



**Autoenge Solutions**  
*Tecnologia em instrumentação industrial*



# AUTOMAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

**Autoenge Solutions**  
Tecnologia em instrumentação industrial

## Índice

- Capítulo 01 – Introdução
- Capítulo 02 – Histórico
- Capítulo 03 – Fundamentos básicos
- Capítulo 04 – Simbologias
- Capítulo 05 – Sensores de posicionamento
- Capítulo 06 – Variável temperatura
- Capítulo 07 – Variável pressão
- Capítulo 08 – Variável nível
- Capítulo 09 – Variável vazão
- Capítulo 10 – Variável Peso/Carga
- Capítulo 11 – Variáveis analíticas
- Capítulo 12 – Atuadores Eletromagnéticos
- Capítulo 13 – Válvulas de controle
- Capítulo 14 – Posicionadores
- Capítulo 15 – Sistemas de Controle
- Capítulo 16 – Ações de controle
- Capítulo 17 – Modelos de malhas de controles
- Capítulo 18 – Controlador Lógico Programável
- Capítulo 19 – Interface Homem Máquina
- Capítulo 20 – Sistema de Supervisão
- Capítulo 21 – Redes Industriais
- Capítulo 22 – Sistema de comunicação Fieldbus
- Capítulo 23 – Sistema de comunicação Profibus
- Capítulo 24 – Tabela de protocolos de comunicação

## **Capítulo 01 - Introdução**

O segmento denominado “AUTOMAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO” é por demais heterogêneo em termos dos produtos nele englobados e que, muitas vezes se complementam.

Por razões de um melhor entendimento deste segmento, cabe dividi-lo:

- Instrumentação;
- Automação de Processos Industriais e Não Industriais ( Controle de Processos);
- Automação da Manufatura.

A seguir, daremos uma idéia da abrangência de cada uma destas áreas:

### **Instrumentação:**

Instrumentação é a ciência da adaptação de dispositivos e técnicas de medição, de indicação, de ajuste e controle nos equipamentos e processos de fabricação .

A instrumentação e os sistemas de controle visam a otimização na eficiência dos processos de fabricação e a obtenção de um produto de melhor qualidade a um custo mais baixo e em menor tempo. A instrumentação é indispensável para:

1. Incrementar e controlar a qualidade do produto;
2. Aumentar a produção e o rendimento;
3. Fornecer dados a respeito da matéria-prima, a quantidade produzida e dados relativos a economia dos processos;
4. A execução de funções de inspeção e ensaios, com maior rapidez e confiabilidade;

5. Simplificar projetos de pesquisa, desenvolvimento e sistemas de obtenção de dados complexos e ;

6. Fornecer sistemas de segurança para os operários, as fábricas e os processos.

Esta área pode ser dividida em grandes subgrupos;

- Instrumentos de teste e medição - abrangem a geração e a medição de grandezas eletrônicas;

- Instrumentos para controle de processos - abrangem os instrumentos para painel e campo, úteis na medida e no controle de grandezas físicas nos processos da Indústria de transformação;

- Instrumentos para análises físicas, químicas e ensaios mecânicos - ( Analítica ) abrangem os instrumentos utilizados em laboratórios de pesquisas e controle de qualidade ,

- Instrumentos de aplicação odonto-médico-hospitalar.

### **Automação de Processo Industrial e Não Industrial ( Controle de Processo ):**

A Automação de Processos subdivide-se em dois setores:

- Processos Industriais:

\* Siderúrgica;

\* Química e petroquímica;

\* Geração de energia, etc.

- Processos não Industriais:

\* Sistemas de transporte;

\* Distribuição de energia;

\* Sistemas de serviços urbanos, etc.

## **Automação da Manufatura:**

Este segmento, evidenciam-se as seguintes sub-áreas:

- Comando numérico por computador;
- Projetos assistidos por computador ( CAD-CAM);
- Robótica.

## **Capítulo 02 - Histórico**

Como sabemos, os instrumentos de hoje utilizados são frutos de pesquisas e desenvolvimento de longas datas. A título de curiosidade, vamos analisar um “instrumento” utilizado na China Antiga ( Século XII D.C.). Trata-se de um regulador de canudo de palha para, beber.

O relato histórico é o seguinte:

“Eles bebem o vinho através de um tubo de bambu de dois ou mais pés de comprimento, em cujo interior há um obturador móvel, parecido com um peixinho feito de prata. Conviva e anfitrião compartilham o mesmo tubo. Se a bóia em formato de peixe se aproxima do furo, o vinho não virá. Assim, se alguém sugar muito lento ou muito rápido, os furos fechar-se-ão e não se poderá beber”.

Em outras palavras, o dispositivo tem a função de manter uma vazão de vinho pelos participantes de uma bebedeira.

Após esse período, outros inventos foram surgindo, até chegarmos na Revolução Industrial. Foi apenas mediante uma passagem pelo campo da máquina a vapor que, no fins do século XIX, o concito alcançou a consciência do mundo da engenharia.

A máquina de BOULTON-WATT, admirada como sensação, rapidamente disseminou-se pela Europa. Nela a atenção focalizou-se no Governador Centrífugo com seus volantes giratórios, a demonstrar impressionante, a ação da realimentação.

Por meio de elementos mecânicos adequados, este movimento é transmitido para a válvula de admissão de modo que, ao estrangular o fluxo de vapor, a velocidade é reduzida.

Como nosso é o estudo da Instrumentação, vamos dar um salto histórico para o século XX, na década de 40, onde a Instrumentação Pneumática teve seu grande desenvolvimento, surgindo pela primeira vez a filosofia dos sistemas de transmissão e sala de controle centralizado.

Já na década de 50, surgiram os primeiros sinais da Instrumentação Eletrônica, paralelamente a processos e sistemas de controle cada dia mais complexos.

Durante a década de 60, surgem os primeiros sistemas de controle automático por computador, no meio a uma tecnologia de circuitos integrados.

### **Revolução industrial - Séc. XVIII**

- Artesanato. Todas as fases da produção eram feitas pela mesma pessoa.
- Manufatura. Especialização do trabalho.

- Maquinfatura. Transformação da matéria-prima pelas máquinas em substituição as ferramentas usadas pelo homem..

### **Estamos na era da automação.**

A primeira revolução industrial, no fim do século passado, foi caracterizada pela substituição do trabalho muscular do homem por máquinas motrizes, ou seja, a mecanização. A automação é a introdução da mecanização não só desses trabalhos, mas também dos trabalhos mentais.

Na automação, o dispositivo automático observa sempre o resultado do seu trabalho e dá essa informação ao dispositivo principal ( essa ação reflexiva chama-se realimentação ou feedback). Este último compara a informação com um objetivo desejado, e, se existir diferença entre os dois, atua no sentido de diminuí-la para o mínimo valor possível. Pode-se dizer, portanto, que a noção fundamental da automação é radicada no feedback.

### **Automação**

**Conceito:** É um conjunto de técnicas através das quais se constróem sistemas ativos capazes de atuar com uma eficiência ótima pelo uso de informações recebidas do meio sobre o qual atuam, com base nas informações o sistema calcula a ação corretiva mais apropriada. Um sistema de **automação** comporta-se exatamente como um operador humano o qual, utilizando as informações sensorias, pensa e executa a ação mais apropriada.

As grandes funções da **automação** podem se resumir como se vê na tabela abaixo:

As analogias com as funções de um operador humano podem esquematizar-se assim:

Sistema de Automação	Operador Humano
Informação ou comunicação	Impressão sensorial
Computação	Raciocínio
Controle	Ação

No campo industrial e, em particular, nas indústrias petroquímicas, o operário, operador de processo, tinha por função, vigiar leituras de um grande número de instrumentos de medida. As pressões, as temperaturas, as vazões, os níveis, as composições químicas, deveriam ser conhecidas a todos os instantes pelo operador, o qual deveria detectar, de entre essa grande massa de dados, as variáveis que se desviavam de certos valores prefixados e atuar sobre o complexo fabril de modo a reconduzi-lo a um funcionamento mais estável ou mais econômico.

Porém as limitações intrínsecas do homem oferecem a este processo de integração uma lentidão incompatível com as grandes produções das unidades fabris modernas. A atenção a dois fatores simultâneos é praticamente impossível. Um esforço no sentido de uma maior rapidez acarreta um aumento dos erros e falsas manobras.

Nas últimas décadas, as técnicas do controle automático permitiram liberar os operadores fabris de funções enfadonhas e que exigiam grande esforço nervoso permitindo, simultaneamente, que essas funções fossem cumpridas com maior precisão, rapidez e segurança.

O controle automático é verdadeiramente a primeira fase da **automação**. Trata-se porém de uma automação não integrada e ao nível de subsistemas fabris relativamente simples.

Ao passo que primitivamente era o operário quem, guiando-se, pôr exemplo, pela leitura de um manômetro, tentava regular uma pressão, abrindo ou fechando válvulas, agora é uma cadeia de controle ( ou malha de controle ) que faz a mesma coisa com muitas vantagens. Encontraram-se numa cadeia de controle, as funções básicas de medida, computação e controle que já referimos serem características da automação.

O cálculo da ação de controle está a cargo de pequenos **computadores** pneumáticos e eletrônicos: Os controladores.

Isto não quer dizer, diga-se de passagem, que o homem se torna inútil. Pelo contrário, como supervisor do autômato e sem estar agora sujeito à enorme tensão nervosa e muscular de múltiplas tarefas, isto é , liberto dos meios, o piloto humano tem sempre a possibilidade de alterar as ordens dadas ao sistema e pode dedicar-se aos verdadeiros fins a atingir: A investigação, a procura de novos aspectos do real, a supervisão geral.

## Capítulo 03 – Fundamentos básicos

### INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL – FUNÇÕES DE INSTRUMENTOS

É através da instrumentação, principalmente, que um operador faz o acompanhamento do processo.

#### Definições:

**Instrumento:** equipamento industrial responsável em controlar, medir, registrar ou indicar as variáveis de um processo produtivo.

**Controle:** verificação de uma variável para possíveis correções fazendo com que a mesma permaneça dentro de uma tolerância de trabalho pré-determinada.

**Medir:** determinar ou verificar a extensão de uma grandeza ou variável.

**Registrar:** escrever ou lançar uma informação em papel (gráfico) ou em forma de arquivo eletrônico.

**Indicar:** apontar, mostrar, sinalizar o valor de uma variável.

**Sinalizar:** na qual o instrumento somente indica se a grandeza medida se encontra acima ou abaixo de certos valores pré-fixados.

**Transmitir:** o instrumento transforma o sinal medido em outro, que passa ser transmitido à distância.

Os transmissores mais comuns são:

1. Pneumáticos: que convertem a medição da variável em um sinal proporcional de pressão de ar comprimido.

No sistema americano, os limites da faixa de medição correspondem a 3 e 15 psi. No sistema europeu, os limites são de 0,2 e 0,1 Kgf/cm<sup>2</sup>.

2. Eletrônicos: que convertem a medição da variável em um sinal proporcional elétrico, de 4 à 20 mA, ou 10 à 50 mA.

Os sinais são transmitidos, no caso de transmissão pneumática, através de tubos de cobre ou plástico de cerca de 6 mm do diâmetro externo, enquanto que no caso de transmissão eletrônica usa-se em geral 2 fios.

3. Digitais: Fieldbus é um sistema de comunicação digital bidirecional que interliga equipamentos inteligentes de campo com sistema de controle ou equipamentos localizados na sala de controle.

A recepção se faz por medidores de pressão (receptores pneumáticos) ou miliamperímetros.

Nota-se que, uma vez colhido o tipo de transmissão e o sinal, os receptores serão iguais entre si, diferenciando-se somente uns dos outros pela escala.

## **INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL – DEFINIÇÕES GERAIS**

**Variável:** são condições ou situações que ocorrem durante um processo produtivo, que podem ou não interferir no processo ou no produto, alterando a qualidade, a produtividade ou deixando o processo inseguro. As principais variáveis são: temperatura, pressão, vazão e nível.

**VARIÁVEL CONTROLADA:** É a grandeza que desejamos manter dentro de certos parâmetros ou valores pré-determinados.

**VARIÁVEL MANIPULADA:** É a grandeza que efetivamente manuseamos a fim de manter a variável controlada, dentro dos valores desejados.

Estas grandezas nem sempre são coincidentes.

**Processo:** seqüência de operações em um conjunto de máquinas e/ou equipamentos necessários para a manufatura de um produto.

Os instrumentos podem estar localizados em painéis na sala de controle e/ou no campo.

Os instrumentos que medem, indicam ou controlam essas variáveis no processo possuem sensibilidade e grau de aperfeiçoamento extremamente apurados requerendo, por isto, cuidados especiais de manuseio.

Além disso, deve o operador ter sempre em mente que os instrumentos também representam a segurança da unidade e do pessoal e que deles dependem a qualidade e a correta especificação na elaboração dos produtos.

#### **INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL – CARACTERÍSTICAS DE INSTRUMENTOS**

1. **Faixa de medida (RANGE):** conjunto de valores da variável medida que estão compreendidos dentro dos limites inferior e superior da capacidade de medida ou de transmissão do instrumento. Expressa-se determinando os valores extremos;
2. **Alcance (SPAN):** é a diferença algébrica entre os valores superior e inferior da faixa de medida do instrumento. Por exemplo, um instrumento com faixa de medida de 100°C a 250°C, possui um alcance de 150°C.

3. **Erro:** é a diferença entre o valor medido ou transmitido pelo instrumento, em relação ao valor real da variável medida. Se tivermos o processo em regime permanente, estável, chamaremos de "erro estático" que será positivo ou negativo, dependendo da indicação do instrumento que poderá estar indicando a mais ou a menos. Quando tivermos a variável se alterando, teremos um atraso na transferência de energia do meio para o medidor, onde o valor medido estará geralmente atrasado em relação ao valor real da variável. Esta diferença é chamada de "erro dinâmico";
4. **Precisão:** define-se como sendo o maior valor de erro estático que um instrumento pode ter ao longo de sua faixa de trabalho. Pode ser expressa de diversas maneiras como: porcentagem do alcance, unidade da variável e porcentagem do valor medido;
5. **Zona morta:** é a não alteração na indicação ou no sinal de saída de um instrumento ou em valores absolutos da faixa de medida do mesmo, apesar de ter ocorrido uma sensível variação da variável. Por exemplo, um instrumento com faixa de medida entre 0°C a 200°C possui uma zona morta de  $\pm 0,1\%$  do alcance, ou seja  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ . Portanto, para variações inferiores a este valor, o instrumento não apresentará alteração da medida;
6. **Sensibilidade (linearity):** é a razão entre a variação do valor medido ou transmitido para um instrumento e a variação da variável que o acionou, após ter alcançado o estado de repouso. Pode ser expressa em unidades de medida de saída e de entrada. Por exemplo, um termômetro de vidro com faixa de medida de 0°C a 500°C possui uma escala de leitura de 50cm, portanto, a sua sensibilidade é de  $0,1\text{cm}/^\circ\text{C}$ ;
7. **Histerese:** é a diferença máxima apresentada por um instrumento, para um mesmo valor, em qualquer ponto da faixa de trabalho, quando a variável percorre toda a escala nos sentidos ascendente e descendente;

8. **Repetibilidade:** é a máxima diferença entre diversas medidas de um mesmo valor da variável, adotando sempre o mesmo sentido de variação. Expressa-se em porcentagem do alcance;
  
9. **Resolução:** é a menor variação que se pode detectar. A resolução está relacionada com o número de "bit" do instrumento: quanto maior o número de "bit" melhor a resolução. O cálculo da resolução de um instrumento é dado pelo quociente da faixa de medida por  $2^{\text{número de "bit" do mesmo}}$ . Por exemplo, para um transdutor linear de 100mm e 12 bit, tem-se uma resolução de 0,024mm.
  
10. **Valor desejado** (ou "set-point" ou "set-value"): É o valor no qual desejamos manter a variável controlada.
  
11. **Desvio (Off-set);** É a diferença porventura existente entre o valor desejado e o valor da variável controlada.

#### **Classificação dos instrumentos**

Sob o ponto de vista do operador, os instrumentos podem classificar-se em:

##### **Segundo sua localização**

1. Instrumentos de painel, localizados na sala de controle;
2. Instrumentos de campo, localizados na área das unidades.

##### **Segundo suas funções**

1. Instrumentos de medição da variável;
2. Instrumentos de controle da variável, segundo informações obtidas pelos instrumentos de medição;
3. Instrumentos de alarme, que alertam o operador sobre condições anormais das variáveis, dentro da margem de segurança que o processo e a unidade exigem.

##### **Segundo suas características**

1. Instrumentos indicadores, nos quais a variável é indicada por meio de um ponteiro em uma escala, ou digital;
2. Instrumentos registradores, nos quais a variável é registrada em uma carta por meio de uma pena;
3. Instrumentos controladores, que mantêm a variável num valor pré-determinado.

Naturalmente, os instrumentos podem desempenhar, simultaneamente, uma ou mais das funções citadas.

Por exemplo: pode ser simplesmente indicador;

Por exemplo: pode ser simplesmente registrador;

Por exemplo: pode ser simplesmente controlador;

Por exemplo: pode ser indicador controlador;

Por exemplo: pode ser registrador controlador.

### **Sistemas de transmissão (leitura remota)**

Em geral, a medição de uma variável é feita no campo e o instrumento pelo qual se acompanha o valor dessa variável está na Casa de Controle.

Isto é possível devido ao que chamamos de transmissão.

Instrumentos que incorporam dispositivos para efetuar a transmissão são chamados **instrumentos transmissores**.

Esses dispositivos de transmissão empregam uma fonte de energia auxiliar.

Assim, conforme a natureza dessa energia auxiliar, os transmissores se classificam em: pneumáticos, hidráulicos e elétricos.

Os transmissores pneumáticos poderiam usar como fonte de energia qualquer gás seco pressurizado, entretanto, geralmente, é usado ar comprimido seco.

Os transmissores hidráulicos poderiam usar qualquer líquido, sendo comum o óleo.

Os transmissores elétricos usam, naturalmente, a energia elétrica.

Existem elementos medidores que por natureza geram energia elétrica e não precisam de dispositivo adicional para transmissão, apenas meio para transmitir (fios condutores).

Se admitirmos que uma variável quando medida varia de 0 a 100, existem convenções que relacionam esse intervalo de medição com uma faixa de transmissão.

Assim, por exemplo, são comuns as faixas de 3 a 15 “psi” (libras por polegada quadrada), ou 0,2 a 1 kgf/cm<sup>2</sup> (quilogramas por centímetro quadrado) na transmissão pneumática.

Ou 4 a 20 mA (mili amperes) na transmissão elétrica analógica ou à 20 mV (milivolts) na transmissão elétrica digital.

#### **CONTROLE AUTOMÁTICO**

Nos processos industriais antigos ou de pequeno porte as variáveis eram controladas pelo elemento humano; o controle manual.

Atualmente, devido a complexidade dos processos, seja por questões de segurança ou de economia, o elemento humano foi substituído por instrumentos capazes de executar essas tarefas: são os controladores automáticos.

A mão de obra pode ser extremamente reduzida, uma vez que restaram poucas operações manuais e a fiscalização ou supervisão geral da instrumentação é de fácil execução.

Como vantagens de controle automático sobre o elemento humano, temos:

- Redução de custos através da diminuição de mão de obra;
- Garantia de uniformidade de produtos acabados;
- Garantia maior de segurança pessoal e do equipamento.

#### Conceito de controle automático

Entende-se por “controle automático” um conjunto de operações que consistem em:

- **Medir** uma variável;
- **Comparar** esta medida com um valor desejado;
- **Corrigir** o desvio observado.

A figura abaixo mostra, sob a forma de notação de blocos, o conceito de controle automático.

Os componentes principais do controle automático são: o processo e o controlador automático.

O **processo** ou sistema controlado compreende uma operação ou uma série de operações realizadas no, ou pelo equipamento, no qual uma variável é controlada.

O controlador automático é um instrumento que recebe o valor da variável medida e atua para corrigir ou limitar o desvio dessa variável em relação a um ponto de controle (valor constante pré-estabelecido para a variável) ou então limitar o desvio da variável em relação a uma lei pré-estabelecida (valor variável da própria variável).

O controlador atua sobre o elemento final de controle.

O **elemento final de controle** é o dispositivo que varia diretamente o valor da variável manipulada.

**Variável controlada** é a quantidade ou condição que é medida e controlada.

**Variável manipulada** é a quantidade ou condição que é variada pelo elemento final de controle, de modo a efetuar o valor da variável controlada.

**Meio controlado** é a energia ou material do processo no qual a variável é medida e controlada.

**Agenda de controle** é a energia ou material do processo, do qual a variável manipulada é uma condição ou característica.

## Funções do Controle Automático

Muitos Controles, sejam eles controlados manualmente ou automaticamente, irão se comportar de maneira satisfatória apenas quando os

valores de certas variáveis do processo forem mantidas dentro de limites determinados.

Então, a função do controle do processo é manipular a relação entrada e saída de energia, de maneira que as variáveis do processo sejam mantidas dentro dos limites desejáveis. Um controlador automático pode ser definido como um mecanismo o que mede o valor da variável do processo e opera de maneira a limitar o desvio desta variável, em volta do valor desejado. A variável do processo, que é mantida dentro de limites, é chamada de variável controlada.

#### Elementos de Controle Automático

Os elementos funcionais de um sistema de controle automático e sua interação numa cadeia de controle fechada, são mostrados na figura abaixo.

Uma comparação mostra que o controlador automático desempenha as mesmas funções básicas (e na mesma ordem), que o operador humano no processo.

Relação das quatro funções de controle e dos elementos básicos de um controlador automático, para um controle em cadeia fechada.

Os elementos de medição efetuam de medir, sentem a avaliam a variável de saída do processo.

A função de comparação de valor medido da variável de saída com seu valor desejado, é feita pelo detetor de erro, que produz um sinal quando existe um desvio entre o valor mantido e o desejado.

Este sinal de atuação é muitas vezes chamado de erro. Este sinal tem uma certa relação com o desvio, que pode ser chamada: função de computação.

#### **Vantagens de Controle Automático na Indústria:**

Não é demais nas vantagens que a automação com controladores individuais ou com computador central à indústria. Eis uma lista de alguns desses aspectos favoráveis:

- 1 - Eliminação de trabalhos monótonos ou exigindo atenção concentrada.
- 2 - Eliminação do erro humano.
- 3 - Diminuição das horas-homem para a mesma produção.
- 4 - Aumento na quantidade do produto ou no número de unidades fabricadas.
- 5 - Melhoria na qualidade dos produtos.
- 6 - Melhor aproveitamento de matérias-primas.
- 7 - Melhor aproveitamento de energia.
- 8 - Menor desgaste do equipamento fabril.
- 9 - Melhoria na uniformidade dos produtos.
- 10 - Em resumo: aumentos de produtividade podendo ir de alguns % até valores muito altos.

### **Diagrama de Blocos de um Sistema de Controle**

A automação de processos tem recebido de estudiosos de todos os assuntos a maior atenção, dada a sua influência tanto no campo tecnológico como humano, onde a mão de obra “não especializada” vem sendo substituída, sendo esta substituição, acelerada ou retardada de acordo com os interesses econômicos em jogo.

A bem da verdade já nos dias de hoje a mão de obra não automatizada, é histórica nos países desenvolvidos, pouco importante naqueles em desenvolvimento e fator de atraso nos subdesenvolvidos.

Destes fatos surge a preocupação de dotar o técnico brasileiro de um conhecimento amplo sobre sistemas de controles automáticos e instrumentos capazes de realizar este controle.

A dedicação na análise de instrumentos capazes de detectar, manipular, registrar e atuar sobre grandezas físicas envolvidas em processos automáticos; também é objetos deste nosso trabalho.

Basicamente, um sistema de controle automático opera segundo o diagrama de blocos da figura 1, onde é adicionado ao processo uma malha de realimentação capaz de atuar sobre a entrada do sistema.

Nosso objetivo prende-se mais à malha de realimentação que ao processo propriamente dito. Assim, na figura 2 temos a malha de realimentação mais detalhada.

### **Classificação dos Controles**

A utilização de controles automáticos se dá quando desejamos alta confiabilidade, muita rapidez e grande economia podendo ser estes três fatores, considerados individualmente ou em conjunto.

Baseado ainda nestes três fatores podemos dividir os sistemas de controle segundo a sua operação em:

1. Sistemas de Malha Aberta
2. Sistemas de Malha Fechada

Nos sistemas de malha aberta temos operação discreta do atuador, sendo que após o comando o sistema de controle perde sua ação sobre o processo, ficando a espera de uma nova ordem.

A figura 3 mostra o esquema de um sistema de malha aberta.

Nos sistemas de malha temos uma operação contínua, e a cada instante a variável de saída é comparada com um padrão. Dependendo da informação

resultante temos um comando do atuador sobre a variável a ser controlada. Na figura 4 mostramos um sistema de malha fechada.

## **Capítulo 04 – Simbologias**

A simbologia de instrumentação analógica e digital, compartilhada e integral, distribuída e centralizada se baseia nas seguintes normas americanas (geralmente traduzidas para o português) :

1. ISA S5.1, *Instrumentation Symbols and Identification*, 1984
2. ISA S5.3, *Graphic Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems*, 1983

### **Aplicações**

Os símbolos de instrumentação são encontrados principalmente em

1. fluxogramas de processo e de engenharia,
2. desenhos de detalhamento de instrumentação instalação, diagramas de ligação, plantas de localização, diagramas lógicos de controle, listagem de instrumentos,
3. painéis sinópticos e semigráficos na sala de controle,
4. diagramas de telas de vídeo de estações de controle.

### **Geral**

Cada instrumento ou função a ser identificada é designado por um conjunto alfanumérico ou número de tag. A parte de identificação da malha correspondente ao número é comum a todos os instrumentos da mesma malha. O tag pode ainda ter sufixo para completar a identificação.

### **Número de tag típico**

	Identificação do instrumento ou tag do instrumento
<b>TIC</b>	
<b>103</b>	Identificação da malha (malha de temperatura, número 103)

## T 103

	Identificação funcional
	Controlador Indicador de temperatura
<b>TIC</b>	
<b>T</b>	Primeira letra (variável da malha)
	Letras subsequentes (função do instrumento na malha)
<b>IC</b>	

O número da malha do instrumento pode incluir o código da informação da área . Por exemplo, o TIC 500-103, TIC 500-104, aos dois controladores indicadores de temperatura, ambos da área 500 e os números seqüenciais são 103 e 104.

### Identificação funcional

A identificação funcional do instrumento ou seu equivalente funcional consiste de letras da Tab. 1 e inclui uma primeira letra, que é a variável do processo medida ou de inicialização. A primeira letra pode ter um modificador opcional. Por exemplo, PT é o transmissor de pressão e PDT é o transmissor de pressão diferencial.

A identificação funcional do instrumento é feita de acordo com sua função e não de sua construção.

### Identificação da malha

A identificação da malha geralmente é feita por um número, colocado ao final da identificação funcional do instrumento associado a uma variável de processo. A numeração pode ser serial ou paralela. Numeração paralela começa de 0 ou para cada variável, TIC-100, FIC-100, LIC-100 e AI-100. Numeração serial usa uma única seqüência de números, de modo que se tem TIC-100, FIC-101, LIC-102 e AI-103. A numeração pode começar de 1 ou qualquer outro número conveniente, como 101, 1001, 1201.

### Linhas entre os Instrumentos

As linhas de ligações entre os instrumentos devem ser mais finas que as linhas de processo e são simbolizadas como mostrado a seguir.

	Sinal indefinido: conexão com processo, elo mecânico ou alimentação do instrumento
	Sinal pneumático, típico de 20 a 100 kPa (3 a 15 psi)
	Sinal eletrônico, típico de 4 a 20 mA cc
	Sinal de ligação por programação ou elo de comunicação
~ ~ ~	Sinal eletromagnético ou sônico (guiado)
~ ~ ~	Sinal eletromagnético ou sônico (não guiado)
L L L	Sinal hidráulico
	Tubo capilar
	Linha de processo

Exemplo para simbologia de malha de controle:

**Letras para simbologias**

	Primeira letra		Letras subsequentes		
	Variável	Modificador	Função display	Função saída	Modificador
A	Análise (5,19)		Alarme		
B	Queimador		Escolha (1)	Escolha (1)	Escolha (1)
C	Escolha (1)			Controle (13)	
D	Escolha (1)	Diferencial			
E	Tensão (f.e.m.)		Elemento sensor		
F	Vazão (flow)	Fração ou relação (4)			
G	Escolha (1)		Visor (9) ou indicador local		
H	Manual (hand)				Alto ( <i>high</i> ) (7, 15, 16)
I	Corrente		Indicação (10)		
J	Potência	Varredura ( <i>scan</i> ) (7)			
K	Tempo	Tempo de mudança (4, 21)		Estação controle (22)	

L	Nível ( <i>level</i> )		Lâmpada (11)		Baixo ( <i>low</i> ) (7, 15, 16)
M	Escolha (1)	Momentâneo			Médio (7, 15)
N	Escolha (1)		Escolha (1)	Escolha (1)	Escolha (1)
O	Escolha (1)		Orifício ou Restrição		
P	Pressão, Vácuo		Ponto de teste		
Q	Quantidade	Integral, Total (4)			
R	Radiação		Registro (17)		
S	Velocidade ou Frequência	Segurança (8)		Chave (13)	
T	Temperatura			Transmissão (18)	
U	Multivariável (6)		Multifunção (12)	Multifunção (12)	Multifunção (12)
V	Vibração, Análise mecânica			Válvula, damper (13)	
W	Peso, Força		Poço ( <i>well</i> )		
X	Não classificado (2)  Variável a definir	Eixo X	Não classificado (2)	Não classificado (2)	Não classificado (2)
Y	Evento, Estado  Função a definir	Eixo Y		Relé, computação (13, 14, 18)	
Z	Posição ou Dimensão	Eixo Z		Elemento final	

**Balão do Instrumento**

O instrumento completo é simbolizado por um pequeno balão circular, com diâmetro aproximado de 12 mm. Porém, os avanços nos sistemas de controle com instrumentação aplicando microprocessador, computador digital, que permitem funções compartilhadas em um único instrumento e que utilizam ligações por programação ou por elo de comunicação, fizeram surgir outros símbolos de instrumentos e de interligações.

Representação dos instrumentos em Diagramas P&I

	Sala de Controle Central		Local Auxiliar		Campo
	Acessível ao operador	Atras do painel ou inacessível ao operador	Acessível ao operador	Atras do painel ou inacessível ao operador	
<b>Equipamento</b> Instrumento discreto					Montado no campo
<b>Equipamento compartilhado</b> Instrumento compartilhado					
<b>Software</b> Função de computador					
<b>Lógica compartilhada</b>					

Controle Lógico Programável					
Instrumentos compartilhando o mesmo invólucro. Não é mandatório mostrar uma caixa comum.					

### **Capítulo 05 – Sensores de posicionamento**

São sensores que se destinam a detectar a aproximação de um corpo, podendo este ser metálico, não metálico, magnético, etc. O sinal produzido é binário, onde pode ser aplicado em controle on-off, intertravamento, alarme, seqüência de acionamentos, etc.

Abaixo relacionados temos os tipos de detetores por aproximação:

- **Detetor de limite mecânico; (“Micro Swich”);**
- **Detetor de limite magnético (“Reed Switch”);**
- **Detetor de limite indutivo;**
- **Detetor de limite capacitivo;**
- **Detetor de limite óptico;**
- **Detetor de limite magnético-indutivo.**

Neste capítulo serão vistos os elementos emissor de sinais por aproximação, isto é, sem o contato das partes móveis a serem detectadas.

### - Indutivo

Esse tipo de sensor detecta qualquer tipo de objeto metálico, podendo realizar, entre outras aplicações, contagem e medições de velocidade. Atuam geralmente numa faixa de distância de 0,6 mm a 75 mm.

São encontrados principalmente na indústria automobilística, têxtil, papel e celulose e plástico. Esse tipo representa 60% dos sensores utilizados.

O princípio de funcionamento se dá através da geração de um campo eletromagnético na face.

No tipo indutivo o objeto que se aproxima deve ser metálico, pois fará parte do núcleo de um indutor, e a indutância só será modificada com a introdução de metais no campo magnético do indutor.

Os sensores indutivos podem ser de corrente alternada ou contínua e este último a dois ou a quatro fios.

No tipo para corrente alternada o sensor aciona diretamente a carga (relés, cargas resistivas, pequenos motores ) através de um triac interno.

Ver diagrama e dados.

Distância de detecção 10mm

tensões de operação 42 a 130Vca

120 a 240Vca

carga máxima (42Vca) - 12VA - 0,28 A

(220Vca) - 80VA - 0,36 A

carga mínima 8VA

Os tipos de corrente contínua só acionam cargas de corrente contínua de baixa potência. Isso exige a utilização de um relé para o acionamento indireto de cargas maiores e de corrente alternada.

O tipo a dois fios deve ser ligado em série, como no de corrente alternada.

No tipo a quatro fios dois desses fios são conectados à fonte e os outros dois são as saídas, uma NA e outra NF sendo comum o terminal positivo ou o negativo desta fonte, dependendo do tipo.

A saída do sensor é a transistor e de acordo com seu tipo, NPN ou PNP, apresenta dois tipos de ligação diferentes:

No tipo NPN, ao ser acionada, a saída apresenta potencial negativo, logo, a carga deverá ser ligada entre o positivo da fonte e a saída.

NA

NF

saída simples saída tipo inversor

No tipo PNP, ao ser acionada, a saída apresenta potencial positivo, logo a carga deverá ser ligada entre o negativo da fonte e a saída.

NA

NF

saída simples saída tipo inversor

### - Capacitivo

**Esses sensores detectam qualquer tipo de objeto, tipos de material em detrimento de outros (como vidro e não plástico) e até a presença de determinados materiais dentro de recipientes (como a presença de líquidos dentro de garrafas).**

O tipo capacitivo tem como elemento sensor o dielétrico de um capacitor, podendo assim o objeto ser de qualquer natureza material exceto gasosa. Os sensores capacitivos também podem ser de alimentação do tipo a dois fios de corrente contínua e de corrente alternada, e a quatro fios de corrente contínua todos com ligações idênticas aos indutivos.

A forma de ligação do sensor é em geral, mostrada no corpo do próprio sensor devendo ser em seguida com muita atenção principalmente quanto a corrente máxima, a faixa de tensão e à polaridade nos tipos de alimentação contínua

### **-Sensor óptico**

Sensores capazes de detectar qualquer tipo de objeto que reflete luz. Alguns sensores especiais detectam até objetos pretos ou transparentes (cada objeto irá gerar um fator de redução para o sensor). Nessa linha estão os sensores com fibra óptica e laser, que permitem maior precisão e aplicações de difícil acesso.

Estão divididos em três segmentos: difuso (possui o emissor e o receptor em um único corpo e o acionamento acontece quando um objeto entra na região de atuação do sensor e reflete o feixe de luz), retro-reflexivo (também possui o emissor e o receptor no mesmo corpo, tem um espelho prismático, e é acionado quando um objeto interrompe o feixe de luz refletido pelo espelho) e barreira (quando o sensor e o receptor estão em corpos separados, e o acionamento acontece quando o objeto interrompe o feixe de luz).

São encontrados nas áreas de empacotamento, paletizadoras, processamento de papel e plástico, indústria têxtil e detecção de cor e de marca.

Também no óptico qualquer objeto é percebido desde que não seja translúcido. O sensor óptico tem a vantagem de não precisar de grande proximidade do objeto.

O sensor se apresenta em dois tipos:

\*Barreira: há um transmissor de luz e um receptor de luz, e este acionará contatos internos em quanto o feixe atingir o receptor, estando necessariamente o transmissor e o receptor separados.

\*Reflexivo: O transmissor e o receptor são montados em um mesmo corpo e a luz é emitida em sentido contrário ao do receptor ( que está ao lado do receptor ), o feixe luminoso só atinge o sensor quando reflete em algum objeto e volta ao mesmo, por isso este tipo recebe a denominação de reflexivo.

Em geral, utiliza-se um espelho para a reflexão, e o objeto detectado interrompe o retorno do feixe luminoso. Neste caso o objeto não deve refletir a luz e por isso não deve passar muito próximo ao sensor.

#### TIPO BARREIRA

OBJETO DETECTADO

FONTE DE LUZ SENSOR

TIPO REFLEXIVO

ELEMENTO TRANSMISSOR ESPELHO

ELEMENTO TRANSMISSOR

#### - Magnético (Reed switch)

Lâminas flexíveis encapsulada num invólucro de vidro, formam um dos mais versáteis dispositivos eletrônicos com aplicações que vão desde simples interruptor até a de sensíveis sensores para as mais diversas modalidades de acionamento. Neste capítulo veremos o princípio de funcionamento dos reed switches e apresentaremos algumas aplicações.

Como o próprio nome sugere, o reed switch é uma chave de lâmina sendo formado por duas ou mais lâminas de metal encapsuladas numa ampola de vidro.

Como não há possibilidade de termos um acesso direto às lâminas, para que possamos acionar o dispositivo fazemos uso de um campo magnético externo. Este campo magnético atua sobre as lâminas que se magnetizam por indução e com isso se flexionam para fechar o circuito encostando uma na outra ou então fazendo uma comutação num sistemas de três lâminas.

Para que obtenhamos uma operação deste dispositivo com característica que permitam sua utilização com o máximo de confiabilidade, todas as partes devem obedecer a certos requisitos. Partimos então das lâminas.

#### As lâminas

Evidentemente o material com que são fabricadas as lâminas devem ter propriedades ferromagnéticas, para que possam sofrer uma magnetização sob a ação de um campo externo. O material usado é o ferro-níquel, uma liga de alta permeabilidade para que não haja perda do fluxo magnético. A retenção magnética deve ser o menor possível para evitar que o magnetismo remanescente prejudique o funcionamento do dispositivo quando o campo externo desaparece. A presença desta retenção fariam com que os contatos "grudassem" permanecendo o dispositivo ligado mesmo depois de retirado o campo externo de acionamento.

O coeficiente de dilatação da lâminas deve ser equivalente ao do vidro do encapsulamento para evitar problemas durante o processo de soldagem. Uma dilatação desigual com o aquecimento poderia resultar em micro-trincas no vidro que causariam a fuga do gás interno do dispositivo que, conforme veremos é de grande importância tanto no desempenho do dispositivo como na determinação de sua vida útil.

A superfície das lâminas deve ser totalmente limpa, isenta de gases que possam causar problemas de funcionamento.

Finalmente, a dureza da liga de ferro-níquel deve ser rigorosamente controlada.

## O vidro

O vidro usado na construção dos reeds switches deve apresentar características especiais.

Uma delas é a alta resistividade, pois as lâminas fazem contato internamente a ampola e portanto este deve funcionar como um perfeito isolante.

Nas ampolas que possuem sistemas reversíveis, existe uma pequena pastilha de quartzo entre as lâminas NA e NF, para garantir a isolação neste ponto em que existe uma grande proximidade física entre eles. conforme a figura que segue.

É obvio que, pelas mesmas razões expostas, ao falarmos das lâminas o vidro deve ter um determinado coeficiente de dilatação. Para aumentar a capacidade de dissipação de calor do dispositivo, óxido de ferro é acrescentado ao vidro, o que lhe dá a coloração esverdeada o que caracteriza este tipo de componente.

## Contatos

Mínima resistência ôhmica, capacidade de resistir ao faiscamento, são algumas das exigências para estes elementos dos reed switches.

Estas características são resultantes de banhos eletrolíticos rigorosamente controlados. O material mais usado é a liga de Ródio/rutênio que tem um ponto de fusão de aproximadamente de 2000 oC e apresenta uma resistência de contato inicial que pode variar entre 50 e 200 miliohms dependendo do tipo de ampola.

As ampolas com contato NA de Ródio/rutênio, comutam, dependendo de seu tamanho potências de 10 a 15 watts.

Para comutação de potência mais elevadas, até 100 W com contatos NA, existem ampolas com contatos de tungstênio, que tem um ponto de fusão bem

mais alto, de 3387 oC, mas com resistências de contato mais elevadas, da ordem de 500

#### **Sensores sonares (ou ultrassônicos)**

**Esses sensores utilizam o princípio da emissão de ondas sonoras – em altíssima frequência – e a medição do tempo levado para recepção da onda sonora chocar-se contra o objeto e voltar, usando o princípio  $V=s/t$ . São capazes de detectar praticamente qualquer tipo de objeto – exceto aqueles que não refletem som.**

**Estão divididos em seis princípios de atuação: difuso (a onda sonora se choca com o objeto e comuta a saída. É aplicado para detectar a presença ou contagem de peças), reflexivo (emite a onda sonora para um anteparo, e quando um objeto entra na área de atuação, a saída é comutada. É aplicado para detectar a presença de objetos com superfícies irregulares), difuso com supressão de fundo (com operação semelhante ao difuso, sendo possível delimitar a distância detectando o objeto em determinado ponto), difuso com supressão de frente (também semelhante ao difuso, determinando a partir de qual distância mínima em que o objeto a ser detectado deve estar posicionado para redefinir a saída), difuso com supressão de frente e fundo (determina-se o intervalo de espaço no qual o objeto deve estar posicionado para que a saída se estabeleça), e saída analógica (podem medir distância e apresentar valores equivalentes de tensão e corrente).**

**Os sensores sonares podem ainda ser ligados a uma interface de comunicação e alguns parâmetros serem programados via computador. São encontrados, por exemplo, na medição de níveis de tanques.**

#### **Sensor de deslocamento**

Transdutores lineares de deslocamento são sensores projetados para medir deslocamentos, pelo princípio da fita plástica condutiva (filme espesso), para cursos de 10mm a 2.000mm. A máxima velocidade de deslocamento é de 10m/s, com vida útil de  $25 \times 10^6$  metros de deslocamento percorrido, ou  $100 \times 10^6$  operações, válido para aquele que ocorrer primeiro.

Um tipo de transdutor linear de deslocamento é o Doc 074, modelo PZ 34F da Gefran Brasil, com fixação através de flange. A FIG. 3 apresenta a fotografia deste transdutor linear de deslocamento. Algumas de suas especificações técnicas:

- Curso elétrico útil (mm): 25 a 250;
- Linearidade independente:  $\pm 0,2\%$  / 25mm  
 $\pm 0,1\%$  / 50mm a 100mm  
 $\pm 0,05\%$  / 125mm a 250mm
- Faixa de temperatura permissível:  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ ;
- Velocidade máxima de deslocamento: 10m/s;
- Força de acionamento:  $<0,5\text{N}$ ;
- Grau de proteção (DIN 40050): IP60;
- Ligações elétricas: cabo blindado  $3 \times 0,25$  / 1m;
- Dimensão do corpo: 83,5 a 308,5 mm.

## **Capítulo 06 – Variável Temperatura**

O objetivo de se medir e controlar as diversas variáveis físicas em processos industriais é obter produtos de alta qualidade, com melhores condições de rendimento e segurança, a custos compatíveis com as necessidades do mercado consumidor.

Nos diversos segmentos de mercado seja, eles químico, petroquímico, siderúrgico, cerâmico, farmacêutico, vidreiro, alimentício, papel e celulose, hidrelétrico, nuclear entre outros, a monitoração da variável temperatura é fundamental para a obtenção do produto final especificado.

Termometria significa "Medição de Temperatura". Eventualmente o termo Pirometria é também aplicado com o mesmo significado, porém, baseando-se na etimologia das palavras, podemos definir:

**PIROMETRIA** - Medição de altas temperaturas, na faixa onde os efeitos de radiação térmica passam a se manifestar.

**CRIOMETRIA** - Medição de baixas temperaturas, ou seja, aquelas próximas ao zero absoluto de temperatura.

**TERMOMETRIA** - Termo mais abrangente que incluiria tanto a Pirometria, como a Criometria que seriam casos particulares de medição.

- **TEMPERATURA E CALOR**

Todas as substâncias são constituídas de pequenas partículas, as moléculas que se encontram em contínuo movimento. Quanto mais rápido o movimento das moléculas mais quente se apresenta o corpo e quanto mais lento mais frio se apresenta o corpo.

Então define-se temperatura como o grau de agitação térmica das moléculas.

Na prática a temperatura é representada em uma escala numérica, onde, quanto maior o seu valor, maior é a energia cinética média dos átomos do corpo em questão.

Outros conceitos que se confundem às vezes com o de temperatura são:

. Energia Térmica.

. Calor.

A Energia Térmica de um corpo é a somatória das energias cinéticas, dos seus átomos, e além de depender da temperatura, depende também da massa e do tipo de substância.

Calor é energia em trânsito ou a forma de energia que é transferida através da fronteira de um sistema em virtude da diferença de temperatura.

Até o final do século XVI, quando foi desenvolvido o primeiro dispositivo para avaliar temperatura, os sentidos do nosso corpo foram os únicos elementos de que dispunham os homens para dizer se um certo corpo estava mais quente ou frio do que um outro, apesar da inadequação destes sentidos sob ponto de vista científico.

A literatura geralmente reconhece três meios distintos de transmissão de calor: condução, radiação e convecção.

- **Condução**

A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio sólido, líquido ou gasoso ou entre meios diferentes em contato físico direto.

- **Radiação**

A radiação é um processo pelo qual o calor flui de um corpo de alta temperatura para um de baixa, quando os mesmos estão separados no espaço, ainda que exista um vácuo entre eles.

- **Convecção**

A convecção é um processo de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento da mistura. A convecção é mais importante como mecanismo de transferência de energia ( calor ) entre uma superfície sólida e um líquido ou gás.

- **ESCALAS DE TEMPERATURA**

Desde o início da termometria, os cientistas, pesquisadores e fabricantes de termômetro, sentiam a dificuldade para atribuir valores de forma padronizada à temperatura por meio de escalas reproduzíveis, como existia na época, para Peso, Distância, Tempo.

As escalas que ficaram consagradas pelo uso foram Fahrenheit e a Celsius. A escala Fahrenheit é definida atualmente com o valor 32 no ponto de fusão do gelo e 212 no ponto de ebulição da água. O intervalo entre estes dois pontos é dividido em 180 partes iguais, e cada parte é um grau Fahrenheit.

A escala Celsius é definida atualmente com o valor zero no ponto de fusão do gelo e 100 no ponto de ebulição da água. O intervalo entre os dois pontos está dividido em 100 partes iguais, e cada parte é um grau Celsius. A denominação "grau centígrado" utilizada anteriormente no lugar de "Grau Celsius", não é mais recomendada, devendo ser evitado o seu uso.

Tanto a escala Celsius como a Fahrenheit, são relativas, ou seja, os seus valores numéricos de referência são totalmente arbitrários.

Se abaixarmos a temperatura continuamente de uma substância, atingimos um ponto limite além do qual é impossível ultrapassar, pela própria definição de temperatura. Este ponto, onde cessa praticamente todo movimento atômico, é o zero absoluto de temperatura.

Através da extrapolação das leituras do termômetro à gás, pois os gases se liqüefazem antes de atingir o zero absoluto, calculou-se a temperatura deste ponto na escala Celsius em  $-273,15^{\circ}\text{C}$ .

Existem escalas absolutas de temperatura, assim chamadas porque o zero delas é fixado no zero absoluto de temperatura.

Existem duas escalas absolutas atualmente em uso: a Escala Kelvin e a Rankine.

A Escala Kelvin possui a mesma divisão da Celsius, isto é, um grau Kelvin é igual à um grau Celsius, porém o seu zero se inicia no ponto de temperatura mais baixa possível,  $273,15$  graus abaixo do zero da Escala Celsius.

A Escala Rankine possui obviamente o mesmo zero da escala Kelvin, porém sua divisão é idêntica à da Escala Fahrenheit. A representação das escalas absolutas é análoga às escalas relativas: - Kelvin  $\Rightarrow$  400K (sem o símbolo de grau "  $^{\circ}$  "). Rankine  $\Rightarrow$  785R.

A Escala Fahrenheit é usada principalmente na Inglaterra e Estados Unidos da América, porém seu uso tem declinado a favor da Escala Celsius de aceitação universal.

A Escala Kelvin é utilizada nos meios científicos no mundo inteiro e deve substituir no futuro a escala Rankine quando estiver em desuso a Fahrenheit.

Existe uma outra escala relativa a Reamur, hoje já praticamente em desuso. Esta escala adota como zero o ponto de fusão do gelo e 80 o ponto de ebulição da água. O intervalo é dividido em oitenta partes iguais. (Representação -  $^{\circ}\text{Re}$ ).

- **Conversão de escalas**

A figura à seguir, compara as escalas de temperaturas existentes

Desta comparação podemos retirar algumas relações básicas entre as escalas:

$$\underline{^{\circ}\text{C}} = \underline{^{\circ}\text{F} - 32} = \underline{\text{K} - 273} = \underline{\text{R} - 491}$$

5 9 5 9

Outras relações podem ser obtidas combinando as apresentadas entre si. Exemplo:

O ponto de ebulição do oxigênio é  $-182,86^{\circ}\text{C}$ . Expressar esta temperatura em:

a)  $^{\circ}\text{C}$  p/  $\text{K}$  :

$$\text{K} = 273 + (-182,86) = 90,14 \text{ K}$$

b)  $^{\circ}\text{C}$  p/  $^{\circ}\text{F}$  :

$$\underline{-182,86} = \underline{^{\circ}\text{F} - 32} = -297,14 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

5 9

c)  $^{\circ}\text{C}$  p/  $\text{R}$  :

$$\underline{-182,86} = \underline{\text{R} - 491} = 161,85 \text{ R}$$

5 9

- **Escala Internacional de Temperatura**

Para melhor expressar as leis da termodinâmica, foi criada uma escala baseada em fenômenos de mudança de estado físico de substâncias puras, que ocorrem em condições únicas de temperatura e pressão. São chamados de pontos fixos de temperatura.

Chama-se esta escala de IPTS - Escala Prática Internacional de Temperatura. A primeira escala prática internacional de temperatura surgiu em 1927 modificada em 1948 (IPTS-48). Em 1960 mais modificações foram feitas e em 1968 uma nova Escala Prática Internacional de Temperatura foi publicada (IPTS-68).

A mudança de estado de substâncias puras (fusão, ebulição) é normalmente desenvolvida sem alteração na temperatura. Todo calor recebido ou cedido pela substância é utilizado pelo mecanismo de mudança de estado.

Os pontos fixos utilizados pela IPTS-68 são dados na tabela abaixo:

<b>ESTADO DE EQUILÍBRIO</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
Ponto triplo do hidrogênio	-259,34
Ponto de ebulição do hidrogênio	-252,87
Ponto de ebulição do neônio	-246,048
Ponto triplo do oxigênio	-218,789
Ponto de ebulição do oxigênio	-182,962
Ponto triplo da água	0,01
Ponto de ebulição da água	100,00
Ponto de solidificação do zinco	419,58
Ponto de solidificação da prata	916,93

Ponto de solidificação do ouro	1064,43
--------------------------------	---------

Observação:

Ponto triplo é o ponto em que as fases sólida, líquida e gasosa encontram-se em equilíbrio.

A ainda atual IPTS-68 cobre uma faixa de -259,34 a 1064,34 °C, baseada em pontos de fusão, ebulição e pontos triplos de certas substâncias puras como por exemplo o ponto de fusão de alguns metais puros.

Hoje já existe a ITS-90 Escala Internacional de Temperatura, definida em fenômenos determinísticos de temperatura e que definiu alguns pontos fixos de temperatura.

<b>PONTOS FIXOS</b>	<b>IPTS-68</b>	<b>ITS-90</b>
Ebulição do Oxigênio	-182,962 °C	-182,954 °C
Ponto triplo da água	+0,010 °C	+0,010 °C
Solidificação do estanho	+231,968 °C	+231,928 °C
Solidificação do zinco	+419,580 °C	+419,527 °C
Solidificação da prata	+961,930 °C	+961,780 °C
Solidificação do ouro	+1064,430 °C	+1064,180 °C

**Normas**

Com o desenvolvimento tecnológico diferente em diversos países, criou-se uma série de normas e padronizações, cada uma atendendo uma dada região. As mais importantes são:

ANSI - AMERICANA

DIN - ALEMÃ

JIS - JAPONESA

BS - INGLESA

UNI - ITALIANA

Para atender as diferentes especificações técnicas na área da termometria, cada vez mais se somam os esforços com o objetivo de unificar estas normas. Para tanto, a Comissão Internacional Eletrotécnica - IEC, vem desenvolvendo um trabalho junto aos países envolvidos neste processo normativo, não somente para obter normas mais completas e aperfeiçoadas mas também de prover meios para a internacionalização do mercado de instrumentação relativo a termopares.

Como um dos participantes desta comissão, o Brasil através da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, está também diretamente interessado no desdobramento deste assunto e vem adotando tais especificações como Normas Técnicas Brasileiras.

#### **MEDIDORES DE TEMPERATURA POR DILATAÇÃO/EXPANSÃO**

- **TERMÔMETRO A DILATAÇÃO DE LÍQUIDO**

##### **Características**

Os termômetros de dilatação de líquidos, baseiam-se na lei de expansão volumétrica de um líquido com a temperatura dentro de um recipiente fechado.

A equação que rege esta relação é:

$$V_t = V_o.[ 1 + \beta_1.(\Delta t) + \beta_2.(\Delta t)^2 + \beta_3.(\Delta t)^3 ]$$

onde:

$t$  = Temperatura do líquido em  $^{\circ}\text{C}$

$V_0$  = Volume do líquido à temperatura inicial de referência  $t_0$

$V_t$  = Volume do líquido à temperatura  $t$

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$  = Coeficiente de expansão do líquido  $^{\circ}\text{C}^{-1}$

$\Delta t = t - t_0$

Teoricamente esta relação não é linear, porém como os termos de segunda e terceira ordem são desprezíveis, na prática consideramos linear. E daí:

$$V_t = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t)$$

Os tipos podem variar conforme sua construção:

- Recipiente de vidro transparente
- Recipiente metálico

#### **Termômetros de dilatação de líquido em recipiente de vidro**

É constituído de um reservatório, cujo tamanho depende da sensibilidade desejada, soldada a um tubo capilar de seção , mais uniforme possível fechado na parte superior.

O reservatório e parte do capilar são preenchidos de um líquido. Na parte superior do capilar existe um alargamento que protege o termômetro no caso da temperatura ultrapassar seu limite máximo.

Após a calibração, a parede do tubo capilar é graduada em graus ou frações deste. A medição de temperatura se faz pela leitura da escala no ponto em que se tem o topo da coluna líquida.

Os líquidos mais usados são: Mercúrio, Tolueno, Álcool e Acetona

Nos termômetros industriais, o bulbo de vidro é protegido por um poço metálico e o tubo capilar por um invólucro metálico.

LÍQUIDO	PONTO DE SOLIDIFICAÇÃO(°C)	PONTO DE EBULIÇÃO(°C)	FAIXA DE USO(°C)
Mercúrio	-39	+357	-38 à 550
Álcool Etílico	-115	+78	-100 à 70
Tolueno	-92	+110	-80 à 100

No termômetro de mercúrio, pode-se elevar o limite máximo até 550°C injetando-se gás inerte sob pressão, evitando a vaporização do mercúrio.

Por ser frágil e impossível registrar sua indicação ou transmiti-la à distância, o uso deste termômetro é mais comum em laboratórios ou em indústrias, com a utilização de uma proteção metálica.

#### **Termômetro de dilatação de líquido em recipiente metálico.**

Neste termômetro, o líquido preenche todo o recipiente e sob o efeito de um aumento de temperatura se dilata, deformando um elemento extensível (sensor volumétrico).

Características dos elementos básicos deste termômetro:

*Bulbo*

Suas dimensões variam de acordo com o tipo de líquido e principalmente com a sensibilidade desejada.

A tabela abaixo, mostra os líquidos mais usados e sua faixa de utilização:

LÍQUIDO	FAIXA DE UTILIZAÇÃO (°C)
Mercúrio	-35 à +550
Xileno	-40 à +400
Tolueno	-80 à +100
Álcool	50 à +150

*Capilar*

Suas dimensões são variáveis, sendo que o diâmetro interno deve ser o menor possível, a fim de evitar a influencia da temperatura ambiente, porém não deve oferecer resistência a passagem do líquido em expansão.

*Elemento de Medição*

O elemento usado é o Tubo de Bourdon, podendo ser :

Os materiais mais usados são: bronze fosforoso, cobre - berílio , aço - inox e aço - carbono.

Pelo fato deste sistema utilizar líquido inserido num recipiente e da distância entre o elemento sensor e o bulbo ser considerável, as variações na temperatura ambiente afetam não somente o líquido no bulbo, mas em todo o sistema (bulbo, capilar e sensor) causando erro de indicação ou registro. Este efeito da temperatura ambiente é compensado de duas maneiras que são denominadas classe 1A e classe 1B.

Na classe 1B a compensação é feita somente no sensor, através de uma lamina bimetálica. Este sistema é normalmente preferido por ser mais simples, porém o comprimento máximo do capilar para este sistema de compensação é de aproximadamente 6 metros.

Quando esta distância for maior o instrumento deve possuir sistema de compensação classe 1A, onde a compensação é feita no sensor e no capilar, por meio de um segundo capilar ligado a um elemento de compensação idêntico ao de medição, sendo os dois ligados em oposição.

O segundo capilar tem comprimento idêntico ao capilar de medição, porém não está ligado a um bulbo.

A aplicação destes termômetros, se encontra na indústria em geral para indicação e registro, pois permite leituras remotas e por ser o mais preciso dos sistemas mecânicos de medição de temperatura, porém não é recomendável para controle por causa de seu tempo de resposta ser relativamente grande (mesmo usando fluido trocador de calor entre bulbo e poço de proteção para diminuir este atraso conforme figura abaixo). O poço de proteção, permite manutenção do termômetro com o processo em operação.

Recomenda-se não dobrar o capilar com curvatura acentuada para que não se forme restrições que prejudicariam o movimento do líquido em seu interior, causando problemas de medição.

- **TERMÔMETROS À PRESSÃO DE GÁS**

**Princípio de funcionamento**

Fisicamente idêntico ao termômetro de dilatação de líquido, consta de um bulbo, elemento de medição e capilar de ligação entre estes dois elementos.

O volume do conjunto é constante e preenchido com um gás a alta pressão. Com a variação da temperatura, o gás varia sua pressão conforme, aproximadamente a lei dos gases perfeitos, com o elemento de medição operando como medidor de pressão. A Lei de Gay-Lussac, expressa matematicamente este conceito:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n}{T_n}$$

Observa-se que as variações de pressão são linearmente dependentes da temperatura, sendo o volume constante.

**Características**

O gás mais utilizado é o N<sub>2</sub> e geralmente é pressurizado com uma pressão de 20 a 50 atm., na temperatura mínima a medir. Sua faixa de medição vai de -100 a 600 °C, sendo o limite inferior devido a própria temperatura crítica do gás e o superior proveniente do recipiente apresentar maior permeabilidade ao gás nesta temperatura, o que acarretaria sua perda inutilizando o termômetro.

Tipos de gás de enchimento:

<b>Gás</b>	<b>Temperatura Crítica</b>
Hélio ( He )	- 267,8 °C
Hidrogênio ( H2 )	- 239,9 °C
Nitrogênio ( N2 )	- 147,1 °C
Dióxido de Carbono ( CO2 )	- 31,1 °C

- **TERMÔMETRO À PRESSÃO DE VAPOR**

**Princípio de funcionamento**

Sua construção é bastante semelhante ao de dilatação de líquidos, baseando o seu funcionamento na Lei de Dalton:

"A pressão de vapor saturado depende somente de sua temperatura e não de seu volume"

Portanto para qualquer variação de temperatura haverá uma variação na tensão de vapor do gás liqüefeito colocado no bulbo do termômetro e, em conseqüência disto, uma variação na pressão dentro do capilar.

A relação existente entre tensão de vapor de um líquido e sua temperatura é do tipo logarítmica e pode ser simplificada para pequenos intervalos de temperatura em:

$$P_1 / P_2 = H_e \cdot (1/T_1 - 1/T_2) / 4,58$$

onde:

$P_1$  e  $P_2$  = Pressões absolutas relativas as temperaturas

$T_1$  e  $T_2$  = Temperaturas absolutas

$H_e$  = Representa o calor latente de evaporação do líquido em questão

A tabela a seguir, mostra os líquidos mais utilizados e seus pontos de fusão e ebulição:

Líquido	Ponto de Fusão ( °C )	Ponto de ebulição ( °C )
Cloreto de Metila	- 139	- 24

Butano	- 135	- 0,5
Éter Etílico	- 119	34
Tolueno	- 95	110
Dióxido de enxofre	- 73	- 10
Propano	- 190	- 42

- **TERMÔMETROS À DILATAÇÃO DE SÓLIDOS (TERMÔMETROS BIMETÁLICOS)**

**Princípio de funcionamento**

Baseia-se no fenômeno da dilatação linear dos metais com a temperatura. Sendo:

$$L_t = L_o. ( 1 + \alpha.\Delta t)$$

onde:

t= temperatura do metal em °C

L<sub>o</sub> = comprimento do metal à temperatura inicial de referência t<sub>o</sub>

L<sub>t</sub> = comprimento do metal á temperatura final t

α = coeficiente de dilatação linear

$$\Delta t = t - t_o$$

**Características de construção**

O termômetro bimetalico consiste em duas laminas de metais com coeficientes de dilatação diferentes sobrepostas, formando uma só peça. Variando-se a temperatura do conjunto, observa-se um encurvamento que é proporcional a temperatura.

Na prática a lamina bimetalica é enrolada em forma de espiral ou hélice, o que aumenta bastante a sensibilidade.

O termômetro mais usado é o de lamina helicoidal, e consiste em um tubo bom condutor de calor, no interior do qual é fixado um eixo que por sua vez recebe um ponteiro que se desloca sobre uma escala.

Normalmente usa - se o invar (aço com 64% Fe e 36% Ni) com baixo coeficiente de dilatação e o latão como metal de alto coeficiente de dilatação.

A faixa de trabalho dos termômetros bimetálicos vai aproximadamente de -50 a 800 °C, sendo sua escala bastante linear. Possui exatidão na ordem de +/- 1%.

#### ***Medição de temperatura com Termopar***

Um termopar consiste de dois condutores metálicos, de natureza distinta, na forma de metais puros ou de ligas homogêneas. Os fios são soldados em um extremo ao qual se dá o nome de junta quente ou junta de medição. A outra extremidade dos fios é levada ao instrumento de medição de f.e.m. ( força eletromotriz ), fechando um circuito elétrico por onde flui a corrente.

O ponto onde os fios que formam o termopar se conectam ao instrumento de medição é chamado de junta fria ou de referência.

O aquecimento da junção de dois metais gera o aparecimento de uma f.e.m.. Este princípio conhecido por efeito Seebeck propiciou a utilização de termopares para a medição de temperatura. Nas aplicações práticas o termopar apresenta-se normalmente conforme a figura acima .

O sinal de f.e.m. gerado pelo gradiente de temperatura (  $\Delta T$  ) existente entre as juntas quente e fria, será de um modo geral indicado, registrado ou transmitido.

- **Efeitos Termoelétricos**

Quando dois metais ou semicondutores dissimilares são conectados e as junções mantidas a diferentes temperaturas, quatro fenômenos ocorrem simultaneamente: o efeito Seebeck, o efeito Peltier, o efeito Thomson e o efeito Volta.

A aplicação científica e tecnológica dos efeitos termoelétricos é muito importante e sua utilização no futuro é cada vez mais promissora. Os estudos das propriedades termoelétricas dos semicondutores e dos metais levam, na prática, à aplicação dos processo de medições na geração de energia elétrica ( bateria solar ) e na produção de calor e frio. O controle de temperatura feito por pares termoelétricos é uma das importantes aplicações do efeito Seebeck.

Atualmente, busca-se o aproveitamento industrial do efeito Peltier, em grande escala, para obtenção de calor ou frio no processo de climatização ambiente.

#### **Efeito termoelétrico de Seebeck**

O fenômeno da termoeletricidade foi descoberto em 1821 por T.J. Seebeck quando ele notou que em um circuito fechado, formado por dois condutores diferentes A e B, ocorre uma circulação de corrente enquanto existir um diferença de temperatura  $\Delta T$  entre as suas junções. Denominamos a junta de medição de  $T_m$ , e a outra, junta de referência de  $T_r$ . A existência de uma f.e.m. térmica AB no circuito é conhecida como efeito Seebeck. Quando a temperatura da junta de referência é mantida constante, verifica-se que a f.e.m. térmica é uma função da temperatura  $T_m$  da junção de teste. Este fato permite utilizar um par termoelétrico como um termômetro.

O efeito Seebeck se produz pelo fato de que os elétrons livres de um metal difere de um condutor para outro e depende da temperatura. Quando dois condutores diferentes são conectados para formar duas junções e estas são mantidas a diferentes temperaturas, a difusão dos elétrons nas junções se produz a ritmos diferentes.

#### **Efeito termoelétrico de Peltier**

Em 1834, Peltier descobriu que, dado um par termoelétrico com ambas as junções à mesma temperatura, se, mediante uma bateria exterior, produz-se uma corrente no termopar, as temperaturas da junções variam em uma quantidade não inteiramente devida ao efeito Joule. Esta variação adicional de temperatura é o efeito Peltier. O efeito Peltier produz-se tanto pela corrente proporcionada por uma bateria exterior como pelo próprio par termoelétrico.

O coeficiente Peltier depende da temperatura e dos metais que formam uma junção, sendo independente da temperatura da outra junção. O calor Peltier é reversível. Quando se inverte o sentido da corrente, permanecendo constante o seu valor, o calor Peltier é o mesmo, porém em sentido oposto.

#### **Efeito termoelétrico de Thomson**

Em 1854, Thomson conclui, através das leis da termodinâmica, que a condução de calor, ao longo dos fios metálicos de um par termoelétrico, que não transporta corrente, origina uma distribuição uniforme de temperatura em cada fio.

Quando existe corrente, modifica-se em cada fio a distribuição de temperatura em uma quantidade não inteiramente devida ao efeito Joule. Essa variação adicional na distribuição da temperatura denomina-se efeito Thomson.

O efeito Thomson depende do metal de que é feito o fio e da temperatura média da pequena região considerada. Em certos metais há absorção de calor, quando uma corrente elétrica flui da parte fria para a parte quente do metal e que há geração de calor quando se inverte o sentido da corrente. Em outros metais ocorre o oposto deste efeito, isto é, há liberação de calor quando uma corrente elétrica flui da parte quente para a parte fria do metal. Conclui-se que, com a circulação de corrente ao longo de um fio condutor, a distribuição de temperatura neste condutor se modificará, tanto pelo calor dissipado por efeito Joule, como pelo efeito Thomson.

#### **Efeito termoelétrico de Volta**

A experiência de Peltier pode ser explicada através do efeito Volta enunciado a seguir:

" Quando dois metais estão em contato a um equilíbrio térmico e elétrico, existe entre eles uma diferença de potencial que pode ser da ordem de Volts ".

Esta diferença de potencial depende da temperatura e não pode ser medida diretamente.

- **Leis Termoelétricas**

Da descoberta dos efeitos termoelétricos partiu-se através da aplicação dos princípios da termodinâmica, a enunciação das três leis que constituem a base da teoria termoelétrica nas medições de temperatura com termopares, portanto, fundamentados nestes efeitos e nestas leis, podemos compreender

todos os fenômenos que ocorrem na medida de temperatura com estes sensores.

**Lei do circuito homogêneo**

" A f.e.m. termal, desenvolvida em um circuito termoelétrico de dois metais diferentes, com suas junções as temperaturas T1 e T2, é independente do gradiente de temperatura e de sua distribuição ao longo dos fios". Em outras palavras, a f.e.m. medida depende única e exclusivamente da composição química dos dois metais e das temperaturas existentes nas junções.

Um exemplo de aplicação prática desta lei é que podemos ter uma grande variação de temperatura em um ponto qualquer, ao longo dos fios dos termopares, que esta não influirá na f.e.m. produzida pela diferença de temperatura entre as juntas, portanto, pode-se fazer medidas de temperaturas em pontos bem definidos com os termopares, pois o importante é a diferença de temperatura entre as juntas.

**Lei dos metais intermediários**

" A soma algébrica das f.e.m. termais em um circuito composto de um número qualquer de metais diferentes é zero, se todo o circuito estiver a mesma temperatura". Deduz-se daí que um circuito termoelétrico, composto de dois metais diferentes, a f.e.m. produzida não será alterada ao inserirmos, em qualquer ponto do circuito, um metal genérico, desde que as novas junções sejam mantidas a temperaturas iguais.

Onde se conclui que:

$$T_3 = T_4 \rightarrow E_1 = E_2$$

$$T_3 = T_4 \rightarrow E_1 = E_2$$

Um exemplo de aplicação prática desta lei é a utilização de contatos de latão ou cobre, para interligação do termopar ao cabo de extensão no cabeçote.

### Lei das temperaturas intermediárias

" A f.e.m. produzida em um circuito termoelétrico de dois metais homogêneos e diferentes entre si, com as suas junções as temperaturas T1 e T3 respectivamente, é a soma algébrica da f.e.m. deste circuito, com as junções as temperaturas T1 e T2 e a f.e.m. deste mesmo circuito com as junções as temperaturas T2 e T3.

Um exemplo prático da aplicação desta lei, é a compensação ou correção da temperatura ambiente pelo instrumento receptor de milivoltagem.

- **Correlação da F.E.M. em Função da Temperatura**

Visto que a f.e.m. gerada em um termopar depende da composição química dos condutores e da diferença de temperatura entre as juntas, isto é, a cada grau de variação de temperatura, podemos observar uma variação da f.e.m. gerada pelo termopar, podemos, portanto, construir uma tabela de correlação entre temperatura e a f.e.m., por uma questão prática padronizou-se o levantamento destas curvas com a junta de referência à temperatura de 0°C.

Essas tabelas foram padronizadas por diversas normas internacionais e levantadas de acordo com a Escala Prática Internacional de Temperatura de 1968 ( IPTS-68 ), recentemente atualizada pela ITS-90, para os termopares mais utilizados.

A partir dessas tabelas podemos construir um gráfico conforme a figura a seguir ,onde está relacionado a milivoltagem gerada em função da temperatura, para os termopares segundo a norma ANSI, com a junta de referência a 0°C.

- **Tipos e Características dos Termopares**

Existem várias combinações de 2 metais condutores operando como termopares. As combinações de fios devem possuir uma relação razoavelmente linear entre temperatura e f.e.m.; devem desenvolver uma f.e.m. por grau de mudança de temperatura, que seja detectável pelos equipamentos normais de medição.

Foram desenvolvidas diversas combinações de pares de Ligas Metálicas, desde os mais corriqueiros de uso industrial, até os mais sofisticados para uso especial ou restrito a laboratório.

Essas combinações foram feitas de modo a se obter uma alta potência termoelétrica, aliando-se ainda as melhores características como homogeneidade dos fios e resistência a corrosão, na faixa de utilização, assim cada tipo de termopar tem uma faixa de temperatura ideal de trabalho, que deve ser respeitada, para que se tenha a maior vida útil do mesmo. Podemos dividir os termopares em três grupos, a saber:

- Termopares Básicos
- Termopares Nobres
- Termopares Especiais

**Termopares básicos**

São assim chamados os termopares de maior uso industrial, em que os fios são de custo relativamente baixo e sua aplicação admite um limite de erro maior .

TIPO T

Nomenclaturas: T - Adotado pela Norma ANSI

CC - Adotado pela Norma JIS

Cu - Co

Cobre - Constantan

Liga: ( + ) Cobre - ( 99,9 % )

( - ) Constantan - São as ligas de Cu-Ni compreendidos no intervalo entre Cu ( 50 % ) e Cu ( 65 % ) Ni ( 35 % ). A composição mais utilizada para este tipo de termopar é de Cu ( 58 % ) e Ni ( 42 % ).

Características:

Faixa de utilização: - 200 °C a 370 °C

F.e.m. produzida: - 5,603 mV a 19,027 mV

Aplicações: Criometria ( baixas temperaturas ), Indústrias de refrigeração, Pesquisas agrônômicas e ambientais, Química e Petroquímica.

#### TIPO J

Nomenclaturas: J - Adotada pela Norma ANSI

IC - Adotada pela Norma JIS

Fe-Co

Ferro - Constantan

Liga: ( + ) Ferro - ( 99,5 % )

( - ) Constantan - Cu ( 58 % ) e Ni ( 42 % ), normalmente se produz o ferro a partir de sua característica casa-se o constantan adequado.

Características:

Faixa de utilização: -40 °C a 760 °C

f.e.m. produzida: - 1,960 mV a 42,922 mV

Aplicações: Centrais de energia, Metalúrgica, Química, Petroquímica, indústrias em geral.

#### TIPO E

Nomenclatura: E - Adotada pela Norma ANSI

CE - Adotada pela Norma JIS

NiCr-Co

Liga: ( + ) Chromel - Ni ( 90 % ) e Cr ( 10 % )

( - ) Constantan - Cu ( 58 % ) e Ni ( 42 % )

Características:

Faixa de utilização: -200 °C a 870 °C

f.e.m. produzida: - 8,824 mV a 66,473 mV

Aplicações: Química e Petroquímica

**TIPO K**

Nomenclaturas: K - Adotada pela Norma ANSI

CA - Adotada pela Norma JIS

Liga: ( + ) Chromel - Ni ( 90 % ) e Cr ( 10 % )

( - ) Alumel - Ni( 95,4 % ), Mn( 1,8 % ), Si( 1,6 % ), Al( 1,2 % )

Características:

Faixa de utilização: - 200 °C a 1260 °C

f.e.m. produzida: - 5,891 mV a 50,99 mV

Aplicações: Metalúrgicas, Siderúrgicas, Fundição, Usina de Cimento e Cal, Vidros, Cerâmica, Indústrias em geral.

**Termopares nobres**

São aqueles que os pares são constituídos de platina. Embora possuam custo elevado e exijam instrumentos receptores de alta sensibilidade, devido à baixa potência termoeletrica, apresentam uma altíssima precisão, dada a homogeneidade e pureza dos fios dos termopares.

**TIPO S**

Nomenclaturas: S - Adotada pela Norma ANSI

Pt Rh 10 % - Pt

Liga: ( + ) Platina 90% Rhodio 10 %

( - ) Platina 100 %

Características:

Faixa de utilização: 0 °C a 1600 °C

f.e.m. produzida: 0 mV a 16,771 mV

Aplicações: Siderúrgica, Fundição, Metalúrgica, Usina de Cimento, Cerâmica, Vidro e Pesquisa Científica.

**Observação:** É utilizado em sensores descartáveis na faixa de 1200 a 1768 °C, para medição de metais líquidos em Siderúrgicas e Fundições

TIPO R

Nomenclaturas: R - Adotada pela Norma ANSI

PtRh 13 % - Pt

Liga: ( + ) Platina 87 % Rhodio 13 %

( - ) Platina 100 %

Características:

Faixa de utilização: 0 °C a 1600 °C

f.e.m. produzida: 0 mV a 18,842 mV

Aplicações: As mesmas do tipo S  
**TIPO B**

Nomenclaturas: B - Adotada pela Norma ANSI

PtRh 30 % - PtRh 6 %

Liga: ( + ) Platina 70 % Rhodio 30 %

( - ) Platina 94 % Rhodio 6 %

Características:

Faixa de utilização: 600 a 1700 °C

f.e.m. produzida: 1,791 mV a 12,426 mV

Aplicações: Vidro, Siderúrgica, alta temperatura em geral.

#### Termopares especiais

Ao longo do anos, os tipos de termopares produzidos oferecem, cada qual, uma característica especial porém, apresentam restrições de aplicação, que devem ser consideradas.

Novos tipos de termopares foram desenvolvidos para atender as condições de processo onde os termopares básicos não podem ser utilizados.

#### **Tungstênio – Rhênio**

Esses termopares podem ser usados continuamente até 2300 °C e por curto período até 2750 °C.

Irídio 40 % - Rhodio / Irídio

Esses termopares podem ser utilizados por períodos limitados até 2000 °C.

Platina - 4 0% Rhodio / Platina - 2 0 % Rhodio

Esses termopares são utilizados em substituição ao tipo B onde temperaturas um pouco mais elevadas são requeridas. Podem ser usado continuamente até 1600 °C e por curto período até 1800 °C ou 1850 °C.

Ouro- Ferro / Chromel

Esses termopares são desenvolvidos para trabalhar em temperaturas criogênicas.

Nicrosil / Nisil

Basicamente, este novo par termoeletrico é um substituto para o par tipo K, apresentando uma força eletromotriz um pouco menor em relação ao tipo K.

- **Correção da Junta de Referência**

As tabelas existentes da f.e.m. gerada em função da temperatura para os termopares, têm fixado a junta de referência a 0 °C ( ponto de solidificação da água ), porém nas aplicações práticas dos termopares junta de referência é considerada nos terminais do instrumento receptor e esta se encontra a temperatura ambiente que é normalmente diferente de 0 °C e variável com o tempo, tornando assim necessário que se faça uma correção da junta de referência, podendo esta ser automática ou manual

Os instrumentos utilizados para medição de temperatura com termopares costumam fazer a correção da junta de referência automaticamente, sendo um dos métodos utilizados, a medição da temperatura nos terminais do instrumento, através de circuito eletrônico, sendo que este circuito adiciona a milivoltagem que chega aos terminais, uma milivoltagem correspondente a diferença de temperatura de 0 °C à temperatura ambiente.

Existem também alguns instrumentos em que a compensação da temperatura é fixa em 20 °C ou 25 °C. Neste caso, se a temperatura ambiente

for diferente do valor fixo, o instrumento indicará a temperatura com um erro que será tanto maior quanto maior for a diferença de temperatura ambiente e do valor fixo.

É importante não esquecer que o termopar mede realmente a diferença entre as temperaturas das junções. Então para medirmos a temperatura do ponto desejado precisamos manter a temperatura da junção de referência invariável.

$$FEM = JM - JR$$

$$FEM = 2,25 - 1,22$$

$$FEM = 1,03 \text{ mV} \rightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Esta temperatura obtida pelo cálculo está errada pois o valor da temperatura correta que o meu termômetro tem que medir é de 50 °C.

$$FEM = JM - JR$$

$$FEM = 2,25 - 1,22$$

FEM = 1,03 mV + a mV correspondente a temperatura ambiente para fazer a compensação automática, portanto:

$$FEM = mV JM - mV JR + mV CA \text{ (Compensação automática)}$$

$$FEM = 2,25 - 1,22 + 1,22$$

$$FEM = 2,25 \text{ mV} \rightarrow 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

A leitura agora está correta, pois 2,25 mV corresponde a 50 °C que é a temperatura do processo.

Hoje em dia a maioria dos instrumentos fazem a compensação da junta de referência automaticamente. A compensação da junta de referência pode ser feita manualmente. Pega-se o valor da mV na tabela correspondente a temperatura ambiente e acrescenta-se ao valor de mV lido por um milivoltímetro.

- **Fios de Compensação e Extensão**

Na maioria das aplicações industriais de medição de temperatura, através de termopares, o elemento sensor não se encontra junto ao instrumento receptor.

Nestas condições torna-se necessário que o instrumento seja ligado ao termopar, através de fios que possuam uma curva de força eletromotriz em função da temperatura similar aquela do termopar, afim de que no instrumento possa ser efetuada a correção na junta de referência.

Definições:

1- Convenciona-se chamar de fios aqueles condutores constituídos por um eixo sólido e de cabos aqueles formados por um feixe de condutores de bitola menor, formando um condutor flexível.

2- Chama-se de fios ou cabos de extensão aqueles fabricados com as mesmas ligas dos termopares a que se destinam. Exemplo: Tipo TX, JX, EX e KX.

3- Chama-se de fios ou cabos de compensação aqueles fabricados com ligas diferentes das dos termopares a que se destinam, porém que forneçam, na faixa de utilização recomendada, uma curva da força eletromotriz em função da temperatura equivalente à desses termopares. Exemplo : Tipo SX e BX.

Os fios e cabos de extensão e compensação são recomendados na maioria dos casos para utilização desde a temperatura ambiente até um limite máximo de 200 °C.

- **Erros De Ligação**

### Usando fios de cobre

Geralmente na aplicação industrial, é necessário que o termopar e o instrumento encontrem-se relativamente afastados, por não convir que o aparelho esteja demasiadamente próximo ao local onde se mede a temperatura. Nestas circunstâncias deve-se, processar a ligação entre os terminais do cabeçote e o aparelho, através de fios de extensão ou compensação.

Tal, procedimento é executado sem problemas desde que, o cabeçote onde estão os terminais do termopar e o registrador, estejam a mesma temperatura de medição.

Vejamos o que acontece quando esta norma não é obedecida.

Uma solução simples é que normalmente é usada na prática, será a inserção de fios de compensação entre o cabeçote e o registrador. Estes fios de compensação em síntese, nada mais são que outros termopares cuja função é compensar a queda da FEM que aconteceu no caso estudado, ocasionada pela diferença de temperatura entre o cabeçote e o registrador.

Vejamos o que acontece se, no exemplo anterior, ao invés de cobre usamos um fio compensado. A figura mostra de que maneira se processa a instalação.

Como no caso acima, a FEM efetiva no cabeçote é de 20,74 mV. Dela, até o registrador, são utilizados fios de extensão compensados, os quais adicionam à FEM uma parcela igual a 0,57 mV, fazendo assim com que chegue ao registrador uma FEM efetiva de 22,26 mV. Este valor corresponderá a temperatura real dentro do forno ( 538 °C ). A vantagem desta técnica provém do fato de que os fios de compensação, além de terem custo menor que os fios do termopar propriamente dito, também são mais resistentes.

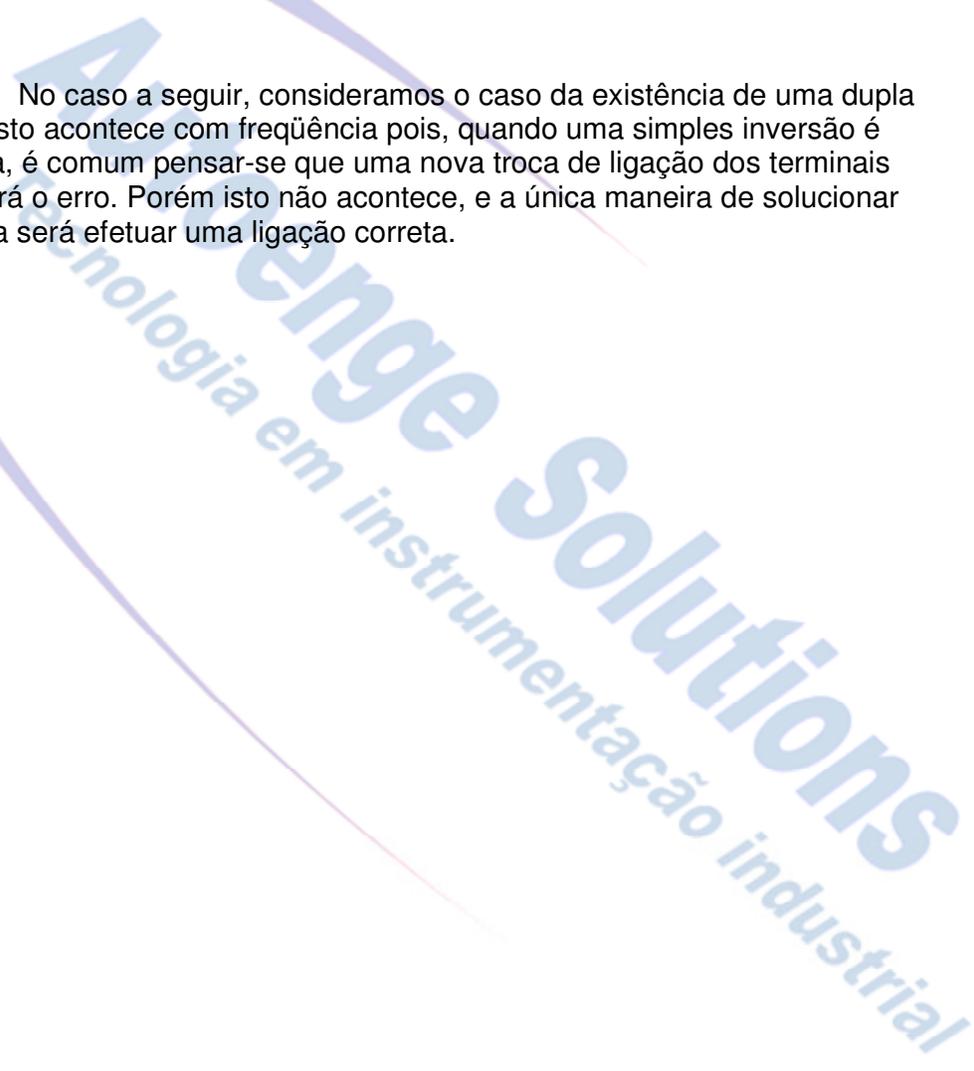
#### Inversão simples

Conforme o esquema a seguir, os fios de compensação foram invertidos.

Assume-se que o forno esteja a 538 °C, o cabeçote a 38 °C e o registrador a 24 °C. Devido a diferença de temperatura entre o cabeçote e o registrador, será gerada uma FEM de 0,57 mV. Porém em virtude da simples inversão, o fio positivo está ligado no borne negativo do registrador e vice-versa. Isto fará com que a FEM produzida ao longo do circuito se oponha àquela do circuito de compensação automática do registrador. Isto fará com que o registrador indique uma temperatura negativa.

#### Inversão dupla

No caso a seguir, consideramos o caso da existência de uma dupla inversão, isto acontece com frequência pois, quando uma simples inversão é constatada, é comum pensar-se que uma nova troca de ligação dos terminais compensará o erro. Porém isto não acontece, e a única maneira de solucionar o problema será efetuar uma ligação correta.



- **Termopar De Isolação Mineral**

O termopar de isolação mineral é constituído de um ou dois pares termoeletricos, envolvidos por um pó isolante de óxido de magnésio, altamente compactado em uma bainha externa metálica. Devido a esta construção, os condutores do par termoeletrico ficam totalmente protegidos contra a atmosfera exterior, conseqüentemente a durabilidade do termopar depende da resistência a corrosão da sua bainha e não da resistência a corrosão dos condutores. Em função desta característica, a escolha do material da bainha é fator importante na especificação destes.

**Vantagens dos termopares de isolação mineral**

**A. Estabilidade Na Força Eletromotriz**

A estabilidade da FEM do termopar é caracterizada em função dos condutores estarem completamente protegidos contra a ação de gases e outras condições ambientais, que normalmente causam oxidação e conseqüentemente perda da FEM gerada.

**B. Resistência Mecânica**

O pó muito bem compactado, contido dentro da bainha metálica, mantém os condutores uniformemente posicionados, permitindo que o cabo seja dobrado achatado, torcido ou estirado, suporte pressões externas e choque térmico, sem qualquer perda das propriedades termoeletricas.

**C. Dimensão Reduzida**

O processo de fabricação permite a produção de termopares de isolação mineral, com bainhas de diâmetro externo até 1,0 mm, permitindo a medida de temperatura em locais que não eram anteriormente possíveis com termopares convencionais.

#### **D. Imperpeabilidade A Água , Óleo E Gás**

A bainha metálica assegura a impermeabilidade do termopar a água, óleo e gás.

#### **E. Facilidade De Instalação**

A maleabilidade do cabo, a sua pequena dimensão, longo comprimento grande resistência mecânica, asseguram facilidade de instalação, mesmo nas situações mais difíceis.

#### **F. Adaptabilidade**

A construção do termopar de isolamento mineral permite que o mesmo seja tratado como se fosse um condutor sólido. Em sua capa metálica podem ser montados acessórios, por soldagem ou brasagem e quando necessário, sua seção pode ser reduzida ou alterada em sua configuração.

#### **G. Resposta Mais Rápida**

A pequena massa e a alta condutividade térmica do pó de óxido de magnésio, proporcionam ao termopar de isolamento mineral um tempo de resposta que é virtualmente igual ao de um termopar descoberto de dimensão equivalente.

#### **H. Resistência A Corrosão**

As bainhas podem ser seleccionadas adequadamente para resistir ao ambiente corrosivo.

#### **I. Resistência De Isolação Elevada**

O termopar de isolamento mineral tem uma resistência de isolamento elevada, numa vasta gama de temperaturas, a qual pode ser mantida sob condições mais úmidas.

#### **J. Blindagem Eletrostática**

A bainha do termopar de isolamento mineral, devidamente aterrada, oferece uma perfeita blindagem eletrostática ao par termoelétrico.

- **Associação De Termopares**

**Associação série**

Podemos ligar os termopares em série simples para obter a soma das mV individuais. É a chamada termopilha. Este tipo de ligação é muito utilizada em pirômetros de radiação total, ou seja, para soma de pequenas mV.

O instrumento de medição pode ou não compensar a mV da junta de referência. Se compensar deverá compensar uma mV correspondente ao n°. de termopares aplicados na associação.

Exemplo.: 3 termopares → mVJR = 1 mV → compensa 3 mV

**Associação série – oposta**

Para medir a diferença de temperatura entre 2 pontos ligamos os termopares em série oposta.

O que mede maior temperatura vai ligado ao positivo do instrumento.

Os termopares sempre são do mesmo tipo. Exemplo:

Os termopares estão medindo 56 °C e 50 °C respectivamente, e a diferença será medida pelo milivoltímetro.

$$FEM T = FEM2 - FEM1 \quad 56 \text{ °C} = 2,27 \text{ mV}$$

$$FEM T = 2,27 - 2,022 \quad 50 \text{ °C} = 2,022 \text{ mV}$$

$$\text{FEM T} = 0,248 \text{ mV} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Não é necessário compensar a temperatura ambiente desde que as juntas de referência estejam a mesma temperatura.

### Associação em paralelo

Ligando 2 ou mais termopares em paralelo a um mesmo instrumento, teremos a média das mV geradas nos diversos termopares se as resistências internas foram iguais.

### ***Medição de Temperatura por termoresistência***

Os métodos de utilização de resistências para medição de temperatura iniciaram-se ao redor de 1835, com Faraday, porém só houve condições de se elaborar as mesmas para utilização em processos industriais a partir de 1925.

Esses sensores adquiriram espaço nos processos industriais por suas condições de alta estabilidade mecânica e térmica, resistência à contaminação, baixo índice de desvio pelo envelhecimento e tempo de uso.

Devido a estas características, esse sensor é padrão internacional para a medição de temperatura na faixa de  $-270 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ . em seu modelo de laboratório.

- **Princípio De Funcionamento**

Os bulbos de resistência são sensores que se baseiam no princípio de variação da resistência em função da temperatura. Os materiais mais utilizados

para a fabricação destes tipos de sensores são a platina, cobre ou níquel, que são metais que apresentam características de:

- a) Alta resistividade, permitindo assim um melhor sensibilidade do sensor.
- b) Ter alto coeficiente de variação de resistência com a temperatura.
- c) Ter rigidez e ductilidade para ser transformado em fios finos.

A equação que rege o fenômeno é a seguinte:

Para faixa de -200 a 0 °C:

$$R_t = R_0 \cdot [ 1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 \cdot (T - 100) ]$$

Para faixa de 0 a 850 °C:

$$R_t = R_0 \cdot [ 1 + A \cdot T + B \cdot T^2 ]$$

onde:

$R_t$  = resistência na temperatura T ( $\Omega$ )

$R_0$  = resistência a 0 °C ( $\Omega$ )

T = temperatura (°C)

A , B , C = coeficientes inerentes do material empregado

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5,802 \cdot 10^{-7}$$

$$C = -4,2735 \cdot 10^{-12}$$

O número que expressa a variação de resistência em função da temperatura é chamado de alfa ( $\alpha$ ) e se relaciona da seguinte forma:

Um valor típico de alfa para  $R_{100} = 138,50 \Omega$  é de  $3,850 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  segundo a DIN-IEC 751/85.

- **Construção Física Do Sensor**

O bulbo de resistência se compõe de um filamento, ou resistência de Pt, Cu ou Ni, com diversos revestimentos, de acordo com cada tipo e utilização.

As termorresistências de Ni e Cu têm sua isolação normalmente em esmalte, seda, algodão ou fibra de vidro. Não existe necessidade de proteções mais resistentes a temperatura, pois acima de  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  o níquel perde suas propriedades características de funcionamento como termorresistência e o cobre sofre problemas de oxidação em temperaturas acima de  $310 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Os sensores de platina, devido a suas características, permitem um funcionamento até temperaturas mais elevadas, têm seu encapsulamento normalmente em cerâmica ou vidro. A este sensor são dispensados maiores cuidados de fabricação pois, apesar da Pt não restringir o limite de temperatura de utilização, quando a mesma é utilizada em temperaturas elevadas, existe o risco de contaminação dos fios.

Para utilização como termômetro padrão, os sensores de platina são completamente desapoitados do corpo de proteção. A separação é feita por isoladores, espaçadores de mica, conforme desenho abaixo. Esta montagem não tem problemas relativos a dilatação, porém é extremamente frágil.

Os medidores parcialmente apoiados têm seus fios introduzidos numa peça de alumina de alta pureza com fixador vítreo. É um meio termo entre resistência a vibração e dilatação térmica.

A versão completamente apoiada pode suportar vibrações muito mais fortes, porém sua faixa de utilização fica limitada a temperaturas mais baixas, devido a dilatação dos componentes.

- **Características Da Termoresistência De Platina**

As termoresistências Pt - 100 são as mais utilizadas industrialmente, devido a sua grande estabilidade, larga faixa de utilização e alta precisão. Devido a alta estabilidade das termoresistências de platina, as mesmas são utilizadas como padrão de temperatura na faixa de -270 °C a 660 °C. A estabilidade é um fator de grande importância na indústria, pois é a capacidade do sensor manter e reproduzir suas características ( resistência - temperatura ) dentro da faixa especificada de operação.

Outro fator importante num sensor Pt 100 é a repetibilidade, que é a característica de confiabilidade da termoresistência. Repetibilidade deve ser medida com leitura de temperaturas consecutivas, verificando-se a variação encontrada quando de medição novamente na mesma temperatura.

O tempo de resposta é importante em aplicações onde a temperatura do meio em que se realiza a medição está sujeito a mudanças bruscas.

Considera-se constante de tempo como tempo necessário para o sensor reagir a uma mudança de temperatura e atingir 63,2 % da variação da temperatura.

Na montagem tipo isolamento mineral, tem-se o sensor montado em um tubo metálico com uma extremidade fechada e preenchido todos os espaços com óxido de magnésio, permitindo uma boa troca térmica e protegendo o sensor de choques mecânicos. A ligação do bulbo é feita com fios de cobre, prata ou níquel isolados entre si, sendo a extremidade aberta ,selada com resina epoxi, vedando o sensor do ambiente em que vai atuar.

Este tipo de montagem permite a redução do diâmetro e apresenta rápida velocidade de resposta.

#### **Vantagens:**

- a) Possuem maior precisão dentro da faixa de utilização do que outros tipo de sensores.
- b) Com ligação adequada não existe limitação para distância de operação.

- c) Dispensa utilização de fiação especial para ligação.
- d) Se adequadamente protegido, permite utilização em qualquer ambiente.
- e) Têm boas características de reprodutibilidade.
- f) Em alguns casos substitui o termopar com grande vantagem.

**Desvantagens:**

- a) São mais caras do que os sensores utilizados nessa mesma faixa.
- b) Deterioram-se com mais facilidade, caso haja excesso na sua temperatura máxima de utilização.
- c) Temperatura máxima de utilização 630 °C.
- d) É necessário que todo o corpo do bulbo esteja com a temperatura equilibrada para indicar corretamente.
- e) Alto tempo de resposta.

- **Princípio De Medição**

As termorresistências são normalmente ligadas a um circuito de medição tipo Ponte de Wheatstone, sendo que o circuito encontra-se balanceado quando é respeitada a relação  $R4.R2 = R3.R1$  e desta forma não circula corrente pelo detetor de nulo, pois se esta relação é verdadeira, os potenciais nos pontos A e B são idênticos. Para utilização deste circuito como instrumento de medida de Termorresistência, teremos as seguintes configurações:

- **Ligação à 2 fios**

Como se vê na figura, dois condutores de resistência relativamente baixa RL1 e RL2 são usados para ligar o sensor Pt-100 (R4) à ponte do instrumento de medição.

Nesta disposição, a resistência R4 compreende a resistência da Pt-100 mais a resistência dos condutores RL1 e RL2. Isto significa que os fios RL1

e RL2 a menos que sejam de muito baixa resistência, podem aumentar apreciavelmente a resistência do sensor.

Tal disposição, resultará em erro na leitura da temperatura, a menos que algum tipo de compensação ou ajuste dos fios do sensor de modo a equilibrar esta diferença de resistência. Deve-se notar que, embora a resistência dos fios não se altere em função do tamanho dos fios uma vez já instalado, os mesmos estão sujeitos às variações da temperatura ambiente, o que introduz uma outra possível fonte de erro na medição.

O método de ligação a dois fios, somente deve ser usado quando o sensor estiver a uma distância de aproximadamente 3 metros.

Concluindo, neste tipo de medição a 2 fios, sempre que a temperatura ambiente ao longo dos fios de ligação variar, a leitura de temperatura do medidor introduzirá um erro, devido a variação da resistência de linha .

- **Ligação à 3 fios**

Este é o método mais utilizado para termorresistências na indústria. Neste circuito a configuração elétrica é um pouco diferente, fazendo com que a alimentação fique o mais próximo possível do sensor, permitindo que a RL1 passe para o outro braço da ponte, balanceando o circuito. Na ligação a 2 fios, as resistências de linha estavam em série com o sensor, agora na ligação a 3 fios elas estão separadas.

Nesta situação, tem-se a tensão EAB, variando linearmente em função da temperatura da PT-100 e independente da variação da temperatura ambiente ao longo dos fios de ligação . Este tipo de ligação, garante relativa precisão mesmo com grandes distâncias entre elemento sensor e circuito de medição

### **MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR RADIAÇÃO**

Ao se medirem temperaturas em que o contato físico com o meio é impossível ou impraticável, faz-se uso da pirometria óptica ou de radiação térmica.

Um corpo aquecido emite energia mesmo que esteja no vácuo. Esta energia, a radiação térmica, é transportada por ondas eletromagnéticas, como a energia luminosa, mas com predominância de frequências bem menores que as do espectro visível, enquanto o corpo está à temperatura não muito elevada.

À medida que se aquece um corpo, a partir de temperaturas da ordem de 500 °C, o corpo começa a ficar visível porque começa a emitir radiações que tem uma fração apreciável com frequência de luz : o espectro visível.

Ainda assim a maior parte da intensidade da radiação tem frequência localizada na região do infravermelho.

Se pudéssemos aquecer indefinidamente o corpo, ele passaria do rubro para o branco e para o azul, Isto indica que a predominância da intensidade de radiação emitida dentro do espectro visível corresponde a frequências crescentes à medida que a temperatura do corpo é elevada.

- **Radiação Eletromagnética**

#### **Hipóteses de Maxwell**

Os trabalhos científicos de Coulomb, Ampère, Faraday e outros estabeleceram os princípios da Eletricidade. Na década de 1860, o físico escocês Maxwell desenvolveu uma teoria matemática, na qual generalizou estes princípios.

Considerando que na indução eletromagnética um campo magnético variável induz uma força eletromotriz, o que é característico de um campo elétrico, Maxwell apresentou as seguintes hipóteses:

1 – Um campo magnético variável é equivalente, nos seus efeitos, a um campo elétrico e inversamente,

2 – Um campo elétrico variável é equivalente, nos seus efeitos, a um campo magnético.

Com essas hipóteses, Maxwell generalizou, matematicamente, os princípios da Eletricidade. A verificação experimental de sua teoria só foi possível quando se considerou um novo tipo de onda, as chamadas ondas eletromagnéticas. Essas ondas surgem como consequência de dois efeitos: um campo magnético variável produz um campo elétrico, e um campo elétrico variável produz um

campo magnético. Esses dois campos em constantes e recíprocas induções propagam-se pelo espaço.

### **Ondas eletromagnéticas**

As ondas ocorrem quando uma perturbação originada em uma região pode ser reproduzida nas regiões adjacentes em um instante posterior.

De acordo com Maxwell, se em um ponto P produzirmos um campo elétrico variável E, ele induzirá um campo magnético B variável com o tempo e com a distância ao ponto P. Além disso, o vetor B variável induzirá um vetor E, que também varia com o tempo e com a distância do campo magnético variável. Esta indução recíproca de campos magnéticos e elétricos, variáveis com o tempo e com a distância, torna possível a propagação desta seqüência de induções através do espaço.

### Propagação das Ondas Eletromagnéticas no espaço

Portanto, uma perturbação elétrica no ponto P, devida à oscilação de cargas elétricas por exemplo, se propaga a pontos distantes através da mútua formação de campos elétricos e magnéticos variáveis. Maxwell estabeleceu equações para a propagação desta perturbação, mostrando que ela apresentava todas as características de uma onda: refletindo, refratando, difratando e interferindo. Por isto, denominou-a ondas ou radiações eletromagnéticas.

### **Espectro eletromagnético**

Hoje, sabemos que existe uma variação ampla e contínua nos comprimentos de onda e frequência das ondas eletromagnéticas.

No quadro abaixo, temos um resumo dos diversos tipos de ondas eletromagnéticas, chamado espectro eletromagnético; as frequências estão em hertz e os comprimentos de onda, em metros.

### Espectro eletromagnético

Analisando esse quadro, observamos que luz, ondas de rádio e raios X são nomes dados a certas faixas de frequência e comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Cada nome caracteriza uma faixa, na qual as ondas são emitidas e recebidas de um modo determinado. Por exemplo, a luz, de comprimentos de onda em torno de  $10^{-6}$  m, pode ser percebida através de seu efeito sobre a retina, provocando a sensação de visão; mas, para detectar

ondas de rádio, cujo comprimento de onda varia em torno de  $10^5$  m a  $10^{-1}$  m, precisamos de equipamentos eletrônicos.

- **Teoria da Medição de Radiação**

Em 1860, Gustav Kirchoff demonstrou a lei que estabelecia a igualdade entre a capacidade de um corpo em absorver e emitir energia radiante. Essa lei é fundamental na teoria da transferência de calor por radiação. Kirchoff também propôs o termo "corpo negro" para designar um objeto que absorve toda a energia radiante que sobre ele incide.

Tal objeto, em conseqüência, seria um excelente emissor.

Em 1879, Joel Stefan enunciou, a partir de resultados experimentais, a lei que relaciona a radiância de um corpo com a sua temperatura. A radiância,  $W$ , é a potência da radiação térmica emitida, por unidade de área da superfície do corpo emissor. Ludwig Boltzmann chegou, em 1884, às mesmas conclusões através da termodinâmica clássica, o que resultou na chamada Lei de Stefan-Boltzmann:

$$W = \epsilon \cdot \delta \cdot T^4$$

Onde:

$W$  = energia radiante ( Watts/m<sup>2</sup>)

$\delta$  = Constante de Stefan-Boltzmann (  $5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \text{W.K}^4$ )

m<sup>2</sup>

$T$  = Temperatura absoluta

$\epsilon$  = Emissividade

Para o corpo negro a máxima emissividade é igual a um. Portanto:

$$W = \delta \cdot T^4$$

Embora o corpo negro seja uma idealização, existem certos corpos como laca preta, placas ásperas de aço, placas de asbesto, com poder de absorção e de emissão de radiação térmica tão altos que podem ser considerado idênticos ao corpo negro.

O corpo negro é considerado, portanto, um padrão com o qual são comparadas as emissões dos corpos reais.

Quando, sobre um corpo qualquer ocorrer a incidência de irradiação, teremos uma divisão dessa energia em três parcelas:

$$W = W_A + W_R + W_T$$

Onde:

$W$  = energia Incidente

$W_A$  = energia absorvida

$W_R$  = energia refletida

$W_T$  = energia transmitida

Sendo:

79

- Absorvidade :  $\alpha = \frac{WA}{W}$

W

- Refletividade :  $\delta = \frac{WR}{W}$

W

- Transmissividade :  $\tau = \frac{WT}{W}$

W

Somando-se os três coeficientes para um mesmo comprimento de onda temos:

$$\alpha + \delta + \tau = 1$$

para materiais opacos,  $\tau = 0$ .

Normalmente a absorvidade é denominada "emissividade" que simbolizaremos por  $\epsilon$ , e é influenciada por vários fatores. Os principais são:

- a) Acabamento superficial: as superfícies polidas têm uma baixa absorvidade porque a refletividade é alta.
- b) Natureza do material.
- c) Temperatura da superfície: quando esta aumenta a emissividade também aumenta.

De acordo com Lei de Kirchoff existe uma igualdade entre a capacidade de um corpo em absorver a energia incidente e sua capacidade de reemiti-la. Chama-se a esta última de " emissividade ", a qual pode ser assim definida:

" A emissividade é a relação entre a energia irradiada, em um dado comprimento de onda, por um corpo qualquer e um corpo negro à mesma temperatura ".

$$\varepsilon = \frac{W}{W_0} \text{ (corpo qualquer)}$$

$W_0$  ( corpo negro )

Assim definida , a emissividade assume sempre valores entre 0 e 1 , sendo numericamente iguais à fração de radiação absorvida pelo corpo . Considerando a radiação térmica emitida pelo corpo negro , como composta de ondas eletromagnéticas e obtido experimentalmente o seu espectro em função da temperatura, estava constituído o desafio aos físicos teóricos : explicar este espectro a partir de sua causa microscópica.

Uma onda eletromagnética de rádio ou televisão é emitida por uma antena que essencialmente se constitui de cargas oscilantes , isto é , um oscilador eletromagnético. No caso da radiação emitida por um corpo " as antenas " eram consideradas os osciladores microscópios provenientes da oscilação de cargas moleculares devido à vibração térmica no interior do corpo. Num sólido, a uma determinada temperatura , as diversas moléculas oscilariam nas diversas freqüências , emitindo a radiação com o espectro estudado.

Em 1901, o físico alemão Max Planck publicou os resultados do seu estudo da radiação térmica, onde satisfazia todos os requisitos conceituais experimentais da radiação do corpo negro.

- **Pirômetros Ópticos**

O pirômetro óptico é o dispositivo oficial reconhecido internacionalmente para medir temperaturas acima de 1064,43 °C. É usado para estabelecer a Escala Internacional Prática de Temperatura acima de 1064,43 °C.

O pirômetro óptico mede a intensidade de energia radiante emitida numa faixa estreita do comprimento de onda do espectro visível . A intensidade da luz no espectro visível emitida por um objeto quente varia rapidamente com sua temperatura. Assim, com uma pequena variação da temperatura há uma variação muito maior na luminosidade , o que fornece um meio natural para a determinação de temperaturas com boa precisão.

O pirômetro óptico é um instrumento com o qual a luminosidade desconhecida de um objeto é medida comparando-a com a luminosidade conhecida de uma fonte padrão. Os pirômetros utilizam dois métodos para comparação:

- Variando a intensidade da luz emitida por uma lâmpada padrão ( corrente que passa através do filamento ) até atingir o mesmo brilho da fonte.

- Variando a luminosidade aparente do corpo quente através de dispositivos ópticos enquanto uma corrente constante atravessa o filamento da lâmpada padrão que permanece com brilho constante.

A comparação do brilho entre a fonte a ser medida e o filamento da lâmpada é feita por um observador, o que faz com que essa medida dependa, portanto, da sensibilidade do olho humano às diferenças no brilho entre duas fontes da mesma cor .

Ao considerar-se uma aplicação deve-se levar em conta os seguintes dados:

- Os limites normais de utilização estão entre 750 °C e 2850 °C. Com filtros de absorção especiais, pode-se estender sua calibração até 5500 °C.
- As medidas efetuadas com pirômetros ópticos são independentes da distância entre a fonte e o aparelho, além de que são providos de um conjunto de lentes que aproxima o objetivo a ser medido.
- Em uso industrial, consegue-se uma precisão de até  $\pm 2\%$ .
- Devido à medida de temperatura ser baseada na emissividade da luz ( brilho ), erros significativos podem ser criados, devido à reflexão de luz ambiente pela fonte a ser medida.
- Quando o meio onde se executa a medida possui partículas em suspensão, causando assim uma diminuição da intensidade da luz proveniente da fonte, diminuindo a precisão da medição.

- **Radiômetro Ou Pirômetros De Radiação**

Os radiômetros ( ou pirômetros de radiação ) operam essencialmente segundo a lei de Stefan-Boltzmann. São os sistemas mais simples, neles a radiação é coletada por um arranjo óptico fixo e dirigida a um detetor do tipo termopilha ( associação em série - ver figura abaixo ) ou do tipo semiconductor nos mais modernos, onde gera um sinal elétrico no caso da termopilha ou altera o sinal elétrico no caso do semiconductor.

Como não possuem mecanismo de varredura próprio, o deslocamento do campo de visão instantâneo é realizado pela movimentação do instrumento como um todo. Os radiômetros são em geral portáteis, mas podem ser empregados também no controle de processos a partir de montagens mecânicas fixas ou móveis.

Graças à utilização de microprocessadores, os resultados das medições podem ser memorizadas para o cálculo de temperaturas e seleção de valores.

A apresentação dos resultados é normalmente feita através de mostradores analógicos e digitais, podendo ainda ser impressa em papel ou gravada em fita magnética para posterior análise. Alguns radiômetros são diretamente conectados com unidades de controle ou registradores através de interface analógica/digital.

Os radiômetros são usados industrialmente onde:

- As temperaturas estão acima da faixa de operação prática dos termopares.
- A atmosfera do processo for prejudicial aos pares termoeletricos, causando medidas falsas e pequena durabilidade ao par .
- No interior de fornalhas a vácuo ou pressão, onde os sensores de temperatura danificam o produto.
- O objeto cuja temperatura se vai medir está em movimento.
- Em locais onde os termopares não podem ser instalados, por causa de vibrações, choques mecânicos ou impossibilidade de montagem.

Ao considerar-se uma aplicação deve-se levar em conta os seguintes dados:

- A temperatura do alvo e a temperatura normal de operação.

- O sinal de saída é independente da distância do alvo, desde que o campo de visão do sistema óptico esteja preenchido totalmente pelo mesmo.
- O material da fonte e sua emitância.
- Ângulos de visada com aplicações em corpo não negro ( deve-se restringir o ângulo para uma visada de 45°, ou menos, da perpendicular ).
- As condições do ambiente, temperatura e poeira.
- Velocidade do alvo.

Os radiômetros operam numa faixa entre -30 °C a 4000 °C, respondendo em 0,1 ou 0,2 segundos a 98% da mudança de temperatura com precisão de  $\pm 1\%$  da faixa medida.

## **Capítulo 07 – Variável Pressão**

Medição de pressão é o mais importante padrão de medida, pois as medidas de vazão, nível, etc. podem ser feitas utilizando-se esse princípio.

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

**P =  $\frac{F}{A}$**  onde P = Pressão

**A** F = Força

**A** = Área

- **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.

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

**Exemplo :** 3 Kgf/cm<sup>2</sup> ABS Pressão Absoluta

4 Kgf/cm<sup>2</sup> 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.

- ***diagrama comparativo das escalas***

Pressão Absoluta

Pressão Relativa

## Pressão Atmosférica

### Vácuo

#### Vácuo Absoluto

- **pressão diferencial**

É a diferença entre 2 pressões, sendo representada pelo símbolo  $\Delta P$  (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.

- **unidades de pressão**

Como existem muitas unidades de Pressão é necessário saber a correspondência entre elas, pois nem sempre na indústria temos instrumentos padrões com todas as unidades e para isto é necessário saber fazer a conversão .

Exemplo:

10 PSI = \_\_\_\_\_ ? \_\_\_\_\_ Kgf/cm<sup>2</sup>

1 PSI = 0,0703 Kgf/cm<sup>2</sup> De acordo com a tabela

10 x 0,0703 = 0,703 Kgf/cm<sup>2</sup>

### **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.

#### **Tipos de Tubos “ Bourdon ”**

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.

C

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 :  $P_1 - P_2 = h \cdot \rho \cdot g$

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 pêlos 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 :

S

$$R = \rho \cdot L$$

R : Resistência do condutor

$\rho$  : 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  $\Delta L$  , 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 ímã 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 ímã 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).

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 diferente, 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 frequência entre si. Esta diferença pode ser sentida por um circuito eletrônico , tal diferença de frequência será proporcional ao  $\Delta P$  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 frequência x 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 frequências 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 .

## **Capítulo 08 – Variável Nível**

Nível é a altura do conteúdo de um reservatório que pode ser sólido ou líquido. Trata-se de uma das principais variáveis utilizadas em controle de processos contínuos, pois através de sua medição torna-se possível:

- a) Avaliar o volume estocado de materiais em tanques de armazenamento.
2. Balanço de materiais de processos contínuos onde existam volumes líquidos ou sólidos de acumulação temporária, reações, mistura, etc.

3. Segurança e controle de alguns processos onde o nível do produto não pode ultrapassar determinados limites.

### ***métodos de medição de nível de líquido***

Os três tipos básicos de medição de nível são:

- a) direto
- b) indireto
- c) descontínuo

#### **MEDIÇÃO DIRETA**

É a medição que tomamos como referência a posição do plano superior da substância medida. Neste tipo de medição podemos utilizar réguas ou gabaritos, visores de nível, bóia ou flutuador.

- **Réqua ou Gabarito**

Consiste em uma régua graduada a qual tem um comprimento conveniente para ser introduzida dentro do reservatório a ser medido.

A determinação do nível se efetuará através da leitura direta do comprimento molhado na régua pelo líquido.

- **Visores de Nível**

Este medidor usa o princípio dos vasos comunicantes, o nível é observado por um visor de vidro especial, podendo haver uma escala graduada acompanhando o visor.

### **Bóia ou Flutuador**

Consiste numa bóia presa a um cabo que tem sua extremidade ligada a um contrapeso. No contrapeso está fixo um ponteiro que indicará diretamente o nível em uma escala. Esta medição é normalmente encontrada em tanques abertos.

### **Medição de nível indireta**

Neste tipo de medição o nível é medido indiretamente em função de grandezas físicas como : pressão, empuxo , radiação e propriedades elétricas.

- **Medição de Nível por Pressão Hidrostática (pressão diferencial)**

Neste tipo de medição usamos a pressão exercida pela altura da coluna líquida, para medirmos indiretamente o nível, como mostra abaixo o Teorema de Stevin:

$$P = h \cdot \delta$$

Onde:

P = Pressão em mm H<sub>2</sub>O ou polegada H<sub>2</sub>O

h = nível em mm ou em polegadas

$\delta$  = densidade relativa do líquido na temperatura ambiente.

$\delta$

Essa técnica permite que a medição seja feita independente do formato do tanque seja ele aberto ou pressurizado.

- **Medição por Pressão Diferencial em Tanques Pressurizados.**

Neste tipo de medição, a tubulação de impulso da parte de baixo do tanque é conectada à câmara de alta pressão do transmissor de nível. A pressão atuante na câmara de alta é a soma da pressão exercida sob a superfície do líquido e a pressão exercida pela coluna de líquido no fundo do reservatório. A câmara de baixa pressão do transmissor de nível, é conectada na tubulação de impulso da parte de cima do tanque onde mede somente a pressão exercida sob a superfície do líquido.

- **Supressão de Zero**

Para maior facilidade de manutenção e acesso ao instrumento, muitas vezes o transmissor é instalado abaixo do tanque. Outras vezes a falta de plataforma fixadora em torno de um tanque elevado resulta na instalação de um instrumento em um plano situado em nível inferior à tomada de alta pressão.

Em ambos os casos, uma coluna líquida se formará com a altura do líquido dentro da tomada de impulso, se o problema não for contornado, o transmissor indicaria um nível superior ao real.

- **Elevação de Zero**

Quando o fluido do processo possuir alta viscosidade, ou quando o fluido se condensa nas tubulações de impulso, ou ainda no caso do fluido ser corrosivo,

devemos utilizar um sistema de selagem nas tubulações de impulso, das câmaras de baixa e alta pressão do transmissor de nível. Selam-se então ambas as tubulações de impulso, bem como as câmaras do instrumento.

Na figura abaixo, apresenta-se um sistema de medição de nível com selagem, no qual deve ser feita a elevação, que consiste em anular-se a pressão da coluna líquida na tubulação de impulso da câmara de baixa pressão do transmissor de nível.

- **Medição de Nível com Borbulhador**

Com o sistema de borbulhador podemos detectar o nível de líquidos viscosos, corrosivos, bem como de quaisquer líquidos à distância.

Neste sistema necessitamos de um suprimento de ar ou gás e uma pressão ligeiramente superior à máxima pressão hidrostática exercida pelo líquido. Este valor normalmente é ajustado para aproximadamente 20% a mais que a máxima pressão hidrostática exercida pelo líquido. O sistema borbulhador engloba uma válvula agulha, um recipiente com líquido na qual o ar ou gás passará pelo mesmo e um indicador de pressão.

Ajustamos a vazão de ar ou gás até que se observe a formação de bolhas em pequenas quantidades. Um tubo levará esta vazão de ar ou gás até o fundo do vaso a qual queremos medir seu nível, teremos então um borbulhamento bem sensível de ar ou gás no líquido o qual queremos medir o nível. Na tubulação pela qual fluirá o ar ou gás, instalamos um indicador de pressão que indicará um valor equivalente a pressão devido ao peso da coluna líquida. Nota-se que teremos condições de instalar o medidor a distância.

- **Medição de Nível por Empuxo**

Baseia-se no princípio de Arquimedes: “Todo o corpo mergulhado em um fluido sofre a ação de uma força vertical dirigida de baixo para cima igual ao peso do volume do fluido deslocado.”

A esta força exercida pelo fluido do corpo nele submerso ou flutuante chamamos de empuxo.

$$E = V \cdot \delta$$

onde:

$E$  = empuxo

$V$  = volume deslocado

$\delta$  = densidade ou peso específico do líquido

Baseado no princípio de Arquimedes usa-se um deslocador (displacer) que sofre o empuxo do nível de um líquido, transmitindo para um indicador este movimento, por meio de um tubo de torque. O medidor deve ter um dispositivo de ajuste para densidade do líquido cujo nível estamos medindo, pois o empuxo varia com a densidade.

Através dessa técnica podemos medir nível de interface entre dois líquidos não miscíveis.

Na indústria muitas vezes temos que medir o nível da interface em um tanque contendo 2 líquidos diferentes. Este fato ocorre em torres de destilação, torres de lavagem, decantadores etc.

Um dos métodos mais utilizados para a medição da interface é através da variação do empuxo conforme citaremos a seguir.

Consideremos um flutuador de forma cilíndrica mergulhado em 2 líquidos com pesos específicos diferentes  $\delta_1$  e  $\delta_2$ .

Desta forma, podemos considerar que o empuxo aplicado no flutuador, será a soma dos empuxos  $E_1$  e  $E_2$  aplicados no cilindro, pelos líquidos de pesos específicos  $\delta_1$  e  $\delta_2$ , respectivamente. O empuxo será dado pôr:

$E_t = E_1 + E_2$  onde:

$$E_1 = V_1 \cdot \delta_1 \text{ e } E_2 = V_2 \cdot \delta_2$$

Assim para diferentes valores de altura de interface, teremos diferentes variações de empuxo.

- **Medição de Nível por Radiação**

Os medidores que utilizam radiações nucleares se distinguem pelo fato de serem completamente isentos do contato com os produtos que estão sendo medidos. Além disso, dispensando sondas ou outras técnicas que mantêm contato com sólidos ou líquidos tornando-se possível, em qualquer momento, realizar a manutenção desses medidores, sem a interferência ou mesmo a paralisação do processo.

Dessa forma os medidores que utilizam radiações podem ser usados para indicação e controle de materiais de manuseio extremamente difícil e corrosivos, abrasivos, muito quentes, sob pressões elevadas ou de alta viscosidade.

O sistema de medição por raios gamas consiste em uma emissão de raios gamas montado verticalmente na lateral do tanque do outro lado do tanque teremos um câmara de ionização que transforma a radiação Gama recebida em um sinal elétrico de corrente contínua. Como a transmissão dos raios é inversamente proporcional a altura do líquido do tanque, a radiação captada pelo receptor é inversamente proporcional ao nível do líquido do tanque, já que o material bloquearia parte da energia emitida.

- **Medição de Nível por Capacitância**

A capacitância é uma grandeza elétrica que existe entre 2 superfícies condutoras isoladas entre si.

O medidor de nível capacitivo mede as capacidades do capacitor formado pelo eletrodo submerso no líquido em relação as paredes do tanque. A capacidade do conjunto depende do nível do líquido.

O elemento sensor, geralmente é uma haste ou cabo flexível de metal. Em líquidos não condutores se empregam um eletrodo normal, em fluidos condutores o eletrodo é isolado normalmente com teflon. A medida que o nível do tanque for aumentando o valor da capacitância aumenta progressivamente a medida que o dielétrico ar é substituído pelo dielétrico líquido a medir.

A capacitância é convertida por um circuito eletrônico numa corrente elétrica sendo este sinal indicado em um medidor.

A medição de nível por capacitância também pode ser feita sem contato, através de sondas de proximidade. A sonda consiste de um disco compondo uma das placas do capacitor. A outra placa é a própria superfície do produto ou a base do tanque.

- **Medição de Nível por Ultra Som**

O ultra-som é uma onda sonora, cuja frequência de oscilação é maior 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 portanto, do meio (sólido, líquido ou gasoso).

Assim sendo, a velocidade do som é a base para a medição através da técnica de eco, usada nos dispositivos ultra-sônicos.

As ondas de ultra-som são geradas e captadas pela excitação elétrica de materiais piezoelétricos.

A característica marcante dos materiais piezoelétricos é produção de um frequência quando aplicamos uma tensão elétrica. Assim sendo, eles podem ser usados como gerador de ultra-som, compondo, portanto, os transmissores.

Inversamente, quando se aplica uma força em uma material piezoelétrico, ou seja quando ele recebe um sinal de frequência, resulta o aparecimento de uma tensão elétrica no seu terminal. Nesta modalidade, o material piezoelétrico é usado como receptor do ultra-som.

**Os dispositivos do tipo ultra-sônico podem ser usados tanto na detecção contínua de nível como na descontínua.**

Os dispositivos destinados a detecção contínua de nível caracterizam-se, principalmente, pelo tipo de instalação, ou seja, os transdutores podem encontrar-se totalmente submersos no produto, ou instalados no topo do equipamento sem contato com o produto.

- **Medição de Nível por Radar**

Possue uma antena cônica que emite impulsos eletromagnéticos de

alta frequência à superfície a ser detectada. A distância entre a antena e a superfície a ser medida será então calculada em função do tempo de atraso entre a emissão e a recepção do sinal.

Essa técnica pode ser aplicada com sucesso na medição de nível de líquidos e sólidos em geral. A grande vantagem deste tipo de medidor em relação ao ultrassônico é a imunidade à efeitos provocados por gases, pó, e espuma entre a superfície e o detetor, porém possui um custo relativo alto.

**medição de nível Descontínua**

Estes medidores são empregados para fornecer indicação apenas quando o nível atinge certos pontos desejados como por exemplo em sistemas de alarme e segurança de nível alto ou baixo.

Nos líquidos que conduzem eletricidade, podemos mergulhar eletrodos metálicos de comprimento diferente. Quando houver condução entre os eletrodos teremos a indicação de que o nível atingiu a altura do último eletrodo alcançado pelo líquido.

Medição de nível descontínua por condutividade

Medição de nível descontínua por bóia

Diversas técnicas podem ser utilizadas para medição descontínua, desde simples bóia acoplada a contatos elétricos a sensores eletrônicos do tipo capacitivo ou ultra-sônico, onde diferenciam-se entre si pela sensibilidade, tipo de fluido, características operacionais instalação e custo.

**medição de nível de sólidos**

É necessário medir o nível dos sólidos, geralmente em forma de pó ou grãos, em silos, alto-fornos etc., pelos mesmos motivos da medição de nível dos líquidos.

Esta medição é comumente feita por dispositivos eletromecânicos, onde é colocada uma sonda sobre a carga ou conteúdo. O cabo da sonda movimentada um transdutor eletromecânico, que envia um sinal para um indicador, cuja a escala é graduada para nível. Essa técnica apesar de simples tem como desvantagem a grande incidência de manutenção tornando-a inviável em muitos casos.

Outros medidores como os radioativos, capacitivos, ultrassônicos, radares e sistemas de pesagem com células de carga podem ser utilizados com bastante eficiência e precisão apesar de possuírem em alguns casos o custo elevado.

## **Capítulo 09 – Variável Vazão**

### **Introdução e simbologia**

A importância da variável vazão-quantidade do fluido escoado através de tubulações e equipamentos, na unidade de tempo pode ser avaliada pelas suas aplicações industriais:

1. Controla o processo nas quantidades totais ou parciais que se acham em transformação no processo, em período de tempo;
2. Permite o “balanço” de material de um sistema ou da unidade toda.

A importância da variável vazão-quantidade de fluido escoado, pode ser pesada pelo seguinte:

1. Permite um controle do balanço da unidade, desde que existam medidores volumétricos na carga da unidade e nos seus diversos produtos derivados finais;
2. Permite a contabilização mais exata na venda (ou transferência) dos produtos.

Os instrumentos de vazão e volume tem a seguinte simbologia:

### 1. Formas simples

FI Indicador de vazão (“*flow indicator*”);

FR Registrador de vazão (“*flow recorder*”);

FC Controlador de vazão (“*flow controler*”);

FQ Integrador ou totalizador volumétrico (T = *totalizer*).

### 2. Formas compostas

FIC Indicador e controlador de vazão;

FRC Registrador e controlador de vazão.

### 3. Formas especiais

FE Elemento primário de vazão (“*flow element*”);

FG Visores de vazão (“*flow-glass*”);

FCV Válvula auto-operada por vazão.

#### Tipos de medidores de vazão e volume

Segundo seu princípio de funcionamento, os medidores de vazão e volume são classificados nos seguintes tipos principais:

##### a) Tipo pressão diferencial variável

- Tipo área variável
- Tipo de deslocamento positivo

##### b) Medidores de vazão tipo pressão diferencial variável

Quando introduzimos uma restrição em uma tubulação através da qual escoar um fluido, ocorre como consequência, uma perda ou queda de pressão.

Esta perda de pressão é tanto maior quanto maior for a vazão do fluido que estiver escoando pela tubulação.

A perda de pressão introduzida não é a mesma para todos os fluidos, dependendo da **viscosidade**, **temperatura** e **densidade** do fluido em questão.

É evidente que também depende do **tamanho de restrição** e do **diâmetro da tubulação** em que esta se situa.

Conclui-se, portanto, que a partir da medida da perda ou queda de pressão através de uma restrição colocada em uma tubulação já podemos determinar a vazão.

Na primeira figura abaixo, temos representado uma restrição na tubulação e na segunda figura, um gráfico representativo de como a pressão varia na região em torno da restrição (orifício).

A queda da pressão introduzida é:  $P_1 - P_2 = P$ .

Nota-se pelo gráfico, que esta diferença varia conforme as posições das tomadas de pressões  $P_1$  e  $P_2$ .

Para medir a vazão por diferença das pressões usam-se instalações que se compõem:

1. De um elemento primário: dispositivo de restrição que produz a diferença (queda) das pressões;
2. De um elemento secundário: dispositivo que mede a diferença de pressões produzida pela restrição;
3. De um elemento terciário, que é usado para indicar, registrar e/ou controlar a vazão.

Os elementos primários mais usados são;

- Placa de orifício;
- Bocal de vazão;
- Tubo Venturi;
- Tubo Pitot.

O **tubo Pitot** é um dispositivo que serve para medir a velocidade do fluido em um ponto qualquer na secção de escoamento.

Consta, em geral, de dois tubos justapostos, que são inseridos na tubulação, um deles colocado de modo a medir a pressão estática existente e mais a pressão cinética devido à velocidade do fluido:  $P_1 = P_e + P_v$ ; o outro mede apenas a pressão estática:  $P_2 = P_e$ .

A diferença das duas tomadas dá a medição da velocidade do fluido:

$$P_1 - P_2 = P_e + P_v - P_e = P_v$$

A figura abaixo dá uma idéia de um tubo Pitot.

O **tubo Venturi** é recomendado para medição de vazão de fluido que contenham grandes quantidades de sólidos em suspensão e para fluidos altamente viscosos.

O **bocal de vazão** é de uso semelhante ao tubo Venturi porém sendo um elemento mais econômico.

A **placa de orifício** é, geralmente, o elemento primário mais simples na fabricação, na instalação e de baixo custo.

Consiste de uma placa metálica com		
------------------------------------	--	--

um orifício centrado ou excêntrico, de diâmetro menor que o da tubulação onde se acha instalada, de seção circular elíptica, segmental, etc., com suas bordas vivas (ortogonais) ou boleadas. A figura ao lado mostra uma placa de orifício.		
--	--	--

Às vezes, a placa é provida de um pequeno furo adicional para a passagem de gases ou de condensado.

Quando um fluido é um gás, o furo adicional deve ficar na parte inferior da tubulação, de forma a deixar escoar os gases que se condensam e no caso do fluido ser líquido, o orifício deve ficar na parte superior da tubulação, a fim de dar passagem à parte vaporizada, porventura existente, e assim não adicionar erro maior na vazão medida.

A placa de orifício é inserida na tubulação entre flanges e as tomadas de pressão são a montante e a jusante da mesma. São denominadas, respectivamente, de alta pressão e de baixa pressão.

A diferencial de pressão, ou seja, as duas tomadas de pressão são ligadas a um medidor diferencial de pressão (elemento secundário), como mostrado na figura a seguir.

Outro medidor de pressão diferencial é o tipo “foles com enchimento de líquido”.

Consta, essencialmente, de dois foles, cheios de líquidos, o que confere proteção de sobrecarga e possibilita amortecimento ajustável entre os dois foles.

Quando há uma diferença de pressão, os dois foles procuram uma posição de equilíbrio, posição esta transmitida mecanicamente a um dispositivo provido de ponteiro ou pena, em uma escala apropriada de vazão.

A figura abaixo mostra esquematicamente tal medidor.

O tipo mais freqüente de medidor de vazão por pressão diferencial é o chamado “conversor de pressão”. É um medidor tipo “seco”, cujo princípio é o de equilíbrio de forças.

As pressões produzidas no elemento primário são aplicadas no elemento detector (medidor) no conversor diferencial.

Por meios mecânicos e pneumáticos ou eletro-magnéticos a força é equilibrada de tal modo que a saída (pressão pneumática ou corrente elétrica) é proporcional à pressão diferencial medida.

A vazão, nesses medidores tipo diferencial de pressão variável, relaciona-se com a pressão diferencial.

#### **c) Medidores de vazão tipo “área variável”**

Este tipo é também conhecido pelo nome de “rotâmetro”.

Consta de um tubo cônico, contendo no seu interior um flutuador. A posição do flutuador vai depender da diferença entre o peso próprio e a força de empuxo causada pela vazão, que passa pela coroa circular compreendida entre o diâmetro interno do tubo e o diâmetro do flutuador.

Sendo o peso do flutuador constante, a altura atingida dependerá, portanto, da vazão através do medidor.

A figura ao lado mostra um rotâmetro.

Uma das vantagens deste medidor é que a escala do mesmo é linear.

#### **d) Medidores de volume tipo “deslocamento”**

Estes instrumentos medem o volume escoado e tem uma precisão muito boa, sendo indicados para medição com efeito comercial ou contábil, principalmente, porque através de dispositivos mecânicos e/ou mecânico-elétricos podem fazer a integração do volume escoado.

#### **Instrumentos receptores e controladores de vazão**

Tanto os receptores como os controladores para a variável **vazão**, são similares aos usados para as demais variáveis.

Eles podem ser: pneumáticos ou eletrônicos (elétricos).

### a) Medidores de vazão tipo Eletromagnético

O princípio de funcionamento do Medidor Eletromagnético de Vazão é baseado na Lei de FARADAY, segundo a qual um objeto condutor que se move em um campo magnético, gera uma força eletromotriz.

A relação entre o campo magnético, movimento do fluido e **fem** (força eletromotriz) induzida, pode facilmente ser determinada através da regra da mão direita. No medidor Eletromagnético, o condutor é o fluido que passa através do tubo detetor.

Desta forma, a direção do campo magnético, a vazão e a **fem** estão posicionadas uma em relação a outra de um ângulo de  $90^\circ$ .

#### LEI DE INDUÇÃO DE FARADAY

“A voltagem induzida em um condutor que se move perpendicularmente através de um campo magnético será proporcional a velocidade do condutor através do campo”.

Neste caso, o líquido é o condutor, e nele será induzida uma voltagem diretamente proporcional a sua velocidade de escoamento.

Mede vazão volumétrica, independente da viscosidade, densidade, turbulência, sólidos em suspensão, condutividade (> 200Ωμ - 100ppm de sal em água pura) pois a voltagem gerada é proporcional a velocidade média.

Possui sinal de saída linear, não introduz perda de carga no sistema, sendo adequado para líquidos com grande quantidade de sólidos em suspensão, ácidos corrosivos, água.

Infelizmente, a maioria dos produtos de petróleo não possuem condutividade suficiente para medição satisfatória com este instrumento.

Óleo cru, por exemplo, contendo água salgada poderá apresentar condutividade suficiente, porém, a distribuição não uniforme da água poderá prejudicar a leitura.

Embora o medidor possa ser montado em qualquer posição, é recomendável, que a disposição da tubulação mantenha o medidor sempre cheio de líquido com os eletrodos na horizontal garantindo a precisão da medição.

PRECISÃO: ±1% (MEDIDOR-CONVERSOR-INDICADOR OU REGISTRADOR)

MATERIAIS:

Eletrodo- Aço inox, Platina, Hastelloy

Isolante- Neoprene, Teflon, Epox fiber glass.

Medidor Magnético

## **Turbina**

Neste tipo de medidor a ação da velocidade linear do líquido, sobre as palhetas do rotor, provoca sua rotação.

Como a velocidade angular é proporcional a velocidade linear tem-se uma medida da vazão volumétrica.

O rotor possui em sua periferia diversos pontos magnéticos, igualmente espaçados, que ao passarem pelo campo produzido pelo imã permanente, induzem na bobina captadora, uma onda senoidal, de frequência proporcional a vazão volumétrica.

O sinal captado pela bobina poderá ser amplificado, convertido em um instrumento receptor, obtendo-se a vazão instantânea e totalizada.

### Medidor Turbina

O sinal de saída é praticamente linear pois a cada pulso corresponde a um determinado volume.

O número de pulsos por unidade de vazão é chamado fator K da turbina. Este fator varia com a vazão, pressão e com a temperatura de operação.

Não há precisão no início da faixa, devido ao atrito do rotor e inércia inicial.

### Efeito Coriolis

Há mais de vinte anos, numa busca pelo aprimoramento tecnológico, foram iniciados os primeiros trabalhos para medição direta de vazão mássica por meio do efeito Coriolis, que pela lei de Newton é diretamente proporcional à massa. Após 10 anos de pesquisas foi lançado o primeiro medidor Coriolis, para uso laboratorial.

Resumidamente, um medidor Coriolis possui dois componentes: Tubos de sensores de medição e transmissor.

Um sistema magnético faz com que o tubo sensor vibre em sua frequência natural, quase imperceptível a olho nu. A vibração se assemelha à um

diapasão, cobrindo menos do que 2,5 mm e completando 80 ciclos a cada segundo ( Figura A ).

O fluido que passa através do tubo é forçado a seguir seu movimento vertical. Quando, durante o correspondente semi-ciclo, o tubo se move para cima ( Figura B ), o fluxo que entra resiste ao movimento e força o tubo para baixo. Tendo sido forçado do para cima, o fluido que sai do tubo resiste, com seu impulso, neste sentido, reduzido, tendendo a deslocar o tubo para cima. Com isto, o tubo sofre uma torção ( Figura C ). No outro semi-ciclo ( para baixo ), a torção se dará em sentido oposto.

De acordo com a segunda lei de Newton, a magnitude da torção é proporcional à taxa de vazão da massa através do tubo sensor.

São instalados em cada lado do tubo, transdutores que enviarão as informações à unidade eletrônica, onde serão processadas e transformadas em sinal elétrico proporcional à vazão-de-massa. Adicionalmente, pela medição da frequência natural de vibração do tubo, poderá ser determinada a densidade do fluido.

A

B

C

Um RTD é montado no tubo, monitorando a temperatura deste, a fim de compensar as variações das deformações elásticas sofridas com a oscilação da temperatura.

Basicamente, o sensor mais o transmissor apresenta:

- Precisão:  $\pm 0,2\%$  mais instabilidade zero;
- Diâmetro: de 1/16" até 6,0";
- Range: de 0,05 Kg/min ou L/min até 11 mil Kg/min ou L/min;
- Pressão: até 200 bar ( existem modelos até 400 bar );

- Repetibilidade: 0,1%
- Temperatura: de -240°C a +240°C faixa standard e até 456°C faixa de alta temperatura;
- Rangeabilidade: de 10/1 até 100/1.

O medidor não exige cuidados especiais de montagem não tendo restrições de trechos retos mínimos e apenas recomenda-se que o medidor esteja sempre cheio e, na prática, observa-se os seguintes tipos de montagem orientados aos diferentes tipos de fluidos:

Líquidos

Gases

Líquidos com sólidos

## **Capítulo 10 – Variável Peso/Carga**

As células de carga são sensores projetados para medir cargas estáticas e dinâmicas de tração e compressão, princípio extensométrico e cargas de 0 a 300t. As células são totalmente estanques (proteção IP67) e podem ser utilizadas em atmosferas agressivas. Externamente o transdutor é usinado a partir de um único bloco de aço inoxidável sem qualquer parte soldada. As

células de carga são, ainda, resistentes à vibração e impacto. O seu tamanho compacto permite sua aplicação em pequenos espaços e em locais de difícil acesso.

Um tipo de célula de carga é a Doc 438, modelo TU-K5C, para cargas de tração e compressão da Gefran Brasil, com flange para a aplicação de cargas suspensas, FLA703, e articulação esférica, SND022. A FIG. 2 apresenta as dimensões mecânicas da célula de carga Doc 438 e sua montagem com junta esférica dupla e flange para cargas suspensas. Algumas especificações técnicas desta célula:

- Precisão: 0,2%;
- Faixa de medição: 0 a 500Kg;
- Sensibilidade: 2mV/V;
- Erro combinado - não linearidade/histerese/repetibilidade:  $\pm 0,2\%$  do fundo de escala;
- Tensão nominal de alimentação: 10V;

## Introdução

A ocorrência da necessidade de um controle rigoroso constante da qualidade final (ou intermediária) de um processo industrial é cada vez acentuada. O controle de qualidade é exercido nestes processos, em grande parte, por análises químicas ou físicas e existe uma quantidade variada de instrumentos especiais para executá-las.

Existem os mais variados tipos de instrumentos especiais, dependendo do que se pretende medir e, entre os de mesma finalidade, diversos princípios de funcionamento:

- pH metro;
- Condutivímetro;
- Densímetro;
- Viscosímetro;
- Analisador de percentagem de oxigênio;
- Silicômetro.

### PH metro

- **Simbologia**

pH1 Indicador de pH;

pHR Registrador de pH;

pHIC Controlador-indicador de pH;

pHRC Controlador-registrador de pH.

### Variável

pH Potencial hidrogeniônico.

### Unidade de medida

Valor pH É o co-logarítimo ou concentração de ions hidrogênio  $H^+$  de uma solução; indica o grau de alcalinidade, neutralidade ou acidez da solução.

	Valor pH
--	----------

--	--	--

**Princípio de funcionamento**

Detector (elemento primário)

O dispositivo de detecção de pH consiste de dois eletrodos, um de medição (eletrodo de vidro) imerso na solução testada e outro de referência imerso em uma solução de concentração hidrogeniônica constante e conhecida. Estes eletrodos estão separados por uma membrana, à qual permite a passagem da corrente eletro-química. A diferença de potencial entre os dois eletrodos indica o valor pH da solução testada, d.d.p. esta que varia linearmente com o valor pH.

Estes eletrodos estão em uma câmara de fluxo, cuja finalidade é mantê-los constantemente imersos na solução testada. Normalmente é incluído um terceiro eletrodo (resistência) na câmara de fluxo, cuja finalidade é compensação da variação de temperatura.

A figura abaixo dá uma visão em corte dos eletrodos supracitados.

**Receptor**

O sinal emitido pelo conjunto de eletrodos é muito débil para movimentação de qualquer dispositivo de indicação, registro ou controle.

O sistema utilizado para detecção deste sinal, de modo a amplificá-lo sem deformações, é conhecido como sistema de balanço contínuo.

O sistema de balanço contínuo baseia-se no princípio de potenciômetro, onde se efetua a comparação de tensões sem fluxo de corrente.

O potenciômetro pode ser definido como um dispositivo para medida de d.d.p. ou de f.e.m. de valor desconhecido, pela comparação desta f.e.m. desconhecida, com uma f.e.m. conhecida, fornecida por uma pilha padrão ou outra fonte de potencial padrão. O circuito fundamental do potenciômetro é simples (vide figura abaixo), consiste de uma resistência variável (“*slide wire*”) AB com um contacto-central C que se move livremente ao longo desta resistência. A bateria (Bat) supre um pequeno potencial constante ao longo do “*slide wire*”. A f.e.m. desconhecida (no nosso caso a d.d.p. entre os eletrodos de vidro e referência) é ligada a um amplificador em série com o contato C, de modo que forme um potencial oposto ao da bateria.

Se este pequeno potencial constante na parte AC do “*slide wire*” for diferente da f.e.m. desconhecida, haverá um fluxo de corrente entre os terminais do amplificador e conseqüentemente uma amplificação de corrente de modo a acionar o servomotor M, que movimenta o contacto C no sentido de igualar os dois potenciais, anulando a corrente de alimentação do amplificador, estabilizando-o no ponto de corrente nula.

Uma escala locada ao longo do “*slide wire*” e um ponteiro acoplado no contacto C nos indicará o valor da leitura efetuada.

#### **Condutivimetro** **Simbologia**

- CI Indicador de condutividade;
- CR Registrador de condutividade;
- CIC Controlador indicador de condutividade;
- CRC Controlador registrador de condutividade.

#### **Variável**

Condutividade elétrica.  
**Unidade de medida**

Micro Mho por centímetro ou us/cm micro siemens por centímetro.

#### Princípio de funcionamento

- Detector (elemento primário)

A célula de medição de condutividade é composta de dois eletrodos cilíndricos concêntricos que medem a resistência elétrica da solução em que está imersa.

Como a condutividade é relacionada com a resistência, visto que  $C = K/R$ , onde  $C$  = condutividade elétrica (em  $\nu/cm$ )  $R$  = resistência elétrica (em  $\Omega$ ) e  $K$  = constante da célula; a leitura pode ser feita diretamente em condutividade. Para efetuar a compensação da variação de temperatura da solução testada é acoplado à célula, um termistor (resistor de coeficiente negativo).

A figura a seguir mostra o desenho típico de uma célula de condutividade.

#### Densímetro Simbologia

Sgl Indicador de densidade;

SgR Registrador de densidade;

SglC Controlador indicador de densidade;

SgRC Controlador registrador de densidade.

#### Variável

Densidade relativa (*specific gravity*) de um líquido e o peso de um determinado volume deste fluído comparado com o peso do mesmo volume de água, ambos medidos nas mesmas condições de pressão e temperatura (usualmente à pressão atmosférica é a 20°C).

#### Unidade de medida

A densidade relativa, por ser resultado de uma comparação, é adimensional.

Para produtos de petróleo, é dotado, para simplificação de expressão, a unidade °API (graus API - *American Petroleum Institut*). A correspondência entre a unidade °API e a densidade relativa é dada na tabela abaixo, notando-se que a escala API corre em sentido inverso da densidade relativa.

°API	d a 60°F
0	1,0760
10	1,0000
20	0,9340
30	0,8762
40	0,8251
50	0,7796
60	0,7389
70	0,7022
80	0,6690
90	0,6388
100	0,6112

#### Princípio de Funcionamento

- Detector (elemento primário)

Método de pesagem com volume fixo.

O detentor compõe-se de uma esfera de volume fixo conhecido, através da qual o líquido flue continuamente. O líquido então é pesado por um mecanismo de balanço de forças com ou sem um sistema de transmissão.

#### Receptor

Como o sistema de transmissão é o usual (seja pneumático ou eletrônico) o receptor (controle do registro) é do mesmo tipo dos já citados anteriormente para as variáveis básicas (vazão, pressão, nível, temperatura).

**Viscosímetro**  
**Simbologia**

VI Indicador de viscosidade;

VR Registrador de viscosidade;

VIC Controlador indicador de viscosidade;

VRC Controlador registrador da viscosidade.

**Variável**

Viscosidade cinemática.

**Unidade de medida**

Stokes =  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

No nosso caso específico: CS.

**Princípio de funcionamento**

O líquido analisado é bombeado, a uma vazão, constante através de um tubo de fricção. A queda de pressão através deste tubo é medido em termos de viscosidade por um sistema normal de medição de pressão diferencial.

**Analizador % de oxigênio**

- **Simbologia**

O<sub>2</sub>I Indicador % de O<sub>2</sub> ;

O<sub>2</sub>R Registrador % de O<sub>2</sub> ;

O<sub>2</sub>RC Controlador registrador % de O<sub>2</sub> ;

O<sub>2</sub>IC Controlador indicador % de O<sub>2</sub> .

#### Variável

Analisa a concentração de oxigênio em gases, no nosso caso, nos gases de combustão das caldeiras para verificar sua eficiência.

#### Unidade de medida

% de O<sub>2</sub> (por volume).

#### Princípio de funcionamento

- **Detector tipo susceptibilidade-magnética-campo magnético não uniforme:**

O oxigênio se destaca entre os gases pelo seu comportamento paramagnético, isto é, a sua atração por um campo magnético. Um pequeno corpo de prova, imerso em um campo magnético não uniforme tende a ser expelido se o O<sub>2</sub> é presente. Este deslocamento aumenta com o aumento da concentração de O<sub>2</sub> e pode ser medido pela reflexão de raios luminosos.

Vemos na figura abaixo o esquema representativo de funcionamento. O corpo de prova C, contrabalanceado pelo seu corpo de prova C1 estão imersos em um campo magnético não uniforme, através do qual flue o gás analisado, recebe uma carga da placa P que tem um potencial DC fixo, tendendo a trazê-lo à posição zero.

Como dito, a presença do oxigênio no gás analisado tende a expelir o corpo de prova, expulsão esta que modifica a posição do espelho R (locado no eixo de sustentação C-C variando a intensidade de raios luminosos refletidos nas fotocélulas F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub>. Esta variação alimenta sistema de balanço contínuo que indica diretamente a % do O<sub>2</sub>.

## **Capítulo 12 – Atuadores Eletromagnéticos**

O movimento das cargas elétricas, e em particular a corrente elétrica, é responsável por um fenómeno de atração ou repulsão designado por força magnética. Dois condutores percorridos por uma corrente elétrica atraem-se um ao outro se os sentidos dos respectivos fluxos forem concordantes, e repelem-se no caso contrário. A força magnética, encontram-se associados o campo magnético, o fluxo e a densidade de fluxo magnético, a permeabilidade magnética, a indutância ou coeficiente de auto-indução, e o coeficiente de indução mútua.

Considerem-se os dois fios condutores paralelos e imersos no espaço vazio representados na FIG. 7, e admita-se que o comprimento,  $l$ , é muito superior à distância respectiva ( $l \gg d$ ), que a secção é infinitesimal ( $r \ll d$ ) e que ambos são percorridos por correntes elétricas,  $i_1$  e  $i_2$ , lentamente variáveis no tempo.

Força magnética exercida entre dois fluxos de corrente elétrica

Nestas condições, entre os dois fios condutores estabelece-se uma força de índole magnética cuja intensidade é dada pela Equação , onde  $\mu_0 10\pi=4 \cdot 10^{-7}$  [Wb/A.m] - define a constante universal designada por permeabilidade magnética do vazio.

[N]

A força é tanto maior quanto mais longos e próximos se encontrarem os condutores ou, em alternativa, quanto mais elevadas forem as correntes que os percorrem. A direção da força magnética e da corrente elétrica são perpendiculares entre si, sendo de repulsão o sentido da força no caso de fluxos discordantes , e de atração no caso inverso . Convém lembrar que a ausência de corrente em qualquer dos dois fios condutores determina a ausência da força magnética. Por conseguinte, cargas elétricas em repouso são transparentes do ponto de vista do campo magnético, isto é, não geram nem são afetadas pelo campo magnético.

Se se considerar a ação exercida pela corrente  $i_1$  sobre o condutor-2, por exemplo por unidade de comprimento e normalizada relativamente à corrente  $i_2$ , obtém-se a intensidade do campo magnético,  $H_1$ , criado pelo condutor-1

[A/m]

Neste caso, a intensidade da força magnética,  $F$  [N], pode ser expressar em função do campo magnético,  $H_1$  [A/m]:

A análise de um circuito com bobinas exige a obtenção e a resolução de uma ou várias equações diferenciais. As condições iniciais da corrente, do fluxo magnético e da energia armazenada, em conjunto com a imposição da sua continuidade, constituem a informação necessária para determinar os valores das constantes da solução da equação diferencial.

A FIG. 8 ilustra os diversos caminhos fechados de corrente vulgarmente utilizados na realização de bobinas: a espira (a), a bobina com  $N$  espiras e núcleo cilíndrico (b) e a bobina com  $N$  espiras e núcleo toroidal (c).

Caminhos fechados de corrente utilizados na realização de bobinas

1. Espira

2. Bobinas com núcleo cilíndrico
3. Toroidal

### **Válvulas Solenóides.**

São equipamentos que em funcionamento nos processos industriais, auxiliam em geral os mais variados dispositivos, nas suas seqüências de comando a distância.

#### **- Funcionamento:**

A válvula é aberta ou fechada pelo movimento do núcleo, que trabalha em oposição a uma mola, atraído pela bobina quando a mesma é energizada.

#### **- Tipos de válvulas (Solenóides utilizadas para controle automático).**

- Válvulas de duas vias;
- Válvulas de três vias;
- Válvulas de quatro vias e
- Válvula de rearme normal.

#### **-Válvulas de Duas Vias.**

Tem uma conexão de entrada e uma de saída. Proporcionam vedação total, abrem e fecham

um orifício em função do comando elétrico.

### **- Válvulas de Três Vias.**

Têm três conexões e dois orifícios, um estará sempre fechado enquanto o outro estiver aberto e vice-versa. Estas válvulas podem ser usadas para aplicar ou exaurir pressão de uma válvula

operada por motor a diafragma ou operada por cilindros de simples efeito, com retorno à mola. Têm aplicações para selecionar ou dirigir fluxos através de suas conexões.

### **- Válvulas de Quatro Vias.**

São geralmente utilizadas para comando de cilindros de duplo efeito. Estas válvulas têm qua-

tro conexões: uma de pressão, duas para cilindro e uma de exaustão.

Em uma posição da válvula, sempre em função do comando elétrico, a pressão é aplicada a um lado do cilindro e do outro lado é conectado a exaustão.

Na outra posição da válvula a pressão e exaustão, se invertem. As válvulas-solenóides de quatro vias são construídas com bobina única ou dupla, para atender a diferentes requisitos de

comando e segurança..

### **- Válvulas de Rearme Manual.**

A válvula de rearme deve ser operada manualmente. Ela retornará à posição original quando o solenóide for energizado ou desenergizado, dependendo da construção da válvula.

## **Capítulo 13 – Válvulas de Controle**

### **Introdução**

O elemento final de controle é um mecanismo que atua no processo comandado pelo sinal emitido pelo instrumento controlador, com a finalidade de corrigir ou reduzir ao mínimo o desvio acusado no valor da variável controlada.

Na maioria dos casos, esse elemento final de controle é uma “válvula de diafragma” ou “válvula automática de regulação”, geralmente conhecida por “**válvula de controle**”.

Quer nos sistemas pneumáticos, quer nos sistemas eletrônicos de controle a válvula de controle (pneumática) é usada. Isso se deve ao fato de que ela pode controlar vazões com muita precisão, de modo contínuo.

### **Descrição e princípio de funcionamento**

Uma válvula de controle, de um modo geral, é constituída de dois conjuntos:

1. Parte motora ou atuador;
2. Corpo.

Conforme a figura ao lado, o atuador consta de uma câmara metálica contendo um diafragma flexível, de uma mola alcance ajustável, de uma haste de acionamento presa ao diafragma de um indicador de posição de abertura da válvula.

O corpo é a parte colocada na tubulação para variar o agente de controle.

Internamente possui uma ou duas restrições à passagem do produto, chamadas sedes ou assentos da válvula.

Um ou dois obturadores (plugues e tampões) colocados numa das extremidades da haste operam na sede ou sedes da válvula.

O funcionamento da válvula de controle é o seguinte: o sinal de ar modulado enviado pelo controlador pressiona o diafragma, vencendo a contra-pressão exercida pela mola, até atingir uma condição de equilíbrio.

Assim, a válvula tem seu curso variando desde a posição aberta até a posição fechada quando o “plug” toca a sede. Externamente, o indicador preso à haste indica a posição da válvula na escala presa ao atuador.

#### **Ação das válvulas de controle**

As válvulas de controle podem ter duas diferentes ações:

1. Ar abre;
2. Ar fecha.

Uma das razões importantes dessas ações é o fator segurança quando a válvula está colocada num determinado sistema processual. Explicando: Consideramos a falta de ar (por exemplo, falha no suprimento) como uma condição possível e em tal caso a posição tomada automaticamente pela válvula de controle deverá ser escolhida de modo que seja a mais segura para o processamento ou equipamento.

Essas ações dependem, em resumo, da disposição relativa entre sede, plug e atuação pneumática por cima ou por baixo do diafragma.

Muitas válvulas podem ter a sua ação invertida apenas trocando-se de posição a sede e o plug.

Dessa necessidade das ações da válvula decorreu a existência das ações do instrumento **controlador**, as quais são as seguintes:

1. Ação direta;
2. Ação inversa.

Define-se como sendo de “ação direta” um controlador cujo sinal de saída (correção) aumenta ou diminui quando o sinal de entrada (variável medida), aumenta ou diminui, respectivamente.

Um controlador tem “ação inversa” quando o sinal de saída aumenta ou diminui quando a variável medida diminui ou aumenta, respectivamente.

#### **Tipos de válvulas de controle**

As válvulas de controle têm várias classificações quanto ao tipo. Vejamos algumas.

#### **Válvulas de sede simples e de sede dupla**

A de sede simples tem a vantagem de maior vedação à passagem do fluxo na posição fechada, em pressões relativamente pequenas.

Como desvantagem apresenta a possibilidade de não fechar completamente quando o fluido do processo tem altas pressões.

A válvula de dupla sede na qual a pressão do produto do processo, praticamente, atua em sentidos opostos sobre a haste, não tem dificuldades para atingir a posição fechada.

A desvantagem deste tipo aparece apenas em caso de diferença na sincronização de fechamento (passagem por uma das sedes).

As figuras abaixo mostram esses tipos de válvulas de controle.



*Válvula de controle Válvula de controle com 2 plugues*

### **Válvulas quanto às curvas características**

Definimos a “curva característica” de uma válvula como sendo a relação entre a vazão que ela deixa passar e a abertura da mesma.

A mais simples de todas é chamada tipo “abertura rápida” (*on-off*).

Estas válvulas são adequadas para sistemas de controle de duas posições, sistemas de controle de nível de um processo de grande capacitância.

A válvula de característica “igual porcentagem” é uma das mais usadas no controle automático dos processos.

Seu nome deriva do fato de que para iguais incrementos na abertura, a válvula deixa passar iguais incrementos de vazão.

A justificativa da grande aplicação deste tipo de válvula se deve ao fato de que o processo é sensivelmente afetado por uma mesma variação de vazão em relação a vazão inicial, quer isto se verifique com a válvula no início ou no fim do seu curso.

Esta válvula é adequada para:

1. Controlador proporcional com F.P., larga;
2. Processos de pequena capacitância;
3. Processos, onde a carga é muito variável;
4. Controle de vazão, de temperatura e de nível, em geral;
5. Controle de razão de vazões.

Como desvantagens apenas por ser de confecção cara e não ser adequada para fluidos sujos, pois o acúmulo de resíduos altera sensivelmente a sua característica.

#### **Válvula agulha**

É usada para regular vazões pequenas ou de alta pressão.

#### **Válvula de característica linear**

Nestas válvulas a vazão praticamente varia proporcionalmente com a abertura da mesma.

São adequadas para controladores proporcionais com ganho 1 indo até 4 (F.P.= 25%), ou para processos com capacitância média onde as condições de operação não variam muito.

### Válvulas “Saunders” e borboleta

Têm aplicações específicas, bem como as válvulas de 3 vias.

## **Capítulo 14 – Posicionadores**

Certos sistemas de controle exigem das válvulas um comportamento mais crítico e daí o emprego de **posicionadores**.

**Posicionadores** são dispositivos capazes de receber o sinal de saída do controlador e enviar para a cabeça da válvula um sinal equivalente ou diferente, porém guardando alguma relação com o mesmo.

Seu emprego justifica-se:

1. Para vencer o atrito na haste da válvula, por exemplo quando a gaxeta é apertada para evitar vazamento;
2. Para diminuir o atraso de resposta do atuador de grande capacidade ou distante do controlador;
3. Para inverter a ação do controlador;
4. Para alterar a faixa do sinal do controlador.

Os posicionadores em geral, consistem de um fole que recebeu o sinal do controlador, uma alavanca que transmite a posição da haste ao fole e um sistema de relé piloto com conjunto bico-palheta.

## **Acessórios de uma Válvula de Controle**

Como acessórios podemos definir, determinados dispositivos que são ligados às válvula, para obter determinadas adaptações com o sistema de controle ou sofisticações quanto à operação da controlabilidade.

Os principais tipos de acessórios utilizados são os posicionadores, válvulas solenóides, reguladores de ar, transdutores eletropneumáticos, volantes auxiliares manuais, etc.

Dentre todos, é sem dúvida alguma o posicionador o mais comumente utilizado, sendo que em alguns tipos de válvulas, realmente deixa de ser considerado como acessórios, passando a ser parte integrante da própria válvula. O posicionador pode ser pneumático ou eletropneumático.

### **- Posicionador Pneumático**

Define-se como posicionador a um dispositivo que transmite a pressão de carga ao atuador, permitindo posicionar a haste de válvula no valor exato determinado pelo sinal de controle.

#### **POSICIONADOR PNEUMÁTICO MONTADO NUMA VÁLVULA DE CONTROLE TIPO GLOBO.**

Um dos maiores enganos é o de julgar, precipitadamente que uma válvula de controle com posicionador venha a desempenhar a sua função de melhor forma. Isto pode, talvez acontecer porém a afirmação é duvidosa. A sua utilização nas válvulas, que não precisam obrigatoriamente de seu uso, deve ser criteriosa, pois às vezes o controle torna-se mais estável e com melhor desempenho sem a utilização do posicionador na válvula. Isto se deve ao fato de que, sendo o posicionado um elemento que contribui com uma constante de tempo adicional à malha de controle, torna-se um pouco mais difícil o ajuste global para um desempenho dinamicamente estável. Um posicionador opera adequadamente quando o seu tempo de resposta junto com a válvula é muito

mais rápido que o do processo. Em outras palavras, a frequência oscilatória do circuito de controle, respondendo a um distúrbio no processo, deve ser no mínimo 5 a 10 vezes menor que a largura da banda do controlador.

Certos sistemas lentos necessitam do uso de posicionadores nas válvulas. Tais sistemas seriam o controle da temperatura, controle de nível líquido, controle de vazão de gás e mistura. Em outros sistemas mais rápidos, tais como o controle de pressão de um líquido ou de vazão de líquido, um "booster" amplificador é normalmente utilizado com sensíveis vantagens.

ESQUEMA DE UMA VÁLVULA OPERANDO: (A) SEM POSIONADOR E (B) COM POSICIONADOR.

#### \* **Aplicações Recomendadas da Utilização do Posicionador.**

São, basicamente os seguinte motivos da necessidade da utilização de um posicionador numa válvula de controle.

\* Para compensar a força gerada pelo atrito:

Nas aplicações em processos de alta pressão ou aplicações outras onde a gaxeta seja bastante apertada para evitar vazamentos, há o surgimento de um atrito considerável contra a haste, produzindo-se um histerese e tempo morto maior que o limite normalmente aceito. Nesses casos, aconselha-se a utilização de um posicionador para enviar maior volume de ar, compensado de atraso na resposta da válvula devido às excessivas forças de atrito nas gaxetas.

\* Para aumentar a velocidade de resposta da válvula:

Se uma válvula de controle for operada diretamente por um controlador pneumático, a velocidade de operação da válvula depende de: a) distância entre controlador e válvula, e diâmetro da tubulação dos sinal do controlador à válvula; b) volume do atuador , c) capacidade do relé do controlador.

Ao utilizarmos um posicionador na válvula, o sinal do controlador indo diretamente ao posicionador, e este não requer um volume de ar muito grande, evitaremos o transporte de grandes quantidades de ar entre o controlador e o posicionador. Isso faz aumentar a velocidade de resposta da válvula. Geralmente, o relé piloto do posicionador possui uma área de passagem maior que a do controlador e, portanto, o ar do posicionador para a válvula desloca-se mais rapidamente e em maior volume obtendo-se, assim, também, maior velocidade na resposta da válvula.

\* Para permitir uma operação de faixa dividida ( "splitrange "):

As vezes é desejável operar uma válvula de controle, utilizando-se apenas de uma parte da faixa do sinal de saída do controlador. Isto pode ser realizado se especificarmos um posicionador para esta utilização particular. Um arranjo comum é o de ter uma válvula e um posicionador operando sobre 3 a 9 psig de sinal de saída do controlador, enquanto que outra válvula e posicionador opera sobre 9 a 15 psig de saída do mesmo controlador.

\* Para inverter a ação da válvula:

Um posicionador cuja pressão de ar de saída aumenta conforme aumenta o sinal de entrada, é denominado de posicionador de ação direta. Um posicionador cujo o sinal de saída diminui conforme aumenta o sinal de entrada, é denominado de posicionador de ação inversa. A mudança de ação do posicionador é facilmente realizado no próprio campo.

\* Para modificar a característica de vazão da válvula:

A maioria dos posicionador são lineares, isto é, eles mudam a posição da haste da válvula linearmente em relação ao sinal de saída do controlador.

Contudo, alguns posicionadores possuem meios geralmente um excêntrico de mudar essa relação linear, e portanto, alteram característica de vazão da válvula.

Natureza do meio fluído: Se o fluído do processo tende a grudar ou aglomerar-se nas partes da válvula, provocando um aumento do atrito entre as partes móveis o uso do posicionador é recomendado para proporcionar força adicional necessária para vencer esses atritos.

Podemos concluir, do acima exposto que, basicamente, a utilização de um posicionador acoplado à válvula de controle nos assegura que, a posição do obturador de válvula seja sempre proporcional ao valor e pressão de saída do controlador, independente das forças de atrito na gaxeta,, histerese do atuador a diafragma ou forças de desequilíbrio do fluído sobre o obturador da válvula.

Um posicionador contudo não pode corrigir um mau desempenho, quando:

I - A válvula de controle é super ou subdimensionada.

II - O controlador possui uma excessiva banda morta e histerese:

III - A resposta dinâmica do sistema completo de um controle é muito lenta para satisfazer os desejados requisitos do processo que está sendo controlado.

#### **- Limitações no Uso do Posicionador**

As alterações e uso recomendados que foram mencionados são considerados tradicionais. Contudo, recentes estudos e pesquisas têm indicado que, o uso de um posicionador pode prejudicar a qualidade do controle em processo rápidos, tais como: pressão e vazão de líquidos. Onde, necessita-se, por exemplo, de maiores pressões de ar, para efeito de fechamento da válvula ou de maior rapidez de operação, está recomendando-se a utilização do "booster" no lugar do posicionador.

Para processos lentos, como a maioria dos sistemas térmicos, (nível de líquido e alguns processos de pressão de grande volume de gás), o posicionador deve melhorar a qualidade do control.

## **Capítulo 15 – Sistemas de Controle Automático**

Geralmente, existem várias condições internas e externas que afetam o desempenho de um processo. Estas condições são denominadas de variáveis de processo, tais como: temperatura, pressão, nível, vazão, volume, etc. Um processo pode ser controlado através de um sistema de controle medindo-se variáveis, parâmetros que representam o estado deste processo, ajustando-as automaticamente de maneira a se conseguir um valor que representa o estado desejado para este processo. As condições de ambiente devem sempre ser incluídas na relação de variáveis do processo.

### **DEFINIÇÕES**

1. Variável controlada: é a grandeza ou condição que é medida ou controlada. Normalmente é a saída do sistema;
2. Variável manipulada: é a grandeza ou condição que é variada pelo controlador de modo a afetar o valor da variável controlada;
3. Controle: medição do valor da variável controlada do sistema e aplicação da variável manipulada ao sistema para corrigir ou limitar o desvio do valor medido de um valor desejado;
4. Plantas: é uma parte do equipamento ou um conjunto de itens de uma máquina que funcionam juntos, cuja finalidade é desempenhar uma dada operação (qualquer objeto físico a ser controlado);
5. Processo: qualquer operação a ser controlada;
6. Sistema: é uma combinação de componentes que atuam conjuntamente e realizam um certo objetivo;
7. Perturbação ou distúrbio: é um sinal que tende a afetar adversamente o valor da saída do sistema. Uma perturbação é considerada externa quando é gerada fora do sistema e constitui uma entrada;
8. Sistema de controle de processos: é um sistema regulador automático no qual a saída é uma variável controlada;
9. Sistema regulador automático: é um sistema de controle em que a entrada de referência ou a saída desejada, ou é constante ou varia lentamente com o tempo. Além disso, a tarefa principal consiste em manter a saída real no valor desejado na presença de perturbações;

10. Servossistema ou servomecanismo: é um controle em que a saída é uma posição mecânica, velocidade ou aceleração;
11. Sistema de controle em malha fechada: muitas vezes também chamado de sistema de controle realimentado, está intimamente relacionado com o erro do sistema. O sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal realimentado (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e suas derivadas), é introduzido no controlador de modo a reduzir o erro, trazendo a saída do sistema a um valor desejado;
12. Sistema de controle em malha aberta: é o sistema em que a saída não tem nenhum efeito sobre a ação de controle, ou seja, a saída não é medida nem realimentada para comparação com a entrada;
13. Sistema de controle adaptativo: é o sistema que possui a capacidade de detectar variações nos parâmetros da planta, fazendo os ajustes necessários nos parâmetros do controlador a fim de manter um desempenho ótimo. Adaptação significa auto-ajustar, uma vez que em muitos sistemas, as características dinâmicas não são constantes devido a várias razões (deterioração de componentes ao longo do tempo ou variações nos parâmetros e no ambiente). Portanto, são sistemas que levam em conta as suas características dinâmicas, desde modo, aumentando a sua confiabilidade;
14. Sistema de controle de aprendizado: são sistemas de controle que possuem uma habilidade para aprender;

## **PRINCÍPIOS BÁSICOS DE PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE**

Qualquer sistema de controle deve ser estável. Esta é uma exigência primordial. Além da estabilidade absoluta, um sistema de controle deve Ter uma estabilidade relativamente razoável; assim, a resposta deve apresentar amortecimento razoável. Além disso, a velocidade de resposta deve ser razoavelmente rápida e o sistema de controle deve ser capaz de reduzir erros a zero ou a algum valor pequeno tolerável.

A exigência da estabilidade relativa razoável está relacionada a exigência de precisão no estado estacionário, razão de incompatibilidade entre esses dois fatores. Portanto, no projeto de sistemas de controle, é necessário fazer o compromisso mais efetivo entre estas duas exigências.

Existem duas teorias de controle: clássica e moderna. A primeira teoria utiliza o conceito de função de transferência. A análise e projeto são feitos no domínio "s" e/ou no domínio de frequência, entretanto, não pode manipular sistemas de controle com entradas e saídas múltiplas. A Segunda, baseia-se no conceito de espaço de estados, utilizando-se a análise vetorial-matricial. A análise e o projeto são feitos no domínio do tempo

Os componentes envolvidos nos sistemas de controle são amplamente diferentes. Eles podem ser eletromecânicos, hidráulicos, pneumáticos, eletrônicos, etc. Em engenharia de controle, em vez de tratar os dispositivos de "hardware", substitui-se os tais dispositivos ou componentes pelos seus modelos matemáticos.

Obter um modelo matemático razoavelmente preciso de um componente físico é um dos problemas mais importantes em engenharia de controle. Um modelo matemático não deve ser nem muito complicado nem muito simplificado. Um modelo matemático deve representar os aspectos essenciais de um componente físico. As previsões do comportamento do sistema baseadas no modelo matemático devem ser razoavelmente precisas. Embora as relações entre entrada-saída de muitos componentes sejam não-lineares, normalmente lineariza-se tais relações em torno de pontos de operação, limitando a faixa de variáveis para ser pequena - facilitando o tratamento analítico e computacional.

A análise de um sistema de controle corresponde a investigação, sob condições específicas, do desempenho do sistema cujo modelo matemático é conhecido. Visto que qualquer sistema é constituído de componente, a análise deve começar por uma descrição matemática de cada componente. Uma vez que o modelo matemático do sistema completo tenha sido deduzido, a maneira pela qual a análise é executada independe do fato do sistema físico ser pneumático, elétrico, mecânico, etc. Por análise da resposta transitória geralmente determina-se as respostas de uma planta para comandar entradas e entradas de perturbações. Por análise no estado estacionário determina-se a resposta depois da resposta transitória ter desaparecido.

Projetar um sistema significa achar um sistema que realize uma dada tarefa. Se as características da resposta dinâmica e/ou as características no estado estacionário não forem satisfatórias, deve-se adicionar um compensador ao sistema. Em geral, um projeto de um compensador adequado não é direto, mas exigirá métodos experimentais.

Nos últimos anos, os computadores digitais têm representado um papel importante na análise, no projeto e na operação de sistemas de controle. O computador pode ser usado para executar computações necessárias, para simular uma planta ou componentes de sistema, ou para controlar um sistema. O controle por computador tem se tornado cada vez mais comum, e muitos sistemas de controle industriais, sistemas de aviação e sistemas de controle de robôs utilizam controladores digitais.

O método básico para o projeto de qualquer sistema de controle prático necessariamente envolverá procedimentos experimentais. A síntese de sistemas de controle linear é teoricamente possível, e o engenheiro de controle pode determinar sistematicamente os componentes necessários para desempenhar o objetivo dado. Na prática, no entanto, o sistema pode ser submetido a muitas restrições ou pode ser não-linear, e em tais casos nenhum dos métodos de síntese está disponível atualmente. Além disso, as características dos componentes podem não ser precisamente conhecidas. Assim, procedimentos experimentais são sempre necessários.

O engenheiro de controle deve satisfazer as especificações dadas na realização de uma tarefa. Estas especificações podem incluir fatores tais como a velocidade de resposta, amortecimento razoável, precisão do estado estacionário, confiabilidade e custos. Todos os requisitos devem ser interpretados em termos matemáticos, não se esquecendo de certificar de que o sistema de malha fechada é estável e tem características aceitáveis na resposta transitória (velocidade e amortecimento razoável) e precisão aceitável no estado estacionário.

A especificação do sinal de controle sobre o intervalo de tempo de operação é chamado lei de controle. Matematicamente, o problema básico de controle é determinar a lei do controle ótimo, sujeita a várias restrições de engenharia e de economia, o que minimiza (ou maximiza, conforme possa ser o caso) um dado índice de desempenho. Este índice de desempenho pode ser uma integral de uma função variável de erro que deve ser minimizada.

## **ETAPAS DO PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE**

Dada uma planta, deve-se primeiro escolher sensores e atuadores apropriados. Deve-se obter modelos matemáticos da planta, dos atuadores e dos sensores. Então, usando o modelo matemático obtido, projeta-se um controlador tal que o sistema em malha fechada satisfaça as especificações dadas. O controlador projetado é a solução para a versão matemática do problema de projeto. Neste estágio, a teoria de controle ótimo é muito útil porque fornece o limite superior de desempenho do sistema para um dado índice de desempenho.

Depois do projeto matemático ter sido concluído, o engenheiro de controle simula o modelo em um computador para testar o comportamento do sistema resultante em resposta a vários sinais e perturbações. Usualmente, a configuração inicial do sistema não é satisfatória. Então o sistema deve ser reprojetoado e a análise correspondente concluída. Este processo de projeto e análise é repetido até que um sistema satisfatório seja obtido. Então, pode-se concluir o sistema físico do protótipo.

Este processo de construção de um protótipo é o inverso daquele de modelamento. O protótipo é um sistema físico que representa o modelo matemático com razoável precisão. Uma vez que o protótipo tenha sido construído, o engenheiro o testa para ver se ele é ou não satisfatório. Se for, o projeto está concluído. Se não, o protótipo deve ser modificado e testado novamente. Este processo continua até que o protótipo seja completamente satisfatório.

No caso de alguns sistemas de controle de processo, formas padronizadas de controladores, tais como controladores PD (proporcional-mais-derivativo), PI (proporcional-mais-integral) e PID (proporcional-mais-integral-mais-derivativo) podem ser usados. Os parâmetros do controlador são determinados experimentalmente seguindo um procedimento padrão estabelecido. Neste caso, não são necessários modelos matemáticos. No entanto, este é um caso tanto especial..

Os controladores analógicos industriais podem ser classificados, de acordo com a ação de controle, como:

- Controladores de duas posições ou liga-desliga (on-off);
- Controladores proporcionais;
- Controladores do tipo integral;
- Controladores do tipo proporcional-mais-integral;
- Controladores do tipo proporcional-mais-derivativo;
- Controladores do tipo proporcional-mais-integral-mais derivativo;

Em um sistema de controle de duas posições, o elemento atuante possui apenas duas posições fixas que são, em muitos casos, simplesmente ligado e desligado (do inglês, on-off). O controle de duas posições é relativamente simples e barato e, por esta razão, extremamente utilizado, tanto em sistemas de controle industriais, como domésticos. São geralmente dispositivos elétricos, e uma válvula operada por solenóide elétrico é extensivamente usada nestes controladores. O tamanho do intervalo diferencial deve ser determinado a partir de considerações relativas à precisão exigida e à vida do componente.

Para um controlador com ação de controle proporcional, a relação entre a saída do controlador,  $u(t)$ , e o sinal de erro atuante,  $e(t)$ , é igual a uma constante,  $K_p$ , denominada sensibilidade proporcional ou ganho. Independentemente do mecanismo real, ou da forma da potência de operação, o controlador proporcional é essencialmente um amplificador com um ganho ajustável.

Em um controlador com ação de controle integral, o valor da saída do controlador,  $u(t)$  é variado em uma taxa proporcional ao sinal de erro atuante,  $e(t)$ . A Eq. 1 apresenta esta taxa de variação, onde  $K_i$  é a constante ajustável do controlador integral. A ação de controle integral é muitas vezes denominada controle de restabelecimento (reset).

A ação de controle de um controlador proporcional-mais-integral é definida pela Eq. 2, onde  $T_i$  é chamado tempo integral. Tanto  $K_p$  como  $T_i$  são ajustáveis. O tempo integral ajusta a ação de controle integral, enquanto uma mudança no valor de  $K_p$  afeta tanto a parte proporcional, como a parte integral da ação de controle. O inverso do tempo integral  $T_i$  é denominado taxa de restabelecimento (reset), que é o número de vezes, por minuto, que a parte proporcional da ação de controle é duplicada. Esta taxa é medida em termos de repetições por minuto.

(2)

A ação de controle de um controlador proporcional-mais-derivativo é definida pela Eq. 3, onde  $T_d$  é chamado tempo derivativo. Tanto  $K_p$  como  $T_d$  são ajustáveis. O tempo derivativo é o intervalo de tempo pelo qual a ação de taxa avança o efeito da ação de controle proporcional. A ação de controle derivativa, algumas vezes denominada controle de taxa, é onde a magnitude da saída do controlador é proporcional à taxa de variação do sinal de erro atuante. Sua ação tem o caráter antecipatório, entretanto, a ação de controle derivativo nunca pode antecipar uma ação que ainda não ocorreu. Porém, possui a desvantagem de amplificar os sinais de ruído e causar efeito de saturação no atuador. Logo, nunca se usa este controle sozinho porque somente é efetivo durante os períodos transitórios.

(3)

A ação de controle de um controlador proporcional-mais-integral-mais-derivativa é uma combinação da ação de controle proporcional, ação de controle integral e ação de controle derivativa, definida pela Eq. 4. Esta ação combinada possui as vantagens de cada uma das três ações de controle individuais.

(4)

## EFEITOS DAS AÇÕES DE CONTROLE INTEGRAL E DERIVATIVA SOBRE O DESEMPENHO DO SISTEMA

No controle proporcional de um processo cuja função de transferência não possui um integrador,  $1/s$ , há um erro em regime estacionário, ou desajuste, na resposta à entrada ao degrau. Este desajuste pode ser eliminado se for incluída no controlador uma ação de controle integral.

No controle integral de um processo, o sinal de saída do controlador, em qualquer instante é igual à área sob a curva sinal de erro atuante até aquele instante. A FIG. 4 mostra os efeitos de um controlador integral e de um controlador proporcional em um sistema. Observa-se que a ação de controle integral, embora remova o desajuste ou erro em regime estacionário, pode resultar em uma resposta oscilatória com amplitude lentamente decrescente ou mesmo com amplitude crescente, ambas usualmente indesejáveis.

Curvas de erro,  $e(t)$ , e sinal de saída,  $u(t)$ , de controlador

1. Controle integral
2. Controle proporcional

FONTE: Ogata, 1993, p.175

O erro em regime estacionário pode ser reduzido pelo aumento do valor do ganho  $K_p$ . O aumento deste valor, entretanto, resultará em uma resposta mais oscilatória do sistema. Já que o valor do ganho não pode ser demasiadamente aumentado, é desejável modificar o controle proporcional para um controle proporcional-mais-integral. Curvas de respostas típicas para um pequeno e um grande valor de  $K_p$  são mostrados:

Curvas de resposta típicas para o distúrbio de torque em degrau

FONTE: Ogata, 1993, p.176

Se for adicionado ao controlador uma ação de controle integral, então, enquanto houver um sinal de erro, haverá um sinal desenvolvido pelo controlador para reduzir este erro, desde que o sistema de controle seja estável. Logo, a ação de controle proporcional tende a estabilizar o sistema, enquanto a ação de controle integral tende a eliminar ou reduzir o erro em regime estacionário em resposta a várias entradas.

A ação de controle derivativa, quando adicionada a um controlador proporcional, possibilita um meio de obter um controlador com alta sensibilidade. Uma vantagem em usar ação de controle derivativa é que ela responde à taxa de variação do erro atuante e pode produzir uma correção significativa antes de o valor do erro atuante tornar-se demasiadamente grande. O controle derivativo, portanto, antecipa o erro atuante e inicia uma ação corretiva mais cedo, tendendo a aumentar a estabilidade do sistema.

Embora o controle derivativo não afete diretamente o erro em regime estacionário, ele produz amortecimento no sistema e portanto, permite o uso de um valor maior de ganho do sistema, o que resulta em uma melhora na precisão em regime estacionário.

Devido ao fato de o controle derivativo operar sobre a taxa de variação do erro atuante e não sobre o próprio erro atuante, este modo nunca é usado sozinho. É sempre utilizado em combinação com ação proporcional ou ação proporcional-mais-integral.

**CONTROLADOR AUTOMÁTICO, ATUADOR E SENSOR**

A FIG. A é um diagrama de blocos de um sistema de controle industrial, que consiste em um controlador automático, um atuador, uma planta e um sensor (elemento de medição). O controlador detecta o sinal de erro atuante, que usualmente está em um nível de potência muito baixo, e o amplifica até um nível suficientemente alto. Junto com o amplificador, pode-se alterar o sinal de erro atuante amplificando-o e às vezes diferenciando e/ou integrando-o para produzir um melhor sinal de controle.

**Figura A - Diagrama de blocos de um sistema de controle automático**

FONTE: Ogata, 1993, p.147

O atuador é um dispositivo de potência que produz a entrada para a planta de acordo com o sinal de controle, de modo que o sinal de realimentação corresponderá ao sinal de entrada de referência. A saída de um controlador automático é introduzida em um atuador, tal como um motor hidráulico ou válvula pneumática ou motor elétrico.

O sensor ou elemento de medição é um que converte a variável de saída em uma outra variável adequada, tal como um deslocamento, uma pressão ou uma tensão (voltagem), que pode ser usada para comparar a saída ao sistema de entrada de referência. Este elemento está no caminho de realimentação do sistema de malha-fechada. O ponto de ajuste do controlador deve ser convertido a uma entrada de referência com as mesmas unidades que o sinal de realimentação proveniente do sensor ou elemento de medição.

### **Controle Cascata\***

Uma das técnicas para melhorar a estabilidade de um circuito complexo é o emprego do controle tipo cascata. Sua utilização é muito conveniente quando a variável controlada não pode manter-se no valor desejado, pôr melhores que sejam os ajustes do controlador, devido`as perturbações que se produzem em virtude das condições do processo. Quando a temperatura media se desvia do set-pont, o controlador varia a posição da válvula de vapor; e se todas as características do vapor permanecerem constantes, o controle será satisfatório. Entretanto, se uma das características (pôr exemplo, a pressão da linha) variar, a vazão através da válvula também variará, embora tivéssemos a válvula fixa. Teremos uma mudança da temperatura do trocador de calor, e após um certo tempo (dependendo das capacitância, resistência e tempo de transporte do processo), a variação da temperatura chegará ao controlador, o qual reajustará a posição da válvula de acordo com a ações de que dispusermos)

### **Controle Razão\***

Como o próprio nome indica, temos neste tipo de controle uma razão entre duas variáveis. No controle de razão ou relação, uma variável é controlada em relação a uma segunda variável. Controle Razão ( uma aplicação típica do controle de relação de duas vazões de ar / óleo na malha de combustão em uma caldeira ou forno)

O controle de cascata é somente um método que melhora o controle de uma variável, e que o controle de relação ou razão satisfaz uma necessidade especifica no processo entre duas grandezas.

O sinal do Transmissor de Vazão é multiplicado pôr um fator manual ou automaticamente. O sinal de Saída do multiplicador será o set-pont do controlador de vazão do fluido secundário, o qual atuara diretamente no controlador, onde teríamos então uma razão fixa.

### **Controle razão com set-pont remoto (fator)\***

A malha apresenta a seguir é uma associação do controle cascata com o controle razão, sendo que a razão é determinada através do sinal de um analisador.O nível é afetado pela vazão A e por B indiretamente. O lic atuará na vazão A a qual irá atuar no Fic B em proporção determinada pelo AIC.

### **Controle Override\***

Empregamos este tipo de controle para limitar a variável do processo entre dois valores, com o objetivo de evitar danos ao processo ou produto. Entre as aplicações típicas encontramos a do bombeamento em oleoduto.

Neste tipo de controle temos dois controladores de pressão: um na sucção da bomba e o outro na descarga da bomba, cujos sinais de saída são selecionados por um rele seletor ( passa baixa) , o qual atuará na válvula de controle. Empregamos este sistema quando estivermos diante de duas ou mais condições de anormalidade. O controle na válvula será feito pela condição anormal que existir.

### **Controle Split-range\***

No controle split-range ou ranger dividido normalmente se envolvem duas válvulas de controle operadas por um mesmo controlador. Neste tipo de controle teremos basicamente quase sempre uma das duas condições a seguir.

A primeira, quando temos uma malha de controle com uma variável atuando dentro de uma faixa prefixada, a saída da variável desta faixa provocando a intervenção de uma segunda variável.

Pode-se este tipo de controle aplicado a dois trocadores de calor ligados em serie. O processo se utiliza para aquecer um produto cuja vazão sofre muita variação. Quando houver vazão baixa, basta apenas um trocador de calor para aquecer o produto, e quando houver vazão alta, teremos necessidade de utilizar os dois trocadores de calor.

Suponhamos que, do ponto de vista de segurança, as válvula devam fechar em caso de falta de ar; teremos então o controlador de ação reversa ( ao se aumentar a temperatura, diminui-se o sinal de saída). Se a vazão do produto é baixa , atuara a válvula de vapor V-1 porque teremos o sinal de saída do controlador compreendido entre 50 e 100% ( 9 - 15 PSI ). A medida que aumenta a vazão, o controlador de temperatura diminui o seu sinal de saída, até que, quando tivermos o sinal menor que 50% ( 9 PSI ), a válvula V-1 permanecerá

totalmente aberta; teremos, então o primeiro trocador trabalhando no maximo de seu rendimento, e teremos a válvula V-2 começando a se abrir e iniciando o funcionamento do segundo trocador. Quando tivermos o maximo de vazão determinada, teremos duas válvulas totalmente abertas e os dois trocadores trabalhando no maximo de sua potencia.

Vejam os exemplos de um tanque que tivesse sua pressão controlada através de uma injeção de  $N_2$ . Caso tivéssemos necessidade de reduzir a pressão no tanque e o simples fechamento total da válvula de  $N_2$  não fosse suficiente para baixá-la, o controlador de pressão atuaria em uma válvula de purga para a atmosfera, baixando conseqüentemente a pressão do vaso.

Normalmente na passagem de uma condição limite para a entrada da 2ª válvula, temos uma faixa “ morta ” de aproximadamente 5%, sendo que o valor desta faixa varia com a sua aplicação

### **Controle de limites Cruzados\***

Utilizamos o controle de limite cruzados quando há uma certa seqüência na manipulação de variáveis, sendo prioritário o comprimento desta seqüência.

Este tipo de Controle é bastante utilizado em malhas de controle de combustão em caldeiras e fornos em geral. Utilizamos este tipo de controle quando temos duas variáveis atuando em paralelo, sendo que é exigido que uma delas atue sempre em antecipação a segunda variável; poderíamos citar como exemplo uma aplicação típica no controle de combustão em uma caldeira.

A variável principal é a pressão de vapor que deve ser mantida em um valor constante predeterminada. O sinal de saída do controlador de pressão atuará como set-point remoto para as vazões de combustível e ar de combustão.

Quando tivermos baixa pressão na caldeira, teremos, por parte do controlador de pressão, uma solicitação de combustível e ar. Entretanto, a admissão destes deve obedecer a uma certa seqüência, ou seja, primeiramente teremos a entrada do ar de combustão para posterior entrada do combustível. Em condições opostas, poderíamos provocar avarias na caldeira ou forno, caso a entrada do ar sofresse um atraso ponderável.

Na solicitação de diminuição das vazões ( combustível e ar ) por parte do controlador, teríamos então condições inversa: primeiramente “ sairia ” o combustível para posterior saída do comburente

### **Controle de combustão em Paralelo com Duplo Limite Cruzado.**

A técnica de controle em paralelo em duplo limite cruzado, é hoje a mais inovadora aplicação em termos de controle de combustão. Neste tipo de controle, o controlador de temperatura atua em cascata e em paralelo nos controladores de ar e combustão. Em operação normal, a malha funciona como um típico controle em cascata paralelo. Mais, é nos transientes que suas vantagens são sentidas. Este controle permite determinar o excesso máximo de ar e de gás quando ocorrer um incremento ou decremento das vazões, isto é:

- -K1 = Determina o excesso máximo de gás para desaquecer.

- +K2 = Determina o excesso máximo de ar para aquecer.
- -K3 = Determina o excesso máximo de ar para desaquecer.
- +K4 = Determina o excesso máximo de gás para aquecer.

Neste caso, como exemplo, imaginaremos a situação de falha de ar e de falta de gás. Consideramos que estamos em aquecimento, que a saída do controlador de temperatura TIC é de 80% ,que FK é igual a um (1) e que as funções de “K” se~rao ajustadas com os seguintes valores:

-K1 = 5% -K3 = 5%

+K2 = 1% +K4 =1%

a) Situação: Falha do Ar de Combustão.

- 1 - O sinal T é de 80%
  - 2 - O sinal A será de 0%
  - 3 - O sinal A1 será de 0%
  - 4 - O sinal A2 será de 0%
  - 5 - O sinal na saída do seletor “3” será de 80%
  - 6 - O sinal na saída do seletor “4” será de 0%
- Cortando a vazão de gás

B) Situação: Falha no Gás

- 1 - O sinal T é de 80%
  - 2 - O sinal G será de 80%
  - 3 - O sinal G1 será de 0%
  - 4 - O sinal G2 será de 0%
  - 5 - O sinal na saída do seletor “1” será de 80%
  - 6 - O sinal na saída do seletor “2” será de 0%
- Cortando a vazão de ar

Como podemos ver, não ocorre excesso de gás na falta de ar nem excesso de ar na falta de gás.

## **Capítulo 18 – Controladores Lógicos Programáveis**

Os Controladores Lógicos Programáveis - CLP - são um microcomputador de propósito específico dedicado para o controle de processos. Os CLP's foram desenvolvidos para o controle de sistemas com entradas e saídas binárias (de dois estados apenas: ligado - desligado, alto - baixo, etc.); porém, hoje têm adquirido muitas outras funções com alta confiabilidade, como é o caso de tratamento de sinais analógicos, controle contínuo multi-variáveis, controle de posição de alta precisão, etc. Os CLP's nasceram para substituir reles na implementação de intertravamentos e controle seqüencial se especializando no tratamento de variáveis digitais. Algumas características mais relevantes dos CLP's são:

- **Caráter modular dos CLP's:** permite adequar o controlador para qualquer aplicação, já que o projetista especifica só o número e tipos de módulos que precisa de acordo com o número de entradas, saídas e outras funções, que requer o processo a ser controlado, se adequando o controlador à aplicação;
- **Flexibilidade dada pela programação:** pode ser aplicado a qualquer tipo de processo e facilmente mudadas as funções através do programa, sem mexer na instalação;
- **Comunicação:** cada fabricante possui redes de comunicação proprietárias e possibilidades para comunicação com outros CLP's ou componentes como inversores de frequência, o que possibilita a distribuição de tarefas de controle e a centralização das informações através de computadores onde rodam aplicativos de supervisão. Diversos meios físicos são possíveis: fios trançados, fibras ópticas ou ondas de rádio;
- **Redundância:** quando o sistema assim o requer, são fornecidos módulos e CPU's (Unidade Central de Processamento) redundantes (com mais de uma CPU) que garantem uma altíssima confiabilidade de operação até nos processos mais exigentes.

As linguagens de programação desenvolvidos para eles são fundamentalmente representados de três formas:

- Redes de contatos: similar aos esquemas elétricos de relês e contatores;
- Blocos funcionais: similares aos esquemas elétricos de circuitos digitais (AND, OR, XOR, etc.);
- Lista de instrução mnemônicas: similares aos programas escritos em assembler.

Os CLP's nasceram para substituir relês na implementação de intertravamentos e controle seqüencial, se especializando no tratamento de variáveis digitais. É caracterizado por:

- Fornecimento via projeto de integração;
- Sistema dividido em diversas CPU's de CLP's a fim de obter melhor performance em aplicações críticas. Redundância proporcionada pela duplicação de cartões de I/O (entrada / saída), fontes e CPU's;
- Redes de comunicação antes proprietárias, agora buscam obedecer a padrões internacionais. Uso recente de fibras óticas;
- Total liberdade de escolha de parceiros de equipamentos e engenharia;
- Programação do supervisor independente da programação do CLP;
- As variáveis devem ser definidas duas vezes: na base de dados do SCADA e no programa do CLP;
- Tecnologia em geral aberta;
- Muito eficiente no tratamento de variáveis discretas com poder e flexibilidade crescentes no tratamento de variáveis analógicas;
- Hardware e software padrões de mercado;
- Custos globais baixos quando comparado a SDCD - Sistemas Distribuídos para Controle Digital.

## **Capítulo 19 – Interface Homem Máquina**

Embora existam diversas tecnologias de controle, deve existir o interfaceamento entre o controle com o comando, proporcionando uma melhor integração do homem com a máquina. Para esta finalidade, utilizou-se com freqüência anunciadores de alarmes, sinaleiros, chaves seletoras, botoeiras, etc..., que nos permitiam comandar ou visualizar estados definidos com ligado e desligado, alto ou baixo, temperatura elevada ou normal, mas não nos permitia visualizar os valores de alto, quanto alto, ou normal quanto normal. Surgiram então os “displays” e chaves digitais (“thumbwheel switches”). Os “displays” nos permitiam visualizar os valores das variáveis do processo, bem como mudar parâmetros pré definidos, como por exemplo, temporizações através das chaves digitais.

No entanto, este tipo de interface trazia dois problemas claros, o primeiro a dimensão da superfície do painel, que por muitas vezes necessitava de ser ampliada, somente para alojar tantos botões, ou informações que eram necessárias. Com o desenvolvimento das interfaces homem-máquina – IHM - com visores alfanuméricos, teclados de funções e comunicação via serial com o dispositivo de controle, o qual muitas vezes era um computador pessoal – PC - estas traziam consigo os seguintes benefícios:

- Economia de fiação e acessórios, pois a comunicação com o CP seria serial com um ou dois pares de fio trançados, economizando vários pontos de entrada ou saída do CP, e a fiação deste com os sinaleiros e botões.
- Redução da mão-de-obra para montagem, pois ao invés de vários dispositivos, agora seria montado apenas a IHM.
- Diminuição das dimensões físicas do painel
- Aumento da capacidade de comando e controle, pois a IHM pode ajudar em algumas funções o CP, com por exemplo massa de memória para armazenar dados, etc.
- Maior flexibilidade frente a alterações no campo.
- Operação amigável
- Fácil programação e manutenção.

A evolução seguinte foi a utilização de interfaces gráficas ao invés de alfanuméricas.

Quando utilizadas, as interfaces gráficas, em alguns casos mais simples substituem os sistemas supervisórios, ou quando usadas em sistemas de controle, integradas a sistemas supervisórios, estas além das funções das IHM's alfanuméricas já citadas, executam também funções de visualização que aliviam o sistema supervisório para que a performance das funções de supervisão, alarme, tendências, controle estatístico de processo entre outras possa ser elevada.

**Logo, os** softwares que tem a finalidade de servir como uma Interface Homem Máquina, não tem a finalidade de controlar nenhuma parte da máquina ou processo, ou seja, se ocorrer qualquer problema durante a sua execução, não prejudicará a automação da máquina ou processo. Normalmente estes softwares apresentam facilidades de configuração, mas estão limitados em segurança de dados, comunicação em rede, comunicação remota, controles de processo, etc.

Os softwares que possuem as mesmas funções dos softwares IHM, além de poderem efetuar controle, distribuir informações entre estações via rede com performance e segurança, etc., são os softwares do tipo "sistema de controle e aquisição de dados"- SCADA. Estes softwares normalmente são mais robustos e confiáveis para aplicações de grandes porte e para aplicações distribuídas em varias estações.

O software de supervisão, localizado no nível de controle do processo das redes de comunicação, é o responsável pela aquisição de dados diretamente dos controladores lógico programáveis - CLP para o computador, pela sua organização, utilização e gerenciamento dos dados. Poderá ser configurado para taxas de varredura diferentes entre CLP's e inclusive, entre pontos de um mesmo CLP.

Os dados adquiridos devem ser condicionados e convertidos em unidades de engenharia adequadas, em formato simples ou de ponto flutuante, armazenando-os em um banco de dados operacional. A configuração individual de cada ponto supervisionado ou controlado, permite ao usuário definir limites para alarmes, condições e textos para cada estado diferente de um ponto, valores para conversão em unidade de engenharia, etc..

O software deve permitir que estratégias de controle possam ser desenvolvidas utilizando-se de funções avançadas, através de módulos dedicados para implementação de funções matemáticas e booleanas, por exemplo. Através destes módulos, poderá ser feito no software aplicativo de supervisão, o controle das funções do processo.

Os dados adquiridos podem ser manipulados de modo a gerar valores para parâmetros de controle como "set-point's". Os dados são armazenados em arquivos de dados padronizados. Estes arquivos poderão ser acessados por programas de usuários para realização de cálculos, alteração de parâmetros e dos seus próprios valores.

O software supervisorio é visto como o conjunto de programas gerado e configurado no software básico de supervisão, implementando as estratégias de controle e supervisão, as telas gráficas de interfaceamento homem-máquina, a aquisição e tratamento de dados do processo, a gerência de relatórios e alarmes. Este software deve ter entrada de dados manual, através de teclado. Os dados serão requisitados através de telas com campos pré-formatados que o operador deverá preencher. Estes dados deverão ser auto-explicativos e possuírem limites para as faixas válidas. A entrada dos dados deve ser realizada por telas individuais, seqüencialmente, com seleção automática da próxima entrada. Após todos os dados de um grupo ser inserido, esses poderão ser alterados ou adicionados pelo operador, que será o responsável pela validação das alterações.

A estratégia de supervisão e controle é desenvolvida com o software básico de supervisão que cria um banco de dados operacional com todos os dados de configuração do sistema. Os dados podem ser referentes a configuração da própria estratégia ou referentes aos pontos supervisionados (ou controlados). Em ambos os casos, o método e recursos utilizados para entrada de dados deve ser composta por ferramentas do tipo "Windows", com menus dirigidos, preenchimento de campos pré-formatados e múltiplas janelas.

Os dados da estratégia são gerais, afetando todo o banco, como por exemplo, a configuração de impressoras, os tipos de equipamentos conectados, as senhas, etc.. Os dados referentes aos pontos são individuais e abrangem os "TAG" (variáveis de entrada/saída - I/O - ou internas), as descrições, os limites de alarme, a taxa de varredura, etc.. Alterações podem ser realizadas com o sistema "on-line" (ligado ou à quente). Após a estratégia configurada, o software básico deve executar, gerenciar e armazenar o resultado de cálculos e operações realizadas, o estado dos pontos e todas as informações necessárias neste banco de dados.

O conjunto de telas do software de supervisão deve permitir os operadores, controlar e supervisionar completamente toda a planta. As telas deverão ser organizadas em estrutura hierárquica do tipo árvore, permitindo um acesso seqüencial e rápido. A seguir, é descrito as principais telas que o aplicativo deve conter:

- Telas de visão geral: são telas que apresentarão ao operador uma visão global de um processo, sob visualização imediata na operação da planta. Nestas telas são apresentados os dados mais significantes à operação e objetos que representam o processo. Os objetivos devem ser dotados de características dinâmicas, representando o estado de grupos de equipamentos e áreas do processos apresentado. Os dados devem procurar resumir de forma significativa os principais parâmetros a serem controlados (ou monitorados) do processo específico;
- Telas de grupo: são telas representativas de cada processo ou unidade, apresentando objetos e dados de uma determinada área de modo a relacionar funções estanques dos processos. Os objetos devem ser dotados de características dinâmicas representando o estado e/ou condição dos equipamentos da área apresentada. Os dados apresentados devem representar valores quantitativos dos parâmetros supervisionados (ou controlados). As telas de grupo também possibilita ao operador, acionar os equipamentos da área através de comandos do tipo abrir/fechar ou ligar/desligar. Além disso, o operador poderá alterar

os parâmetros de controle ou supervisão, tais como "set-point's", limites de alarme, modos de controle, etc.;

- Telas de detalhe: são telas que atendem a pontos e equipamentos controlados (ou monitorados) individualmente. Serão compostas, quando possível, por objetos com características dinâmicas, representando o estado do equipamento. Os dados apresentam todos os parâmetros do ponto supervisionado (ou monitorado). As telas devem possibilitar ao operador alterar os parâmetros do equipamento, seus limites, os seus dados de configuração, etc.;
- Telas de malhas: são telas que apresentam o estado das malhas de controle. Todas as telas devem apresentar os dados das variáveis controladas exibidas, como "set-point's", limites e condição dos alarmes, valor atual e valor calculado, etc., em forma de gráfico de barras e em valores numéricos;
- Telas de tendência - histórica e real: são telas normalmente padrão do software básico de supervisão. Estas telas apresentam várias ( em média seis) variáveis simultaneamente, na forma gráfica, com valores coletados em tempo real ("on-line"), na forma de tendência real e na forma histórica "off-line" - valores de arquivos pré-armazenados em disco. Estas tendências podem ser apresentadas em forma de gráficos ou em forma tabular, com os últimos valores coletados para cada variável;
- Telas de manutenção: são compostas por informações de problemas, alarmes, defeitos e dados de manutenção das diversas áreas referentes ao processo e equipamentos destes, incluindo o próprio sistema de controle. As informações são do tipo histórico de falhas, programa de manutenção dos equipamentos (corretiva e preventiva), e informações gerais dos equipamentos (comerciais, assistências técnica, etc.). O histórico de falhas por equipamento ou área fica armazenado em arquivos no banco de dados do software de supervisão, possibilitando o tratamento destas informações através de telas orientativas à manutenção, ou através de programas de usuário para estatísticas de utilização e defeitos.

O software básico de supervisão possui um módulo para desenvolvimento de relatórios. Criados em formatos padrão, para os relatórios do tipo históricos, permitem ao operador a escolha de quais variáveis deseja visualizar. Os dados podem ser apresentados nas telas das estações com campos de identificação para "TAG", data, hora e descrição do ponto. Os relatórios poderão ser solicitados manualmente pelo operador e destinados para impressoras ou terminais de vídeo. Os dados históricos são armazenados em arquivos de modo que podem ser acessados pelos programas de relatórios, para serem trabalhados e apresentados à operação. Deste modo, os arquivos podem ser armazenados em meios magnéticos para utilização futura.

Estes aplicativos oferecem sofisticados recursos que otimizam o tempo de desenvolvimento e a manutenção dos sistemas:

- Interface clara, lógica e intuitiva;
- Conectividade com a maioria dos equipamentos disponíveis no mercado ou mesmo com outros aplicativos Windows;
- Biblioteca gráfica para criação de telas; Suporte à rede e arquitetura cliente/servidor;
- Configuração e reconhecimento de alarmes;
- Relatórios formatados, graficamente customizados pelo usuário;
- Registro de dados em disco e análise histórica;
- Receitas que permitem a programação de valores para o envio ao processo;
- Scripts que permitem a criação de rotinas exclusivas, definindo lógicas e criando seqüências de atitudes através de uma linguagem de programação interativa, personalizando ao máximo o aplicativo;
- Suporte a banco de dados via ODBC (Open Data Base Connectivity) - Access, SQL Server, Oracle, dBase, etc.;
- CEP (Controle Estatístico de Processos);
- Módulo matemático para a formulação de equações;
- Controle de acesso por nível de usuário;
- Acesso remoto via Internet;
- Captura, registro e transmissão digital de imagens;
- Aquisição de eventos com precisão de 1ms;
- Criação de instrumentos virtuais.

## **Capítulo 21 – Redes de Comunicação Industrial**

Os sistemas de automação e controle tem se apoiado cada vez mais em redes de comunicação industriais, seja pela crescente complexibilidade dos processos industriais, seja pela distribuição geográfica que se tem acentuado nas novas instalações industriais. Assim, praticamente não tem sido implementados sistemas que não incluam alguma forma de comunicação de dados, seja local, através de redes industriais, seja remota, implementadas em sistemas SCADA - sistema para aquisição, supervisão e controle de processos.

Embora essa disseminação de aplicação de comunicação seja recente, já de há muito que tem sido desenvolvidos diferentes esquemas de comunicação de

dados em ambientes industriais, buscando sempre estruturas que garantam a segurança na transmissão dos dados, bem como a velocidade de comunicação. Um modelo bastante abrangente para os vários requisitos de comunicação no ambiente industrial é o de três níveis diferentes de requisito:

- Nível de informação: caracterizado por grandes volumes de troca de dados com constantes de tempo da ordem de grandeza de segundos (tempo não crítico). Essencialmente de domínio da informática;
- Nível de automação e controle: caracterizado por volumes moderados de dados com constantes de tempo da ordem de grandeza de centenas de milisegundos. Orientado para integração entre unidades inteligentes, de natureza diversa. Aplicações de característica contínua, de baixa velocidade e alta segurança. Mensagens complexas, com razoável nível de informações de diferentes propósitos;
- Nível de dispositivos de campo: caracterizado por volumes menores de dados com constantes de tempo da ordem de grandeza de dezenas de milisegundos (tempos de resposta muito curtos). Orientada a sensores e atuadores, tipicamente de natureza discreta. Ações executadas no nível dos dispositivos, sem necessidade de interação com níveis superiores;

Difícilmente uma única rede de comunicação local poderá atender todos os três níveis, havendo em geral, uma implementação de diferentes redes para atender cada característica específica. De forma geral, quando se está analisando o desempenho da rede, é usual colocar-se como primeira questão, qual é a taxa de transmissão de bits, para depois inquirir sobre o protocolo usado, e finalmente, sobre o mecanismo de troca de dados. Entretanto, o impacto sobre o desempenho de uma rede nesse aspecto é exatamente oposto a essa consideração: o efeito maior sobre o desempenho é dado pelo modelo, seguido pelo protocolo e finalmente pela taxa de transmissão. Concluído-se, não adianta comunicar a altas velocidades, com informações mal dispostas ou redundantes.

A camada de enlace, responsável pelo mecanismo de entrega de pacotes, tem sido implementada tradicionalmente em redes industriais com a estrutura origem/destino. Essa implementação agrega a cada mensagem enviada o endereço da estação de destino.

Observe-se que esta implementação, em determinadas circunstâncias, pode ser ineficiente: suponha-se que um mesmo dado deve ser transmitido a vários nós de uma mesma rede. O dispositivo que está transmitindo este dado deverá

emitir uma mensagem com ambos endereços origem/destino para cada nó que deva receber tal mensagem. Portanto, aumentando o tráfego da rede e constituindo um operação repetitiva em conter sempre o endereço do dispositivo a ser enviado tal mensagem. Além disso, caso haja necessidade de sincronizar vários dispositivos pertencentes a uma mesma rede, havendo alguma dificuldade em fazer tal sincronismo, uma vez que ao ser necessário mandar mensagens consecutivas a todos os dispositivos a serem sincronizados, ocorre um deslocamento desse instante de sincronismo.

Redes industriais mais recentes usam um modelo diferente para implementar a camada de enlace, chamado produtor/consumidor. Esta implementação está baseada no conceito de que alguns dispositivos são produtores de informações e outros são consumidores dessas. Nessa implementação, quando um produtor disponibiliza sua informação, esta é colocada na rede disponível para todos os dispositivos que sejam seus consumidores ao mesmo tempo, reduzindo o número de mensagens a serem emitidas, bem como reduzindo o próprio comprimento da mensagem, uma vez que não será necessário incluir ambos endereços de remetente e destinatário, sendo necessário tão somente identificar a informação a ser transmitida. Logo, o modelo produtor/consumidor, empregado nas redes de mercado mais recentes como Foundation Fieldbus, WorldFIP, ControlNet e DeviceNet, apresentam um modelo de rede eficiente, quanto a maximização de troca de dados, além de se ter um aumento da flexibilidade da rede.

**Glossário**

<b>TCP/IP - Transmission Control Protocol - Internet Protocol</b>
É uma família de protocolos, algumas vezes chamado de <i>Conjunto DoD</i> , desenvolvido pelo Departamento de Defesa norte-americano, muito utilizado para conectar computadores/equipamento com "Sistema Operacional" diferentes.
<b>Control Networks</b>
Rede de controle com inteligência descentralizada. Normalmente utilizada para comunicação entre CLP's ou IHM's. ex. Ethernet   Profibus FMS   Data Highway   ControlNet   Modbus Plus   CAN   LONWorks   alguns Fieldbus  etc...
<b>Device Networks</b>
Rede de controle com inteligência centralizada. Normalmente utilizada para comunicação com Entradas e Saídas remotas ou dispositivos e atuadores em campo. ex. Profibus DP/PA   FieldBus   Remote I/O   DeviceNet   Genius   Seriplex   CC Links   etc...
<b>Profibus FMS - Process Field Bus - Field Message Specification</b>
Rede de comunicação orientada a objetos, torna a integração de vários objetos transparentes, Multi-Mestre /Slave, Token passing/polling, máximo de 32 nós por segmento, velocidade máxima de 12Mbit/s - depende da distancia/meio físico.
<b>Profibus DP - Process Field Bus - Decentralized Periphery</b>
Rede de troca de dados entre estações mestre-escravo, torna a integração de vários I/O remotos transparentes.
<b>Profibus PA - Process Field Bus - Process Automation</b>
Rede para conexão de instrumentos na area de processo, utiliza padrão IEC 1158-2.
<b>Interbus</b>
Rede de troca de dados entre I/O Remotos e Processadores, Master/Slave, máximo 256 nós, velocidade máxima de 500Kbits/s
<b>DeviceNet</b>
Rede de troca de dados entre estações mestre-escravo, para conexão de I/O Remotos, sensores e atuadores, Master/Slave, baseado no CAN (Control Area Network)
<b>ControlNet</b>
Rede de troca de dados entre estações CLP's e/ou MMI, velocidade máxima de 5 M bit/s - Rede Proprietária da Allen-Bradley.
<b>Remote I/O</b>
Rede de troca de dados entre estações mestre-escravo, para conexão de I/O Remotos, sensores e atuadores, Master/Slave, velocidade máxima de 230.4Kbits/s (762 metros) - Proprietária da Allen-Bradley
<b>DH+ Data Highway Plus</b>

Rede de troca de dados entre estações CLP's e/ou MMI, velocidade máxima de 57.6Kbits/s (utilizando KT/KTX Card) - Rede Proprietária da Allen-Bradley (Rockwell Automation)

### **ASPÉCTO DA EVOLUÇÃO TELEMÉTRICA**

Houve um tempo em que a discussão era a cerca do padrão telemétrico pneumático que deveria ser utilizado nos instrumentos, 3 a 15 PSIG ou 6 a 30 PSIG. O tempo passou e hoje enfrentamos uma realidade tecnológica totalmente diferente daquele tempos.

## **Capítulo 22 – Sistema de comunicação Fieldbus**

Fieldbus é um sistema de comunicação digital bidirecional que interliga equipamentos inteligentes de campo com sistema de controle ou equipamentos localizados na sala de controle.

O “Fieldbus” não é apenas uma substituição do sinal de transmissão analógico de 4 a 20 mA por um digital, interligando os instrumentos de campo a sala de controle. Algumas vantagens desta nova tecnologia são:

- Redução no custo de fiação, instalação, operação e manutenção de plantas industriais;
- Informação imediata sobre diagnóstico de falhas nos equipamentos de campo. Os problemas podem ser detectados antes deles se tornarem sérios, reduzindo assim o tempo de inatividade da planta;
- Distribuição das funções de controle nos equipamentos de campo - instrumentos de medição e elementos de controle final. Serão dispensados os equipamentos dedicados para tarefas de controle;
- Aumento da robustez do sistema, visto que dados digitais são mais confiáveis que analógicos;
- Melhoria na precisão do sistema de controle, visto que conversões D/A e A/D não são mais necessárias. Consequentemente a eficiência da planta será aperfeiçoada.

O “Fieldbus” não representa uma paixão típicas por novas tecnologias e sim a redução de aproximadamente 40 % nos custos de projeto, instalação, operação e manutenção de um processo industrial.

Impacto nos novos sistemas de controle:

- Redução de custo de engenharia;
- Redução de cabos, bandejas, borneiras, etc;
- Melhoria na qualidade das informações;
- Os transmissores transmitem muito mais informações;
- Os equipamentos indicam falha em tempo real;
- Facilidade na manutenção;

## **AS VERTENTES MUNDIAIS**

Por se tratar de uma comunicação puramente digital é necessário que se estabeleçam regras para que seja possível a interoperabilidade entre instrumentos de fabricantes diferentes. Inicialmente cada fabricante procurou desenvolver sua própria tecnologia, ficando o usuário final subordinado aquela rede proprietária.

A partir da união de grandes empresas sujem duas vertentes mundiais, a FIELDBUS FOUNDATION formada basicamente por empresas americanas e a FIELDBUS PROFIBUS formada por empresas européias.

A FIELDBUS PROFIBUS sai na frente e estabelece seus padrões, tendo hoje mais de 1400 instrumentos de diversos fabricantes aprovados nos testes de conformidade e com o certificado da fundação. Já a FIELDBUS FOUNDATION completou o seu processo de padronização no final do ano de 1997. A seguir temos a tradução do jornal de divulgação mundial da Foundation que pode ser encontrado em [www.fieldbus.org](http://www.fieldbus.org)

### **Três fornecedores recebem registro de dispositivo**

AUSTIN, Texas, 12 de junho de 1998 - A Fieldbus Foundation hoje anunciou que sete dispositivos fieldbus completaram seu processo de registro de dispositivo prosperamente, passando nos testes de interoperabilidade entre outras exigências e agora estão autorizados a receber a marca de registro da Fundação. O registro dos primeiros produtos Fieldbus Foundation que foram antecipado por usuários de equipamento de automatização, é esperada para ter um impacto significante no mercado de controles industrial.

A Fieldbus Foundation emitiu certificados registro para os seguintes produtos: Rosemount Inc., Modelo 3244 Transmissor de Temperatura e Modelo 3051 Transmissor de Pressão; Smar International Co., LD Modelo 302 Transmissor de Pressão, Modelo TT302 Transmissor de Temperatura e Modelo IF302 conversor de 4-20 mA para Fieldbus; e Yokogawa Eletric Corporation, Modelo EJA Transmissor de Pressão e Modelo YF Flowmeter.

De acordo com o Presidente da Fieldbus Foundation John Pittman, o registro do produto Fieldbus " significa o começo de uma era nova, dinâmica em automatização de planta. "

Testes de interoperabilidade entre dispositivo são administrados pela Fundação de Fieldbus em seu laboratório independente em Austin, Texas.

A Fieldbus Foundation é uma corporação sem fins lucrativos que consiste em mais de 120 fabricantes e companhias de automatização industrial mundial,

com o propósito principal de prover um ambiente aberto e neutro para o desenvolvimento de um único, internacional, fieldbus interoperável. Neste ambiente, usuários finais, fabricantes, universidades e organizações de pesquisa estão trabalhando para desenvolver a tecnologia juntos.

O termo " fieldbus " se refere a um protocolo de comunicações digital, bidirecional usado para comunicações entre instrumentos de campo e sistemas de controle em processo, manufatura, batelada e contínuo. É intencional, com a substituição do 4-20 mA analógico, uma oferta de benefícios, inclusive a habilidade para migrar o controle ao chão de planta; acesso para uma riqueza sem precedente de dados do campo; custos reduzido de telemetria; e aumentou capacidades de manutenção avançada, sem falar na brusca redução de custos de instalação.

A seguir temos a arquitetura de uma rede Fielbus, onde podemos observar a estação de supervisão, uma placa de interface com múltiplos canais, o barramento linear, terminador do barramento ( BT-302 ), fonte de alimentação (PS-302), impedância ( PSI-302 ) e diversos instrumentos, inclusive um CLP com placa de interface para o barramento.

Na figura seguinte podemos observar com mais detalhes a instalação de um barramento linear Fieldbus, também observamos a redundância das placas de interface.

## **Capítulo 23 – Sistema de comunicação Profibus**

PROFIBUS Área de aplicação.

PROFIBUS é um padrão de fieldbus aberto para largas aplicações, processos contínuo, manufatura, elétrica, entre outras. Independência dos vendedores e abertura estão garantidas pelo padrão PROFIBUS EN 50 170. Com o PROFIBUS, dispositivos de diferentes fabricantes podem comunicar entre si sem a necessidade de interface especiais. PROFIBUS pode ser usado

onde necessitamos de alta velocidade transmissão de dados e tarefas de comunicação complexas e extensas. Veja figura 1. A família de PROFIBUS consiste em três versões compatíveis.

- **PROFIBUS-DP**

Aperfeiçoado para velocidade alta e montagem barata, esta versão de PROFIBUS é especialmente projetada para comunicação entre sistemas de controle de automatização e I/O distribuído ao nível de dispositivo. PROFIBUS-DP pode ser usado para substituir transmissão paralela em 24 V - 0 a 20 mA. ou 4 a 20 mA.

- **PROFIBUS-PA**

PROFIBUS-PA é especialmente projetado para automatização de processo. Permite conectar sensor e atuadores até mesmo em um barramento comum em áreas intrinsecamente seguras. PROFIBUS-PA permite comunicação de dados e pode ser usado com tecnologia 2 fios de acordo com o padrão internacional IEC 1158-2.

- **PROFIBUS-FMS**

PROFIBUS-FMS é a solução de propósito geral para comunicação de tarefa ao nível de célula. Serviços de FMS poderosos abrem um amplo alcance de aplicações e provêm grandes flexibilidades. PROFIBUS-FMS também pode ser usado para tarefas de comunicação extensas e complexas.

*Figure 2: A família de PROFIBUS*

## **PROTOCOLO DE ACESSO AO MEIO.**

PROFIBUS especifica as características técnicas e funcionais de um sistema de fieldbus serial, descentralizando os controladores digitais, agora trabalhando a nível de célula. Há uma distinção entre dispositivos mestre e dispositivos de escravo.

- Dispositivos mestres determinam a comunicação de dados no barramento. Um mestre pode enviar mensagens sem um pedido externo quando segura os direitos de acesso do barramento (o token). Também são chamados os mestres estações ativas.

- Dispositivos escravos são dispositivos periféricos. Dispositivos escravos típicos incluem dispositivos de I/O, válvulas, drivers e transmissores. Eles não têm direitos de acesso ao barramento e só podem reconhecer mensagens ou podem enviar mensagens ao mestre quando requisitados. Também são chamados os escravos estações passivas. Eles só requerem uma porção pequena do protocolo do barramento, o implementação deles é particularmente econômica

PROFIBUS – protocolo de acesso ao meio.

Observamos que a interação com o CLP é totalmente possível, desde que tenhamos um cartão que promova a interface. Muitos fabricantes já possuem cartões de interface com certificado de conformidade, entre eles GEFANUC, ALLEN BRADLEY, entre outros. Ao lado temos a figura do cartão de interface para PROFIBUS-DP do fabricante Allen Bradley.

A forma de configuração e programação do CLP não se altera, porém existem uma outra interface onde se faz a configuração e a programação dos demais dispositivos da rede.

No caso do PROFIBUS as versões que mais nos interessa é a DP e a PA, a seguir temos uma listagem das funções básicas do PROFIBUS-DP que foram extraídas do catálogo eletrônico disponível para download em [www.profibus.com](http://www.profibus.com). O trecho não foi traduzido para não perder a legitimidade das funções.

*Basic PROFIBUS-DP functions*

- **Transmission Technology**

- RS-485, twisted pair, two wire cable or fibre optics
- Baud rates from 9.6 kbit/sec to 12 Mbit/sec
  - **Bus access**
    - Token passing procedure between masters and master-slave procedure for slaves
    - Mono-master or multi-master systems possible
    - Master and slave devices, maximum of 126 stations on one bus
      - **Communication**
        - Peer-to-peer (user data transmission) or Multicast (control commands)
        - Cyclic master-slave user data transmission and acyclic master-master data transmission
          - **Operating modes**
            - Operate: Cyclic transmission of input and output data
            - Clear: Inputs are read, and outputs are held in fail-safe status
            - Stop: Only master-master data transmission is possible
              - **Synchronization**
                - Control commands permit synchronization of the inputs and outputs
                - Sync mode: Outputs are synchronized
                - Freeze mode: Inputs are synchronized
                  - **Functionality**
                    - Cyclic user data transmission between DP master and DP slave(s)
                    - Dynamic activation or deactivation of individual DP slaves
                    - Check of DP slave configuration
                    - Powerful diagnostic functions, 3 hierarchical levels of diagnostic messages
                    - Synchronization of the inputs and/or the outputs

- Address assignment for the DP slaves over the bus
- Configuration of the DP master (DPM1) over the bus
- Maximum of 246 bytes of input and output data per DP slave
  - **Security and protection functions**
    - All messages are transmitted with Hamming distance  $HD = 4$
    - Watchdog timer at the DP slave
    - Access protection for the inputs/outputs of the DP slaves
    - Monitoring of user data transmission with configurable monitoring timer at the master
  - **Types of devices**
    - Class-2 DP master (DPM2): programming/configuration/diagnostic devices
    - Class-1 DP master (DPM1): central programmable controllers such as PLCs, PCs, etc.
    - DP slave: device with binary or analog inputs/outputs, drives, valves, etc.