncrono. Após a filtragem (para eliminar “ripple de alta frequência”) e linearização adequadas o sinal é entregue ao circuito de saída com ajustes de ganho e de “off-



set”).

### Transdutores Indutivos:

Outro transdutor bastante utilizado para medida de pequenas distâncias é o sensor baseado nas **correntes de Eddy** que são induzidas numa superfície condutora quando as linha de fluxo magnético interceptam com a superfície condutora, como ilustrado na figura abaixo.

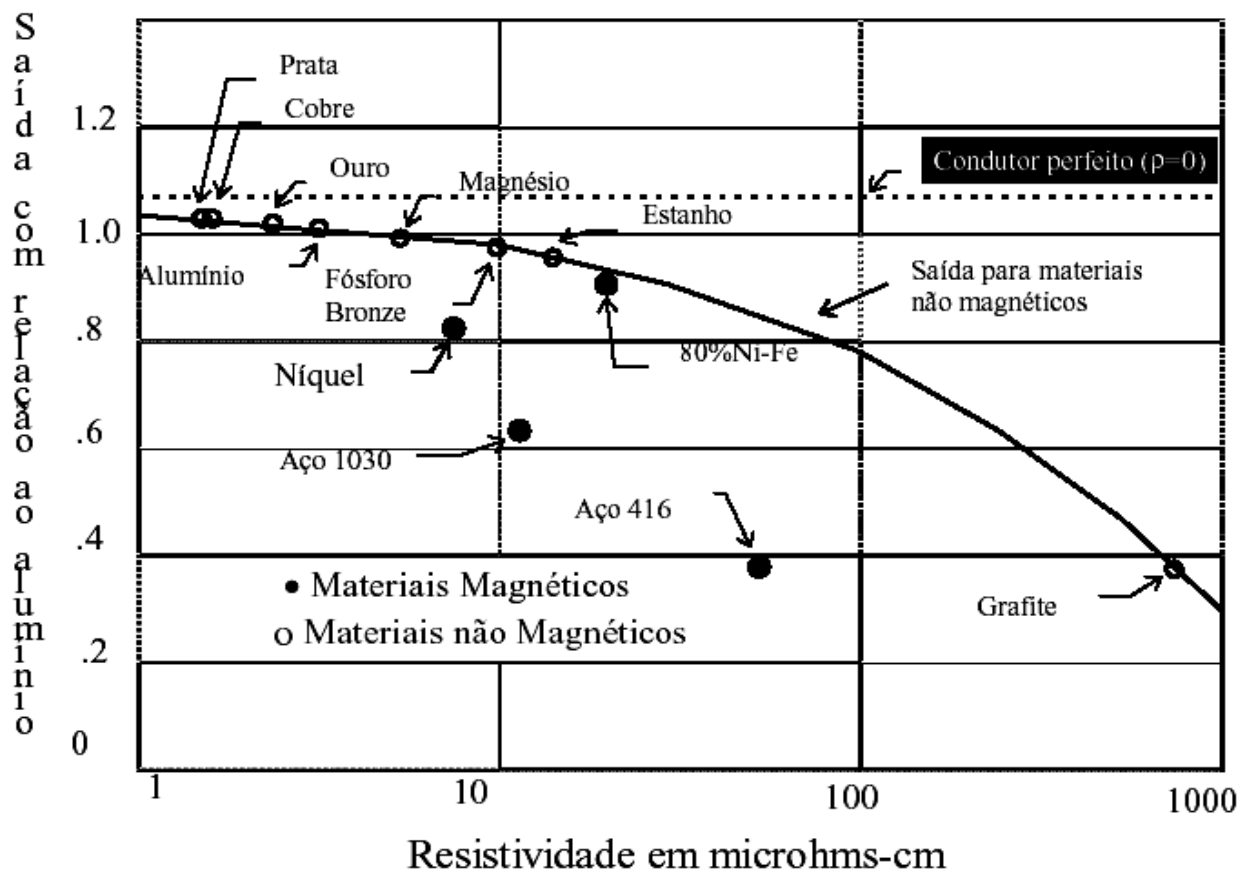


A magnitude das corrente de Eddy produzidas na superfície do material condutor é uma função da distancia da bobina ativa e a superfície. As corrente de Eddy aumentam quando a distância diminui.



A mudança nas corrente de Eddy são sentidas com uma ponte de impedância. As duas bobinas formam os dois braços da ponte. Os outros dois braços são referência de impedância do circuito de condicionamento. A primeira bobina no sensor (bobina ativa) que muda a sua indutância com o movimento do alvo, é ligada no braço ativo da ponte. A segunda bobina é ligada no braço oposto da mesma ponte. A saída da ponte é demodulada e fornece um sinal analógico que é linearmente proporcional a distancia do sensor ao alvo.

A sensibilidade do sensor é fortemente dependente do material do alvo, onde uma alta sensibilidade está associado com materiais de alta condutividade. A saída do sensor indutivo normalizado com relação ao alumínio para os principais elementos normalmente presente no alvo é mostrado na figura abaixo. Para um alvo de alumínio a sensibilidade típica é de 4V/mm.



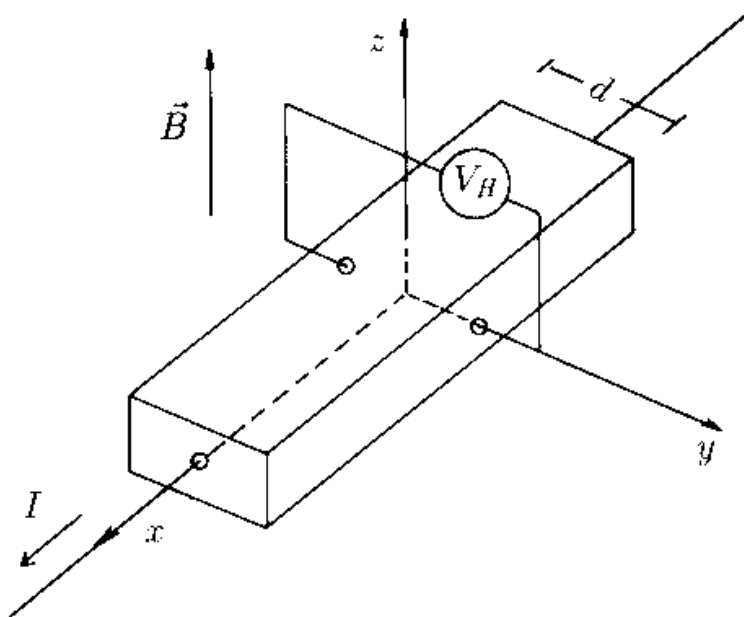
A influência da temperatura na saída do sensor é pequena devida ao arranjo diferencial proporcionado pelas duas bobinas. A maior causa dessa dependência é devido ao fato de a resistividade do material do alvo varia com a temperatura. Para o alumínio como alvo, o sensor apresenta uma sensibilidade à temperatura de 0.0022%/°C.

Da mesma forma que o sensor indutivo, o intervalo de operação do sensor depende do diâmetro da bobina ativa. A relação intervalo/diâmetro é normalmente igual à 0.25 e a resposta em frequência é da ordem de 20-50 KHz.

### Transdutor de Efeito Hall:

Um campo magnético que exerça forças nos elétrons tende a deslocá-los levemente. Nestes casos a força magnética é transferida para o condutor. Estes deslocamentos podem ser notados devido ao aparecimento de uma pequena diferença de potencial através da amostra do condutor em uma direção perpendicular a ambos, campo magnético e velocidade das cargas. Esta diferença de potencial é conhecida como ddp de Hall e o seu efeito é chamado Efeito Hall.

Se um campo magnético estático é aplicado numa barra de semiconductor, perpendicularmente à direção de movimento de deriva das cargas, estas tendem a ser defletidas lateralmente. Vamos considerar a figura ao



lado, permite determinar se um semiconductor é do tipo n (elétrons) ou do tipo p (lacunas ou buracos).

Vamos supor que o semiconductor é tipo p. Como os buracos se movimentam na direção +x e têm carga positiva, a força sobre eles tem o sentido -y. Esta força deflete os buracos e resulta no acúmulo de cargas positivas no lado  $y = -d/2$  da barra deixando, por conseguinte, cargas negativas no lado  $y = +d/2$ . Estas cargas criam um campo elétrico no sentido +y que, após um transiente inicial, impedem a continuação do movimento dos buracos na direção y. O valor do campo elétrico transversal pode

ser calculado considerando que a força total sobre um buraco é dada por

$$F = q \cdot (E + v \times B)$$

Em regime estacionário, a componente y desta força deve ser nula. Então a componente y do campo elétrico é,

$$E_y = (v \times B)_y = v_x B_z$$

A tensão transversal que aparece na barra,  $V_H = E_y \cdot d$ , é chamada a tensão Hall. Utilizando a relação entre a densidade de corrente de buracos e a velocidade  $J_p = e p_0 v_x$ , para buracos, temos

$$E_y = (J_p \cdot B_z) / e p_0 = R_H J_p B_z$$

onde  $R_H = (e p_0)^{-1}$  é o coeficiente Hall.

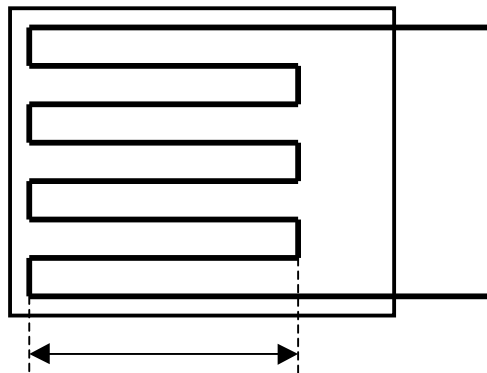
Este é um efeito quântico resultante da quantização dos níveis de energia de elétrons no campo magnético. O efeito Hall também tem várias aplicações práticas. Uma das mais importantes é na medida de campos magnéticos. O sensor Hall é constituído de uma pequena barra de semiconductor conhecido, percorrido por uma certa corrente elétrica. Quando colocado num campo magnético cuja intensidade deseja-se medir, o valor da tensão que aparece transversalmente no sensor fornece uma medida direta do campo.

### Extensômetros (“Strain Gauge”):

Extensômetros são dispositivos muito utilizados pela indústria para fins de medição de tensões mecânicas e medições de peso (carga). Elas são normalmente usadas nas chamadas células de carga, que é um bloco preparado para medições e composto por diversos extensômetros.

Estes dispositivos são também conhecidos como “strain gauge” e seu princípio de funcionamento está fundamentado na variação da resistência em função da deformação, por isso, estes dispositivos também são chamados de sensores de deformação.

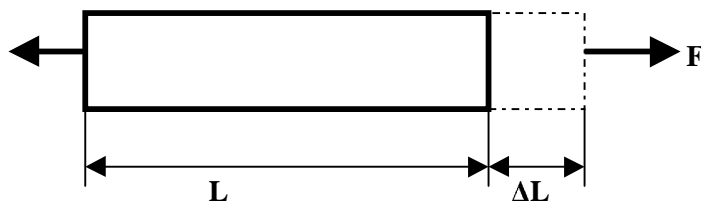
Quando um corpo sofre a ação de uma força, seja axial ou de dobra, ele sofre deformações. Até certo ponto estas deformações são elásticas e proporcionais à intensidade da força. Ou seja ele se contrai ou estica conforme a direção da força e na proporção desta. Na figura abaixo, podemos visualizar um sensor do tipo Strain Gauge, mais utilizado na indústria.



**Região Ativa**

As trilhas metálicas em zig-zag definem o valor da resistência dentro da região que sofre a deformação chamada de região ativa. Quando o corpo sofre um estiramento esta região se alonga e o comprimento das trilhas também. Como a resistência depende do comprimento do fio, este sofre um aumento proporcional a deformação. Quando há uma contração a resistência diminui.

Seja uma barra metálica qualquer de comprimento  $L$  e diâmetro  $D$ , submetida a uma força axial de intensidade  $F$ . Assim sendo, esta barra sofrerá uma deformação axial de  $\Delta L$ , proporcional a força, conforme ilustra a figura abaixo.



Associada a deformação mecânica axial, temos radial, ou seja, um estiramento axial, corresponde a uma compressão radial numa razão dada pela relação de Poisson, onde:

Seja a deformação dada por:  $\varepsilon = \Delta L/L$ , então a relação de Poisson é dada por:

Relação de Poisson  $\nu = \varepsilon_T / \varepsilon$ , onde :

$\varepsilon_T$  deformação radial;

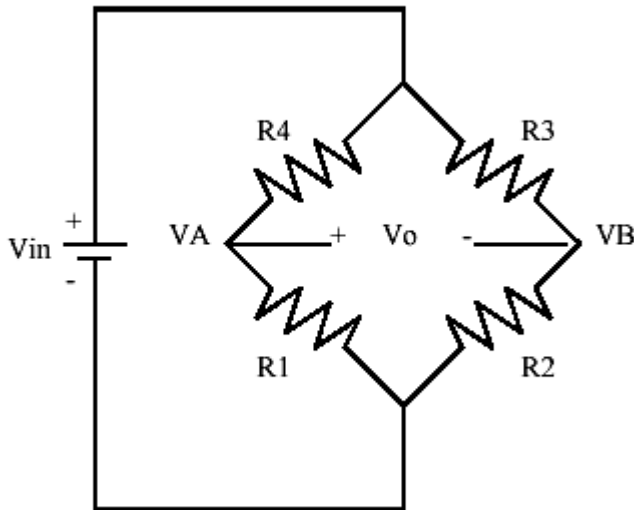
$\varepsilon$  deformação axial.

Para exemplificar a relação de Poisson para o aço vale tipicamente entre 0,25 a 0,3.

Um dos parâmetros fundamentais para um sensor deste tipo é o fator de Gauge, ou GF, que é uma medida da sensibilidade do mesmo. O Fator de Gauge é dado pela relação abaixo:

$$GF = \Delta R/R / \Delta L/L = \Delta R/R / \varepsilon$$

A forma mais adequada de se utilizar um sensor tipo strain gauge é através de medições na ponte de Wheatstone, conforme vemos na figura abaixo:



Na Figura ao lado tem-se a ponte de Wheatstone em sua forma mais simples, composta por quatro elementos de 2 terminais (resistores, no caso), formando um quadrilátero, uma fonte de excitação (tensão ou corrente), conectada ao longo de uma diagonal e um instrumento de medição (tensão ou corrente), conectado à outra diagonal. A ponte possibilita a medida de uma propriedade elétrica de um elemento indiretamente, comparando-se com um elemento similar.

Assim, quando  $R_1/R_4 = R_2/R_3$ , a ponte está balanceada (em ZERO), ou seja,  $V_o = 0$ , independentemente do

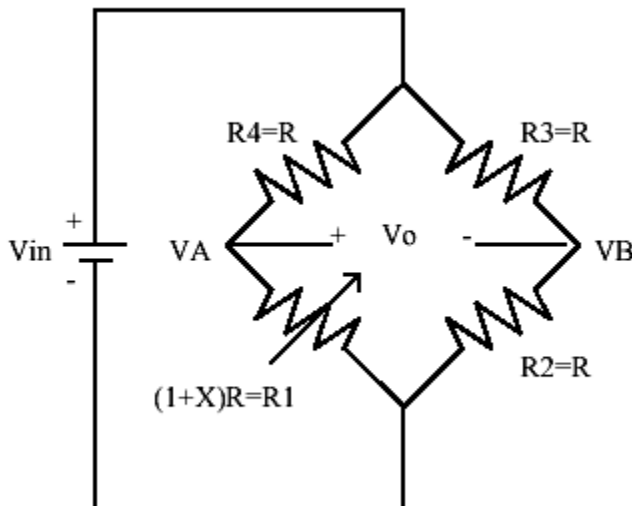
modo de excitação (tensão ou corrente), sua magnitude, modo de leitura (tensão ou corrente) ou impedância do medidor.

$$V_o = \frac{R_1}{R_1 + R_4} V_{in} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_{in} \quad (1)$$

$$V_o = \frac{\frac{R_1}{R_4} - \frac{R_2}{R_3}}{\left(1 + \frac{R_1}{R_4}\right)\left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)} V_{in} \quad (2)$$

Na maioria de transdutores empregando pontes, o desvio de um ou mais resistores em relação ao valor inicial é uma indicação da magnitude (ou sua variação) da grandeza sob medição.

Na Figura abaixo tem-se uma ponte com todas resistências nominalmente iguais, à exceção de R1, que agora é um Strain Gauge o qual é multiplicado por um fator  $(1+X)$ , onde  $X=GF \cdot \epsilon$ , e corresponde a um desvio fracional em torno de zero, função, por exemplo, do stress(sensor *strain-gage*) aplicado a uma barra.

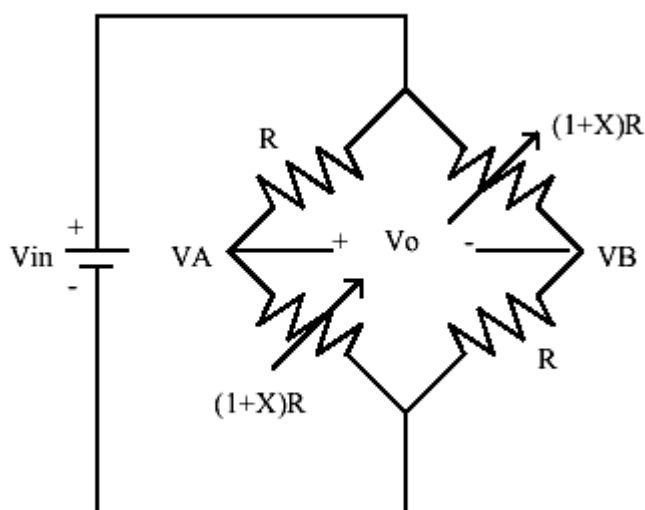


$$V_o = \frac{V_{in}}{4} \frac{X}{1 + \frac{X}{2}}$$

Por exemplo, se  $V_{in} = 10V$  e  $X_{max} = \pm 0.002$ , a saída da ponte  $V_o$  será linear a 0.1% no intervalo  $-5mV \leq V_o \leq 5mV$  e a 1% para  $-50mV \leq V_o \leq 50mV$ .

Define-se como *sensibilidade* da ponte a razão entre a máxima variação esperada em  $V_o$  sobre o valor da tensão de excitação. No exemplo citado, as sensibilidades são  $\pm 500\mu V/V$  e  $\pm 5mV/V$ , respectivamente.

A sensibilidade pode ser dobrada no caso de dois elementos variáveis idênticos serem utilizados, como na ponte ilustrada na próxima figura. Um exemplo seria a utilização de um par de resistores *strain-gage* identicamente orientados, sob ação de um mesmo stress.



$$V_o = \frac{V_{in}}{2} \frac{X}{1 + \frac{X}{2}}$$

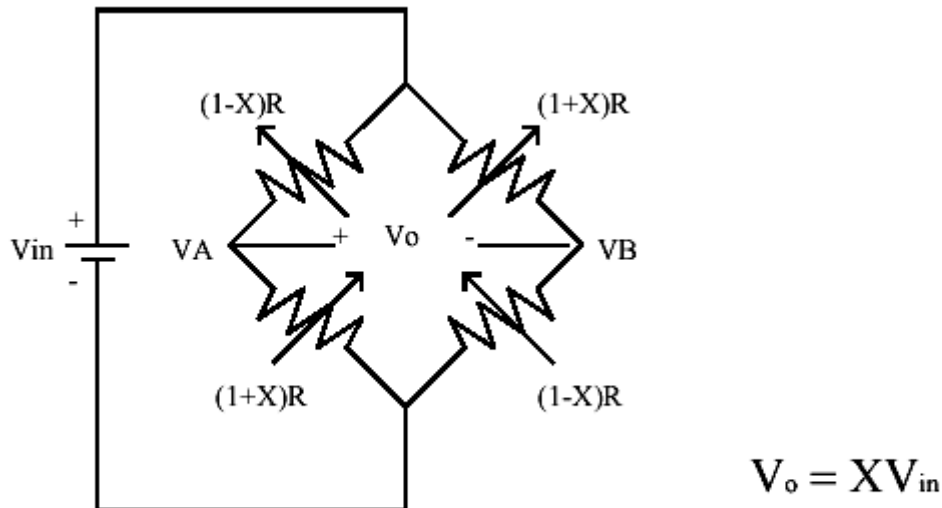
que é aproximadamente:

$$V_o \cong \frac{V_{in}}{2} X$$

mesmo grau de não-linearidade  $1/(1+X/2)$  exista.

Como pode ser observado, a saída é dobrada em relação ao caso anterior, embora o

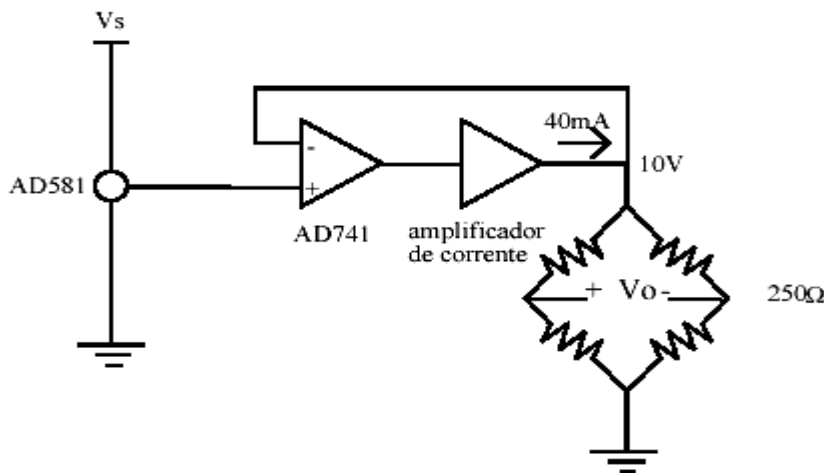
Em casos especiais, a saída pode ainda ter sua magnitude dobrada, na montagem indicada na Figura abaixo. Neste caso, dois pares de elementos variáveis idênticos são utilizados, onde cada par apresenta uma variação igual em magnitude, mas em sentido contrário, em relação ao outro par.



E como pode ser observado, uma saída idealmente linear é obtida, supondo-se, evidentemente, idênticas variações expressas por  $X$ . Como exemplo, a utilização de pares de resistores strain-gage, em superfícies opostas de uma barra (fina) sob stress.

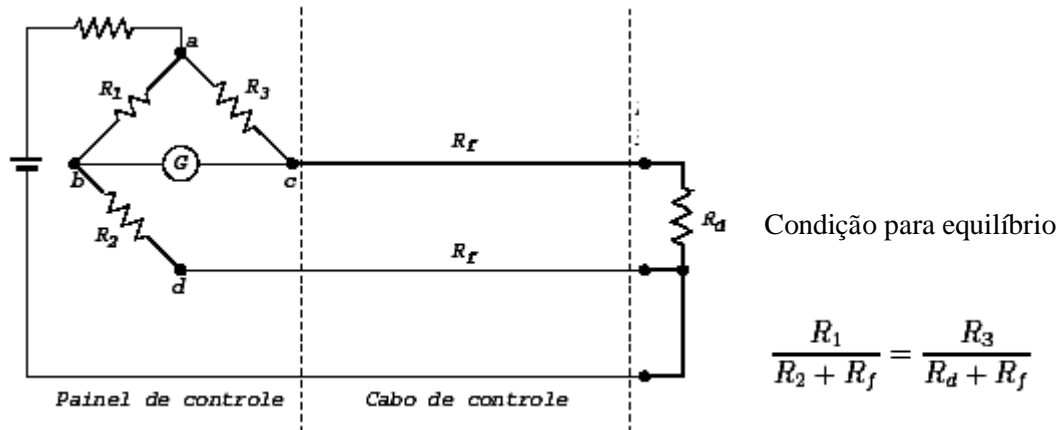
Desse modo, enquanto um par é submetido ao alongamento (aumento da resistência), o outro sofre compressão (diminuição da resistência). A tensão (ou corrente) de excitação deve ser consideravelmente estável.

Variações no tempo podem induzir a erros em  $V_o$ , uma vez que a rejeição do modo comum, embora elevada, não é idealmente infinita. Na prática, essa tensão, denominada referência de tensão, é obtida com a utilização de circuitos reguladores de tensão. Esses circuitos geram referências de tensão que apresentam desvios extremamente baixos (dezenas de ppm, no máximo) de seu valor nominal em função de variações na alimentação e temperatura. Na Figura abaixo, tem-se um circuito prático de polarização de uma fonte resistiva utilizando-se componentes comerciais.



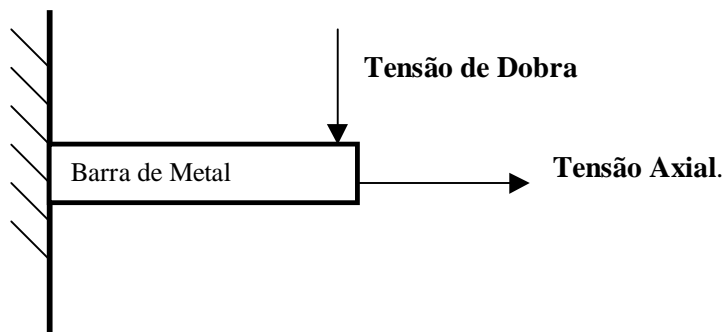
Um fato não levado em consideração até aqui, é que o sensor fica localizado no campo e montagem da ponte de Wheatstone implica na utilização de fios para fazer a interligação física do sensor com a ponte. Dois fios seriam o suficiente para interligar cada sensor a ponte, compondo assim a ligação a dois fios.

Entretanto, não se deve desprezar o fato de que os fios tem uma certa resistência e que este valor pode não ser desprezível. Além disso, fatores externos podem fazer a resistência destes fios variar e produzir uma leitura falsa. Assim sendo a ligação mais recomendada é a três fios, que permite uma compensação do erro introduzido pela resistência do fio. Esta ligação está ilustrada abaixo:

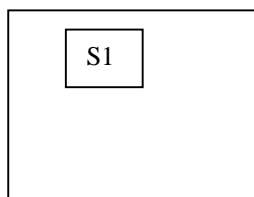


O equilíbrio fica estabelecido pelo fato de que os dois ramos da ponte sofrem a mesma influência da resistência  $R_f$  do fio de ligação. O terceiro fio não interfere muito na medição.

### Diagrama de Tensões de uma célula de carga

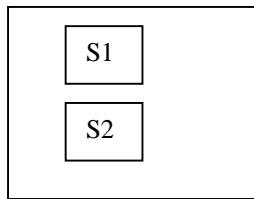


### Montagens de Strain Gauge para Tensões Axiais



Com apenas um Strain Gauge, a medida fica susceptível a variações de temperatura e as tensões de Dobra.

### Face Superior da Barra

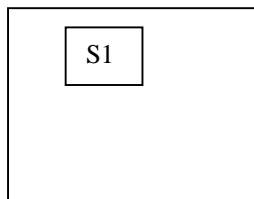


Com a introdução de um segundo Strain Gauge S2 sobre a face superior, pode-se resolver o problema da temperatura. Mas não da tensão de dobra.

Para resolver o problema da tensão de dobra, devemos usar as faces superior e inferior e trabalhar com quatro transdutores.

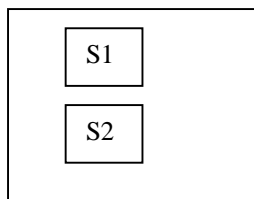
### **Face Superior**

#### **Montagem de Strain Gauge para tensões de Dobra**



Apenas um Strain Gauge a precisão pode ser baixa em razão dos efeitos da temperatura e de tensões axiais.

### **Face Superior**

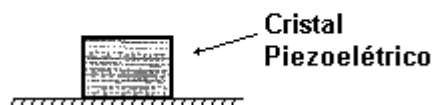


Com dois Strain Gauge sobre a face superior, podemos compensar os efeitos da temperatura, mas não as tensões axiais. Para isto usamos dois sensores na face inferior, que além de resolver o problema das tensões axiais, aumenta a sensibilidade do conjunto.

### **Face Superior**

#### **Transdutores Piezoelétricos:**

Alguns materiais isolantes tem a propriedade de formar dipolos elétricos de forma permanente, de forma tal que estes materiais reagem a pressões e a tensões elétricos. São chamados de eletretos ou materiais Piezoelétricos. É o caso de materiais de Titanato de Bário e outros. Normalmente são cristais como os da figura ao lado. Dentre suas propriedades eles oferecem uma tensão elétrica proporcional à deformação que estão sofrendo.



O contrário também vale, se aplicarmos uma tensão, há uma deformação proporcional a mesma. São muito usados como cristais de osciladores de microcontroladores e microprocessadores e como microfones (microfones de eletreto). São usados também como transdutores de pressão e como microatuadores de elevada precisão.

Como transdutores são também extensômetros, mas seu uso é mais restrito pelo fato de que estes materiais não são tão robustos quantos os extensômetros resistivos.

#### **Tacogerador:**

É um pequeno gerador elétrico de CC, com campo fornecido por imã. A tensão gerada, pela Lei de Faraday é proporcional à velocidade com que o fluxo magnético é cortado pelo enrolamento do rotor. Assim, o Tacogerador é um transdutor mecânico elétrico linear.



$$V = K n$$

K é uma constante que depende do campo do imã, do número de espiras e pólos e das dimensões do rotor; n é a rotação do eixo (por minuto, rpm, ou segundo, rps).

A polaridade da tensão gerada depende do sentido de rotação.

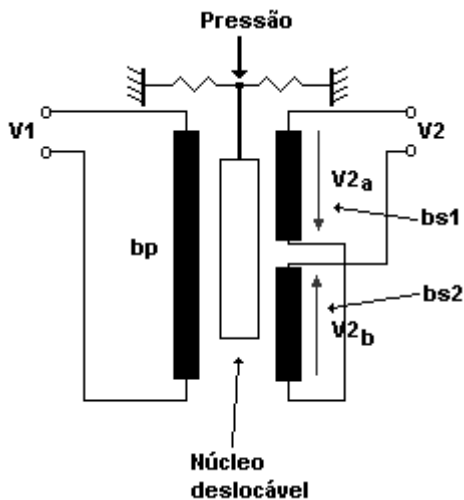
### Transdutores de Pressão:

Traduzem a pressão de um fluido em sinal elétrico. Normalmente usam um transdutor mais simples, como strain gauge, piezoelétrico, LVDT, e outros. Os tipos mais comuns são ilustrados abaixo:



construção. Em contrapartida, pode medir pressões absolutas e não só efetivas.

Transdutor de pressão usando transdutor piezoelétrico. As variações de pressão são convertidas em variações de deformação pelo diafragma e este atua diretamente sobre o cristal piezoelétrico que traduz esta deformação em sinal elétrico proporcional a deformação e a pressão que deu origem. Este transdutor somente pode medir pressões positivas, dada a sua



Transdutor de pressão à base de um LVDT. As variações de pressão são convertidas em deformação do diafragma. Esta deformação é transformada em deslocamento do eixo do LVDT, uma vez que o diafragma está conectado ao eixo do mesmo, e este deslocamento é traduzido em tensão elétrica proporcional ao deslocamento do mesmo. Como o deslocamento depende da deformação e esta da pressão, a tensão é proporcional a pressão. Este transdutor pode medir pressões positivas e negativas. Pressões absolutas e efetivas.

### Transdutores de Vazão:

A medição de vazão inclui no seu sentido mais amplo, a determinação da quantidade de líquidos, gases e sólidos que passa por um determinado local na unidade de tempo; podem também ser incluídos os instrumentos que indicam a quantidade total movimentada, num intervalo de tempo.

A quantidade total movimentada pode ser medida em unidades de volume (litros, mm<sup>3</sup>, cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>, galões, pés cúbicos) ou em unidades de massa (g, Kg, toneladas, libras). A vazão instantânea é dada por uma das unidades acima, dividida por uma unidade de tempo (litros/min, m<sup>3</sup>/hora, galões/min). No caso de gases e vapores, a vazão instantânea pode ser expressa, em Kg/h ou em m<sup>3</sup>/h. Quando se mede a vazão em unidades de volume, devem ser especificadas as "condições base" consideradas. Assim no caso de líquidos, é importante indicar que a vazão se considera "nas condições de operação", ou a 0 °C, 20 °C, ou a outra temperatura, qualquer. Na medição de gases, é comum indicar a vazão em Nm<sup>3</sup>/h (metros cúbicos normais por hora, ou seja a temperatura, de 0 °C e a pressão atmosférica) ou em SCFM (pés cúbicos standard por minuto - temperatura, 60 °F e 14,696 PSIA de pressão atmosférica).

Vale dizer que:

1 m<sup>3</sup> = 1000 litros 1 galão (americano) = 3,785 litros

1 pé cúbico = 0,0283168 m<sup>3</sup> 1 libra = 0,4536 Kg

## TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO:

Existem dois tipos de medidores de vazão:

- os medidores de quantidade;
- medidores volumétricos.

### MEDIDORES DE QUANTIDADE

São aqueles que, a qualquer instante permitem saber que quantidade de fluxo passou mas não vazão do fluxo que está passando. Exemplo: bombas de gasolina, hidrômetros, balanças industriais, etc.

#### a) Medidores de Quantidade por Pesagem

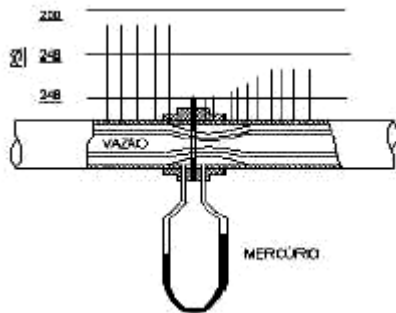
São utilizados para medição de sólidos, que são as balanças industriais.

#### b) Medidores de Quantidade Volumétrica

São aqueles que o fluido, passando em quantidades sucessivas pelo mecanismo de medição faz com que o mesmo acione o mecanismo de indicação. São estes medidores que são utilizados para serem os mentos primários das bombas de gasolina e dos hidrômetros. Exemplo: disco nutante, tipo pistão rotativo oscilante, tipo pistão alternativa, tipo pás, tipo engrenagem, etc.

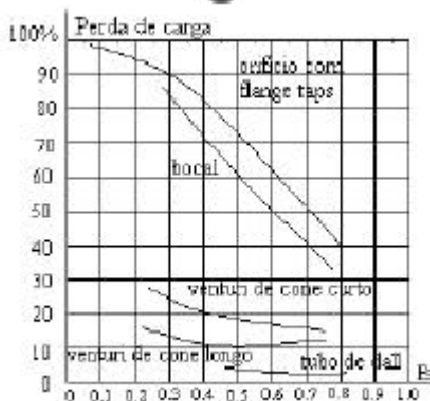
### MEDIDORES VOLUMÉTRICOS

São aqueles que exprimem a vazão por unidade de tempo.

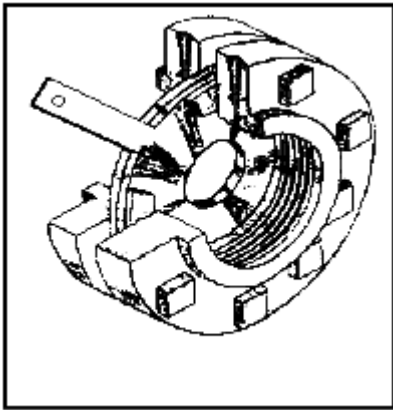


#### a) Medição de Vazão por Pressão Diferencial

A pressão diferencial é produzida por vários tipos de elementos primários colocados na tubulação de forma tal que o fluido passa através deles. A sua função é aumentar a velocidade do fluido diminuindo a área da seção em um pequeno comprimento para haver uma queda de pressão. A vazão pode então, ser medida a partir desta queda.



Uma vantagem primordial dos medidores de vazão por DP, é que os mesmos podem ser aplicados numa grande variedade de medições, envolvendo a maior parte dos gases e líquidos, inclusive fluidos com sólidos em suspensão, bem como fluidos viscosos, em uma faixa de temperatura e pressão bastante ampla. Um inconveniente deste tipo de medidor é a perda de carga que o mesmo causa ao processo, sendo a placa de orifício, o dispositivo que provoca a maior perda de carga "irrecuperável" (de 40 a 80% do DP gerado).



### PLACA DE ORIFÍCIO

Dos muitos dispositivos inseridos numa tubulação para se criar uma pressão diferencial, o mais simples e mais comum empregado é o da placa de orifício. Consiste em uma placa precisamente perfurada, a qual é instalada perpendicularmente ao eixo da tubulação.

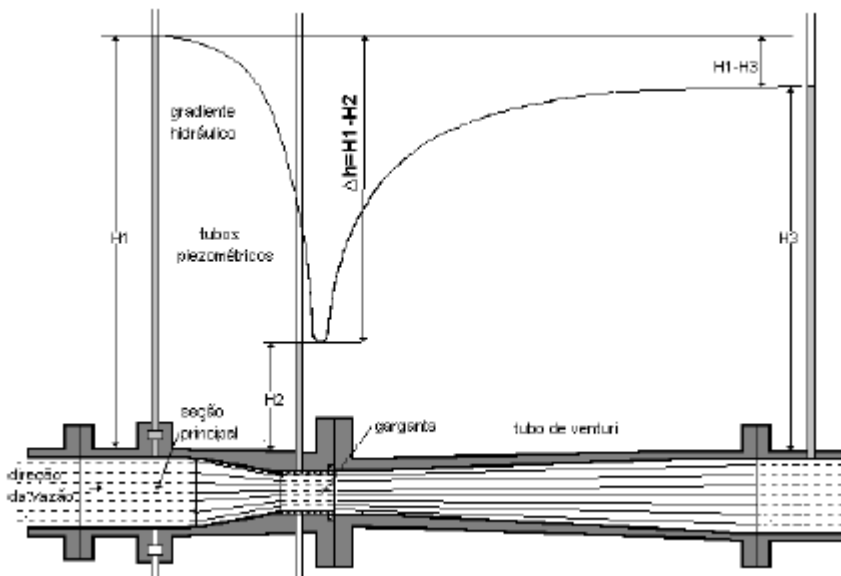
É essencial que as bordas do orifício estejam sempre perfeitas, porque, se ficarem, imprecisas ou corroídas pelo fluído, a precisão da medição será comprometida. Costumeiramente são fabricadas com aço inox, monel, latão, etc., dependendo do fluído.

#### VANTAGENS

Instalação fácil  
Econômica  
Construção simples  
Manutenção e troca simples

#### DESVANTAGENS

Alta perda de carga  
Baixa Rangeabilidade



### TUBO VENTURI

O tubo Venturi, combina dentro de uma unidade simples, uma curta garganta estreitada entre duas seções cônicas e está usualmente instalado entre duas flanges, numa tubulações. Seu propósito é acelerar o fluído e temporariamente baixar sua pressão estática.

A recuperação de pressão em um tubo Venturi é bastante eficiente, como podemos ver na figura a seguir, sendo seu uso recomendado quando se deseja um maior restabelecimento de pressão e quando o fluido medido carrega

sólidos em suspensão. O Venturi produz um diferencial menor que uma placa de orifício para uma mesma vazão e diâmetro igual à sua garganta.

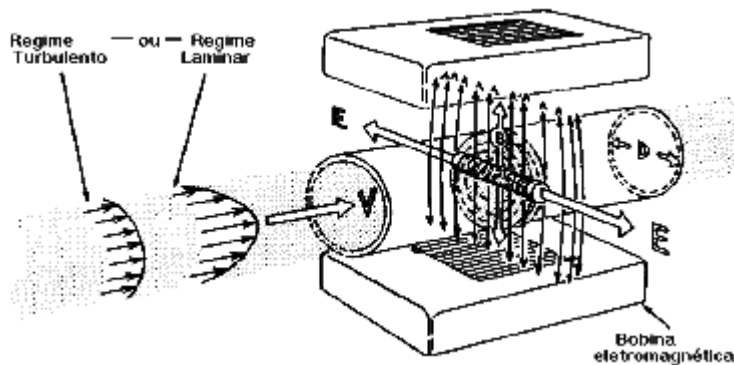
### MEDIDORES ESPECIAIS DE VAZÃO

Os principais medidores especiais de vazão são:

- medidores magnéticos de vazão com eletrodos,
- tipo turbina,
- tipo Coriolis , Vortex;
- Ultra-sônico

### Medidor Eletromagnético de Vazão

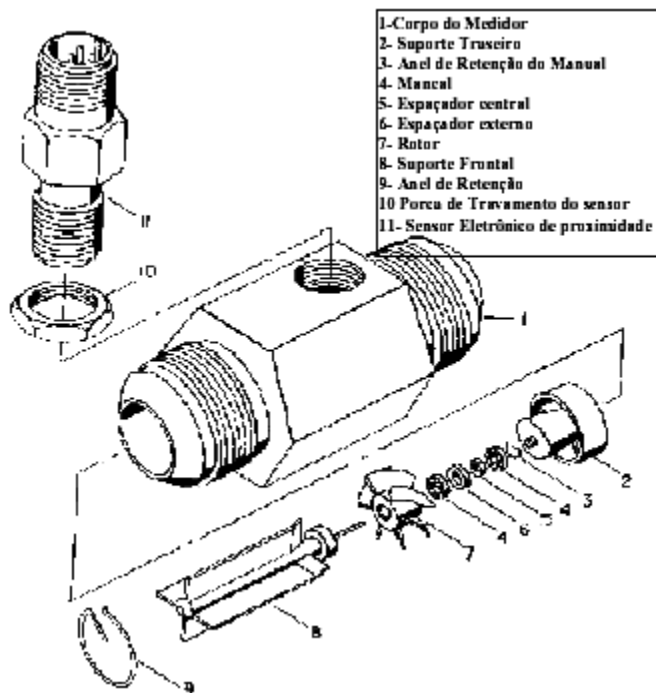
O medidor magnético de vazão é seguramente um dos medidores mais flexíveis e universais dentre os métodos de medição de vazão. Sua perda de carga é equivalente a de um trecho reto de tubulação, já que não possui qualquer obstrução. É virtualmente insensível à densidade e à viscosidade do fluido de medição. Medidores magnéticos são portanto ideais para medição de produtos químicos altamente corrosivos, fluidos



com sólidos em suspensão, lama, água, polpa de papel. Sua aplicação estende-se desde saneamento até indústrias químicas, papel e celulose, mineração e indústrias alimentícias. A única restrição, em princípio é que o fluido tem que ser eletricamente condutivo. Tem ainda como limitação o fato de fluidos com propriedades magnéticas adicionarem um certo erro de medição. A figura ao lado ilustra este transdutor.

### Medidor Tipo Turbina

O medidor é constituído basicamente por um rotor montado axialmente na tubulação. O rotor é



provido de aletas que o fazem girar quando passa um fluido na tubulação do processo. Uma bobina captadora com um ímã permanente é montada externamente fora da trajetória do fluido.

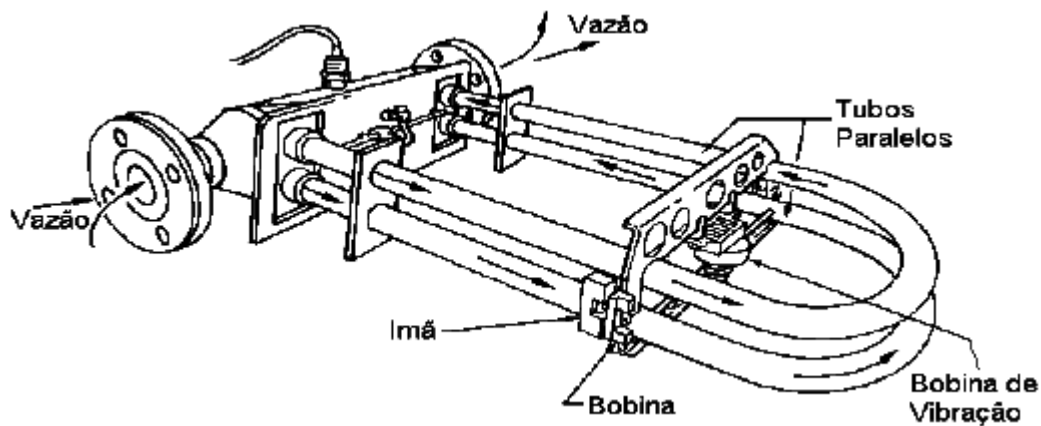
Quando este se movimenta através do tubo, o rotor gira a uma velocidade determinada pela velocidade do fluido e pelo ângulo das lâminas do rotor. À medida que cada lâmina passa diante da bobina e do ímã, ocorre uma variação da *relutância* do circuito magnético e no fluxo magnético total a que está submetida a bobina. Verifica-se então a indução de um ciclo de tensão alternada.

A frequência dos pulsos gerados desta maneira é proporcional à velocidade do fluido e a Vazão pode ser determinada pela medição / totalização de pulsos. A figura ao lado ilustra este tipo de transdutor.

### Medidor por Efeito Coriolis

É um instrumento de grande sucesso no momento, pois tem grande aplicabilidade desde indústria alimentícia, farmacêutica, química, papel, petróleo etc. e sua medição, independe das variáveis de processo - densidade, viscosidade, condutibilidade, pressão, temperatura, perfil do fluido.

Resumidamente, um medidor Coriolis possui dois componentes: tubos de sensores de medição e transmissor. Os tubos de medição são submetidos a uma oscilação e ficam vibrando na sua própria frequência natural à baixa amplitude, quase imperceptível a olho nu. Quando um fluido qualquer é introduzido no tubo em vibração, o efeito do Coriolis se manifesta causando uma deformação, isto é, uma torção, que é captada por meio de sensores magnéticos que geram uma tensão em formato de ondas senoidais.



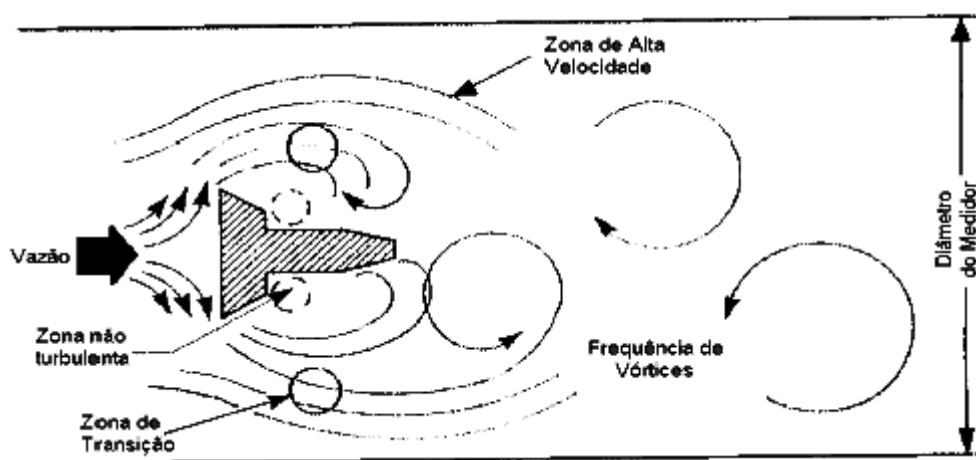
A figura ao lado, ilustra este tipo de medidor.

### Medidor Vortex

Quando um anteparo de geometria definida é colocado de forma a obstruir parcialmente uma tubulação em que escoa um fluido, ocorre a formação de vórtices; que se desprendem alternadamente de cada lado do anteparo, como mostrado na figura abaixo. Este é um fenômeno muito conhecido e demonstrado em todos os livros de mecânica dos fluidos.

Os vórtices também podem ser observados em situações frequentes do nosso dia a dia, como por exemplo:

O movimento oscilatório da plantas aquáticas, em razão da correnteza; As bandeiras flutuando ao



vento; As oscilações das copas das árvores ou dos fios elétricos quando expostas ao vento.

A figura ao lado ilustra este fenômeno.

## Medidores Ultra-sônicos

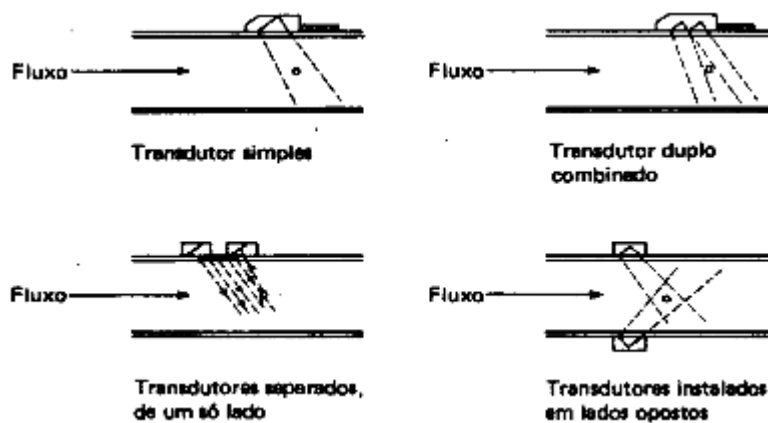
Os medidores de vazão que usam a velocidade do som como meio auxiliar de medição podem ser divididos em dois tipos principais:

- **Medidores a efeito doppler**
- **Medidores de tempo de trânsito.**

Existem medidores ultra-sônicos nos quais os transdutores são presos à superfície externa da tubulação, e outros com os transdutores em contato direto com o fluido. Os transdutores-emissores de ultra-sons consistem em cristais piezoelétricos que são usados como fonte de ultra-som, para enviar sinais acústicos que passam no fluido, antes de atingir os sensores correspondentes.

## Medidores de efeito Doppler

O efeito Doppler é aparente variação de frequência produzida pelo movimento relativo de um emissor e de um receptor de frequência. No caso, esta variação de frequência ocorre quando as ondas são refletidas pelas partículas móveis do fluido. Nos medidores baseados neste princípio ( ver figura abaixo ),



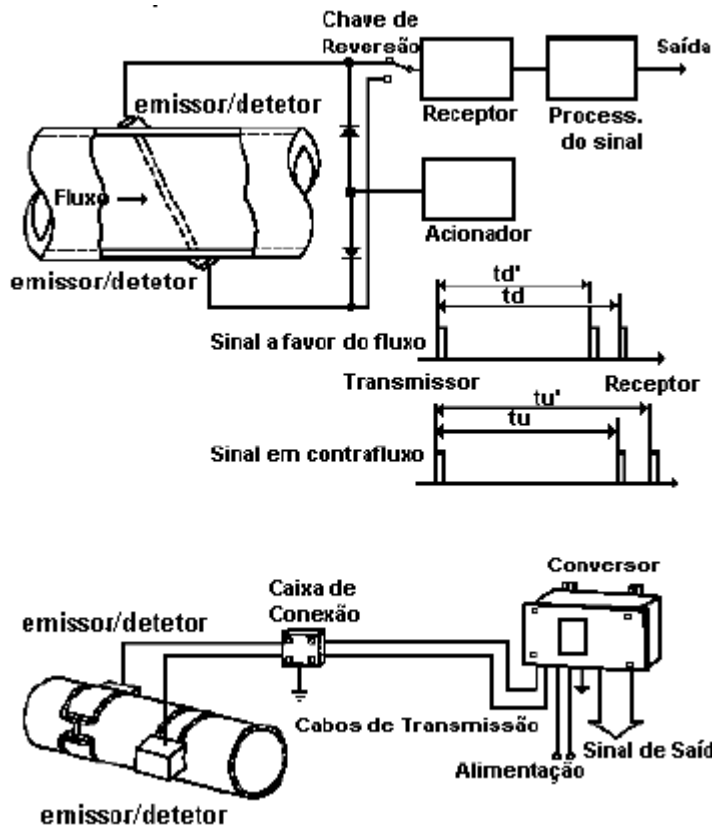
os transdutores-emissores projetam um feixe contínuo de ultra-som na faixa das centenas de khz. Os ultra-sons refletidos por partículas veiculadas pelo fluido têm sua frequência alterada proporcionalmente ao componente da velocidade das partículas na direção do feixe. Estes instrumentos são conseqüentemente adequados para medir vazão de fluidos que contêm partículas capazes de refletir ondas acústicas. A figura ao lado ilustra esta técnica.

## Medidores de tempo de trânsito

Ao contrário dos instrumentos anteriores, estes instrumentos não são adequados para medir vazão de fluidos que contêm partículas. Para que a medição seja possível, os medidores de tempo de trânsito devem medir vazão de fluidos relativamente limpos. Nestes medidores ( ver figura abaixo ), um transdutor – emissor - receptor de ultra-sons é fixado à parede externa do tubo, ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas. O eixo que reúne os emissores -receptores forma com o eixo da tubulação, um ângulo  $\alpha$ .

Os transdutores transmitem e recebem alternadamente um trem de ondas ultrasônicas de duração pequena. O tempo de transmissão é levemente inferior ( $t_1$ ) orientada para a jusante, e levemente superior

(t<sub>2</sub>) quando orientada para a montante. Sendo  $L$  a distância entre os sensores,  $V_1$  a velocidade média do fluido e  $V_2$  a velocidade do som no líquido considerado, temos:



### Pirometria óptica:

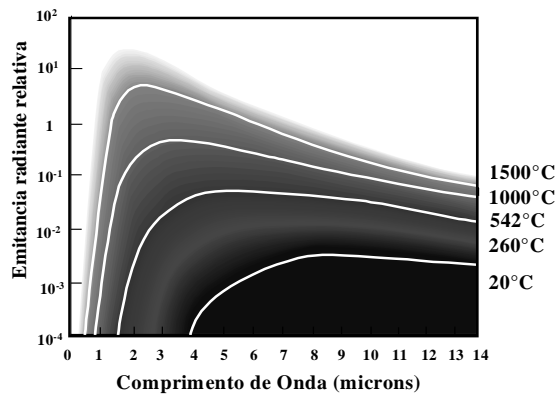
Vem ganhando espaço em função do fato de que não necessita de contato e pode medir a temperatura com o corpo em movimento. Baseia-se no princípio da emissão de radiação infravermelha por corpos aquecidos. A radiação é captada por um fotodiodo e convertida em tensão proporcional a energia incidente, donde se avalia a temperatura do corpo.

### Princípios Básicos:

Basicamente, radiação térmica ou transmissão de calor por radiação, é a taxa de emissão de energia de um dado material, dada sua temperatura. A radiação térmica está relacionada com a energia liberada de oscilações ou transições dos elétrons, átomos, íons, ou moléculas mantidos pela energia interna do material. Toda forma de matéria com temperatura acima do zero absoluto emite energia térmica. Em gases ou outros materiais transparentes (materiais com absorção interna desprezível), a energia térmica se irradia através de seu volume. Para materiais com alta absorção interna, como os metais, apenas algumas centenas de camadas atômicas mais externas efetivamente contribuem para a emissão de energia térmica. Para esses materiais, a emissão de energia térmica é um fenômeno superficial.

## *Radiação Característica Em Corpo Negro*

### Relação entre Temperatura e Energia

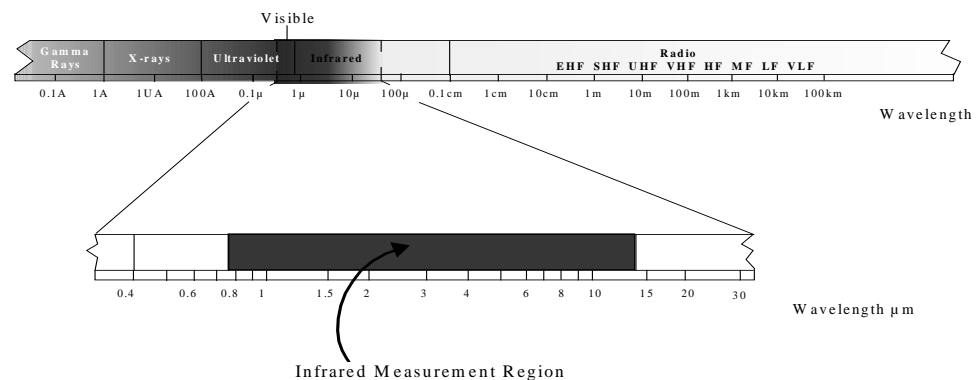


Em 1900, Max Planck estabeleceu sua teoria de radiação quântica. A lei de Planck matematicamente descreve a quantidade de energia emitida por um material em uma dada temperatura  $T$  para cada comprimento de onda  $\lambda$ . A Fig. 1 ilustra a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro (radiador perfeito) em diferentes temperaturas, calculados usando-se a lei de Planck.

A lei de Planck é fundamental para o desenvolvimento dos Pirômetros IV e para o entendimento de seus detalhes operacionais. Porém, a lei de Planck se aplica apenas para radiadores perfeitos, que teoricamente emitem a uma taxa de 100% a energia armazenada em forma de calor. No mundo real não encontramos materiais com o mesmo comportamento de um corpo negro.

Os comprimentos de onda utilizados para a medição de temperatura compõem o chamado espectro infravermelho, que faz parte do espectro eletromagnético amplo, conforme a fig. abaixo:

## *Espectro Eletromagnético*

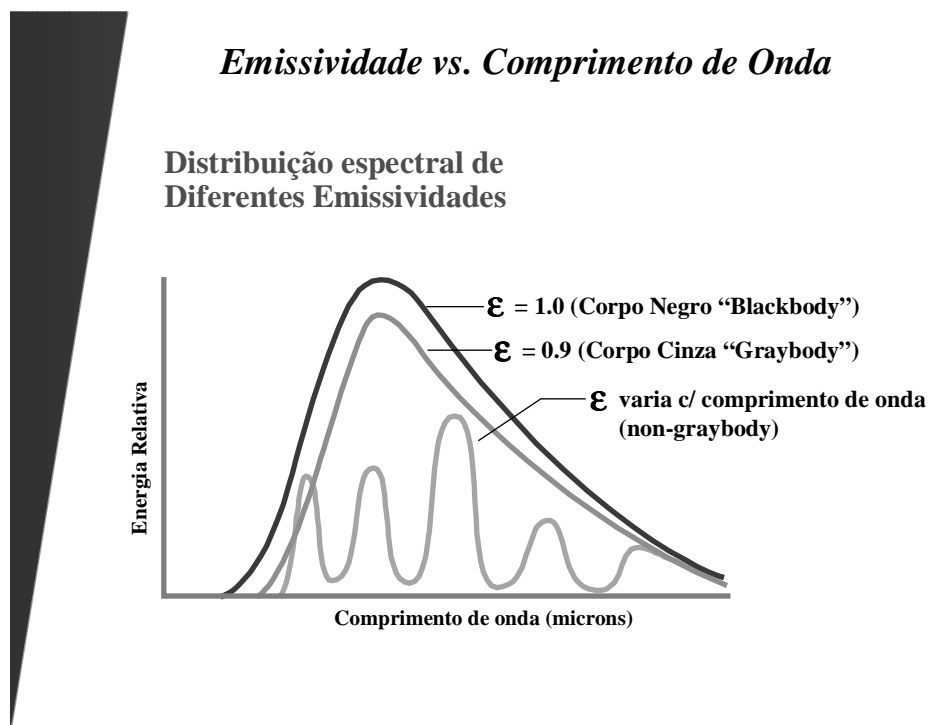




## Emissividade

Termômetros Infravermelhos ( também conhecidos como Pirômetros de radiação ) são calibrados para medir a temperatura de um corpo negro. Entretanto nenhum objeto real emite a mesma quantidade de energia que um corpo negro emite à mesma temperatura no mesmo comprimento de onda. O fator emissividade é definido como a razão entre a energia emitida por um material e a energia emitida por um corpo negro na mesma temperatura no mesmo comprimento de onda.

Como mostra a Fig. abaixo , um corpo negro possui fator emissividade  $\epsilon = 1$  , um corpo cinza possui emissividade constante porém  $\epsilon < 1$  , e um corpo não cinza possui emissividade que varia ao longo de diferentes comprimentos de onda , mas não com a temperatura.



A radiação interage com os objetos de três formas : reflexão , absorção ou transmissão. Se representarmos por R , A e T as porções de energia refletida , absorvida e transmitida , temos pela lei de conservação de energia que  $R+A+T = 100\%$  ou '1'. Se um corpo está em equilíbrio térmico com o ambiente , a quantidade de energia emitida é sempre igual a quantidade de energia absorvida , isto é ,  $A=\epsilon$  e  $\epsilon + R + T = 1$  .

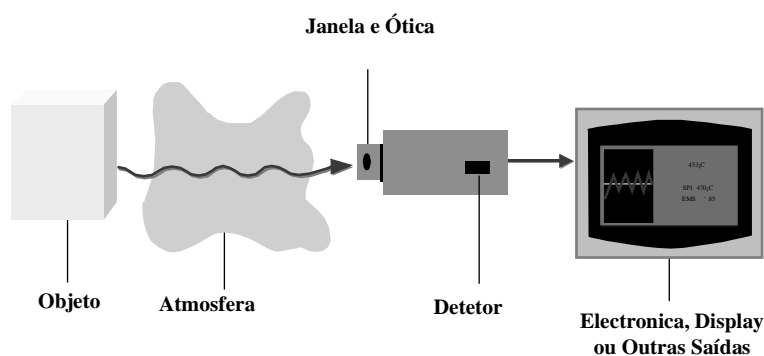
Para medir a temperatura de um objeto , devemos selecionar um pirômetro com espectro de detecção em que o objeto seja opaco (  $T=0$  ). Então temos  $\epsilon + R = 1$  , ou seja , objetos que possuem baixo fator emissividade apresentam alto fator de reflexão.

## Campo de visão

A figura abaixo ilustra os principais componentes de um termômetro IV. Um sensor foto sensível sintonizado para detectar uma banda específica do espectro infravermelho , recebe energia radiante do alvo através do sistema ótico. O sistema ótico determina o diâmetro da área circular medida ou campo de visão do instrumento . Esta relação entre distância entre alvo e pirômetro , e o diâmetro do campo de visão , determina a resolução ótica do equipamento , D:S . Uma relação D:S = 60:1 equivale a um ângulo de  $1^\circ$  .

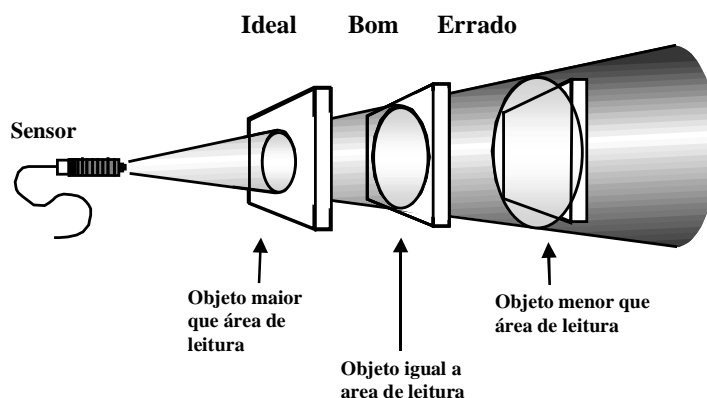
Para pirômetros ‘uma cor’ o preenchimento do campo de visão do instrumento é fundamental para uma medição precisa. Qualquer que seja o equipamento, ele sempre indicará a temperatura média da área delimitada pelo seu campo de visão, conforme ilustra a figura abaixo.

## *O Sistema Infravermelho*



## *Distância x Tamanho do Alvo*

### **O Objeto Deve Preencher o Campo de Visão**



Muitos dos pirômetros modernos permitem a opção entre sistemas de mira telescópica ou laser para facilitar o posicionamento do sensor em relação ao alvo a ser medido.

### Pirômetros de banda simples ou “uma cor”

O pirômetro de banda espectral simples detecta e quantifica a energia irradiada em apenas uma banda do espectro infravermelho. Os pirômetros atuais são sintonizados em diferentes espectros de detecção. Os principais compromissos são : a escolha de bandas onde a absorção atmosférica seja a menor possível, e o material a ser medido seja opaco.

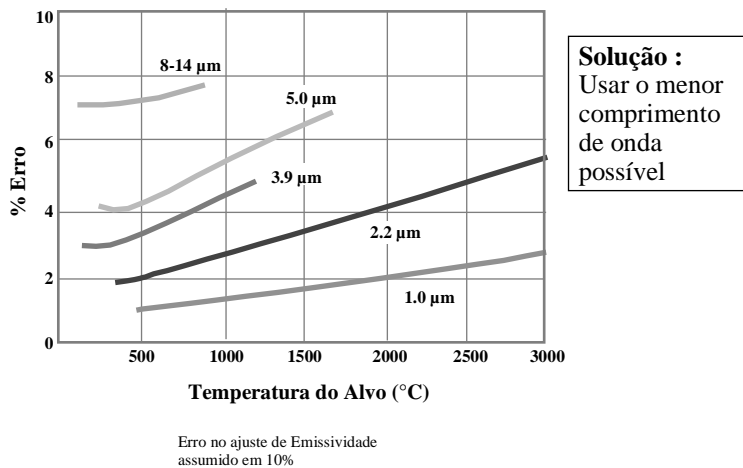
A expressão ( simplificada) abaixo relaciona a temperatura T e a energia S quantificada :

$$T = B / [A + \ln(\epsilon) - \ln(S)]$$

Onde A e B são constantes determinados na calibração,  $\epsilon$  = fator emissividade e S a energia detectada. Note que existe uma forte dependência entre a temperatura e o fator emissividade e a quantidade de energia emitida pela área delimitada pelo campo de visão do instrumento.

Neste tipo de equipamento redução de energia dada a obstrução causada por vapores e partículas sólidas, assim como variações de emissividade, afetam diretamente a medição da temperatura.

## Erros De Temperatura Devido À Incerteza Na Emissividade



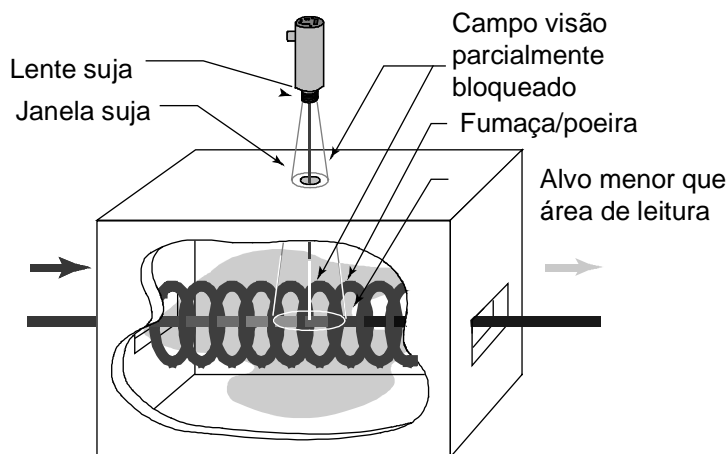
### Pirômetro razão ou “duas cores”

Os pirômetros razão detectam a energia radiante emitida pelo alvo ( campo de visão) em duas bandas de comprimento de onda. Esses equipamento são menos sensíveis à interferências causadas pela variação de emissividade e obstruções físicas presentes no ambiente pois a temperatura é proporcional à uma razão entre duas quantidades de energia.

$$T = B / [A + \ln(\epsilon_1 / \epsilon_2) - \ln(S_1 / S_2)]$$

A e B , como no pirômetro “uma cor “ são constantes determinadas na calibração do instrumento ,  $\epsilon_1/ \epsilon_2$  representa a razão entre os fatores emissividade que podem ser diferentes nos dois espectros , e  $S_1/S_2$  a razão entre as duas energias. O pirômetro “duas cores” não mais possui ajuste de emissividade , e sim ajuste de “slope” que é a razão dos fatores emissividade.

## Resolução De Problemas Com Termômetros 2 Cores



### 12. Sensores

Enquanto os transdutores visam converter uma grandeza física em outra, os sensores apenas sentem a ocorrência de um evento e reagem à ele enviando um sinal. Ou seja, sua resposta é discreta e não contínua como a dos transdutores. Eles são muito importantes na indústria dada a grande necessidade que os processos automatizados têm, de obter dados sobre eventos que ocorrem num.

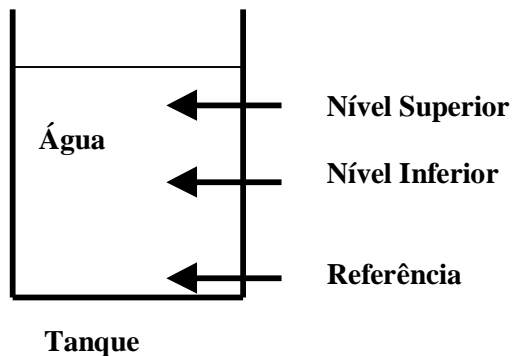
Os eventos podem ser de vários tipos. Um objeto que se aproxima, um líquido que atingiu um determinado nível, a pressão que atingiu um limite prestabelecido, enfim, existem diversas situações.

Existem vários tipos de sensores, mas os principais utilizados pela indústria são:

- Sensor de Nível;
- Sensor de Pressão;
- Sensor de Posição;
- Sensor de Presença;

### Sensor de Nível:

Normalmente são utilizados como sensor de nível de água para encher um tanque, um balão volumétrico de uma caldeira ou outra aplicação qualquer. O sensor mais comum, principalmente quando o líquido é a água, é o sensor de varetas. Elas são fixadas ao corpo do tanque ou balão volumétrico, ou ainda, coluna de inspeção de nível. São normalmente duas varetas, sendo uma para o nível mínimo e outra para o nível máximo. Há uma terceira vareta chamada de referência. A figura abaixo ilustra o arranjo entre as hastes.

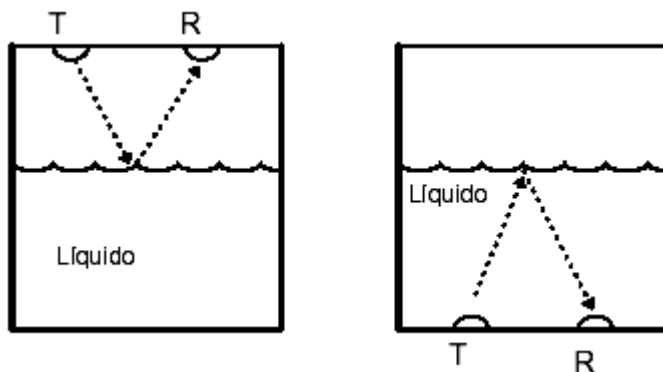


Perceba que a haste de referência é sempre mais baixa que as outras duas. O princípio de funcionamento é pela condutividade do líquido. Quando o nível está acima do nível superior, ambas as hastes conduzem para a haste de referência. Quando o nível cai abaixo do nível superior, a haste correspondente não pode mais conduzir para a referência, ficando apenas a haste de nível inferior conduzindo. Quando o nível cai abaixo do nível inferior, nenhuma das duas hastes conduz.

Normalmente, estes sensores são usados com controladores ON-OFF para ligar uma bomba. No caso a bomba seria ligada no nível inferior e desligada no nível superior. Caso a superfície do tanque seja metálica, a haste de referência é dispensável, podendo o fio da haste ser ligado diretamente no corpo do tanque.

A principal desvantagem deste sensor é que há a necessidade de furar o tanque para as hastes e ele só funciona com líquidos que apresentem certo grau de condutividade. A condutividade pode ser ajustada por meio de um potenciômetro no controlador para adequar a resposta.. Este sensor não funciona com líquidos não condutivos como por exemplo, água desmineralizada para caldeiras.

Quando o líquido não é condutivo, pode-se usar outro tipo de sensor como os ultrasônicos como ilustra a figura abaixo:



O uso da reflexão ultrasônica para medida de nível é favorável pois esta é uma **técnica não invasiva**, isto é, ela não envolve em colocar nenhuma parte no material. A figura a) e a figura b), mostram as técnicas interna e externa. É óbvio, que a técnica externa é mais adequada para a medida de nível de material sólido. Em ambos os casos a medida depende do tempo gasto na reflexão do pulso ultrasônico na superfície do material.

**Sensores de Pressão:**

Normalmente são eletromecânicos do tipo pressostato. Basicamente são compostos por uma mola que é submetida a uma força produzida pela pressão do fluido. Quando a pressão do fluido atinge um certo valor vence a força da mola aciona um contato elétrico simples. Esse é o chamado pressostato simples, usado simplesmente para indicar pressão máxima ou mínima.

Há também o pressostato diferencial, onde uma vez atingida a pressão máxima e acionado o contato elétrico, este somente irá voltar ao estado de repouso, quando a pressão cair abaixo de um certo nível, que pode ser ajustado. Por haver uma diferença entre a pressão que ativa o contato e a que desativa o contato, o pressostato é chamado de diferencial ou de histerese. É o pressostato típico de pequenos compressores.

**Sensores de Posição ou de Proximidade:**

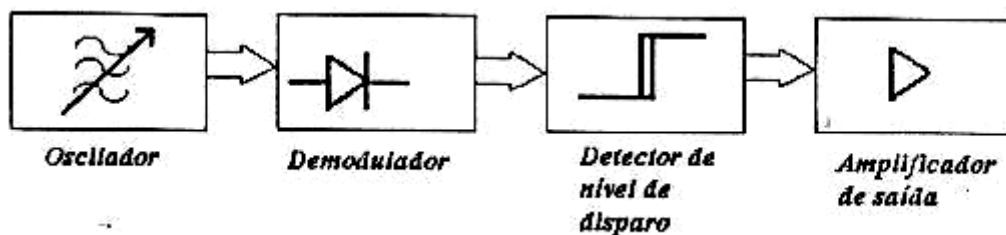
Muito usados na indústria para automação industrial dada sua grande versatilidade e utilidade no controle de eventos discretos. Podem ser de vários tipos, mas normalmente se classificam pela natureza de seu princípio de funcionamento. São eles:

- **Sensor Indutivo;**
- **Sensor Capacitivo;**
- **Sensor Ultrassônico;**
- **Sensor Fotoelétrico;**

**Sensores Indutivos:**

São sensores que executam uma comutação eletrônica, quando um objeto metálico entra dentro de um campo eletromagnético de alta frequência, produzido por um oscilador eletrônico. Sua instalação se dá em máquinas ferramentas, máquinas operatrizes, de embalagens, têxteis, correias transportadoras e na indústria automobilística, para resolver problemas gerais de automação. Abaixo é visto o esquema construtivo, em blocos, de um sensor indutivo.

Onde:



Oscilador:

diminui a frequência de oscilação quando um evento for detectado.

Demodulador:

converte o sinal do oscilador em nível de tensão cc.

Detector de nível de disparo:

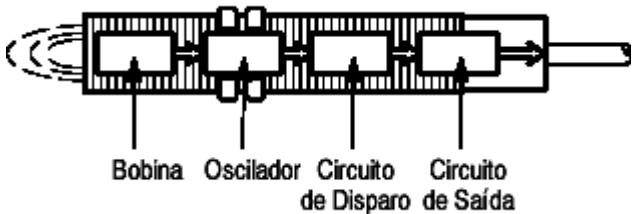
dispara quando o oscilador diminui a frequência.

Amplificador de saída:

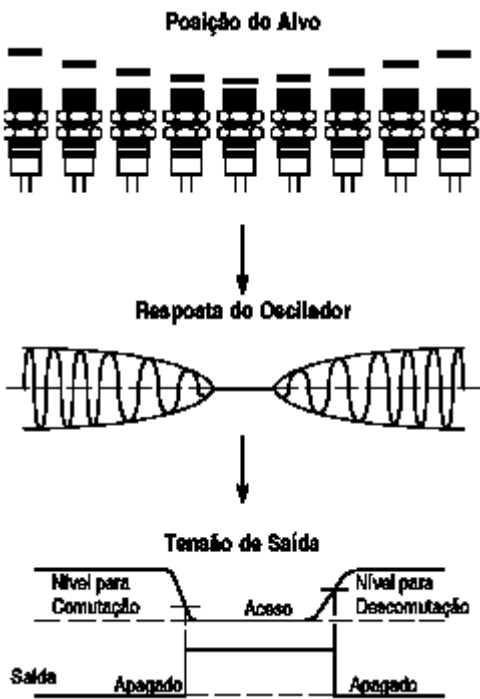
amplifica o sinal gerado pelo sensor e entrega-o a carga.

Funcionamento:

O oscilador, com o auxílio de uma bobina, gera um campo magnético de alta frequência. Este campo, é direcionado para fora do elemento ativo, formando uma região de sensibilidade denominada de face sensível, de distância determinada, chamada de distancia de comutação. Quando um corpo metálico esta distante da face sensível, mas dentro da distância de comutação, este metal amortece a oscilação, provocando a comutação eletrônica, ou seja, faz o sensor mudar de estado.



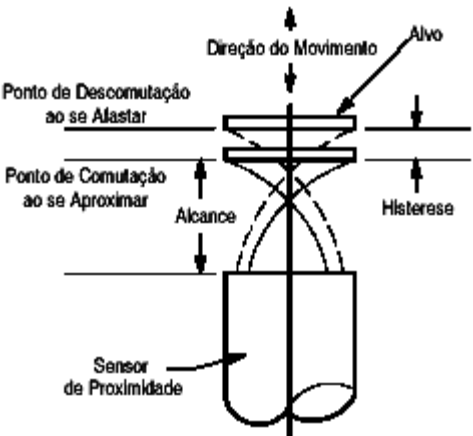
Com a retirada do corpo metálico da distância de comutação, o oscilador volta a trabalhar normalmente e o sensor volta a seu estado normal. Ao lado, vemos a montagem pictórica de um sensor indutivo, com seus elementos.



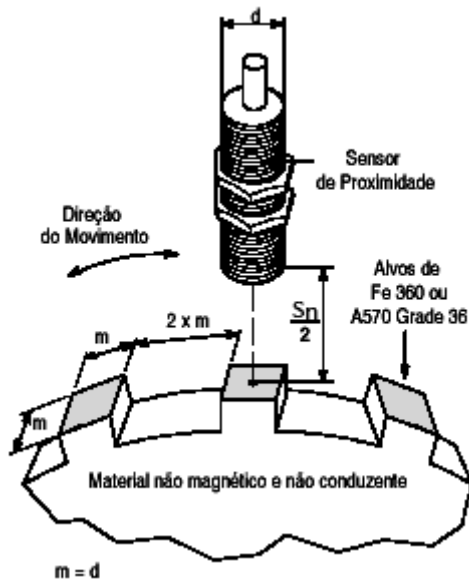
Na figura ao lado observamos a variação da frequência do oscilador em função da posição do alvo. Nota-se que a medida que o alvo se aproxima a frequência diminui e a amplitude também, após um certo ponto o oscilador praticamente para de funcionar, gerando uma detecção. Com o afastamento do corpo, após um certo ponto ele volta a funcionar. Perceba que o ponto de ativação e desativação são diferentes, ou seja, o sensor tem histerese.

Fatores de Correção

Material do Alvo	Fator de Correção Aproximado
Aço Carbono	1,0
Aço Inoxidável	0,85
Latão	0,50
Alumínio	0,45
Cobre	0,40



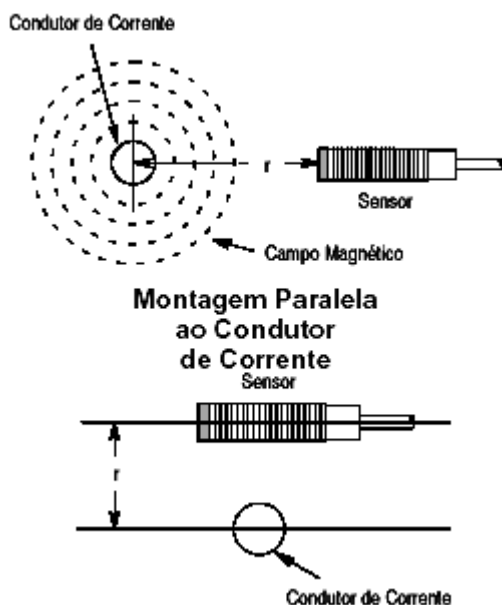
A figura ao lado ilustra melhor o efeito da histerese, que é esta diferença entre o ponto de ativação e desativação. Outro dado importante é que o alcance que aparece na figura ao lado é definido para um material padrão que é o aço-carbono padrão. Para materiais diferentes, a distância deve ser corrigida de um fator. A tabela acima, ilustra alguns destes fatores, para alguns materiais. Isto pode variar de fabricante para fabricante.



Observamos na figura ao lado uma característica importante deste sensor que é a frequência de comutação do mesmo.

O método ilustrado ao lado é o método padrão da norma IEC para a determinação da frequência de comutação do sensor. O sensor indutivo é posicionado frente a uma roda dentada, onde os dentes estão dentro da região sensora nominal. A roda gira com uma certa velocidade angular. A sucessão dos dentes e vales gera pulsos na saída do sensor. Estes pulsos são contados e velocidade da roda vai aumentando. Se tudo estiver bem a contagem de pulsos bate com velocidade da roda dentada. Quando o sensor chega ao limite e começa a pular pulsos, porque não pode mais acompanhar o giro da roda.

Este é o limite deste sensor.



Sensores próximos a condutores percorridos por corrente elevadas podem sofrer interferência dos campos magnético criados por estes condutores.

Assim, deve-se calcular a distância  $r$  entre estes condutores e o sensor para evitar problemas de disparo intempestivo. A distância segura  $r$ , como estão demonstrados nas figuras ao lado, podem ser obtidas no gráfico abaixo ou diretamente das expressões.

Pelo gráfico, entrando com a corrente de soldagem, a distância deve ser tal que fique na Zona de segurança, ou seja na parte mais escura do gráfico.

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

$$B = \frac{H}{0.796}$$

$$\text{Gauss} = 10 \cdot B$$

onde:

$I$  = corrente de soldagem (em kA),

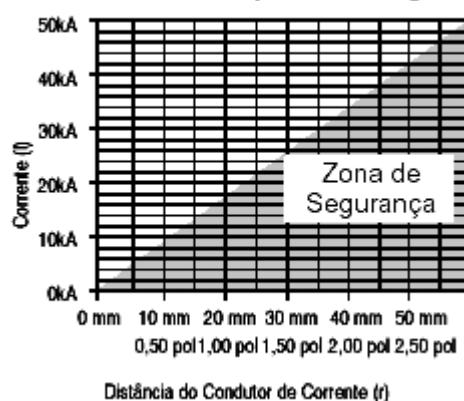
$H$  = intensidade do campo (em kA/m),

$B$  = fluxo magnético (em mT), e

$r$  = distância entre o sensor e os

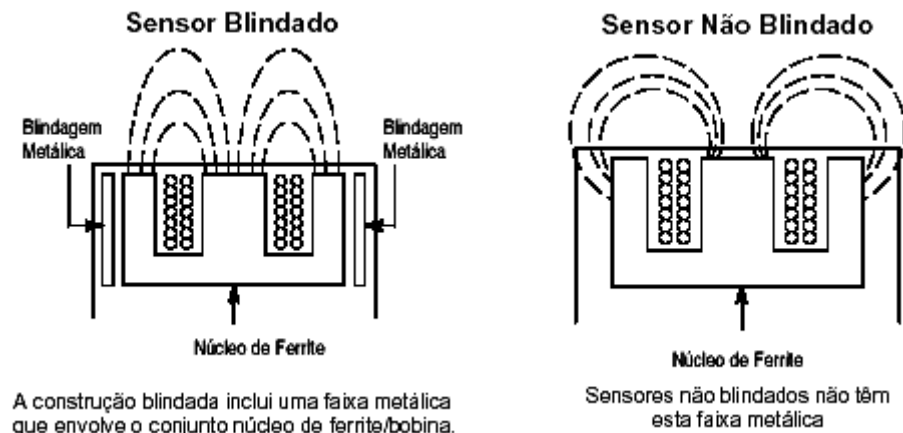
condutores de corrente (em metros).

Imunidade a Campo de Soldagem





### Tipos de Sensor com relação ao tipo de campo magnético



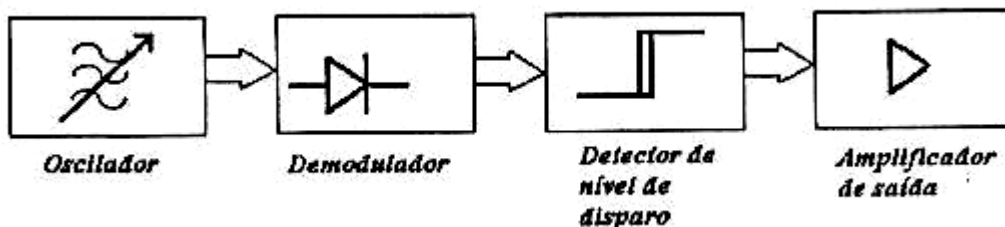
Na figura acima vemos a diferença na distribuição do campo magnético de um sensor blindado e outro não blindado. Isto influencia nas distâncias de montagem do sensor.

### Sensores Capacitivos:

Assim como os sensores indutivos, os capacitivos também podem efetuar um chaveamento eletrônico sem qualquer contato físico. Estes sensores foram desenvolvidos para atuarem na presença de materiais orgânicos, plásticos, vidro, líquido, além de metais.

Sua aplicação se dá em detectores de nível em tanques, contagem de garrafas ( cheias ou vazias ), contagem de embalagens plásticas, limitadores de carretéis, etc.

Abaixo é visto o esquema construtivo, em blocos, de um sensor capacitivo.



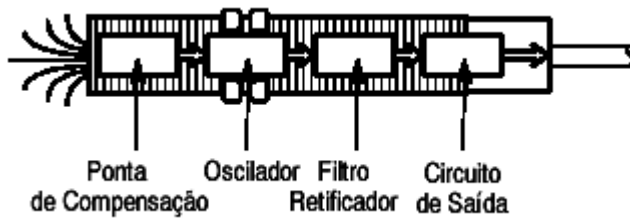
Onde:

Oscilador:	diminui a frequência de oscilação quando um evento for detectado.
Demodulador:	converte o sinal do oscilador em nível de tensão cc.
Detetor de nível de disparo:	dispara quando o oscilador diminui a frequência.
Amplificador de saída:	amplifica o sinal gerado pelo sensor e entrega-o a carga.

### Funcionamento:

Conforme pode ser notado na figura acima o esquema em blocos de um oscilador capacitivo é igual ao do indutivo. A diferença entre eles reside no fato de que no sensor capacitivo o princípio de funcionamento está baseado na variação do dielétrico no meio em que o sensor está inserido. Quando nesta região penetrar algum objeto, este provoca a variação do dielétrico e, conseqüentemente a

variação da frequência do oscilador. Variação esta que é detectada e transformada em um nível de tensão cc.

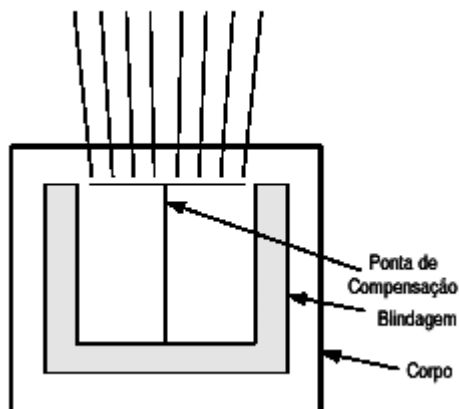


Com a retirada do objeto da distância de comutação, o oscilador volta a trabalhar normalmente e o sensor volta ao seu estado normal. Ao lado vemos a montagem pictórica dos elementos do sensor. A correta detecção depende da constante dielétrica dos materiais que devem ser detectados. O sensor capacitivo normalmente é usado para detectar materiais não metálicos. Cada

material tem sua constante dielétrica K.

A distância sensora deve ser corrigida em função da constante dielétrica K do material. A distância de catálogo é a distância para o alvo padrão, que é o mesmo dos sensores indutivos.

#### Sensor Blindado

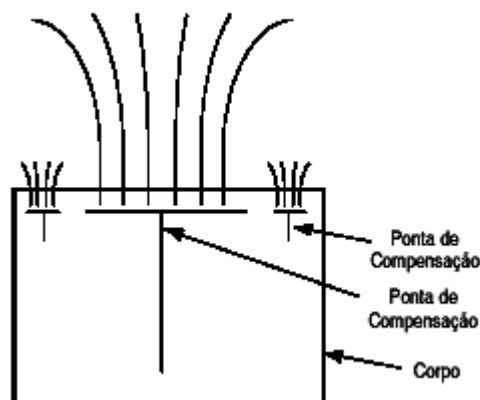


Ao lado vemos um sensor capacitivo do tipo blindado. Veja que o campo elétrico na ponta é bem mais concentrado, que o da ponta não blindada. Este fato o torna mais adequado para detectar elementos de constante dielétrica K mais baixa, que são difíceis de detectar. Assim eles enxergam alvos que os não-blindados não enxergam.

Em contrapartida, são mais susceptíveis a detecção falsa por acúmulo de poeira e/ou umidade.

Outro fator importante, é que a montagem é influenciada pela blindagem. O sensor blindado pode ter montagem rente, o não blindado não.

#### Ponta Não Blindada



Na versão não blindada ilustrada pela figura ao lado, o campo elétrico é menos concentrado o que o torna mais adequado para materiais com constante dielétrica K mais alta.

Além disso, para materiais apropriados, o sensor não blindado apresenta alcance maior que a versão blindada.

As versões não blindadas são equipadas com pontas laterais de compensação que evitam a detecção intempestiva devido ao acúmulo de pó e/ou umidade. Sob estas condições sensores blindados são uma melhor opção que os blindados.

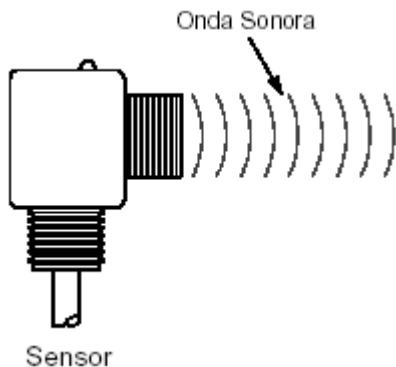
Os sensores não blindados também são mais adequados para a instalação em suportes de plástico para a detecção de líquidos em tanques de forma não invasiva.

O nível de líquido é detectado através da parede do

material plástico que serve de suporte ao sensor.

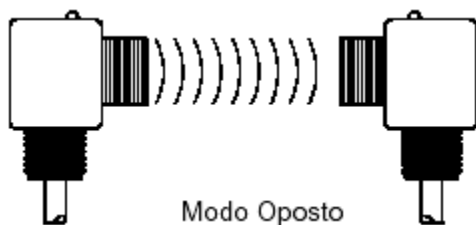
### Sensores Ultrasônicos:

São sensores que trabalham a base de emissão de uma onda sonora inaudível. (200kHz).



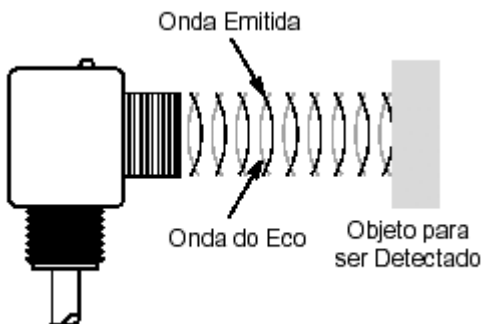
O sensor é composto de um transmissor e um receptor de onda sonora. Ele pode operar de dois modos:

- **Modo oposto;**
- **Modo Difuso.**



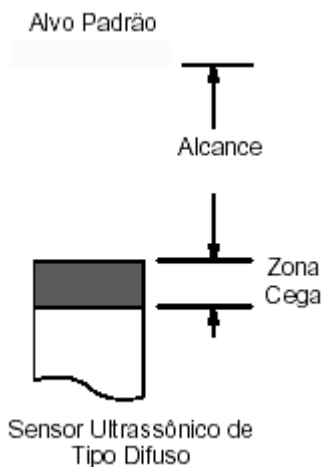
A figura ao lado ilustra o funcionamento do sensor ultrasônico no modo oposto. Ele basicamente é composto por dois sensores sendo um operando como transmissor e outro como receptor.

O conjunto forma uma barreira sonora, como ocorre com a barreira ótica.



A figura ao lado ilustra o funcionamento do sensor ultrasônico no modo difuso. Ele basicamente opera pelo princípio do eco, ou seja, ele emite um sinal ultrasônico e aguarda pelo eco. Quando um objeto entra na zona detectável, ocorre um eco que é detectado pelo sensor.

É um tipo de barreira sonora de um só sensor.



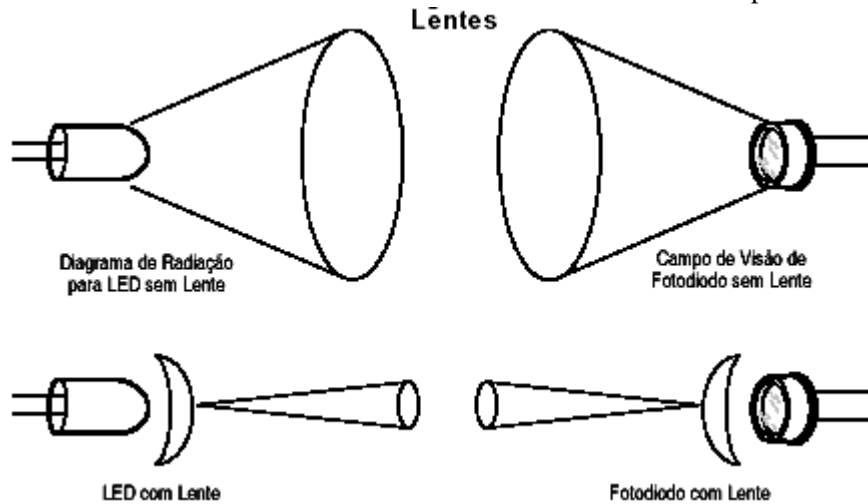
Os sensores ultrasônicos apresentam zonas cegas, onde a detecção é incerta dentro da zona de sensibilidade. No caso do sensor ultrasônico a zona cega está a frente da superfície sensível do sensor.

Materiais flexíveis, como espumas de borrachas ou tecidos, podem ter problemas na detecção porque não são bons refletores de ondas sonoras. Outro problema é a temperatura que deve ser em torno de 100°C para detecção confiável.

Sensores ultrasônicos podem fornecer uma tensão de saída proporcional a distância do alvo, atuando assim como transdutor.

## Sensores Fotoelétricos:

São dispositivos que trabalham sob o princípio de detecção de luz. Normalmente trabalham na região do infravermelho onde os fotodiodos e fototransistores apresentam melhor sensibilidade. Como

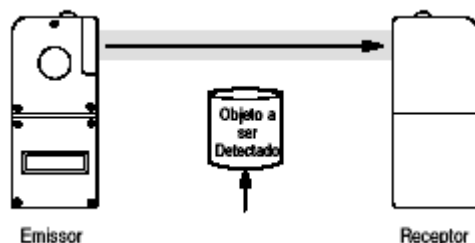


usam-se normalmente led's como fonte de luz, estes têm característica de luz difusa, assim sendo, são necessárias lentes para reduzir o espalhamento do feixe e dessa forma melhorar a sensibilidade do sensor. Usa-se também lentes no fotodiodo. A ilustração ao lado demonstra isto de forma bem clara. Como a quantidade de radiação de um led depende da

corrente, esta deve ser a mais alta possível, entretanto o led se aquece o que limita a corrente máxima permissível. Assim, a solução para se ter altas correntes e baixo aquecimento é usar o led de forma pulsada, que é o que é feito.

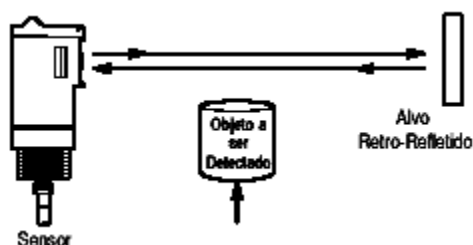
O modo como a detecção é feita define os chamados modos de detecção. São eles:

- **Feixe transmitido**
- **Retro-Refletido**
- **Difuso**



O feixe transmitido é o caso ilustrado pela figura ao lado, onde o transmissor e o receptor são separados. O objeto a ser detectado deve interromper o feixe. O corpo deve ser opaco o suficiente para interromper ou reduzir substancialmente a intensidade do feixe, do contrário a detecção falhará. Além disso a dimensão do corpo deve ser compatível com a largura do feixe de luz. Se o feixe for muito largo, corpos estreitos podem não ser detectados. Há

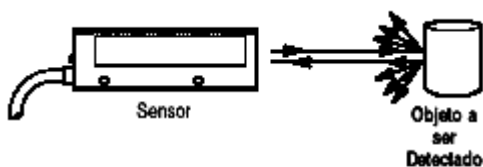
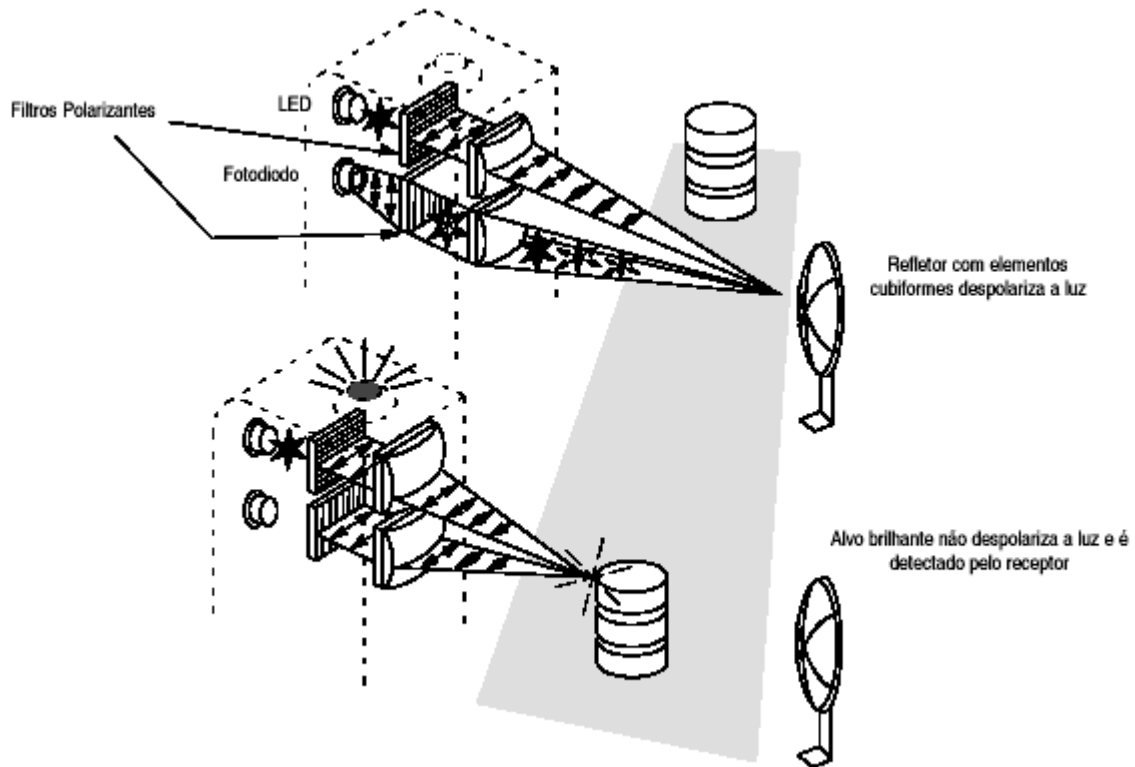
a necessidade nestes casos de se corrigir a largura do feixe com o auxílio de lentes.



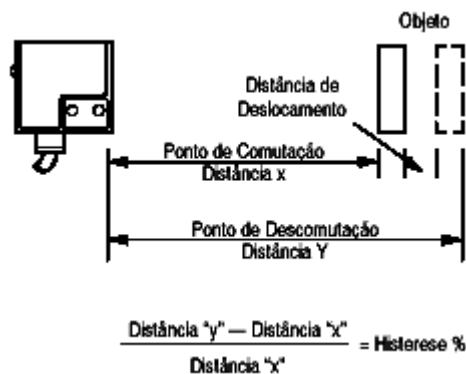
O modo retro-reflexivo está ilustrado ao lado. Ele é mais simples de instalar dado que apenas um sensor é usado. O refletor é composto por uma fita reflexiva ou outro elemento que não uma placa espelhada. A vantagem é que há uma tolerância de até 15° na perpendicularidade o refletor. Via de regra este método não é recomendado em ambientes poluídos. Além disso, como ele trabalha sobre o princípio de reflexão, detecção de corpos reflexivos pode confundir o

sensor. Nestes casos recomenda-se o sensor retro-reflexivo polarizado. O polarizador filtra a luz que é refletida de corpos brilhantes, que é polarizada, e assim a interrupção do feixe é detectada, mesmo havendo a reflexão.

A figura abaixo, ilustra um caso de detecção de modo retro-reflexiva polarizada. Note que a luz emitida é polarizada pelo polarizador e no refletor a luz refletida é despolarizada. Assim a luz despolarizada passa pelo 2º polarizador, que é perpendicular ao primeiro. Quando um corpo reflexivo interrompe o feixe, ele devolve luz com a mesma polarização do 1º polarizador e assim esta acaba ficando no 2º polarizador, interrompendo o feixe.



Um modo de detecção no qual a luz atinge a superfície de um objeto e é difundida da superfície por todos os ângulos e detectada pelo receptor.



No modo de detecção difuso, não há um feixe alinhado refletido como nos casos anteriores. Na verdade há a emissão de um feixe bem aberto, permitindo que a luz seja refletida de vários lugares dentro de uma certa faixa. Há várias variantes deste método, a mais comum é aquele em que a calibração é feita de forma tal que a luz de fundo tenha influência baixa na ausência do corpo a detectar. Quando este aparece, a reflexão deve aumentar e acionar o sensor. É uma técnica bastante difícil de trabalhar devido a variação substancial na refletância dos diversos corpos.

Tal qual outros sensores, o sensor fotoelétrico apresenta o fenômeno de histerese, como ilustra a figura ao lado.

Sensores com transmissor e refletor na mesma peça, apresentam uma zona cega a frente da face sensora.

### 13. Atuadores:

São os dispositivos que efetivamente realizam trabalho, atuando no meio físico. Podem ser contínuos ou discretos dependendo da forma de atuação. Basicamente os principais atuadores em uso na automação são:

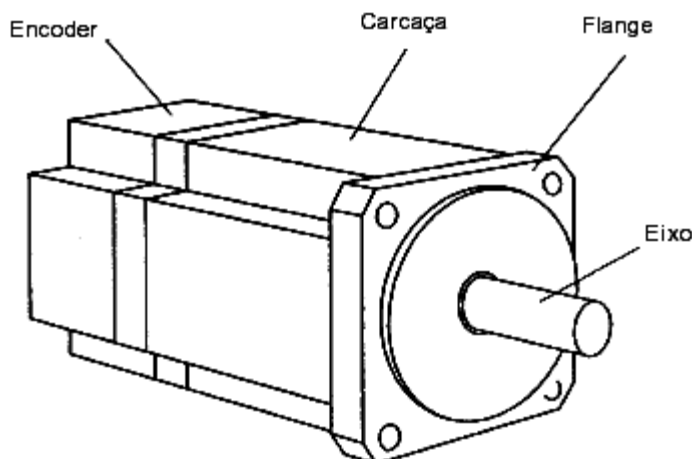
- **Eletroválvulas e Cilindros;**
- **Servomotores;**
- **Motores de Passo;**
- **Motores Lineares;**

#### **Eletroválvulas e Cilindros:**

Eletroválvulas são as válvulas pneumáticas e hidráulicas pilotadas eletricamente. Podem ser discretas como as válvulas direcionais que apenas direcionam o fluxo ou contínuas como as válvulas proporcionais e servoválvulas, que controlam a vazão do fluido de forma proporcional. Não são atuadores de fato, apenas trabalham em conjunto com os cilindros pneumáticos e hidráulicos, sendo estes sim atuadores efetivamente.

Estes materiais não serão detalhados aqui, por haver um curso específico para eles.

#### **Servomotores:**



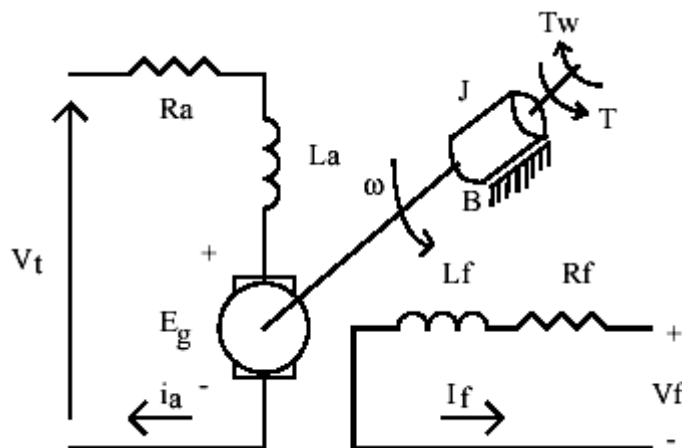
São motores elétricos contínuos com a propriedade adicional de terem sua velocidade controlada por meio da tensão, da corrente e da frequência, dependendo do seu tipo. Basicamente são motores que devem trabalhar sobre a ação de algum mecanismo de servoposicionamento. Em razão disto, possuem sempre um mecanismo de realimentação de sua posição, que pode ser um encoder ou um resolver ou dispositivo Hall. A figura ao lado ilustra o corpo típico do servomotor e um encoder solidamente instalado sobre o eixo do mesmo, formando um só corpo.

Os servomotores podem ser classificados de acordo com a forma de alimentação:

- **Servomotores DC ou CC**
- **Servomotores AC ou CA**

#### **Servomotores CC:**

São basicamente motores de CC, sendo que o estator é do tipo ímã permanente. Na figura abaixo, temos uma máquina de corrente contínua (CC) clássica. Podemos controlar o torque e a velocidade deste motor através da corrente de armadura  $I_a$ .



O servomotor CC é um motor de corrente com elevada dinâmica, ou seja, seu projeto é feito de forma tal que a interação do fluxo proporcione torque relativamente constante ao longo de uma grande faixa de velocidade e rápida resposta. Assim o motor pode ter sua velocidade variada ao longo de uma ampla faixa de valores em necessariamente afetar o torque. Isso é conseguida pelo rotor de imã permanente que mantém o fluxo do rotor constante. Dessa forma a velocidade fica sendo uma função da corrente do motor. O sentido do giro é dado pela polaridade da corrente do motor. Até pouco tempo atrás o servomotor

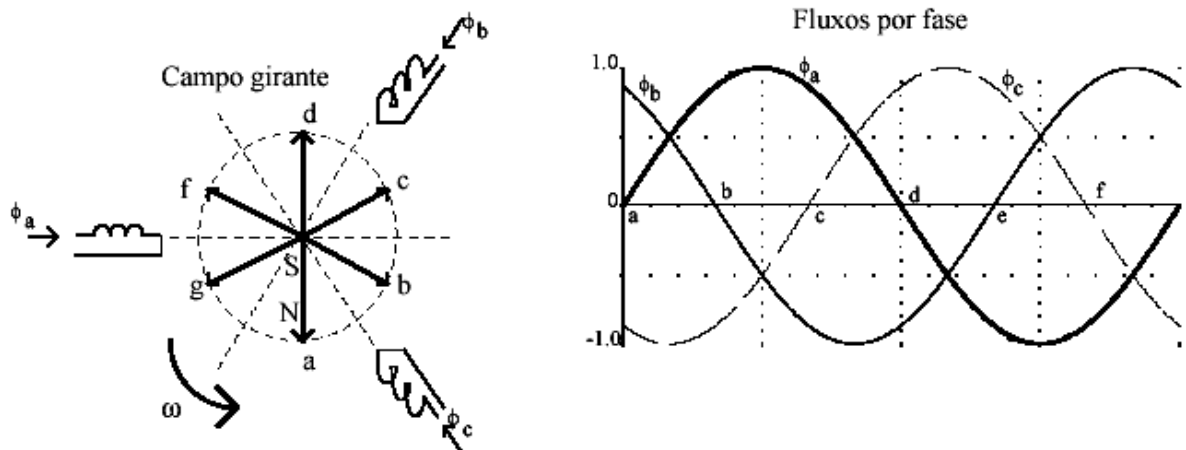
CC era predominante em relação ao servomotor CA em razão do torque e potências maiores oferecido por este tipo. Atualmente esta relação está se modificando.

### Servomotores CA:

São basicamente motores trifásicos síncronos CA, sendo que o rotor é composto por imã permanente feito com elementos do tipo terras raras.

Seu princípio de acionamento é o mesmo de motores trifásicos CA, ou seja, é um inversor de frequência vetorial. O inversor de frequência, no caso aqui é chamado de servoconversor, decompõe a corrente em suas componentes  $I_d$  e  $I_q$  e analisa-as individualmente. Com esta informação o servoconversor consegue controlar o torque e a velocidade do servomotor CA. Tal qual o servomotor CC é possível variar a velocidade em ampla faixa sem grande variação de torque. Embora o servomotor CA seja muito parecido com o motor CA trifásico comum, ele não deve ser alimentado diretamente em virtude do fato de que o projeto dele prevê uma relação de fluxo/frequência bem diferente dos motores CA comuns. Assim sua tensão alternada deve ser gerada por um servoconversor, mesmo se na placa do motor consta a tensão de 220V ou outra tensão de uso industrial.

Abaixo, temos a relação a demonstração dos fluxos magnéticos criados pelas correntes das fases. Observe como o defasamento de  $120^\circ$ , proporciona um campo magnético girante.

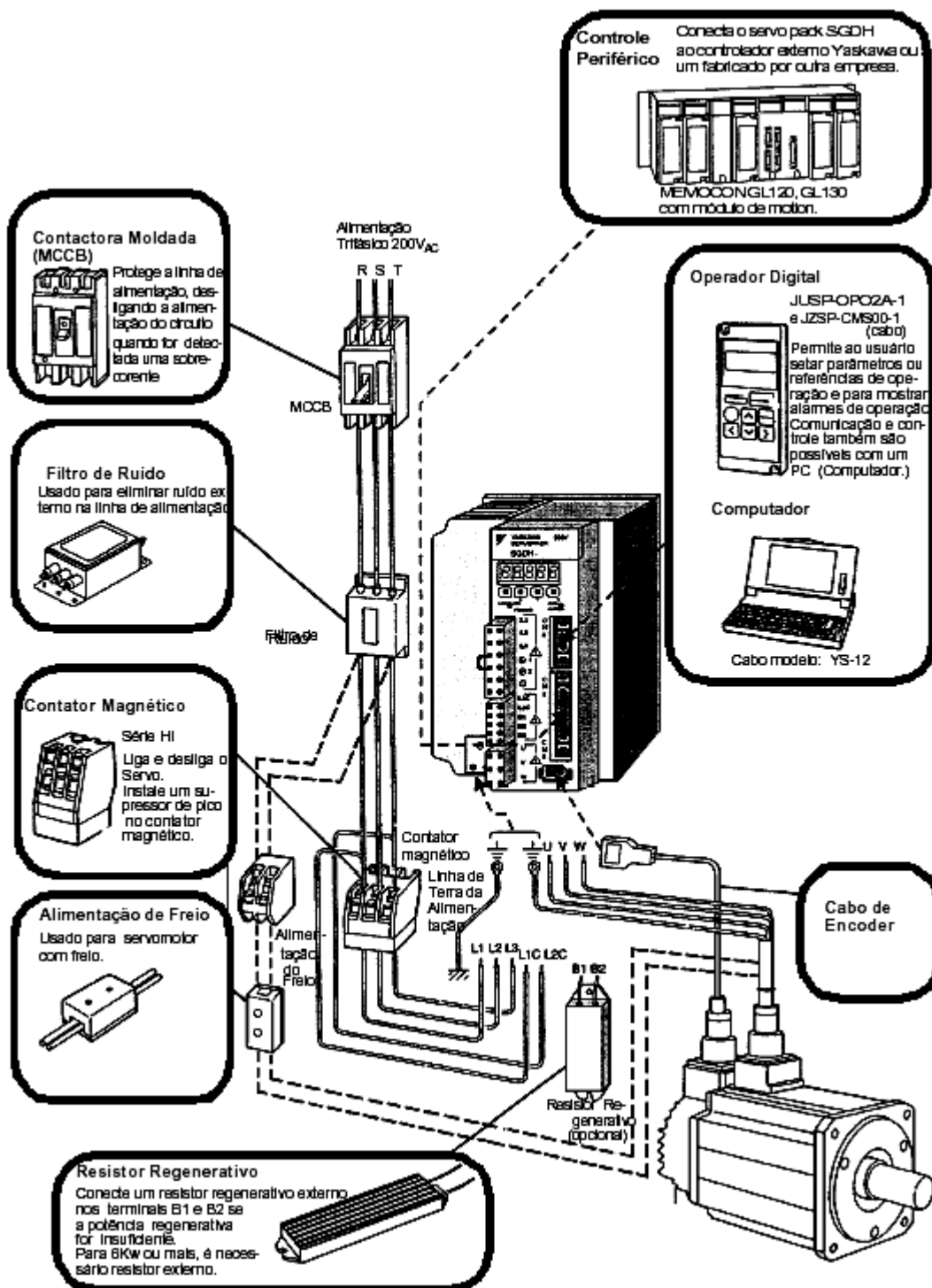


Dentre seus parâmetros mais importantes, o servomotor apresenta o Torque nominal determinado pela potência nominal. E o torque máximo que é cerca de três vezes o torque nominal do

motor. De modo geral, servomotores são preteridos em relação à motores de passo, quando torque e velocidades são importantes.

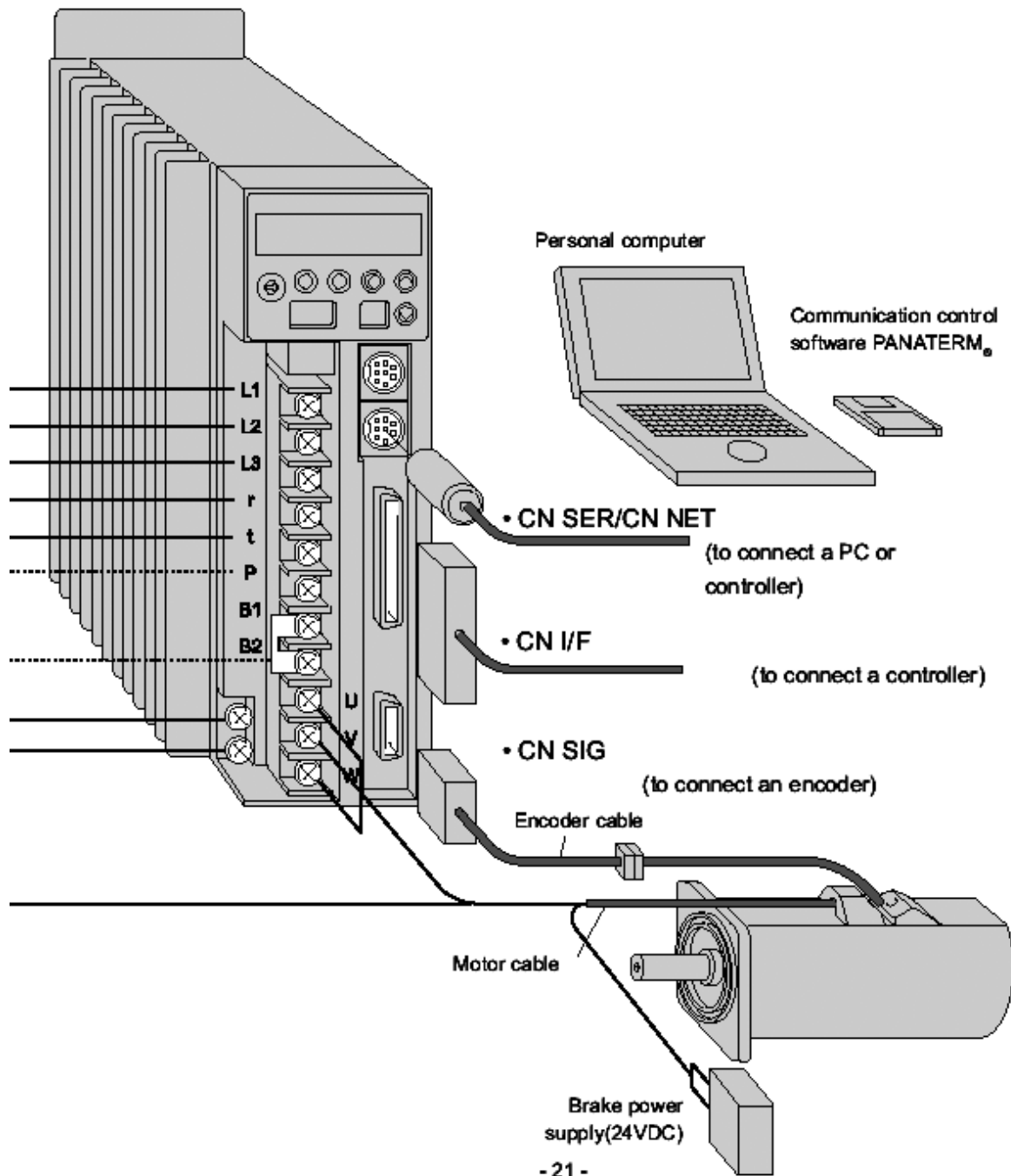
Outra característica muito importante, é que servomotores devem funcionar sempre em malha fechada. Normalmente os servomotores CC usam Encoder para sua realimentação ao passo que servomotores CA usam Resolver. Dependendo da aplicação podem usar também tacogeradores.

Abaixo, temos a ligação típica de um servomotor e seu servocontrolador do fabricante Yaskawa.





Abaixo, temos um outro exemplo de ligação entre o servomotor e o servoconversor de um outro fabricante.



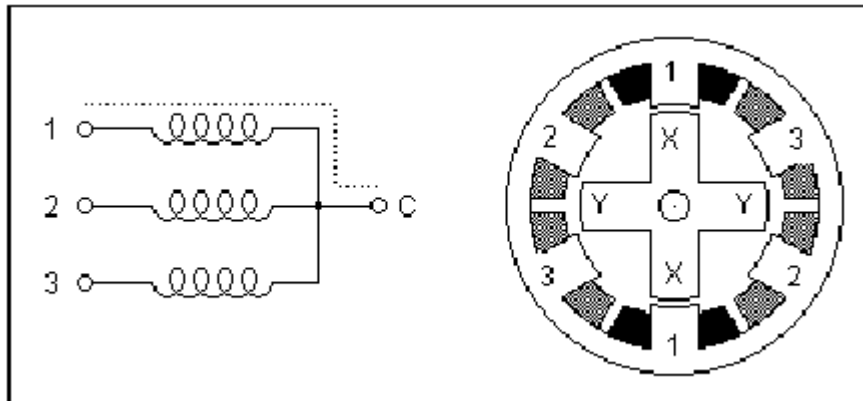
## Motores de Passo

São motores totalmente diferentes dos convencionais, porque seu movimento é discreto ao passo que os demais são movimento contínuo.

A alimentação também é totalmente diferente e ocorre por meio de pulsos que são aplicados as bobinas do estator de forma sequenciada. O sentido da sequencia determina o sentido de rotação.

São motores alimentados por sinais exclusivamente digitais ao passo que os anteriores são alimentados por sinais analógicos.

O rotor de um motor de passo é composto por um ímã permanente que pode ter muitos polos visando aumentar sua resolução.



Seu deslocamento é medido normalmente em graus. O menor deslocamento que um motor de passo pode dar é chamado de passo do motor daí o nome.

Seja um motor como o da ilustração ao lado, composto por três bobinas no estator e um rotor

composto por dois pares de pólos magnéticos em configuração perpendicular como mostrado na figura. Alimentando-se a bobina 1, teremos a formação de pólos magnéticos N e S nesta bobina. Pelo menos dois pólos do rotor, no caso os do ímã X alinhar-se-ão como os pólos desta bobina pelo princípio de repulsão e atração dos ímãs. Na sequencia, se alimentarmos agora a bobina 2 e desligarmos a bobina 1, teremos uma rotação do rotor visando alinhar os pólos do ímã Y com a bobina 2. Seguindo a sequencia, alimentando a bobina 3 e desligando a 2, teremos nova rotação e o alinhamento do ímã X com a bobina 3. E por fim desligando a bobina 3 e ligando a bobina 1, voltamos ao início e tudo se repete.

Se percorrermos a sequencia de forma contrária, ou seja, primeira a bobina 3, depois a 2 e finalmente a 1, teríamos a inversão do sentido de rotação do motor.

O motor acima é um motor do tipo bipolar e de relutância variável (MRV). A classificação dos motores pode ser feita assim:

Com relação ao princípio de funcionamento:

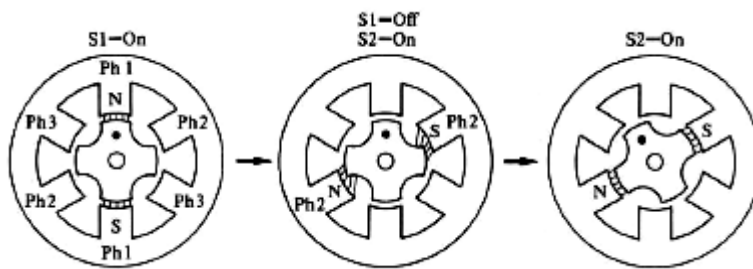
- **Relutância variável;**
- **Ímã permanente;**
- **Motores híbridos;**

Com relação ao enrolamento, podem ser:

- **Unipolares;**
- **Bipolares;**

### Relutância Variável:

Os motores de passo de relutância variável são assim chamados pelo fato de que o alinhamento entre os polos significa em termos de campo magnético uma busca pelo ponto de mínima relutância. Veja a figura abaixo:



Quando o rotor e o estator não estão alinhados a relutância magnética é elevada.

Então o motor trabalha de modo a diminuir a relutância magnética. Podemos ver o que acontece quando desligamos

Ph1 e ligamos Ph2 na figura acima. A relutância do motor vista da fonte aumenta subitamente após a comutação. Como podemos ver na figura, o rotor vai mover-se no sentido contrário dos ponteiros do relógio dum ângulo de passo de 30° de modo a minimizar a relutância. Depois de andar três passos o rotor aparenta voltar à posição inicial.

Para diminuir o ângulo de passo o número de dentes no rotor tem de aumentar.

$$\theta_s = 360^\circ/S$$

Onde:

$\theta_s$  - ângulo de passo

S - número de passos por revolução

O parâmetro S está relacionado com o número de dentes no rotor e com o número de fases.

$$S = m N_r$$

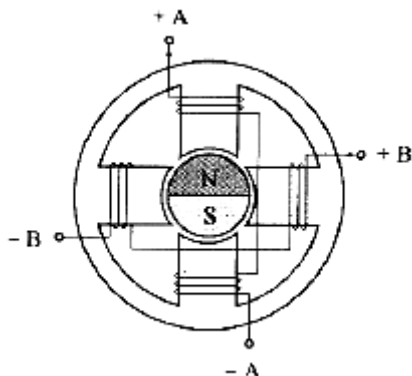
Onde:

m – número de fases

$N_r$  – número de dentes do rotor

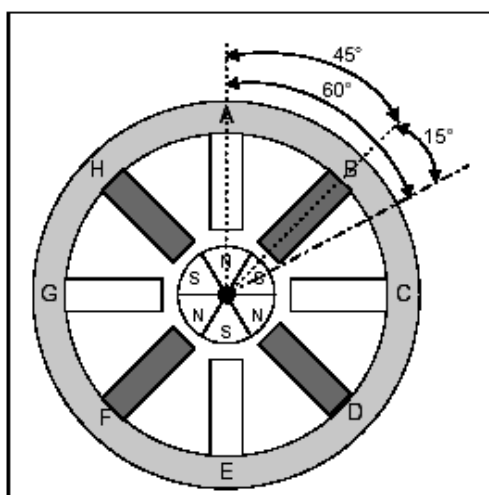
### Ímã permanente ou MIP:

Neste tipo de motor, o rotor é composto por um ímã permanente e o estator tem um conjunto de enrolamentos pelos quais se realiza a alimentação do motor. A alimentação deste tipo de motores pode ser unipolar ou bipolar.



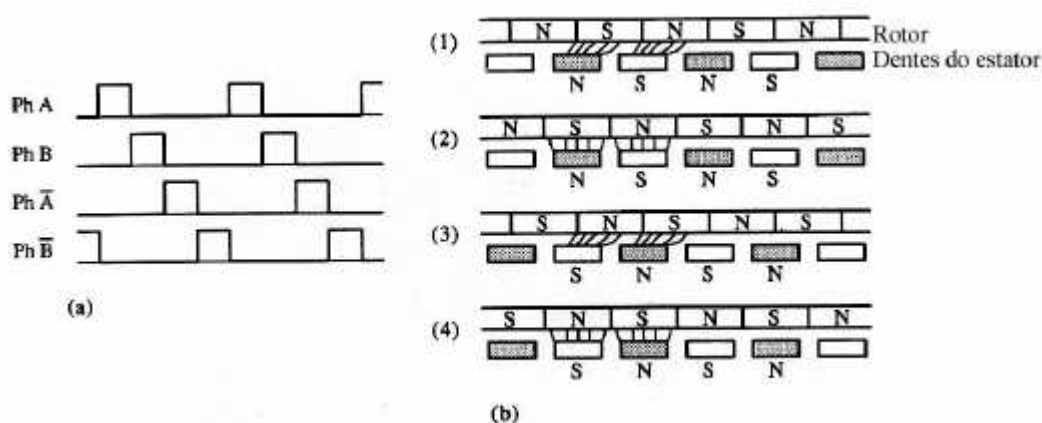
A Figura ao lado mostra, esquematicamente, este tipo de motor com quatro enrolamentos no estator que está dividido em dois andares. Quando a fase A é alimentada o rotor tende a alinhar os seus pólos com os pólos de polaridade oposta do estator. A mudança de excitação da fase A para a fase B, resulta num passo de 90° no sentido contrário dos ponteiros do relógio.

Alimentando agora a fase C, obtém-se um novo passo de 90°, assim vai. Invertendo-se a tensão, inverte-se o sentido do giro. Na ausência de alimentação verifica-se a existência de um pequeno binário (binário remanente) que, tipicamente, atinge 10% do binário máximo.



Ao lado, temos uma figura do motor MIP, com múltiplos pólos no rotor:

Na Figura abaixo, podemos observar um motor onde é constituído por duas metades e com dentes em forma de garras que constituem os pólos. Os anéis de enrolamentos são normalmente bifilares para que, ao comutar a corrente, se produza uma polaridade oposta. A Figura (b) mostra a sequência típica de excitação e como ocorrem os passos. O rotor é colocado na posição (1) e a fase A é excitada para que se produzam pólos magnéticos entre o rotor e o estator. Assim, o rotor desloca-se para a esquerda devido à tensão das linhas magnéticas. Na posição (2) podemos ver o estado de equilíbrio com a fase A excitada. Seguidamente, se comutarmos a corrente para a fase B, o rotor vai rodar mais na mesma direção, porque os dentes do andar B estão desalinhados de um



quarto de dente em relação aos dentes do andar A. A posição (3) mostra o resultado desta excitação. Para avançar o rotor para a esquerda e colocá-lo na posição (4), a fase B é desexcitada e é excitada a fase A . Consequentemente, para o rotor continuar a rodar na mesma direcção, a fase A é desexcitada e é excitada a fase B e assim sucessivamente. Os motores com dentes em forma de garra têm custos de fabrico baixos, embora não possam realizar ângulos de passo muito pequenos.

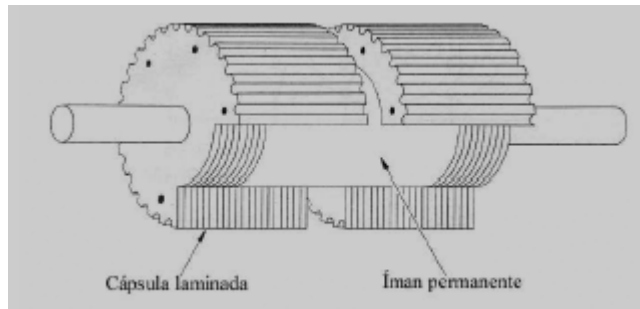
Abaixo, temos uma tabela comparativa dos tipos de motores:

	MRV	MIP
<b>Vantagens</b>	Estrutura que permite pequenos passos	Existência de binário remanente
	Possibilidade de atingir velocidades elevadas	Razão de binário permanente/tamanho elevada
	Bidireccional	Construção mecânica simples (excepto para pequenos passos)
	Força contra-electromotriz inferior à do MIP	Para o mesmo binário requer menos potência que os outros MP
<b>Desvantagens</b>	Construção mais complexa que a dos MIP's	Razão binário/inércia baixa
	Inexistência de binário remanente	Impossibilidade de fazer "roda livre"
	Razão binário/tamanho inferior à dos outros tipos de motores	Variação das características de magnetização do íman
	Más características de amortecimento de oscilações	Existência de uma força contra-electromotriz elevada
		Velocidades máximas limitadas

### Motores Híbridos:

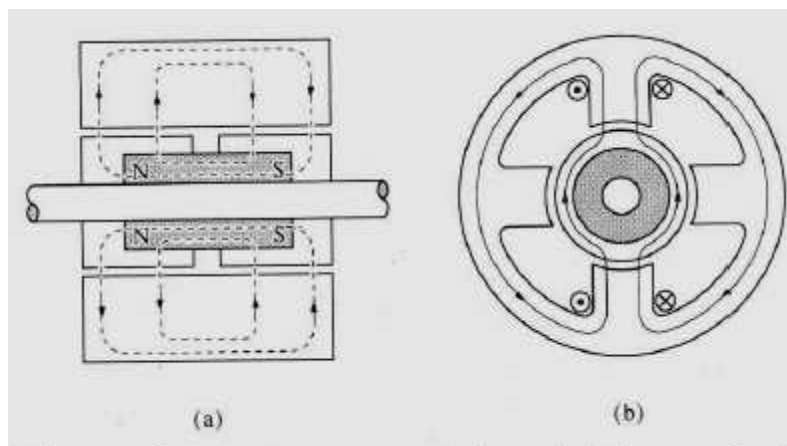
São basicamente um compromisso entre os dois tipos analisados acima. Ele tenta combinar as vantagens de cada um dos tipos acima analisados.

Na figura abaixo um detalhe do rotor do motor híbrido.



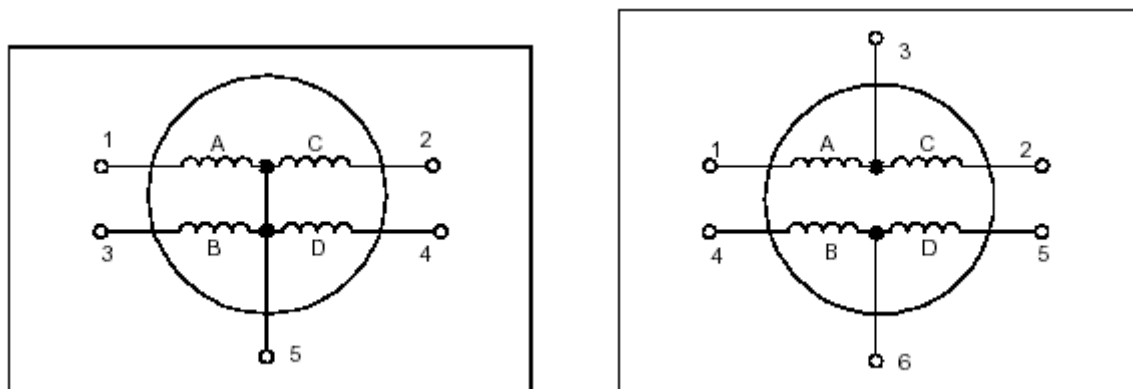
O termo "híbrido" deriva do fato do motor ter uma combinação do princípio de funcionamento do MIP e do MRV, de forma a conseguir-se um pequeno ângulo de passo e um binário elevado num motor relativamente pequeno. A estrutura do estator é igual ou muito parecida com a do MRV como podemos ver na Figura ao lado. A característica importante encontra-se na estrutura do rotor. No núcleo do rotor encontra-se um disco

cilíndrico, ilustrado na Figura 2.10, e está magnetizado ao longo do seu comprimento de forma a produzir um campo unipolar mostrado na figura (a). Cada pólo do ímã está coberto com uma cápsula dentada de ferro macio. As duas cápsulas estão desalinhadas por uma distância de meio dente. Abaixo, vemos um detalhe do fluxo magnético num motor híbrido.



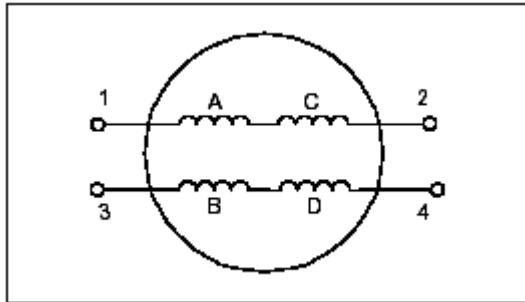
### Motores Unipolares:

As figuras abaixo, ilustra um motor unipolar. Repare que os enrolamentos têm um tap central. Dessa forma estes motores tem de 5 à 6 fios. O enrolamento não é bidirecional e a corrente percorre apenas



metade do enrolamento a cada passo. Isto significa que seu torque tende a ser menor que o do motor bipolar para o mesmo tamanho. Entretanto o circuito de controle tende a ser mais simples.

### Motores bipolares:



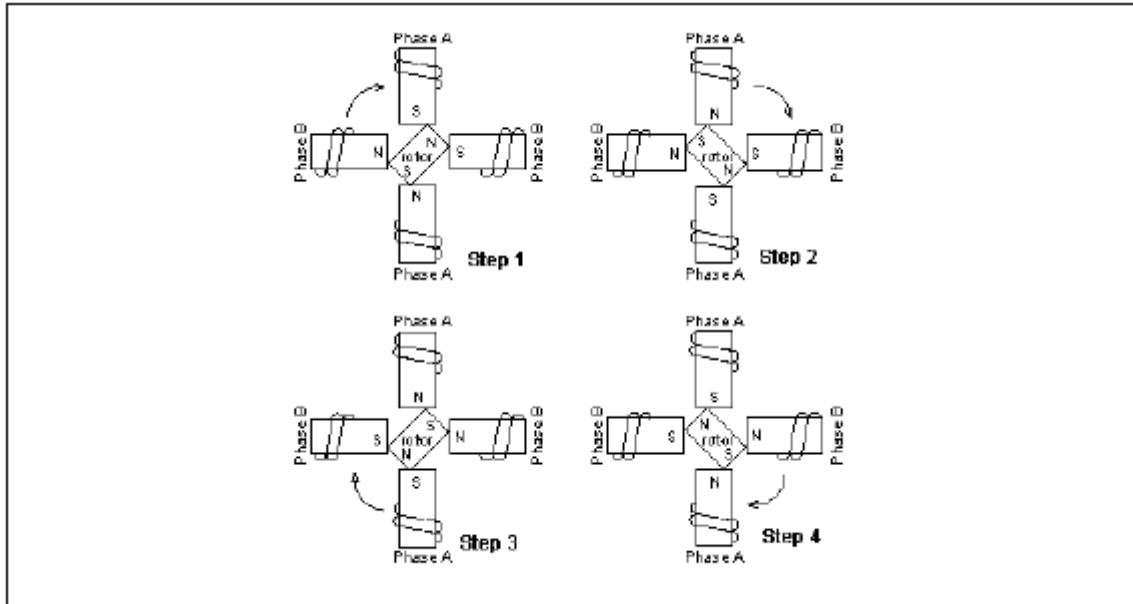
A figura ao lado ilustra um motor bipolar. Repare que a corrente percorre o enrolamento todo, tendo assim mais torque o mesmo motor unipolar. É bidirecional e exige um controle mais complexo. Normalmente é feito por um conjunto de 4 transistores associados em pontes HH.

### Técnicas de Acionamento de Motores de Passo:

Normalmente motores de passo devem ter seus enrolamentos acionados um a um, formando uma sequência chamada de passo total ou completo. Entretanto é possível acionar mais de uma bobina de cada vez de um motor de passo. A vantagem é que esta técnica permite refinar o passo de um determinado motor. Quando a sequência é tal que divide por dois, chamamos de meio passo. Quando divide por mais de dois, chamamos de passo fracionário.

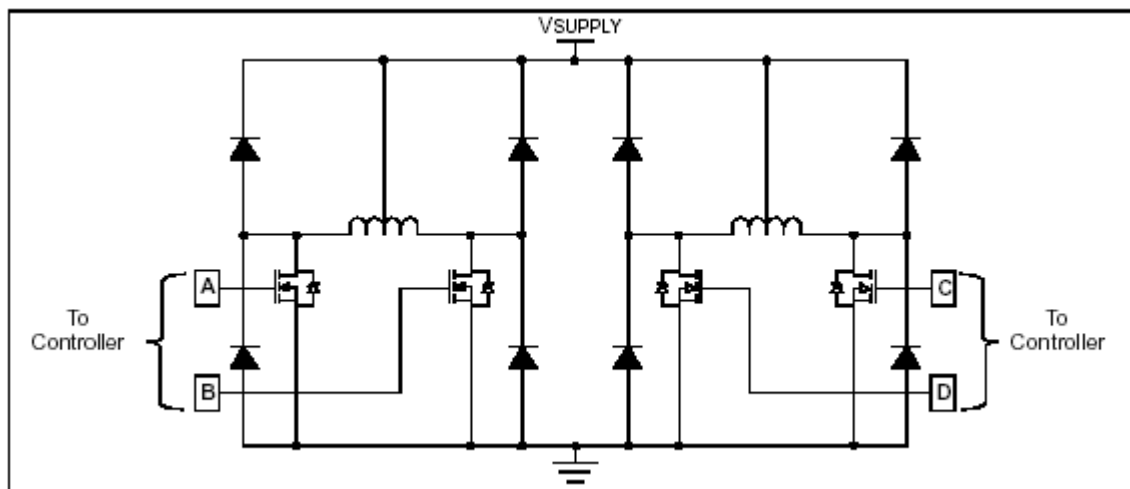
A figura abaixo, ilustra o funcionamento de um motor de passo usando a técnica do meio passo.

Observe que a cada etapa, ocorre um deslocamento de apenas metade do passo esperado, ou seja, para o passo de  $90^\circ$ , temos apenas um deslocamento de  $45^\circ$ , isto é, dividimos o passo em dois menores.

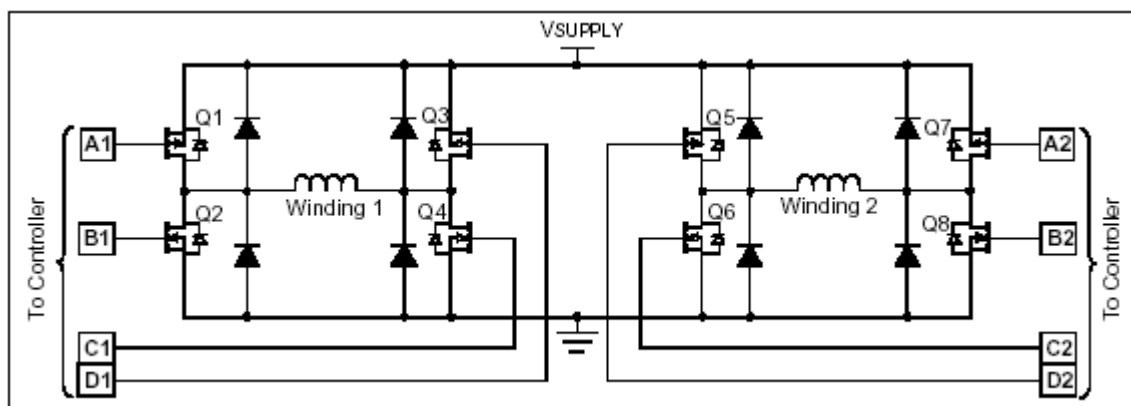


Isto é possível, porque o rotor do motor se alinha sempre com o eixo magnético resultante, e não necessariamente com a bobina. No motor de passo completo, apenas uma bobina é acionada de cada vez, assim o eixo magnético coincide com a posição da bobina. Para obter o meio passo, conforme a figura acima, no passo 1, acionamos apenas a bobina 1 e 2. Assim o motor se alinha com o eixo resultante das duas. Assim basta incluir entre as sequências de passo completo, sequências envolvendo o acionamento de duas ou mais bobinas e teremos passos mais refinados.

Abaixo, temos um exemplo de etapa de potência de um motor unipolar de 6 fios.

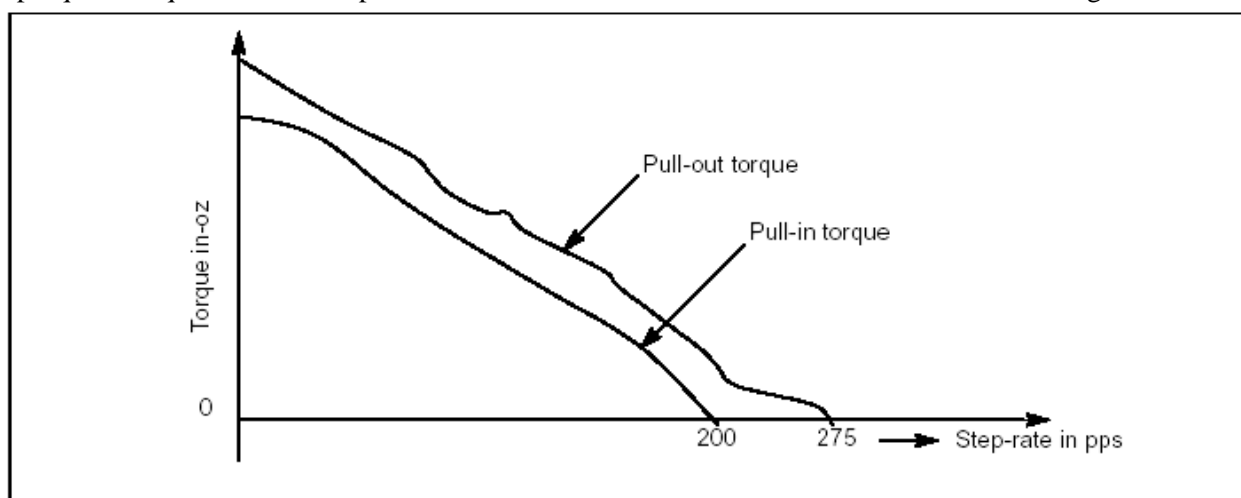


Na figura abaixo, uma etapa de potência de motor de passo bipolar de 4 fios.



### Curva de Torque Velocidade:

O motor de passo é bem diferente do servomotor no que tange a curva torque velocidade. Isto porque o torque do motor de passo decai bastante com o aumento da velocidade como na figura abaixo:



Basicamente três parâmetros são importantes na análise das curvas de Torque –Velocidade:

- **Torque de manutenção:** Torque necessário para girar o rotor enquanto uma bobina está energizada;
- **Pull-in:** Torque contra o qual o motor pode acelerar, sem perda de passo;
- **Pull-Out:** Torque que o motor pode oferecer à carga na velocidade de operação;
- **Torque de Retenção:** Torque requerido para mover o eixo de um motor sem bobina energizada.

#### 14. Acionamentos Elétricos:

Os sistemas de acionamento encontrados na indústria vão desde os acionamentos elétricos simples como chaves de partida à contator como:

- Partida direta;
- Partida estrela-triângulo;
- Partida compensadora

Ou os acionamentos podem ser eletrônicos como:

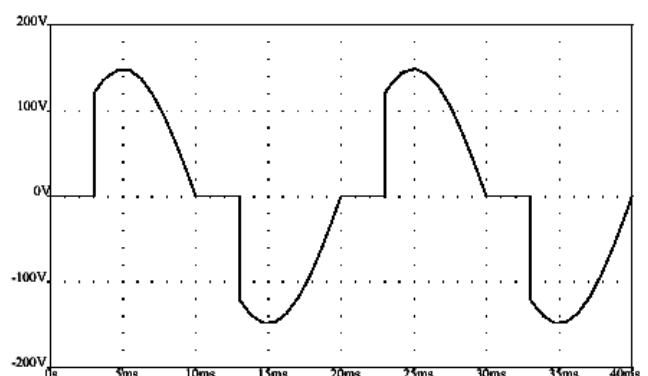
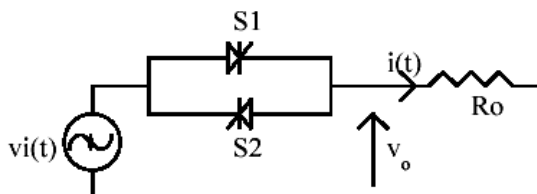
- Soft-Start;
- Inversores de frequência;
- Servoconversores.

##### Soft-Start:

São chaves eletrônicas que atuam na partida dos motores elétricos. Elas promovem uma aceleração linear do motor evitando os picos de partida e a aceleração brusca dos motores. Alguns modelos também atuam na frenagem, não permitindo a parada brusca dos motores.

Por serem eletrônicas, exibem uma série de parâmetros, tais como tempo de aceleração máximo, tensão mínima de partida, além de algumas funções de proteção dos motores.

Seu princípio de atuação está no recorteamento da senóide que alimenta o motor, através do controle do ângulo de disparo do SCR ou TRIAC. A figura abaixo ilustra o efeito do corte da tensão por um SCR, sob uma carga.





Em regime, a atuação da SoftStart limita-se a controlar o FP do motor, se ela dispuser desta funcionalidade.

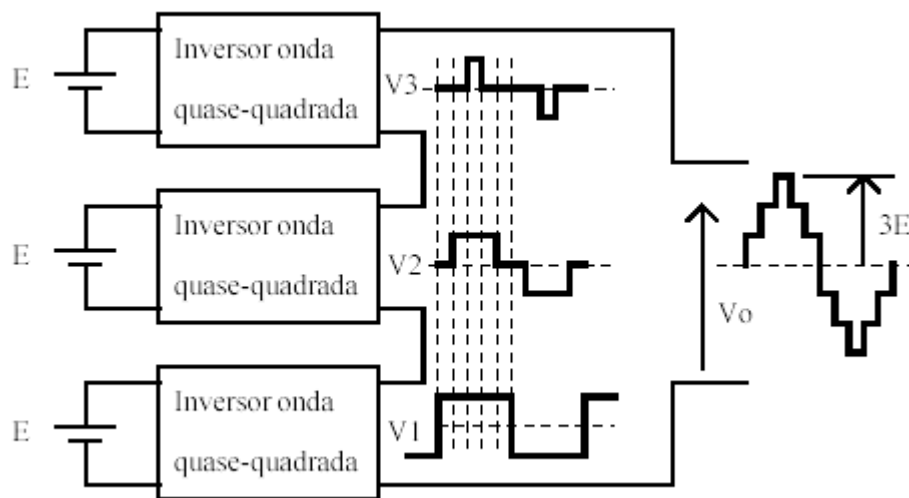
Para correta especificação, necessita-se conhecer o tipo de curva de carga que se pretende acelerar ou frenar, ou seja, uma carga de conjugado constante, como guindastes, ou conjugado linear como esteiras ou ainda conjugado quadrático como bombas e ventiladores e outras possibilidades.

### Inversores de frequência:

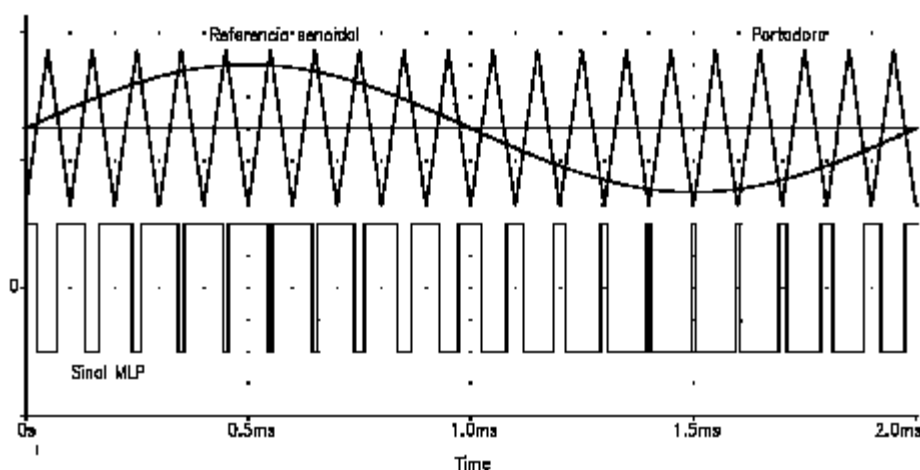
São mais sofisticados que os anteriores. O inversor pode atuar tanto na partida quanto em regime.

Pode variar a velocidade do motor de uma ampla gama de valores, sendo tudo isso parametrizável.

Seu princípio de funcionamento está no fato de que a velocidade síncrona do motor é função da frequência de alimentação. Logo, o inversor de frequência deve controlar a frequência do sinal que alimenta o motor. Para fazer ele retifica a corrente alternada da rede e reconstrói o sinal alternado através de uma técnica chamada de modulação quadrada multinível. A figura abaixo ilustra isto.



Esta técnica produz uma onda quadrada muito distorcida uma outra técnica mais avançada é o PWM, ou modulação por largura de pulso. O resultado é como o da figura abaixo:



Esta técnica gera sinais muito menos distorcidos que a forma anterior por isso é a técnica preterida para acionamento de motores.

Com relação a forma de controle do motor, as técnicas dividem-se em:

- Controle Escalar;
- Controle Vetorial.

### Controle Escalar:

É o método mais simples, onde a frequência e a tensão são ajustadas de forma a manter a relação V/F constante, ou seja, fluxo aproximadamente constante para manter o torque constante. É um tipo de controle em malha aberta. O seu sucesso depende do tipo de carga que o motor aciona, principalmente da curva de conjugado de carga(constante, linear, quadrático, etc..).

É o tipo de acionamento usado onde não há fortes acelerações e desacelerações envolvidas, ou seja não é controle para servomotores.

### Controle Vetorial:

É um tipo de controle bem mais caro e complexo. Ele decompõe a corrente em suas componentes  $I_d$  e  $I_q$  (Eixo direto e Quadratura). Dessa forma o motor AC passa a ser visto como um motor de CC e o controle de torque e velocidade pode ser feito de forma mais precisa. Para o usuário, esta operação é totalmente transparente, mas os benefícios são claros como estabilidade no controle, capacidade de enfrentar variações bruscas de velocidade e torque entre outros.

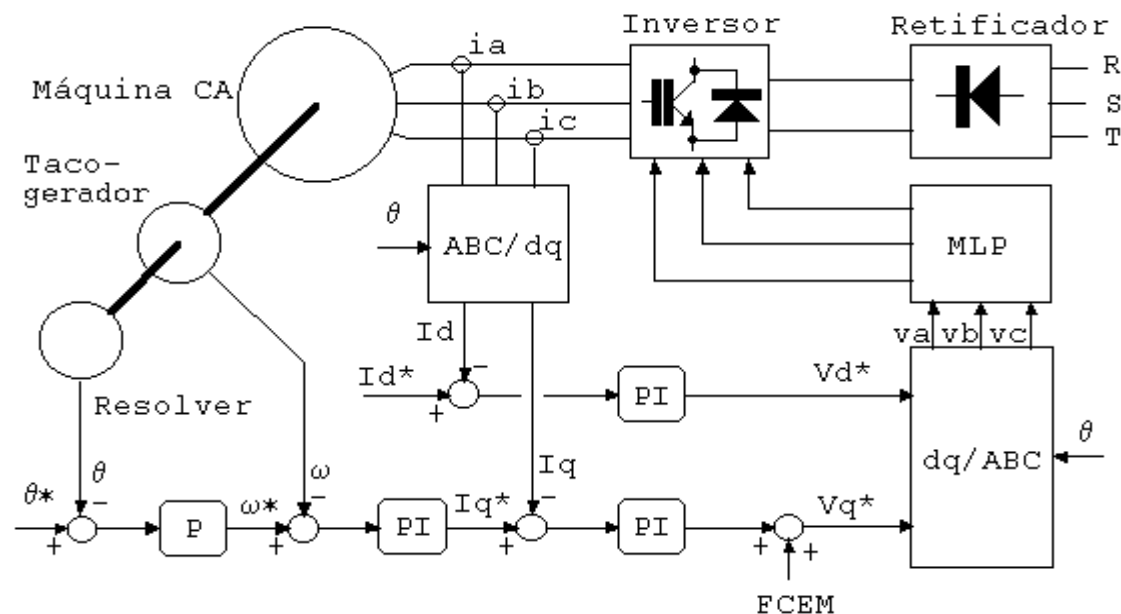
Normalmente são do tipo realimentado, necessitando assim de um encoder ou resolver e as vezes, de um tacogerador para implementar o controle, embora já existam versões de controle vetorial sem realimentação, mas com performance menor.

Com estas sofisticções é razoável que o custo seja bem maior, entretanto, vem se reduzindo ao longo dos anos. A tendência é o crescimento cada vez maior do controle vetorial.

### Servoconversores:

São inversores de frequência vetoriais otimizados para servomotores CA.

A figura abaixo ilustra o funcionamento de uma máquina CA e um servoconversor.



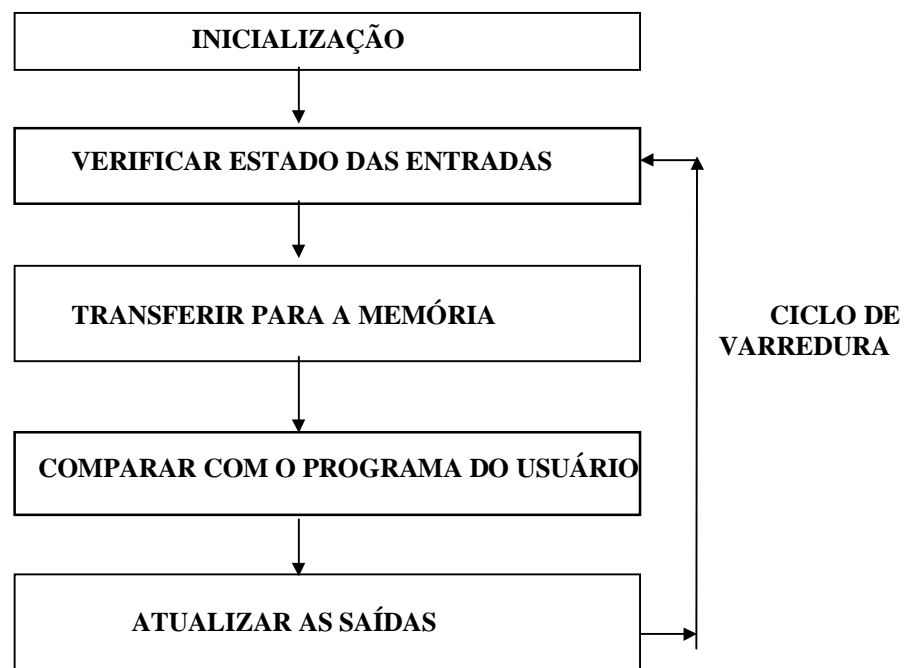
Perceba que este servoconversor possui uma realimentação de velocidade, proporcionada pelo sinal do tacogerador, além do sinal de posição do Resolver.

**15. Controlador Lógico Programável (CLP):**

São dispositivos de controle programável que permitem a realizam de atividades de controle sequencial com muito mais flexibilidade que os sistemas convencionais. Nos primórdios eles basicamente eles substituíam a chamada lógica de contadores ou relés. Hoje em dia, assume inclusive as funções de controle discreto, englobando blocos funcionais como o bloco PID.

***Vantagens do uso de controladores lógicos programáveis***

- Ocupam menor espaço;
- Requerem menor potência elétrica;
- Podem ser reutilizados;
- São programáveis, permitindo alterar os parâmetros de controle;
- Apresentam maior confiabilidade;
- Manutenção mais fácil e rápida;
- Oferecem maior flexibilidade;
- Apresentam interface de comunicação com outros CLPs e computadores de controle;
- Permitem maior rapidez na elaboração do projeto do sistema.

***Princípio de funcionamento – Diagrama em blocos***

**INICIALIZAÇÃO**

No momento em que é ligado o CLP executa uma série de operações pré - programadas, gravadas em seu Programa Monitor :

- Verifica o funcionamento eletrônico da C.P.U. , memórias e circuitos auxiliares;
- Verifica a configuração interna e compara com os circuitos instalados;
- Verifica o estado das chaves principais ( RUN / STOP , PROG, etc. );
- Desativa todas as saídas;
- Verifica a existência de um programa de usuário;
- Emite um aviso de erro caso algum dos itens acima falhe.

**VERIFICAR ESTADO DAS ENTRADAS**

O CLP lê o estados de cada uma das entradas, verificando se alguma foi acionada. O processo de leitura recebe o nome de Ciclo de Varredura ( Scan ) e normalmente é de alguns micro - segundos ( scan time ).

**TRANSFERIR PARA A MEMÓRIA**

Após o Ciclo de Varredura, o CLP armazena os resultados obtidos em uma região de memória chamada de Memória Imagem das Entradas e Saídas. Ela recebe este nome por ser um espelho do estado das entradas e saídas. Esta memória será consultada pelo CLP no decorrer do processamento do programa do usuário.

**COMPARAR COM O PROGRAMA DO USUÁRIO**

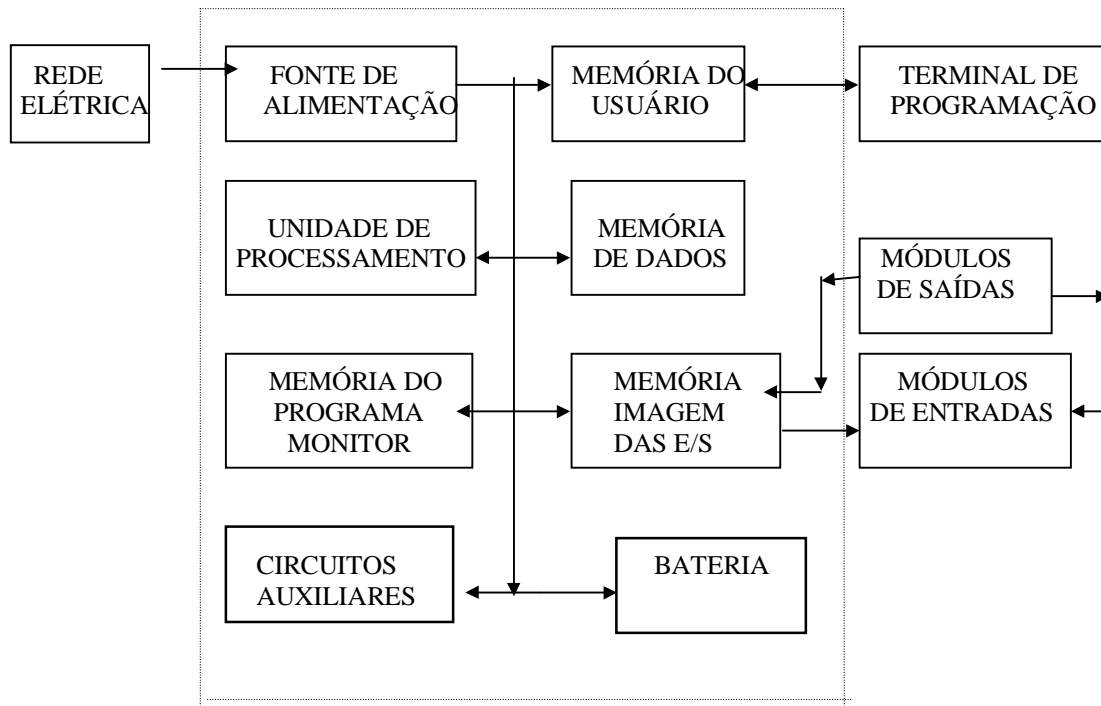
O CLP ao executar o programa do usuário , após consultar a Memória Imagem das Entradas , atualiza o estado da Memória Imagem das Saídas, de acordo com as instruções definidas pelo usuário em seu programa.

**ATUALIZAR O ESTADO DAS SAÍDAS**

O CLP escreve o valor contido na Memória das Saídas , atualizando as interfaces ou módulos de saída. Inicia - se então, um novo ciclo de varredura.

### Estrutura Interna do CLP

O C.L.P. é um sistema microprocessado , ou seja, constituí - se de um microprocessador ( ou microcontrolador ), um Programa Monitor , uma Memória de Programa , uma Memória de Dados, uma ou mais Interfaces de Entrada, uma ou mais Interfaces de Saída e Circuitos Auxiliares.



#### FONTE DE ALIMENTAÇÃO :

A Fonte de Alimentação tem normalmente as seguintes funções básicas :

- Converter a tensão da rede elétrica ( 110 ou 220 VCA ) para a tensão de alimentação dos circuitos eletrônicos , ( + 5VCC para o microprocessador , memórias e circuitos auxiliares e +/- 12 VCC para a comunicação com o programador ou computador );
- Manter a carga da bateria, nos sistemas que utilizam relógio em tempo real e Memória do tipo R.A.M.;
- Fornecer tensão para alimentação das entradas e saídas ( 12 ou 24 VCC ).

#### UNIDADE DE PROCESSAMENTO :

Também chamada de C.P.U. é responsável pela funcionamento lógico de todos os circuitos. Nos CLPs modulares a CPU está em uma placa ( ou módulo ) separada das demais, podendo - se achar combinações de CPU e Fonte de Alimentação. Nos CLPs de menor porte a CPU e os demais circuitos estão todos em único módulo. As características mais comuns são :

- Microprocessadores ou Microcontroladores de 8 ou 16 bits ( INTEL 80xx, MOTOROLA 68xx, ZILOG Z80xx, PIC 16xx );
- Endereçamento de memória de até 1 Mega Byte;
- Velocidades de CLOCK variando de 4 a 30 MHZ;
- Manipulação de dados decimais, octais e hexadecimais.

**BATERIA :**

As baterias são usadas nos CLPs para manter o circuito do Relógio em Tempo Real, reter parâmetros ou programas ( em memórias do tipo RAM ), mesmo em caso de corte de energia , guardar configurações de equipamentos etc. Normalmente são utilizadas baterias recarregáveis do tipo Ni - Ca ou Li. Neste casos , incorporam se circuitos carregadores.

**MEMÓRIA DO PROGRAMA MONITOR :**

O Programa Monitor é o responsável pelo funcionamento geral do CLP. Ele é o responsável pelo gerenciamento de todas as atividades do CLP. Não pode ser alterado pelo usuário e fica armazenado em memórias do tipo PROM , EPROM ou EEPROM . Ele funciona de maneira similar ao Sistema Operacional dos microcomputadores. É o Programa Monitor que permite a transferência de programas entre um microcomputador ou Terminal de Programação e o CLP, gerenciar o estado da bateria do sistema, controlar os diversos opcionais etc.

**MEMÓRIA DO USUÁRIO :**

É onde se armazena o programa da aplicação desenvolvido pelo usuário. Pode ser alterada pelo usuário, já que uma das vantagens do uso de CLPs é a flexibilidade de programação. Inicialmente era constituída de memórias do tipo EPROM , sendo hoje utilizadas memórias do tipo RAM ( cujo programa é mantido pelo uso de baterias ) , EEPROM e FLASH-EPROM , sendo também comum o uso de cartuchos de memória, que permite a troca do programa com a troca do cartucho de memória. A capacidade desta memória varia bastante de acordo com o marca/modelo do CLP, sendo normalmente dimensionadas em Passos de Programa.

**MEMÓRIA DE DADOS :**

É a região de memória destinada a armazenar os dados do programa do usuário. Estes dados são valores de temporizadores, valores de contadores, códigos de erro, senhas de acesso, etc. São normalmente partes da memória RAM do CLP. São valores armazenados que serão consultados e ou alterados durante a execução do programa do usuário. Em alguns CLPs , utiliza - se a bateria para reter os valores desta memória no caso de uma queda de energia.

**MEMÓRIA IMAGEM DAS ENTRADAS / SAÍDAS :**

Sempre que a CPU executa um ciclo de leitura das entradas ou executa uma modificação nas saídas, ela armazena o estados da cada uma das entradas ou saídas em uma região de memória denominada Memória Imagem das Entradas / Saídas. Essa região de memória funciona como uma espécie de “ tabela ” onde a CPU irá obter informações das entradas ou saídas para tomar as decisões durante o processamento do programa do usuário.

**CIRCUITOS AUXILIARES :**

São circuitos responsáveis para atuar em casos de falha do CLP. Alguns deles são :

- **POWER ON RESET** : Quando se energiza um equipamento eletrônico digital, não é possível prever o estado lógico dos circuitos internos. Para que não ocorra um acionamento indevido de uma saída , que pode causar um acidente , existe um circuito encarregado de desligar as saídas no instante em que se energiza o equipamento. Assim que o microprocessador assume o controle do equipamento esse circuito é desabilitado.

- **POWER - DOWN** : O caso inverso ocorre quando um equipamento é subitamente desenergizado . O conteúdo das memórias pode ser perdido. Existe um circuito responsável por monitorar a tensão de alimentação, e em caso do valor desta cair abaixo de um limite pré - determinado, o circuito é acionado interrompendo o processamento para avisar o microprocessador e armazenar o conteúdo das memórias em tempo hábil.

- **WATCH - DOG - TIMER** : Para garantir no caso de falha do microprocessador , o programa não entre em “ loop” , o que seria um desastre, existe um circuito denominado “ Cão de Guarda “ , que deve ser acionado em intervalos de tempo pré - determinados . Caso não seja acionado , ele assume o controle do circuito sinalizando um falha geral.

### MÓDULOS OU INTERFACES DE ENTRADA :

São circuitos utilizados para adequar eletricamente os sinais de entrada para que possa ser processado pela CPU ( ou microprocessador ) do CLP . Temos dois tipos básicos de entrada : as digitais e as analógicas.

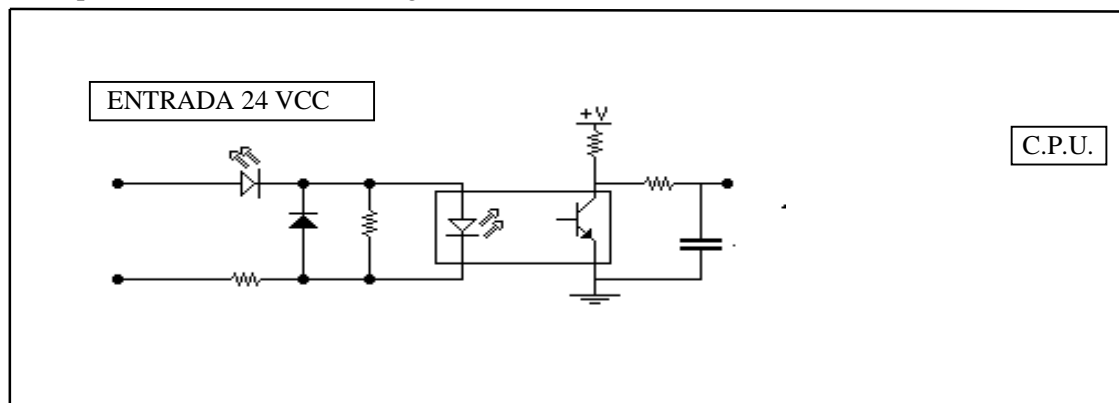
**ENTRADAS DIGITAIS** : São aquelas que possuem apenas dois estados possíveis, ligado ou desligado , e alguns dos exemplos de dispositivos que podem ser ligados a elas são :

- Botões;
- Chaves ( ou micro ) fim de curso;
- Sensores de proximidade indutivos ou capacitivos;
- Chaves comutadoras;
- Termostatos; Pressostatos; Controle de nível ( bóia );
- Etc.

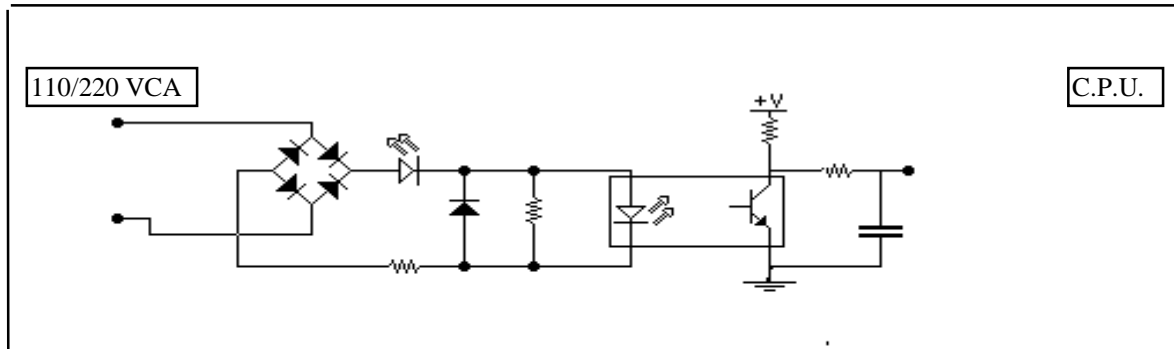
As entradas digitais podem ser construídas para operarem em corrente contínua ( 24 VCC ) ou em corrente alternada ( 110 ou 220 VCA ). Podem ser também do tipo N ( NPN ) ou do tipo P ( PNP ). No caso do tipo N , é necessário fornecer o potencial negativo ( terra ou neutro ) da fonte de alimentação ao borne de entrada para que a mesma seja ativada. No caso do tipo P é necessário fornecer o potencial positivo ( fase ) ao borne de entrada. Em qualquer dos tipos é de praxe existir uma isolação galvânica entre o circuito de entrada e a CPU. Esta isolação é feita normalmente através de optoacopladores.

As entradas de 24 VCC são utilizadas quando a distância entre os dispositivos de entrada e o CLP não excedam 50 m. Caso contrário , o nível de ruído pode provocar disparos acidentais.

Exemplo de circuito de entrada digital 24 VCC :



Exemplo de circuito de entrada digital 110 / 220 VCA :



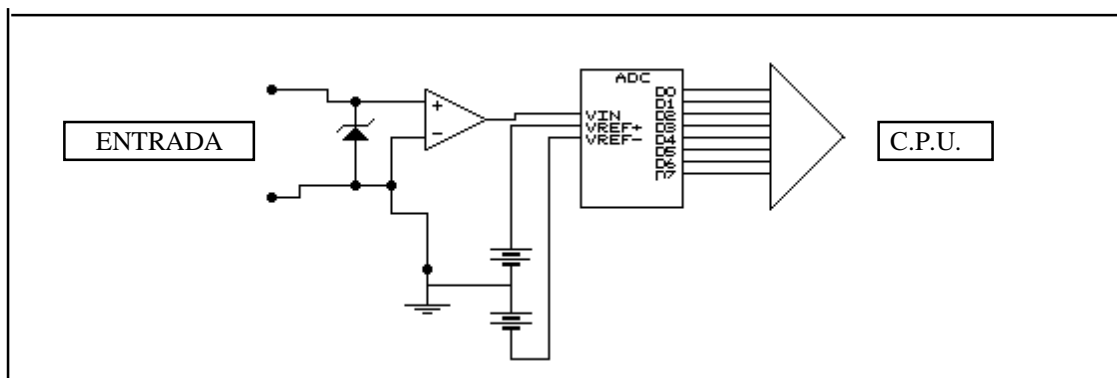
### ENTRADAS ANALÓGICAS :

As Interfaces de Entrada Analógica , permitem que o CLP possa manipular grandezas analógicas, enviadas normalmente por sensores eletrônicos. As grandezas analógicas elétricas tratadas por estes módulos são normalmente tensão e corrente. No caso de tensão as faixas de utilização são : 0 á 10 VCC, 0 á 5 VCC, 1 á 5 VCC, -5 á +5 VCC, -10 á +10 VCC ( no caso as interfaces que permitem entradas positivas e negativas são chamadas de Entradas Diferenciais ), e no caso de corrente, as faixas utilizadas são : 0 á 20 mA , 4 á 20 mA.

Os principais dispositivos utilizados com as entradas analógicas são :

- Sensores de pressão manométrica;
- Sensores de pressão mecânica ( strain gauges - utilizados em células de carga );
- Taco - geradores para medição rotação de eixos;
- Transmissores de temperatura; Transmissores de umidade relativa; Etc.

Uma informação importante a respeito das entradas analógicas é a sua resolução. Esta é normalmente medida em Bits. Uma entrada analógica com um maior número de bits permite uma melhor representação da grandeza analógica. Por exemplo : Uma placa de entrada analógica de 0 á 10 VCC com uma resolução de 8 bits permite uma sensibilidade de 39,2 mV , enquanto que a mesma faixa em uma entrada de 12 bits permite uma sensibilidade de 2,4 mV e uma de 16 bits permite uma sensibilidade de 0,2 mV. Exemplo de um circuito de entrada analógico :





### MÓDULOS ESPECIAIS DE ENTRADA :

Existem módulos especiais de entrada com funções bastante especializadas. Alguns exemplos são :

- Módulos Contadores de Fase Única;
- Módulos Contadores de Dupla Fase;
- Módulos para Encoder Incremental;
- Módulos para Encoder Absoluto;
- Módulos para Termopares ( Tipo J, K, L , S, etc );
- Módulos para Termoresistências ( PT-100, Ni-100, Cu-25 ,etc);
- Módulos para Sensores de Ponte Balanceada do tipo Strain - Gauges;
- Módulos para leitura de grandezas elétricas ( KW , KWh , KQ, KQh, cos Fi , I , V , etc).

### MÓDULOS OU INTERFACES DE SAÍDA :

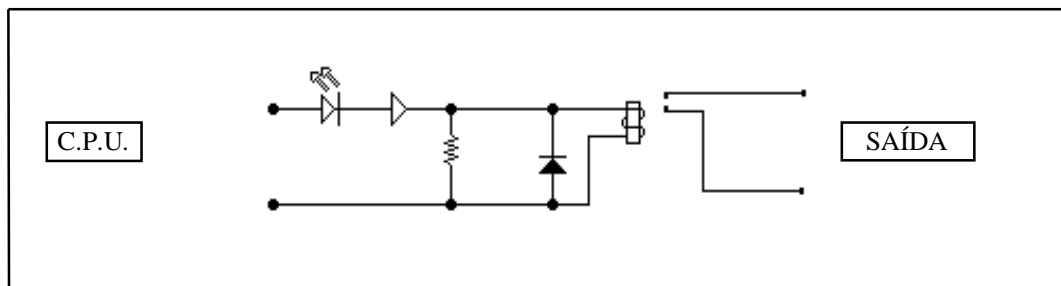
Os Módulos ou Interfaces de Saída adequam eletricamente os sinais vindos do microprocessador para que possamos atuar nos circuitos controlados . Existem dois tipos básicos de interfaces de saída : as digitais e as analógicas .

**SAÍDAS DIGITAIS :** As saídas digitais admitem apenas dois estados : ligado e desligado. Podemos com elas controlar dispositivos do tipo :

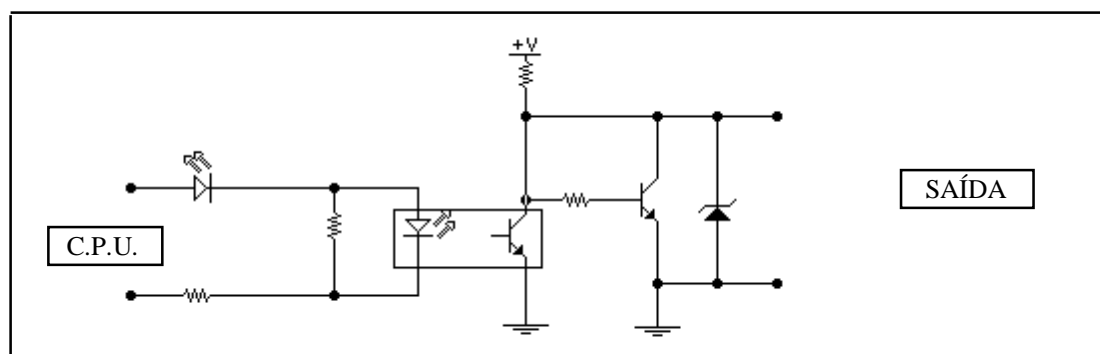
- Reles ;
- Contatores ;
- Reles de estado-sólido
- Solenóides;
- Válvulas ;
- Inversores de frequência;
- Etc.

As saídas digitais podem ser construídas de três formas básicas : Saída digital à Relê , Saída digital 24 VCC e Saída digital à Triac. Nos três casos, também é de praxe , prover o circuito de um isolamento galvânico, normalmente opto - acoplado.

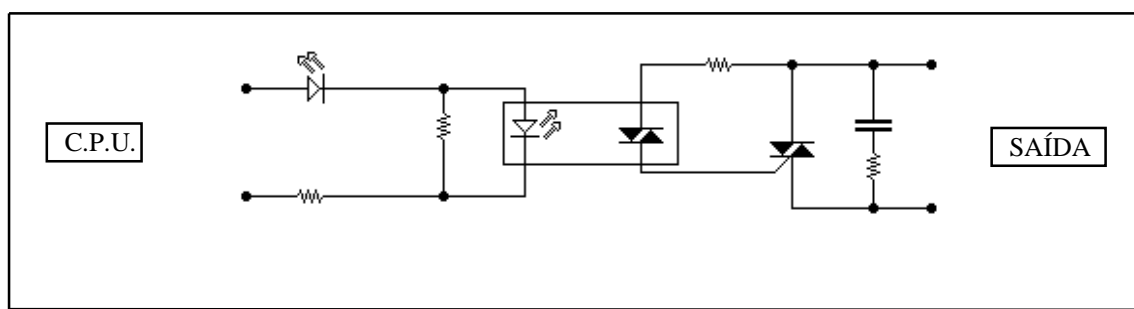
Exemplo de saída digital à relê :



Exemplo de saída digital à transistor :



Exemplo de saída digital à Triac :

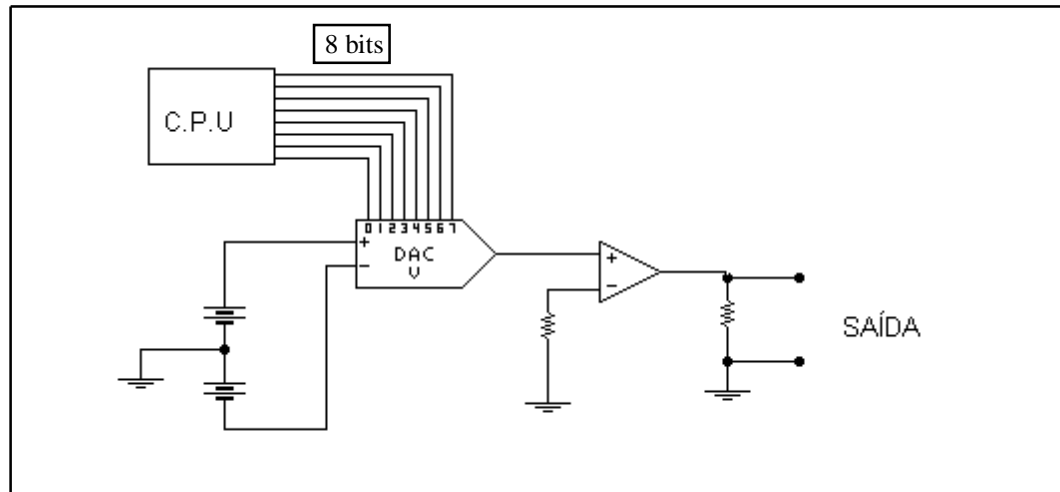


### SAÍDAS ANALÓGICAS :

Os módulos ou interfaces de saída analógica converte valores numéricos, em sinais de saída em tensão ou corrente. No caso de tensão normalmente 0 à 10 VCC ou 0 à 5 VCC, e no caso de corrente de 0 à 20 mA ou 4 à 20 mA. Estes sinais são utilizados para controlar dispositivos atuadores do tipo :

- Válvulas proporcionais;
- Motores C.C.;
- Servo - Motores C.C.;
- Inversores de frequência;
- Posicionadores rotativos;
- Etc.

Exemplo de circuito de saída analógico :



Existem também módulos de saída especiais. Alguns exemplos são :

- Módulos P.W.M. para controle de motores C.C.;
- Módulos para controle de Servomotores;
- Módulos para controle de Motores de Passo ( Step Motor );
- Módulos para I.H.M. ( Interface Homem Máquina );
- Etc.

### ***Capacidade de um CLP***

Podemos ressaltar que, com a popularização dos micro - controladores e a redução dos custos de desenvolvimento e produção houve uma avalanche no mercado de tipos e modelos de C.L.P.s , os quais podemos dividir em :

#### **Nano e Micro - C.L.P.s :**

São C.L.P.s de pouca capacidade de E/S ( máximo 16 Entradas e 16 Saídas ), normalmente só digitais, composto de um só módulo ( ou placa ) , baixo custo e reduzida capacidade de memória (máximo 512 passos).

#### **C.L.P. s de Médio Porte :**

São C.L.P.s com uma capacidade de Entrada e Saída de até 256 pontos, digitais e analógicas , podendo ser formado por um módulo básico, que pode ser expandido. Costumam permitir até 2048 passos de memória , que poder interna ou externa ( Módulos em Cassetes de Estado - Sólido , Soquetes de Memória , etc ), ou podem ser totalmente modulares.

**C.L.P.s de Grande Porte :**

Os C.L.P.s de grande porte se caracterizam por uma construção modular , constituída por uma Fonte de alimentação , C.P.U. principal , CPUs auxiliares , CPUs Dedicadas , Módulos de E/S digitais e Analógicos, Módulos de E/S especializados, Módulos de Redes Locais ou Remotas , etc, que são agrupados de acordo com a necessidade e complexidade da automação. Permitem a utilização de até 4096 pontos de E/S. São montados em um Bastidor ( ou Rack ) que permite um Cabeamento Estruturado .

***Programação Básica de um CLP***

Os CLP's precisam ser previamente programados para realizar suas funções, assim sendo uma linguagem de programação deve ser utilizada. Nos primórdios do CLP ele fora utilizado para substituir conjuntos de contatos de relés e contatores em painéis de forma tal que pudessem ser reconfigurados de uma forma mais simples e facilitar eventuais mudanças. Assim a primeira linguagem de PLC foi a de diagramas de contato, ou Ladder Diagram, que se baseia no funcionamento dos contatos dos relés, daí o nome de "lógica de relé". A Ladder Diagram foi bem aceita nos EUA, mas na Europa permanecia a tendência de programação baseada em linhas de comando, como o assembly. Havia portanto, a necessidade padronização e isto foi feito por uma norma internacional.

A IEC 1131, padroniza vários aspectos de automação, ela é composta dos seguintes capítulos:

- IEC 1131-1      Informações gerais;
- IEC 1131-2      Especificações de Equipamentos e Teste;
- IEC 1131-3      Modelo de programação e de Software;
- IEC 1131-4      Orientações ao usuário;
- IEC 1131-5      Comunicação;
- IEC 1131-6      Comunicação por FieldBus;
- IEC 1131-7      Programação para Controle Fuzzy;
- IEC 1131-8      Orientação para Aplicação e Implementação de Linguagens de Programação;

**LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO - CLP**

Para facilitar a programação dos CLPs , foram sendo desenvolvidas durante o tempo, diversas Linguagens de Programação. Essas linguagens de programação constituem - se em um conjunto de símbolos, comandos, blocos , figuras, etc, com regras de sintaxe e semântica. Entre elas ,surgiu a Linguagem STEP 5, STEP 7, e outras.

A IEC 1131-3, que trata de linguagens de programação, define cinco tipos básicos:

- IL      Lista de Instruções(LIS);
- ST      Texto estruturado, semelhante ao PASCAL;
- LD      Diagrama de contatos (DIC);
- FBD      Blocos lógicos (DIL);
- SFC      Carta de funções, onde existem blocos padrão com a função identificada por códigos

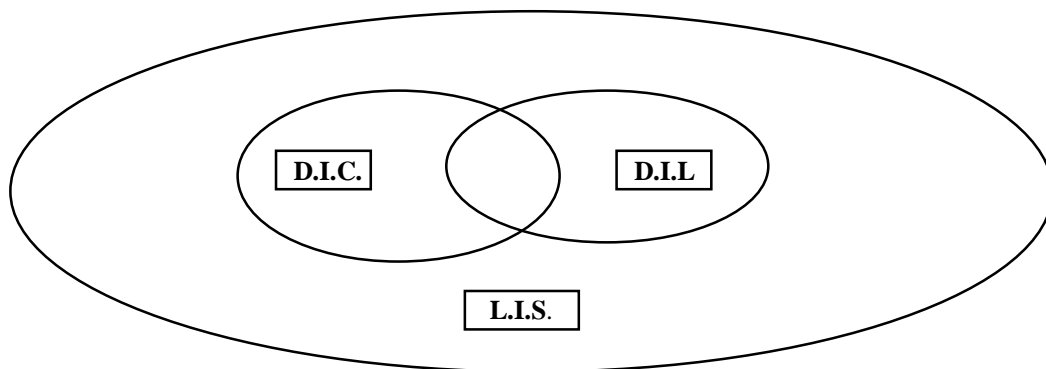
## **LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO STEP 5**

A linguagem STEP 5 tem se mostrado bastante eficiente, principalmente porque permite ao usuário representar o programa de automação, tanto em Diagrama de Contatos ( D.I.C. ou LADDER ), em Diagrama Lógico ( D.L.C. ) e como uma Lista de Instruções ( L.I.S.). Isso facilita o manejo da linguagem a um amplo círculo de usuários, na confecção e modificação de programas. Uma biblioteca dos denominados Blocos Funcionais Estandarizados , posta à disposição dos usuários, é um passo a mais na confecção racional de programas e redução dos custos de software.

A linguagem STEP 5 é uma entre as muitas outras de alto nível existentes, entendendo - se por alto nível aquela que se aproxima muito da linguagem humana. Ela foi desenvolvida levando - se em conta os conhecimentos da área de automação, tendo a partir daí representações para a mesma linguagem.

## **INTERCAMBIALIDADE ENTRE REPRESENTAÇÕES**

Cada um dos métodos de representação DIC, LIS e DIL tem suas propriedades e limitações em termos de programação, ou seja, um programa escrito em LIS nem sempre pode ser escrito em DIC ou DIL, isso em face da característica da própria representação; é o caso por exemplo, de querer se representar em DIC uma instrução de entrada de dados ou de um salto condicional de programação, embora alguns compiladores o faça, porém esta instrução é facilmente representada em LIS. A seguir temos uma representação simbólica da intercambialidade :



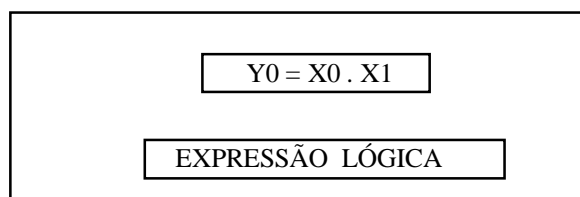
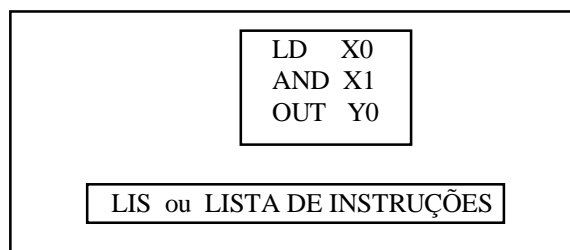
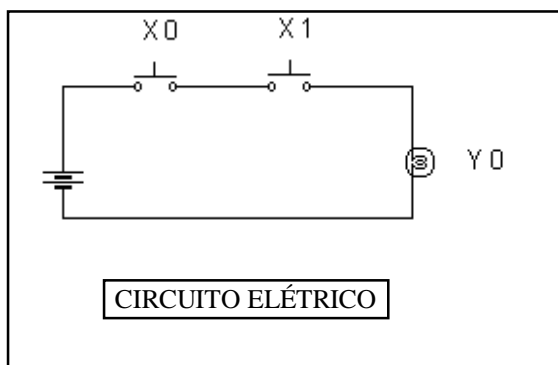
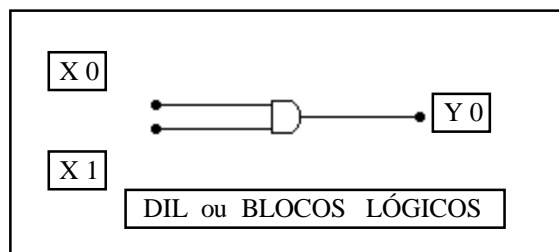
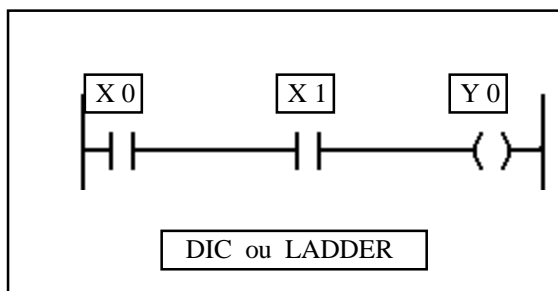
**INTERCAMBIALIDADE ENTRE AS REPRESENTAÇÕES**

## ESTRUTURA DA LINGUAGEM

O tratamento matemático dado à solução de um certo problema, para um número reduzido de variáveis, é a Álgebra de Boole, formando assim, através de seus teoremas, expressões representativas da solução do problema ou do comando de um sistema. Tais expressões podem ser executadas por um conjunto de circuitos, denominados em eletrônica digital, de portas lógicas. As portas lógicas, como veremos a seguir são a tradução dos postulados de Boole.

## NOÇÕES BÁSICAS DE REPRESENTAÇÃO

Podemos representar, logicamente, um circuito série simples, composto de dois interruptores e uma lâmpada, de diversas maneiras:



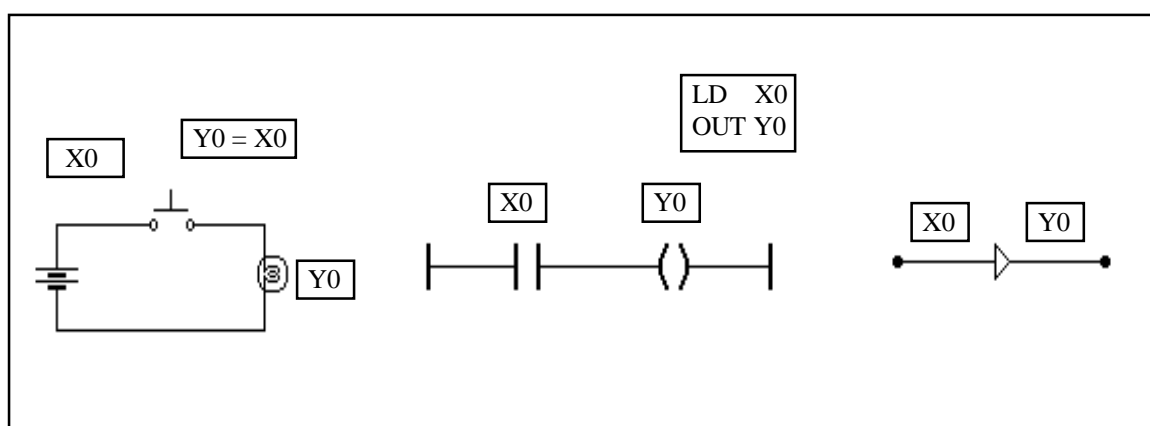
Todas as figuras acima, são representações possíveis de um mesmo circuito elétrico. Todas igualmente válidas para representar o circuito mencionado.

## INSTRUÇÕES E BLOCOS BÁSICOS

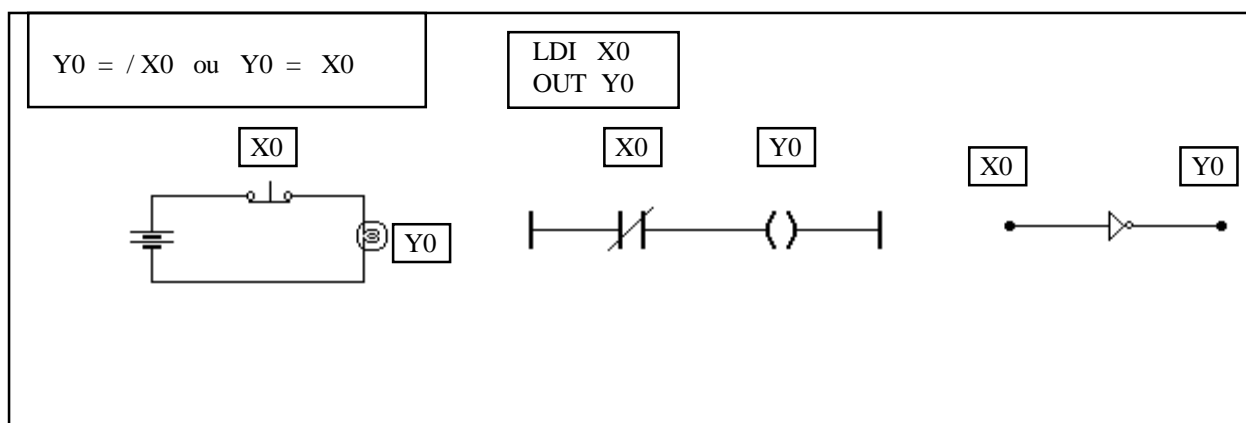
Os blocos básicos ou fundamentais nas linguagens de programação são : bloco NA ( função SIM - NO ), bloco NF ( função NÃO - NOT ), bloco SÉRIE ( função E - AND ) e o bloco PARALELO ( função OU - OR ).

Veremos em detalhe cada bloco, em várias representações.

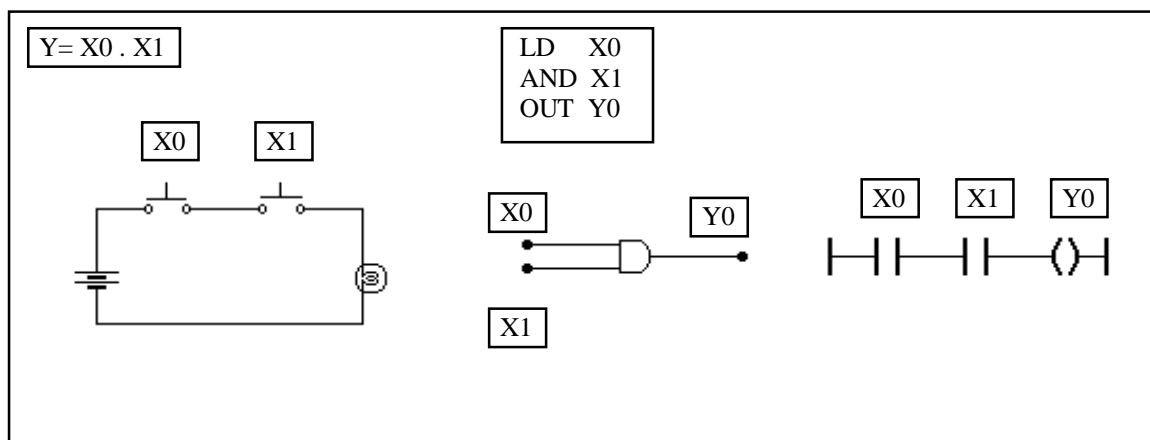
BLOCO N.A. ( NORMALMENTE ABERTO ), que pode ser representado :



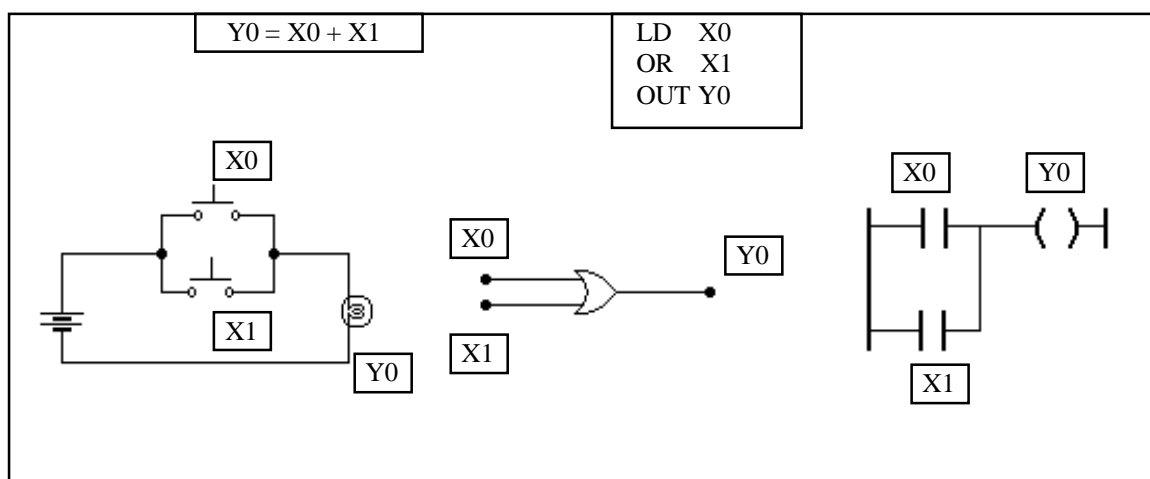
BLOCO N.F. ( NORMALMENTE FECHADO ), que pode ser representado :



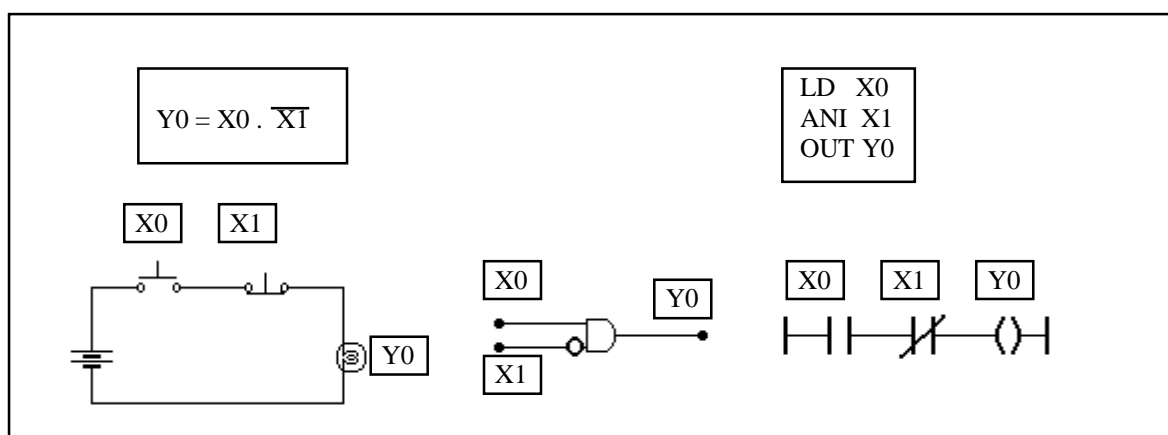
BLOCO SÉRIE ( FUNÇÃO E ), que pode ser representado :



BLOCO PARALELO ( FUNÇÃO OU ), que pode ser representado :

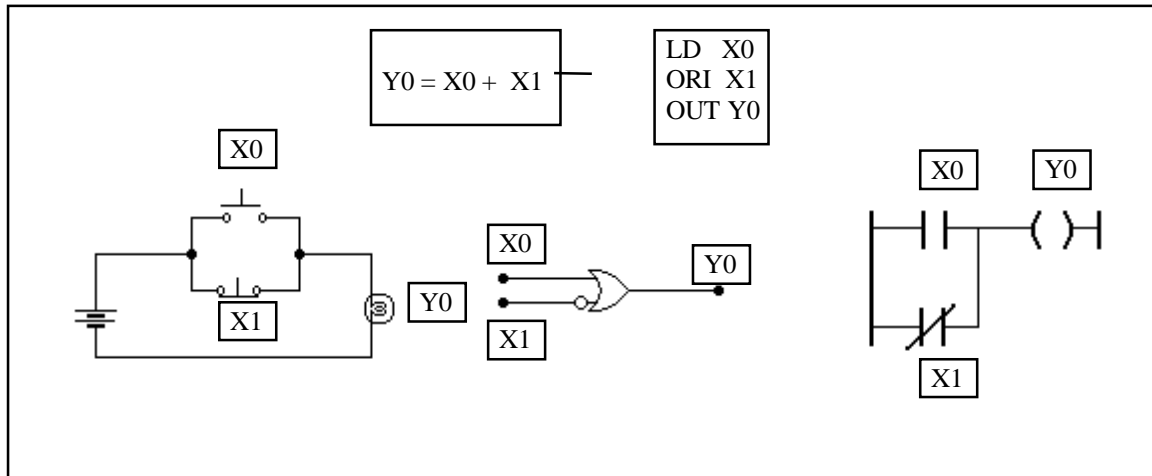


BLOCO SÉRIE NA - NF



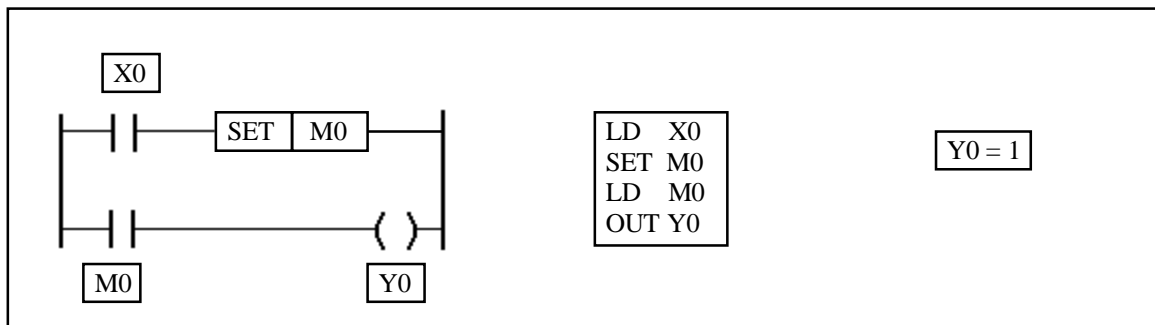


### BLOCO PARALELO NA - NF

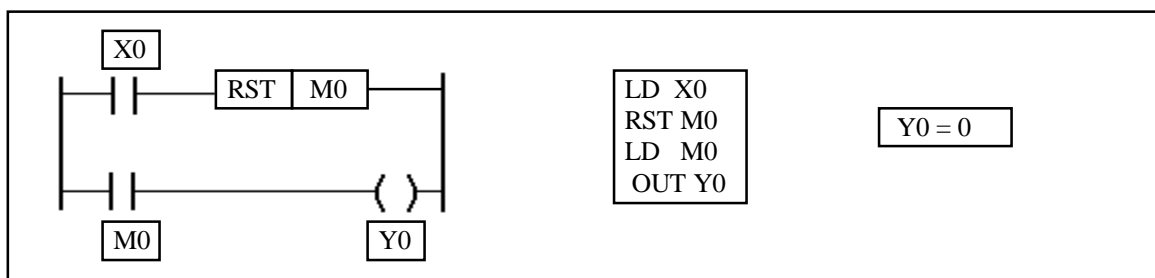


### INSTRUÇÕES E BLOCOS ESPECIAIS

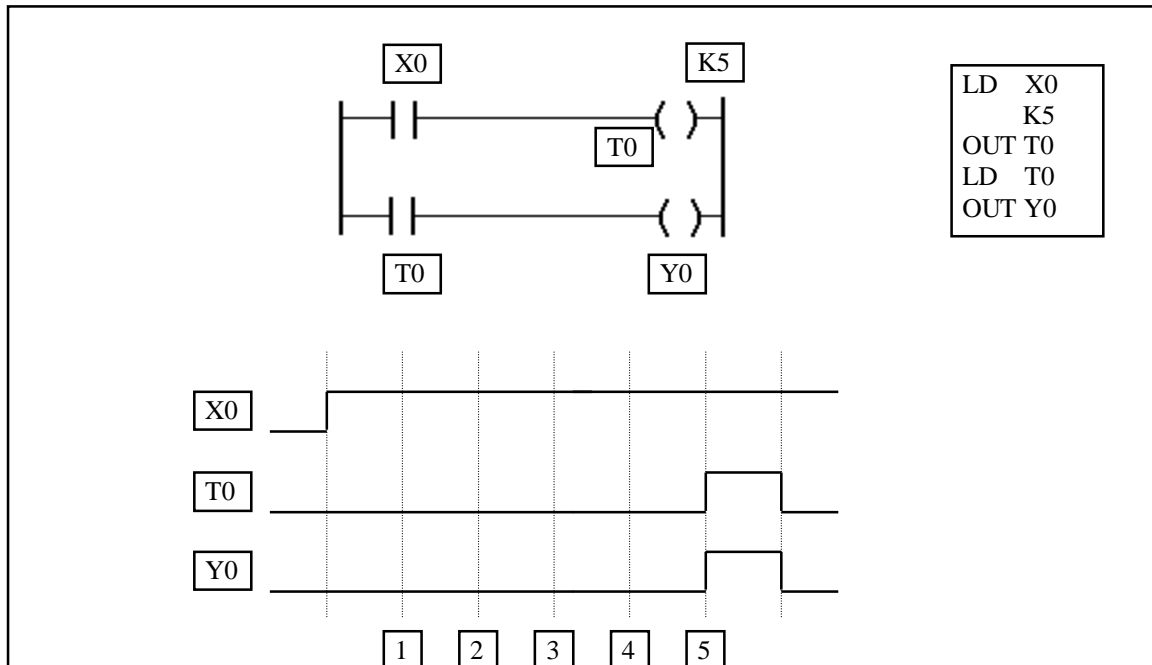
**BLOCO OU INSTRUÇÃO - SET ( SETAR )** - Esta instrução força o estado de uma saída ou memória a ficar ativada.



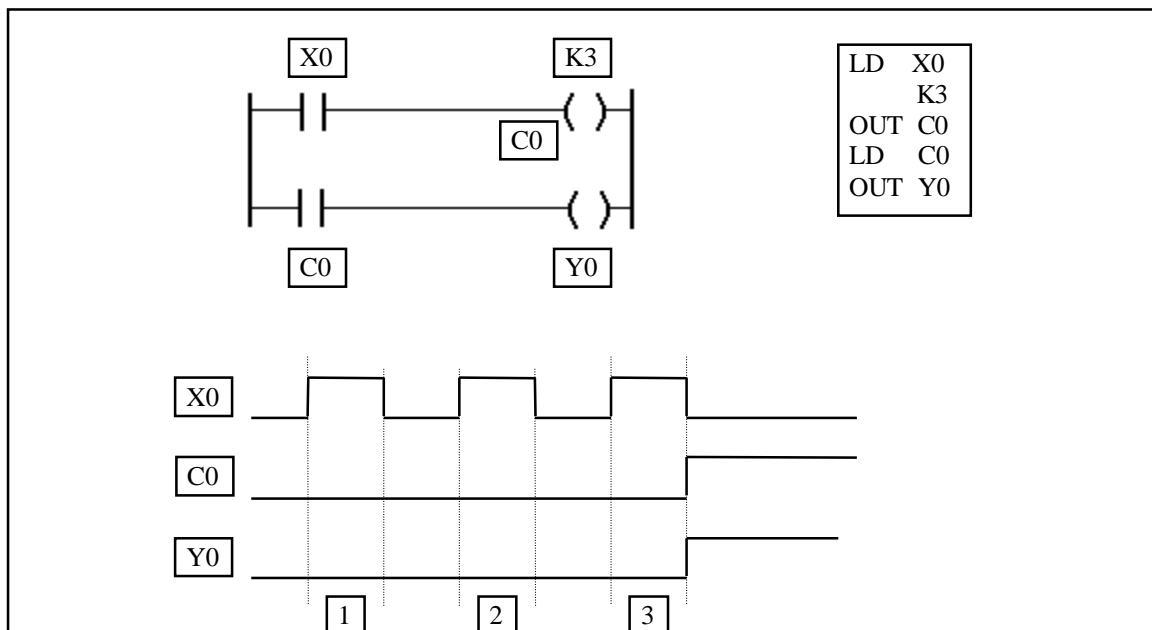
**BLOCO OU INSTRUÇÃO RESET - RST ( RESETAR )** : Esta instrução força o estado de uma saída ou memória a ficar desativada.



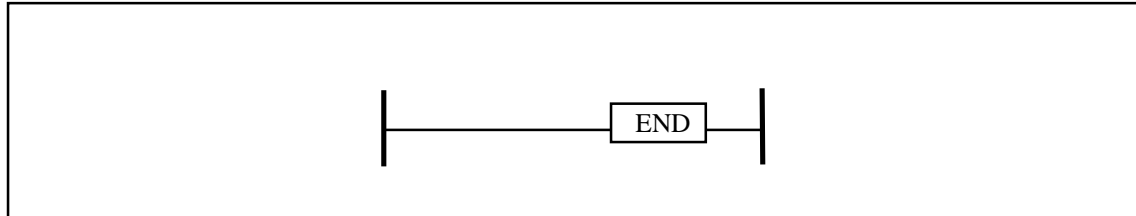
**BLOCO OU INSTRUÇÃO TIMER - T ( TEMPORIZADOR ) :** Esta instrução serve para ativar uma saída ou memória após um certo período de tempo.



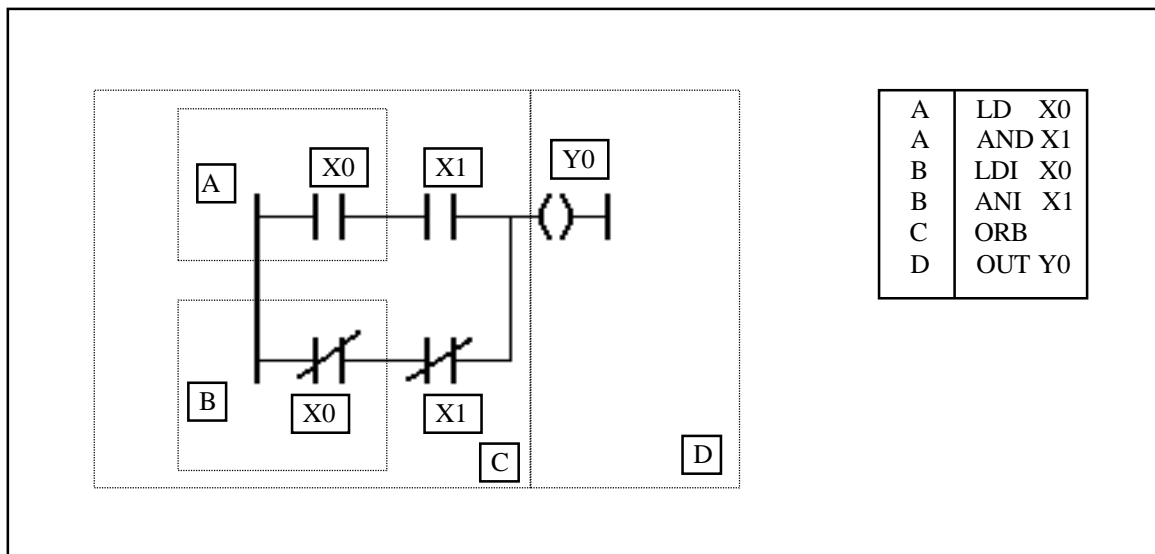
**BLOCO OU INSTRUÇÃO COUNTER - C ( CONTADOR ) :** Esta instrução serve para ativar uma saída ou memória, após uma certo número de eventos.



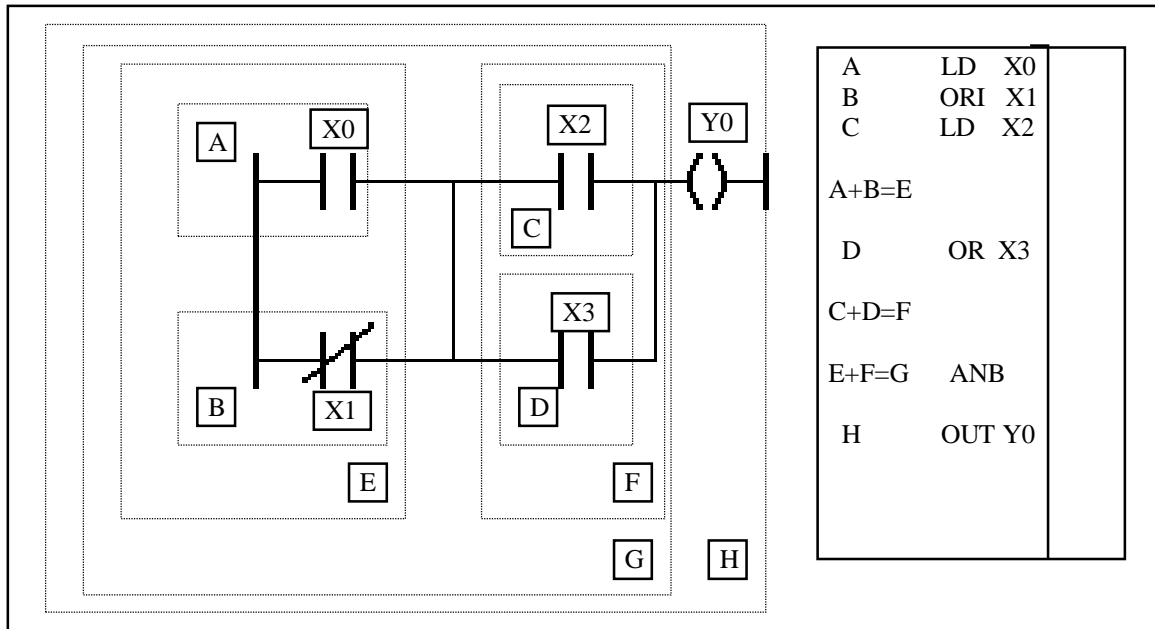
**BLOCO OU INSTRUÇÃO END ( FIM ) :** Esta instrução serve para avisar o Programa Monitor o final do Programa do Usuário, caso contrário, o Programa Monitor irá varrer toda a memória, mesmo que o Programa do usuário não a ocupe totalmente. A sua omissão causa um desperdício de tempo de processamento.



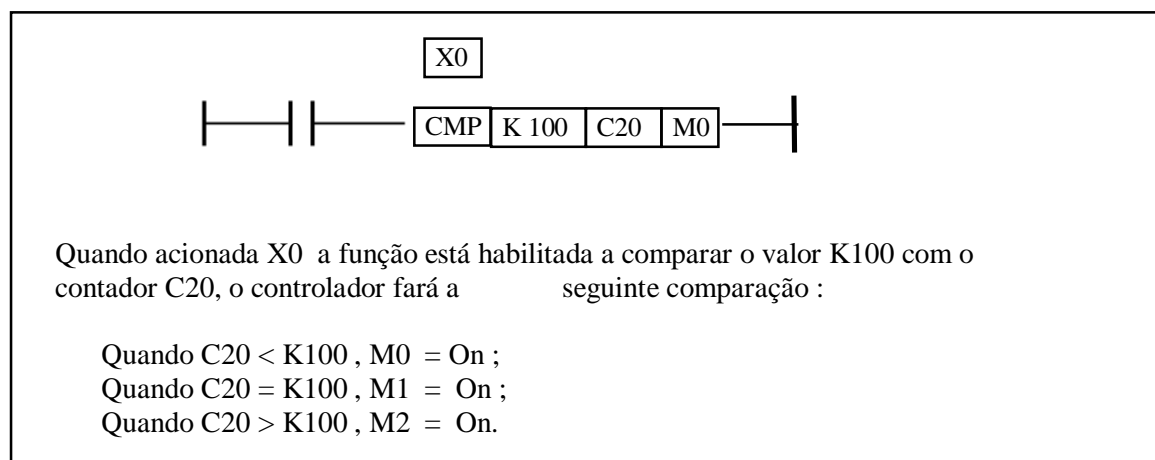
**BLOCO OU INSTRUÇÃO - ORB ( OR BLOCK ):** A instrução ORB não tem parâmetro físico de contato, é uma sequência de lógicas AND , em paralelo com várias outras sequências de lógica AND. A função ORB é uma ferramenta de programação para a criação de funções OR complexas.



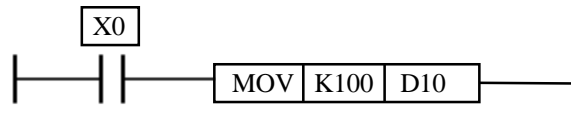
**BLOCO OU INSTRUÇÃO ANB ( AND BLOCK )** : A instrução ANB não tem um parâmetro físico de contato, é uma união de múltiplas seqüências de lógicas OR /ORI em série. É uma ferramenta para criação de funções AND complexas.



**BLOCO OU INSTRUÇÃO COMPARAÇÃO - CMP** : É utilizada para comparar valores de contadores, registradores e temporizadores.

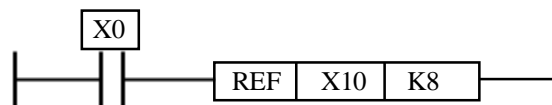


**BLOCO OU INSTRUÇÃO MOVER - MOV :** É utilizada para movimentar dados entre registradores, contadores e temporizadores.



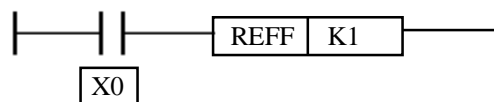
Quando a entrada X0 for acionada habilitará a função a mover dados de K100 para o registrador D10

**BLOCO OU INSTRUÇÃO RENOVAÇÃO ( Refresh ) - REF :** É utilizada para gerar a imagem das entradas ou saídas no bloco de memória antes da instrução END.



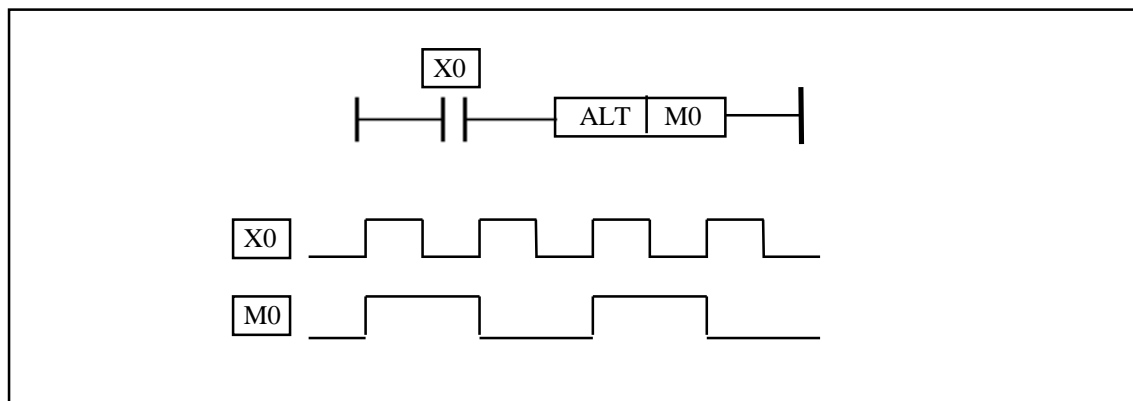
Quando ativada X0 é feita uma renovação dos dados de X0 a X15 ( ou Y0 a Y11 ) em sua memória imagem

**BLOCO OU INSTRUÇÃO RENOVAÇÃO e FILTRO - REFF :** É utilizada para filtrar o sinal de entrada, ou seja, evitar que ruídos ativem a entrada ( 0 à 60 mili - segundos ).

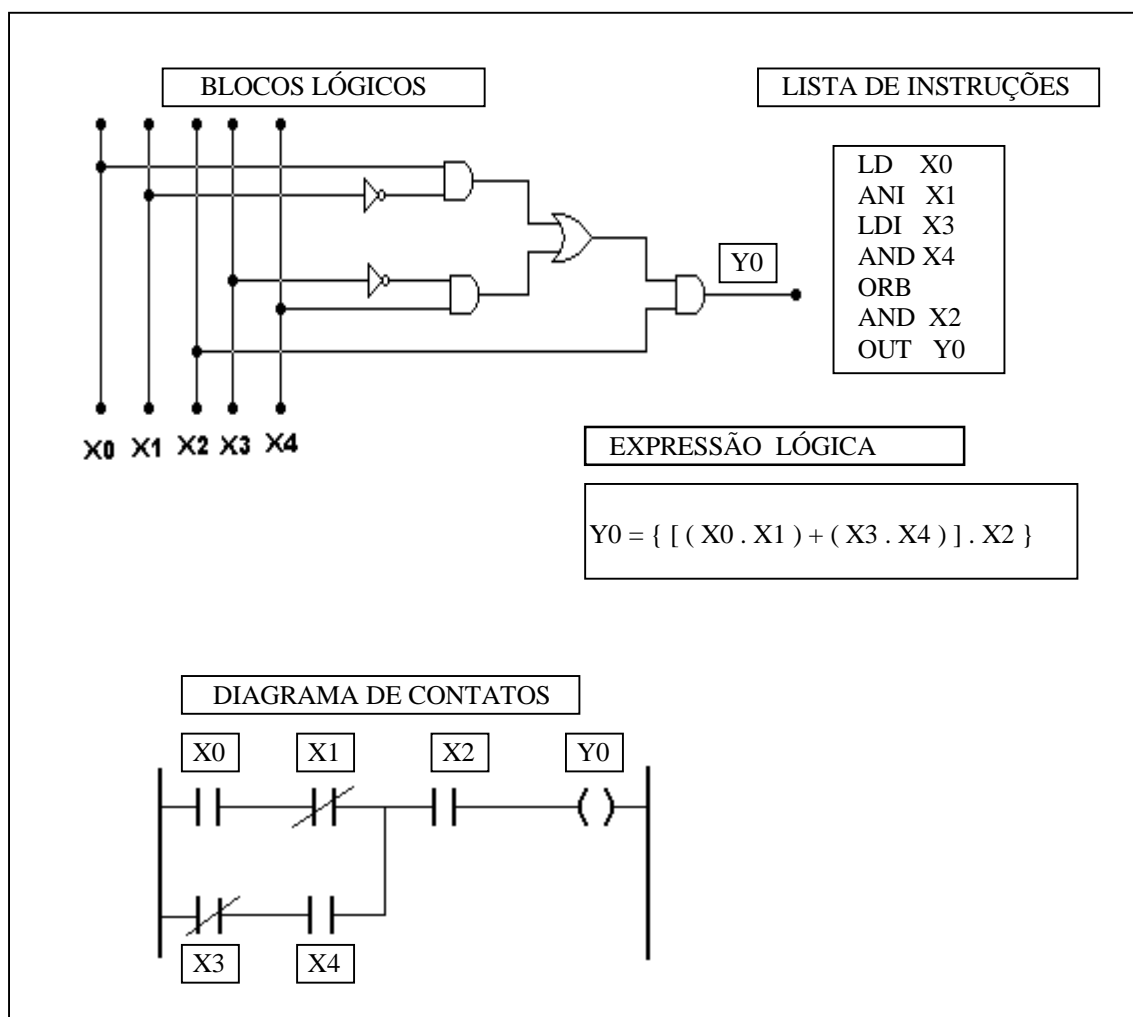


Quando ativada X0, o filtro de entrada passa a ser de 1 mili - segundo

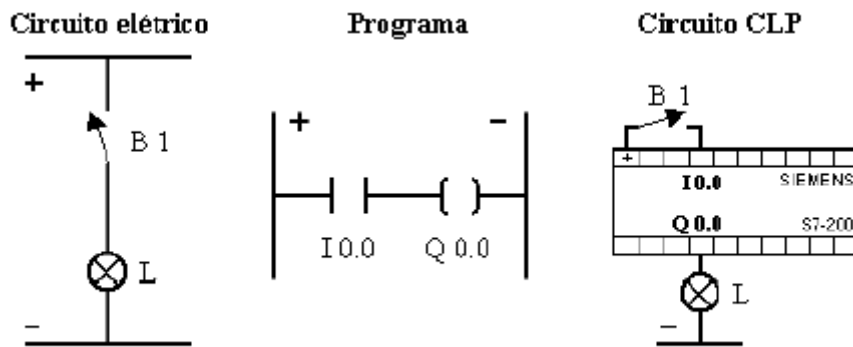
BLOCO OU FUNÇÃO ALTERNAR - ALT : É utilizada para configurar uma saída em FLIP - FLOP .



Exemplo de um circuito de comando em mais de uma representação :



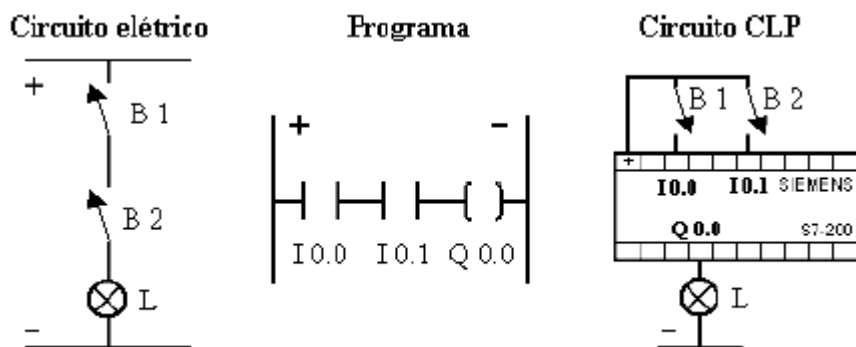
**Aplicação do CLP envolvendo lógica combinacional simples:**



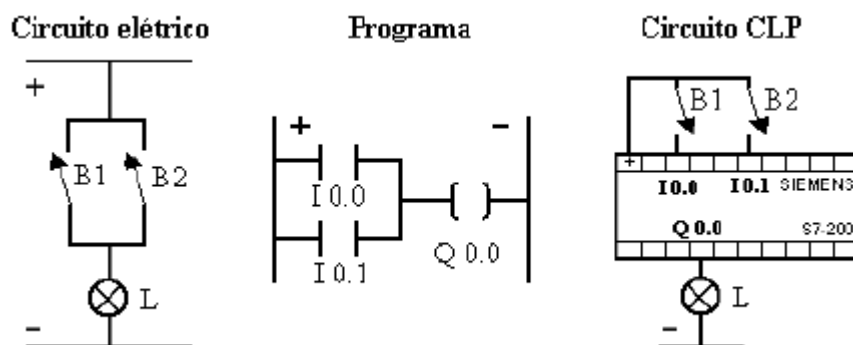
O botão B1, normalmente aberto, está ligado a entrada I0.0 e a lâmpada está ligada à saída Q0.0.

Ao acionarmos B1, I0.0 é acionado e a saída Q0.0 é energizada. Caso quiséssemos que a lâmpada apagasse quando acionássemos B1 bastaria trocar o contato normal aberto por um contato normal fechado, o que representa a função NOT.

Podemos desenvolver programas para CLPs que correspondam a operações lógicas combinacionais básicas da álgebra de Boole, como a operação AND. Na área elétrica a operação AND corresponde a associação em série de contatos, como indicado na figura abaixo.

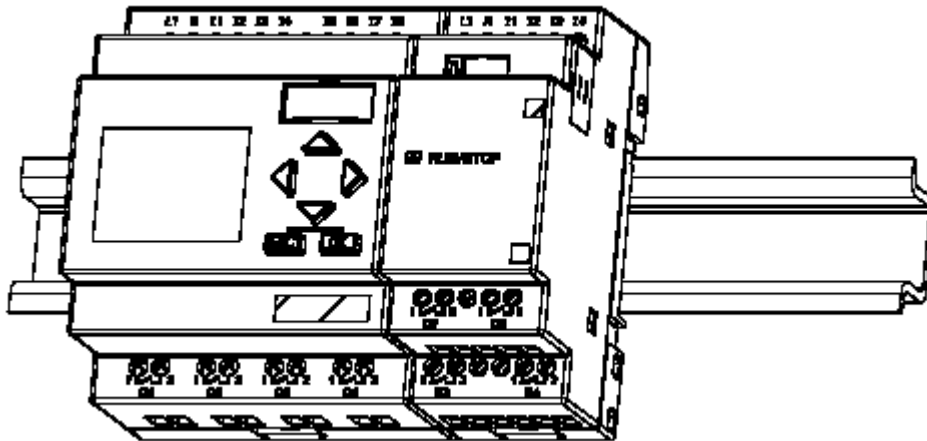


Outra operação lógica básica é a função OR, que corresponde a associação em paralelo de contatos, como indicado na figura abaixo.

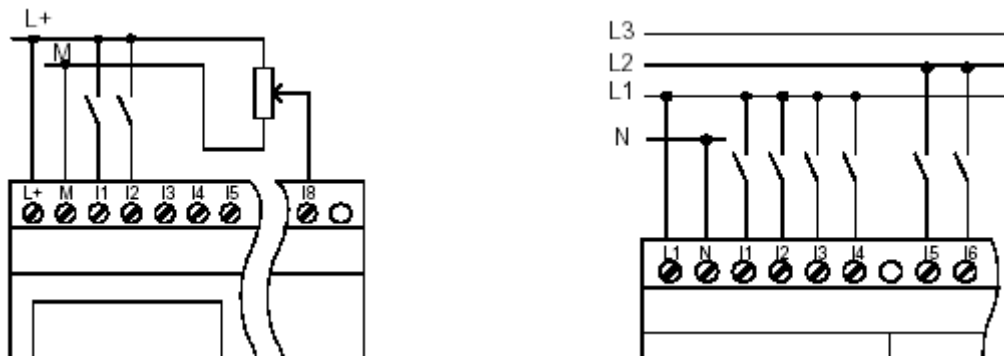


### MicroCLP da Siemens (Logo):

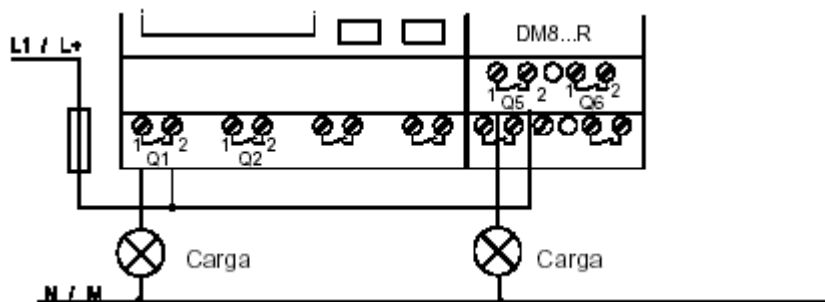
A Siemens tem um microCLP, chamado de LOGO, muito utilizado por ser versátil, dispensar programadores( a programação pode ser feita “in loco” pelo teclado. Ele usa a linguagem dos blocos lógicos DIL. Existem versões similares de outros fabricantes como o CLIC da WEG e o EASY da Klockner-Moeller. Abaixo, temos uma ilustração deste dispositivo:



Ele é apropriado para fixação em trilhos DIN. Abaixo, temos dois exemplos de conexão de elementos sensores nas entradas do LOGO. O da esquerda recebe alimentação CC o da direita em CA. Repare que a entrada I8, na figura da esquerda, é do tipo analógica, e as demais são digitais.



Abaixo, temos um exemplo da conexão de cargas nas saídas à relé do LOGO. Como o contato é seco, tanto faz se é CC ou CA.

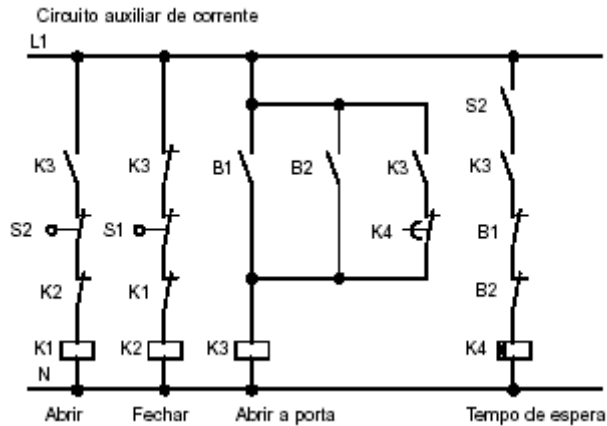




## Exemplo de Aplicação

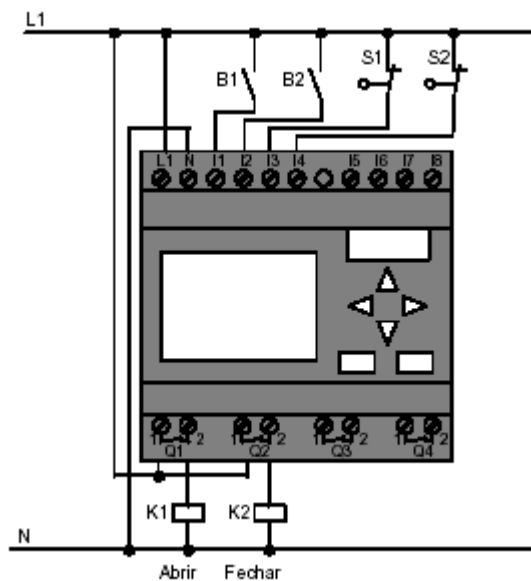
Visando demonstrar o uso de CLP's, ilustramos algumas montagens e ligações usando um microCLP da Siemens o LOGO.

Esquema de ligação para o implementar o comando abaixo:



Assim que um dos detectores de movimento B1 ou B2 detectar uma pessoa, será dado início ao processo de fechamento da porta através do K3. Se a área de detecção de ambos os detectores de movimento estiver isenta de registros por um tempo mínimo, o K4 irá liberar o processo de fechamento.

Agora vamos verificar a solução usando o LOGO.



O circuito ficou bem menor e os circuitos mais simples. A lógica de ligação agora é implementada pelo LOGO.

## 16. IHM – Interface Homem Máquina.

São painéis gráficos que permitem o interfaceamento do ser humano com os equipamentos de controle. Elas informam sobre as variáveis do processo, como nível de líquido em um tanque, temperatura em uma estufa, etc..

Podem ser de dois tipos:

- **Passivo;**
- **Ativo;**

Os modelos passivos limitam-se a informar dados sobre o processo e não permitem uma interação maior com o processo.

Já os modelos ativos, permitem uma interação do homem com o processo, além é claro das funções de visualização de dados. Exigem uma linguagem de programação.

Estes modelos atualmente, usam uma técnica chamada de “Touch Screen”, onde são feitas detecções diretamente na tela da IHM. Ela representa um botão por um ícone na tela, e ao ser tocado a IHM identifica o toque e processa a informação. Ela substitui assim um teclado de membrana.

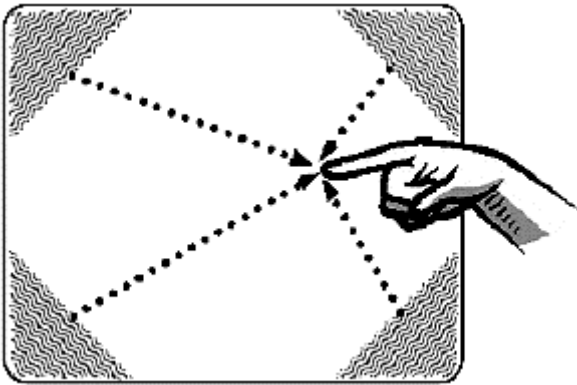
Normalmente estas interfaces estão acopladas a um sistema inteligente como um CLP ou CNC.

IHM são essenciais em sistemas de CNC dada a interatividade necessária nessas máquinas.

### **Touch Screen**

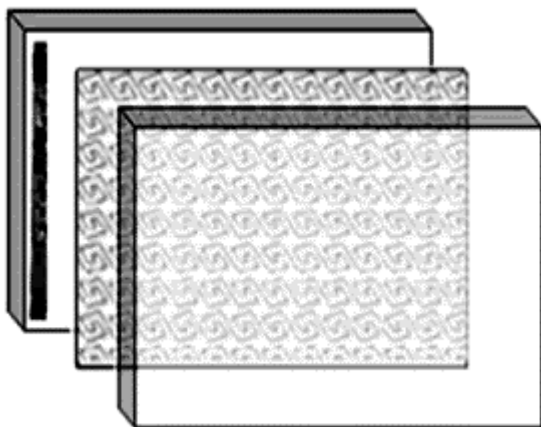
Existem muitas IHM's que utilizam a técnica do “Touch Screen”, assim vale a pena comentar sobre o seu princípio de funcionamento. Existem várias técnicas, dentre elas:

#### ➤ **Capacitiva Superficial**

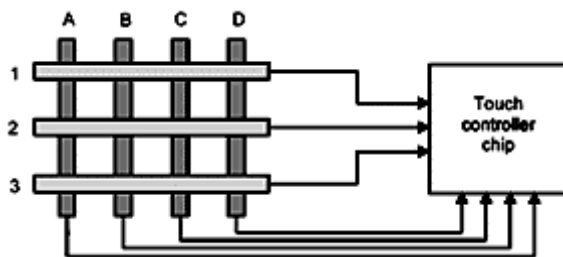


A tecnologia Capacitiva Superficial da Elo consiste de uma camada uniforme condutiva sobre uma tela de vidro. Durante a operação, eletrodos nas extremidades da tela distribuem uma pequena tensão, uniforme, através de toda a camada condutiva superficial da tela, criando assim um campo elétrico uniforme. Quando tocamos na tela, drenamos corrente elétrica de cada um dos cantos desse campo elétrico, proporcionalmente. A controladora calcula o local do toque (coordenada) através da medida de corrente descarregada e transmite as coordenadas para o computador.

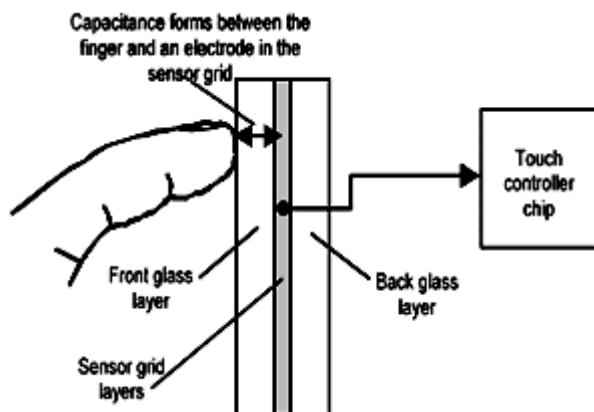
#### ➤ **Capacitiva Projetada**



O touchscreen de tecnologia capacitiva projetada tem na frente e atrás uma camada de vidro protetor que proporciona melhor qualidade da imagem e maior resistência física.



A camada intermediária consiste de uma grade sensorial de micro fios, e que realça a qualidade óptica da imagem.

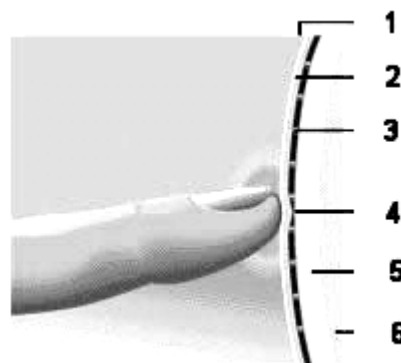


Durante o toque, altera-se a capacitância entre o dedo e a grade sensorial. A controladora serial embutida calcula na grade sensorial o local do toque, localiza e transmite a coordenada para o computador.

### ➤ AccuTouch

O touchscreen resistivo de 5 fios AccuTouch é composto por uma tela de vidro com um revestimento resistivo uniforme. Uma película de polyester é firmemente estendida sobre a parte superior dessa tela de vidro e separada por pequenos espaçadores (pontos) transparentes e isolantes. Essa película possui um revestimento durável em sua face externa e um revestimento condutivo na sua face interna.

- 1 Revestimento Durável
- 2 Camada Condutiva
- 3 Espaçadores
- 4 Revestimento Resistivo
- 5 Pannel de Vidro
- 6 CRT

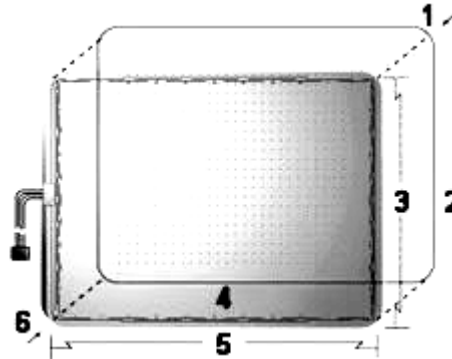


### O que ocorre ao tocar no touchscreen

Ao tocar na tela, empurra-se o revestimento condutivo da película de cobertura contra o revestimento resistivo do vidro, proporcionando um contato elétrico. As tensões produzidas constituem a representação análoga da posição de onde está se efetuando o toque.

### Como a controladora do touchscreen interpreta as medições da tela

- 1 +5 Volts
- 2 Y- Tensão
- 3 Ry
- 4 X-Tensão
- 5 Rx
- 6 0 Volts



Enquanto a controladora aguarda o toque na tela, a superfície resistiva do touchscreen é induzida a +5V através de quatro guias (fios) e a película superior é colocada em GND (terra) por meio de uma grande resistência. Quando o touchscreen não está sendo tocado, a tensão na película de cobertura é zero (0). O nível de tensão dessa cobertura é continuamente convertido por um Conversor analógico-Digital (ADC) e monitorado pelo microprocessador da controladora.

Quando o touchscreen é tocado, o microprocessador detecta a tensão da película da cobertura e começa a convergir as coordenadas da seguinte maneira:

#### A

O microprocessador coloca tensão no eixo X do touchscreen aplicando +5V aos pinos H e X, colocando em terra (GND) os pinos Y e L. Uma tensão analógica proporcional à posição X (horizontal) do toque aparecerá na película superior no pino S do conector do touchscreen. Essa tensão é digitalizada pelo Conversor Analógico Digital e submetida a um algoritmo intermediário para depois ser armazenado para ser transmitido ao PC (Host).

#### B

Logo em seguida, o microprocessador coloca tensão no eixo Y do touchscreen aplicando +5V aos pinos H e Y, colocando em terra (GND) os pinos X e L. Uma tensão analógica proporcional à posição Y (vertical) aparece agora sobre a camada de cobertura no pino S do conector do touchscreen. Esse Sinal é convertido e processado como descrito anteriormente para a posição X.

### Porque é Importante o Algoritmo Intermediário

Esse algoritmo reduz o ruído resultante do contato durante o início e o final do mesmo com o touchscreen. Sucessivas amostras de X e Y são coletadas para determinar que seus valores não se diferenciem muito dentro de uma certa faixa de valores. Se uma ou mais dessas amostras saírem fora desse range, as amostras são descartadas e o processo se reinicia. Isso continua sucessiva vezes até que as amostras, primeiro X e depois Y fiquem dentro dessa faixa. Por intermédio desses valores são usados como a coordenada X e a coordenada Y respectivamente.

Uma vez que se obtém amostras independentes de X e Y, os pares de coordenadas são testados para eliminar os efeitos de ruído. Se uma amostra não entrar dentro de um range pré-estabelecido, todas as coordenadas X e Y são descartadas e a sequência independente X e Y é reiniciada. Uma vez que se obtém

coordenadas aceitáveis, determina-se uma coordenada intermediária essa é transmitida ao processador do PC. (host)

### **Vídeo Calibração**

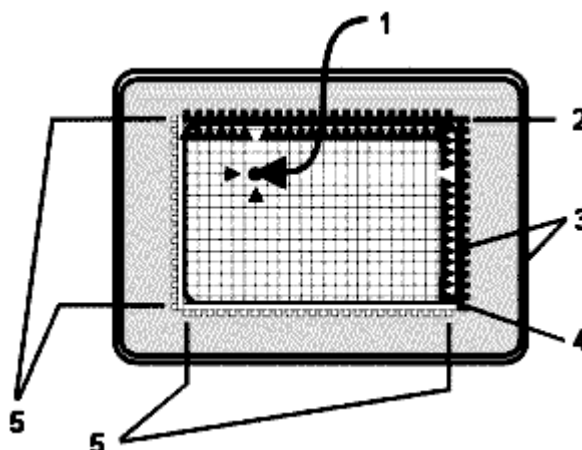
Os valores X e Y são similares às coordenadas cartesianas, onde X é crescente da esquerda para a direita e Y é crescente da parte de baixo para cima. Essas coordenadas absolutas são arbitrárias e sem escala variando levemente de um touchscreen para outro. A controladora da AccuTouch pode ser calibrada pelo vídeo de calibração. Esse alinha o sistema de coordenadas do touchscreen com a imagem da tela, reorienta cada eixo e coloca em escala as coordenadas antes que sejam transmitidas ao PC de controle.

### **Medições dos eixos X e Y originadas no vidro**

A tecnologia de cinco fios AccuTouch utiliza a parte inferior da película sobre o vidro para as medições dos eixos X e Y. A película flexível de cobertura atua somente como uma ponta de prova das medições de tensão. Isso significa que, a tela touchscreen continuará operando corretamente mesmo que não se mantenha uniforme os valores na camada condutiva a película de cobertura. O resultado é uma tela touchscreen confiável, durável e precisa com uma operação sem erros.

#### ➤ **CarrollTouch**

- 1 Ativação do touch
- 2 Máscara interna da moldura da matriz-ótica
- 3 Borda interna e externa da moldura transparente infra vermelha
- 4 Borda da área útil do monitor
- 5 Feixe de luz infra vermelha

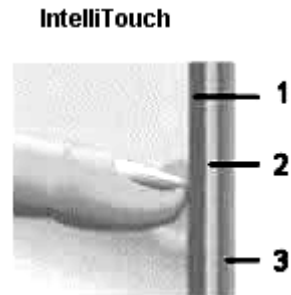


A tecnologia infra vermelha IR se baseia na interrupção de um feixe de luz infra vermelha na frente da tela do monitor. O quadro do touch, a moldura da matriz-ótica, contém uma fileira de diodos infra vermelhos (LEDs) e foto transistores cada um montado em lados opostos para gerarem uma grade de luz infra vermelha invisível. O conjunto dessa moldura constituem-se de placas de circuitos impressos sobre os quais montam-se os opto eletrônicos e que são escondidas atrás de uma máscara transparente aos raios IR. Esta máscara protege os componente opto-eletrônicos de ambientes e operações indesejáveis e permitem a emissão dos raios infra vermelhos.

A controladora infra vermelha alimenta seqüencialmente os LEDS a fim de criar uma grade de raios infra vermelhos. Quando o apontador, tal como o dedo, penetra nessa grade, obstruindo o feixe de raios infra vermelhos, um ou mais foto transistores de cada eixo detectam a ausência de luz e transmitem uma senha que identifica as coordenadas X e Y.

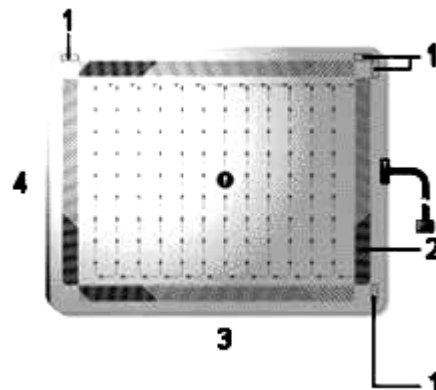
### ➤ IntelliTouch/SecureTouch

- 1 Camada touchscreen de vidro transparente
- 2 Camada de ar
- 3 LCD



Os touchscreens IntelliTouch e SecureTouch possuem uma tela de vidro com transdutores piezo elétricos transmissores e receptores para os eixos X e Y. A controladora do touchscreen emite um sinal elétrico de 5 Mhz ao transdutor de transmissão o qual converte em ondas de ultra som no vidro. Essas ondas sonoras de alta frequência são direcionadas através da superfície da tela de touchscreen por uma carreira de ranhuras defletoras. Esses refletores são colocados fora da área útil da tela e reúnem e direcionam as ondas até o transdutor receptor que as convertem novamente em sinal elétrico, ou seja, faz-se um mapeamento digital da superfície de touchscreen através de ondas sonoras.

- 1 Transdutores
- 2 Refletores em cada eixo, refletindo a onda ultra sônica sobre a tela touchscreen
- 3 Eixo X
- 4 Eixo Y



Quando você toca na tela, absorve uma porcentagem das ondas que estão rastreando a tela. O sinal recebido no transdutor se compara então com o mapeamento digital armazenado na controladora, qualquer alteração é reconhecida e uma coordenada é calculada. Este processo se faz independentemente para o eixo X e para o eixo Y. Ao medir-se a quantidade de sinal absorvida, determina-se também um eixo virtual Z. As coordenadas digitalizadas são transmitidas ao PC para o processamento do sistema.

Estas são algumas das técnicas utilizadas, existem outras.

### 17. Comando Numérico Computadorizado (CNC):

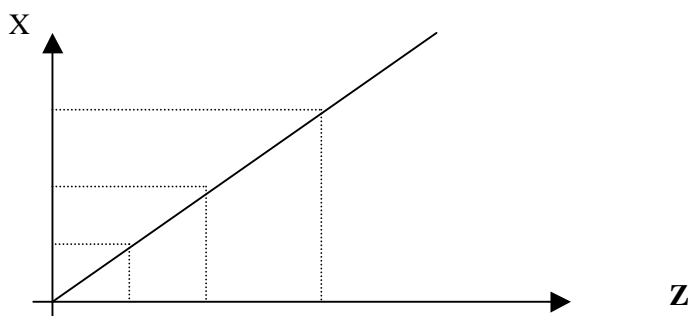
O Comando Numérico computadorizado ou CNC é um tipo de controlador baseado em números. Ele deriva do Comando Numérico. É um tipo de CLP com funções bem mais sofisticadas. Ele também executa um programa previamente determinado e pode realizar tarefas de um CLP, mas ele o faz com maior performance. E

Entretanto, o CNC não trabalha sozinho, ele necessita dos elementos de acionamento como os servoconversores para controlar o servomotores no posicionamento. Na realidade, a etapa de controle de posicionamento e de velocidade de avanço do servomotor é feita pelo servoconversor. O CNC se

incumbe da tarefa de definir a “trajetória” do movimento. Ou seja, o CNC diz ao servoconversor aonde ele deve ir e com que velocidade. O servoconversor gera os sinais necessários para isto ocorra.

Em suma o CNC é um computador industrial com uma interface IHM com o usuário. O CLP também é um computador industrial, mas o CNC tem muito mais potencial matemático.

Dentre as funções do CNC estão a interpolação de eixos. Por exemplo, suponha que se deseja fazer um rasgo em uma peça na direção X e Z, sendo que  $X=2*Z$ . O operador informa os pontos inicial e final do movimento. O CNC usa um algoritmo matemático chamado de interpolação linear e calcula os pontos necessários para gerar o movimento. Veja o exemplo da figura abaixo:



Cada ponto intermediário entre o ponto inicial e final foi previamente calculado pela interpolação feita pelo CNC, os pontos são apresentados um a um ao servoconversores do eixo X e Z.

Se o movimento não fosse uma reta, mas sim uma circunferência ou arco, a interpolação seria circular. Se o movimento for circular em dois eixos e linear em um terceiro eixo será helicoidal.

Esta capacidade matemática de calcular os pontos e tomar decisões de que motor deve acionar e a que velocidade são as prerrogativas do CNC. O CLP não faz interpolações. Ele até pode comandar um servoconversor para posicionar um eixo. Mas não terá a mesma performance de um CNC.

### **Programação do CNC:**

Basicamente devem ser enviadas ao CNC dois tipos de informação:

- Trajetória;
- Comutação.

Informação de trajetória diz respeito a posicionamento e tipo de movimento(linear, circular,etc..).  
Informação de comutação diz respeito a mudança de ferramenta, velocidade, etc..

Basicamente o CNC utiliza um conjunto de instruções composta por um identificador e os parâmetros. Podemos selecionar os seguintes identificadores:

- **Instrução N:** Define o sequencial de linha de programa, se não se utilizar desvios de sub-rotina, não é absolutamente necessária;
- **Instrução G:** Define movimentos da ferramenta. Tem vários parâmetros e é a instrução mais usada;
- **Instrução F:** Modificador para avanço rápido de ferramenta. Muito usada para aproximação;
- **Instrução S:** Define a velocidade do fuso principal;
- **Instrução T:** determina o tipo de ferramenta;
- **Instrução M:** Funções diversas como ligar o fluido refrigerante, cambio 1, etc..

### **Linguagem de Programação G**

**G00:** Avanço em marcha rápida para deslocar rapidamente a ferramenta até o ponto final. O deslocamento é feito em linha reta, por isso deve-se verificar a possibilidade de colisão.

**G01:** Interpolação linear utilizada para deslocar a ferramenta em trabalho de usinagem da posição até a posição desejada em linha reta. Este comando possui a seguinte sintaxe:

G01 X/U Z/W A C R F S M B

Onde:

X/U Z/W A : coordenada do ponto final.

C : medida do chanfro.

R : medida do raio de arredondamento

F: avanço mm/volta.

S: rotação (rpm).

M: instrução M

B: instrução B.

**G02:** Interpolação circular no sentido horário.

Sintaxe: G02 X/U Z/W R I K F S M B

R: valor do raio.

I, K : Coordenadas relativas do centro com relação ao ponto inicial, sendo I no eixo

X e K no eixo Z.

**G03:** Interpolação circular no sentido anti-horário.

**G24,G25,G26,G27:** Avanço rápido em direção ao ponto de troca de ferramenta Durante o processo de usinagem pode ser necessário trocar a ferramenta, neste caso o porta ferramenta deve se afastar da peça para poder girar sem perigo de colisão.

O comando G24 a ferramenta se desloca na direção X até o ponto de troca de ferramenta. O G25 faz a ferramenta se deslocar na direção Z.

**G26** equivale a um G24 seguido por G25.

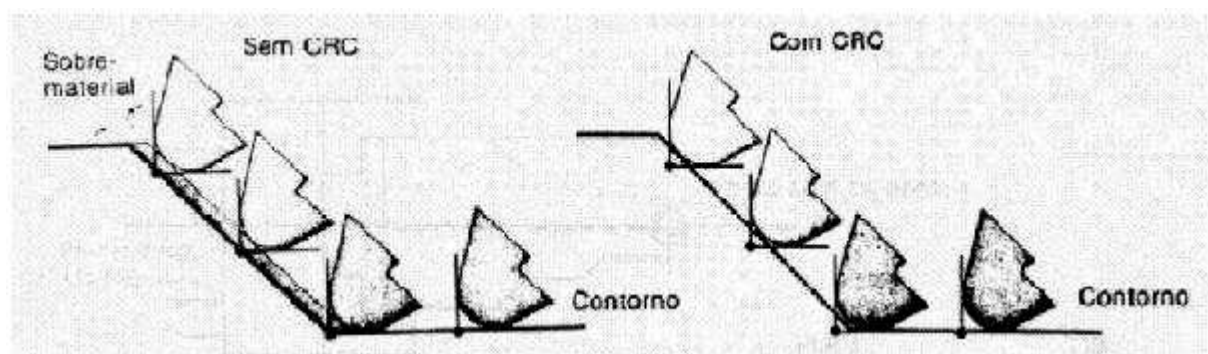
**G27** equivale a G25 seguido de G24.

**T:** Troca de ferramenta

Sintaxe Teeaa onde ee: número da estação e aa: dados de correção de desgaste da ferramenta.

**G40 e G46 :** Compensação de raio de ferramenta

A compensação do raio de corte faz com que a ferramenta considere o contorno exato da peça. G46 ativa e G40 desativa.



A figura acima mostra a compensação do raio de corte. (adaptado de IFAO,1984)

**G96 :** Velocidade de corte constante

Sintaxe G96 V(valor da velocidade de corte)

**G92:** Limitação da rotação

Sintaxe: G92 P(rotação máxima) Q(rotação mínima)

**G71,G72,G73** Ciclos de Desbaste



Antes de ser dado o acabamento é necessário que sejam dados alguns passes de desbaste, isto pode ser feito através da programação de cada passe utilizando as sentenças de deslocamento, ou através da utilização dos ciclos de desbaste. Através de uma única sentença, o ciclo de desbaste usina o material até o contorno final da peça que deve ser programado em algum ponto do programa.

**G71** realiza o desbaste com deslocamento longitudinal

**G72** desbaste transversal e **G73** desbaste paralelo ao contorno.

O contorno correspondente ao ciclo pode ser programado na forma de subprograma ou no mesmo programa onde o início e o fim devem estar identificados pelo número de sentença.

Sintaxe: G71 A P Q I K D F S

Onde:

A: Número do subprograma.

P e Q: Número da sentença inicial e final respectivamente.

I: Sobremetal na direção X.

K: Sobremetal na direção Z.

D: profundidade de corte.

F: Avanço [mm/volta].

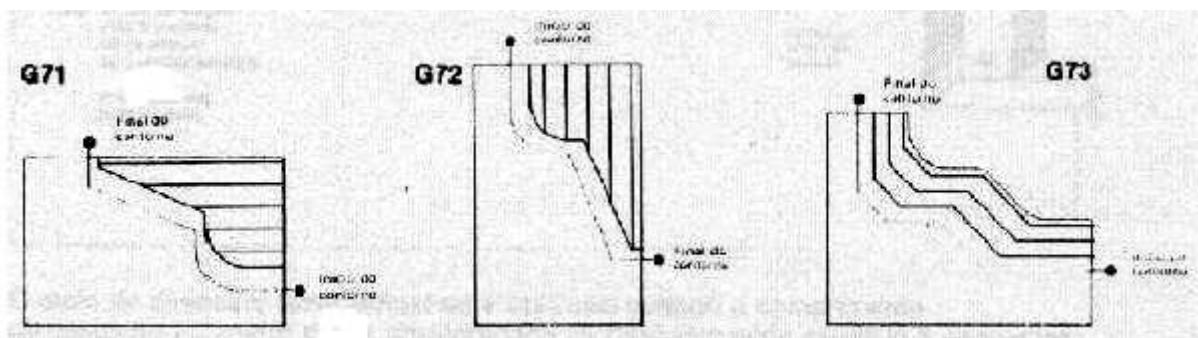
S: Rotação [rpm].

G72 tem sintaxe semelhante a G71.

Antes de serem executadas as instruções G71 ou G72 deve-se posicionar a ferramenta no ponto teórico, um ponto próximo a superfície em bruto da peça.

**G73** A P Q U W I K D F S

Onde: - U , W : coordenada do ponto teórico relativas ao ponto final do contorno.



A figura acima, ilustra os Ciclos de Desbaste. (adaptado de IFAO,1984)

**G33** : usinagem de rosca

Sintaxe: G33 X/U Z/W F E M B

Com este comando, inicialmente a ferramenta deve ser posicionada no ponto inicial da rosca com G00 e a seguir chamar a instrução G33 onde X/U,Z/W são as coordenadas do ponto final da rosca em coordenadas absolutas (X,Z) ou incrementais (U,W) ; deve-se informar o passo da rosca F ou E, onde F é em milímetro e E em polegadas; M e B são funções auxiliares que podem ser ativadas. A cada chamada do comando um passe é executado dependendo da altura do filete este comando deve ser chamado repetidas vezes a cada chamada deve-se atualizar as posições inicial e final. Pode-se usinar roscas cilíndricas, cônicas ou transversais com este comando.

**G76**: ciclo de pentear roscas

Sintaxe: G76 X/U Z/W I K H F/E A D

Inicialmente a ferramenta deve ser posicionada no ponto inicial da rosca com G00 e a seguir chamar a instrução G76 onde X/U,Z/W são as coordenadas do ponto final da rosca em coordenadas absolutas (X,Z) ou incrementais (U,W) ; deve-se informar o passo da rosca F ou E, onde F é em milímetro e E em polegadas; I é a distância em X do ponto inicial ao ponto final , para rosca cilíndrica é 0; K é a

profundidade da rosca; H o número de passadas; A é o ângulo de aproximação deve ser ajustado para 5 graus menor que o ângulo de flanco da rosca (roscas métricas ang.flanco 60o então A 55o ) e D é a profundidade do último passe. Pode-se usinar roscas cilíndricas ou cônicas com este comando.

**G83:** ciclo de furação.

Sintaxe: G83 X/U Z/W D H F .

X, Z: posição final; D: profundidade da 1a furação; H: número de repetições do ciclo, a cada repetição a broca retorna ao ponto inicial para proporcionar a remoção dos cavacos e F: avanço.

### **Listagem de Funções "G" (**

Função: G00 Posicionamento Rápido

Função: G01 Interpolação Linear com avanço programável

Função: G02 e G03 Interpolação Circular

Função: G04 Tempo de permanência

Função: G20 Programação em diâmetro

Função: G21 Programação em raio

Função: G30 Cancela imagem espelho

Função: G31 Ativa imagem espelho no eixo "X"

Função: G32 Ativa imagem espelho no eixo "Z"

Função: G33 Ciclo de Roscamento Básico

Função: G37 Roscamento Automático

Função: G40 Cancela Compensação do Raio da Ponta da Ferramenta

Função: G41 Compensação do Raio da Ferramenta ( esquerda )

Função: G42 Compensação do Raio da Ponta da Ferramenta ( direita )

Função: G46 Inibe a velocidade de corte constante

Função: G47 Ativa a velocidade de corte constante

Função: G53 Cancela Todos DPZ's

Função: G54 Ativa o Primeiro DPZ

Função: G55 Ativa o Segundo DPZ

Função: G60 Cancela área de segurança

Função: G61 Ativa área de segurança

Função: G66 Ciclo Automático de Desbaste Longitudinal

Função: G67 Ciclo Automático de Desbaste Transversal

Função: G68 Ciclo Automático de Desbaste paralelo ao perfil final

Função: G70 Admite programa em polegada

Função: G71 Admite programa em milímetro

Função: G73 Interpolação linear ponto-a-ponto

Função: G74 Ciclo de Furação Com Descarga de Cavacos

Função: G75 Ciclo de Canais

Função: G76 Ciclo automático de roscamento (profundidade)

Função: G80 Cancela ciclo automático de furação

Função: G83 Ciclo automático de furação com quebra de cavacos

Função: G90 Programação em Coordenadas Absolutas

Função: G91 Programação em Coordenadas Incrementais

Função: G92 Origem do Sistema de Coordenadas e Limite de Rotação (rpm)

Função: G94 Estabelece Programa de Avanço (pol/min ou mm/min)

Função: G95 Estabelece Programa de Avanço (pol/rotação ou mm/rotação)

Função: G96 Programação em Vc Constante (pés/minuto ou metros/minuto)

Função: G97 Programação em rpm direta

Função: G99 Cancela G92 e define a programação em função do zero máquina

### **Instruções O**

Servem para representar os números de programas e subprogramas.

### **Instruções M**

Possibilitam a programação de funções auxiliares da máquina. Por exemplo: M03 e M04 determinam o sentido de rotação da árvore principal, M30:

indica o fim do programa principal, M00 ou M01 interrompem a usinagem, M07 a M09 ativa ou desativa o uso de fluido refrigerante.

### **Listagem de funções M.**

M00 Parada do Programa

M01 Parada opcional do programa

M02 Fim de Programa

M03 Sentido Horário de Rotação do Eixo Árvore

M04 Sentido Anti-horário de Rotação do Eixo Árvore

M05 Desliga o eixo-árvore

M06 Libera o giro da torre

M08 Liga o Refrigerante de Corte

M09 Desliga o Refrigerante de Corte

M10, M11, M12, M13, M14, Troca de Faixa de Rotação

(\*) M15 Liga ferramenta rotativa no sentido horário

(\*) M16 Liga ferramenta rotativa no sentido anti-horário

(\*) M17 Desliga ferramenta rotativa

(\*) M18 Liga manipulador de peças

(\*) M19 Orientação do eixo-árvore

(\*) M20 Liga aparelho alimentador de barras

(\*) M21 Desliga aparelho alimentador de barras

(\*) M22 Trava o eixo-árvore

(\*) M23 Destrava o eixo-árvore

M24 Abrir placa

M25 Fechar placa

M26 Recuar o mangote do contra-ponto

M27 Acionar o mangote do contra-ponto

(\*) M28 Abrir luneta

(\*) M29 Fechar luneta

M030 Fim de Programa

(\*) M033 Posicionamento do contra-ponto

(\*) M036 Abrir a porta automática

(\*) M037 Fechar a porta automática

(\*) M038 Avançar o aparador de peças

(\*) M039 Recuar o aparador de peças

(\*) M42 Ligar ar para limpeza da placa

(\*) M43 Desligar ar para limpeza da placa

(\*) M50 Subir o braço do leitor de posição da ferramenta (TOOL EYE)

(\*) M51 Descer o braço do leitor de posição da ferramenta (TOOL EYE)

(\*) FUNÇÕES OPCIONAIS

### **Instruções B**

São utilizadas para a programação de funções específicas da máquina e funções adicionais especiais, como por exemplo:

- sistema flexível de manuseio;
- sistema flexível de alimentação;

- acionamento rotativo de ferramentas;
- posicionamento da árvore principal;
- dispositivos de medição.

### **Exemplo de Programa**

O programa apresentado a seguir pode ser utilizado para tornear a peça da figura, além do desenho da peça deve-se conhecer as dimensões da placa: 110 mm, comprimento das castanhas: 30 mm, sobremetal 1 mm e dimensões da peça em bruto:

diâmetro: 80 mm e comprimento: 157 mm.

G59 Z296 deslocamento do ponto zero

N1 T101 M4 chamada de ferramenta

G96 V200

G00 X82 Z0

G01 X-1.8 F0.2 Facear

G71 P50 Q60 I0.5 K0.1 D4 F0.35 desbaste

G26

N2 T202 M4

G96 V300

N50

G46 ativa CRC

G00 X22 Z1 início do contorno final

G01 X28 Z-2 F0.2 chanfro

G01 Z-20

G01 X25 Z-25

G01 Z-47

G02 X45 Z-57 R10

G01 W-28 R8

G01 X75 Z-100

G01 W-30

G01 X81

G00 X81.5

G40

N60

G26

## **18. Interfaces Seriais para Transmissão de Dados;**

Com o desenvolvimento de equipamentos surgiu a necessidade comunicação dos elementos de automação entre si. Linhas de Drivers e receivers são comumente utilizados para permutar dados entre dois ou mais pontos (nós) em uma rede. A confiança na comunicação dos dados pode ser dificultada na presença de ruído, diferenças de níveis, interferência de impedâncias, e outros problemas associados em instalações da Rede.

A conexão entre dois ou mais elementos (drivers e receivers) será considerado do tipo “transmission line” se o intervalo de tempo de subida e descida for menor que metade do tempo necessária para que o sinal trafegue do transmissor até o receptor.

Padrões têm sido desenvolvidos para garantir a compatibilidade entre unidades desenvolvidas por diferentes fabricantes, e para permitir razoável sucesso na transferência de dados em distâncias específicas e/ou na taxa de transferência. A EIA (Electronics Industry Association ) tem produzido padrões para RS485, RS422, RS232 e RS423 que compartilham comunicação de dados. Sugestões geralmente são feitas para solucionar problemas que podem ser encontrados em uma rede típica. Padrões EIA foram previamente marcados com o prefixo “RS” para indicar “padrões recomendados” (recommended standard); entretanto, hoje em dia o “EIA” é utilizado para identificar a organização dos Padrões. Enquanto os padrões trazem uniformidade para as comunicações de dados, muitas áreas ainda não estão padronizadas e se comportam como “áreas de sombra”, onde o usuário deverá descobrir por si mesmo a melhor maneira de proceder.

### **MÉTODO DE TRANSMISSÃO “SINGLE-ENDED”:**

As comunicações de informações eletrônicas entre elementos irão geralmente se enquadrar entre duas categorias: single-ended e diferencial. O RS232 (single-ended) foi introduzido em 1962, e apesar dos rumores de que teria uma vida curta, permaneceu sendo largamente utilizado pelas indústrias. As especificações permitem para transmissão de dados de um transmissor para um receptor baixas taxas ( até 20K bits/segundo) e distancias curtas (ate 50 pés)

Canais independentes são estabelecidos para dois caminhos de comunicação (full-duplex). Os sinais do RS-232 são representados por níveis de voltagem relacionados ao sistema comum. O estado nulo (MARK) tem o nível de sinal negativo em relação ao comum e o estado ativo (SPACE) tem o nível de sinal positivo em relação ao comum.

O RS232 possui numerosas linhas “handshaking” (primeiramente utilizadas com modems) e também especifica um protocolo de comunicação. Em geral se você não estiver conectado a um modem a linha “handshaking” pode apresentar muitos problemas, caso não esteja desabilitada por software. O RTS (Request to send) tem alguma utilidade em certas aplicações. O RS423 e outra especificação single ended com melhoria de operação sobre o RS232; entretanto não tem sido muito usado pela indústria.

### **MÉTODO “DIFFERENTIAL DATA TRANSMISSION”:**

Quando comunicando em altas taxas de transmissão, ou por longas distâncias em ambientes reais, métodos “Single-ended” são geralmente inadequados. O método “differential data transmission” (sinal diferencial balanceado) oferece performance superior na maioria das aplicações. Os sinais diferenciais podem ajudar a anular os efeitos dos sinais de ruído induzido que podem aparecer como modos de tensão comum na rede.

O RS-422 (diferencial) foi designado para maiores distâncias e maiores taxas de transmissões em relação ao RS-232. Na sua forma mais simples, um par de conversores de RS-232 para RS-422 (e vice-versa) pode ser usado para formar uma “Extensão do Rs-232”. Transmissão de dados até 100 Kbps e distâncias até 4000 pés podem ser supridas com o Rs-422. Este padrão é também especificado para aplicações “mult-drop” onde apenas um driver é conectado a, e transmite em, um barramento (“bus”) de até 10 receivers.

Enquanto uma aplicação do tipo “mult-drop” apresenta muitas vantagens desejáveis, equipamentos em RS-422 não podem ser utilizados para construir uma rede multi-ponto confiável. Uma rede verdadeiramente multi-ponto consiste em múltiplos drivers e receivers conectados em um único barramento, onde todos os nós podem transmitir ou receber dados.

Redes “Quasi” multi-drop (4-fios) são geralmente construídas usando equipamentos RS-422. Estas redes normalmente operam no modo “half-duplex”, onde um único “mestre” no sistema envia um comando para um dos muitos equipamentos “escravos” em uma rede. Tipicamente um equipamento é endereçado para que possa receber os dados atribuídos a ele. Sistemas deste tipo (4-fios – half-duplex) normalmente são construídos para evitar problemas de colisão de dados (contenção de barramento).

O padrão RS-485 encontra os requisitos para uma rede multi-ponto confiável, pois especifica padrões para até 32 drivers e 32 receivers um único barramento (2-fios). Com a introdução de repetidores

automáticos e drivers/receivers de alta impedância, esta limitação pode ser estendida para centenas (ou até milhares) de nós em uma rede. O padrão RS-485 aumenta o modo de transmissão comum para os drivers/receivers no modo “tri-state”. Os drivers RS-485 podem resistir a problemas de colisão de dados (contenção de barramento) e a falhas de condições do barramento.

Para resolver o problema da colisão de dados presentes em redes multi-drop, unidades de hardware (conversores, repetidores, controles de microprocessadores) podem ser construídos para ficar em modo de recepção até que os dados estejam prontos para serem transmitidos. Sistemas de um único mestre (muitos outros esquemas de comunicação estão disponíveis) oferecem uma maneira simples de evitar colisão de dados em um típico sistema de 2-fios, half-duplex e multi-drop. O mestre inicia um pedido de comunicação a um “nó escravo” pelo endereçamento desta unidade.

O hardware detecta o bit de inicialização da transmissão e automaticamente habilita o transmissor RS-485. Uma vez enviado o caractere, o hardware volta ao modo de recepção em aproximadamente 1 – 2 microsegundos.

Qualquer número de caracteres pode ser enviado, onde o transmissor irá automaticamente re-disparar com cada novo caractere (ou em muitos casos um esquema temporizador “bit-oriented” é usado em conjunto com uma rede preparada para uma operação automática, incluindo qualquer taxa de transmissão e/ou qualquer especificação de comunicação). Uma vez endereçada, uma unidade “escrava” está pronta para responder imediatamente por causa do curto tempo de duração da transmissão de um equipamento automático. Não é necessário introduzir grandes “delays” em uma rede para evitar colisão de dados. Por que “delays” não são necessários, as redes podem ser construídas com taxa de transmissão de dados de até 100% de “throuput put”.

## **19. Redes de Dados Digitais para Campo;**

### **Transmissão de dados:**

Para a transmissão de informações de processo, como temperatura, pressão, vazão, etc.. são utilizados os elementos ditos transmissores. As transmissão de informação pode ser analógica onde as informações são transmitidas através da modulação de um parâmetro como corrente ou tensão. Exemplo típicos:

- **Sinal de 0-20mA ou 4-20mA**
- **Sinal de 0-10V ou –10-10V**
- **Sinal de 0-5V ou –5-5V;**

Mas existem outras redes de comunicação mais sofisticadas que são as redes digitais que vem substituindo as redes analógicas. Elas são classificadas em três níveis conforme sua posição hierarquica na produção. São elas:

- **SensorBus:** Nível de Sensor-atuador. Conecta os sensores e atuadores a nível de chão de fábrica. Exemplos: AS-i, InterBus Loop, etc.
- **DeviceBus:** É uma rede SensorBus para maiores distâncias (até 500m) e mais equipamentos. Exemplos: ProfiBus DP, SDS, InterBUS S, etc..
- **FieldBus :** São redes para equipamentos mais inteligentes e cobrem distâncias muito maiores. São redes para controle de processos como Loop's PID, e outros Exemplos: ProfiBus PA, HART, FieldBus Foundation, etc..

## REDE AS-i

É um dos tipos de redes digitais mais simples que existe. É limitada e serve para a interligação de sensores e atuadores, daí seu nome (**Actuador Sensor interface**). Dada a sua simplicidade ela apresenta algumas vantagens como excelente relação Custo/Benefício, facilidade de conexão e tempo resposta muito curto: tipicamente gasta-se 5ms para uma troca de informações entre todos os componentes da rede. Ela é composta basicamente por no mínimo um bloco de alimentação e um bloco controlador mestre. É uma rede monomestre, ou seja, todos os demais elementos devem ser escravos. Alguns CLP's já possuem placas de mestre para redes AS-i incorporadas.

Os módulos podem ser de dois tipos:

- **Passivos;**
- **Ativos.**

Os módulos passivos apenas servem como derivações do cabo da rede, não possuindo nenhuma eletrônica inteligente.

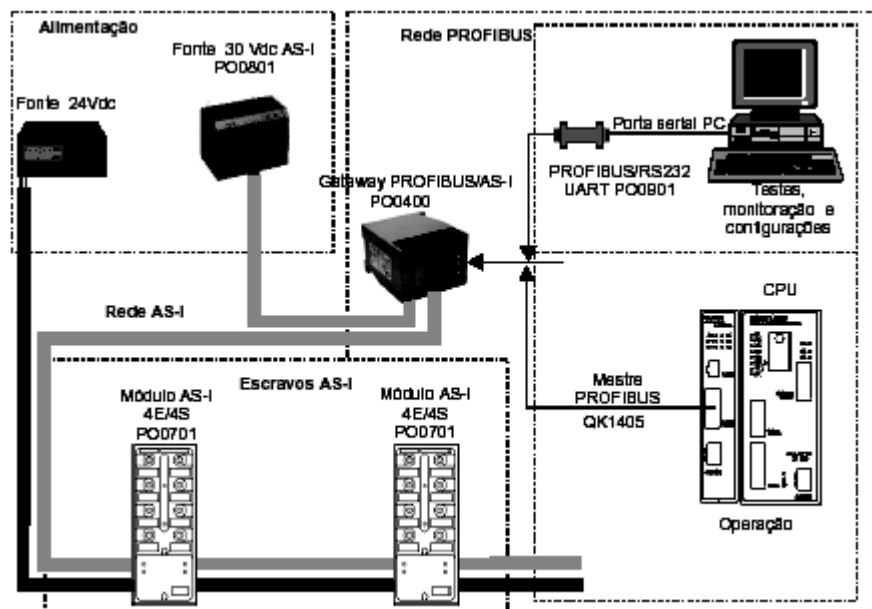
Os módulos ativos, estes sim contem o chip para a rede AS-i, ou seja, são os elementos que conectam os sensores e os atuadores a rede. Estes módulos devem ser previamente programados com um endereço que permitirá ao mestre localizá-lo na rede.

O módulo de alimentação deve ser capaz de atender a toda rede no que tange ao quesito de potência consumida pelos módulos conectados a rede.

A forma de conexão é por meio de um cabo chato de isolamento especial autocicatrizante. As conexões são feitas por meio de uma peça chamada de “vampiro”, que é um elemento composto por duas pequenas hastes metálicas (que lembram dentes de vampiro) e que penetram o isolamento e conectando o elemento ao cabo. Quando retiramos o vampiro, os buracos são fechados pelo próprio isolamento, daí o nome autocicatrizante.

Pela mesma conexão de dados, alimenta-se o módulo, ou seja, usa-se apenas um cabo para alimentação e tráfego de dados, normalmente na cor preta ou amarelada.

Todo o fluxo de informações é controlado pelo bloco mestre, que além disso verifica se houve erros de transmissão o que aumenta a confiabilidade da rede.



Com o uso de gateways, pode-se fazer a interconexão desta rede com redes mais avançadas como a Profibus DP e outras, a fiura ao lado ilustra isto.

A grande vantagem desta rede, em relação as redes analógicas, são a melhor imunidade a ruídos, maior riqueza de informações e maior simplicidade de instalação, uma vez que com um único cabo, interliga-se muitos componentes, ao passo que na rede analógica,

um único par é necessário para cada transmissor, o que faz com que na saída dos CLP's haja uma elevada cablagem, além é claro de dificultar a expansão em razão da necessidade de instalação de novos cabos.

### **PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO – MODBUS:**

**Rede industrial de comunicação:** A faculdade de informar, em tempo real as diferentes partes comandadas de uma linha de produção automatizada, não pode ser utilizada sem uma rede industrial de comunicação. Numa tal rede, as partes comandadas são ligadas entre elas por módulos especializados utilizando protocolos de comunicação bem definidos como por exemplo o MODBUS. Existem vários tipos de redes industriais, mas no caso em estudo utilizamos:

- O sistema tipo MESTRE/ESCRAVO;

Neste tipo de rede, cada terminal programável TES (terminais de entrada/saída) é responsável por uma parte operativa e possui um módulo especializado que lhe permite trocar informação com um sistema informático chamado "mestre do sistema".

A atividade dos escravos na rede consiste em responder às questões emitidas pelo "mestre".

O "mestre" pode questionar um "escravo" em particular e esperar pela sua resposta (modo questão/resposta), ou, pode enviar uma ordem comum a todos os "escravos" (modo difusão).

### **Modo de Comunicação**

**Atividades do "mestre" da rede:** O "mestre" tem quatro atividades:

- 1- Assegurar a troca de informação entre os terminais. Os terminais não podem dialogar entre eles, o "mestre" assegura a passagem das diferentes informações.
- 2- Assegurar o diálogo com o operador do sistema (diálogo homem/máquina). O "mestre" é em geral constituído por um gráfico que permite visualizar de modo dinâmico a evolução do processo em curso. Graças à gestão de eventos pelo "mestre", é possível seguir de modo preciso qualquer processo, com vista a uma manutenção preventiva, prevendo avarias ou incidentes.
- 3- Assegurar um diálogo com outros "mestres" ou com um computador para uma gestão centralizada do conjunto do processo.
- 4- Assegurar a programação ou passagem de parâmetros para os "escravos" a fim de obter a flexibilidade da produção.

**Protocolo MODBUS:** O protocolo MODBUS modo RTU (binário) é um protocolo do tipo "mestre"/"escravo", (um só "mestre" na rede). Em modo questão/resposta, o "mestre" envia uma questão particular a um "escravo", este responde se a mensagem de questão está formulada corretamente. De maneira geral as trocas de informação são relativas à memória de dados dos "escravos". Se esta troca de informação diz respeito à memória de programa, será necessário parar o modo questão/resposta antes de realizar a troca.

Como o "mestre" está ligado, assim como todos os "escravos", sobre uma rede bidirecional, é necessário designar um interlocutor da troca de informação (número de "escravo"). Todos os "escravos" recebem as questões do "mestre", mas só o interlocutor designado responde ao "mestre".

Este conjunto de ligações entre "escravos" é designado de multi-ponto e apresenta a vantagem de reduzir o número de saídas do "mestre".

O protocolo MODBUS é definido pela sintaxe de todas as mensagens transmitidas sobre a rede.

**Codificação de mensagens sobre o Protocolo MODBUS:** As trocas de informação são feitas por iniciativa do "mestre" que envia a questão, o "escravo" destinatário interpreta-a e envia uma resposta. Uma mensagem sobre o protocolo MODBUS é constituída por um conjunto de caracteres hexadecimais, incluindo quatro tipos de informação:

- O número do "escravo" (1 byte), que designa o destinatário da mensagem;
- O código da função a realizar (1 byte), que designa um comando de escrita ou leitura sobre o TES;
- O endereço respectivo (2 bytes), que designa a posição de memória do TES;



- Os dados a transmitir (p bytes), que designa os parâmetros relativos à função;
- Uma palavra de controle (2 bytes), que serve para detectar os erros de transmissão chamada CRC (Cyclic Redundancy Check).

Funções possíveis: Existem três tipos de troca de mensagens - Leitura de dados;

- Escrita de Dados;
- Difusão de dados.

Código hexadecimal das funções a realizar ...

Para realizar uma difusão de dados o endereço ou número do "escravo" (TES) a utilizar deve ser 0 hex. Neste caso todos os "escravos recebem enviada pelo "mestre", executando simultaneamente a sua ordem sem enviarem nenhuma resposta, (caso de sincronização de telecomandos, reset de contadores...).

Estrutura da mensagem entre Mestre -MODBUS- Escravo: Exemplo da estrutura da mensagem a enviar e receber segundo o protocolo MODBUS, para a função leitura de n palavras.

Obs: Trama no gráfico significa 'mensagem'. Gráfico extraído de texto com português de Portugal.  
Exemplo de uma mensagem MODBUS a enviar ao TES: Leitura de 1 palavra do "escravo" número 1, endereço 01 hex <=> leitura do estado das 4 entradas digitais do TES número 1.

Mensagem de questão:

01 04 00 01 00 01 60 0A

Mensagem de resposta:

01 04 02 00 0F F9 34

(caso as 4 entradas do TES estejam a 1 - ativas)

A Mensagem deve ser enviada em ASCII, sem espaços entre os diversos bytes que a constituem e sem caracteres de início e fim de trama.

Considerações: Todos os bytes constituintes da trama, são em hexadecimal. O CRC 16 é constituído por dois bytes hex., estes são invertidos antes de enviados na trama, isto é, o byte menos significativo passa a ocupar o lugar do byte mais significativo e vice-versa. Isto, para um melhor controle de erros de transmissão. O conjunto de todos os bytes constituintes da mensagem, são codificados caractere por caractere em ASCII antes de serem enviados aos TES's. Deve-se ter atenção, por que o TES tem a seguinte configuração fixa: Baud rate = 9600 bps; 8 bits de data; parity even (par); 1 bit de stop, logo o "mestre", deve estar configurado do mesmo modo para estabelecer comunicação com os "escravos" TES. · 1º Exemplo de Utilização industrial do MODBUS (Indicadores de Pesagem): Os modelos de indicadores 3104B Modbus e 3107 Modbus da Empresa Alfa Instrumentos, por exemplo, oferecem suporte ao protocolo de comunicação *Modbus* através da respectiva interface serial, possibilitando usufruir dos avançados recursos em pesagem para controle de processos, existentes nos indicadores da Alfa Instrumentos. Este protocolo é largamente utilizado para estabelecer comunicações tipo mestre-escravo entre dispositivos inteligentes através da sua estrutura flexível e eficaz de troca de mensagens. O protocolo Modbus opera à taxas de transmissão de 19200 bps, sem paridade e 2 stop bits (configuráveis), estando implementado nos modos RTU e ASCII, através do canal serial RS- 232 para comunicação ponto-a-ponto (estrela) ou RS-485 para padrão multi-ponto (barramento), configurado para operar como um elemento escravo desta rede.

Os indicadores de pesagem Alfa Instrumentos modelos 3104B Modbus e/ou 3107 Modbus podem ser conectados a uma única rede serial Modbus, formando juntamente com outros dispositivos já existentes no mercado, uma solução de automação rápida, simples e segura, aliada a todas as vantagens já conhecidas que a comunicação serial pode oferecer.

Através dessa configuração é possível ter acesso a todos os comandos disponíveis no protocolo Alfa Instrumentos, possibilitando a troca de informações necessárias para o total controle do processo em pesagem, tais como:

- Leitura contínua do peso apresentado pelo mostrador de pesagem (peso líquido ou bruto);

- Leitura individual dos níveis de corte 1,2 e 3 já programados;
- Programação individual de novos valores para os níveis de corte 1,2 e 3;
- Leitura de códigos que permitem monitorar alterações de configuração no equipamento que no sejam autorizadas (segurança anti-fraudes);
- Leitura do valor da tara armazenada;
- Leitura do peso acumulado;
- Acionamento das funções de Tara, Peso Bruto, Zero e Destrava dos Níveis de Corte;
- Verificação dos parâmetros de calibração.

Pelo fato do protocolo *Modbus* estar bem difundido no mercado, a maioria dos fabricantes de sistemas supervisórios e IHMs disponibilizam device drivers que agilizam a integração de equipamentos que se comunicam em *Modbus* em uma rede industrial.

Exemplo :

- **2º Exemplo de Utilização do Protocolo MODBUS e Padrão RS-485 (monitoração de energia).**

Trata-se de um sistema com as seguintes funções:

- Monitoração de energia junto a medição da concessionária;
- Funções de controle de demanda, fator de potência e programação horária, com capacidade de atuação sobre até 60 cargas, através da utilização de módulos de acionamento CCK 512;
- Acompanha software de gerenciamento para microcomputadores com o sistema de operacional WINDOWS;

A unidade CCK 5100 possui como canais de comunicação:

- **Porta de programação** : no padrão ETHERNET – 10 Mbits/Seg com protocolo de comunicação em TCP/IP, que permite a programação, leitura dos dados registrados na memória do equipamento, supervisão em tempo real;
- **Porta de Supervisão** : no padrão RS 485/RS 232 (selecionável por JUMPER) permite, via protocolo MODBUS RTU, a supervisão, em tempo real do consumo de energia;
- **Porta de controle** : no padrão RS 485, é nesta porta que são conectados os módulos de acionamento CCK 512 para o controle da demanda, fator de potência e programação horária via protocolo MODBUS RTU. Cada módulos CCK 512 possui 12 relés de acionamento, podendo ser conectado ao CCK 5100 até 5 módulos CCK 512, num total de 60 RELÉS;

**Especificações:**

- Canal serial para entrada do sinal de medição da concessionária de energia elétrica, totalmente compatível com o protocolo ABNT, preparado pela CE- 03:066.02 – Comissão de Estudos de Medidores Eletrônicos de Medição de Energia Elétrica do CB-03 – Comitê Brasileiro de Eletricidade que prevê a atualização das medidas a cada segundo;
- Sincronismo de data / hora do equipamento com a data e o horário do medidor de energia elétrica da Concessionária garantido pelas informações contidas no protocolo ABNT;
- Porta de comunicação RJ45 para conexão em ETHERNET, velocidade de comunicação de 10 Mbits, protocolo de comunicação TCP/IP para comunicação com o programa para microcomputadores SW CCK PC 6000 que acompanha ao SISTEMA CCK 5100;
- Porta de comunicação serial RS 485 ou RS 232C, protocolo de comunicação MODBUS RTU para onde são disponibilizadas informações para supervisão, onde são informados dados como: consumo de energia elétrica, estado (ligada/desligada) das cargas controladas, etc;
- Porta de comunicação serial RS 485 utilizada para a comunicação em MODBUS RTU com os módulos de acionamento CCK 512 para o controle de demanda, fator de potência e programação horária;
- Memória de massa com 35 dias contínuos de dados de medição em médias integradas de 15 minutos, sendo que na chegada do 36º dia, o primeiro dia é apagado;

- Retenção de dados em caso de falha de energia por até 10 (dez) dias;
- Registro dos índices de qualidade de energia exigidos pela ANEEL: DIC (duração em minutos de todas as interrupções de energia ao consumidor), FIC (número de interrupções de energia ao consumidor) e DMIC (duração da maior interrupção de energia ao consumidor);
- Alimentação bi-volt automática em 90 a 250 VAC, com opção para 110/ 220 VCC;
- Condicionamento em caixa metálica com grau de proteção IP 55;
- Operação em condições ambientais de 0 a 40° C e umidade relativa do ar de até 95%.