



AQÜISIÇÃOS DE DADOS

SEGUNDA
EDIÇÃO

Werther Serralheiro

1 - Introdução

1.1 Princípios de Instrumentação

Existe a necessidade do ser humano de obter informações do meio ambiente, e a partir destas informações será possível modelar os fenômenos observados. Neste item iremos abordar vários princípios básicos para sistemas de aquisição de dados.

1.1.1 Informação

Informação é aquilo que gera um significado na mente humana modificando nosso conhecimento. O termo informação tem três usos principais:

Em linguagem comum ela relaciona uma coleção de fatos, idéias, entidades, conceitos e atributos que definem um sujeito ou objeto. (Ex. Enciclopédia).

Em teoria de informação se refere à quantidade transferida numa mensagem passando por um canal de comunicação.

Em Instrumentação aplicam-se os dois conceitos já que nos sistemas de medidas deve-se mapear a variável (isto é codificar a medida) e ainda transmiti-la através de um canal de comunicação.

Nas ciências naturais a informação pode ser quantificada, definido-se a menor quantidade de informação (Ex. bit), ela pode ser representada de diversas formas , mas sempre limitada a um certo tipo de portador de energia ou massa.

1.1.2 Medição

Medição é o processo empírico e objetivo de designação de números a propriedades de objetos ou eventos do mundo real de forma a descreve-los. Outra forma de explicar este processo é comparando a quantidade ou variável desconhecida com um padrão definido para este tipo de quantidade, implicando então num certo tipo de escala.

Tipos de medidas

- Medida Nominal: Quando duas quantidades do mesmo tipo são comparadas para saber se são iguais (Ex. duas cores , acidez de dois líquidos)
- Medida Ordinal: Quando é necessário ter informação a tamanhos relativos (Ex. Classificação por peso e altura de uma turma)

- **Medida em Intervalos:** Quando deseja-se uma informação mais específica, envolve-se então uma certa escala, sem incluir pontos de referência ou zero. (Ex. no caso anterior usar a escala de metros e quilogramas)
- **Medidas Normalizadas:** Define-se um ponto de referência e realiza-se a razão, dividindo cada medida pelo valor de referência, determinando as magnitudes relativas. (Ex. O maior valor obtido será 1, quando foi escolhido como referência o valor máximo medido)
- **Medidas Cardinais:** O ponto de referência é comparado com um padrão definido. Assim todo parâmetro físico pode ser medido contra uma referência padrão, como o Sistema Internacional de medidas SI. Na Figura 3 representa o sistema internacional de unidades com as unidades básicas e as derivadas.

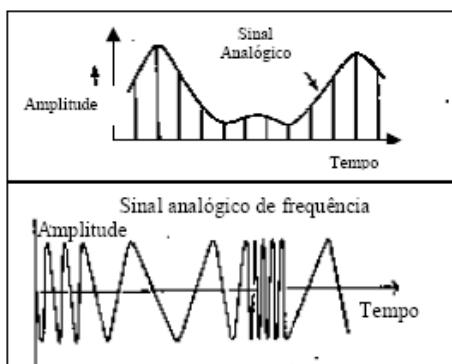
1.1.3 Sinais

Nenhuma informação pode ser carreada desde uma fonte a um receptor sem algum transporte de energia ou massa, esta informação, vem como uma mudança de estado ou modulação da portadora de energia ou massa, isto é chamado de sinal.

Sinais então podem tomar a forma de variações de parâmetros, como pressão, deflexão de um feixe de luz, deslocamentos mecânicos, etc. Quatro tipo de sinais podem ser identificados:

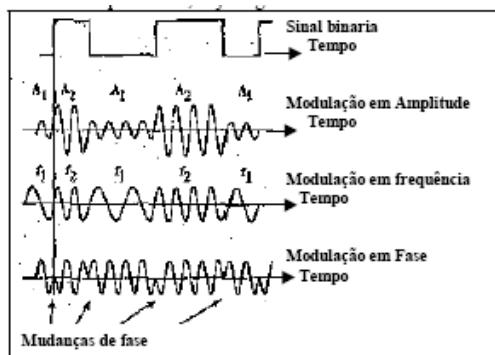
Series temporais analógicas

Sinais cuja amplitude ou freqüência varia analogicamente no tempo, como na figura abaixo.



Sinais periódicos

São sinais que podem transportar a informação através de uma modulação analógica da amplitude, freqüência ou fase da portadora.



Sinais amostrados

São sinais que possuem valores discretos eqüidistantes no tempo, estes sinais podem ser multiplexados temporalmente podem realizar diversos tipos de modulação como:

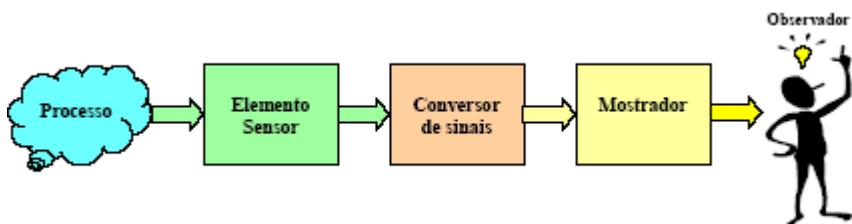
- PAM (Modulação por amplitude de pulso)
- PWM (Modulação por largura de pulso)
- PPM (Modulação pela posição do pulso)
- PCM (Modulação por pulso codificado)
- A/D (Conversão analógica/Digital)

Sinais estocásticos

Neste caso o valor instantâneo do sinal é descrito por uma função densidade de probabilidade em relação ao espaço e tempo. (Ex. ruído branco)

1.1.4 Sistema geral de medida

Os sistemas de medidas apresentam geralmente três elementos constituintes, mostrado na figura abaixo:

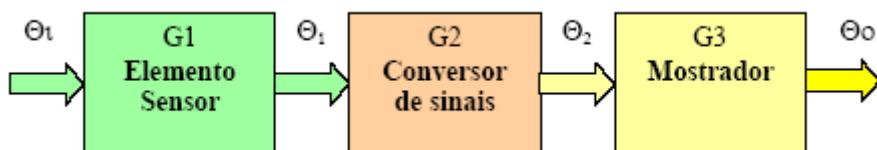


Função de transferência

Em condições de estado estacionário define-se função de transferência de um sistema como a razão entre o sinal de saída Θ_o e o de entrada Θ_i :

$$G = \frac{\Theta_o}{\Theta_i}$$

De acordo com o diagrama de blocos anterior para cada elemento constituinte do sistema teremos uma função de transferência própria, conforme figura abaixo.



Desta forma teremos que as funções de transferência do elemento sensor (G1), conversor de sinais (G2) e elemento mostrador (G3)

A função de transferência do sistema pode-se escrever assim:

$$G = G1 \times G2 \times G3$$

1.2 Características estáticas dos Instrumentos

1.2.1 Sensibilidade

A sensibilidade de um instrumento define-se como sendo a razão entre a mudança y na saída, causada por uma mudança x na entrada:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

A diferença com função de transferência é que esta reflete também os aspectos dinâmicos do instrumento.

1.2.2 Ganho

O ganho de um sistema ou instrumento define-se como a saída dividida pela entrada:

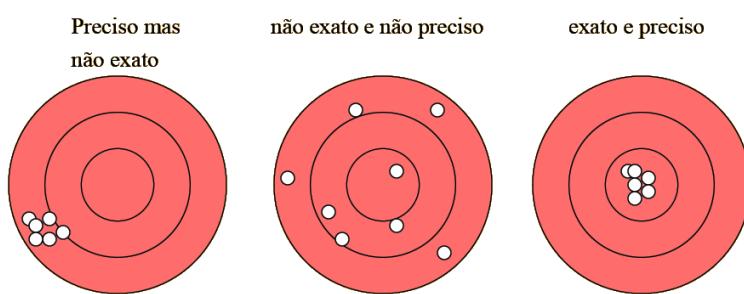
$$G = \frac{y}{x}$$

1.2.3 Exatidão

Qualidade da medição que assegura que a medida coincide com o valor real da grandeza considerada. O valor representativo deste parâmetro é o valor médio. Quando o valor real ou correto é conhecido, a exatidão garante a rastreabilidade da medição. Isso significa que o valor pode passar de um laboratório para outro, sempre mantendo a medida exata. Este parâmetro é expresso, em geral como porcentagens do fundo de escala

1.2.4 Precisão

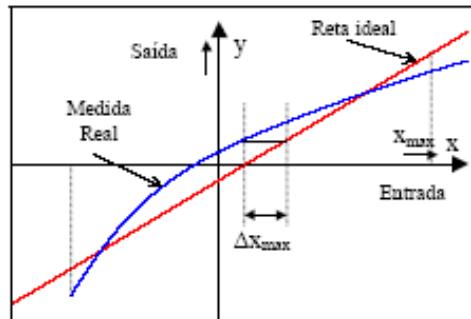
Qualidade da medição que representa a dispersão dos vários resultados, correspondentes a repetições de medições quase iguais, em torno do valor central. É usualmente associado ao erro padrão. Este parâmetro é expresso, em geral como porcentagens do fundo de escala.



1.2.5 Linearidade

A linearidade de um instrumento indica a máxima aproximação da relação entrada – saída, com uma determinada linha reta. Geralmente quantifica-se a não-linearidade expressando-se como porcentagem do fundo de escala assim,

$$\%NL = \left(\frac{\Delta x_{\max}}{x_{\max}} \right) \cdot 100$$



1.2.6 Offset

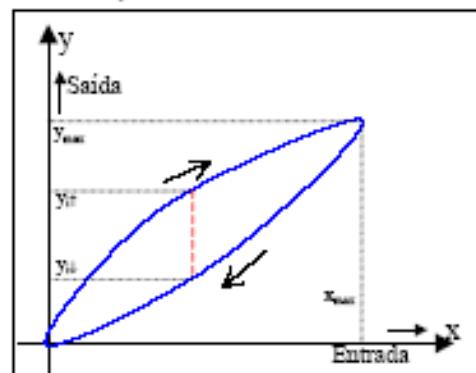
Define-se como o desvio de zero do sinal de saída quando a entrada é zero

1.2.7 Repetibilidade

E a capacidade do instrumento de reproduzir as mesmas saídas, quando as mesmas entradas são aplicadas, na mesma seqüência e nas mesmas condições ambientais. Este valor é expresso como sendo o valor pico da diferença entre saídas, em referência ao fundo de escala e em porcentagem.

1.2.8 Histerese

Quando um certo valor de entrada é atingido, a primeira vez quando os valores de entrada estão aumentando, e a segunda vez quando eles estão diminuindo, a diferença das saídas é chamada de histerese, a qual pode ter diversas causas físicas. Calcula-se a este parâmetro como sendo o valor pico da diferença das saídas, em referência ao fundo de escala e em porcentagem.



$$H = \frac{\max(y_{i\uparrow} - y_{i\downarrow})}{F.S.}$$

1.2.9 Resolução

Define-se como o menor incremento de entrada o qual gera uma saída perceptível e repetitiva, quantificando-se como porcentagem do fundo de escala.

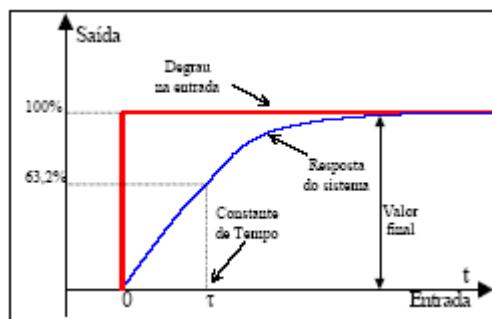
$$Res = \frac{\min(y)}{F.S.}$$

1.3 Características dinâmicas dos Instrumentos

Alguns termos que caracterizam um sistema dinamicamente serão apresentados a seguir:

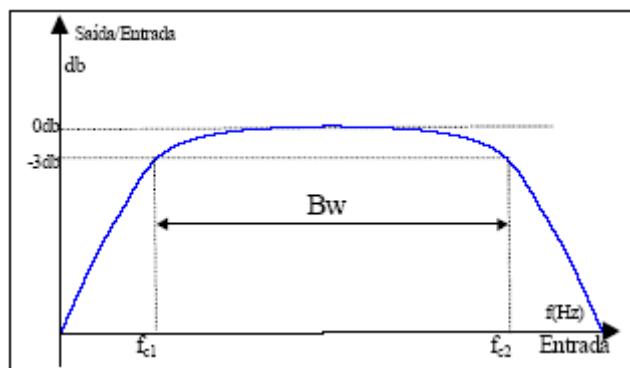
1.3.1 Constante de tempo

Quando um sistema é submetido a uma entrada que apresenta uma variação abrupta (Ex. degrau), a saída toma um certo tempo para atingir seu valor final. A constante de tempo (τ) de um sistema é definida como o tempo que esse sistema toma para atingir 63,2 % do seu valor final.



1.3.2 Resposta em frequência (Largura de Banda)

Quando o sinal aplicado a um instrumento apresenta uma variação com a frequência, chama-se resposta em frequência deste instrumento, a mudança da relação saída / entrada do instrumento, usualmente dado em dB (decibeis). Define-se também largura de banda (Bw) como a faixa de frequência cuja relação (Saída/entrada) normalizada encontra-se entre 0 e -3 dB.



2 - Sensores Discretos

2.1 Característica Elétricas de Sensores

Neste item iremos estudar o comportamento do chaveamento elétrico do sinal que indica o estado no qual o sensor está monitorando.

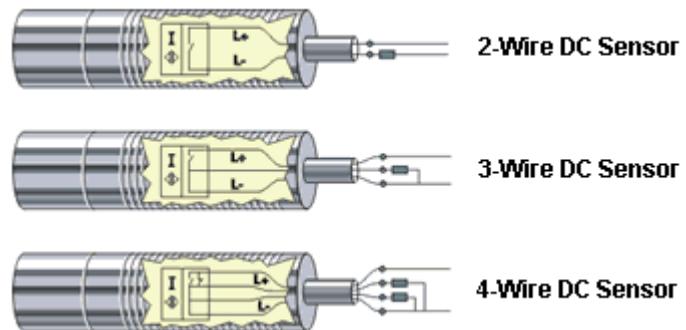
2.1.1 Sensores de Contato

Os sensores de contato são comutadores a 2 fios e chaveiam a condução elétrica entre estes dois fios através de um contato metálico, chamado de *contato seco*.

2.1.2 Sensores de Corrente Contínua

Os sensores de corrente contínua são comutadores a 2, 3 ou 4 fios dependendo do número de saídas que possuem. Estes elementos executam chaveamento em estado sólido, ou seja, não existe movimentação mecânica de contatos.

O esquema de ligação dos sensores de corrente contínua é composto por dois fios para alimentação e pode ter mais um ou os dois fios para sinalização dependendo do número de saídas.

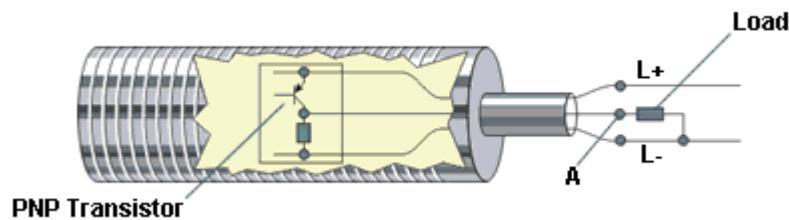


2.1.3 Polaridade

Para sensores de 3 ou 4 fios, a polaridade do transistor que irá realizar a comutação do sinal é importante para a correta ligação da carga que o sensor irá acionar.

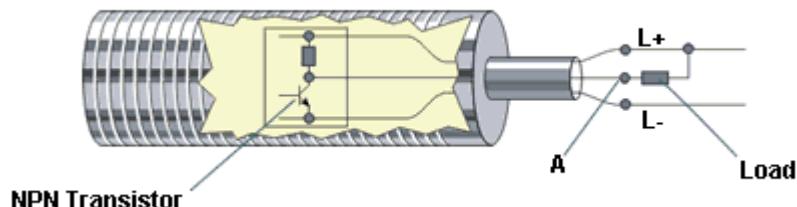
Sensor Tipo PNP

No sensor tipo P (PNP), a carga a ser comandada deve ser ligada entre a saída do sensor e o negativo, desta forma o transistor de saída do sensor comuta a saída ao potencial positivo.



Sensor Tipo NPN

No sensor tipo N (NPN), a carga a ser comandada deve ser ligada entre a saída do sensor e o positivo, desta forma o transistor de saída do sensor comuta a saída ao potencial negativo.

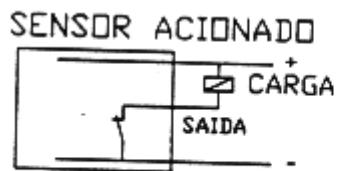


2.1.4 Função de Saída

A função de saída de um sensor define o estado de saída com o produto em repouso e o sentido de comutação quando o sensor é acionado. Existem dois sentidos possíveis de comutação o que determina a existência de três tipos de função de saída para os sensores indutivos.

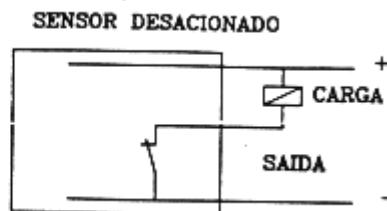
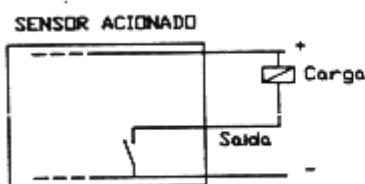
Saída NA (Normalmente Aberto)

Nos sensores com saída NA, a mesma está aberta e portanto a carga desenergizada quando o sensor está desacionado. Ao ser aproximado um acionador ao sensor ocorre o fechamento da saída e a carga é energizada.



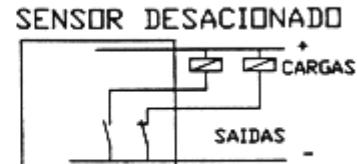
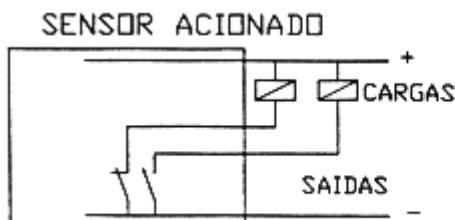
Saída NF (Normalmente Fechado)

Nos sensores com saída NF, a mesma está fechada e portanto a carga energizada quando o sensor está desacionado. Ao ser aproximado um acionador ao sensor ocorre a abertura da saída e a carga é desenergizada.



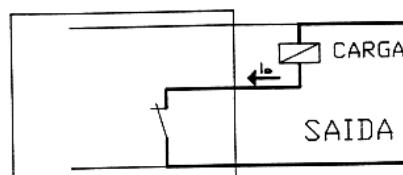
Saída NA + NF (Antivalente)

Os sensores com saída antivalente possuem NA e NF simultaneamente. Quando o sensor é acionado, a saída que está aberta, fecha e a que está fechada, abre, invertendo os contatos.



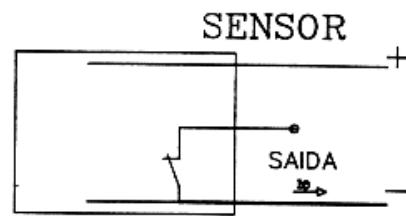
2.1.5 Corrente de Saída “ Ia “ (mA)

Corrente de carga define a faixa de corrente que o sensor pode drenar em sua saída sem ultrapassar os valores que comprometeriam o funcionamento do produto.



2.1.6 Corrente de Consumo “ I_o ” (mA)

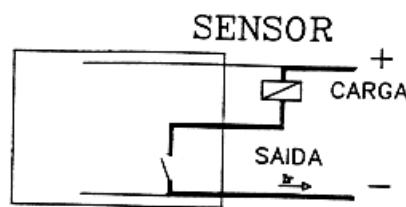
Corrente de consumo é a corrente que o circuito do sensor consome para se manter em condições de funcionamento. A corrente de consumo é medida no circuito de alimentação e não é necessário que a saída esteja conectada à carga para efetuar a medição. A corrente de consumo de sensores de corrente contínua está geralmente na faixa de algumas dezenas de miliampéres. Esta corrente é mencionada e tem importância apenas no cálculo da fonte para a alimentação do sensor.



2.1.7 Corrente Residual “ I_r ” (mA)

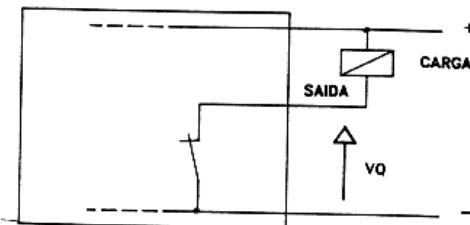
Corrente residual é a corrente que continua a fluir pela saída do sensor mesmo quando esta está desenergizada (aberta).

Na verdade o que ocorre é que o transistor mesmo na condição de corte, continua drenando corrente na ordem de algumas dezenas ou centenas de microampéres. Esta corrente normalmente não é suficiente para atuar qualquer carga, porém se a impedância desta for muito elevada observaremos uma queda de tensão sobre a carga, mesmo com a saída do sensor a comanda aberta.



2.1.8 Queda de Tensão (Vcc)

Queda de tensão é a tensão residual medida sobre a saída do sensor quando a mesma estiver fechada (carga energizada). Para os sensores NA isto ocorre quando houver metal na região ativa do sensor e para os NF, ocorre quando não houver metal na região ativa.



A queda de tensão sobre a saída do sensor, é resultado da soma da queda de tensão sobre os componentes existentes no circuito eletrônico de saída. Normalmente o valor da queda de tensão, está entre 1 e 4 Vcc, em função das características de saída tais como: proteção contra curto-circuito, inversão de polaridade, etc. A queda de tensão também varia para um mesmo sensor em função da corrente de carga que está sendo comutada, sendo que quanto maior esta corrente, maior será a queda de tensão resultante. A queda de tensão é uma característica muito importante, pois a diferença entre a tensão em que o sensor está sendo alimentado e a queda de tensão na saída do mesmo é que determinam qual a tensão realmente aplicada sobre a carga, quando estiver energizada.

2.1.9 Tensão de Isolação (KV)

Tensão de isolamento do sensor é a tensão a que o sensor é submetido entre seu invólucro e os fios da alimentação e saída sem permitir que seja criado arco voltaico. Esta característica é importante para evitar que, em instalações onde haja falha de aterramento, o sensor e mesmo o sistema como um todo seja danificado.

A tensão de isolação de um sensor gira em torno de 1KV sendo mais freqüentemente definido para os sensores de corrente alternada.

2.1.10 Associação de Sensores

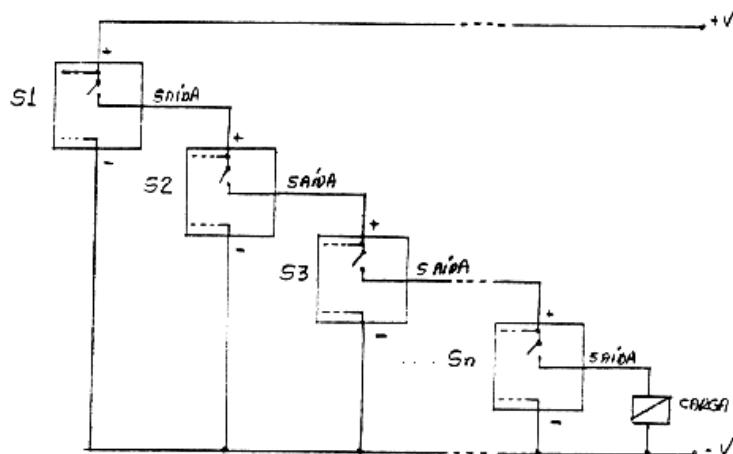
Os sensores de proximidade indutivo de corrente contínua a 3 ou 4 fios, necessitam em varias oportunidades, serem associados para atender às aplicações existentes. Os sensores podem ser associados em serie(executam a função “E”) , em paralelo (executam a função “OU”) ou ainda uma associação mista (executam a função “E” e/ou “OU”).

Qualquer das associações mencionadas devem ser acompanhadas de uma serie de cuidados para que o sistema apresente o desempenho esperado. Na seqüência podemos ver com maiores detalhes cada tipo de associação que pode ser executado.

Associação Série (Função “ E ”)

Na associação serie ou função “E” os sensores são ligados em serie comandando uma única carga. Para a carga ser energizada é necessário que todas as saídas estejam conduzindo, e basta que uma delas não esteja no estado de condução para que a carga fique desenergizada. Obs: Um sensor acionado(com metal na região ativa) tem sua saída energizada somente se esta for do tipo NA. Isto é muito importante lembrar quando se faz associações de sensores misturando NA e NF.

Na seqüência podemos observar o esquema de ligação da associação serie de sensores.



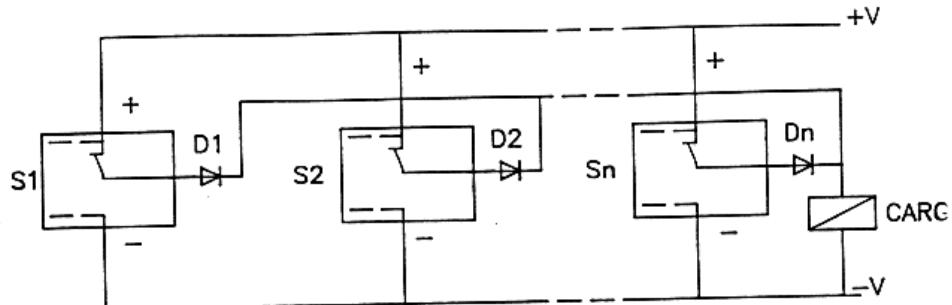
Obs: No exemplo acima os sensores são tipo PNP.

Associação Paralelo (Função “ OU ”)

Na associação paralelo ou função “OU”, os sensores são ligados em paralelo comandando uma única carga. Para a carga ser energizada é necessário que pelo menos uma das saídas esteja conduzindo, enquanto que para a carga estar desenergizada é necessário que todas as saídas não estejam conduzindo.

Obs : Um sensor acionado (com metal na região ativa) tem sua saída energizada somente se esta for do tipo NA . Isto é muito importante lembrar quando se faz associações de sensores misturando NA e NF.

Podemos observar abaixo o esquema de ligação da associação paralela de sensores.



Obs. Os diodos colocados , tem a função de evitar que o LED de todos os sensores sinalizem quando qualquer um deles seja acionado.

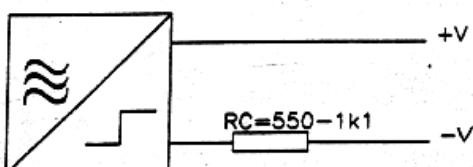
2.1.11 Sensores NAMUR

O sensor NAMUR é um sensor um que apresenta como característica de detecção, as mesmas de um sensor convencional, porém suas características elétricas são particulares e seguem as orientações da NORMA DIN 19234, também conhecida como NORMA NAMUR.

A referida norma regulamenta as características elétricas necessárias para sensores destinados a operarem em áreas de classificação (área explosiva). Estas características são baseadas no baixo potencial elétrico comandado pelo sensor o que impossibilita a ocorrência de faiscamentos em caso de falhas que possam ocorrer na instalação ou mesmo no próprio sensor.

Esquema de ligação

O sensor NAMUR deve ser ligado em série a uma carga resistiva definida.



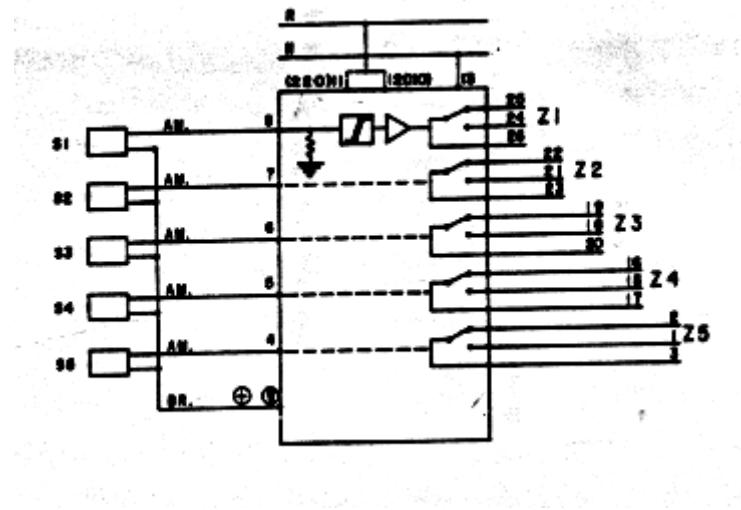
Tensão de alimentação

A tensão de alimentação para os sensores namur é de 7,7 à 9,0 Vcc.

Amplificador NAMUR

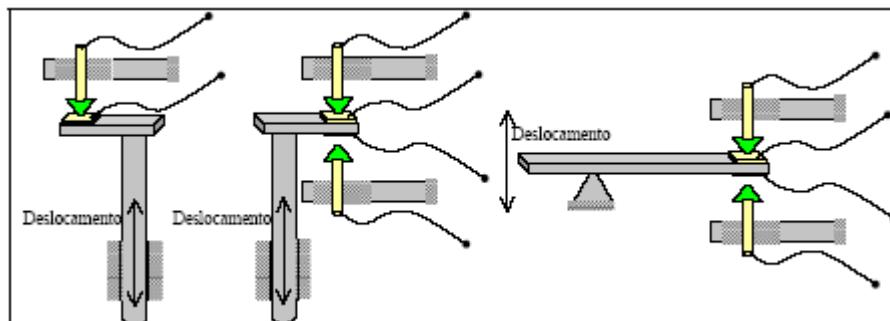
A Norma NAMUR define as características que um sensor deve apresentar para ser instalado em áreas classificadas de forma a atender as condições de segurança exigidas para estas áreas. Porém a utilização de sistemas de sensoriamento em tais áreas só é adequada quando os sensores NAMUR são ligados a amplificadores NAMUR. Estes amplificadores também projetados para atender às necessidades da Norma NAMUR, são elementos que fornecem alimentação e resistência de carga

compatíveis com as exigidas pelos sensores NAMUR. Além disto estes amplificadores também em função da Norma trazem incorporados isolação galvânica, proteção contra rompimento de cabo e curto circuito. Existem vários modelos de amplificadores NAMUR em função do numero de sensores que podem alimentar, da tensão em que são alimentados e do tipo de chaveamento de estado sólido ou contato seco.



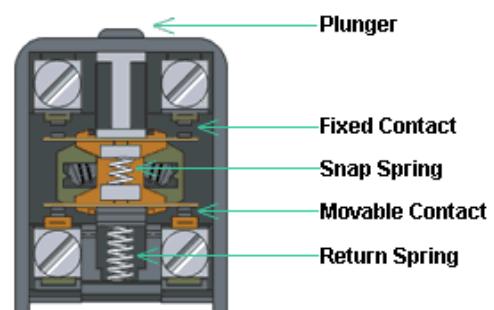
2.2 Sensores Eletromecânicos

Sensores eletromecânicos são sensores que se utilizam de um deslocamento mecânico para efetuar um contato entre condutores elétricos. Veja a figura abaixo.



2.2.1 Componentes construtivos

Um sensor eletromecânico possui basicamente um elemento de deslocamento sensor, um jogo de contatos elétricos (fixo e móvel) que se desloca através de uma mola de compressão de contatos e outra de retorno, como na figura ao lado.



2.3 Sensores de Proximidade Indutivos

Nos processos de produção automatizados, sensores são usados para uma variedade de controles e regulação de atividades. Eles coletam variáveis físicas, químicas e mecânicas. Detectar a presença dos objetos e suas posições, são entre outras, funções dos sensores.

O sensor de proximidade indutivo é um componente eletrônico utilizado para a sinalização e posicionamento na automação de máquinas e processos. Em função de seu princípio de detecção (somente detecta metal) onde o sensor não necessita manter contato mecânico com o atuador para executar o sensoriamento, e do tipo de chaveamento executado com semicondutores, a vida útil deste componente é extremamente elevada quando devidamente utilizada. Além da vida útil elevada, os sensores de proximidade indutivos apresentam inúmeras vantagens em relação dos componentes até então utilizadas (exemplo: chave fim de curso mecânica) tais como, resposta em freqüência elevada, grau de proteção, dimensões reduzidas e sinal de saída compatível com os equipamentos eletrônicos, destinados a automação.

O sensor de proximidade indutivo é o tipo de sensor mais divulgado e utilizado mundialmente, principalmente em função de sua característica de detectar objetos metálicos o que possibilita sua aplicação em diversos segmentos de mercado. Outro fator importante é o preço deste sensores, muito mais barato que outros modelos como o óptico, capacitivo, etc.

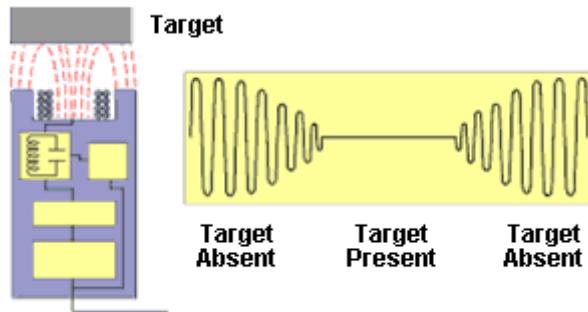
Sensores indutivos ocupam uma importância especial nestas aplicações devido ao princípio de não haver contato quando em operação, sua construção robusta e o tempo de resposta torna-o ideal para o uso em aplicações industriais, além das razões econômicas.

Aplicações dos sensores indutivos:

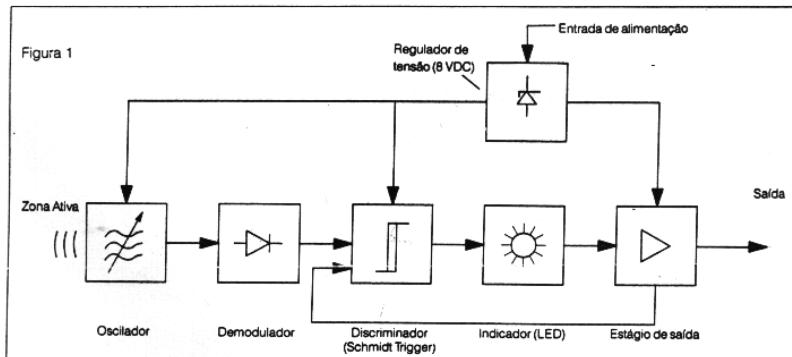
- Confirmação de posição;
- Monitoração de movimento;
- Contagem de pulso;
- Monitoração de velocidade;
- Detecção de direção de velocidade;
- Monitoração da não existência de carga

2.3.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do sensor indutivo baseia-se na existência de um oscilador e uma bobina que geram um campo eletromagnético criando assim uma região ativa do sensor faz com que o campo eletromagnético seja atenuado alterando os níveis internos de corrente do oscilador. Esta variação do nível de corrente é transferida para um comparador pré-calibrado que determinará o estado de saída do sensor. O circuito de saída constituído por componentes eletrônicos executam o chaveamento comandando a carga, a estes conectados.



Na figura a seguir pode-se observar o diagrama de blocos de um sensor de proximidade indutivo.



2.3.2 Característica de Detecção do Sensor Indutivo

Neste item veremos as características de sensoriamento e precauções que devem ser tomadas na instalação do sensor, para não comprometer o desempenho do mesmo.

Distância de Acionamento “S” (mm)

Distância de açãoamento é a distância em milímetros entre a placa de açãoamento (acionador) e a face ativa do sensor, no momento em que ocorre a comutação do mesmo.

Distância de Açãoamento Nominal “Sn” (mm)

Distância de açãoamento nominal, como o próprio nome diz, refere-se a um valor nominal, o qual é mencionado como dado de catálogo. A distância de açãoamento nominal é sempre mencionada em milímetros.

Distância de Açãoamento Real “Sr” (mm)

Distância de açãoamento real, é o valor obtido para o sensor, admitindo-se as variáveis de fabricação. Esta distância é medida com o sensor sendo alimentado em tensão nominal e a temperatura de 20°C. Nestas condições a distância de açãoamento real não deve variar mais que 10% em relação à distância de açãoamento nominal.

$$Sr = Sn \pm 10\%$$

Distância de Acionamento de Trabalho “St “ (mm)

Distância de acionamento de trabalho, é o valor obtido em condições de tensão de alimentação e temperatura especificadas para o produto. A distância de acionamento de trabalho não deve variar mais que 10% em relação a real.

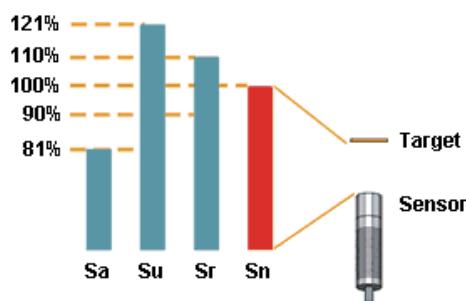
$$St = Sr \pm 10\%$$

Distância de Acionamento de Assegurada “Sa “ (mm)

Distância de açãoamento de assegurada é a distância em que se garante o açãoamento do sensor. Ela está entre a face sensora e o ponto mínimo da distância de açãoamento de trabalho.

$$0 \leq \text{Sa} \leq 0.81 \text{ Sn}$$

As várias distâncias mencionadas nos itens anteriores podem ser verificadas na ilustração abaixo.



2.3.3 Fator de Redução em Função do Material

Dependendo do material do alvo, a distância de acionamento do sensor deve ser multiplicada por um fator de redução que definirá seu novo alcance. Na tabela abaixo, temos o fator de redução para os materiais mais comumente utilizados como alvo para os sensores.

MATERIAL	FATOR DE REDUÇÃO
Aço SAE 1020	1,00 x S
Cromo Níquel	0,89 x S
Aço Inóx	0,70 x S
Latão	0,50 x S
Alumínio	0,40 x S
Cobre	0,33 x S

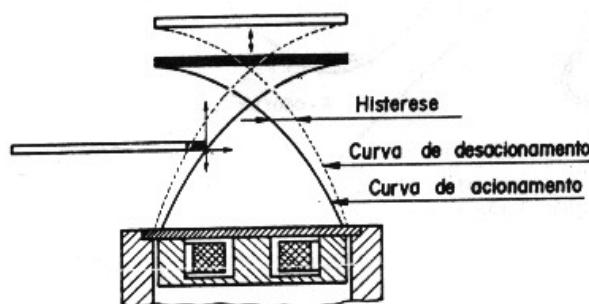
2.3.4 Histerese "H" "(%)

Histerese é a característica que define a diferença do deslocamento entre o ponto de acionamento e desacionamento do sensor. A histerese é sempre definida porcentualmente em relação à distância de acionamento real.

Conforme as NORMAS EN 50008 e EN 50036 a histerese deve ser enquadrada da seguinte forma:

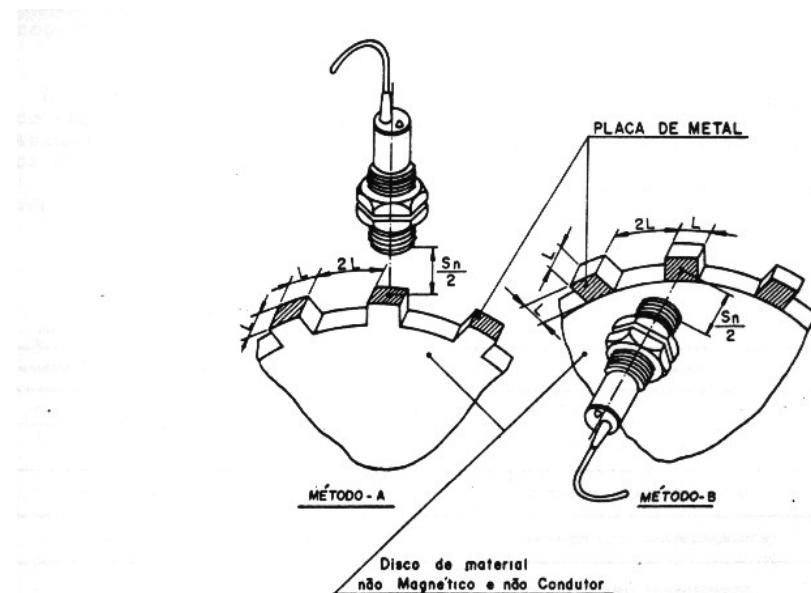
- **Para sensores CC** $0,01 \times Sr \leq H \leq 0,15 Sr$
- **Para sensores CA** $0,03 \times Sr \leq H \leq 0,20 Sr$

A histerese, bem como, todas as características de acionamento do sensor são definidas para a placa padrão de acionamento e a aproximação da mesma, frontal à face sensora. Na figura abaixo pode-se observar a curva característica que determina a histerese do sensor.



2.3.5 Freqüência de Comutação "Fc" (Hz)

Freqüência de comutação é o limite máximo que o sensor pode comutar sua saída com segurança. A forma de medição pode ser efetuada tanto pelo método A como B, conforme mostra figura a seguir.



Onde L é definido como sendo igual ao lado da placa padrão de medição.

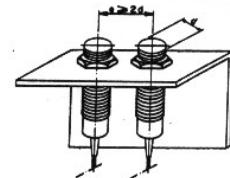
Nos testes, os dentes da roda devem ter as dimensões do acionador padrão ($L \times L$), para aquele caso, e o intervalo entre os dentes deve ser de $2 \times L$. O sensor em teste deve ser instalado de tal forma que a face sensora do mesmo fique a $Sn/2$ do dente do acionador. Estas características são definidas pela NORMA EN 50010 e determinam a freqüência máxima de comutação do sensor.

2.3.6 Formato do Sensor Indutivo

Os sensores indutivos são basicamente divididos em formato cilíndrico, retangular e quadrado de acordo com os seguintes critérios:

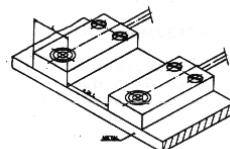
Formato Cilíndrico

Os sensores de formato cilíndrico são aqueles em que, a região onde está localizada a face sensora, é cilíndrica.



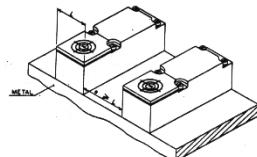
Formato Retangular

Os sensores de formato retangular são aqueles em que, a região onde está localizada a face sensora, é retangular.



Formato Quadrado

Os sensores de formato quadrado são aqueles em que, a região onde está localizada a face sensora, é quadrado.



Embora este critério para definir o formato do sensor seja bastante utilizado, ele não chega a ser universal de tal forma que pode-se encontrar fabricantes que não utilizem este princípio. Também não é raro encontrar fabricantes que definam seus produtos apenas como "CILINDRICO" OU "BLOCO"(Referência aos sensores não cilíndricos)

2.3.7 Forma de Instalação de um Sensor Indutivo

O sensor indutivo em função de suas características é definido para ser instalado de forma "embutida" ou "não embutida". A definição do tipo de instalação que o sensor será adequado, é definido no projeto do produto, uma vez que os sensores para instalação embutida são fabricados com uma blindagem na bobina geradora de campo eletromagnético, o que impossibilita a interferência de materiais metálicos que estejam próximos a ele (exceto a superfície sensora).

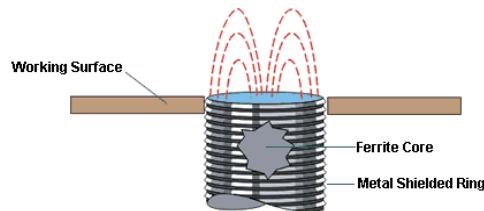
Os sensores fabricados para serem instalados de forma embutida podem também ter instalação não embutida, enquanto que o contrário não é possível, pois comprometeria a atuação do sensor.

2.3.7.1 Instalação embutida (Faceada)

Os sensores indutivos projetados para instalação embutida, tem sua bobina geradora de campo eletromagnético blindada por uma fita metálica que impede a ação de material metálico colocado próximo à superfície do sensor (exceto a superfície da face ativa).

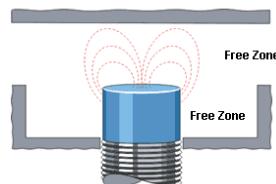
Com isto os sensores para instalação embutida apresentam geralmente distância de açãoamento inferior à daqueles do mesmo tamanho destinados à instalação não embutida. Isto ocorre porque a blindagem impede que as linhas de campo sejam projetadas pela lateral da bobina, o que possibilitaria maior alcance destas e consequentemente maior distância sensora.

Os sensores para instalação embutida ou faceada podem então ser instalados com a face sensora no mesmo nível de um material metálico sem prejudicar o funcionamento do produto.

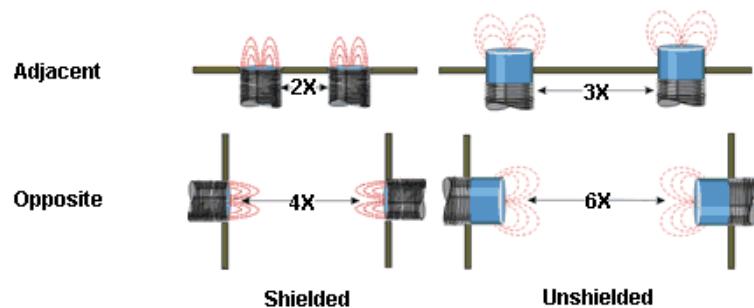


2.3.7.2 Instalação Não Embutida (Saliente)

Os sensores indutivos projetados para instalação não embutida, não tem sua bobina geradora de campo eletromagnético blindada por uma fita metálica, o que possibilitará a ação de material metálico colocado próximo ao sensor. Isto possibilita que estes sensores apresentarem distâncias de açãoamento superior à daqueles do mesmo tamanho destinados a instalação embutida. Isto ocorre porque, como não existe blindagem na bobina geradora de campo eletromagnético, as linhas de campo são projetadas pela lateral da bobina, o que possibilita maior alcance destas e consequentemente maior distância sensora.



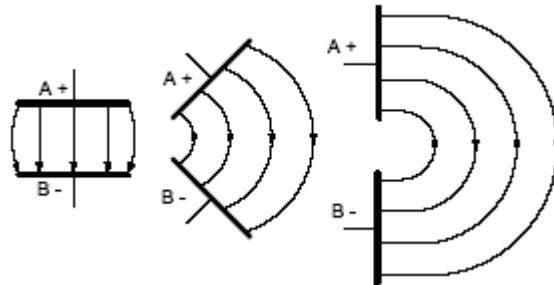
Os sensores para instalação não embutida ou saliente não podem então serem instalados com a face sensora no mesmo nível de um material metálico, pois isto prejudicaria o funcionamento do produto. A distância "h" que deve ser mantida do material metálico a superfície sensora, é um dado definido por cada fabricante.



2.4 Sensores de Proximidade Capacitivos

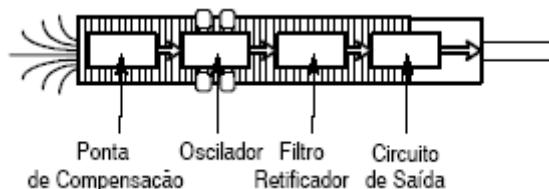
2.4.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento baseia-se na geração de um campo elétrico, desenvolvido por um oscilador controlado por capacitor. O capacitor é formado por duas placas metálicas, carregadas com cargas elétricas opostas, montadas na face sensora, de forma a projetar o campo elétrico para fora do sensor, formando assim um capacitor que possui como dielétrico o ar.



Quando um material aproxima-se da face sensora, ou seja, do campo elétrico, o dielétrico do meio se altera, alterando também o dielétrico do capacitor frontal do sensor. Como o oscilador do sensor é controlado pelo capacitor frontal, quando aproximamos um material, a capacitância também se altera, provocando uma mudança no circuito oscilador. Esta variação é convertida em um sinal contínuo, que comparado com um valor padrão, passa a atuar no estágio de saída.

Sensores de proximidade capacitivos são projetados para operar gerando um campo eletrostático e detectando mudanças neste campo causadas quando um alvo se aproxima da face ativa. As partes internas do sensor consistem em uma ponta capacitiva, um oscilador, um retificador de sinal, um circuito de filtragem e um circuito de saída, como mostra a figura abaixo.



Na ausência de um alvo, o oscilador está inativo. Quando o alvo se aproxima, ele aumenta a capacitância do circuito com a ponta de compensação. Quando a capacitância atinge um valor determinado, o oscilador é ativado, o que ativa o circuito de saída a faz com que ele comute seu estado (de “aberto” para “fechado” ou vice-versa).

A capacitância do circuito com a ponta de compensação é determinada pelo tamanho do alvo, sua constante dielétrica e distância até a ponta. Quanto maior o tamanho e a constante dielétrica de um alvo, mais este aumenta a capacitância. Quanto menor a distância entre a ponta e o alvo, maior a capacitância.

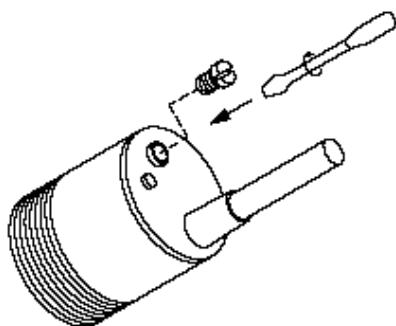
2.4.2 Face Sensora

É a superfície onde emerge o campo elétrico. É importante notar que os modelos não embutidos, com região sensora lateral, são sensíveis aos materiais a sua volta.

2.4.3 Ajuste de Sensibilidade:

O ajuste de sensibilidade dos sensores capacitivos é protegido por um parafuso, que impede a penetração de líquidos e vapores no sensor.

O ajuste de sensibilidade presta-se principalmente para diminuir a influência do acionamento lateral no sensor, diminuindo-se a distância sensora. Permite ainda que se detecte alguns materiais dentro de outros, como por exemplo: líquidos dentro de garrafas ou reservatórios com visores de vidro, pós dentro de embalagens, ou fluidos em canos ou mangueiras plásticas.



2.4.4 Alvo Padrão e Aterramento para Sensores de Proximidade Capacitivos

O alvo padrão para sensores de proximidade capacitivos é o mesmo que para sensores de proximidade indutivos. O alvo é aterrado de acordo com normas de teste IEC. Entretanto, um alvo numa aplicação típica não necessita estar aterrado para se ter uma detecção confiável.

2.4.5 Fatores de Correção

Para um determinado tamanho do objeto-alvo, os fatores de correção para sensores capacitivos são determinados segundo a constante dielétrica do material do alvo. Materiais com constantes dielétricas altas são mais fáceis de detectar que aqueles com valores mais baixos. Segue uma lista parcial de constantes dielétricas para alguns materiais industriais típicos.

Para maiores informações, consulte o CRC Handbook of Chemistry and Physics (CRC Press), o CRC Handbook of Tables for Applied Engineering Science (CRC Press) ou outras fontes de referência.

Constantes Dielétricas de Materiais Industriais Conhecidos

Acetona 19,5	Cereal 3-5	Mármore 8,0-8,5	Polietileno 2,3
Açúcar 3,0	Cimento em Pó 4,0	Mica 5,7-6,7	Polipropileno 2,0-2,3
Água 80	Cinza Queimada 1,5-1,7	Nylon 4-5	Poliestireno 3,0
Álcool 25,8	Cloro Líquido 2,0	Óleo de Soja 2,9-3,5	Sal 6,0
Amônia 15-25	Etanol 24	Óleo de Transformador 2,2	Soluções Aquosas 50-80
Anilina 6,9	Farinha 1,5-1,7	Leite em Pó 3,5-4	Teflon 2,0
Ar 1	Freon R22 e 502 (líquido) 6,11	Papel 1,6-2,6	Vaselina 2,2-2,9
Areia 3-5	Gasolina 2,2	Papel Saturado de Óleo 4,0	Vidro 3,7-10
Benzeno 2,3	Glicerina 47	Parafina 1,9-2,5	
Borracha 2,5-35	Madeira Seca 2-7	Petróleo 2,0-2,2	
Celulóide 3,0	Madeira Úmida 10-30	Porcelana 4,4-7	

2.4.5.1 Sensores Capacitivos Blindados Vs. Construção Não Blindada

Cada sensor de proximidade capacitiva pode ser classificado por possuir construção blindada ou não blindada.

Sensor Blindado

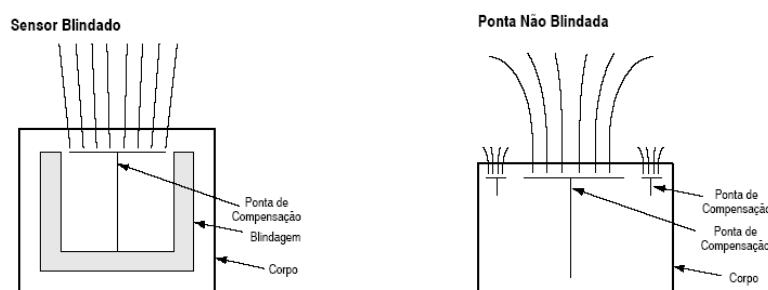
Os sensores blindados são construídos com uma faixa de metal ao redor do sensor. Isso ajuda a direcionar o campo eletrostático para a frente do sensor e resulta em um campo mais concentrado.

A construção blindada permite que o sensor seja montado rente em um material sem causar uma falsa comutação.

Os sensores de proximidade capacitivos blindados são mais indicados para a detecção de materiais de constantes dielétricas baixas (difícil de detectar), devido aos seus campos eletrostáticos altamente concentrados. Isto permite a eles detectar alvos que sensores não-blindados ignoram.

Sensor Não Blindado

Os sensores não blindados não possuem uma faixa de metal ao redor do sensor e consequentemente possuem um menor campo eletrostático concentrado. Muitos modelos não blindados são equipados com pontas de compensação, as quais fornecem aumento na estabilidade para o sensor.



As versões não-blindadas são também mais adequadas que as versões blindadas para uso com suportes plásticos para sensores, um acessório projetado para aplicações onde se faz a detecção de nível de líquido. O suporte é montado através de um furo num tanque e o sensor é inserido no receptáculo do suporte. O sensor detecta o líquido no tanque através da parede do suporte.

O campo eletrostático de um sensor não-blindado é menos concentrado do que o da versão blindada. Isto os torna mais indicados para detectar materiais de constantes dielétricas altas (fáceis de detectar) ou para diferenciar entre materiais de constantes altas e baixas. Para certos materiais do alvo, os sensores de proximidade capacitivos em versão não-blindada apresentam alcance maior que aqueles em versão blindada.

As versões não-blindadas são equipadas com uma ponta de compensação que permite que o sensor ignore névoa úmida, poeira, pequenas quantidades de sujeira e pequenos respingos de óleo ou água que se acumulem no sensor. A ponta de compensação também melhora a resistência do sensor para variações em umidade do ambiente.

2.5 Sensores Óticos

Sensores fotoelétricos são usados em muitas aplicações e indústrias para fornecer detecção precisa de objetos sem contato físico com os mesmos. Na sua forma mais básica, um sensor fotoelétrico pode ser concebido como um dispositivo “tipo chave fim-de-curso”, onde o acionador mecânico ou a alavanca é substituída por um feixe de luz.

Os sensores fotoelétricos operam percebendo uma mudança na quantidade de luz que é refletida ou bloqueada por um objeto a ser detectado (alvo). A mudança na luz pode ser o resultado da presença ou ausência do alvo ou então resultado de mudança no tamanho, forma, refletividade ou cor de um alvo.

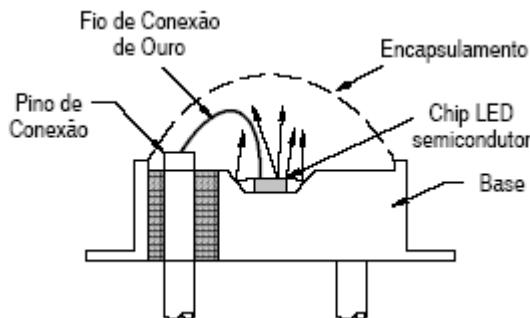
Um sensor fotoelétrico pode ser usado em aplicações para detectar alvos a distâncias de menos de 5 mm (0,2 pol) até mais de 250 m (820 pés). Para uma aplicação bem-sucedida com um sensor fotoelétrico é necessário que o objeto a ser detectado (alvo) cause uma mudança suficiente no nível de luz percebido pelo sensor e que o usuário tenha um entendimento completo dos requisitos para uma detecção confiável.

2.5.1 Conceitos Básicos e Blocos Funcionais

A princípio existem quatro blocos funcionais em um sensor fotoelétrico:

- Fonte de luz
- Sensor de luz
- Lentes
- Saída

2.5.1.1 Fonte de Luz



Um diodo emissor de luz (LED) é um componente eletrônico semicondutor em estado sólido que emite luz quando a corrente é aplicada. A figura acima mostra a construção de um LED. Os LEDs são feitos para emitir luz com comprimentos de onda ou cores específicos. LEDs com luz infravermelha, vermelha visível, verde e azul são usados como emissores de luz na maioria dos sensores fotoelétricos.

LEDs de cores diferentes oferecem diferentes características de detecção.

LEDs infravermelhos são os mais eficientes, geram mais luz e menos calor que qualquer LED de outra cor.

LEDs infravermelhos são usados em sensores onde a máxima saída de luz é necessária para um alcance estendido.

Em muitas aplicações, um feixe de luz visível é desejável para facilitar a instalação ou confirmar o funcionamento do sensor. Luz vermelha visível é a mais eficiente para atender este requisito.

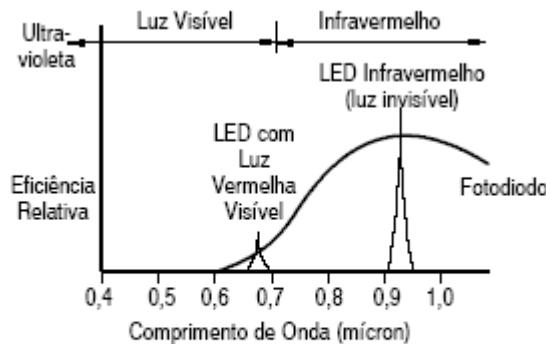
LEDs vermelhos visíveis, azuis e amarelos também são usados em aplicações especiais onde cores específicas ou contrastes de cor devem ser detectados. Estes LEDs também são usados como indicadores de estado (saída, diagnóstico, alarme) em sensores fotoelétricos.

LEDs são componentes resistentes e confiáveis, o que os torna ideais para uso em sensores fotoelétricos. Eles operam em uma larga faixa de temperatura e são muito resistentes a danos decorrentes de vibração e choque.

2.5.1.2 Sensor de Luz

O sensor de luz (ou fotossensor) é o componente eletrônico usado para detectar a fonte da luz. Um fotodiodo ou fototransistor são componentes robustos em estado sólido que causam uma mudança na corrente conduzida dependendo da quantidade de luz detectada.

Fotossensores são mais sensíveis a certos comprimentos de onda de luz. A resposta espectral de um fotossensor determina sua sensibilidade a diferentes comprimentos de onda no espectro da luz. Para melhorar a eficiência de detecção, o LED e o fotossensor são, freqüentemente, casados espectralmente. Um exemplo é mostrado na figura abaixo.

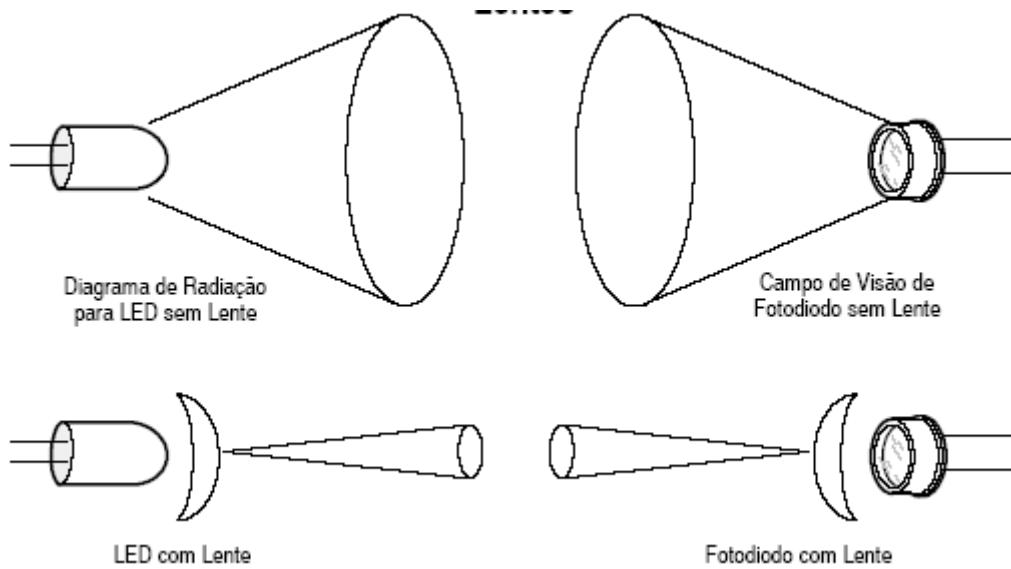


O LED com luz invisível (infravermelha) forma um par spectral para este fototransistor de silício e tem eficiência muito maior que um LED com luz visível (vermelha).

2.5.1.3 Lente

Os LEDs emitem luz sobre uma grande área e os fotossensores percebem esta luz também em uma grande área.

Lentes são usadas em frente ao emissor de luz LED e ao fotossensor para estreitar esta área. À medida que a área é estreitada, o alcance do LED ou do fotossensor aumenta. Como resultado, as lentes também aumentam o alcance de funcionamento para sensores fotoelétricos, como demonstra a figura abaixo.



O feixe de luz de uma combinação de LED e lente é tipicamente de formato cônico. A área da base do cone aumenta com a distância à lente. Alguns sensores fotoelétricos são otimizados para grande alcance. O feixe de luz (e por consequência o campo de visão) emitido por estes sensores é bastante estreito.

Entretanto, o alinhamento pode ser difícil se o campo de visão for muito estreito. Outros sensores fotoelétricos são projetados para detecção de objetos sobre uma grande área. Estes sensores têm um campo de visão mais largo, mas um alcance total mais curto.

2.5.1.4 Saída

Uma vez que uma mudança suficiente no nível de luz é detectada, o sensor fotoelétrico comuta um dispositivo de saída para prover um sinal para o controlador lógico a que o sensor está conectado. Muitos tipos de saídas de sinal discreto ou variável (análogo) estão disponíveis, cada uma com vantagens e desvantagens particulares.

2.5.2 Margem

A Margem (margem de operação, ganho excedente) é um conceito importante que deve ser bem entendido quando se aplicam sensores fotoelétricos. A necessidade de reajustes e intervenções do usuário numa aplicação pode ser minimizada quando se obtém os melhores níveis de margem para aquela aplicação.

A margem expressa a quantidade de luz emitida pela fonte de luz que é detectada pelo receptor. A margem é melhor explicada pelo exemplo:

- Uma margem 0 (zero) ocorre quando nenhuma luz gerada pelo emissor pode ser detectada pelo sensor de luz.
- Uma margem de 1 (um) é obtida quando a luz detectada é exatamente suficiente para comutar o estado do dispositivo de saída (de DESLIGADO para LIGADO ou de LIGADO para DESLIGADO).
- Uma margem de 20 é alcançada quando o receptor detecta 20 vezes mais a quantidade de luz necessária para comutar o estado do dispositivo de saída.

A margem é definida como:

$$\frac{\text{Quantidade real de luz detectada}}{\text{Quantidade mínima necessária para comutar o estado do dispositivo de saída}}$$

e é normalmente expressa como uma relação ou como um número inteiro seguido por "X". Uma margem de 6 pode ser expressa como 6:1 ou 6X.

2.5.3 Modulação do LED

A quantidade de luz gerada pelo emissor é determinada pela quantidade de corrente que é conduzida. Para aumentar o alcance de um sensor fotoelétrico, a quantidade de corrente deve ser aumentada. Entretanto, os LEDs também geram calor—há um limite superior de quantidade de calor que pode ser gerado antes que um LED seja danificado ou destruído.

Nos sensores fotoelétricos, o emissor é comutado rapidamente, interrompendo-se sua corrente numa cadência muito acelerada. Um ciclo de carga baixo (tipicamente menor que 5 %) permite a quantidade da corrente e portanto, a quantidade de luz emitida excedam o que seria permitível sob operação contínua

2.5.4 Detecção Síncrona

O receptor é projetado para detectar a fonte de luz pulsante vinda de um emissor de luz modulada. Para aumentar ainda mais a confiabilidade da detecção, o receptor e o emissor são sincronizados. O receptor espera pulsos de luz que são idênticos àqueles pulsos gerados pelo emissor. A detecção síncrona ajuda um sensor fotoelétrico a

ignorar pulsos de luz de outros sensores fotoelétricos por perto ou de outras fontes de luz pulsante, tais como lâmpadas fluorescentes.

A detecção síncrona somente é possível quando o emissor e o receptor estão num mesmo corpo, o que é verdade para todos os modos de detecção, exceto o de feixe transmitido, como é explicado abaixo.

2.5.5 Modos de Detecção Fotoelétricos

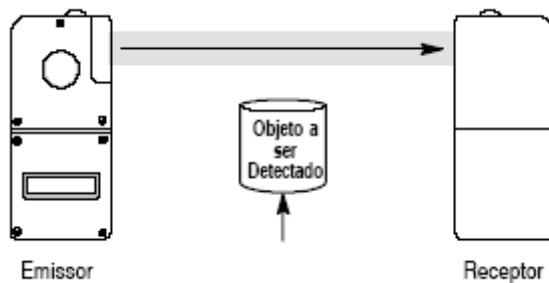
Os métodos diferentes de detecção são chamados de modos de detecção. Os diferentes modos de detecção são basicamente três:

- Feixe transmitido (às vezes chamado de feixe direto, sistema barragem ou barreira)
- Feixe retro-refletido (ás vezes chamado de sistema reflex)
- Feixe difuso (também conhecido como sistema de Proximidade)

Enquanto muitos problemas de aplicação podem ser resolvidos por qualquer um destes modos de detecção, cada um deles oferece vantagens e precauções a considerar.

2.5.5.1 Feixe Transmitido

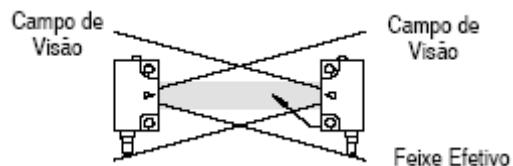
Neste modo o emissor e o receptor estão contidos em corpos separados. Estas duas unidades são posicionadas opostamente entre si, de modo que a luz do emissor atinja diretamente o receptor. O alvo deve interromper (bloquear) o feixe entre emissor e receptor.



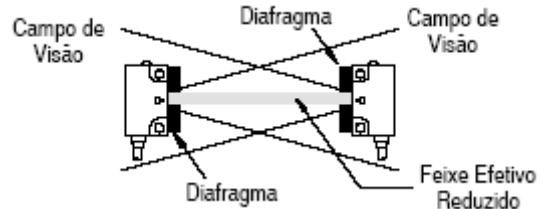
Sensores de feixe transmitido fornecem o maior alcance e o maior nível de margem de operação. Margens em aplicações de feixe transmitido com faixas menores que 10 m (3,1 pés) podem exceder 10000X.

Por este motivo, o feixe transmitido é o melhor modo de detecção quando se opera em ambientes industriais muito empoeirados ou sujos.

O “feixe efetivo” de um sensor de feixe transmitido é equivalente ao diâmetro da lente do emissor e do receptor. A detecção confiável ocorre quando o alvo é opaco e bloqueia pelo menos 50 % do feixe efetivo.



A detecção de objetos menores que o feixe efetivo pode ser melhor conseguida pela redução do diâmetro do feixe, usando-se diafragmas colocados na frente do emissor e do receptor. Diafragmas estão disponíveis para a maior parte dos sensores de feixe transmitido. Alguns usuários têm criado seus próprios diafragmas para outras famílias de sensores.

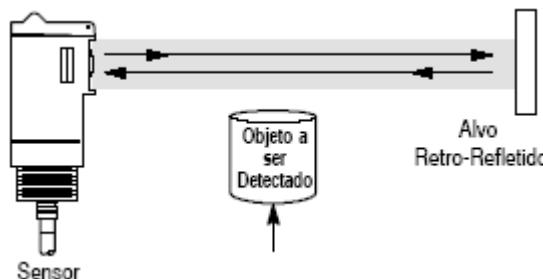


A aplicação de feixe transmitido mais confiável possui uma elevada margem quando o alvo estiver ausente e uma margem zero (ou próxima a zero) quando o alvo estiver presente.

A detecção por feixe transmitido pode não ser adequada para a detecção de alvos transparentes ou translúcidos: a alta margem permite que o sensor “veja através” destes alvos. Apesar de ser freqüentemente possível reduzir a sensibilidade do receptor, a detecção por feixe retro-refletido ou difuso-refletido pode fornecer uma solução melhor.

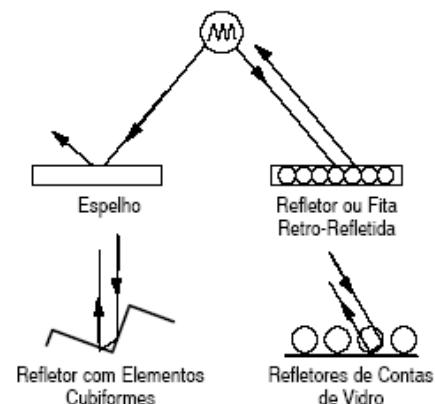
2.5.5.2 Feixe Retro-Refletido

Feixe retro-refletido (reflex) é o modo de detecção mais popular. Um sensor com feixe retro-refletido contém tanto o emissor quanto o receptor em um mesmo corpo. O feixe de luz gerado pelo emissor é refletido por um objeto refletivo especial e detectado pelo receptor. O alvo é detectado quando ele bloqueia o feixe de luz.



Refletores especiais ou fitas refletoras são usadas para a detecção retro-refletida. Ao contrário de espelhos ou outras superfícies reflexivas planas, estes objetos refletivos não precisam ser alinhados de forma perfeitamente perpendicular ao sensor. O desalinhamento de um refletor ou fita refletora de até 15°, tipicamente, não vai reduzir significativamente a margem do sistema de detecção.

Os sensores por feixe retro-refletido são mais fáceis de instalar que os sensores de feixe transmitido. Somente a unidade emissor/receptor (num mesmo corpo) deve ser instalada e conectada. Entretanto, a margem quando o alvo está ausente é tipicamente 10 a 1000 vezes menor que aquelas na detecção por feixe transmitido, tornando a detecção por feixe retro-refletido menos desejável em ambientes altamente contaminados.



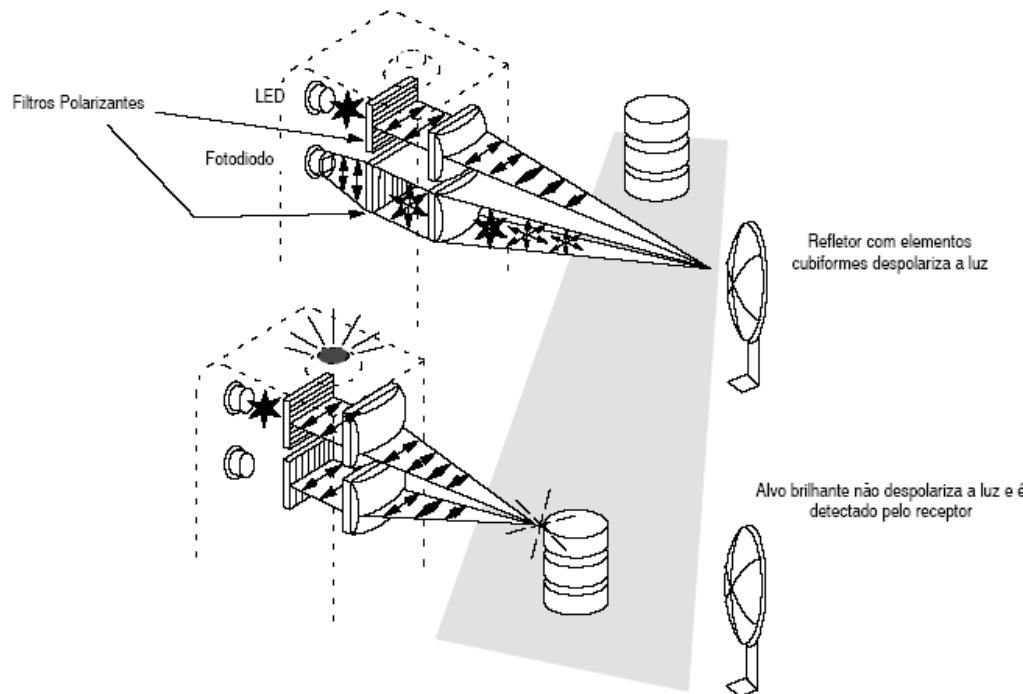
Deve ser tomado cuidado quando se aplicar sensores por feixe retro-refletido comuns em aplicações onde alvos brilhantes ou altamente refletivos devem ser detectados. As reflexões do próprio alvo podem ser detectadas. Às vezes é possível orientar o sensor e o refletor ou fita refletora de modo que o alvo brilhante reflita luz para longe do receptor. Entretanto, para a maior parte das aplicações com alvos brilhantes, a detecção por feixe retro-refletido com luz polarizada oferece uma solução melhor.

Os sensores por feixe retro-refletido com luz polarizada contêm filtros polarizadores na frente do emissor e do receptor. Estes filtros são perpendiculares ou defasados entre si em 90°.

Os sensores por feixe retro-refletido com luz polarizada oferecem alcance 30-40 % menor (e menor margem) que os sensores por feixe retro-refletido padrões. Ao invés de LEDs infravermelhos, os sensores por feixe retro-refletido polarizados devem usar um emissor de luz visível menos eficiente (tipicamente um LED de luz vermelha visível). Estão presentes perdas de luz adicionais causadas pelos filtros polarizadores.

Os sensores com luz polarizada vão ignorar somente as reflexões de “primeira superfície” de uma superfície reflexiva. A luz polarizada é despolarizada à medida que passa através da maior parte dos filmes (películas de plástico transparente) ou embalagens plásticas. Portanto, um objeto brilhante, quando embrulhado em filme plástico transparente, pode criar reflexões que são detectadas pelo receptor. Neste caso, o objeto brilhante torna-se a “segunda superfície” atrás da embalagem plástica. Devem ser considerados outros modos de detecção para estas aplicações.

Todos os refletores padrões despolarizam a luz e são adequados para a detecção com luz polarizada retro-refletida. Entretanto, a maior parte das fitas refletoras não despolariza a luz e são indicadas somente para uso com sensores por feixe retro-refletido padrões. Estão disponíveis fitas refletoras especialmente construídas para a detecção de feixes retro-refletidos polarizados. Procure sempre fitas refletoras especialmente indicadas para uso com sensores por feixe retro-refletido com luz polarizada.

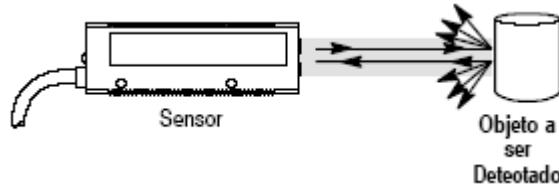


2.5.5.3 Feixe Difuso

A detecção por feixe transmitido ou retro-refletido com luz polarizada cria um feixe de luz entre o emissor e o receptor ou entre sensor e refletor. É necessário o acesso às duas faces opostas do alvo.

Algumas vezes é difícil, ou até impossível, obter acesso a ambos os lados de um alvo. Nestas aplicações, é necessário apontar o emissor diretamente para o alvo. A luz emitida é espalhada pela superfície de todos os ângulos e uma pequena parte é refletida de volta para ser detectada pelo receptor contido no mesmo corpo.

Este modo de detecção é chamado de detecção por feixe difuso ou proximidade.



Existe uma gama de submodos diferentes para a detecção por feixe difuso. A mais simples, difuso padrão, é discutida aqui. Outros tipos, difuso de corte fino, difuso com foco fixo, difuso com grande abertura e difuso com supressão de fundo são explicados em seções posteriores. O objetivo da detecção difuso padrão é obter uma margem relativamente alta quando se detectar o alvo. Quando o alvo estiver ausente, as reflexões de qualquer fundo atrás do alvo devem prover uma margem tão próxima de zero quanto possível.

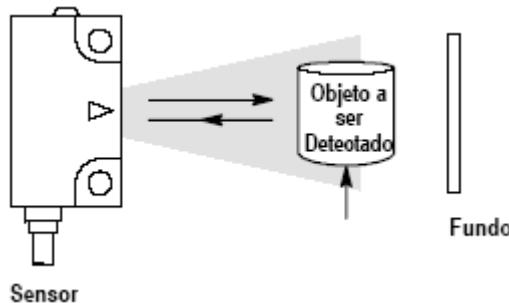
A refletividade do alvo pode variar muito. Superfícies relativamente brilhantes podem refletir a maior parte da luz para longe do receptor, tornando a detecção muito difícil. A face do sensor deve estar paralela a estas superfícies.

Objetos muito escuros, foscos, podem absorver a maior parte da luz e refletir muito pouco para fins de detecção. Estes alvos podem ser difíceis de detectar, a menos que o sensor seja posicionado muito próximo. O alcance máximo especificado de um sensor fotoelétrico é determinado usando-se um alvo difuso-refletivo calibrado.

Alvos difuso do “mundo real” são freqüentemente considerados menos refletivos, como é mostrado na tabela abaixo.

Alvo	Refletividade Relativa Típica
Alumínio Polido	500
Papel branco (referência)	100
Papel de escrever branco	90
Papelão	40
Tora cortada	20
Papel preto	10
Neopreno	5
Borracha de pneu	4
Feltro preto	2

A detecção de alvos posicionados próximos a fundos refletivos pode ser particularmente desafiadora. Pode ser impossível ajustar o sensor para obter uma margem suficiente para detectar o alvo sem a detecção ou sem chegar perto do limiar da detecção do fundo. Outros tipos de detecção por reflexão difusa podem ser mais adequados neste caso.



Feixe Difuso com Corte Fino

Os sensores por feixe difuso com corte fino são projetados de modo que o feixe de luz do emissor e a área de detecção do receptor estejam em ângulo entre si. Isto torna estes sensores mais sensíveis a curta distância e menos sensíveis a longa distância, o que pode prover uma detecção mais confiável de alvos que estejam posicionados próximos a fundos refletivos.

Note que este modo de detecção fornece algum grau de melhoria sobre a detecção por luz difusa padrão, quando um fundo refletivo estiver presente. Entretanto, um fundo que é bastante refletivo ainda pode ser detectado.

Uma solução ainda melhor é dada pelos sensores por feixe difuso com supressão de fundo.

Feixe Difuso com Supressão de Fundo

Ao invés de tentar ignorar o fundo atrás de um alvo, os sensores com supressão de fundo usam eletrônica sofisticada para detectarativamente a presença tanto do alvo quanto do fundo. Os dois sinais relacionados à detecção são comparados e a saída vai comutar seu estado quando houver detecção ativa do alvo ou detecção ativa do fundo. Em termos simples, a detecção com supressão de fundo pode permitir que o sensor ignore a presença de um fundo muito refletivo quase diretamente atrás de um alvo escuro, menos refletivo.

Para muitas aplicações, este é o modo difuso de detecção ideal. Entretanto, os sensores com supressão de fundo são mais complexos e, portanto, mais caros que outros sensores por luz difusa.

Feixe Difuso com Foco Fijo

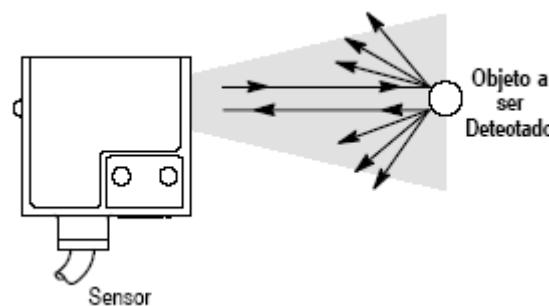
Num sensor com foco fixo (feixe convergente), o feixe de luz do emissor e a área de detecção do receptor estão focados num ponto bastante estreito (ponto focal), a uma distância fixa em frente ao sensor. O sensor é bastante sensível neste ponto e muito menos sensível antes e depois deste ponto focal.

Os sensores com foco fixo encontram três aplicações principais:

- Detecção confiável de alvos pequenos. Pelo fato de o sensor ser bastante sensível no ponto focal, um alvo pequeno pode ser detectado facilmente.
- Detecção de objetos a uma distância fixa. Como um sensor de foco fixo é mais sensível no ponto focal, ele pode ser usado em algumas aplicações para detectar um alvo no ponto focal e ignorá-lo quando ele estiver na frente ou atrás do ponto focal.
- Detecção de marcas em cor impressas (detecção de marcas de codificação coloridas). Em algumas aplicações, é importante detectar a presença de uma marca impressa numa peça contínua de material de embalagem. Um sensor de foco fixo com um emissor de cor específico (tipicamente vermelho, verde ou azul) pode ser selecionado para apresentar a mais alta sensibilidade à cor da marca.

Feixe Difuso com Grande Abertura

Os sensores por feixe difuso com grande abertura projetam a área de detecção do emissor e a do receptor sobre uma grande área.



Estes sensores são ideais para dois tipos de aplicação:

- Detecção de fio—um sensor com grande abertura pode detectar a presença de fios extremamente finos de linha ou outro material posicionados próximos ao sensor. A presença ou ausência (rompimento de fio) do fio pode ser detectada confiavelmente mesmo quando o fio se move de um lado a outro em frente ao sensor.
- Furos ou imperfeições ignoradas nos alvos—como os sensores por feixe difuso com grande abertura podem ignorar sobre uma área grande, eles podem ignorar pequenos furos ou imperfeições em alvos difusos.

Comparativo entre os métodos de detecção

Modo de detecção	Aplicações	Vantagens	Precauções
Feixe Transmitido	Detecção em geral Contagem de peças	<ul style="list-style-type: none"> Alta margem em ambientes contaminados Maior alcance Não afetada por reflexões de superfície secundárias. Provavelmente mais confiável quando tiver objetos de reflexão mais elevados. 	<ul style="list-style-type: none"> Mais caro, por causa da exigência de emissor e receptor separados e conexão mais cara Alinhamento importante Evita detecção de objetos de material transparente.
Feixe retro-refletido	Detecção em geral	<ul style="list-style-type: none"> Alcance moderado Mais barato que o feixe transmitido porque a fiação é mais simples. Facil de alinhar 	<ul style="list-style-type: none"> Alcance mais curto que o feixe transmitido. Menor margem que por feixe transmitido Pode detectar reflexões de objetos brilhantes (use a polarização)
Feixe Retro-refletido, Luz Polarizada	Detecção em geral de alvos brilhantes	<ul style="list-style-type: none"> Ignora reflexões da primeira superfície Usa feixe vermelho visível para facilitar o alinhamento. 	<ul style="list-style-type: none"> Alcance mais curto que para retro-refletido padrão Pode ver reflexões de segunda superfície.
Feixe Difuso, Tipo Padrão	Aplicações em que ambos os lados do objeto não podem ser acessados	<ul style="list-style-type: none"> Acesso a ambos os lados do alvo não é necessário Sem a necessidade de refletor Facil de alinhar 	<ul style="list-style-type: none"> Pode ser de aplicação difícil se o fundo atrás do objeto for muito refletivo e próximo ao objeto.
Feixe Difuso, Corte Fino	Detecção de alvos com necessidade de ignorar as partes do fundo que estão próximas ao alvo.	<ul style="list-style-type: none"> Acesso a ambos os lados do alvo não necessário Fornece alguma proteção contra a detecção de fundos fechados. Detecta objetos indiferentemente da cor dentro do alcance especificado. 	<ul style="list-style-type: none"> Somente útil para detecção em alcance muito curto. Não utilizados com fundo perto do alvo
Feixe Difuso com Supressão de Fundo	Detecção em geral Áreas em que precise ignorar os fundos que estão perto do alvo	<ul style="list-style-type: none"> Acesso a ambos os lados do alvo não necessário Ignora fundos além do alcance especificado, independentemente da refletividade Detecta objetos indiferentemente da cor para o alcance especificado. 	<ul style="list-style-type: none"> Mais caro que outros tipos de sensores difusos Alcance máximo limitado
Feixe Difuso, com Foco Fixo	Detecção de alvos pequenos Detecção de alvos a uma distância específica do sensor Detecção de marcas coloridas	<ul style="list-style-type: none"> Detecção precisa de alvos diminutos em posição específica 	<ul style="list-style-type: none"> Alcance muito curto Inadequado para detecção em aplicações gerais Alvo deve ser posicionado precisamente
Feixe Difuso, com Grande Abertura	Detecção de alvos posicionados sem precisão Detecção de fios muito finos em uma grande área	<ul style="list-style-type: none"> Muito bom ao ignorar as reflexões do fundo Detecção de objetos que não estão precisamente posicionados. Sem a necessidade de refletor 	<ul style="list-style-type: none"> Alcance bastante curto
Fibra Óptica	Permite detecção fotoelétrica em áreas em que um sensor não pode ser montado devido às considerações de espaço ou ambientais	<ul style="list-style-type: none"> Cabos de fibra óptica de vidro disponíveis para aplicações de alta temperatura ambiente Alta resistência a choque e vibração. Cabos de fibra óptica plástica podem ser usados em áreas em que é necessário movimento contínuo Inserção em um espaço limitado Imunidade a ruído Colocação em áreas corrosivas 	<ul style="list-style-type: none"> Mais caro que sensores com lente Alcance bastante curto

2.5.6 Fibra Óptica

Os sensores por fibra óptica permitem a conexão de cabos de fibra óptica ao seu corpo. A luz emitida pelo emissor é transmitida através de fibras transparentes nos cabos e emerge na ponta das fibras. O feixe transmitido ou refletido é então conduzido ao receptor através de fibras separadas. Cabos de fibra óptica podem ser montados em locais que de outro modo seriam inacessíveis a sensores fotoelétricos. Eles podem ser usados na presença de alta temperatura ambiente e em aplicações onde ocorrem choques e vibrações extremos ou movimento contínuo do ponto de detecção (como é descrito abaixo).

Tanto vidro quanto plástico são usados como materiais transparentes para criar cabos de fibra óptica.

2.5.6.1 Fibra Óptica de Vidro

Cabos de fibra óptica de vidro contêm fios múltiplos de fibra de vidro bastante fina, enfeixados juntos numa capa flexível.

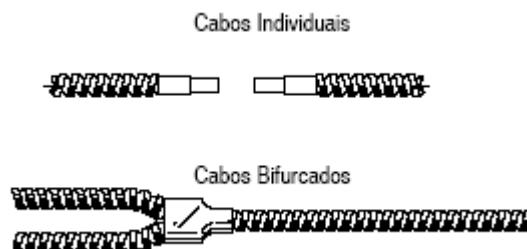
Cabos de fibra óptica de vidro são tipicamente mais duráveis que cabos de fibra óptica plástica. Os cabos de fibra óptica de vidro suportam temperaturas muito mais elevadas.

2.5.6.2 Fibras Ópticas de Plástico

Cabos de fibra óptica plástica são tipicamente construídos com um monofilamento acrílico único. Não há revestimento protetor, tornando os cabos de fibra óptica plástica menos duráveis, mas tipicamente mais baratos que os cabos de fibra de vidro.

Os cabos com fibra de plástico podem ser usados em aplicações onde seja necessária flexão contínua do cabo. Cabos com fibra de plástico espiralados também estão disponíveis para este tipo de aplicação.

Cabos de fibra óptica estão disponíveis em configuração individual ou bifurcada



Dois cabos individuais são usados para detecção por feixe transmitido. Alguns cabos individuais são embalados individualmente, outros são vendidos em pacotes de dois.

Cabos bifurcados são usados para os modos de detecção por feixe refletido (seja difusa ou retroativamente). A detecção por feixe difuso, versão padrão, com cabos de fibra óptica é semelhante à detecção com sensores fotoelétricos dotados de lentes.

A detecção com luz retro-refletida é possível com refletores ou fitas refletoras. A detecção com luz polarizada retro-refletida não é possível. Em algumas aplicações com retro-reflexão, será necessário reduzir a sensibilidade do sensor para evitar detecção do alvo por reflexão difusa. Fibras de vidro podem ser usadas com LEDs de luz infravermelha ou visível.

Fibras ópticas de plástico absorvem luz infravermelha e, portanto, são mais eficientes quando usadas com LEDs de luz vermelha visível.

Uma grande seleção de cabos de fibra óptica está disponível e muitas configurações especiais podem ser obtidas.

Comparação entre os tipos de sensores de fibra ótica

	Vidro	Plástico
Construção	Fibras de vidro finas com manta em aço inoxidável ou PVC	Monofilamento acrílico único
Faixa de Temperatura	-40 °C (-40 °F) para 260 °C (500 °F) com manta de aço inoxidável Pedido especial até a 480 °C (900 °F)	-30 °C (-20 °F) a 70 °C (158 °F)
Durabilidade	Bastante durável	Adequados para muitas aplicações
Flexões Contínuas	Quebrará rapidamente fibras de vidro	Funcionará muito bem, versões espiraladas disponíveis
Emissor	Pode ser de luz visível ou infravermelha	Precisa usar luz visível
Alcance	Pode ser de alcance maior por causa do diâmetro maior	Adequados para muitas aplicações

Detecção de Objetos Transparentes

Materiais transparentes apresentam um desafio único na aplicação de sensores fotoelétricos. A maior parte dos objetos e filmes fornecem contraste insuficiente para serem detectados confiavelmente com sensores por feixe retro-refletido ou retro-refletido, luz polarizada de aplicação geral. Várias formas de detecção por reflexão difusa não oferecem uma solução melhor, porque a localização exata do alvo transparente não pode ser detectada.

Alguns fabricantes oferecem sensores fotoelétricos que são projetados especialmente para aplicações de detecção de objetos e filmes transparentes. Estes sensores por feixe retro-refletido com luz polarizada contêm montagens ópticas especiais, projetadas para otimizar a quantidade de contraste gerada por objetos e filmes transparentes. Eletrônica e software especiais aumentam ainda mais a confiabilidade da detecção.

2.5.7 Especificações de Sensores Fotoelétricos

2.5.7.1 Saída com Comutação por Luz/Sombra

Os termos “comutação por luz” e “comutação por sombra” são usados para descrever a ação de uma saída de sensor quando um alvo está presente ou ausente.

Uma saída de operação por luz está ENERGIZADA (nível lógico um) quando o receptor pode “ver” luz suficiente gerada pelo emissor.

Para detecção por feixe transmitido e retro-refletido, uma saída de comutação por luz está ENERGIZADA quando o alvo está ausente e a luz pode viajar do emissor para o receptor. Para detecção por feixe difuso (todos os tipos), a saída está ENERGIZADA quando o alvo está presente e refletindo luz do emissor para o receptor.

Uma saída de comutação por sombra está ENERGIZADA (nível lógico um) quando o receptor não pode “ver” luz gerada pelo emissor.

Para detecção por feixe transmitido e retro-refletido, uma saída de comutação por sombra está ENERGIZADA quando o alvo está presente e a luz do emissor é bloqueada, não podendo alcançar o receptor. Para detecção difuso (todos os tipos), a saída de comutação por sombra está ENERGIZADA quando o alvo está ausente.

2.5.7.2 Alcance máximo

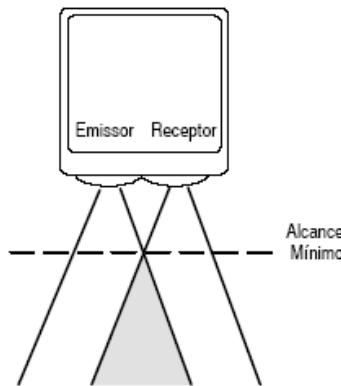
Esta especificação refere-se ao alcance de:

- Sensor para refletor, nas detecções por feixe retro-refletido e retro-refletido com luz polarizada
- De sensor para alvo específico em todos os tipos de detecções por feixe difuso e
- Emissor para receptor nas detecções por feixe transmitido.

A maior parte dos ambientes industriais cria contaminação das lentes do sensor, dos refletores e dos alvos. Os sensores devem ser aplicados a distâncias menores para elevar a margem até um valor aceitável e melhorar a confiabilidade da aplicação.

2.5.7.3 Alcance Mínimo

Muitos sensores por feixe retro-refletido, retro-refletido com luz polarizada e difuso (a maioria) apresentam uma pequena zona “cega” perto do sensor. Refletores, fitas refletoras ou alvos difusos devem ser localizados além deste alcance mínimo do sensor para um funcionamento confiável.

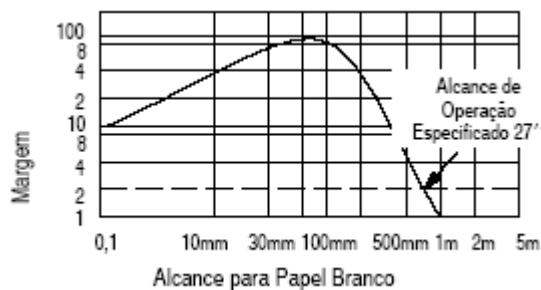


2.5.7.4 Curva de Resposta Típica

As páginas de catálogo para a maioria dos sensores fotoelétricos apresentam uma curva que mostra em quanto a margem típica depende do alcance.

Uma margem de pelo menos 2X é geralmente recomendada para ambientes industriais.

A figura abaixo mostra um exemplo de curva para um sensor por feixe difuso. O alcance máximo (margem=1X) deste sensor é 1 m (39,4 pol) para um alvo de papel branco específico. Uma margem de 4X pode ser conseguida a aproximadamente metade daquela distância ou 500 mm (19,7 pol).



2.5.7.5 Tempo de Resposta

O tempo de resposta de um sensor é o tempo que se passa entre a detecção de um alvo e a mudança de estado do dispositivo de saída, de LIGADO para DESLIGADO ou de DESLIGADO para LIGADO. É também o tempo que leva para a saída voltar ao estado original (descomutar) quando o alvo não se encontra mais na área de detecção.

Para a maioria dos sensores, o tempo de resposta é uma especificação única tanto para o tempo de comutação quanto para o de descomutação. Para outros sensores, podem ser dados dois valores diferentes de tempo para comutação e para descomutação.

O tempo de resposta depende do tipo/versão do sensor e da saída escolhida. Sensores mais lentos geralmente oferecem alcance mais longo. Sensores muito rápidos tipicamente têm alcances mais curtos. O tempo de resposta típico para sensores fotoelétricos varia de 30 μ s a 30 ms.

2.5.7.6 Campo de Visão

Para a maioria dos sensores fotoelétricos, o feixe de luz do emissor e a área de detecção em frente ao receptor se projetam à frente do sensor num formato cônico. O campo de visão é uma medida (em graus) da abertura desta área cônica.

O campo de visão é uma especificação útil para se determinar a área de detecção disponível a uma distância fixa além de um sensor fotoelétrico.

Veja a figura ao lado para este exemplo. O sensor por retro-reflexão do exemplo tem um campo de visão de 3°. A figura mostra que para um alcance de 3,0 m (10 pés) a área de detecção será um círculo de aproximadamente 168 mm (6,6 pol) de diâmetro (56 mm ou 2,2 pol por grau).

Sensores com um campo de visão largo tipicamente apresentam alcance menores. Entretanto, um campo de visão mais largo pode tornar mais fácil o alinhamento.

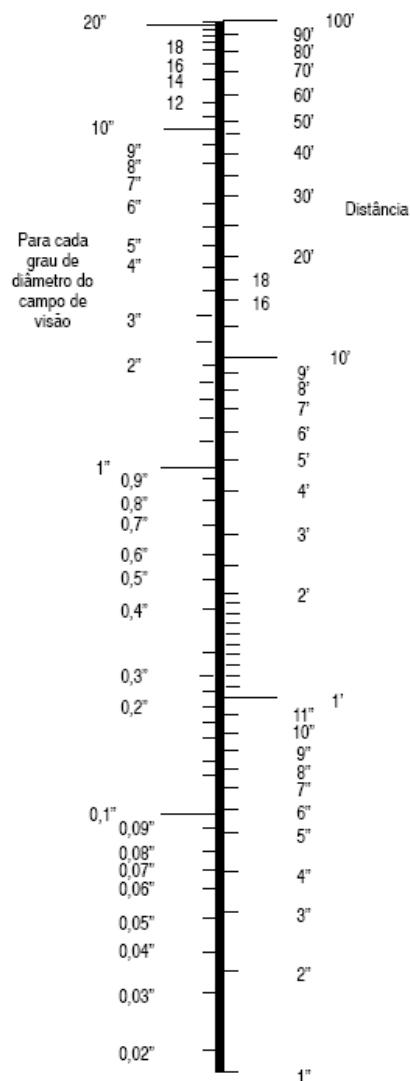
2.5.7.7 Região de Detecção

Diagramas mostrando a região de detecção são apresentados para várias linhas de sensores fotoelétricos, para facilitar a previsão do desempenho destes sensores quando do estudo da aplicação. A região de detecção é definida como a parte do espaço em que um sensor fotoelétrico percebe o alvo.

Ela é representada pela comparação da resposta do receptor à luz gerada pelo emissor correspondente, além do alcance de operação do sensor.

A região de detecção é mostrada em duas dimensões (curva fechada) e assume-se que tenha forma simétrica em relação ao eixo óptico do sensor, em todos os planos em torno de e passando por este eixo. O valor máximo de margem ocorre no eixo óptico; a margem diminui movendo-se o alvo em direção à fronteira do diagrama.

A região de detecção é investigada sob condições sem presença de contaminação e com alinhamento ótimo do sensor. O diagrama da região de detecção representa o maior espaço típico de detecção e não deve ser considerado exato: poeira, contaminação, névoa etc, vão diminuir a região de detecção e o alcance do sensor.



Região de Detecção para Feixe Transmitido

A região de detecção para feixe transmitido representa a fronteira em que o receptor efetivamente recebe luz do emissor correspondente, assumindo-se que não haja desalinhamento angular. O desalinhamento angular entre emissor e receptor diminui o volume da região de detecção. Diagramas da região de detecção para sensores com feixe transmitido são úteis para se determinar o espaçamento mínimo necessário entre pares emissor/receptor de feixe transmitido adjacentes, de forma a se evitar interferência óptica de um par emissor/receptor com pares próximos.

Região de Detecção para Feixe Retro-Refletido

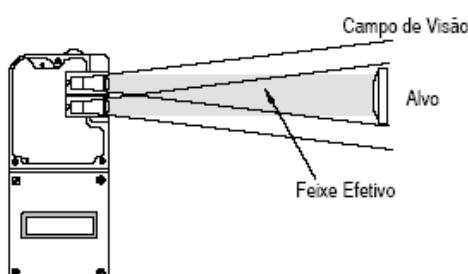
A região de detecção para feixe retro-refletido e retro-refletido com luz polarizada representa a fronteira dentro da qual o sensor vai responder a um alvo retro-refletivo (p.e. um refletor) situado no campo de visão do sensor. O alvo retro-refletivo é mantido perpendicularmente ao eixo óptico do sensor, enquanto os limites da região são traçados. O alvo retro-refletivo modelo 92-39 de 76 mm de diâmetro é usado para investigação da região de detecção, a menos que se especifique outro alvo.

Para funcionamento confiável, o objeto a ser detectado deve ser igual ou maior que o diâmetro do feixe indicado no diagrama da região de detecção. Um alvo retro-refletivo (p.e. refletor) menor deve ser usado para detecção precisa de objetos menores.

Região de Detecção para Feixe Difuso, Versão Padrão, com Corte Fino ou Supressão de Fundo

A região de detecção feixe difuso representa a fronteira dentro da qual a borda de um alvo refletivo branco será detectada ao entrar no campo de visão do sensor. As representações por feixe difuso são geradas usando-se 90 % da folha difuso-refletida, de papel branco, de 216 mm x 279 mm (8½ pol x 11 pol), mantida perpendicularmente aos eixos ópticos do sensor. A região de detecção será menor para materiais menos refletivos e maior para materiais mais refletivos. Objetos menores podem diminuir o volume da região de detecção para certos sensores por difuso-reflexão, quando há distâncias mais longas. Alvos difuso-refletivos com superfícies não perpendiculares aos eixos ópticos do sensor, também diminuirão significativamente a resposta do sensor.

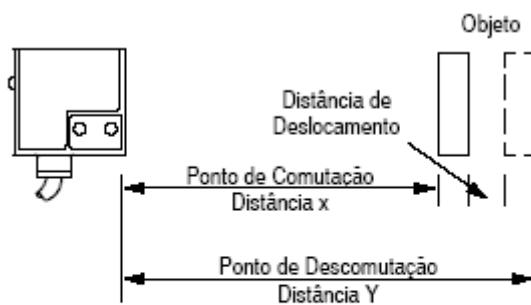
É importante notar que o diâmetro efetivo do feixe do sensor por raio retro-refletido é igual ao diâmetro do alvo retro-refletivo (refletor). Alvos refletivos adicionais no campo de visão do sensor irão aumentar o valor da margem e o alcance, se o campo de visão for maior que o alvo inicial, como mostrado na figura abaixo.



2.5.8 Histerese

Sensores fotoelétricos apresentam histerese (ou curso diferencial). A histerese de um sensor fotoelétrico é a diferença entre a distância de onde um alvo pode ser detectado quando ele se move em direção ao sensor e a distância que ele tem de se afastar do sensor para não ser mais detectado.

À medida que o alvo se move em direção ao sensor, ele será detectado à distância X. Quando ele se afasta do sensor, ele ainda vai ser detectado, até que ele chegue à distância Y.



$$\frac{\text{Distância "y" — Distância "x"}}{\text{Distância "x"}} = \text{Histerese \%}$$

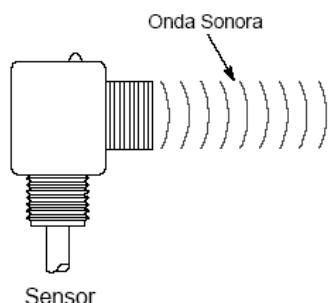
A alta histerese na maioria dos sensores fotoelétricos é útil para se detectar grandes objetos opacos em aplicações com feixe retro-refletido, retro-refletido com luz polarizada e transmitido. Em aplicações com reflexão difusa, uma grande diferença entre a luz refletida do alvo e do fundo também permite o uso de sensores de alta histerese.

2.6 Sensores Especiais

2.6.1 Sensores Ultra-sônicos

2.6.1.1 Princípios da Operação

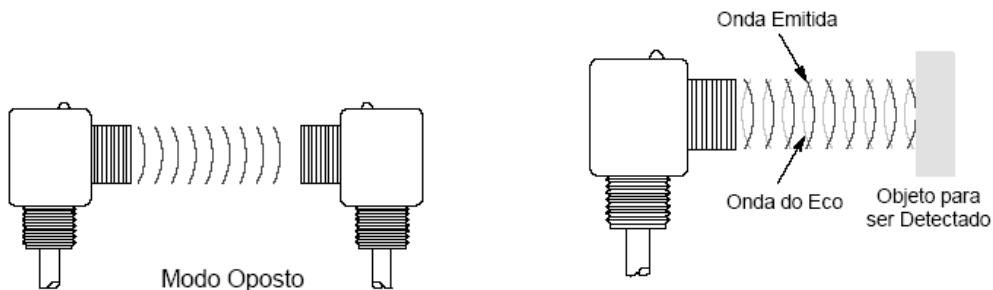
Os sensores ultrassônicos operam emitindo e recebendo ondas sonoras em alta freqüência. A freqüência é geralmente em 200 kHz, que é alta demais para um ouvido do ser humano.



2.6.1.2 Modos de Operação

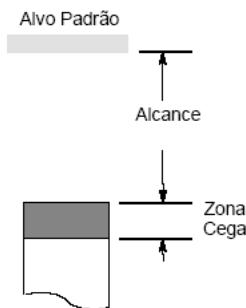
Há dois modos básicos de operação: modo oposto e modo difuso (eco).

No modo oposto, um sensor emite a onda sonora e um outro, montado do lado oposto do emissor, recebe a onda sonora. No modo difuso, o mesmo sensor emite a onda sonora e escuta o eco desenergizando um objeto.



2.6.1.3 Faixa de Detecção

A faixa de detecção é o alcance dentro do qual o sensor ultrassônico detectará o alvo sob flutuações de temperatura e tensão.



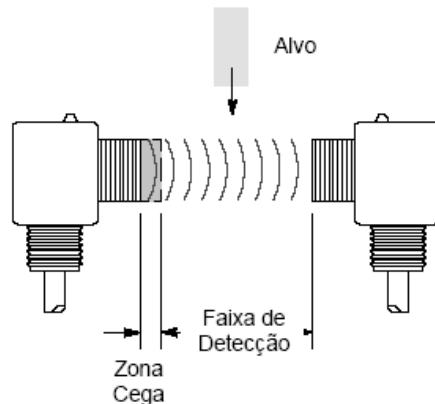
Os sensores ultrassônicos possuem uma zona cega localizada na face de detecção. O tamanho da zona cega depende da freqüência do transdutor. Os objetos localizados dentro de um ponto cego podem não ser confiavelmente detectados.

Certas características do alvo devem ser consideradas ao usar os sensores ultrassônicos. Elas incluem forma do alvo, material, temperatura, tamanho e posicionamento.

Materiais macios, tais como tecido ou espuma de borracha são difíceis de detectar com tecnologia de ultrassom difuso porque eles não são refletores de som adequados.

O alvo padrão para um sensor ultrassônico de tipo difuso é estabelecido pela Comissão Eletrotécnica padrão IEC 60947-5-2. O alvo padrão é uma forma quadrada, possuindo uma espessura de 1 mm e feito de metal com um fim rolado. O tamanho do alvo é depende da faixa de detecção.

Para os sensores ultrassônicos de modo oposto, não há padrão estabelecido.



Os alvos padrões são usados para estabelecer o desempenho dos parâmetros dos sensores. O usuário deve levar em consideração as diferenças no desempenho devido aos alvos não padronizados.

3 - Sensores Contínuos

3.1 Introdução

3.2 Medição de Temperatura

3.2.1 Grandeza

3.2.2 Termopares

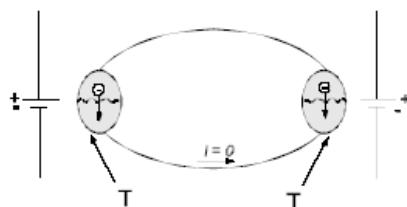
3.2.2.1 Princípio de Transdução

Nos metais e semicondutores, os processos de transporte de carga (corrente elétrica) e de energia, estão intimamente relacionados e se devem ao deslocamento de portadores de corrente (elétrons de condução). Quando os elétrons externos da eletrosfera encontram-se fracamente ligados a seus respectivos núcleos constituintes de um material, absorvem então energia suficiente de fontes externas, podendo tornar-se livres de seu núcleo.



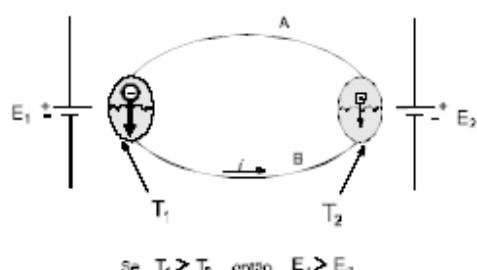
À temperatura constante, energia e densidades de elétrons livres em materiais diferentes não são necessariamente as mesmas. Então quando dois materiais diferentes em equilíbrio térmico entre si são colocados em contato, existirá a tendência da difusão de elétrons através da interface, como na figura ao lado.

O potencial elétrico do material receptor poderá tornar-se mais negativo na interface, enquanto que o material emissor de elétrons poderá tornar-se mais positivo. Quando a diferença no potencial através da interface balancear a força termoelétrica (difusão), o equilíbrio em relação a transferência de elétrons poderá ser estabelecido, como na figura ao lado.



Se dois materiais homogêneos diferentes estão formando um circuito fechado e as duas junções mantidas a mesma temperatura, os campos elétricos resultantes serão opostos e não existirá fluxo de elétrons, como ilustrado na figura abaixo.

Contudo, se as duas junções são mantidas a diferentes temperaturas, uma corrente de difusão líquida poderá ser induzida, conforme mostrado na figura abaixo. Se o circuito é interrompido em um ponto qualquer, pode-se medir, através de um voltímetro, uma diferença de potencial (V) que é função da diferença de temperatura das duas junções e do tipo de material dos fios.



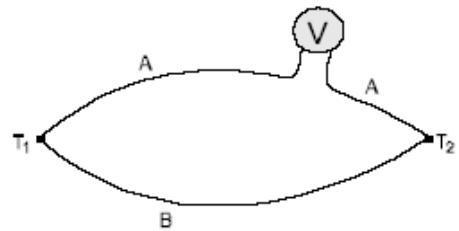
Se $T_1 > T_2$ então $E_1 > E_2$

$$V = \alpha_{AB}(T_1 - T_2)$$

onde α_{AB} é a diferença de poder termoelétrico dos dois materiais.

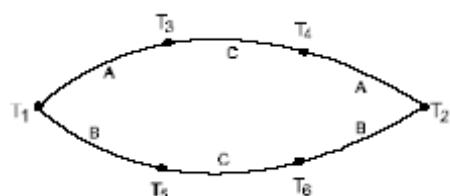
Essa tensão é dita "tensão ou f.e.m Seebeck", em homenagem a Thomas Seebeck que em 1821 descobriu esse fenômeno (chamado "Efeito Seebeck"). A medição da f.e.m Seebeck é medida a corrente nula.

Dessa forma o voltímetro deve ter baixa impedância (alta resistência interna) a fim de assegurar essa condição.



3.2.2.2 Lei dos metais intermediários

"A soma algébrica das forças termoeletromotivas em um circuito composto de qualquer quantidade de diferentes materiais é zero, se todo o circuito estiver a uma temperatura uniforme"



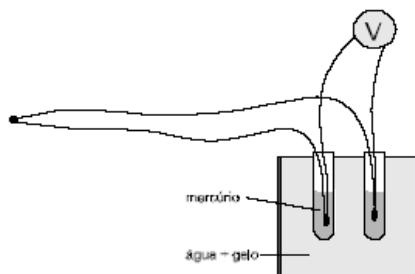
Assim, um terceiro material homogêneo sempre pode ser adicionado em um circuito, não afetando a f.e.m do mesmo, desde que suas extremidades estejam a uma mesma temperatura. Ou seja, o termopar formado pelos materiais A e B não será afetado pelo material C, se $T_3 = T_4$ e $T_5 = T_6$.

3.2.2.3 Junção de referência

O termopar não mede diretamente a temperatura, mas sim uma diferença de temperatura entre dois corpos. Necessita-se então conhecer uma das temperaturas, chamada junção de referência (ou junta fria).

Uma das juntas de referência mais utilizadas é o banho de gelo fundente (0oC). Deve-se usar preferencialmente água destilada, sendo o banho fundente obtido através de gelo com granulometria fina. Para trabalhos mais precisos, a junção de referência deve ser mantida num aparelho de ponto triplo da água cuja temperatura é 0.01 ± 0.0005 °C. Recomenda-se imergir a junta em banho de óleo ou mercúrio. Uma solução mais simples consiste em revestir os fios com uma camada de verniz sintético (esmalte de unhas).

A lei dos metais intermediários permite a ligação de um termopar a junta de referência aberta, conforme mostrado na Figura abaixo, sem que a f.e.m. fornecida seja alterada. Essa é uma situação bastante utilizada, pois preserva o termopar, eliminando a necessidade de interromper o circuito.



Outra forma de ligação bastante utilizada, especialmente quando têm-se uma série de termopares, consiste em manter a junção de referência a uma temperatura próxima do ambiente, medindo-a através de um termômetro de bulbo, ou através de uma termoresistência. A junta pode ser um banho líquido, ou ainda um bloco metálico com grande inércia térmica, sendo os termopares alojados em orifícios preenchidos com material condutor (mercúrio, óleo mineral ou "pasta térmica").

Existe ainda as juntas de referência eletrônicas que começam a se tornar confiáveis. Trata-se de um circuito integrado (por exemplo, AD 597) onde a leitura da temperatura de referência é realizada no próprio corpo do circuito. Como saída, tem-se um sinal elétrico diretamente proporcional a temperatura.

3.2.2.4 Dependência da temperatura

Os termopares são, na realidade, transdutores de temperatura não lineares: o poder termoelétrico varia com a temperatura das junções. O termopar formado pelos metais Cobre / Constantan, possui um poder termoelétrico $a = 40 \text{ mV/oC}$ a temperaturas próximas do ambiente, e $a = 53 \text{ mV/oC}$ a uma temperatura de 200 oC. A Tabela abaixo fornece os valores do poder termoelétrico (a) para diversos tipos de termopares em função da temperatura.

Tabela 1 - Poder termoelétrico para diversos tipos de termopares em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Poder termoelétrico "a" (µV/°C)					
	Cobre/ Constantan (Tipo T)	Cromel/ Alumel (Tipo K)	Ferro/ Constantan (Tipo J)	Cromel/ Constantan (Tipo E)	Platina/ 13%Ródio (Tipo R)	Platina/ 10% Ródio (Tipo S)
-200	15.7	15.3	21.9	25.1	-	-
-100	28.4	30.5	41.1	45.2	-	-
0	38.7	39.7	50.4	58.7	5.3	5.4
25	40.5	40.5	52.0	61.0	6.0	5.8
100	46.8	41.3	54.3	67.5	7.5	7.3
200	53.1	40.0	55.5	74.0	8.8	8.5
300	58.1	41.4	55.4	77.9	9.7	9.1
400	61.8	42.2	55.1	80.0	10.4	9.6
500	-	42.6	56.0	80.9	10.9	9.9
600	-	42.5	58.5	80.7	11.3	10.2
700	-	41.9	62.2	79.8	11.8	10.5
800	-	41.0	-	78.4	12.3	10.9
900	-	40.0	-	76.7	12.8	11.2
1000	-	38.9	-	74.9	13.2	11.5

A Tabela abaixo fornece os polinômios que expressam diretamente força eletromotriz em função da temperatura (e vice-versa) para termopares Cobre/Constantan (tipo T).

Intervalo de Temperatura	f.e.m (μ V)	Temperatura ($^{\circ}$ C)
-10°C a 100°C	$V = 39.011 \times T + 0.0374 \times T^2$	$T = -0,00843 + 0,0259 \times V - 7,11663 \times 10^{-7} \times V^2 + 2,85872 \times 10^{-11} \times V^3$
-10°C a 400°C	$V = 38.74077 \times T + 3.31902 \times 10^{-2} \times T^2 + 2.07142 \times 10^{-4} \times T^3 - 2.19458 \times 10^{-6} \times T^4 + 1.10319 \times 10^{-8} \times T^5 - 3.09275 \times 10^{-11} \times T^6$	$T = -0,01334 + 0,02593 \times V - 7,37848 \times 10^{-7} \times V^2 + 3,3762 \times 10^{-11} \times V^3 + 6,86583 \times 10^{-16} \times V^4 - 2,68455 \times 10^{-19} \times V^5 + 1,96528 \times 10^{-23} \times V^6 - 6,45578 \times 10^{-28} \times V^7 + 8,20458 \times 10^{-33} \times V^8$

Entretanto a forma mais comum para determinar a temperatura a partir da f.e.m fornecida por um termopar com junta de referência a 0°C é através das Tabelas de Equivalência, apresentadas no Apêndice. A primeira coluna indica a temperatura, em década, e a primeira linha de cada seção a temperatura em unidade. A f.e.m fornecida pelo termopar é indicada em milivolts. Uma interpolação linear pode ser empregada para obter uma maior resolução da temperatura obtida.

Caso esteja sendo empregado junta de referência a temperatura diferente de 0°C, deve-se primeiramente adicionar à f.e.m fornecida pelo termopar a tensão referente à temperatura da junção de referência.

O emprego de tabelas (ou relações) na conversão da f.e.m em temperatura implica que os materiais utilizados na fabricação do termopar apresentam as mesmas características termofísicas daqueles utilizados na compilação das mesmas. Mesmo com termopares com pureza elevada a incerteza é da ordem de 0.5 % ou 0.8°C. Para reduzir essa incerteza, a solução é a calibração de cada termopar (ou do lote).

3.2.2.5 Característica dos termopares

A escolha de um termopar para um determinada aplicação, deve ser feita considerando todas as possíveis variáveis, normas exigidas pelo processo e possibilidade de obtenção do mesmo. A Tabela abaixo relaciona os tipos de termopares e a faixa de temperatura usual, com vantagens e restrições.

Tipo	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Faixa de Temperatura	Vantagens	Restrições
T	Cobre	Constantan	-184 a 370°C	1) Reside atmosfera corrosiva. 2) Aplicável em atmosfera redutora ou oxidante abaixo de 310°C. 3) Sua estabilidade o torna útil em temperatura abaixo de 0°C. 4) Apresenta boa precisão na faixa de utilização.	1) Oxidação do cobre acima de 310°C
J	Ferro	Constantan	0 a 760°C	1) Baixo custo 2) Indicados para serviços contínuos até 760°C em atmosfera neutra ou redutora	1) Limite máximo de utilização em atmosfera oxidante de 760°C devido à rápida oxidação do ferro. 2) Utilizar tubo de proteção acima de 480°C.
E	Chromel	Constantan	0 a 870°C	1) Alta potência termoelétrica. 2) Os elementos são altamente resistentes a corrosão, permitindo o uso em atmosfera oxidante.	1) Baixa estabilidade em atmosfera redutora
K	Chromel	Alumel	0 a 1260°C	1) Indicado para atmosfera oxidante. 2) Para faixa de temperatura mais elevada fornece rigidez mecânica melhor do que os tipos S ou R e vida mais longa do que o tipo J. 1) Vulnerável em atmosferas redutoras, sulfurosas e gases como SO ₂ e H ₂ S, requerendo substancial proteção quando utilizado nessas condições	
S	Platina 10% Rhodio	Platina		1) Indicado para atmosfera redutora	1) Vulnerável a contaminação

3.2.2.6 Limites de erro

A Tabela abaixo apresenta limites típicos de erro para termopares convencionais com junta de referência a 0 °C, de acordo com a norma ASTM-E 230/77. Cabe ressaltar que os erros podem ser reduzidos quando realizado uma calibração prévia.

Tipo de termopar	FAIXA DE TEMP.	LIMITES DE ERRO	
		PADRÃO (escolher o maior)	ESPECIAL (escolher o maior)
T	0 a 370°C	± 1°C ou ± 0,75%	± 0,5°C ou ± 0,4%
J	0 a 760°C	± 2,2°C ou ± 0,75%	± 1,1°C ou ± 0,4%
E	0 a 870°C	± 1,7°C ou ± 0,5%	± 1°C ou ± 0,4%
K	0 a 1260°C	± 2,2°C ou ± 0,75%	± 1,1°C ou ± 0,4%
S e R	0 a 1450°C	±1,5°C ou ±0,25%	±0,6°C ou ±0,1%
B	870 a 1700°C	±0,5%	±0,25%
N	0 a 1260°C	±2,2°C ou ± 0,75%	± 1,1°C ou ± 0,4%
T	-200 a 0°C	±1°C ou ±1,5%	-
E	-200 a 0°C	±1,7°C ou ±1%	-
K	-200 a 0°C	±2,2°C ou ±2%	-

3.2.2.7 Fios de extensão

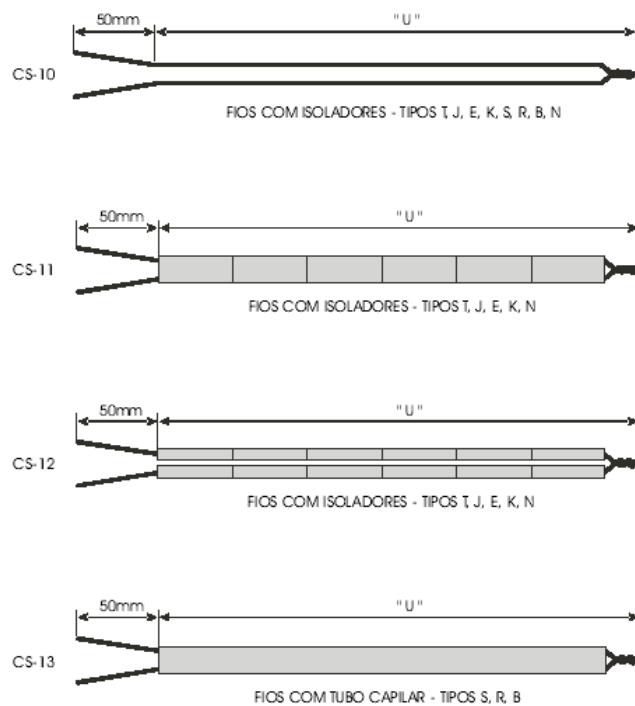
Trata-se de fios com grau de pureza inferior àqueles definidos por norma para fabricação de termopares. São introduzidos entre o ponto de medição e a junção de referência, com o objetivo de reduzir o custo da instalação. A presença desses fios pode introduzir incertezas de até 2 °C dependendo da temperatura na extremidade do fio de extensão. Essas incertezas podem ser bastante reduzidas calibrando o sistema com estes fios, e mantendo a mesma temperatura de calibração durante o uso.

3.2.2.8 Método de fabricação

Um simples contato elétrico entre os dois fios já é suficiente na construção de um termopar, visto que a corrente que nele circulará é de uma intensidade bastante baixa. Contudo a oxidação pode vir a prejudicar a passagem dos elétrons. A baixas temperaturas a brasagem com estanho satisfaz na maior parte dos casos. Já a temperaturas mais altas torna-se necessário a soldagem a acetileno ou arco voltaico, de preferência sem material complementar.

Contudo o método de fabricação de um termopar difere em função da necessidade de utilização. Quando se está interessado na medição de fenômenos transientes rápidos, o termopar deve ser fino, assim como a junção deve ter a menor dimensão possível. Já quando deseja-se medir uma temperatura média, essa integração pode ser realizada pela utilização de uma junta com maior dimensão, tendo-se em mente uma possível influência das trocas radiantes.

O ponto de medição de temperatura de um termopar é a última região de contato entre os dois materiais. Um curto circuito antes da junção de medição é fonte de erro nos resultados. Para evitar ocorrer este erro, é comum o uso de isoladores, conforme a figura abaixo.



Dependendo o tipo de atmosfera na qual o termopar irá ser inserido, deve-se especificar um isolamento externo, também conhecido como “bainha” ou “poço”, na qual o termopar irá ser colocado.

As tabelas abaixo mostram as principais características de bainhas cerâmicas e metálicas.

METÁLICOS

MATERIAL	TEMP. MÁX. APLICAÇÃO	CONSIDERAÇÕES GERAIS
Aço Carbono ou Ferro Preto	540°C	Satisfatório em atmosfera não corrosivas.
Ferro Fundido (Perilitico)	700°C	Utilizado normalmente em fundição de não ferrosos
Aço Inox 304 (18% Cr, 8% Ni)	850°C	Devido sua boa resistência a corrosão e a oxidação é bastante utilizado em indústrias petroquímicas.
Aço Inox 316 (18% Cr, 8% Ni, 2% Mo)	850°C	Resistência a corrosão superior ao aço inox 304.
Aço Cromo 446 (26% Cr, Fe)	1100°C	Excelente resistência a corrosão e oxidação a alta temperatura, boa resistência em atmosferas sulfurosas
Inconel 600 (72% Ni, 16% Cr)	1175°C	Excelente resistência a oxidação em alta temperatura, boa resistência a corrosão, não deve ser utilizado em atmosferas contendo enxofre (sulfurosas), acima de 500°C
Inox 310 (25% Cr, 20% Ni)	1100°C	Excelente resistência a corrosão e oxidação em altas temperaturas; boa resistência a ambientes redutores, sulfurosas e carbonizantes
NICROBELL B (NBB)	1250°C	Excelente desempenho em ambientes oxidantes, redutores a vácuo. Resistência Mecânica e resistência à corrosão superiores ao Aço Inox 310 e Inconel 600. Fácil de ser soldado. Não deve ser utilizado em atmosferas com alta concentração de enxofre livre.
NICROBELL C (NBC)	1250°C	Indicado para ambientes carburantes. Mesmas características do Nicrobell B.

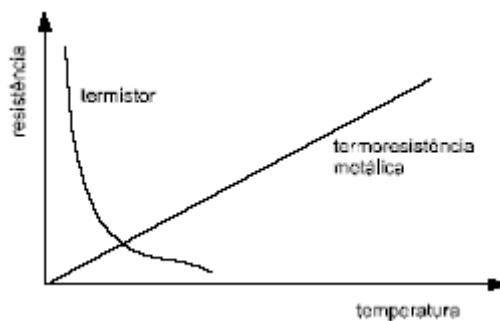
CERÂMICOS

MATERIAL		TEMP. MÁX. APLICAÇÃO	CONSIDERAÇÕES GERAIS
Tipo 610 conforme Norma DIN 40685	Importado	1600°C	<ul style="list-style-type: none"> - Contém 60% de alumina (Al_2O_3) na composição; - Material não poroso; - Boa resistência mecânica; - Boa condutibilidade térmica; - Baixo custo; - Sensível a choque térmico;
	Nacional *	1350°C	
Tipo 710 conforme Norma DIN 40685	Importado	1950°C	<ul style="list-style-type: none"> - Contém 99,7% de alumina (Al_2O_3) na composição; - Material não poroso; - Resistência mecânica e condutibilidade térmica bem melhor que o tipo 610; - Alto custo; - Sensível a choque térmico;
	Nacional *	1750°C	
Carbureto de Silício		1500°C	<ul style="list-style-type: none"> - Material altamente poroso; - Baixa resistência mecânica; - Alta condutibilidade térmica; - Resistente a choque térmico;
Carbureto de Silício Recristalizado		1650°C	<ul style="list-style-type: none"> - Boa resistência a ácidos e a álcalis; - Recomendado para utilização em atmosferas neutras; - Utilizado em fundição de zinco, alumínio, chumbo, cobre, etc.; - No Domo e regeneradores de alto-forno;

3.2.3 Termoresistências

No mesmo ano que Thomas Seebeck descobriu a termoelectricidade, 1821, Sir Humphrey Davy anunciou que a resistividade dos metais apresentavam uma marcante dependência com a temperatura. Quinze anos mais tarde Sir William Siemens apresentou a platina como elemento sensor em um termômetro de resistência. Sua escolha mostrou-se acertada, visto que atualmente um termômetro de resistência de platina é utilizado como padrão de interpolação entre -180 oC e 630 oC.

Termoresistência, ou termômetros de resistência, são nomes genéricos para sensores que variam sua resistência elétrica com a temperatura. Os materiais de uso prático recaem em duas classes principais: condutores e semicondutores. Os materiais condutores apareceram primeiro, e historicamente são chamados de termômetros de resistência ou termoresistências. Os tipos a semicondutores apareceram mais recentemente e receberam o nome de termistores. A diferença básica é a forma de variação da resistência elétrica com a temperatura. Nos metais a resistência aumenta quase que linearmente com a temperatura enquanto que nos semicondutores ela varia de maneira não-linear de forma positiva ou negativa.



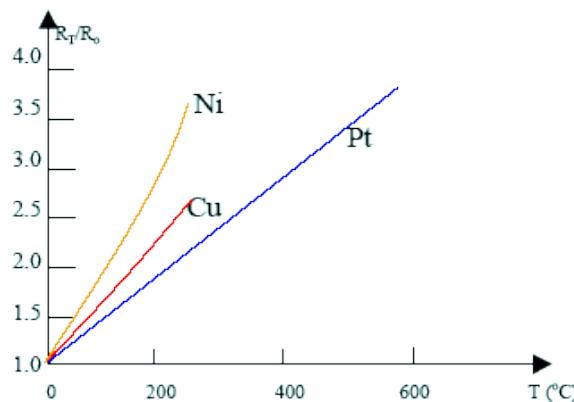
3.2.3.1 Termoresistências metálicas – RTD

Termoresistências metálicas são construídas a partir de fios ou filmes de platina, cobre, níquel e tungstênio para aplicações a alta temperatura. A variação da resistência elétrica de materiais metálicos pode ser representada por uma equação da forma:

$$R = R_0 (1 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + \dots + a_n \cdot T^n)$$

onde R_0 = resistência a $T=0$ °C

A termoresistência mais comum é a base de um fio de platina chamada PT100. Esse nome é devido ao fato que ela apresenta uma resistência de 100 W a 0 oC. Entre 0 a 100 oC a variação pode ser considerada linear, com $a_1 = 0.00385$ W/W/ K. A Tabela 6 do Apêndice A fornece os valores da resistência elétrica em função da temperatura para uma sonda PT100.



3.2.3.2 Termistores

Os primeiros tipos de sensores de temperatura de resistência de semicondutores foram feitos de óxido de manganês, níquel e cobalto, moídos e misturados em proporções apropriadas e prensados numa forma desejada. A esta mistura foi dado o nome de termistor. Comparados com sensores de tipo condutor (que têm coeficiente de temperatura positivo e pequeno), os termistores têm um coeficiente muito grande, podendo ser negativo (dito NTC, Negative Temperature Dependence) ou positivo (PTC – Positive Temperature Dependence). Enquanto alguns condutores (cobre, platina) são bastante lineares, os termistores são altamente não lineares. Sua relação resistência/temperatura é geralmente da forma:

$$R = R_0 \cdot e^{\beta (1/T - 1/T_0)}$$

onde:

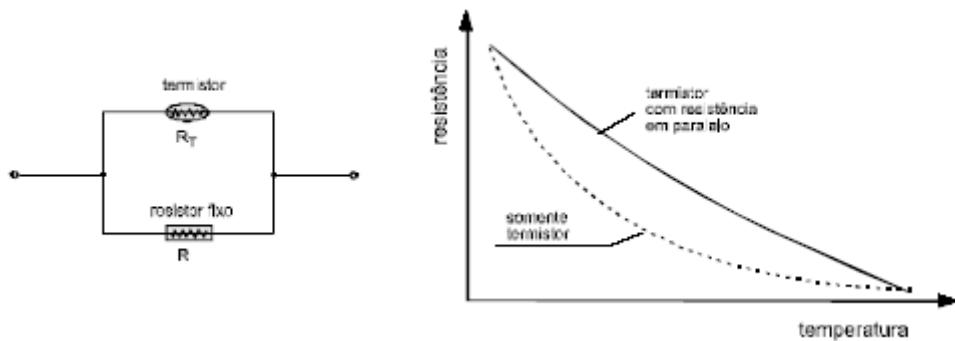
R = resistência na temperatura T (Ω),

R_0 = resistência na temperatura T_0 (Ω),

β = constante característica do material (K),

T, T_0 = temperaturas absolutas (K)

A temperatura de referência T_0 é geralmente tomada como 298 K (25 °C) e a constante $b = -4.0$ para um NTC. Isso implica num coeficiente de temperatura de -0.0450 comparado com $+0.0038$ para a platina. Uma técnica para reduzir a não linearidade de um termistor consiste em deriva-lo com um resistor comum, conforme mostrado na figura abaixo.



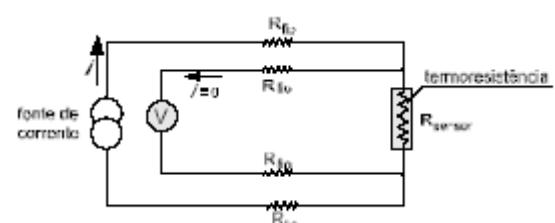
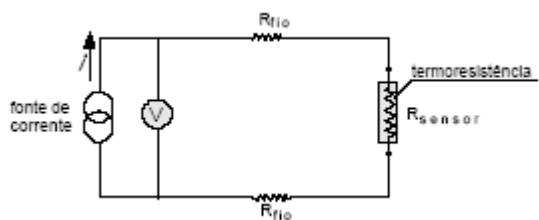
A estabilidade dos primeiros termistores era bastante inferior à das termoresistências metálicas, mas atualmente eles vem apresentando uma estabilidade aceitável para muitas aplicações industriais e científicas.

3.2.3.3 Métodos de medição

Fonte de corrente

Trata-se da técnica aparentemente mais simples, mas que na verdade exige uma fonte de corrente constante. Ela pode ser dividida em duas configurações básicas:

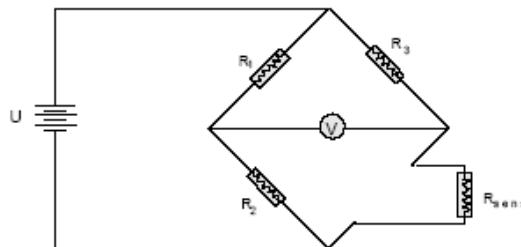
- Medição a dois fios** - Conhecendo a intensidade da corrente, a resistência do sensor (R_{sensor}) é obtida através da medição da queda de tensão. Contudo nesse método o sinal é influenciado por variações da resistência elétrica do cabo (representado por R_{fio}), especialmente se ele é longo e sujeito a variações de temperatura.
- Medição a 4 fios** - Nesse tipo de ligação o efeito da variação da resistência elétrica do cabo é compensado. A queda de tensão é medida junto ao sensor através de dois fios complementares. Como a corrente que circula pelo voltímetro é praticamente nula, não ocorre, então, queda de tensão nesses fios. O desvantagem desse sistema é a necessidade do cabo conter 4 fios, aumentando o custo.



Ponte de Wheatstone

É a técnica mais utilizada pois necessita apenas de uma fonte de tensão, que é mais simples que uma fonte de corrente.

1. **Ligaçāo a dois fios** - A tensāo de saída (V) da ponte depende da relaçāo entre os resistores e da tensāo de alimentaçāo (U), conforme explicitado em termos de V ou de R_{sensor} .



$$V = U \left(\frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} - \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_{sensor}}} \right)$$

$$R_{sensor} = \frac{R_3 V \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right)}{\frac{R_1}{R_2} + V \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right)}$$

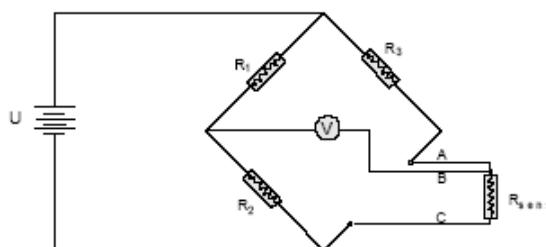
Essa configuração apresenta uma não linearidade do sinal de saída (V) em função de R_{sensor} . Uma das formas de minimizar esse efeito consiste em utilizar valores elevados da relação R_{sensor} / R_3 e R_2 / R_1 além de operar com a ponte próxima da condição balanceada, isto é:

$$\frac{R_{sensor}}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$$

Tipicamente um elemento de platina operando num intervalo de 0 a 100 °C, usando uma relação de resistências de 10:1, dá uma não linearidade de 0,5 °C.

A ligação a dois fios apresenta ainda outro inconveniente: a variaçāo da resistēcia elētrica dos cabos de ligação do sensor influencia o sinal da medição. (fenômeno idêntico ao apresentado no item anterior). A forma de minimizar esse problema é apresentada a seguir.

2. **Ligaçāo a 3 fios** - Nesse caso a efeito da variaçāo da resistēcia do cabo é minimizado, com o custo de um cabo adicional, conforme mostrado na figura abaixo



Com a ponte próxima de uma condição balanceada o efeito da variação da resistência elétrica do cabo A é minimizado pela variação do cabo C. A corrente que circula pelo cabo B é próxima de zero (devido a alta impedância do voltímetro) não ocorrendo, então, queda de tensão parasita.

3.3 Medição de Umidade

Nessa seção serão apresentados alguns instrumentos de medição da umidade do ar, ou seja, de determinação da quantidade de vapor d'água presente no ar atmosférico. O ar atmosférico é capaz de reter uma certa quantidade de água na forma de vapor, sendo que essa quantidade é fortemente dependente da temperatura: quanto maior a temperatura, maior a capacidade de retenção. Se a mistura é continuamente resfriada, chega-se a um estado chamado "temperatura de saturação", ou "ponto de orvalho", onde qualquer redução da temperatura provoca uma condensação do vapor d'água. A umidade absoluta (ω), ou "umidade específica", é definido como a vazão entre as massas de vapor d'água (m_v) e de ar seco (m_a).

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

Contudo a forma mais usual de definir o teor de umidade do ar é através da umidade relativa (ϕ). Considerando a mistura como sendo de gases ideais, ela pode ser definida como a razão entre a pressão parcial do vapor na mistura (p_v) e a pressão de saturação do vapor (p_{sat}) nessa mesma temperatura, ou seja, quando o ar está completamente saturado a sua pressão de vapor é a própria pressão de saturação ($\phi = 1$ ou 100 %).

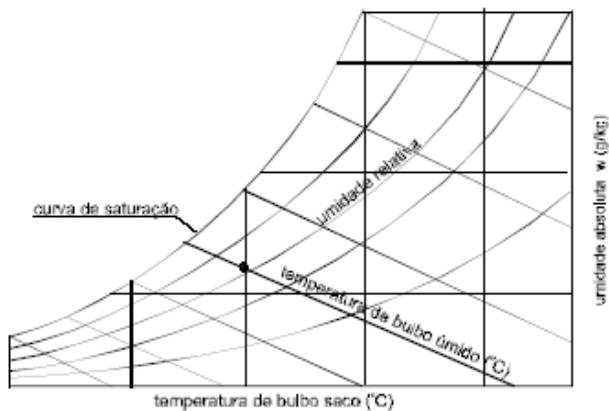
$$\phi = \frac{p_v}{p_{sat}}$$

A umidade relativa é obtida com a ajuda da carta psicrométrica, conforme mostrado esquematicamente na figura abaixo.

A ordenada representa a temperatura de bulbo seco, que é a temperatura medida por um termômetro normal. Já as linhas inclinadas representam a temperatura de bulbo úmido, que será descrito na seção seguinte.

O ponto de cruzamento dessas linhas indicam o valor da umidade relativa e umidade absoluta.

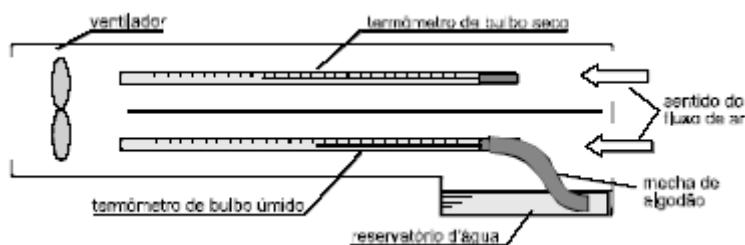
Quando a temperatura de bulbo seco é igual a temperatura de bulbo úmido o ar encontra-se saturado (linha curva de saturação).



3.3.1 Instrumentos de Medição

3.3.1.1 Psicrômetro de bulbo úmido e seco

É o instrumento mais utilizado para medição da umidade, dado sua simplicidade e pelo fato de que, a priori, dispensa calibração. Nesse equipamento a mistura escoa ao redor de dois termômetros: um com o bulbo seco e outro com o bulbo úmido em água destilada. O termômetro de bulbo seco mede simplesmente a temperatura do ar. Já no de bulbo úmido ocorre o fenômeno de evaporação superficial, reduzindo a temperatura da mecha até a temperatura de saturação. Afim de garantir que a temperatura atingida seja realmente a de saturação muitos parâmetros estão envolvidos: velocidade do ar (recomendado entre 3 e 5 m/s, Norma ASHRAE Standart 41.6), dimensões e textura da mecha, trocas radiantes, etc. A ventilação pode ser feita manualmente girando os termômetros (tipo reco-reco), ou por forçaada por ventilador conforme mostrado na figura abaixo.

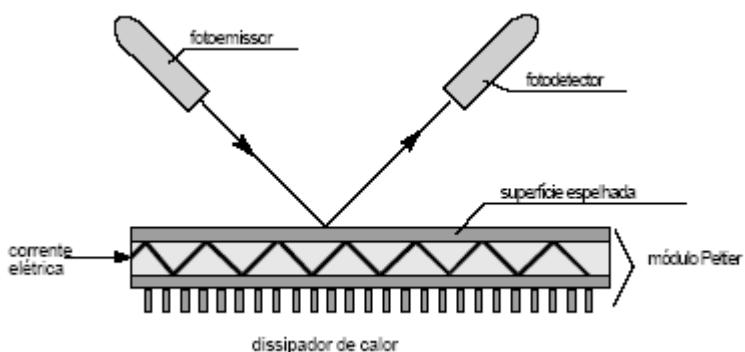


Apesar da simplicidade esse psicrômetro tem o inconveniente de necessitar uma constante monitoração do nível d'água, o que dificulta a automatização do sistema.

3.3.1.2 Higrômetro Capacitivo

O sensor de umidade uma cápsula porosa (normalmente metálica) que varia a capacidade com a umidade relativa do ambiente. O sensor é excitado em frequência e a diferença de fase produzida pela capacidade do sensor é relacionada com a umidade (apresentando dependência com a temperatura ambiente). Trata-se de um método secundário, necessitando calibração prévia. A incerteza de medição é superior a 1 %.

É o tipo de sensor mais utilizado a nível industrial. Contudo ele apresenta limitações na medição de umidades relativas elevadas ($> 95\%$). Um fenômeno chamado absorção secundária provoca uma histerese de leitura, requerendo a exposição do sensor a ambientes com umidade inferior a 50 % por um período de 24 horas.



3.3.1.3 Higrômetro de espelho

Com o auxílio de um módulo Peltier uma superfície espelhada é resfriada até o início da condensação: é a temperatura de saturação (ou ponto de orvalho). O início da condensação é relacionado com uma mudança da refletividade da superfície, detectada por sensores infravermelhos conforme esquematizado na figura abaixo

Trata-se de um método que, a priori, não necessita de calibração. Contudo o sistema deve ser capaz de detectar com precisão o momento exato de início da condensação. A incerteza prevista é da ordem de 0.5 %.

3.4 Medição de Deslocamento

3.5 Medição de Rotação

3.6 Medição de Força

3.7 Medição de Pressão

Pressão é definida como uma força atuando em uma unidade de área.

$$P = \frac{F}{A}$$

onde :
 P = Pressão
 F = Força
 A = Área

3.7.1 Conceitos

Pressão Atmosférica

É a pressão exercida pela atmosfera terrestre medida em um barômetro. Ao nível do mar esta pressão é aproximadamente de 760 mmHg.

Pressão Relativa

É a pressão medida em relação à pressão atmosférica, tomada como unidade de referência.

Pressão Absoluta

É a soma da pressão relativa e atmosférica, também se diz que é medida a partir do vácuo absoluto.

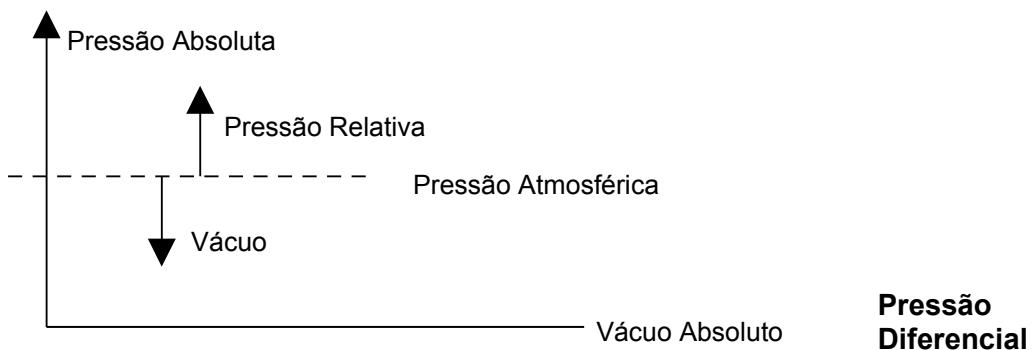
Ao se exprimir um valor de pressão, determinar se a pressão é relativa ou absoluta.

Exemplo : 3 Kgf/cm² ABS \longrightarrow Pressão Absoluta
 4 Kgf/cm² \longrightarrow Pressão Relativa

O fato de se omitir esta informação na indústria significa que a maior parte dos instrumentos medem pressão relativa.

Pressão Negativa ou Vácuo

É quando um sistema tem pressão relativa menor que a pressão atmosférica.



É a diferença entre 2 pressões, sendo representada pelo símbolo ΔP (delta P). Essa diferença de pressão normalmente é utilizada para medir vazão, nível, pressão, etc.

Pressão Estática

É o peso exercido por um líquido em repouso ou que esteja fluindo perpendicularmente a tomada de impulso, por unidade de área exercida

Pressão Dinâmica ou Cinética

É a pressão exercida por um fluido em movimento. É medida fazendo a tomada de impulso de tal forma que recebe o impacto do fluxo.

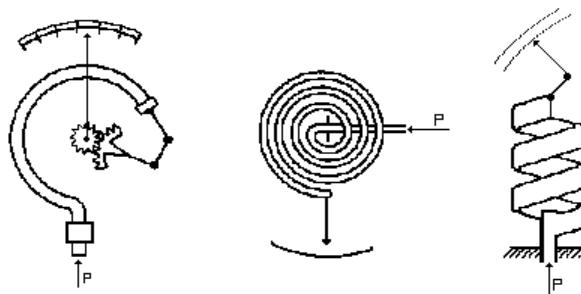
3.7.2 Dispositivos para medição de pressão

O instrumento mais simples para se medir pressão é o manômetro, que pode ter vários elementos sensíveis e que podem ser utilizados também por transmissores e controladores. Vamos então ao estudo de alguns tipos de elementos sensíveis.

Tubo de Bourdon

Consiste geralmente de um tubo com seção oval, disposto na forma de arco de circunferência tendo uma extremidade fechada, estando a outra aberta à pressão a ser medida. Com a pressão agindo em seu interior, o tubo tende a tomar uma seção circular resultando um movimento em sua extremidade fechada. Esse movimento através da engrenagem é transmitido a um ponteiro que vai indicar uma medida de pressão.

Quanto à forma, o tubo de Bourdon pode se apresentar nas seguintes formas: tipo C, espiral e helicoidal.



a) Tipo C

b) Tipo Espiral

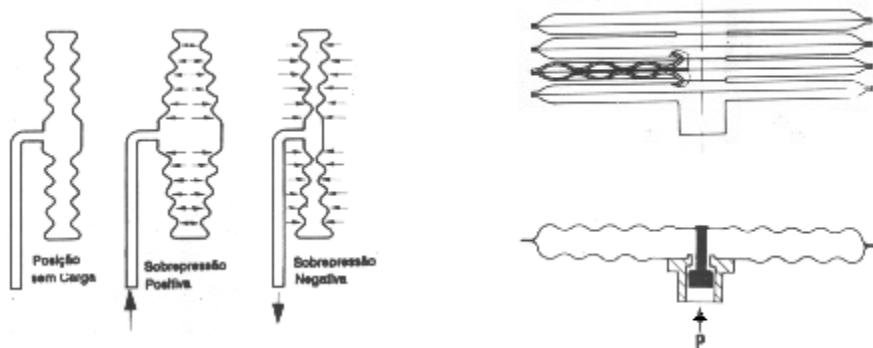
c) Tipo Helicoidal

Membrana ou Diafragma

É constituído por um disco de material elástico (metálico ou não), fixo pela borda. Uma haste fixa ao centro do disco está ligada a um mecanismo de indicação.

Quando uma pressão é aplicada, a membrana se desloca e esse deslocamento é proporcional à pressão aplicada.

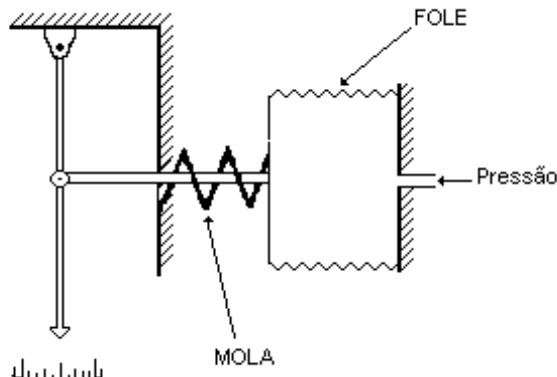
O diafragma geralmente é ondulado ou corrugado para aumentar sua área efetiva.



Fole

O fole é também muito empregado na medição de pressão. Ele é basicamente um cilindro metálico, corrugado ou sanfonado.

Quando uma pressão é aplicada no interior do fole, provoca sua distensão, e como ela tem que vencer a flexibilidade do material e a força de oposição da mola, o deslocamento é proporcional à pressão aplicada à parte interna.



Coluna de Líquido

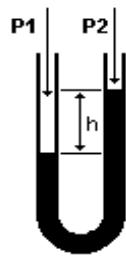
Consiste, basicamente, num tubo de vidro, contendo certa quantidade de líquido, fixado a uma base com uma escala graduada.

As colunas podem ser basicamente de três tipos: coluna reta vertical, reta inclinada e em forma de "U".

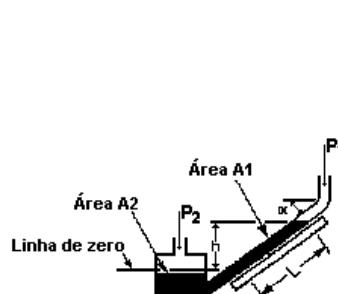
Os líquidos mais utilizados nas colunas são: água (normalmente com um corante) e mercúrio.

Quando se aplica uma pressão na coluna o líquido é deslocado, sendo que este deslocamento é proporcional a pressão aplicada.

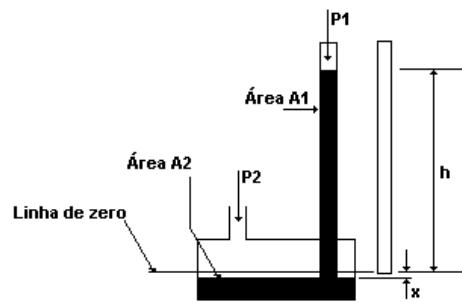
Sendo a fórmula : $P_1 - P_2 = h \cdot dr$



Manômetro de tubo em "U"



Manômetro de tubo inclinado



Manômetro de Reservatório

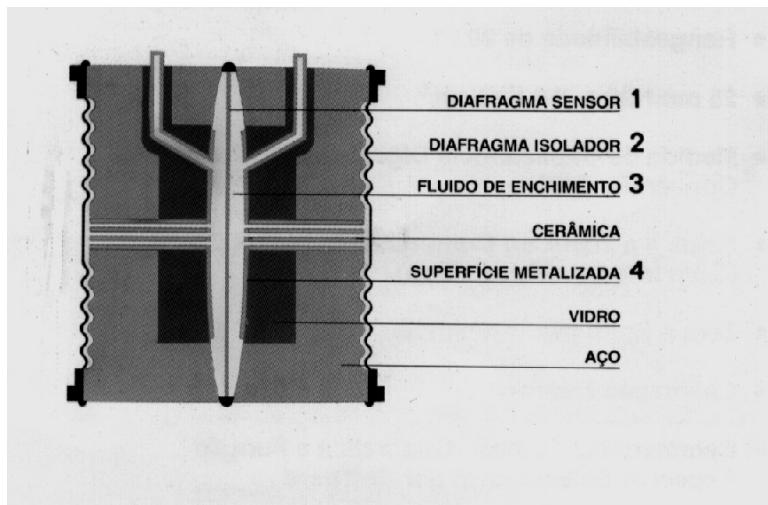
Tipo Capacitivo

A principal característica dos sensores capacitivos é a completa eliminação dos sistemas de alavancas na transferência da força / deslocamento entre o processo e o sensor.

Este tipo de sensor resume-se na deformação , diretamente pelo processo de uma das armaduras do capacitor . Tal deformação altera o valor da capacitância total que é medida por um circuito eletrônico.

Esta montagem, se por um lado, elimina os problemas mecânicos das partes móveis, expõe a célula capacitiva às rudes condições do processo, principalmente a temperatura do processo . Este inconveniente pode ser superado através de circuitos sensíveis a temperatura montados juntos ao sensor.

Outra característica inerente a montagem , é a falta de linearidade entre a capacitância e a distância das armaduras devido á deformação não linear , sendo necessário portanto , uma compensação (linearização) à cargo do circuito eletrônico .



O sensor é formado pelos seguintes componentes :

- Armaduras fixas metalizadas sobre um isolante de vidro fundido
- Dielétrico formado pelo óleo de enchimento (silicone ou fluorube)
- Armadura móvel (Diafragma sensor)

Uma diferença de pressão entre as câmaras de alta (High) e de baixa (Low) produz uma força no diafragma isolador que é transmitida pelo líquido de enchimento .

A força atinge a armadura flexível (diafragma sensor) provocando sua deformação , alterando portanto , o valor das capacitâncias formadas pelas armaduras fixas e a armadura móvel . Esta alteração é medida pelo circuito eletrônico que gera um sinal proporcional à variação de pressão aplicada à câmara da cápsula de pressão diferencial capacitiva .

Tipo Strain Gauge

Baseia-se no princípio de variação da resistência de um fio, mudando-se as suas dimensões.

Para variarmos a resistência de um condutor devemos analisar a equação geral da resistência :

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

R : Resistência do condutor

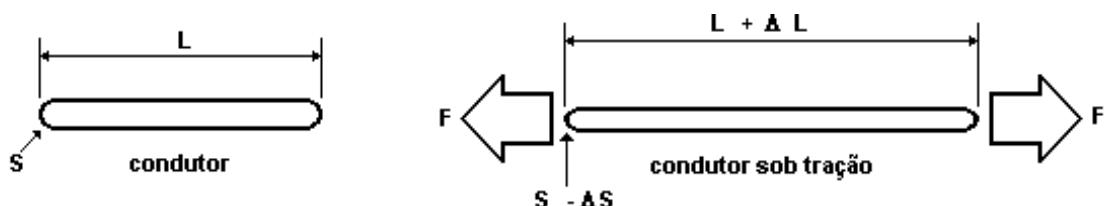
ρ : Resistividade do material

L : Comprimento do condutor

S : Área da seção transversal

A equação nos explica que a resistência elétrica de um condutor é diretamente proporcional a resistividade e ao comprimento e inversamente proporcional a área da seção transversal .

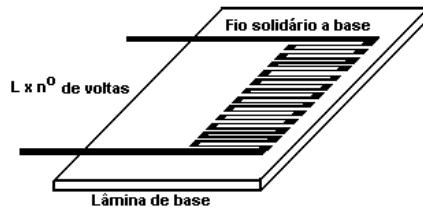
A maneira mais prática de alterarmos as dimensões de um condutor é tracionarmos o mesmo no sentido axial como mostrado a seguir :



Seguindo esta linha de raciocínio , concluímos que para um comprimento L obtivemos ΔL , então para um comprimento $10 \times L$ teríamos $10 \times \Delta L$, ou seja , quanto maior o comprimento do fio, maior será a variação da resistência obtida e maior a sensibilidade do sensor para uma mesma pressão (força) aplicada .

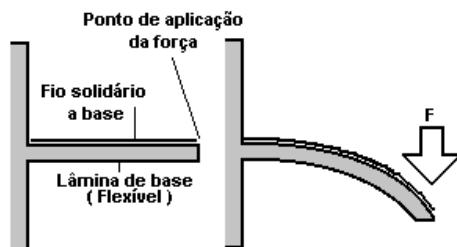
O sensor consiste de um fio firmemente colado sobre uma lâmina de base , dobrando-se tão compacto quanto possível .

Esta montagem denomina-se tira extensiométrica como vemos na figura a seguir :



Observa-se que o fio , apesar de solidamente ligado a lâmina de base , precisa estar eletricamente isolado da mesma .

Uma das extremidades da lâmina é fixada em um ponto de apoio rígido enquanto a outra extremidade será o ponto de aplicação de força .



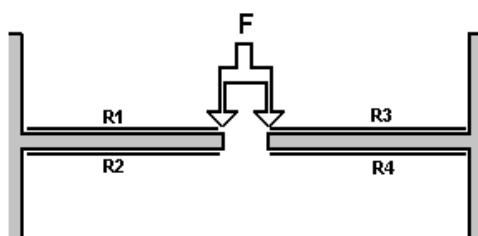
Da física tradicional sabemos que um material ao sofrer uma flexão , suas fibras internas serão submetidas à dois tipos de deformação : tração e compressão .

As fibras mais externas sofrem um alongamento com a tração pois pertencem ao perímetro de maior raio de curvatura, enquanto as fibras internas sofrem uma redução de comprimento (menor raio de curvatura) .

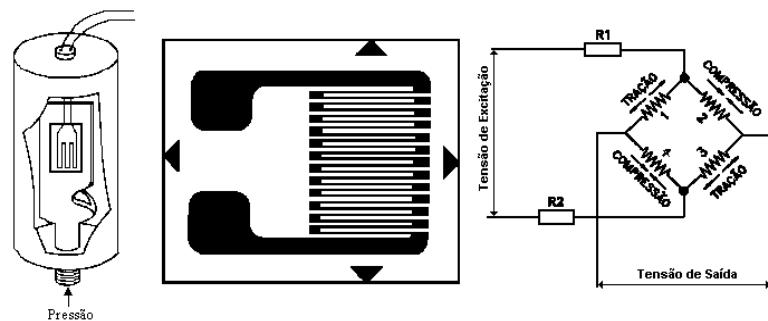


Como o fio solidário à lâmina, também sofrerá o alongamento, acompanhando a superfície externa, variando a resistência total .

Visando aumentar a sensibilidade do sensor, usaremos um circuito sensível a variação de resistência e uma configuração conforme esquema a seguir :

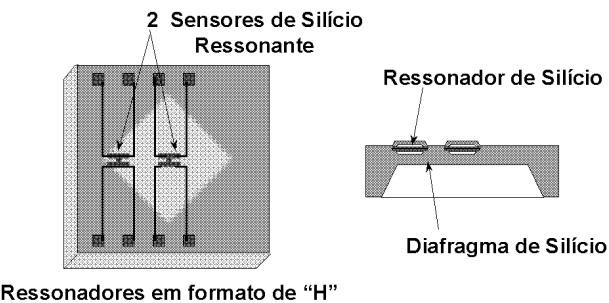


Notamos que a ligação ideal para um Strain Gauge com quatro tiras extensiométricas é o circuito em ponte de Wheatstone , como mostrado a seguir , que tem a vantagem adicional de compensar as variações de temperatura ambiente, pois todos os elementos estão montados em um único bloco .



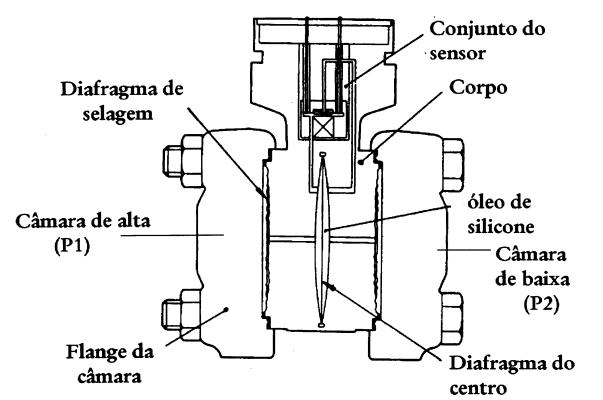
Sensor por Silício Ressonante

O sensor consiste de uma cápsula de silício colocada estrategicamente em um diafragma , utilizando do diferencial de pressão para vibrar em maior ou menor intensidade, afim de que essa freqüência seja proporcional a pressão aplicada.



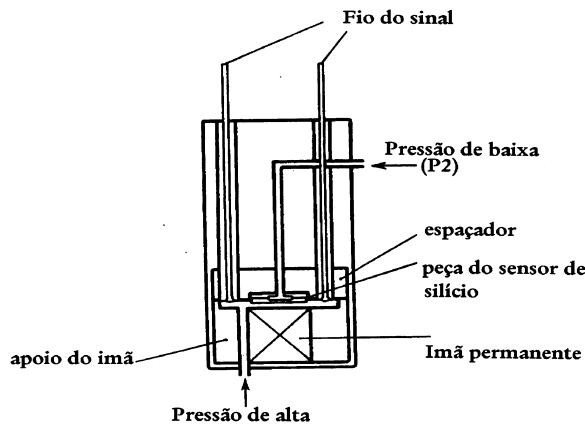
Na seqüência será exibido maiores detalhes sobre esse tipo de célula, sua construção e seu funcionamento.

Construção do sensor



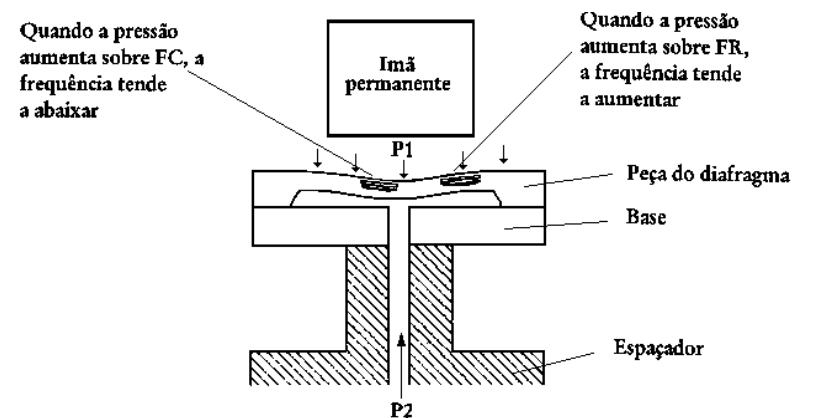
Todo o conjunto pode ser visto através da figura acima, porém, para uma melhor compreensão de funcionamento deste transmissor de pressão, faz-se necessário desmembrá-lo em algumas partes vitais.

Na figura a seguir podemos ver o conjunto do sensor. Ele possui um imã permanente e o sensor de silício propriamente dito.



Dois fatores que irão influenciar na ressonância do sensor de silício são: o campo magnético gerado por um imã permanente posicionado sobre o sensor; o segundo será o campo elétrico gerado por uma corrente em AC (além das pressões exercidas sobre o sensor, obviamente).

Este enfoque pode ser observado na figura abaixo.

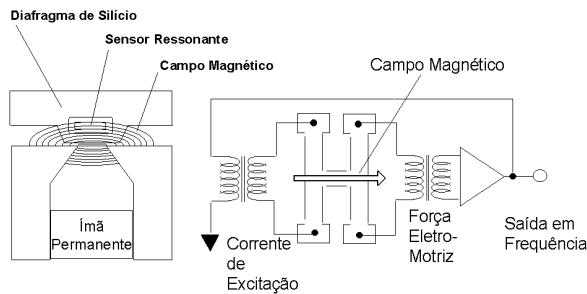


Portanto, a combinação do fator campo magnético/campo elétrico é responsável pela vibração do sensor.

Um dos sensores ficará localizado ao centro do diafragma (FC), enquanto que o outro terá a sua disposição física mais à borda do diafragma (FR)

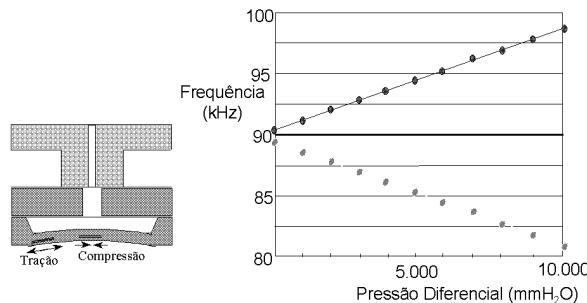
Por estarem localizadas em locais diferentes, porém, no mesmo encapsulamento, uma sofrerá uma compressão e a outra sofrerá uma tração conforme a aplicação de pressão sentida pelo diafragma.

Desta maneira, os sensores possuirão uma diferença de freqüência entre si. Esta diferença pode ser sentida por um circuito eletrônico, tal diferença de freqüência será proporcional ao ΔP aplicado. Na figura a seguir é exibido o circuito eletrônico equivalente.



Através dessas informações é possível criar um gráfico referente aos pontos de operação da freqüência x pressão.

Variação da Frequência com a Pressão

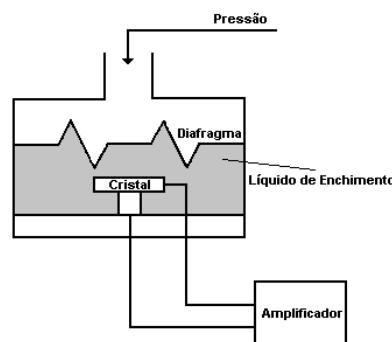


Tipo Piezoelétrico

Os elementos piezoelétricos são cristais, como o quartzo , a turmalina e o titanato que acumulam cargas elétricas em certas áreas da estrutura cristalina, quando sofrem uma deformação física, por ação de uma pressão. São elementos pequenos e de construção robusta. Seu sinal de resposta é linear com a variação de pressão, são capazes de fornecer sinais de altíssimas freqüências de milhões de ciclos por segundo.

O efeito piezoelétrico é um fenômeno reversível . Se for conectado a um potencial elétrico , resultará em uma correspondente alteração da forma cristalina . Este efeito é altamente estável e exato , por isso é utilizado em relógios de precisão .

A carga devida à alteração da forma é gerada sem energia auxiliar , uma vez que o quartzo é um elemento transmissor ativo . Esta carga é conectada à entrada de um amplificador , sendo indicada ou convertida em um sinal de saída , para tratamento posterior .



3.8 Medição de Nível

A medição de nível, embora tenha conceituação simples, requer por vezes artifícios e técnicas apuradas.

O nível é uma variável importante na indústria não somente para a operação do próprio processo, mas também para fins de cálculo de custo e de inventário. Os sistemas de medição de nível variam em complexidade desde simples visores para leituras locais até indicação remota, registro ou controle automático.

Na indústria se requer medições tanto de nível de líquidos como de sólidos.

Para facilitar a compreensão costuma-se definir nível, como sendo a altura do conteúdo de um reservatório, que poderá ser um líquido ou um sólido.

A medida do nível de um reservatório contendo líquido ou sólido, é efetuada a fim de manter esta variável em um valor fixo ou entre dois valores determinados, ou ainda para determinar a quantidade (volume ou massa) do fluido em questão.

Existem dois métodos de medição que são usados nos processos em geral.

a) Método de Medição Direta

É a medição que se faz tendo como referência a posição do plano superior da substância medida.

b) Método da Medição Indireta

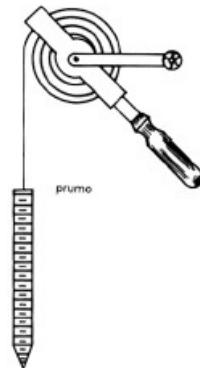
É o tipo de medição que se faz para determinar o nível em função de uma segunda variável.

3.8.1 Medidores de Nível por Medição Direta

3.8.1.1 Medidor de Nível Tipo Réguas ou Gabarito.

Consiste em uma régua graduada que tem o comprimento conveniente, para ser introduzido dentro do reservatório onde vai ser medido o nível.

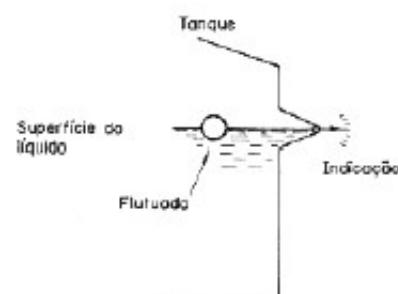
A determinação do nível se efetuará através da leitura direta do comprimento marcado na régua, pelo líquido. São instrumentos simples e de baixo custo permitindo medidas instantâneas. A graduação da régua deve ser feita a uma temperatura de referência, podendo estar graduada em unidades de comprimento, volume ou Massa.



3.8.1.2 Medidor de Nível tipo Flutuador

Medidor de Nível com flutuador interno

Neste medidor de nível, dispositivo esférico é colocado a flutuar no tanque, e seu movimento vertical é convertido pela alavanca em movimento rotativo para um indicador externo.



A rotação da alavanca produz uma indicação direta ou acima um contato magnético. O flutuador tipo esférico é normalmente usado quando grande resistência à pressão é desejada.

O flutuador é desenhado de modo que a linha de centro da esfera coincida com o nível da superfície do líquido, proporcionando uma máxima sensibilidade na mudança de nível.

O medidor de níveis com flutuador interno é usualmente utilizado em tanques abertos. Deve-se ter o cuidado para assegurar que não ocorra vazamentos quando estes são usados com pressão ou em tanque de vácuo.

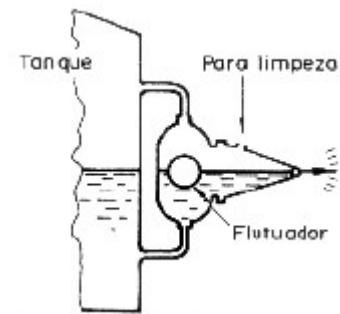
Medidor de nível com flutuador externo

Neste medidor o flutuador é colocado em uma câmara montada do lado de fora do tanque. Conforme varia o nível do flutuador movimenta-se verticalmente.

Este por sua vez transmite esta variação ao elemento indicador através de um sistema de alavancas.

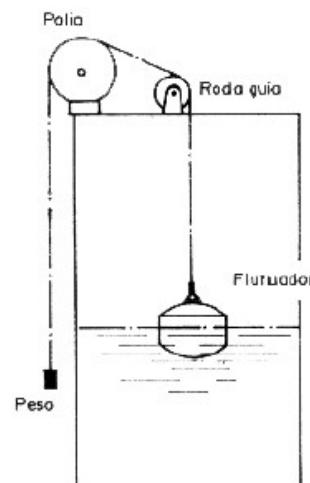
Sua vantagem sobre o sistema com flutuador interno está no fato deste ser menos afetado por oscilações na superfície do líquido contido no tanque ou por sua vaporização.

Com este medidor pode-se obter o nível em tanques sob pressão ou vácuo, medir nível de interface entre dois líquidos de densidade diferentes e medir nível de líquido corrosivos. É indicado especialmente para os casos em que a instalação de um flutuador tipo bóia dentro do tanque de medição não for recomendado.



Medidor de nível tipo flutuador livre

Medidor de nível tipo flutuador livre indica a variação do nível do líquido através do movimento ascendente e descendente do flutuador ligado por meio de uma fita metálica ou corrente a um peso. O deslocamento do flutuador de utilização deste medidor é de aproximadamente de 0 a 30m.



3.8.2 Medidores de Nível por Medição Indireta

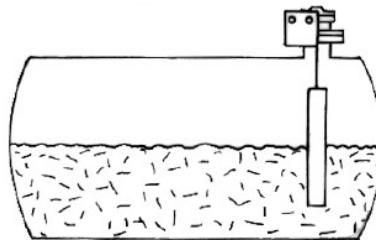
3.8.2.1 Medidor de Nível Tipo Deslocador (DISPLACER)

Este medidor de nível é provido de um detector que utiliza o princípio de Arquimedes que diz:

“Um corpo imerso em um líquido sofre a ação de uma força vertical dirigida de baixo para cima igual ao peso do volume do líquido deslocado.”

A esta força exercida pelo fluido no corpo nele submerso é denominado de empuxo, será maior quanto maior for a densidade do líquido. (Ex: Nadar no mar é mais fácil que nos rios – agua salgada possui maior densidade)

O deslocador comumente utilizado como sensor de transmissores de nível tem a forma de um cilindro oco, fabricado de materiais como aço inox 304 ou 316, monel, hastelloy, teflon sólido, etc. A escolha do material adequado é determinada principalmente pela temperatura e poder corrosivo do fluido. No interior do cilindro, se necessário, são depositados contrapesos granulados, a fim de ajustar o peso do deslocador. Uma vez que o empuxo aumenta com o percentual de imersão, segue-se que o peso aparente do deslocador se reduz com o aumento do nível.

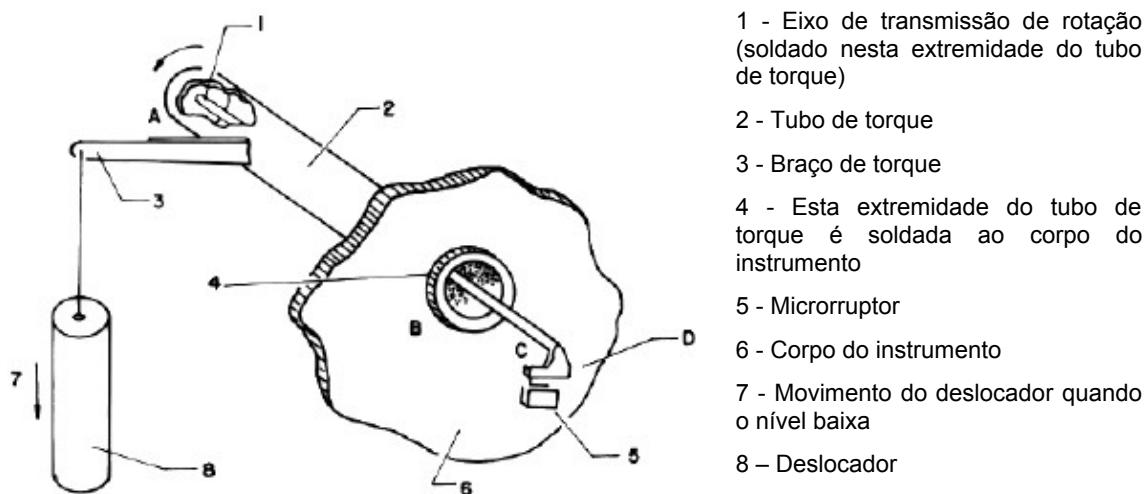


3.8.2.2 Tubo de Torque

O Tubo de torque consiste em um tubo oco, fechado em uma das extremidades, fabricado a partir de materiais tais como aço inox 304, 316, inconel, monel e outros. A espessura da parede do tubo de torque é tipicamente 1/32 pol, embora os tubos para medição de densidade sejam fabricadas até com 1/64 pol. Os fabricantes oferecem modelos para atender até 160 kg/cm², estendendo-se a faixa de temperatura de trabalho de - 200°C a + 400°C.

De acordo com a ilustração, quando o nível desce, o deslocador movimenta-se para baixo, devido a redução da força empuxo. Surge uma torção ao longo do tubo do torque. Esta torção equivale à distensão de uma mola, que equilibra o esforço que lhe é aplicado através de uma reação proporcional à deformação linear sofrida (Mesmo princípio de funcionamento dos torquímetros). Da mesma forma, o ângulo com que gira à extremidade livre do tubo de torque é proporcional ao momento com que reage o tubo de torque em resposta ao acréscimo do peso aparente. Como a variação do empuxo é proporcional à variação de nível (pois o empuxo é proporcional ao volume deslocado, que, por sua vez, é proporcional ao percentual submerso do deslocador), segue-se que a rotação da extremidade livre do tubo de torque é proporcional à variação de nível. Esta rotação, transmitida integralmente ao conversor através do eixo de transmissão e se situa entre 4 e 5 graus para uma excursão completa do nível ao longo do comprimento do deslocador.

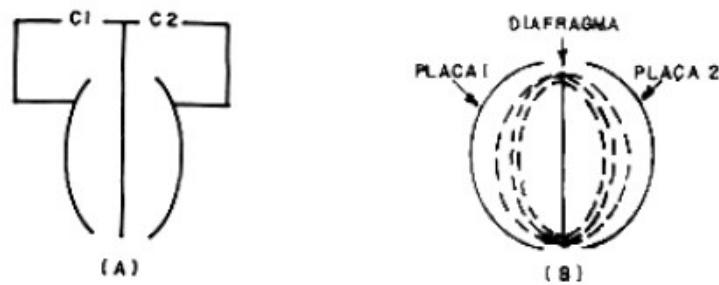
Observe que a haste do deslocador e o braço de torque por um lado e o eixo de transmissão por outro lado constituem o acoplamento, que “penetra” através do elemento de vedação representado pelo tubo de torque.



3.8.2.3 Medidor de Nível Tipo Pressão Diferencial

Estes instrumentos, quando utilizados em medição de nível, medem diferenciais de pressão que são provocados pela coluna líquida presente nos equipamentos cujo nível se deseja medir. Os instrumentos funcionando, segundo este princípio, são em geral transmissores, pelo que daremos aqui atenção.

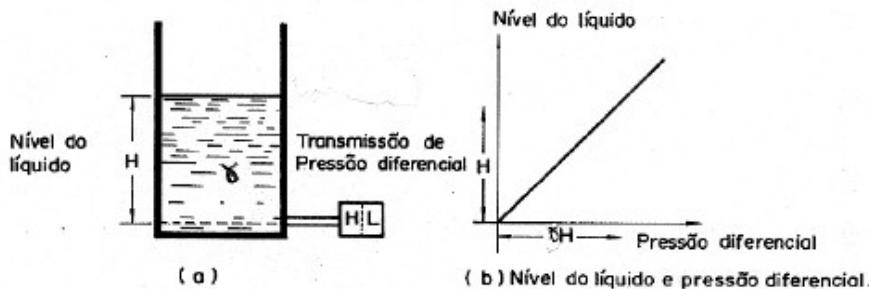
O princípio mais comum de funcionamento dos transmissores de pressão diferencial do tipo diafragma é o princípio de equilíbrio de forças, as pressões que definem um dado diferencial são aplicadas através das conexões de entrada do instrumento a duas câmaras situadas em lados opostos, estanques entre si e separadas por um elemento sensível (diafragma). Estas pressões, atuando sobre o elemento com uma superfície determinada, produzem forças de mesma direção e sentidos opostos, fazendo originar uma força resultante. Esta força resultante, no caso de transmissor tipo célula capacitiva, provoca uma variação na relação das capacitâncias C1 e C2. Esta variação, proporcional à pressão diferencial é convertida, amplificada proporcionando um sinal de saída em corrente na saída do transmissor (normalmente de 4 - 20 mA).



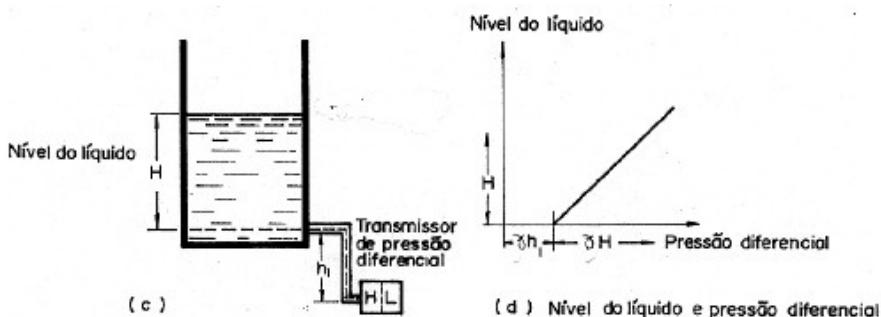
Para tanque aberto

O lado de alta pressão do transmissor de pressão diferencial é ligado pela tomada da parte inferior do tanque e o lado de baixa pressão é aberto para a atmosfera.

Visto que a pressão estática do líquido é diretamente proporcional ao peso do líquido, este pode ser obtido pela medida do primeiro. Neste caso, o medidor de pressão pode ser usado em vez do transmissor de pressão diferencial.

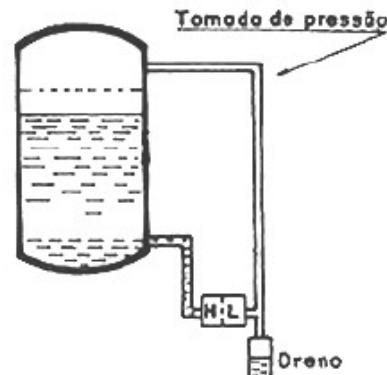


O transmissor de pressão diferencial é usualmente montado em uma posição que corresponde o nível baixo de medição. Se isto é difícil, ele pode ser montado como mostra a figura abaixo. Neste caso a supressão é necessário desde que a pressão adicional já esteja na parte baixa do nível do líquido.



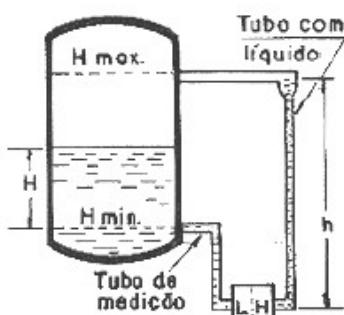
Para Tanque Fechado

No tanque fechado se a pressão dentro do tanque é diferente da pressão atmosférica, os lados de alta e baixa pressão são conectados individualmente por tubos na parte baixa e alta do tanque respectivamente para obter pressão diferencial proporcional ao nível líquido.



Para tanque fechado com vapor

Quando se necessita medir nível em tanque fechado contendo vapor, se faz necessário preencher a tomada de alta pressão com um líquido (normalmente água) para evitar que se forme uma coluna de água nesta tomada, devido à existência de condensado que se acumularia nela e provocaria medição falsa. Neste caso, deve-se fazer a correção do efeito desta coluna.



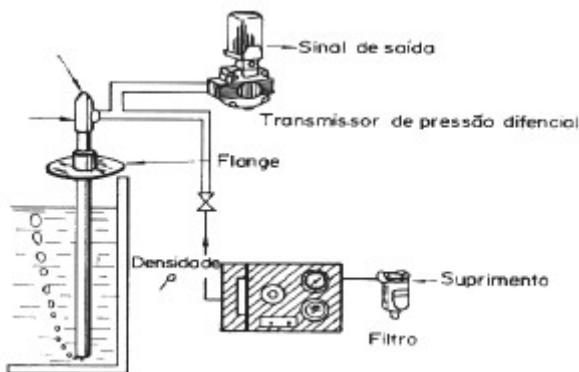
3.8.2.4 Medidor de Nível Tipo Borbulhador

Neste tipo de medição, um tubo é inserido no líquido em um vaso. Uma das pontas devidamente preparada é submersa no líquido cujo nível se deseja medir e através da ponta superior é fornecido ar ou gás inerte permanentemente.

O princípio no qual se baseia este tipo de medição é que será necessário uma pressão de ar igual à coluna líquida existente no vaso, para que o ar vença este obstáculo e consiga escapar pela extremidade inferior do tubo.

Na medição é necessário que se possa saber se a pressão exercida pela coluna de líquido está sendo vencida ou não, e isto se torna possível com o escape das bolhas de ar pela ponta imersa no tubo. Isto representa um pequeno valor adicional na pressão de ar, desprezível, desde que o borbulhamento não seja intenso.

A medida se faz através de um instrumento receptor que pode ser um manômetro ou qualquer outro instrumento transmissor de pressão.



Quando o nível do líquido sobe ou desce a pressão interna do tubo aumenta ou diminui respectivamente acompanhando o nível; esta variação de pressão é sentida pelo instrumento receptor. Uma coluna de líquido maior requer, maior pressão de ar para que haja expulsão de bolhas de ar e para colunas menores, pressões menores de ar.

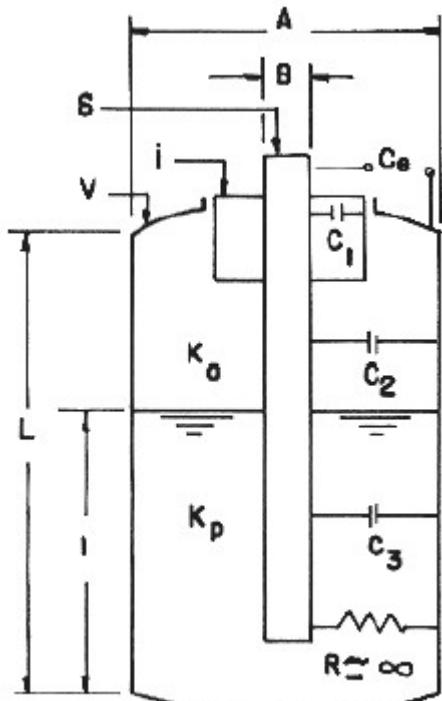
Para termos um bom índice de precisão, é necessário que o fluxo de ar ou gás seja mantido constante em qualquer situação e para conseguirmos esta condição temos diversas maneiras, seja pela utilização de orifícios de restrição, válvulas-agulha, rotâmetros com reguladores de pressão diferencial, borbulhadores reguláveis, entre outros.

As válvulas-agulha e os orifícios de restrição são utilizados por constituírem limitadores de vazão. Podem ser regulados, no caso das válvulas-agulha, até obter o borbulhamento ideal e calculado, no caso de orifícios de restrição.

Já o rotâmetro com reguladores de pressão diferencial apresentam ótima precisão, pois, além de permitirem vazão de ar ou gás, mantêm o fluxo do mesmo constante regulando permanentemente a queda de pressão à montante e a jusante do rotâmetro.

3.8.2.5 Medidor de Nível Tipo Capacitivo

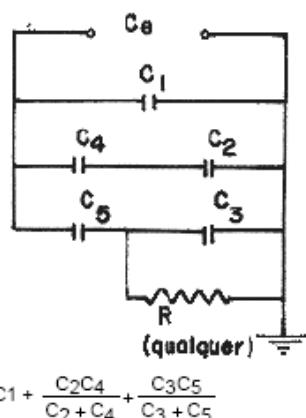
Um capacitor consiste de dois condutores, denominados placas, separados por um material dielétrico. Este componente, muito utilizado em circuitos elétricos, tem como principal característica a propriedade de armazenar cargas elétricas. A grandeza que caracteriza um capacitor é a capacitância, expressa em Farad. Um capacitor de 1 Farad armazena 1 Coulomb de carga ao ser submetido a uma diferença de potencial de 1 Volt. Quando submetido a uma tensão alternada, o capacitor é “percorrido” por uma corrente diretamente proporcional a sua capacitância.



O medidor por capacitância consiste de uma sonda vertical inserida no vaso no qual se deseja monitorar o nível. A sonda pode ser isolada ou não e serve como uma das placas do capacitor. A outra placa é formada pelas paredes do vaso e o fluido comporta-se como dielétrico. A capacitância é medida através de um circuito em ponte AC, excitado por um oscilador de alta frequência (500 kHz a 1,5 MHz). Ao variar o nível no interior do vaso, altera-se as proporções entre o líquido e o vapor. Como a constante dielétrica da maioria dos líquidos é maior que a dos vapores as variações de nível se traduzem em variações (quase) lineares de capacitância. Consequentemente, as sondas capacitivas também podem ser utilizadas para detectar a interface de líquidos com constantes dielétricas (K) distintas.

No circuito, C_1 representa a capacitância parásita apresentada, pelo isolador da sonda e é constante. As capacitâncias C_2 e C_3 representam os efeitos das constantes dielétricas das fases de vapor e líquido, respectivamente. O valor do resistor R deve ser muito elevado (tendendo ao infinito) e representa a resistência efetiva entre a sonda e as paredes do vaso.

As condições de pressão e temperatura determinam o tipo de isolador da sonda enquanto que as condições do fluido (corrosivo ou não) determinam o seu revestimento.



$$C = \frac{7,36 \cdot K}{\log_{10} \frac{D}{d}} = \mu F/FT$$

Onde:

C - Capacitância em picofarad

K - constante dielétrica

d - diâmetro do sensor

D - diâmetro do reservatório

Sólidos					
Material	K	Material	K		
Ácido acético	4,1	Fenol	4,3		
Asbestos	4,8	Polietileno	4,5		
Asfalto	2,7	Polipropileno	1,5		
Baquelite	5,0	Porcelana	5,7		
Carbonato de Cálcio	9,1	Quartzo	4,3		
Celulose	3,9	Borracha	3,0		
Óxido de ferro	14,2	Areia	3,5		
Vidro	3,7	Enxofre	3,4		
Óxido de chumbo	25,9	Açúcar	3,0		
Óxido de magnésio	9,7	Uréia	3,5		
Naftaleno	2,5	Sulfato de zinco	8,2		
Nylon	45,0	Teflon	2,0		
Papel	2,0				
Líquidos					
Material	Temp.(°C)	K	K		
Acetona	22	21,4	Heptano	20	1,9
Amônia	-32	22,4	hexano	20	1,9
Anilina	0	7,8	Ácido clorídrico	28	4,6
Benzeno	20	2,3	Iodo	107	118,0
Benzila	94	13,0	Querosene	21	1,8
Bromo	20	3,1	Metanol	25	33,6
Butano	-1	1,4	Álcool metílico	20	33,1
Tetracloreto de carbono	20	2,2	Éter metílico	26	5,0
Óleo de ricino	16	4,7	Óleo mineral	27	2,1
Cloro	0	2,0	Naftaleno	20	2,5
Clorofórmio	0	5,5	Octano	20	2,0
Cumeno	20	2,4	Pentano	20	1,8
Ciclohexano	20	2,0	Fenol	48	9,9
Dimetil-heptano	20	1,9	Fosgênio	0	4,7
Dinetylpentano	20	1,9	Propano	0	1,6
Dowtherm	21	3,3	Piridina	20	12,5
Etanol	25	24,3	Estireno	25	2,4
Acetona etila	20	6,4	Enxofre	400	3,4
Etilbenzeno	20	2,5	Tolueno	20	2,4
Cloreto de etileno	20	10,5	Uretano	23	3,2
Éter etílico	20	4,3	Éter vinílico	20	3,9
Etilbenzeno	24	3,0	Água	20	80,0
Ácido fórmico	16	58,5	Água	0	88,0
Freon 12	21	2,4	Água	100	48,0
Glicol	20	41,2	Xileno	20	2,4

3.8.2.6 Medidor de Nível Tipo Ultra-Som

O ultra-som é uma onda sonora (mecânica), cuja freqüência de oscilação é maior do que aquela sensível pelo ouvido humano, isto é, acima de 20 kHz.

A geração ocorre quando uma força externa excita as moléculas de um meio elástico. Esta excitação é transferida de molécula a molécula do meio com uma velocidade que depende da elasticidade e inércia das moléculas. A propagação do ultra-som depende, desta forma, do meio, se sólido, líquido ou gases e sua componente longitudinal da onda propaga-se à velocidade característica do material, isto é, é função exclusivamente deste.

Na água, a 10°C, a velocidade de propagação do som é de 1440 m/s, enquanto que no ar, a 20°C, é 343 m/s.

Assim sendo, a velocidade do som é a base para a medição através da técnica de ECO, usada nos dispositivos tipo ultra-sônicos, sendo função da temperatura e da pressão, cujos efeitos originados por esta última são desprezíveis.

Geração do ultra-som

As ondas de ultra-som são geradas pela excitação elétrica de materiais piezelétricos.

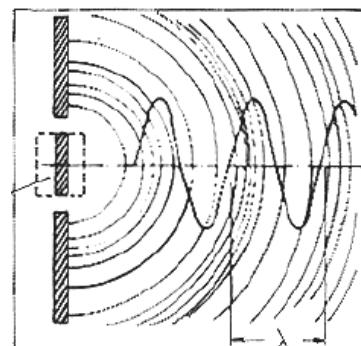
A característica marcante desses materiais é a produção de um deslocamento quando aplicamos uma tensão. Assim sendo, eles podem ser usados como geradores de ultra-som, compondo, portanto, os transmissores.

Inversamente, quando se aplica uma força em um material piezelétrico, resulta o aparecimento de uma tensão no seu terminal elétrico. Nesta modalidade, o material piezelétrico é usado como receptor de ultra-som.

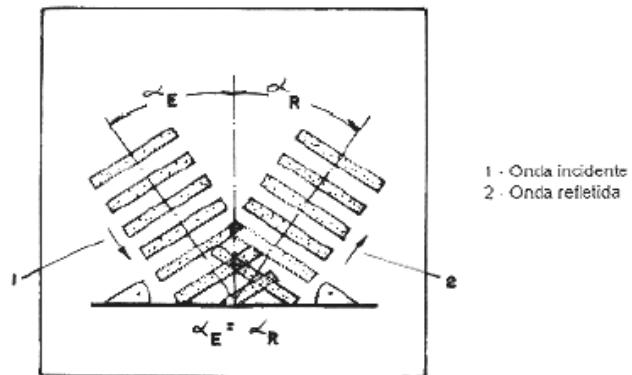
Pela sua estabilidade, o quartzo cultivado é um dos materiais mais recomendados para fabricação do sensor transdutor.

A excitação destes transdutores pode ser realizada de três maneiras:

- Pulso: a excitação de pulso consiste em excitar o transdutor com pulsos que podem atingir uma tensão acima de 500V e com a duração de alguns nanosegundos. A frequência de repetição dos pulsos é da ordem de 300 a 1000 kHz.
- Onda Contínua: como o nome indica, na excitação por onda contínua o transdutor é excitado por uma onda senoidal (às vezes, onda quadrada) ininterruptamente.
- Trens de onda: pode ser produzido por um gerador de ondas senoidais que é ligado por um tempo e, em seguida, desligado, repetindo-se o processo periodicamente.



O princípio de operação dos dispositivos ultra-sônicos tem por base uma lei da ótica física: "O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão"



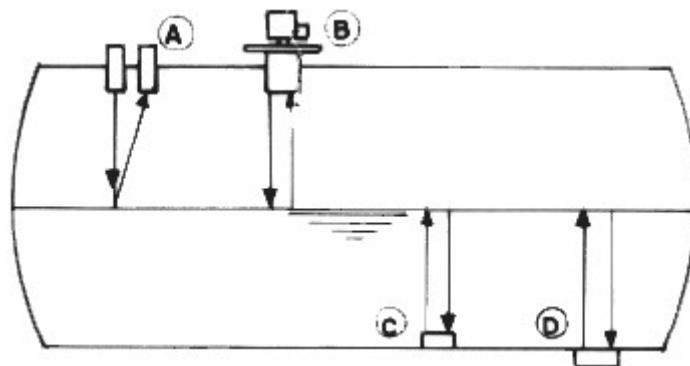
Quando uma onda ultra-sônica, que se propaga em um meio, incide sobre a interface de duas substâncias de densidades diferentes, faz surgir duas ondas emergentes: uma onda ultra-sônica proveniente da reflexão nessa interface (onda refletida) e outra proveniente da mudança de meio de propagação, denominada onda refratada. Cada interface refletirá de forma diferente.

Os dispositivos do tipo ultra-sônico utilizam-se da primeira, isto é, seu princípio de operação concentra-se reflexão da onda gerada pelo transdutor, quando encontra a interface com o produto cujo nível desejamos medir ou, mais precisamente, no lapso de tempo gasto pela onda desde o instante que é gerada, até o instante em que retorna àquele transdutor depois de refletir-se na interface.

Detector Contínuo de Nível

Neste sistema, a onda é emitida e o tempo necessário para retornar é uma indicação da profundidade. O detector ultra-sônico contínuo de nível (SONAR) mede o tempo requerido por uma onda ultra-sônica para ir da superfície do líquido, refletir-se e voltar.

O transdutor pode ser montado no topo do equipamento ou imerso no meio líquido, cujo nível se deseja medir.



O tipo de instalação A prevê dois transdutores, um para emissão e outro para recepção, montados em receptáculos distintos. Neste caso, a onda é gerada no ar, propagando-se até a interface ar-líquido, onde ocorre a reflexão, para depois a onda refletida ser recebida no cristal receptor. A medição contínua do nível de líquido se faz de uma maneira indireta, uma vez que todo o percurso da onda é realizado no meio ar.

Em B o transdutor gera um trem de pulsos ("burst") ultra-sônico e, enquanto a energia acústica é gerada, o receptor está desativado.

O emissor e o receptor estando num único receptáculo, faz-se necessário a ativação do receptor após a emissão do trem de ondas, visando à detecção do eco. A montagem da unidade emissão/recepção no meio gasoso traz a vantagem de se evitar o contato com o fluido do processo; em contrapartida, apresenta a desvantagem de transferir para o meio gasoso uma parcela maior de sua energia.

Nas aplicações para medição de nível de líquidos, a direção do ângulo de incidência deve ser de $\pm 2^\circ$ em relação à vertical. Na instalação C, o tempo de eco ultra-sônico indica diretamente o nível do produto.

A unidade pode ainda ser montada externamente ao vaso (situação D), apresentando a vantagem adicional da não necessidade, de vazar o equipamento.

As instalações C e D discutidas neste sub-item são aplicáveis à detecção de nível de líquidos limpos, enquanto os esquemas A e B podem ser usados também para medir níveis de sólidos.

3.8.2.7 Medidor de Nível tipo Radioativo

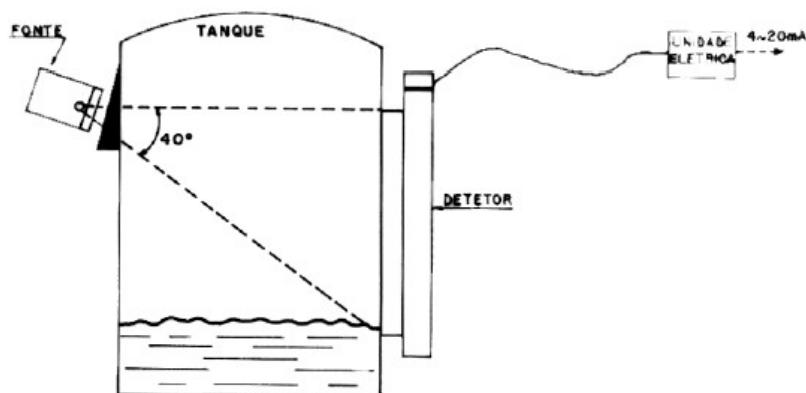
Os sistemas radiamáticos são utilizados para medição de nível de líquidos, polpas ou sólidos granulados em aplicações onde nenhuma outra tecnologia disponível pode ser aplicada.

Esses sistemas consistem de uma fonte de emissão de raio gama (γ), um detector tipo câmara de ionização ou cintilação e uma unidade eletrônica conversora e transmissora de sinal. A fonte, normalmente de césio 137, é alojada em cápsula de aço inox e blindada por chumbo ou ferro fundido, deixando desbloqueada para emissão do raio gama um ângulo de 40° (medição contínua) ou 7° (medição pontual).

O detector mais utilizado é formado por uma câmara contendo gás inerte (argônio, por exemplo) pressurizado, alimentado por uma tensão contínua negativa (-15 VDC) e um coletor de elétrons (que são retirados da última camada do átomo pela incidência do raio gama). A corrente elétrica, produzida pela passagem do raio gama é diretamente proporcional a intensidade da radiação e inversamente proporcional ao nível do produto no silo ou tanque.

Esse sinal é convertido em tensão e/ou freqüência para finalmente, pela unidade eletrônica ser transmitida através de sinal de corrente de 4 a 20 mADC.

Muitos arranjos são utilizados na instalação desses sistemas, porém a mais típica pode ser vista na figura abaixo. Onde a fonte é instalada de um lado do silo ou tanque e o detector no outro.



A intensidade da fonte, que é medida em Ci (Curie), é calculada considerando a distância da mesma ao detector, a espessura e o material da parede, e o produto. Já o comprimento do detector considera o alcance de medição desejada.

3.8.2.8 Medição de Nível por Pesagem

A medição de nível por pesagem consiste basicamente na instalação de células de cargas nas bases de sustentação do silo cujo nível se deseja medir.

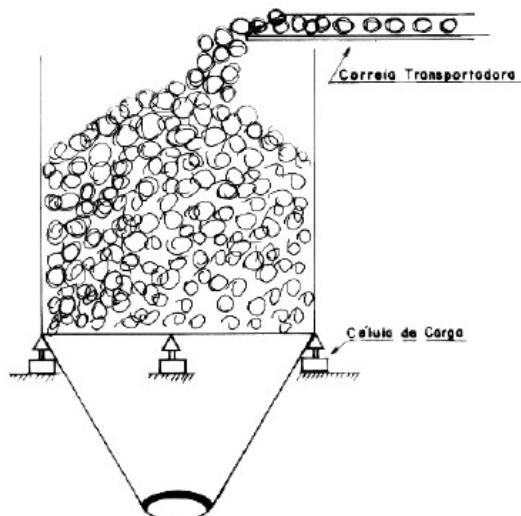
Célula de carga é um sensor constituído por fitas extensiométricas (STRAIN-GAUGES) fixados adequadamente em um bloco de aço especial com dimensões calculadas para apresentar uma deformação elástica e linear quando submetido a uma força. Essa deformação é detectada pelas fitas extensiométricas através da variação de sua resistência elétrica.

As células de carga podem ser instaladas sob os pontos de apoio da estrutura do silo, de tal forma que o seu peso é nelas aplicado. Para estas aplicações é necessário que as células de carga sejam imunes a esforços laterais. Para isto seus encostos para a carga são constituídos de apoios especiais do tipo côncavo ou esférico. O número de células de carga varia em função da forma do silo, sendo que a solução que apresenta melhor precisão é apoiar o silo em três células dispostas defasadas de 120° em relação à projeção do seu centro de simetria.

Sempre que possível o silo deve ser projetado com seção transversal circular de forma a garantir uma distribuição estável e equalizada do peso total entre as três células de carga. Em algumas instalações existem silos apoiados em uma ou duas células de carga sendo os outros apoios fixos; esta solução não é recomendada devido à imprecisão provocada pela distribuição desigual do peso entre os apoios.

Para silos pequenos podem ser usadas células de carga que são deformadas por tração, sendo neste caso o silo suspenso por uma única célula, eliminando-se o problema de distribuição de carga.

Os sistemas de medição de nível através de pesagem exigem que o silo seja fisicamente isolado da estrutura do prédio, evitando, desta forma, que forças estranhas sejam aplicadas às células de carga, introduzindo erros na medição.



Algumas alterações do projeto estrutural do prédio poderão ser necessárias, uma vez que o peso do silo não está mais distribuído em uma estrutura de sustentação, mas, sim, concentrando em pontos onde serão instaladas as células de carga. Os sistemas de enchimento e esvaziamento do silo deverão ser cuidadosamente projetados tendo em vista minimizar sua interferência no sistema de medição. Deve ser evitada a instalação de vibradores, motores e outras fontes de vibração em contato direto com o silo. Em silos mais altos ou instalados em local sujeito a vibrações excessiva,

recomenda-se a colocação de barras estabilizadoras nas laterais do silo para absorver os eventuais esforços horizontais que tendam a desequilibrar o silo prejudicando o desempenho do sistema.

3.9 Medição 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, mm³, cm³, m³, 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, m³/hora, galões/min). No caso de gases e vapores, a vazão instantânea pode ser expressa, em Kg/h ou em m³/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 Nm³/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:

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ litros}$$

$$1 \text{ galão (americano)} = 3,785 \text{ litros}$$

$$1 \text{ pé cúbico} = 0,0283168 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ libra} = 0,4536 \text{ Kg}$$

Existem dois tipos de medidores de vazão, os medidores de quantidade e os medidores volumétricos.

3.9.1 Medidores de Quantidade

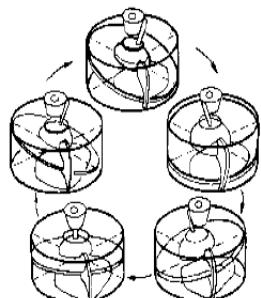
São aqueles que, a qualquer instante permitem saber que quantidade de fluxo passou mas não vazão do fluxo que está passando. Exemplo: bombas de gasolina, hidrômetros, balanças industriais, etc.

a) Medidores de Quantidade por Pesagem

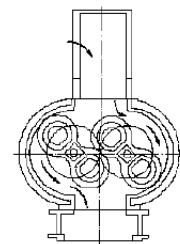
São utilizados para medição de sólidos, que são as balanças industriais.

b) Medidores de Quantidade Volumétrica

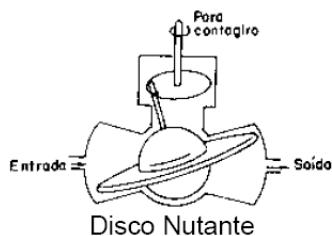
São aqueles que o fluido, passando em quantidades sucessivas pelo mecanismo de medição faz com que o mesmo acione o mecanismo de indicação. São estes medidores que são utilizados para serem os elementos primários das bombas de gasolina e dos hidrômetros. Exemplo: disco nutante, tipo pistão rotativo oscilante,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



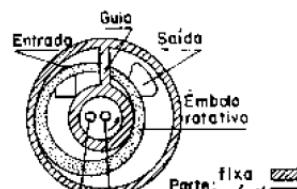
Tipo Pás Giratórias



Tipo de Engrenagem



Disco Nutante



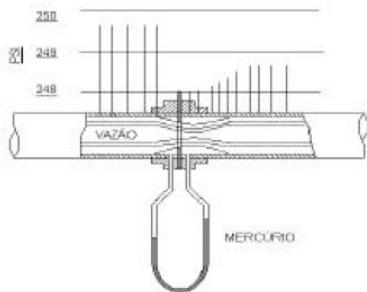
Tipo Pistão Rotativo

3.9.2 Medidores Volumétricos

São aqueles que exprimem a vazão por unidade de tempo.

3.9.2.1 Medição de Vazão por Pressão Diferencial

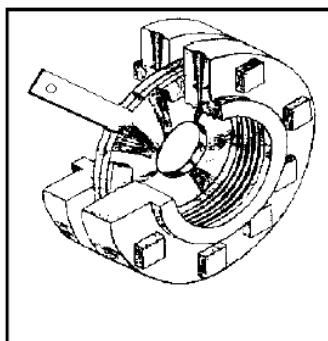
A pressão diferencial é produzida por vários tipos de elementos primários colocados na tubulação de forma tal que o fluido passa através deles. A sua função é aumentar a velocidade do fluido diminuindo a área da seção em um pequeno comprimento para haver uma queda de pressão. A vazão pode então, ser 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 maioria dos gases e líquidos, inclusive fluídos com sólidos em suspensão, bem como fluídos 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)

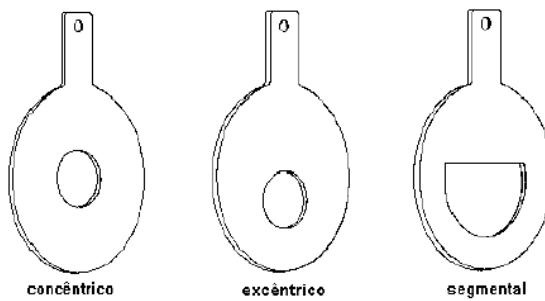
PLACA DE ORIFÍCIO

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. Costumemente são fabricadas com aço inox, monel, latão, etc., dependendo do fluído

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Instalação fácil	Alta perda de carga
Econômica	Baixa Rangeabilidade
Construção simples	Manutenção e troca simples

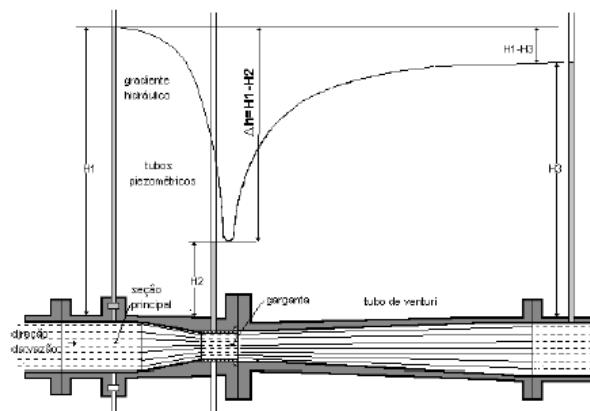


- a) Orifício concêntrico: Este tipo de placa é utilizado para líquidos, gases e vapor que não contenham sólidos em suspensão.
- b) Orifício excêntrico: Utilizada quando tivermos fluido com sólidos em suspensão, os quais possam ser retidos e acumulados na base da placa, sendo o orifício posicionado na parte de baixo do tubo.
- c) Orifício segmental: Esta placa tem a abertura para passagem de fluido, disposta em forma de segmento de círculo. É destinada para uso em fluidos laminados e com alta porcentagem de sólidos em suspensão.

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 tubulação. Seu propósito é acelerar o fluido e temporariamente baixar sua pressão estática.

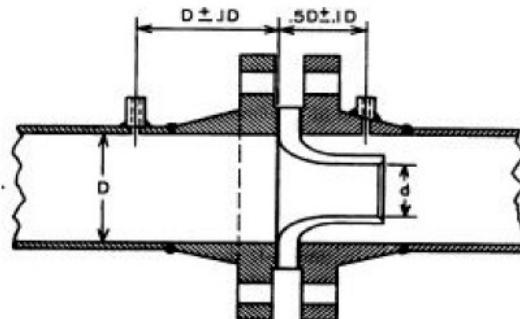
A recuperação de pressão em um tubo Venturi é bastante eficiente, como podemos ver na figura a seguir, sendo seu uso recomendado quando se deseja um maior restabelecimento de pressão e quando o fluido medido carrega sólidos em suspensão. O Venturi produz um diferencial menor que uma placa de orifício para uma mesma vazão e diâmetro igual à sua garganta.



BOCAL DE VAZÃO

O Bocal de vazão (Flow nozzle) é, em muitos aspectos um meio termo entre a placa de orifício e o tubo Venturi. O perfil dos bocais de vazão permite sua aplicação em serviços onde o fluido é abrasivo e corrosivo. O perfil de entrada é projetado de forma a guiar a veia fluída até atingir a seção mais estrangulada do elemento de medição,

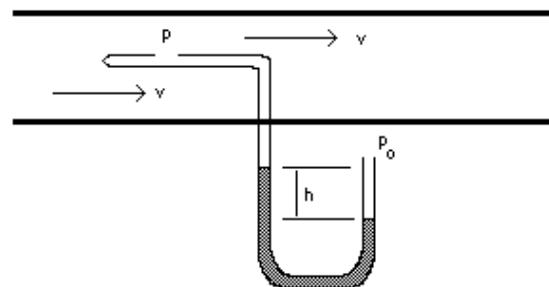
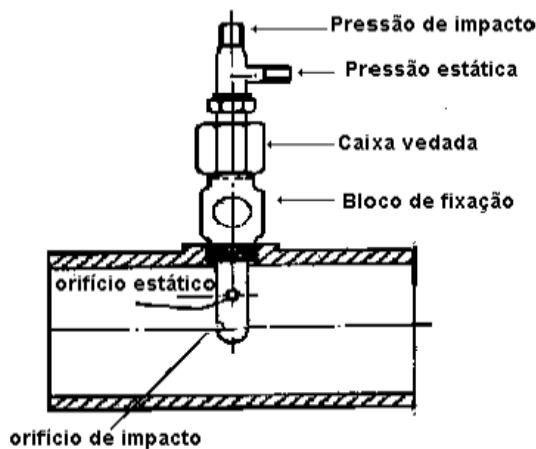
seguindo uma curva elíptica (projeto ASME) ou pseudoelíptica (projeto ISA). Seu principal uso é em medição de vapor com alta velocidade, recomendado p/ tubulações > 50mm.



TUBO PITOT

É um dispositivo para medição de vazão através da velocidade detectada em um ponto da tubulação.

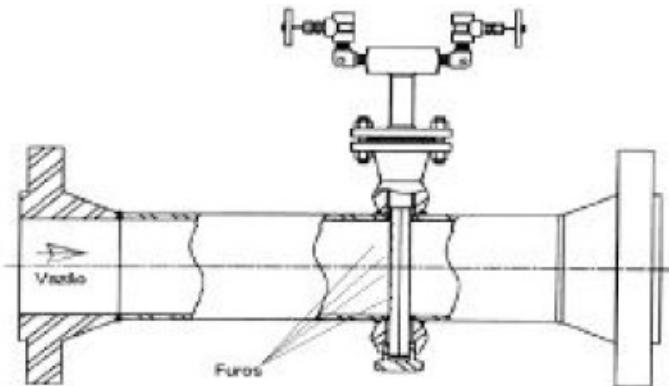
O tubo de Pitot é um tubo com uma abertura em sua extremidade, sendo esta colocada na direção da corrente fluida de um duto. A diferença da pressão total e a pressão estática da linha nos dará a pressão dinâmica, a qual é proporcional ao quadrado da velocidade.



$$\text{Pressão Dinâmica} = \text{Pressão Total} - \text{Pressão Estática}$$

MEDIDOR TIPO ANNUBAR

O Annubar é um dispositivo de produção de pressão diferencial que ocupa todo o diâmetro do tubo. O annubar é projetado para medir a vazão total, de forma diferente dos dispositivos tradicionais de pressão diferencial.



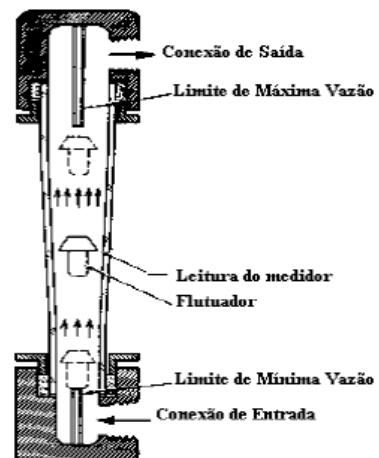
ROTÂMETROS

Rotâmetros são medidores de vazão por área variável, nos quais um flutuador varia sua posição dentro de um tubo côncico, proporcionalmente à vazão do fluido.

Basicamente, um rotâmetro consiste de duas partes:

- 1) Um tubo de vidro de formato côncico, o qual é colocado verticalmente na tubulação em que passará o fluido que queremos medir. A extremidade maior do tubo côncico ficará voltada para cima.
- 2) No interior do tubo côncico teremos um flutuador que se moverá verticalmente, em função da vazão medida.

O fluido passa através do tubo da base para o topo. Quando não há vazão, o flutuador permanece na base do tubo e seu diâmetro maior é usualmente selecionado de tal maneira que bloquee a pequena extremidade do tubo, quase que completamente. Quando a vazão começa e o fluido atinge o flutuador, o empuxo torna o flutuador mais leve; porém, como o flutuador tem uma densidade maior que a do fluido, o empuxo não é suficiente para levantar o flutuador.



A área de passagem oferece resistência à vazão e a queda de pressão do fluido começa a aumentar. Quando a pressão diferencial, somada ao efeito de empuxo do líquido, excede a pressão devido ao peso do flutuador, então o flutuador sobe e flutua na corrente fluida.

Com o movimento ascendente do flutuador em direção à parte mais larga do tubo, a área anular, entre a parede do tubo de vidro e a periferia do flutuador, aumenta. Como a área aumenta, o diferencial de pressão devido ao flutuador decresce. O flutuador ficará em equilíbrio dinâmico quando a pressão diferencial através do flutuador somada ao efeito do empuxo contrabalançar o peso do flutuador.

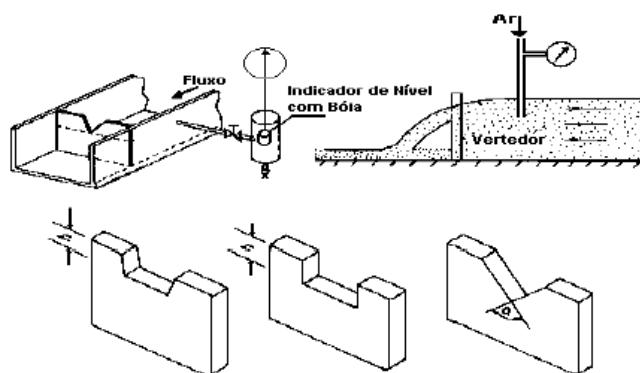
Qualquer aumento na vazão movimenta o flutuador para a parte superior do tubo de vidro e a diminuição causa uma queda a um nível mais baixo. Cada posição do flutuador corresponde a um valor determinado de vazão e somente um. É somente necessário colocar uma escala calibrada na parte externa do tubo e a vazão poderá ser determinada pela observação direta da posição do flutuador.

3.9.2.2 Medidores de Vazão em Canais Abertos

Os dois principais tipos são: o vertedor e a calha de Parshall.

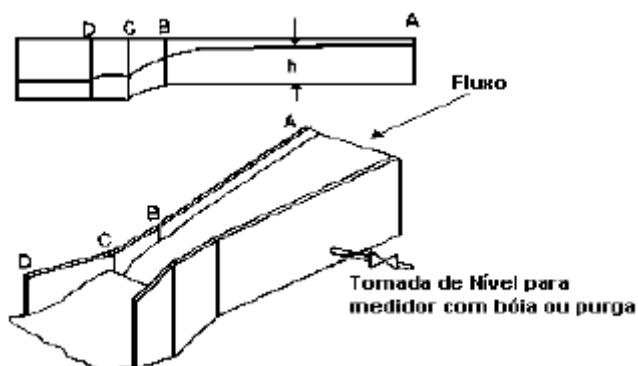
VERTEDOR

O vertedor mede a altura estática do fluxo em reservatório que vete o fluido de uma abertura de forma variável.



CALHA DE PARSHALL

O medidor tipo calha de Parshall é um tipo de Venturi aberto que mede a altura estática do fluxo. É um medir mais vantajoso que o vertedor, porque apresenta menor perda de carga e serve para medir fluidos com sólidos em suspensão.

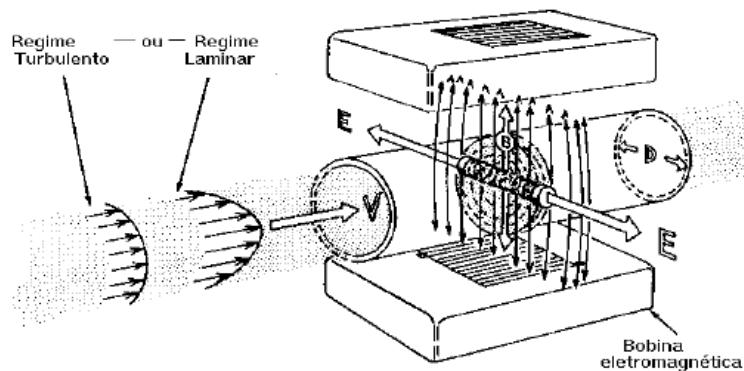


3.9.3 Medidores Especiais de Vazão

Os principais medidores especiais de vazão são: medidores magnéticos de vazão com eletrodos, tipo turbina, tipo Coriolis , Vortex e 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.

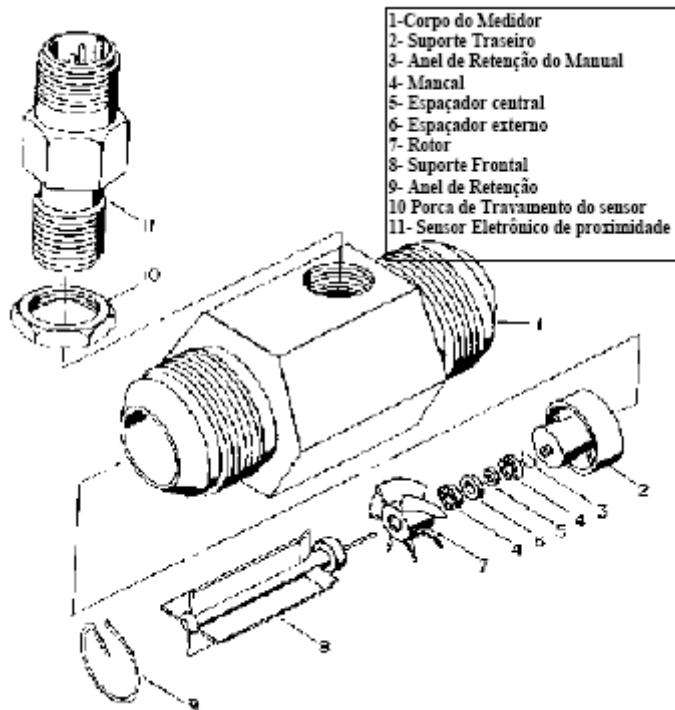


MEDIDOR TIPO TURBINA

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 imã 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 . A medida que cada lâmina passa diante da bobina e do imã , 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 freqüência dos pulsos gerados desta maneira é proporcional à velocidade do fluido e a Vazão pode ser determinada pela medição / totalização de pulsos.

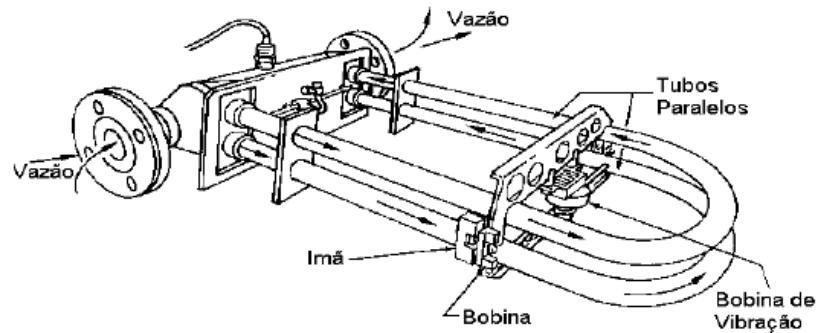


MEDIDOR POR EFEITO CORIOLIS

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 freqüência 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.

As forças geradas pelos tubos criam uma certa oposição à passagem do fluido na sua região de entrada (região da bobina1), e em oposição auxiliam o fluido na região de saída dos tubos. O atraso entre os dois lados é diretamente proporcional à vazão massica. Um RTD é montado no tubo, monitorando a temperatura deste, a fim de compensar as vibrações das deformações elásticas sofridas com a oscilação da temperatura.

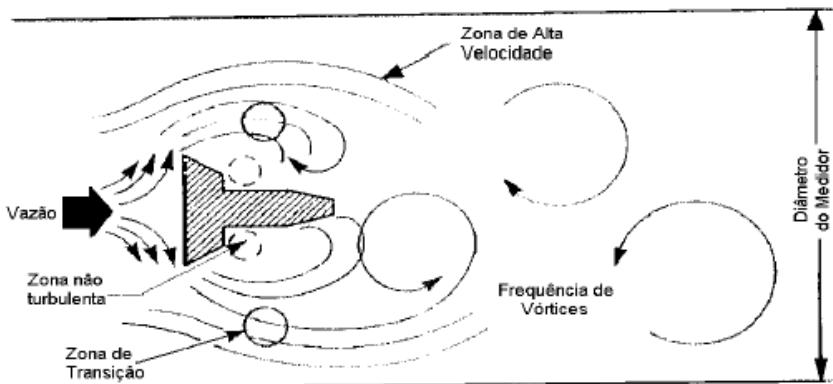


MEDIDOR DE VÓRTICES

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 freqüentes 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.



MEDIDORES ULTRA-SÔNICOS

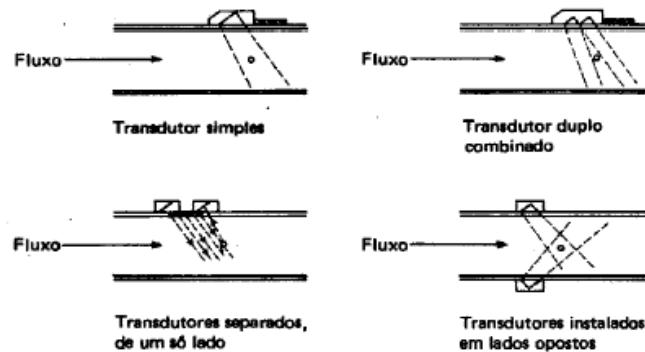
Os medidores de vazão que usam a velocidade do som como meio auxiliar de medição podem ser divididos em dois tipos principais:

- 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 piezoeletricos 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

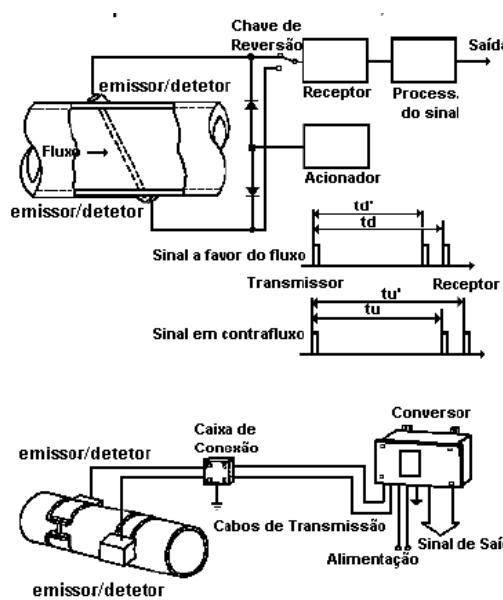
O efeito Doppler é aparente variação de freqüência produzida pelo movimento relativo de um emissor e de um receptor de freqüência. No caso, esta variação de freqüência ocorre quando as ondas são refletidas pelas partículas móveis do fluido. Nos medidores baseados neste princípio (ver figura abaixo), 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 freqüência alterada proporcionalmente ao componente da velocidade das partículas na direção do feixe. Estes instrumentos são consequentemente adequados para medir vazão de fluidos que contêm partículas capazes de refletir ondas acústicas.



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 geratrizess diametralmente opostas. O eixo que reúne os emissores - receptores forma com o eixo da tubulação, um ângulo α . 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_2) quando orientada para a montante.



4 - Sistemas de Aquisição

4.1 Introdução

O objetivo de qualquer sistema de aquisição de dados – sistema DAQ – é providenciar as ferramentas e recursos necessários para medir e analisar fenômenos físicos. Um sistema DAQ pode ser visto como uma coleção de software e hardware que permite comunicar com o mundo físico.

Atualmente, a maioria dos Cientistas e Engenheiros usam computadores pessoais (PC) com PCI, PXI/CompactPCI, PCMCIA, USB, IEEE 1394, ISA, ou as portas paralela ou série para aquisição de dados em laboratórios, medições e testes, e automação industrial.

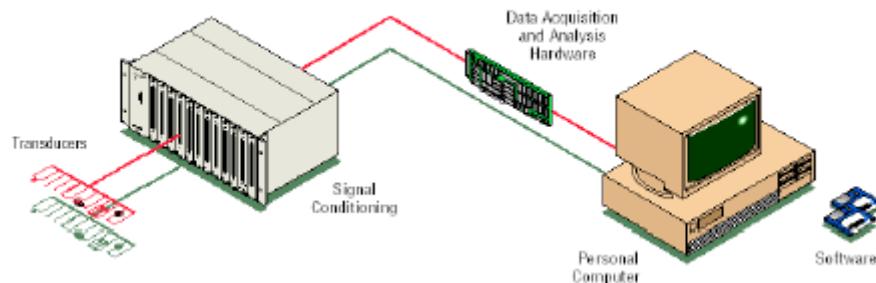
Em muitas aplicações usam-se componentes plug-in para adquirir dados e transferi-los directamente para a memória do computador. Noutras aplicações, é usado remotamente hardware para aquisição de dados, acoplado via porta paralela ou série.

Neste capítulo são introduzidos e explicados os mais importantes critérios, definindo a terminologia comum, de cada elemento constituinte de um sistema DAQ baseado em PC.

4.1.1 Elementos de um Sistema DAQ

A obtenção de resultados apropriados, resultantes de um sistema DAQ baseado num PC, depende de cada um dos seguintes elementos constituintes do sistema:

- PC;
- Sensores/Transdutores;
- Condicionamento de Sinal,
- Hardware;
- Software.



4.2 Condicionamento de Sinal

4.2.1 Conceitos Gerais

Os sinais provenientes dos sensores são muitas vezes incompatíveis com o hardware do sistema DAQ, devendo ser otimizados em relação à gama de entrada do dispositivo DAQ. Para ultrapassar esta incompatibilidade, dever-se-á proceder ao condicionamento do sinal. Por exemplo, podemos precisar de condicionar um sinal por amplificação do mesmo, removendo as componentes de freqüência indesejadas.

Alguns transdutores usam tensão ou corrente de excitação para gerar tensões de saída. Os acessórios de condicionamento de sinal são usados numa grande variedade de importantes aplicações.

Os sinais de saída poderão ser condicionados da mesma forma. No entanto, só o condicionamento dos sinais de entrada será discutido neste capítulo.

As formas mais comuns de condicionar um sinal incluem:

- Amplificação
- Isolamento elétrico
- Multiplexagem
- Filtragem
- Fonte de excitação (tensão ou corrente)

Torna-se necessário compreender a natureza do sinal que se pretende medir, a configuração usada para medir o mesmo, e os efeitos provenientes do meio que envolve o sistema DAQ. Baseando-se nessa informações, é possível determinar que tipo de condicionamento de sinal será necessário integrar no sistema para efetuar medições mais exatas.

4.2.2 Amplificação

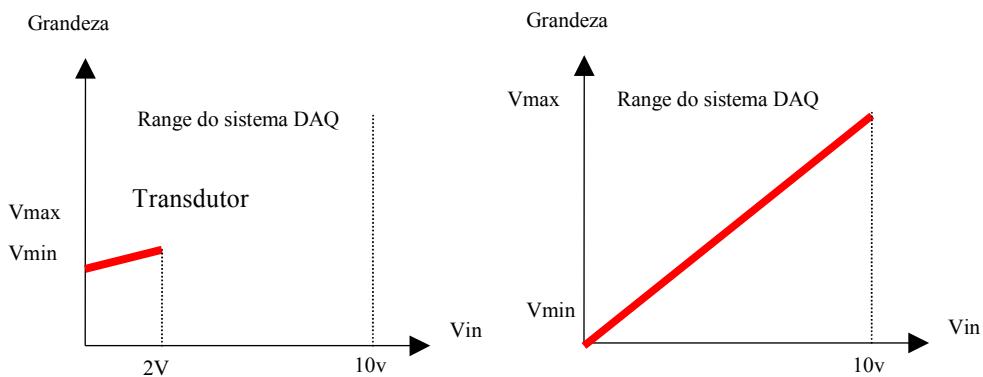
O tipo mais comum de condicionamento de sinal é a amplificação. Sinais de baixo nível, à volta de alguns mV, necessitam geralmente de serem amplificados. Por exemplo, os sinais de saída de pequena amplitude dos termopares deverão ser amplificados antes de serem digitalizados, para aumentar a resolução e diminuir o ruído.

Para conseguir a maior exatidão possível, o sinal deve ser amplificado de forma que a gama de tensão máxima do sinal condicionado seja igual à gama máxima de entrada do conversor A/D.

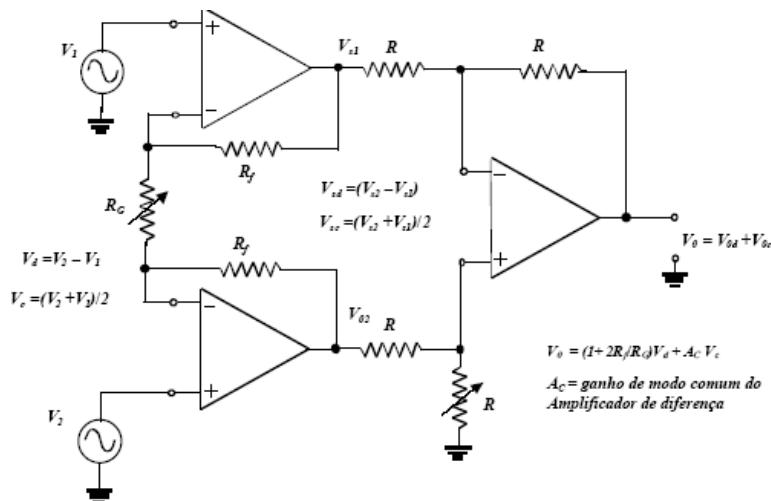
A amplificação do sinal permite reduzir o ruído e aproveitar a gama total do hardware, aumentando assim a resolução da medição.

4.2.2.1 Amplificador de Instrumentação

Comumente, o sinal do transdutor não é ideal para o sistema DAQ, devido ao seu baixo nível de tensão. O ideal seria que o sinal proveniente do transdutor estivesse dentro do *range* de atuação do sistema DAQ, como mostra a figura abaixo.



Este ajuste se consegue com um amplificador de instrumentação. Este amplificador consiste em um sistema que irá ajustar o ganho e o offset do sinal para que o mesmo possa ser adquirido de forma ideal pelo sistema DAQ. A figura abaixo mostra uma montagem de um amplificador de instrumentação usando 3 amp-ops.



4.2.3 Isolamento

Outra aplicação comum de condicionamento de sinal consiste em isolar os sinais provenientes do sensor/transdutor por questões de segurança. O sistema que se monitoriza pode conter fenômenos transitórios de altas tensões, que podem, sem condicionamento dos sinais, danificar o computador.

Usa-se isolamento elétrico para garantir que as leituras efetuadas pelo hardware DAQ não sejam afetadas pelas diferenças nas tensões de “terra” (ground), ou tensões de modo comum. Por exemplo, quando a entrada de um componente DAQ e o sinal do sensor são ambos referenciados à “terra”, alguns problemas ocorrem se existir uma diferença de potencial entre as duas terras. Esta diferença de potencial é conhecida por ground loop, que pode causar uma representação inexata do sinal, ou, se demasiada elevada, causar danos no sistema de medição.

O uso de módulos isolados de condicionamento de sinal permite eliminar ground loops, e assegura que os sinais sejam representados com exactidão.

4.2.4 Multiplexagem

Uma técnica comum de medição de vários sinais com um único componente de medição é designada por multiplexagem. O hardware de condicionamento de sinal para sinais analógicos proporciona muitas vezes multiplexagem para usar na aquisição de sinais que variam suavemente, como por exemplo, a temperatura.

No processo de multiplexagem, um conversor A/D amostra um canal, e alterna para o canal seguinte, amostrando-o, passando para o canal seguinte, e assim sucessivamente.

Uma vez que o mesmo conversor A/D amostra vários canais em vez de um só, a taxa efetiva de amostragem de cada canal é inversamente proporcional ao número de canais amostrados. Por exemplo, uma placa amostrando com uma freqüência $f_s = 1$ MS/s, em $N = 10$ canais, amostra cada um dos canais com a taxa efetiva $f_{efetiva}$ dada por:

$$f_{efetiva} = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{10} = 100kS/s$$

Alguns módulos para sinais analógicos empregam multiplexagem, de forma que 3072 sinais podem ser medidos com uma só placa DAQ (módulos SCXI). Quando multiplexadores são usados, é necessário ter em conta o tempo que os sinais amostrados precisam para estabelecer.

4.2.5 Filtragem

O objetivo de um filtro é eliminar sinais indesejáveis (e.g. ruído) do sinal de interesse que se pretende medir. Um filtro de ruído é usado em sinais DC que variam suavemente (lentamente) tais como temperatura, para atenuar, ou mesmo eliminar, sinais de elevada freqüência que podem reduzir a exactidão das medições efectuadas.

Por exemplo, muitos módulos usam filtros passa-baixo de 4 Hz e 10 kHz para eliminar ruído antes do sinal ser digitalizado pelo dispositivo DAQ.

Sinais AC que variam rapidamente, tais como vibrações, requerem muitas vezes um tipo diferente de filtros, conhecidos por filtros anti-aliasing. Tais como os filtros de ruído, o filtro anti-aliasing é um filtro passa-baixa, embora apresente uma freqüência de corte bem definida, eliminando assim completamente todas as componentes de freqüência que são maiores que a largura de banda do componente DAQ.

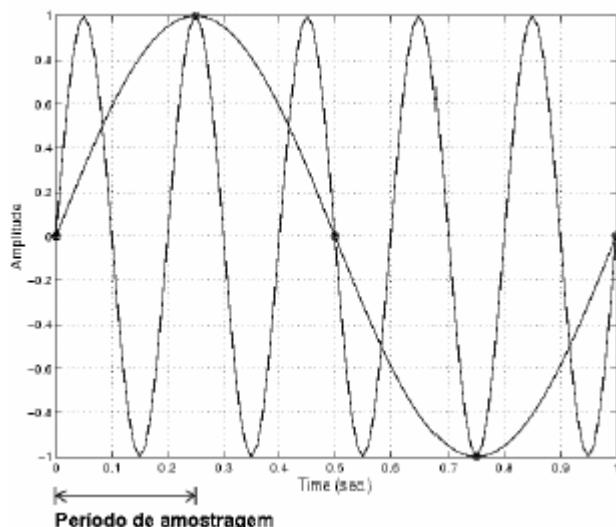
Aliasing - Domínio Temporal

Os sistemas DAQ que realizam a digitalização dos sinais provenientes de sensores ou transdutores, pretendem obter uma representação exata dos mesmos. Infelizmente, as técnicas de amostragem dos equipamentos de digitalização não podem interpretar tão corretamente as componentes de alta freqüência do sinal como as componentes de baixa freqüência. Este fenômeno é conhecido por aliasing.

Aliasing é um conceito simples. Se um sinal varia mais rapidamente que a amostragem feita pelo sistema DAQ, erros ocorrem.

Exemplo

Considera-se um conversor A/D configurado para amostrar a uma taxa de 4 amostras por segundo (taxa de amostragem $f_s = 4$ S/s, ou seja, 4 Hz), e uma forma de onda - sinal de interesse - representada por uma sinusoide de freqüência 1 Hz. Uma vez que a freqüência do sinal é $\frac{1}{4}$ da freqüência de amostragem, pelo teorema de Nyquist, o sinal deverá estar completamente caracterizado.



No entanto, se uma sinusoide de freqüência 5 Hz está também presente no sinal, estas duas ondas não podem mais ser distinguidas. Por outras palavras, a onda sinusoidal de 1 Hz produz as mesmas amostras que a onda de 5 Hz, quando amostradas à taxa de 4 S/s, como se ilustrada na figura acima.

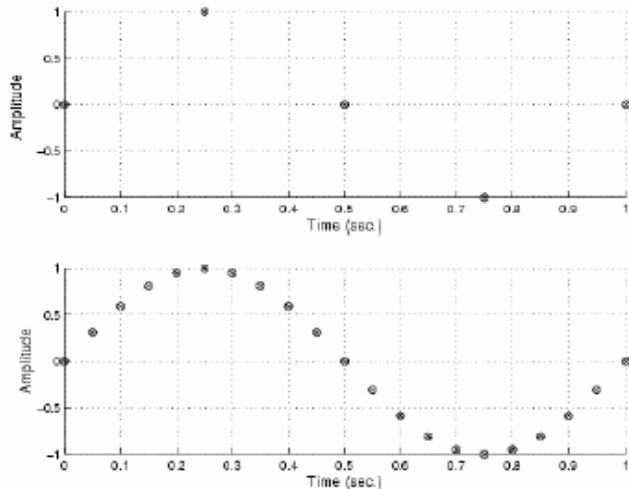
Mesmo que as amostras parecem representar uma onda sinusoidal de freqüência igual a $\frac{1}{4}$ da freqüência de amostragem f_s , o sinal amostrado pode ser visto como qualquer sinusoide de freqüência f dada por:

$$f = (n \pm 0,25) \times f_s$$

onde n é 0, ou qualquer inteiro positivo. Para o exemplo anterior, o sinal amostrado poderia corresponder a uma freqüência de 3 Hz ($n=1$), 5 Hz ($n=2$), 7 Hz ($n=3$), etc.

A relação $0,25 \times f_s$ é designada por *alias* do sinal que pode estar a outra freqüência. Se a amostragem do sinal de entrada é feita pelo menos duas vezes mais rapidamente que a componente de freqüência mais alta presente no sinal, o sinal pode ser univocamente caracterizado, mas esta taxa, a representação da forma de onda não será muito próxima.

Como se mostra na figura abaixo, para obter uma boa representação da forma de onda, é necessário uma taxa de amostragem mais ou menos 10 a 20 vezes a freqüência mais elevada.



Como pode ser visto na figura anterior, uma taxa de amostragem pequena (no exemplo, 4 Hz) produz um sinal amostrado que parece uma forma de onda triangular. O sinal amostrado de maior fidelidade é produzido quando a taxa de amostragem é maior (no exemplo, 20 Hz). Neste último caso, o sinal apresenta-se de fato como uma onda sinusoidal.

Aliasing - Domínio das Frequências

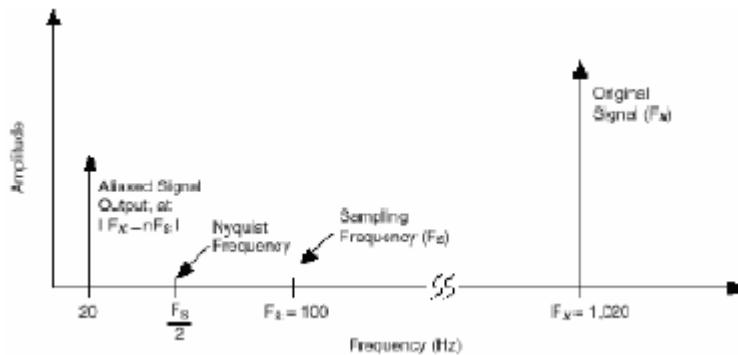
O fenômeno de aliasing torna-se um problema quando o sinal contém freqüências para além da freqüência de Nyquist (igual a metade do valor da freqüência de amostragem). Qualquer componente do sinal maior que a freqüência de Nyquist sofre aliasing e será “projetada” para uma gama de baixas freqüências; estas componentes serão incorretamente interpretadas, e consideradas inferiores à freqüência de Nyquist.

Mais especificamente, uma componente f_x de alta freqüência do sinal, amostrado a uma freqüência f_s , aparece no sinal amostrado com uma freqüência f , igual à diferença entre f_x e o múltiplo da freqüência de amostragem mais próximo, ou seja,

$$f = |f_s - n f_x|, \text{ com } n \text{ inteiro.}$$

Exemplo

Considera-se um sinal de entrada amostrado a $f_s = 100$ Hz. Qualquer componente com freqüência maior que a freqüência de Nyquist, 50 Hz, sofre o fenômeno de aliasing. Um sinal a $f_x = 1020$ Hz, por exemplo, será aliased e aparece como tendo uma freqüência $f = 20$ Hz (igual a $1020 - n \cdot 100$, com $n = 10$).



A componente (freqüência) de 1020 Hz, de um sinal amostrado a uma freqüência $f_s = 100$ Hz, aparece como sendo de 20 Hz.

A figura ilustra este exemplo de aliasing no domínio das freqüências. Se o sinal de entrada contém freqüências superiores a metade da freqüência à qual foi amostrado, diz-se que o sinal é sub-amostrado, e o fenômeno de aliasing pode ocorrer. Aliasing pode ocorrer tanto para sinais que variam rapidamente no tempo, como para sinais “suaves”.

Eliminação do aliasing

As primeiras considerações envolvidas no aliasing são a taxa de amostragem do conversor A/D e das freqüências presentes nos dados amostrados. Para eliminar o fenômeno de aliasing, existem duas opções: pode-se aumentar a taxa de amostragem ou passar o sinal num filtro passa-baixa, removendo assim as componentes de alta freqüência do sinal.

O aumento da taxa de amostragem pode tornar-se cara e impraticável na prática, especialmente quando o limite superior da largura de banda das alta freqüências do ruído pode ser maior que a largura de banda do sinal de interesse.

Assim, uma prática comum é usar filtros passa-baixa que eliminam as freqüências do sinal maiores que a freqüência de Nyquist. A eliminação do aliasing é implementada de acordo com as seguintes considerações práticas:

- Estabelecer a largura de banda útil da medição;
- Selecionar um sensor com largura de banda suficiente;
- Selecionar um filtro analógico, passa-baixa anti-aliasing, que pode eliminar todas as freqüências que excedem esta largura de banda;
- Amostrar o sinal com uma taxa de amostragem, pelo menos duas vezes maior que a freqüência de corte do filtro.

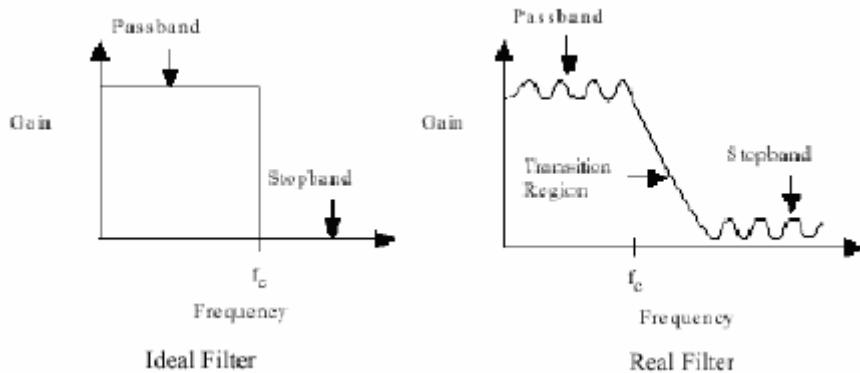
Filtros passa-baixa (Filtros Anti-aliasing)

Um filtro passa-baixa é um filtro que atenua, ou diminui, a potência de qualquer sinal com freqüências superiores a freqüência de corte f_c definida pelo filtro. A gama de freqüência inferiores a f_c é a banda passante (passband) do filtro, enquanto que freqüências superiores a f_c pertencem à stopband.

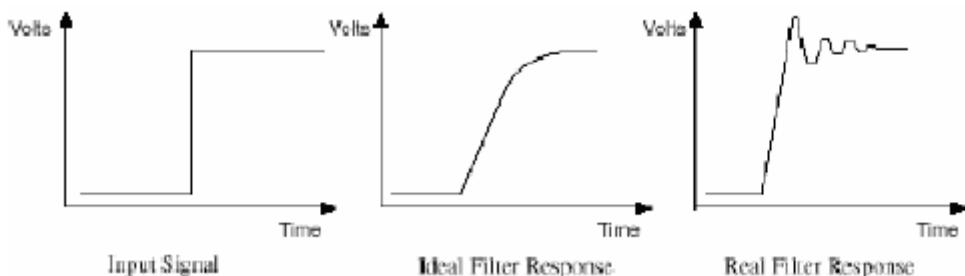
Considere um filtro passa-baixa ideal. Um filtro passa-baixa ideal não atenua qualquer componente do sinal na passband, enquanto que elimina todas as freqüências

pertencentes à stopband. O filtro passa-baixa ideal também possui uma fase (phase shift) linear na freqüência, preservando o aspecto geral da forma de onda filtrada.

Na prática, os filtros reais são caracterizados por funções de transferências que representam de forma aproximada as características de um filtro ideal. A figura abaixo ilustra a função de transferência de um filtro passa-baixa ideal, comparando-a com a de um filtro real.



Um filtro real apresenta um ripple (variação na atenuação como função da freqüência) na banda passante, uma região de transição entre as bandas passante e stopband onde o declive da função de transferência não é infinita (idealmente), e uma stopband com atenuação finita e ripple. Além disso, os filtros reais apresentam não-linearidade nas suas respostas em fase.



Resposta a um degrau unitário (esquerda) de um filtro ideal (centro) e de um filtro real (direita).

Esta não-linearidade faz com que sinais de determinadas freqüências sofram atrasos diferentes, dependendo da freqüência, resultando numa distorção do sinal de entrada. Facilmente se observa os efeitos da não-linearidade da fase introduzida pelo filtro, filtrando um sinal correspondente à função degrau (step); um filtro ideal simplesmente suavisa os “contornos” (edges) - neste caso, o degrau – do sinal de entrada, enquanto que um filtro real causará algum ripple no sinal de saída.

4.2.6 Excitação

Alguns sensores requerem fontes de alimentação, fontes de excitação, para operarem. Por exemplo, células de carga, RTD e termistores, requerem uma tensão (ou corrente) de excitação externa. São usados módulos de condicionamento de sinal para estes sensores para providenciar a alimentação necessária.

As medições efetuadas com RTD são geralmente feitas com uma fonte de corrente, onde é convertida a variação do valor da resistência numa tensão mensurável. As

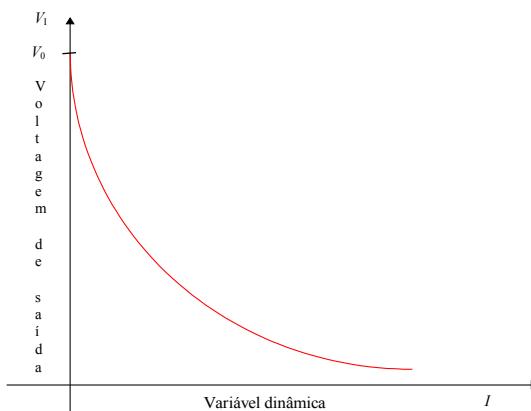
células de carga, componentes cujo valor de resistência é muito baixo, são geralmente usados numa configuração de ponte de Wheatstone, com uma fonte de tensão usada como fonte de excitação.

4.2.7 Linearização

O projetista tem pouca escolha sob a característica saída do sensor versus variável de processo. Normalmente a dependência que existe entre a entrada de a saída é não linear. Até mesmo aqueles dispositivos que são aproximadamente linear podem apresentar problemas quando é necessário uma mediada precisa de uma variável. Uma das funções do condicionamento de sinais é a de linearização da resposta do sensor.

Atualmente, com o surgimento de processadores de sinais digitais, os chamados DSP, faz com que o projetista do sistema, em algumas aplicações resolva pôr linearizar o sinal após a conversão do mesmo no DSP.

A linearização pode se realizada pôr uma amplificador cujo o ganho é função do nível de voltagem de entrada. Um exemplo de linearização ocorre freqüentemente para um sensor cujo a saída é uma função exponencial de alguma variável de dinâmica de processo. A figura abaixo ilustra este tipo de comportamento onde a voltagem do sensor é assumida ser exponencial com relação a intensidade de luz I .



Isto pode ser expresso pôr

$$V_I = V_0 e^{\alpha \cdot I}$$

onde:

- V_I : é a voltagem de saída na intensidade I
- V_0 : é a voltagem de saída na intensidade zero
- α : é a constante exponencial
- I : é a intensidade de luz

Para linearizar este sinal, nós empregamos um amplificador cuja saída varia no logarítmico natural ou inverso do sinal de entrada. Isto na prática poderia ser implementado com um diodo colocado na malha de realimentação de um amplificador operacional. Feito isto a saída pode ser expressa pôr

$$V_A = K \ln(V_{in})$$

onde :

V_A : é a voltagem de saída do amplificador

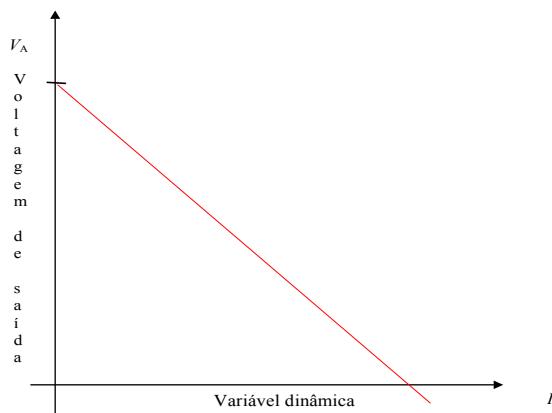
K : é a constante de calibração

V_{in} : é a voltagem de entrada do amplificador = V_I [da equação original]

Substituindo as equações, resulta

$$V_A = K \ln(V_O) - \alpha K I$$

Desta forma a saída do amplificador variará linearmente com a intensidade e tendo uma voltagem de offset $K \ln(V_O)$ e um fator de escala $-\alpha K$ como mostrado na figura abaixo. Um condicionamento de sinal posterior pode ser realizado para eliminar a tensão de offset.



4.3 Placas de Aquisição de Dados

Tradicionalmente, as medições são efetuadas com instrumentos autônomos de diversos tipos, tais como osciloscópios, multímetros, contadores, etc. No entanto, a necessidade de armazenar as medidas efetuadas, e posteriormente processar os dados adquiridos para visualização, tem-se tornado de importância crucial.

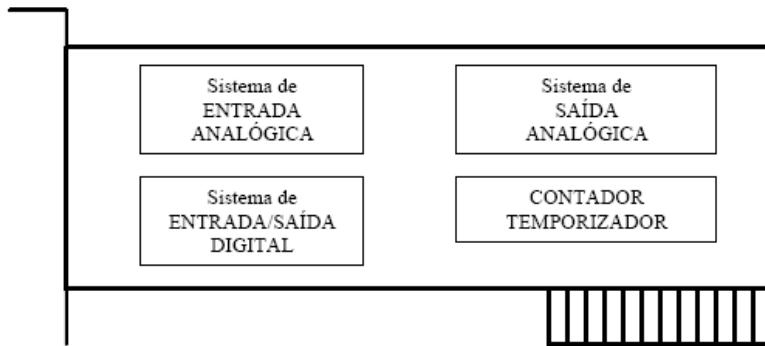
Qualquer sistema DAQ assenta no hardware para aquisição de dados (hardware DAQ). A principal função do hardware é converter sinais analógicos em sinais digitais, e converter sinais digitais em sinais analógicos.

O hardware DAQ pode ser interno e instalado diretamente num slot do PC, ou externo e conectado ao PC através de um cabo externo. Por exemplo, muitos instrumentos possuem uma porta série que permite a troca de dados entre o PC e o instrumento. O uso de uma placa de interface GPIB (General Purpose Instrumentation Bus), tratada em mais pormenor no Cap. 8, permite aos instrumentos a transferência de dados num formato paralelo, possibilitando a atribuição de uma identidade a cada instrumento, dentro de uma rede de instrumentos.

Outra forma de medir sinais e transferir as respectivas medidas para o PC consiste em usar uma placa DAQ. As placas DAQ comerciais típicas possuem ambos os

conversores analógico-digital (A/D) e digital-analógico (D/A), permitindo a entrada e saída de sinais analógicos e digitais, além de canais (linhas) de entrada/saída digital.

As interfaces DAQ possibilitam assim medições e controlo computadorizados de processos industriais e experimentos laboratoriais.



O hardware DAQ é basicamente caracterizado pelos sistemas que ele possui. Um sistema é um componente do hardware DAQ que executa uma determinada tarefa especializada. Os sistemas mais comuns incluem os sistemas de:

- Entrada analógica;
- Saída analógica;
- Entrada/Saída digital (Digital I/O);
- Contadores/Temporizadores (Timing I/O).

Sistemas de Entrada Analógica

Muitos componentes de hardware DAQ possuem um ou mais (sub-) sistemas que convertem (digitalizam) os sinais analógicos provenientes de sensores ou transdutores, em números digitais que o computador consegue interpretar, processo designado por conversão analógico-digital. Tais componentes possuem tipicamente várias linhas (ou canais), sendo designados por sistemas de entrada analógica ou conversores analógicodigital (conversores A/D ou ADC).

Sistemas de Saída Analógica

Os sistemas de saída analógica convertem sinais digitais armazenados no computador num sinal analógico que sai para o exterior. Estes sistemas realizam a operação inversa dos sistemas de entrada analógica. Placas de aquisição típicas oferecem dois canais (linhas) de saída com 12 bits de resolução. Os sistemas de saída analógica são também designados por conversores D/A, ou simplesmente por DAC.

Sistemas de Entrada/Saída Digital (Digital I/O)

Os sistemas de entrada/saída digital (Digital IO ou DIO) de uma interface DAQ são desenhados para enviar e receber valores digitais (valores lógicos) de e para o hardware. Estes valores são tipicamente suportados como simples bits ou linhas (canais), geralmente em número de 8, ou como portas. Os sistemas DIO providenciam assim níveis TTL bi-direcionais que permitem o controlo e status das portas, por leitura e escrita através do PC. Enquanto que algumas placas DAQ incluem capacidades de entrada/saída digital, são normalmente limitadas a operações simples; hardware

especialmente dedicado é muitas vezes necessário quando se pretende realizar operações DIO mais avançadas.

Estes sistemas são usados por exemplo no controlo de componentes. Handshaking é por vezes providenciada, permitindo a comunicação entre componentes periféricos.

Contadores/Temporizadores (Timing I/O)

Os sistemas de contadores/temporizadores (C/T) são usados para contagem de eventos, medições de períodos e frequências, bem como a geração de trem de pulsos.

4.3.1 Sistemas de Entrada Analógica

4.3.1.1 Aspectos da Conversão Analógico–Digital (A/D)

Os sinais analógicos provém de instrumentos, sensores ou transdutores que convertem grandezas físicas, tais como pressão, posição ou temperatura, em sinais elétricos (corrente ou tensão). Muitos componentes de hardware DAQ possuem um ou mais (sub-) sistemas que convertem (digitalizam) esses sinais analógicos em números digitais que o computador consegue interpretar, processo designado por conversão analógicodigital, ou simplesmente A/D.

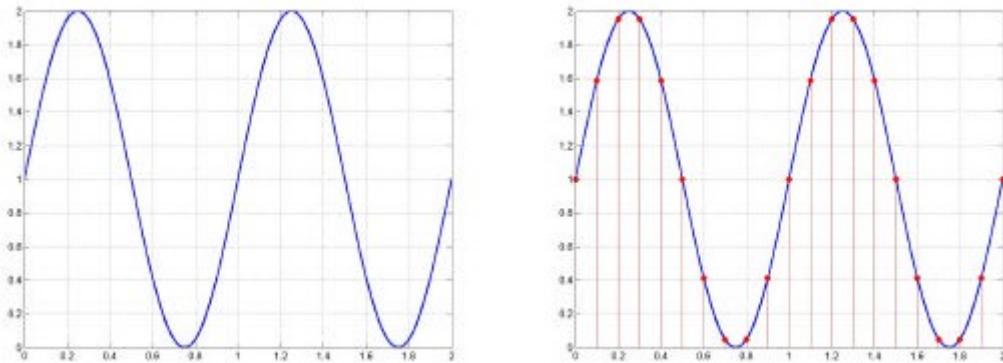
Tais componentes são designados por sistemas de entrada analógica ou conversores analógico-digital (conversores A/D). Estes componentes possuem tipicamente várias linhas (ou canais), e oferecem resoluções de 12 ou 16 bits. Após a digitalização (conversão) de um sinal proveniente do mundo exterior, é possível analizá-lo, armazená-lo no memória do sistema, ou num ficheiro de disco.

A função de um conversor A/D é amostrar e quantizar o sinal analógico usando uma ou várias linhas. Pode-se pensar numa linha como um caminho através do qual circula o sinal do sensor. Tipicamente, os sistemas de entrada analógica possuem 8 ou 16 linhas de entrada disponíveis. Depois de amostrado e quantizado, o sinal será armazenado em memória.

Os sinais analógicos são sinais contínuos no tempo e amplitude (dentro de certos limites pré-definidos). A amostragem consiste em “avaliar” o valor do sinal em instantes de tempo discretos, enquanto que a quantização divide o valor da tensão (ou corrente) em níveis discretos de amplitude.

4.3.1.2 Conceito de Amostragem

Os dados são adquiridos através de um conversor A/D usando o processo de amostragem. Amostrar um sinal analógico envolve registar uma amostra do sinal em instantes de tempo discretos. A taxa à qual um sinal é amostrado designa-se por taxa ou frequência de amostragem. O processo da amostragem gera valores do sinal em intervalos de tempo - período de amostragem.. Em muitas aplicações, o período de amostragem entre amostras adquiridas é mantido constante (por exemplo, cada milisegundos), a não ser em caso de relógios externos.

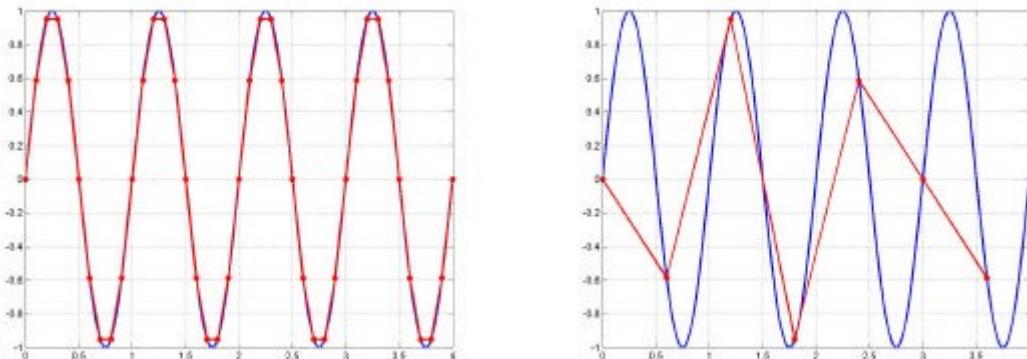


Processo de Amostragem. Sinal analógico (onda sinusoidal de freqüência 1 Hz) e sinal amostrado à freqüência de 0.1 Hz (vermelho).

A taxa de amostragem determina a qualidade do sinal analógico que é convertido. Taxas de amostragem mais elevadas proporcionam melhores conversões. A freqüência de amostragem, f_s , mínima, necessária para representar exatamente o sinal, deve ser pelo menos igual ao dobro da freqüência máxima, f_m , que o sinal analógico apresenta:

$$f_s \geq 2 \times f_m$$

Este valor mínimo é designado por freqüência de Nyquist.

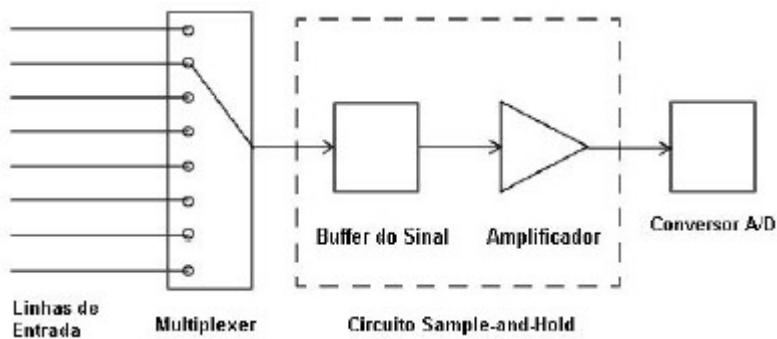


A figura acima mostra um exemplo da amostragem de uma onda sinusoidal. O resultado (vermelho) da amostragem de uma onda sinusoidal (azul), de freqüência $f = 1$ Hz, com freqüência de amostragem de $f_s = 0.1$ Hz (esquerda) e $f_s = 0.6$ Hz (direita).

Se a freqüência de amostragem é menor que a freqüência de Nyquist, um sinal de baixa freqüência é gerado neste processo. Este fenômeno é conhecido por *aliasing*.

4.3.1.3 Circuitos Sample-and-Hold

Para a maioria dos conversores A/D digitais, a amostragem é efetuada por um circuito sample and hold (S/H). Um circuito S/H consiste geralmente num buffer de sinal seguido de um interruptor eletrônico ligado a um condensador.



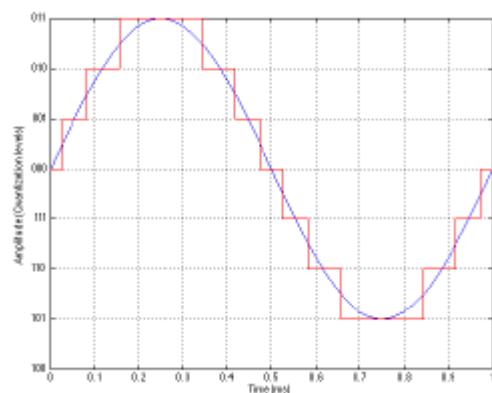
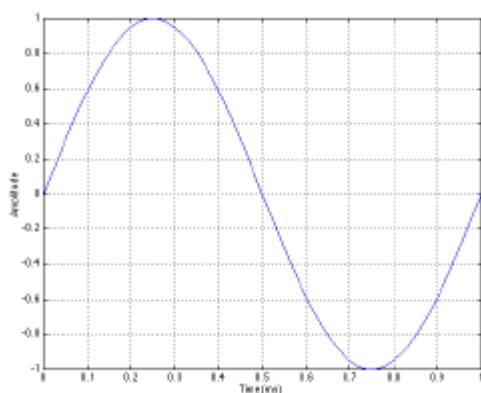
A operação de um circuito S/H consiste nos seguintes passos:

1. Num dado instante de amostragem, o interruptor liga o buffer e o condensador à entrada;
 2. O condensador é carregado até ao valor da tensão de entrada;
 3. A carga é mantida até que o conversor A/D digitalize o sinal;
 4. Para vários linhas, conectadas (multiplexadas) a um só conversor A/D, os passos anteriores são repetidos para cada linha de entrada;
 5. Todo o processo é repetido para o próximo instante de amostragem.

O hardware DAQ pode ser dividido em duas categorias principais, dependendo da forma com que os sinais são amostrados: hardware de varrimento (scanning hardware), que amostra os sinais de entrada sequencialmente, e hardware de sample and hold simultâneo (SS/H), os quais amostram todos os sinais no mesmo instante de tempo.

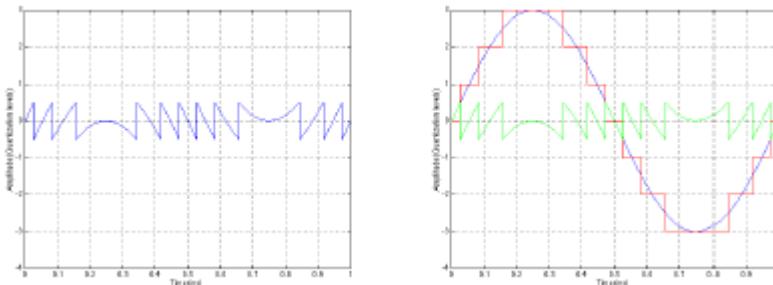
4.3.1.4 Quantização

Durante a quantização, um conversor A/D usa um número finito de valores igualmente espaçados que possam representar o sinal analógico, depois de amostrado. O número de valores diferentes, $2N$, é determinado pelo número N de bits usados para a conversão. Os conversores mais modernos usam 12 ou 16 bits. Tipicamente, o conversor A/D selecciona o valor digital mais próximo do valor amostrado. A figura abaixo mostra uma onda sinusoidal (azul) de frequência 1 Hz, quantizada usando um conversor A/D de 3 bits. O resultado da quantização é mostrado na curva vermelha.

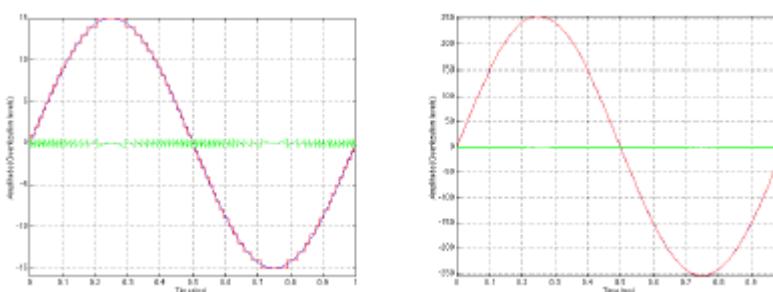


Erro de Quantização

Existe sempre erros associados à quantização de um sinal contínuo. Idealmente, o erro máximo de quantização é $\pm 0.5 \times \text{LSB}$, onde LSB é o bit menos significativo (least significant bit), e, em toda a escala de entrada, o erro de quantização médio é nulo. Como ilustra a figura abaixo, o erro de quantização da onda sinusoidal da figura anterior, é calculado pela diferença entre o sinal contínuo e o sinal digitalizado (quantizado).



A esquerda, o erro de quantização da onda sinusoidal usando um conversor A/D de 3 bits; a direita, onda sinusoidal (azul), sinal (onda) quantizada (vermelho), e erro de quantização (verde).



A figura acima mostra a mesma onda sinusoidal (azul), o sinal digitalizado (vermelho) e o erro de quantização (verde) para um sistema de 5 bits (esquerda) e 9 bits (direita). Obviamente, quanto maior for o número de bits usados, mais próximo será o sinal quantizado do sinal de entrada.

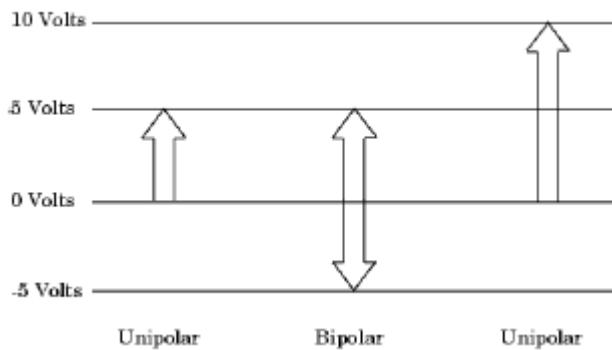
4.3.1.5 Gama e Polaridade

A gama de entrada de um sistema de entrada analógica corresponde ao intervalo de valores de entrada para os quais uma conversão A/D é válida. A gama é então definida pelos níveis de tensão máxima e mínima que o conversor A/D pode quantizar.

É possível alterar a gama de entrada selecionando um valor de ganho diferente. Muitas placas DAQ incluem um amplificador de ganho programável (e.g. valores entre 0.5 e 100) que permite alterar o (fator de) ganho do dispositivo através de software.

Quando um sinal de entrada excede a gama de entrada de um conversor A/D, uma situação de saturação (overrange) ocorre. Neste caso, a maioria dos dispositivos saturam no maior valor que podem representar, e o valor convertido torna-se incorrecto. A escolha do factor de ganho afecta a medição: quanto maior (menor) for o factor de ganho, menor (maior) será a precisão da medida.

Um sistema de entrada analógica pode, tipicamente, converter sinais unipolares e bipolares. Um sinal unipolar apresenta somente valores positivos e nulos., enquanto que um sinal bipolar apresenta valores positivos, negativos e nulos. A figura abaixo ilustra a definição destes sinais.



Em muitos casos, a polaridade do sinal é uma característica constante do sensor: a gama de entrada do sistema deverá ser configurada de acordo com essa polaridade. Como se pode ver, é crucial analisar a gama dos sinais que se espera à saída dos sensores para poder configurar a gama de entrada do sistema de entrada analógica, permitindo desta forma maximizar a resolução e minimizar a ocorrência de situações de saturação.

3.2.6. Configuração de Canais

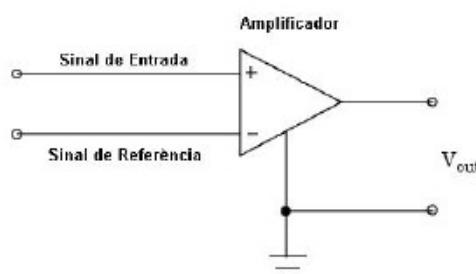
O número de canais (linhas) determina o número de componentes que poderão ser conectados a uma interface DAQ. Os canais de entrada podem ser configurados de duas formas: entradas single-ended ou entradas diferenciais. A escolha do tipo de configuração a usar depende do sinal ser do tipo floating ou grounded.

Entrada Diferencial

Quando se configura o hardware para uma entrada diferencial, existem duas linhas ou canais de entrada associados a cada sinal: um para o sinal de entrada (que se pretende medir), e outro para o sinal de referência (return signal). As entradas diferenciais permitem a medição de sinais que não podem ser referenciados à terra do conversor A/D.

Este método requer duas linhas mas apresenta vantagens relativamente à configuração de entrada single-ended. A medição corresponde à diferença de tensão entre as duas linhas, permitindo rejeitar ruído externo que é comum às duas entradas (interferência de motores, linhas de potência AC, fontes elétricas ou mecânicas que injetam ruído no transdutor ou nas ligações do conversor A/D,...).

Por exemplo, na figura abaixo considera-se um sinal de entrada ligado ao polo positivo (+) de um amplificador, e o sinal de referência (return signal) ligado ao polo negativo (-) do mesmo. O amplificador possui uma terceira ligação que permite referenciar estes sinais à mesma terra.



Recomenda-se que se use entradas diferenciais nas seguintes condições:

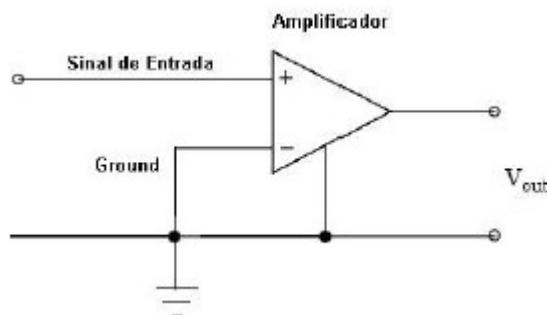
- Sinal de entrada é de baixo nível (inferior a 1 volt);
- Os cabos de ligação do sinal são superiores a 3 m;
- sinal de entrada requer um ponto de referência de terra separado, ou sinal de referência;
- Os cabos de ligação do sinal encontram-se num ambiente ruidoso.

Entrada Single-Ended

Quando se configure o hardware para uma entrada single-ended, existem uma só linha ou canal de entrada associado a cada sinal, e cada sinal é ligado à mesma terra.

A medição de entrada single-ended corresponde à diferença de tensão entre o canal de entrada e a terra do conversor A/D. Cada linha de entrada pode ser usada como interface para um instrumento diferente. O instrumento que se pretende “medir” deve apresentar um sinal de saída que pode ser referenciado à terra da interface. Estes equipamentos são muitas vezes designados por floating, capacitor coupled, ou isolados. De relembrar que as medições single-ended são mais susceptíveis ao ruído que as entradas diferenciais.

Como mostra a figura abaixo, o sinal de entrada é ligado ao polo positivo (+) do amplificador, enquanto que a terra é ligada ao negativo (-).



Sugere-se que se usem entradas single-ended, numa destas condições:

- Sinal de entrada é de alto nível (maior que 1 volt);
- Os fios que ligam os sinais sejam inferiores a 3 m;
- Sinal pode partilhar uma referência comum com outros sinais.

Dever-se-á usar a configuração de entrada diferencial para qualquer sinal que não satisfaça as condições anteriores.

4.3.2 Transferência de Dados para a Memória do PC

A transferência dos dados adquiridos por hardware DAQ para a memória do sistema obedece aos seguintes passos:

1. Os dados adquiridos são armazenados no buffer FIFO (first-in first-out) do hardware;
2. Os dados são transferidos do buffer FIFO para a memória do sistema usando interrupts ou DMA.

Estes passos acontecem automaticamente. Do ponto de vista do programador/utilizador, só é necessária a configuração inicial do componente de hardware aquando da sua instalação. Tipicamente, as placas DAQ são instaladas no PC com bus de dados de alta velocidade, tal como o bus PCI. Dependendo da velocidade da placa-mãe do PC, transferências máximas de dados entre o CPU e a memória podem ocorrer com taxas de 20 MHz a 40 MHz.

4.3.2.1 Buffer FIFO

O buffer FIFO é usado para armazenar temporariamente os dados adquiridos. Os dados são temporariamente armazenados até poderem ser transferidos para a memória do sistema. O processo de transferência de dados de e para o buffer FIFO de entrada analógica é como se segue:

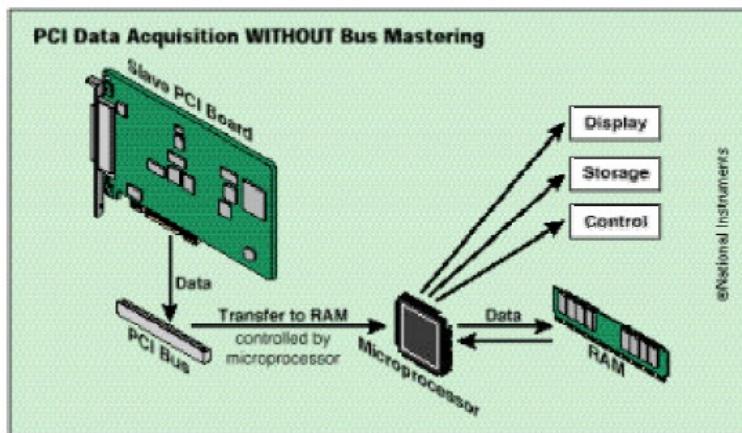
1. O buffer FIFO armazena amostras recentemente adquiridas a uma taxa de amostragem constante;
2. Antes do buffer FIFO estar cheio, o software começa a retirar as amostras. Por exemplo, um interrupt é gerado quando o FIFO está meio cheio, e avisa o software para extraír as amostras o mais rapidamente possível.
3. Uma vez que o serviço de interrupções ou a programação do controlador DMA pode levar alguns milisegundos, dados adicionais são armazenados no FIFO, para posterior extração. Um buffer FIFO com maior capacidade permite uma maior tolerância a estes factos;
4. As amostras são transferidas para a memória do sistema através do bus do sistema (por exemplo, bus PCI ou bus AT). Depois dos dados serem transferidos, o software está livre para executar outras tarefas até que novo interrupt ocorra. Por exemplo, dados podem ser processados ou gravados para um ficheiro em disco. Enquanto as taxas médias de armazenamento e extração de dados forem iguais, dados adquiridos não serão perdidos e a aplicação deverá correr normalmente.

4.3.2.2 Interrupções

O método mais lento, mas mais comum, de mover os dados adquiridos para a memória do sistema é, para a placa DAQ, gerar um sinal de pedido IRQ (interrupt request). O sinal pode ser gerado quando uma amostra é adquirida ou várias amostras são adquiridas. O processo de transferência de dados para a memória do sistema através de interrupts é dado a seguir:

1. Quando os dados estão prontos para serem transferidos, o CPU pára qualquer atividade que esteja em curso, e executa uma rotina (interrupt handler) que grava os atuais registradores da máquina, e configura-os para aceder à placa;
2. Os dados são extraídos da placa e colocados na memória do sistema;
3. Os registradores gravados são repostos, e o CPU retorna ao processo original interrompido.

A figura abaixo apresenta o esquema de transferência de dados convencional, baseado numa arquitetura PCI. Os dados movem-se de forma relativamente rápida, mas muito tempo é despendido na gravação, configuração e reposição da informação dos registradores.



Assim, dependendo do sistema específico que se possui, a transferência de dados por interrupts pode não ser uma boa escolha quando a taxa de amostragem deve ser maior que 5 kHz.

4.3.2.3 Acesso Direto à Memória – DMA (Direct Memory Access)

O DMA é um controlador integrado na placa-mãe. Permite que periféricos façam transferências de dados para a memória RAM sem a intervenção do processador, ficando disponível para executar outra tarefa. O processo de transferência de dados por DMA é como se segue:

1. Quando os dados estão prontos a serem transferidos, a placa direciona o controlador DMA para colocá-lo na memória do sistema logo que possível;
2. Logo que o CPU esteja disponível (o que geralmente acontece muito rapidamente), deixa de interagir com o hardware de aquisição e o controlador DMA move os dados diretamente para a memória;
3. O controlador DMA fica pronto para a próxima amostra apontando para a próxima alocação aberta de memória.
4. Os passos anteriores são repetidos indefinidamente, com os dados transferidos para as alocações de memória abertas num buffer circulando continuamente. Nenhuma interação entre o CPU e a placa é necessária.

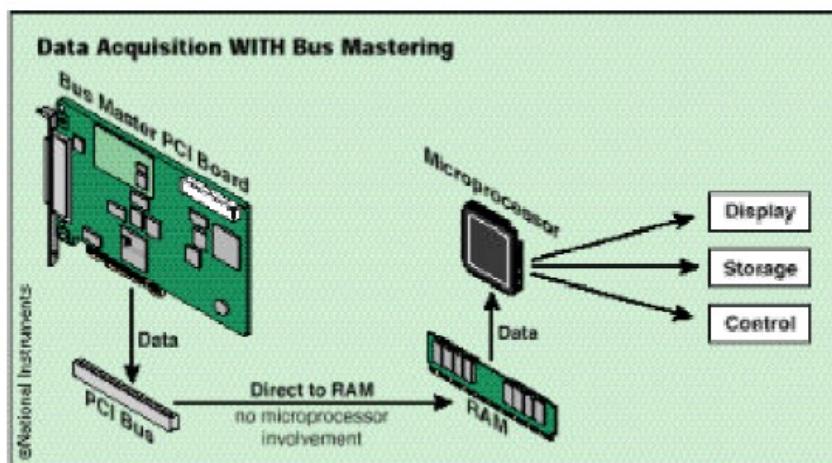
Como exemplo simples, considera-se um ficheiro de 50 KB gravado em disquete. Se não existisse o recurso de DMA, a transferência seria feita byte-a-byte, ou seja, seriam necessárias mais de 50.000 instruções por parte do processador para que esta transferência fosse executada. No entanto, a transferência seria controlada pelo controlador DMA, sem que o processador interaja no processo, ficando disponível para executar outra tarefa. Uma única instrução seria suficiente para o controlador DMA iniciar o processo.

Os PCs suportam vários canais DMA diferentes. Dependendo da aplicação, é possível usar um ou vários desses canais. Por exemplo, uma entrada e uma saída simultâneas com uma placa de som requerem um canal DMA para a entrada e outro canal DMA para a saída.

4.3.2.4 Bus Mastering

Alguns chipsets da Intel, presentes nas placas-mãe Pentium permitem um novo modo de transferência de dados do disco rígido para a memória. Este modo de transferência utiliza um novo esquema de DMA, chamado "Fast Multiword DMA", que transfere, em vez de 1 dado de 16 bits de cada vez, 3 dados de 16 bits de cada vez, ou seja, 48 bits. As taxas de transferência podem chegar a 16,6 MB/s.

Neste caso também a transferência de dados da memória com o disco rígido é feita sem a interferência do processador.



4.4 Tratamento de Sinais

A análise meramente qualitativa de um sinal por vezes é insuficiente para as diversas utilizações experimentais. No sentido de conseguir a sua tradução num sinal mensurável e dele se retirar o máximo de informação, a curva de um sinal é sujeita a diferentes e sucessivas transformações. Dois tipos de processamento são normalmente utilizados na investigação: processamento no domínio temporal, quando se está interessado na análise da amplitude do sinal com base no tempo, e processamento no domínio da freqüência.

4.4.1 Processamento no domínio temporal

Para o processamento com base no tempo, utiliza-se um conjunto de processos de transformação de curva que visam caracterizar e medir a intensidade do sinal durante o tempo.

4.4.1.1 Remoção da componente DC

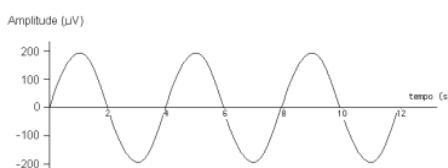
Muitas vezes o sinal apresenta uma componente contínua que provoca um deslocamento da linha de base do sinal. Esta componente contínua é um sinal comum que não tem qualquer relação com o sinal propriamente dito. Pode ser o resultado de fenômenos eletromagnéticos ou de limitações dos amplificadores utilizados.

Uma maneira fácil de remover esta componente é calcular a média de todos os pontos amostrados, e deslocar a curva do sinal deste resultado.

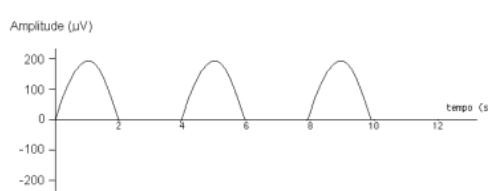
4.4.1.2 Retificação

A retificação da curva é uma operação normalmente utilizada de forma a permitir a posterior integração do sinal, já que transforma uma curva com valores positivos e negativos, de média igual a zero, numa curva de valores absolutos, todos positivos.

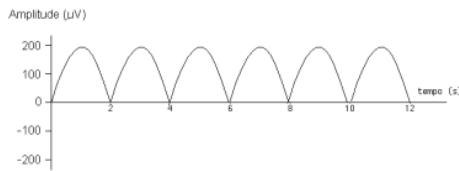
Existem duas formas de retificar a curva: eliminar os valores negativos (retificação de meia onda), ou invertendo-se os valores negativos adicionado-se aos positivos (retificação de onda completa). A retificação de onda completa tem a vantagem de manter toda a energia do sinal.



Sinal com amplitudes positivas e negativas.



Sinal com retificação de meia onda.



Sinal com retificação de onda completa.

4.4.1.3 Valor Médio

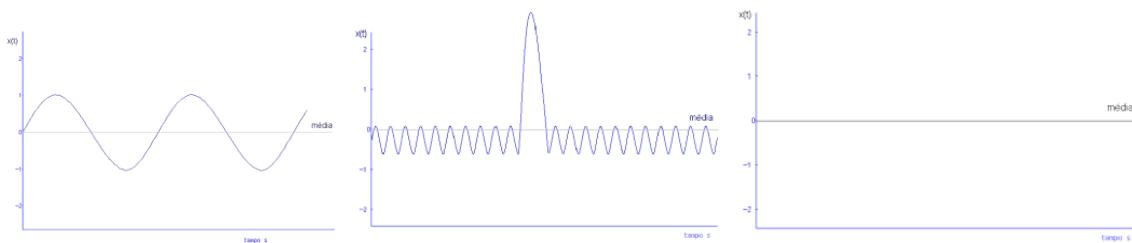
Antes da definição de valor médio uma breve esplanação sobre os tipos de dados existentes. Os dados que representam um fenômeno físico podem ser classificados em determinísticos ou aleatórios.

Determinísticos: são aqueles que podem ser escritos através de uma expressão matemática. No caso de um sistema massa-mola, por exemplo, o deslocamento em função do tempo está perfeitamente definido pela expressão:

$$x(t) = X e^{-at} \cos \omega t$$

Há, na prática, muitos fenômenos que produzem dados representáveis com suficiente precisão por relações matemáticas explícitas. Exemplos destes fenômenos podem ser: a vibração produzida por um rotor desbalanceado, a curva de resfriamento de um termopar, a carga/descarga de um capacitor em um circuito elétrico, etc.

Aleatórios: não podem ser escritos por uma função matemática explícita. Para caracterizá-los é necessário todas as "histórias temporais" possíveis de ocorrerem. Há necessidade de uma descrição probabilística ou estatística. Uma "história em função do tempo" é chamada de registro ou evento, e é observado sobre um intervalo de tempo finito.



Um processo aleatório é caracterizado por um conjunto de parâmetros estatísticos. Três destes parâmetros são: valor médio, função de autocorrelação e função densidade de probabilidade.

Matematicamente o valor médio pode ser definido como:

$$\bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

A média, por si só, não dá informações suficientes para diferenciar fenômenos que podem ser completamente diferentes em sua variação no tempo, porém possuírem o mesmo valor médio.

4.4.1.4 Auto correlação

Descreve a dependência dos valores em um tempo dado em relação aos dados em outro tempo. Matematicamente é definida como:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t + \tau) dt$$

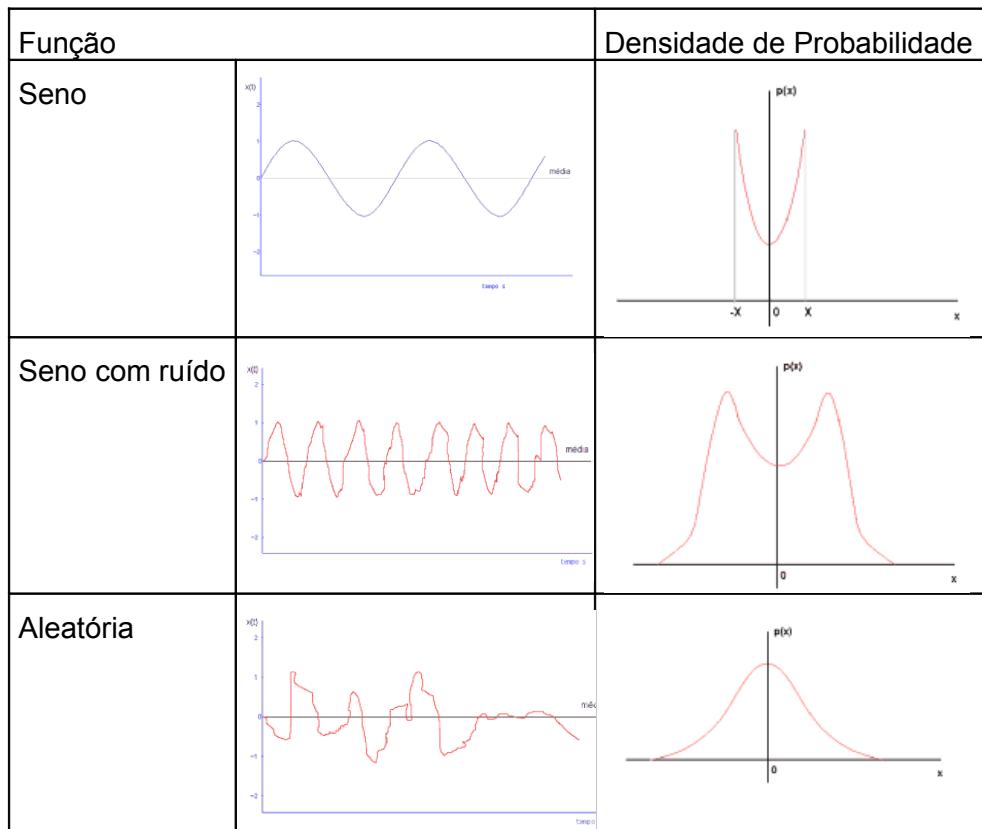
A principal aplicação da função de autocorrelação é estabelecer a influência dos valores em um tempo sobre os valores do fenômeno no tempo futuro. Para dados determinísticos a autocorrelação permanece quando temos um deslocamento no tempo, enquanto que nos processos aleatórios ela decai a zero.

4.4.1.5 Função Densidade de Probabilidade

Descreve a probabilidade de que as amplitudes assumam um valor dentro de um dado intervalo de tempo. Matematicamente é definida como:

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}[x < x(t) < x + \Delta x]}{\Delta x}$$

Para visualizar o significado prático da função densidade de probabilidade considere três funções distintas: um seno "bem comportado", um seno com ruído, e um sinal completamente aleatório, como na figura abaixo. Assume-se, por uma questão de facilidade, que todos estes processos possuem média zero.



A principal aplicação da função densidade de probabilidade é estabelecer a descrição probabilística dos valores instantâneos do processo. Pode ser usada também para identificação de funções determinísticas e aleatórias.

4.4.1.6 Valor RMS

O valor RMS (abreviação direta do inglês "root-mean-square"), corresponde à quantidade de sinal contínuo capaz de conter a mesma quantidade de energia. Matematicamente é definido como a raiz quadrada da média dos quadrados dos valores instantâneos do sinal:

$$Valor(RMS) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt}$$

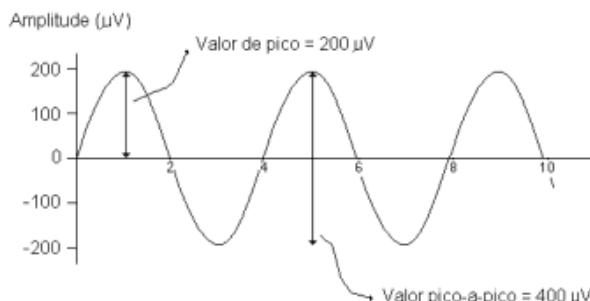
onde:

$x(t)$ - sinal variante no tempo

T - período de duração do sinal

4.4.1.7 Valor de pico / valor pico a pico

Valor de pico e pico-a-pico, são formas de avaliar a amplitude de um sinal, normalmente periódico. Correspondem ao maior valor positivo da função e a diferença entre o maior valor negativo e o maior positivo, respectivamente. Para sinais periódicos o menor e o maior valor da função, repetem-se a cada ciclo. No caso do sinal a curva atinge um pico máximo em apenas um ponto, o mesmo acontecendo com o ponto de mínimo. O valor de pico pode ser utilizado como parâmetro para normalização em amplitude do sinal.



4.4.1.8 Normalização no tempo

Um dos problemas que surgem ao se comparar diferentes sinais está relacionado com as diferenças na duração de vários sinais que se pretende comparar. Normalizar em tempo significa transformar, de uma forma equilibrada e sem alterar a estrutura do sinal, os sinais de duração diferente em sinais com o mesmo número de amostras. Tal pode ser feito, por exemplo, tomando como referência o sinal que contém o menor número de amostras. A aplicação de um algoritmo que determine, em função da duração de cada sinal, o número de amostras a ser retirado de forma intervalada, reduz todos os sinais ao número de amostras do mais curto, sem alterar a sua forma.

4.4.1.9 Normalização em amplitude

Esta técnica consiste na transformação dos valores absolutos de amplitude, das diferentes curvas que se pretende comparar, em valores relativos a um sinal de referência considerado como 100%. Os valores de amplitude assim obtidos tem outro significado mecânico e funcional.

4.4.1.10 Integral

A interpretação matemática do conceito de integral consiste na determinação da área delimitada pela curva.

Para tanto, basta um algoritmo somar todos os valores do vetor correspondente ao sinal, durante o tempo de integração.

Ex:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x(n)	13	5	2	-3	-4	0	1	0	5	10
I [x(n)]		18	20	17	13	13	14	14	19	29

4.4.1.11 Função de Correlação Cruzada

A função de correlação cruzada de dois eventos, descreve a dependência geral de um em relação ao outro. Matematicamente é definida como:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau) dt$$

onde:

$R_{xy}(T)$ - Função de correlação cruzada de $x(t)$ em relação a $y(t)$.

$x(t)$ - Primeira função variante no tempo.

$y(t)$ - Segunda função variante no tempo.

T - Tempo máximo de avaliação entre os dois sinais.

τ - Amplitude da variação temporal.

Quando $\tau = 0$, pode-se dizer que $x(t)$ e $y(t)$ são estatisticamente independentes. Estando ambas as funções normalizadas o valor máximo da função de correlação cruzada é 1 (um), quando as duas funções, $x(t)$ e $y(t)$, são iguais.

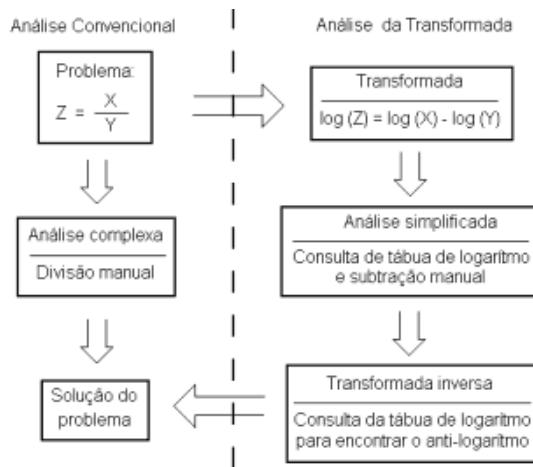
4.4.2 Processamento no domínio da frequência

4.4.2.1 FFT

FFT corresponde a abreviatura do inglês Fast Fourier Transform, que significa Transformada Rápida de Fourier, e é um recurso usado normalmente para simplificar a solução de um problema. Para um maior esclarecimento considere-se o seguinte exemplo: pretende-se determinar o quociente:

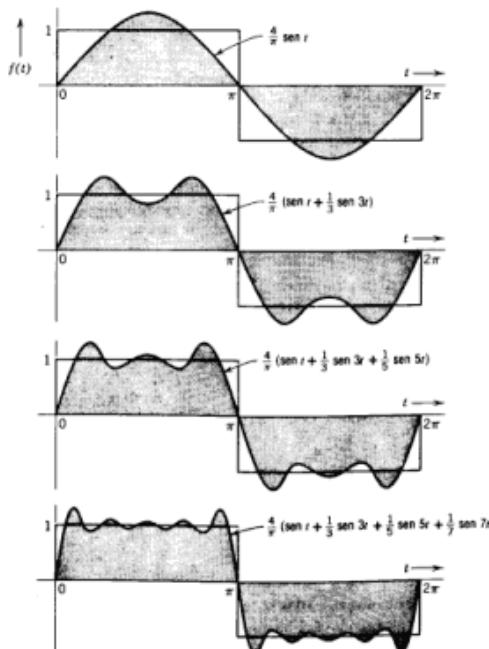
$$Z = \frac{X}{Y}$$

Considerando que se necessita grande precisão no resultado da equação, e que não há uma máquina calculadora disponível. A figura abaixo mostra dois caminhos possíveis de solução do problema.

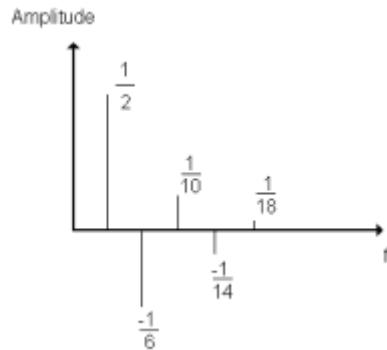


No exemplo mostrado foi utilizado uma propriedade dos logarítmos para transformar a operação de divisão em subtração. A conversão do problema simplifica a solução, uma vez que é muito mais simples e rápido, efetuar uma operação de subtração do que uma de divisão.

Da mesma forma, a Transformada de Fourier, busca simplificar a análise da solução de vários problemas na área científica. Porém a interpretação da Transformada de Fourier não é tão simples. No exemplo adotado, a operação com logaritmo, transforma um único valor em outro. Na Transformada de Fourier tem-se uma função de uma variável definida de a transformada em uma função de outra variável também definida de de a . Uma interpretação simplificada da Transformada de Fourier é apresentada na figura abaixo.



Como apresentado, a essência da Transformada de Fourier de uma função (forma de onda) é decompor ou separar a função em um somatório de senóides de diferentes freqüências. Quando este somatório de senóides representar a função original então tem-se determinada a Transformada de Fourier. Uma representação típica da Transformada de Fourier é um diagrama que mostra a amplitude e freqüência de cada senóide do espectro.



A Transformada de Fourier é desta forma, uma representação da função no chamado domínio freqüência. A Transformada de Fourier contém exatamente a mesma informação que a função original, elas diferem apenas na forma de apresentação da informação. A análise de Fourier permite que se examine uma função sob outro ponto de vista, o domínio transformado.

Frequência média

Corresponde à média aritmética de todas as freqüências presentes no espectro ponderadas por sua amplitude. Pode ser utilizada como parâmetro indicador de compressão espectral.

Frequência mediana

Define-se a frequência mediana como o valor da freqüência que divide o espectro em duas regiões contendo a mesma energia. A frequência mediana é o parâmetro mais adequado para detectar a compressão espectral produzida pela fadiga muscular localizada (paper da mão)

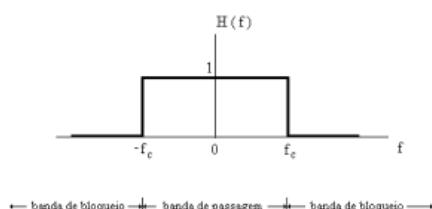
Moda da Frequência

Define-se como a freqüência em que o "power spectrum" atinge o seu valor mais alto.

4.4.2.2 Filtragem de espectro

Ideal

Um filtro ideal é aquele que permite a passagem daquelas componentes de freqüência desejadas, e rejeita completamente as demais. As componentes de freqüência que passam pelo filtro estão na chamada banda de passagem, e as freqüências bloqueadas se encontram na chamada banda de bloqueio. A freqüência , limite das bandas de passagem e bloqueio, é chamada freqüência de corte.



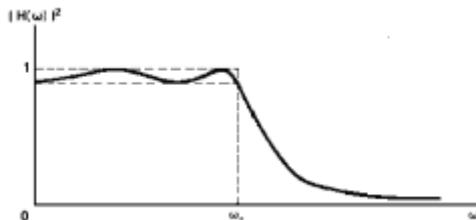
Passa baixa / passa alta

Em algumas situações as características de seleção de freqüência de um filtro ideal não são desejadas, e é preferível uma maior flexibilidade no comportamento do filtro, de maneira a permitir uma transição gradual entre a banda de bloqueio e a banda de passagem, em oposição a transição abrupta, característica dos filtros ideais. Além das bandas de passagem e bloqueio existentes no filtro ideal, surge uma zona de transição, entre as freqüências f_p e f_s , onde existe uma atenuação gradual das freqüências.



Butterworth e Chebyshev

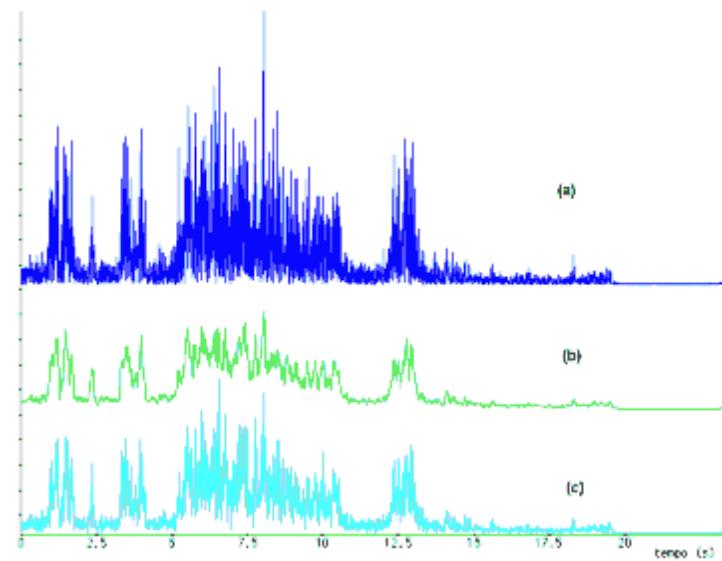
Os filtros Butterworth e Chebyshev são implementados em termos de equações diferenciais. Quanto maior a ordem da equação, mais próximo de um filtro ideal serão os resultados.



Média móvel

Uma forma de reduzir a variabilidade consiste em eliminar as variações muito bruscas dos valores de amplitude do sinal em bruto. Isto pode ser feito calculando-se os valores médios de pequenos intervalos de tempo. Uma escolha importante, de que depende a amplitude da filtragem efetuada, é o tamanho da janela de onde se retira a média. Quanto menor for este intervalo de tempo, menos "suavizada" e mais parecida com a curva original fica a curva resultante.

A fim de obter uma média que varie constantemente no tempo e que seja, portanto, mais representativa das alterações do sinal no tempo, utiliza-se uma técnica de média móvel, ou seja, uma "janela móvel" que percorre toda a curva progressivamente. Considere-se um exemplo de janela com 5 amostras. Esta janela calcula a média das amostras 1-5, depois das janelas 2-6, 3-7 e assim sucessivamente.



(a) Sinal retificado.

(b) sinal após uma filtragem com janela de 20 amostras.

(c) sinal após uma filtragem com janela de 5 amostras.