

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Sistemas de Medida e instrumentação

Professor: Márcio Valério de Araújo

Capítulo I

- Introdução
- Aspectos Gerais da Área de Instrumentação
- Principais Sistemas de Medidas
- Análise em Engenharia Teórica e Experimental

Introdução

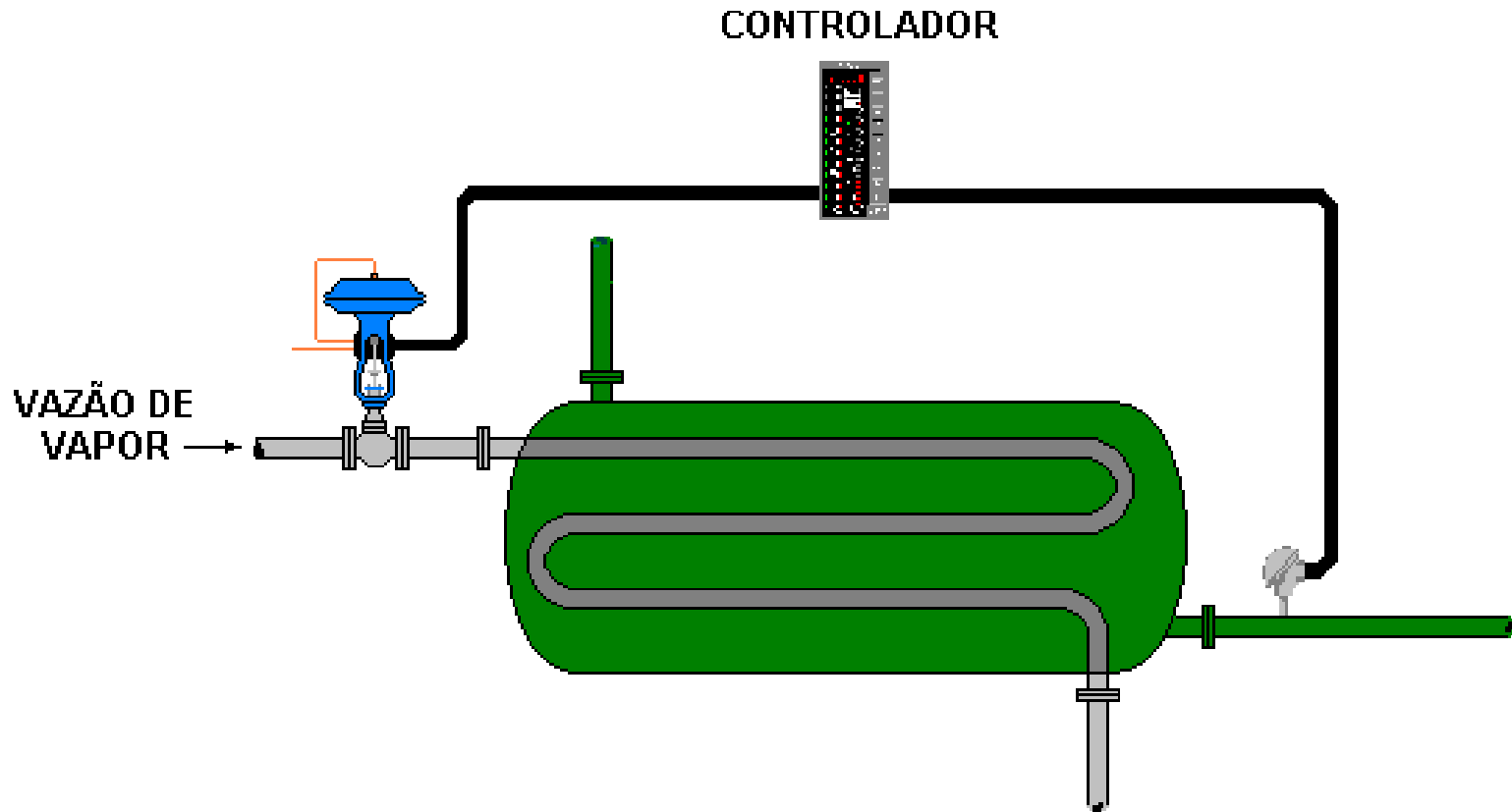
- INSTRUMENTAÇÃO é a ciência que aplica e desenvolve técnicas para adequação de instrumentos de medição, transmissão, indicação, registro e controle de variáveis físicas em equipamentos nos processos industriais.
- Em todos os processos de fabricação é absolutamente necessário controlar e manter constantes algumas variáveis, tais como: pressão, vazão, temperatura, nível.
- Os instrumentos de medição e controle permitem manter constantes as variáveis do processo, objetivando a melhoria em qualidade, o aumento em quantidade do produto e a segurança.
- No princípio da era industrial, o operário atingia os objetivos citados através de controle manual destas variáveis, utilizando somente instrumentos.

Aspectos gerais da área de instrumentação

- **Processo industrial:** É uma operação ou uma série de operações realizada em um determinado equipamento, onde varia pelo menos uma característica física ou química de um material.
- **Variáveis de Processo:** São condições internas ou externas que afetam o desempenho de um processo.
- **Variável Controlada:** É a variável que deve ser controlada para obtermos um objetivo no processo.
- **Meio controlado:** É a energia ou material no qual a variável é controlada.
- **Variável manipulada:** É aquela sobre a qual o controlador automático atua, no sentido de se manter a variável controlada no valor desejado.
- **Agente de controle:** É a energia ou o material do processo, da qual a variável manipulada é uma condição ou característica.

Exemplo

Sistema de aquecimento de água



Elementos básicos de um sistema de controle automático.

- **Unidade de medida**
- **Unidade de controle**
- **Elemento final de controle**

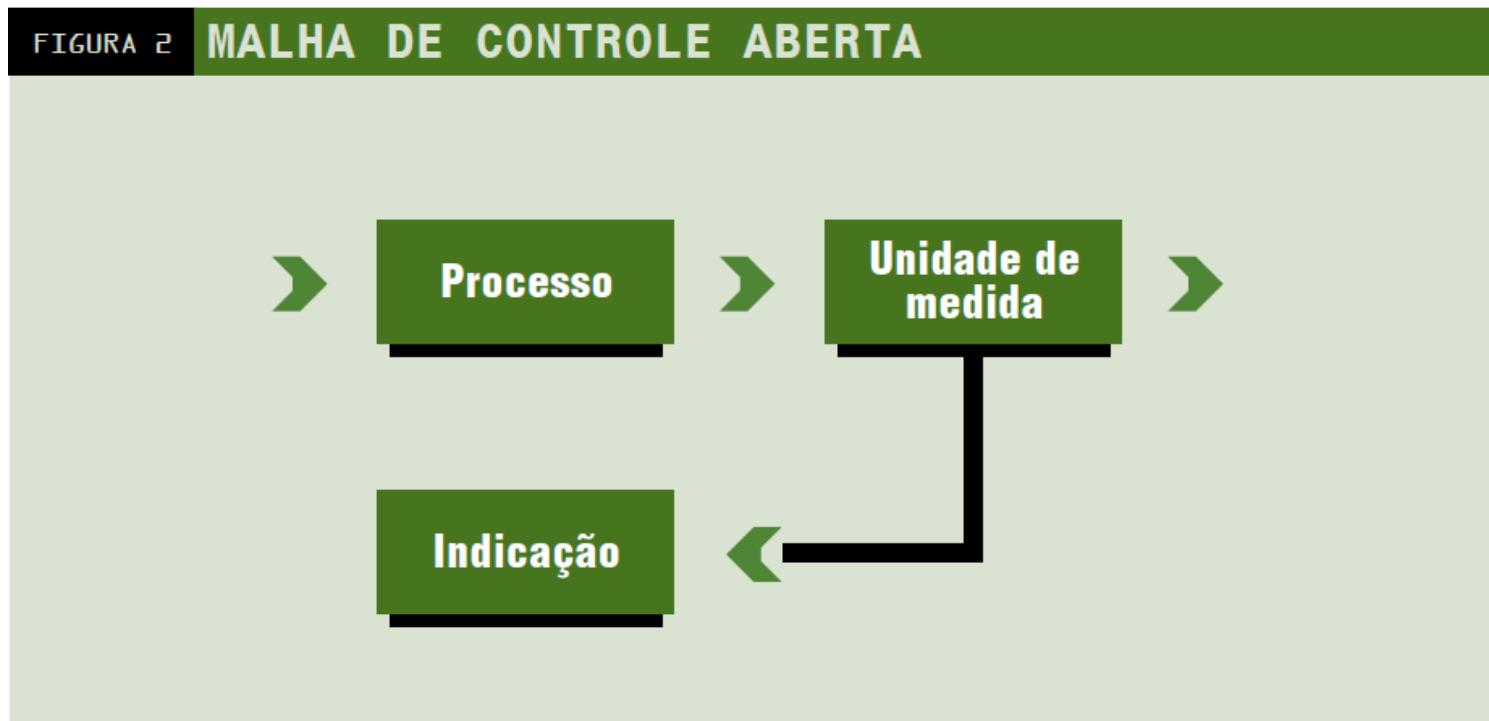


Malha de controle

- Quando se fala em controle, deve-se necessariamente subentender uma medição de uma variável qualquer do processo, isto é, a informação que o controlador recebe. Recebida essa informação o sistema controlador compara-a com um valor pré-estabelecido (chamado SET POINT), verifica a diferença entre ambos, e age de maneira a diminuir ao máximo essa diferença.
- Esta seqüência de operações, medir a variável; comparar com o valor pré determinado e atuar no sistema de modo a minimizar a diferença entre a medida e o set point, nós denominamos de malha de controle, que pode ser aberta ou fechada.

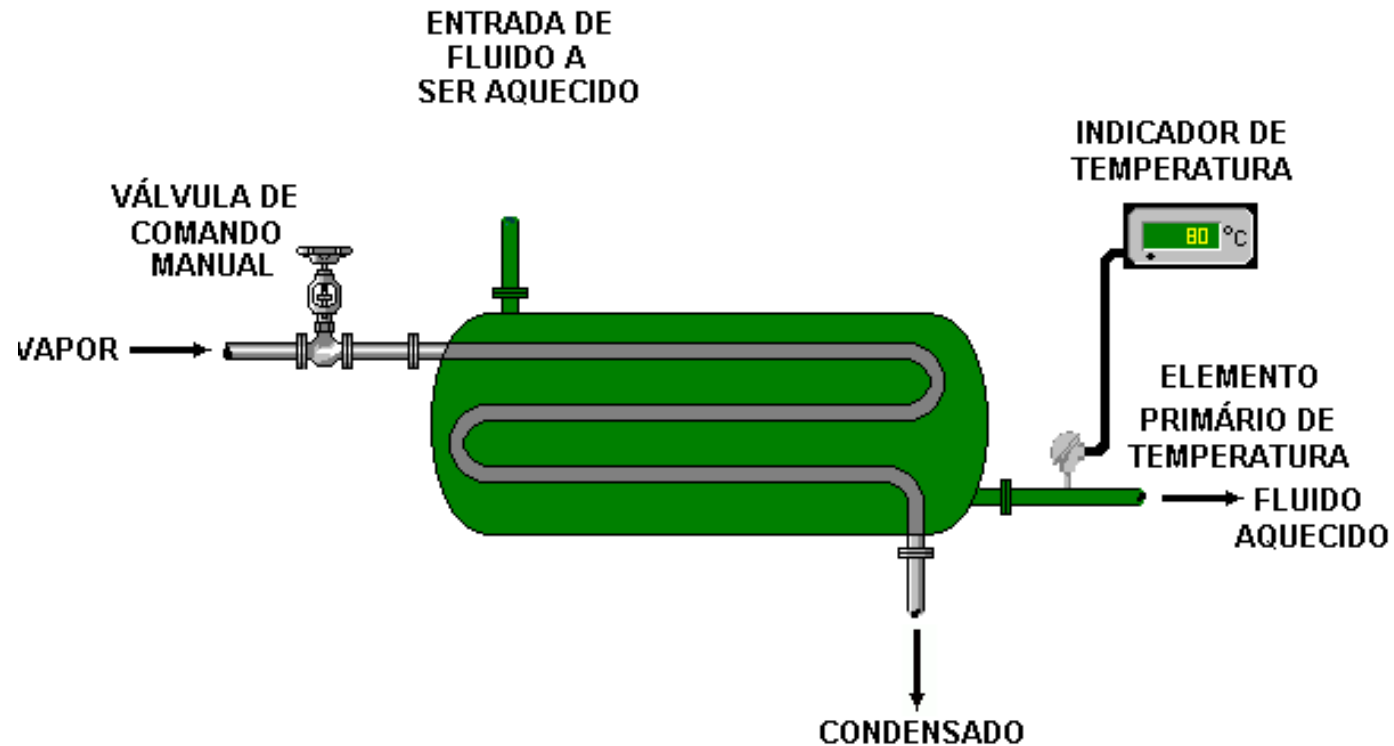
Malha Aberta

- Na malha aberta, a informação sobre a variável controlada não é utilizada para ajustar qualquer entrada do sistema para compensar variações nas variáveis do processo.



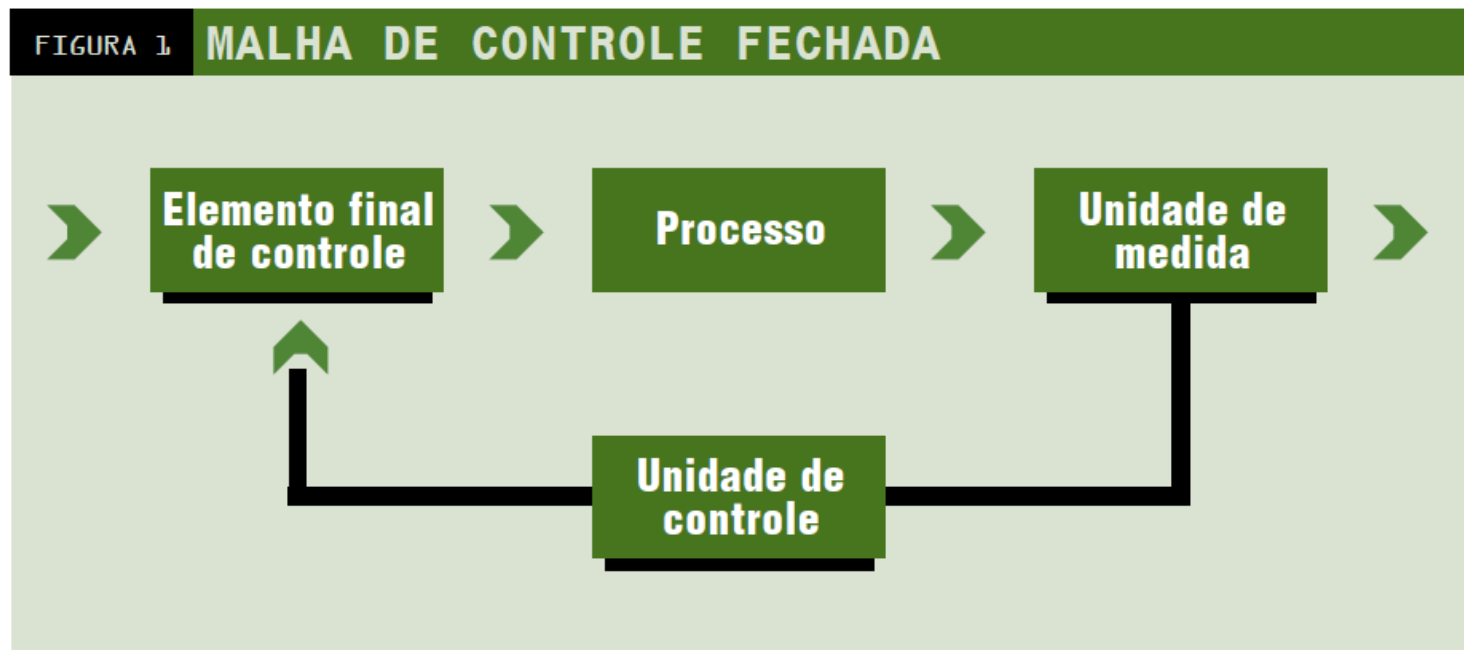
Malha Aberta

- Exemplo



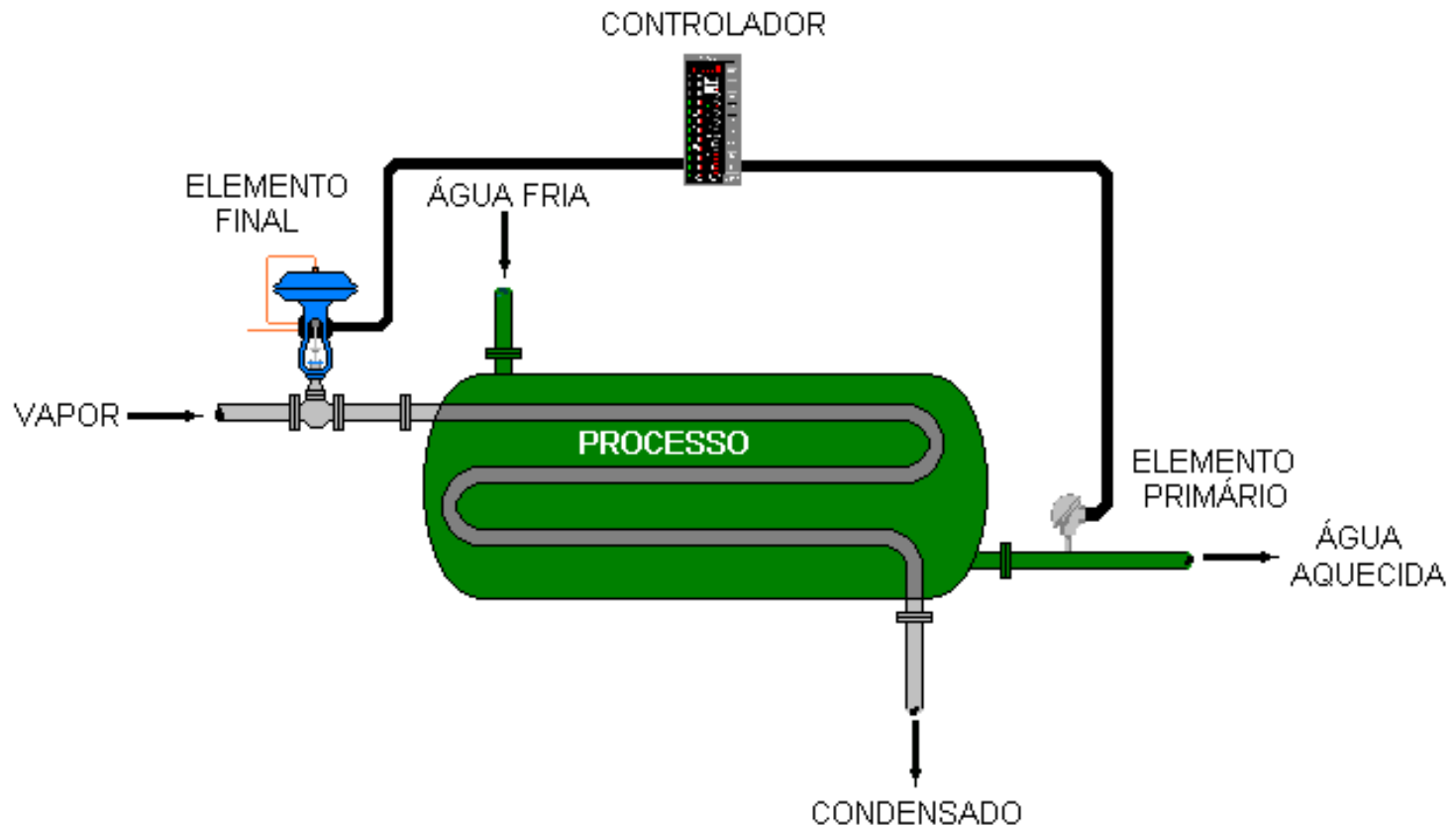
Malha Fechada

- Na malha fechada, a informação sobre a variável controlada, com a respectiva comparação com o valor desejado, é utilizada para manipular uma ou mais variáveis do processo.



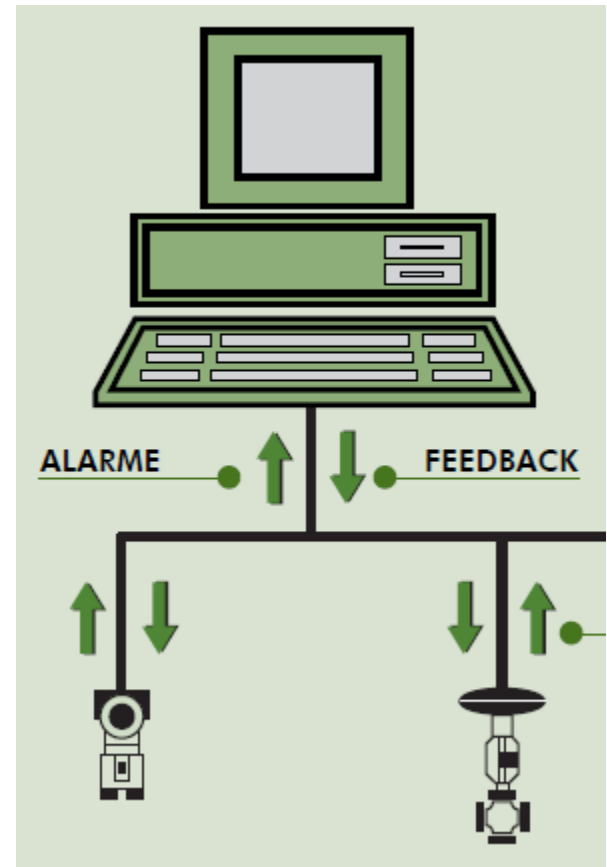
Malha Fechada

- Exemplo:



Rede de comunicação

- Utilização de redes e protocolos de comunicação em automação.



Principais sistemas de medidas

- Os principais sistemas são:

SISTEMA MÉTRICO DECIMAL

Tem como unidades fundamentais o metro, o quilograma e o segundo (MKS)

SISTEMA FÍSICO OU CGESIMAL

Tem como unidades fundamentais o centímetro, o grama e o segundo (CGS)

SISTEMA INDUSTRIAL FRANCÊS

Tem como unidades fundamentais o metro, a tonelada e o segundo (MTS), definidas em função do sistema métrico decimal

SISTEMA INGLÊS

Tem como unidades fundamentais o pé (*foot*), a libra (*pound*) e o segundo (*second*)

Análise em engenharia teórica e experimental

- Na resolução dos problemas de engenharia, contamos com dois métodos distintos, o teórico e o experimental.
- Alguns problemas necessitam dos dois métodos para serem resolvidos.
- A Teoria e o experimento são dois métodos complementares, daí o engenheiro que utiliza ambos será um melhor solucionador de problemas.

Método Teórico

- Os resultados são normalmente de uso geral;
- É muito comum o uso de hipóteses simplificadoras
- Em alguns casos o método teórico resulta em problemas matemáticos complexos;
- Não requer o uso de equipamentos de laboratório, apenas lápis, papel, calculadoras, computadores, etc;
- Muitas vezes o tempo requerido para a solução do problema é menor, já que não é necessário construir modelos em escala ou dispositivos experimentais e realizar medições.

Método Experimental

- Quase sempre os resultados aplicam-se somente ao sistema sendo testado
- Requer a construção de um protótipo
- O tempo requerido para a solução do problema é normalmente longo por envolver o projeto, construção e depuração do dispositivo experimental

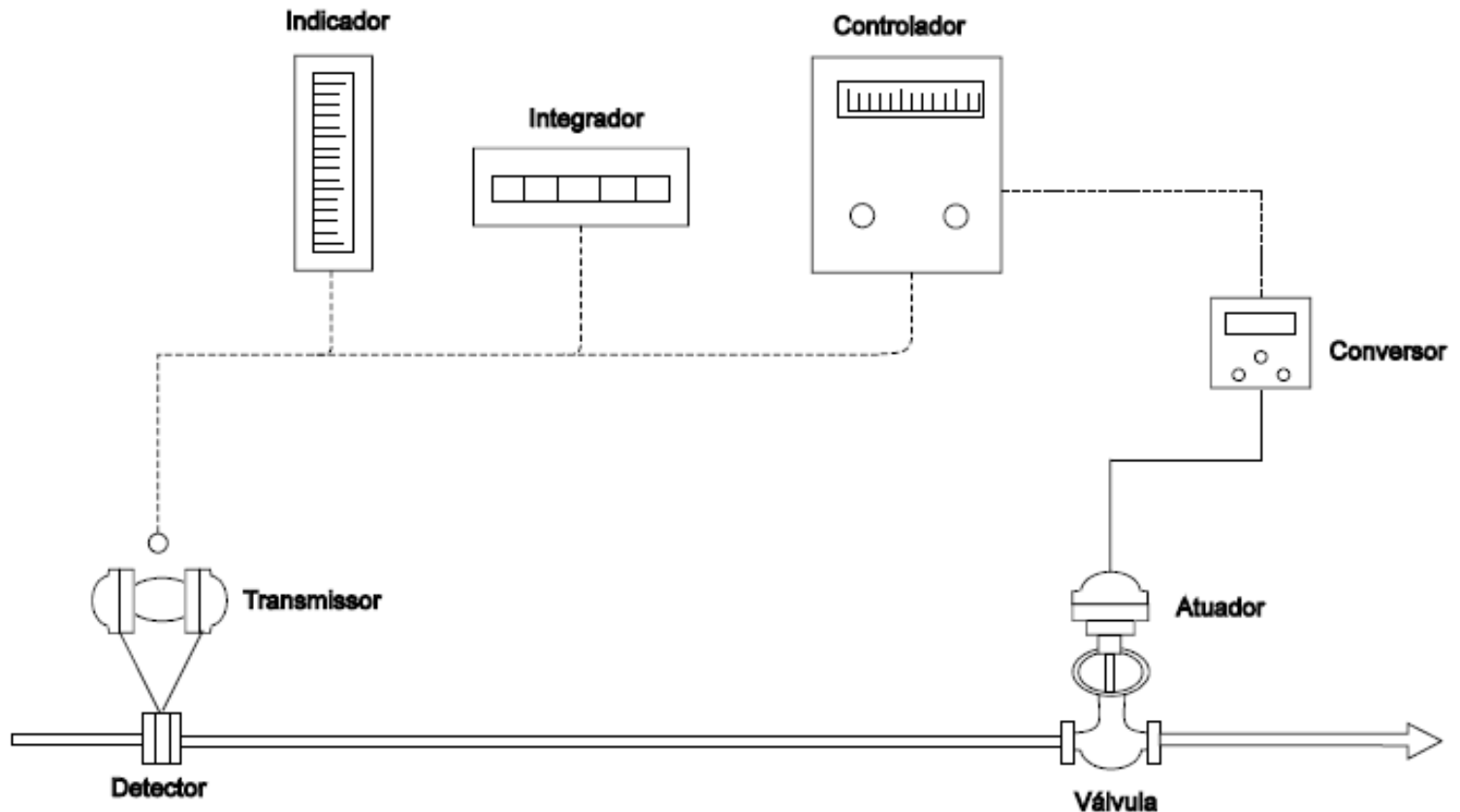


Capítulo II

- Elementos Funcionais de um instrumento
- Exemplos
- Tipo de Sinal Transmitido
- Transdutores Ativos e Passivos
- Métodos da deflexão e da anulação

Elementos funcionais de um instrumento

- A figura abaixo mostra diversos instrumentos associados formando uma malha de controle.



Elementos funcionais de um instrumento

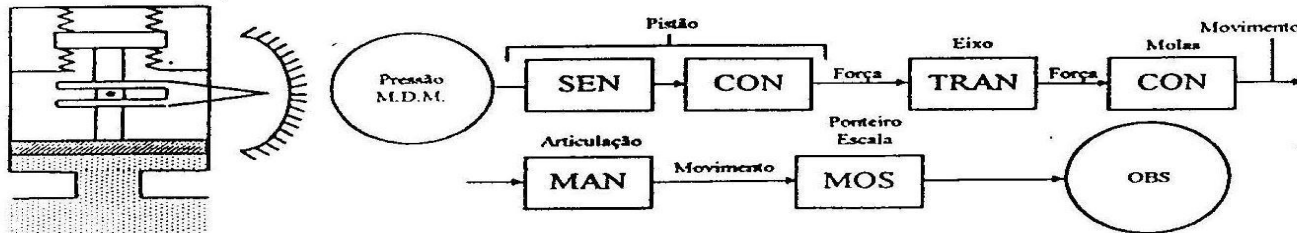
- Os instrumentos que podem compor uma malha são então classificados por função cuja descrição sucinta pode ser lida na tabela abaixo.

INSTRUMENTO	DEFINIÇÃO
Detector	São dispositivos com os quais conseguimos detectar alterações na variável do processo. Pode ser ou não parte do transmissor.
Transmissor	Instrumento que tem a função de converter sinais do detector em outra forma capaz de ser enviada à distância para um instrumento receptor, normalmente localizado no painel.
Indicador	Instrumento que indica o valor da quantidade medida enviado pelo detector, transmissor, etc.
Registrador	Instrumento que registra graficamente valores instantâneos medidos ao longo do tempo, valores estes enviados pelo detector, transmissor, Controlador etc.
Conversor	Instrumento cuja função é a de receber uma informação na forma de um sinal, alterar esta forma e a emitir como um sinal de saída proporcional ao de entrada.
Unidade Aritmética	Instrumento que realiza operações nos sinais de valores de entrada de acordo com uma determinada expressão e fornece uma saída resultante da operação.
Integrador	Instrumento que indica o valor obtido pela integração de quantidades medidas sobre o tempo.
Controlador	Instrumento que compara o valor medido com o desejado e, baseado na diferença entre eles, emite sinal de correção para a variável manipulada a fim de que essa diferença seja igual a zero.
Elemento final de controle	Dispositivo cuja função é modificar o valor de uma variável que leve o processo ao valor desejado.

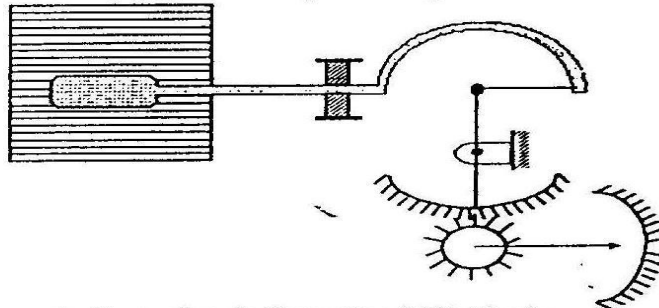
Exemplos

Na maioria dos casos, os sensores e conversores, se encontram juntos em um só elemento chamado transdutor.

1. Medidor de Pressão

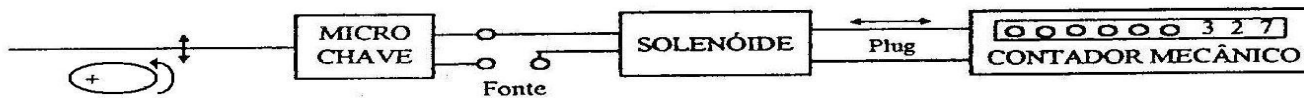


2. Medidor de Temperatura por Pressão



- | | |
|-------------------------------------|----------------|
| MDM..... | - Temperatura |
| SEN/CON-Bulbo..... | - Pressão |
| TRAN-Capilar..... | - Pressão |
| CON-Tubo de Bourdon..... | - Deslocamento |
| MAN-Articulações e Engrenagens..... | - Deslocamento |
| MOS-Ponteiro e Escala..... | - Observador |

3. Contador de Rotações à Distância



A alavanca do micro-switch e o came servem como SENSOR e CONVERTOR, pois o deslocamento angular rotativo é convertido em deslocamento alternativo. O micro-switch serve também como CONVERTOR, convertendo oscilações mecânicas em oscilações elétricas. O solenóide reconverte os pulsos elétricos em mecânicos. O contador mecânico é um CONVERTOR (alternativo para rotatório) e MOSTRADOR.

Tipo de Sinal Transmitido

- Os equipamentos podem ser agrupados conforme o tipo de sinal transmitido ou o seu suprimento.
- Podemos dividir em Pneumáticos, elétricos, etc.
- A seguir será descrito os principais tipos, suas vantagens e desvantagens.

Tipo pneumático

- Nesse tipo é utilizado um gás comprimido, cuja pressão é alterada conforme o valor que se deseja representar.
- Os sinais de transmissão analógica normalmente começam em um valor acima do zero.
- O gás mais utilizado para transmissão é o ar comprimido, sendo também o NITROGÊNIO.
- A grande e única vantagem em seu utilizar os instrumentos pneumáticos está no fato de se poder operá-los com segurança em áreas onde existe risco de explosão (centrais de gás, por exemplo).

Desvantagens do sinal Pneumático

- Necessita de tubulação de ar comprimido (ou outro gás) para seu suprimento e funcionamento.
- Necessita de equipamentos auxiliares tais como compressor, filtro, desumidificador, etc., para fornecer aos instrumentos ar seco, e sem partículas sólidas.
- Devido ao atraso que ocorre na transmissão do sinal, este não pode ser enviado à longa distância, sem uso de reforçadores. Normalmente a transmissão é limitada a
- aproximadamente 100 m.
- Vazamentos ao longo da linha de transmissão ou mesmo nos instrumentos são difíceis de serem detectados.
- Não permite conexão direta aos computadores.

Tipo elétrico

- Os transmissores eletrônicos geram vários tipos de sinais em painéis, sendo os mais utilizados: 4 a 20 mA, 10 a 50 mA e 1 a 5 V.
- Temos estas discrepâncias nos sinais de saída entre diferentes fabricantes, porque tais instrumentos estão preparados para uma fácil mudança do seu sinal de saída.
- A relação de 4 a 20 mA, 1 a 5 V está na mesma relação de um sinal de 3 a 15psi de um sinal pneumático.
- O “zero vivo” utilizado, quando adotamos o valor mínimo de 4 mA, oferece a vantagem também de podermos detectar uma avaria (rompimento dos fios), que provoca a queda do sinal, quando ele está em seu valor mínimo.

Vantagens do sinal elétrico

- Permite transmissão para longas distâncias sem perdas.
- Alimentação pode ser feita pelos próprios fios que conduzem o sinal de transmissão.
- Não necessita de poucos equipamentos auxiliares.
- Permite fácil conexão aos computadores.
- Fácil instalação.
- Permite de forma mais fácil realização de operações matemáticas.

Transmissão via Rádio

- Neste tipo, o sinal ou um pacote de sinais medidos são enviados à sua estação receptora via ondas de rádio em uma faixa de frequência específica.

Vantagens e desvantagens

- As vantagens são:
 - Não necessita de cabos de sinal.
 - Pode-se enviar sinais de medição e controle de máquinas em movimento.
- As desvantagens são:
 - INSTRUMENTAÇÃO DE SISTEMAS
 - Alto custo inicial.
 - Necessidade de técnicos altamente especializados

Transdutores Ativos e Passivos

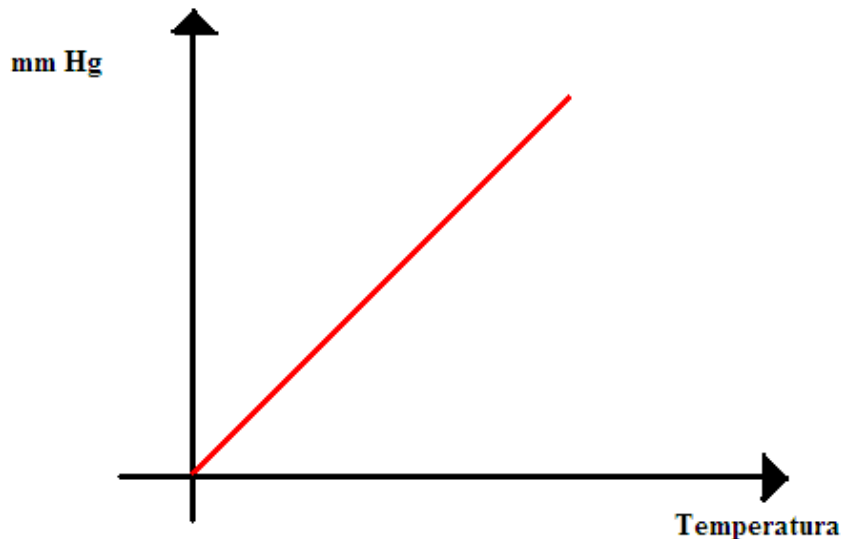
- Os transdutores passivos são aqueles cuja energia é suprida inteiramente ou quase inteiramente pelo sinal de entrada
- Transdutores ativos são aqueles que possuem uma fonte auxiliar de potência, que supre a maior parte da energia consumida, enquanto que o sinal de entrada supre somente uma porção insignificante.

Sinal Analógico, Binário e Digital

- Para podermos automatizar um processo, é necessário que tenhamos informações sobre o seu estado, para isso se estudam quais as magnitudes físicas que deverão ser transmitidas e registrada.

Sinais Analógicos

- O sinal analógico é contínuo no tempo e usualmente varia no tempo de forma relativamente suave.
- O sinal analógico carrega a informação todo o intervalo de tempo de observação.
- Exemplo de um termômetro de mercúrio.



Sinais Binários

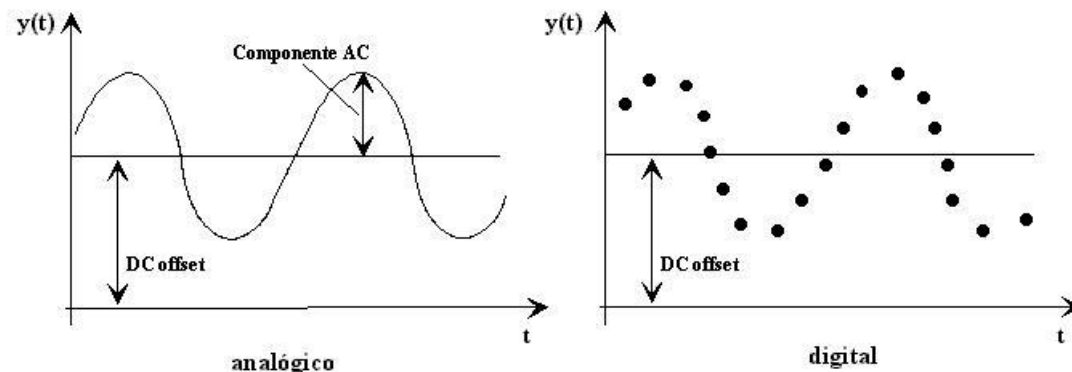
- O sinal binário é o mais simples, pois tem somente dois "estados discretos", ligado ou desligado, 0 ou 1.
- Vários instrumentos usados no controle discreto de sistemas têm esta característica.
- Por exemplo, um instrumento chamado "chave de nível" (chave pois "chaveia" entre dois estados discretos e independentes, lógicos, do tipo sim ou não, ligado ou desligado, 0 ou 1) pode ser usado para ligar ou desligar a bomba que alimenta um reservatório de líquido.

Sinais digitais

- O sinal digital é formado por uma série de números discretos, cada um deles correspondendo a um valor do sinal analógico em um certo instante de tempo.
- A resolução do sinal digital depende do número de bits, e o número de combinações se dá pela seguinte regra: $NC = 2^n$ onde n é o número de bits.
- Exemplos:
 - 1) Quantos bits são necessários para converter um sinal analógico de medida de temperatura de uma sanduicheira elétrica para um sinal digital.
 - 2) Quantos bits são necessários para converter um sinal analógico de um termômetro para uso médico para um sinal digital com resolução menor que $0,1$ °C e escala de 30 até 45

As vantagens relativas do sinal digital frente ao analógico

- Facilidade de condicionamento de sinal;
- os computadores são digitais e podem então processar os sinais digitais em pré e pós-processamento, isto é, filtragem, operações matemáticas, etc;
- os sinais digitais podem ser apresentados diretamente em displays numéricos;
- problemas com ruídos são praticamente eliminados, e a transmissão de dados é mais simples;
- sinais digitais podem ser transmitidos em redes computacionais.

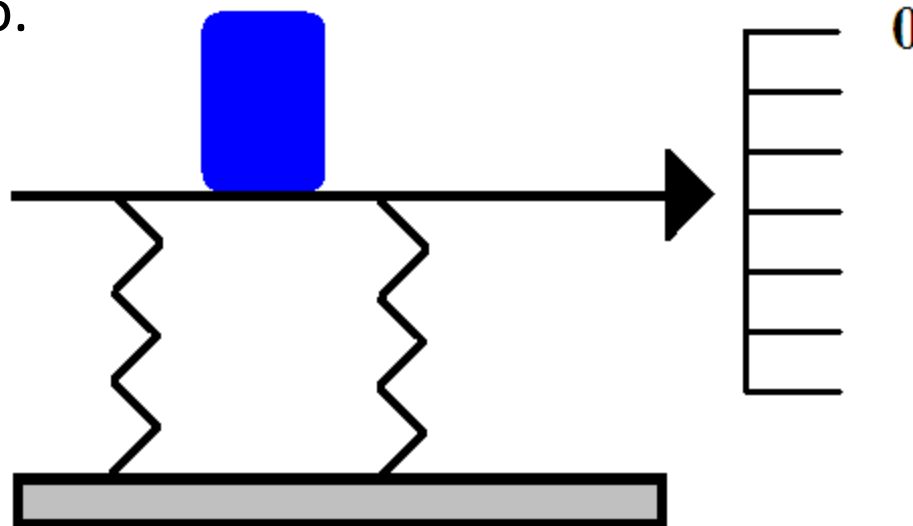


Métodos da deflexão e anulação

- É uma forma de classificar os instrumentos em dois grupos: cancelamento e deflexão.
- Esta classificação diz respeito ao princípio de operação do instrumento.

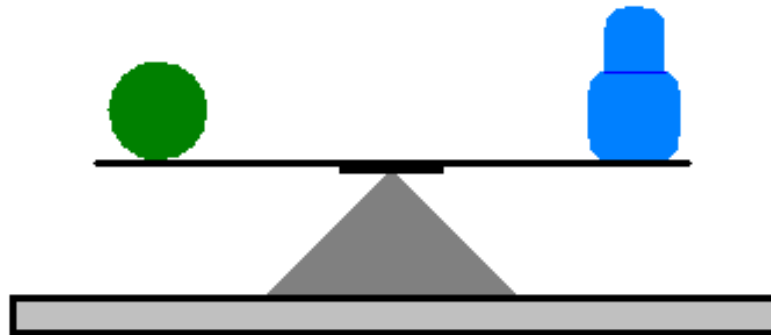
Instrumentos de deflexão

- Em **instrumentos de deflexão** a quantidade medida produz um efeito físico que é contrabalanceado por um efeito contrário em alguma outra parte do instrumento.
- Este efeito contrário, por sua vez, está intimamente ligado a alguma variável que será diretamente perceptível por um sentidos humano.



Instrumentos de cancelamento

- Em **instrumentos de cancelamento**, a deflexão é idealmente mantida nula pela aplicação de um efeito contrário àquele gerado pela quantidade medida.
- A balança de braço articulado (a "balança de feira"), o instrumento de cancelamento mais simples e talvez o mais antigo que existe.

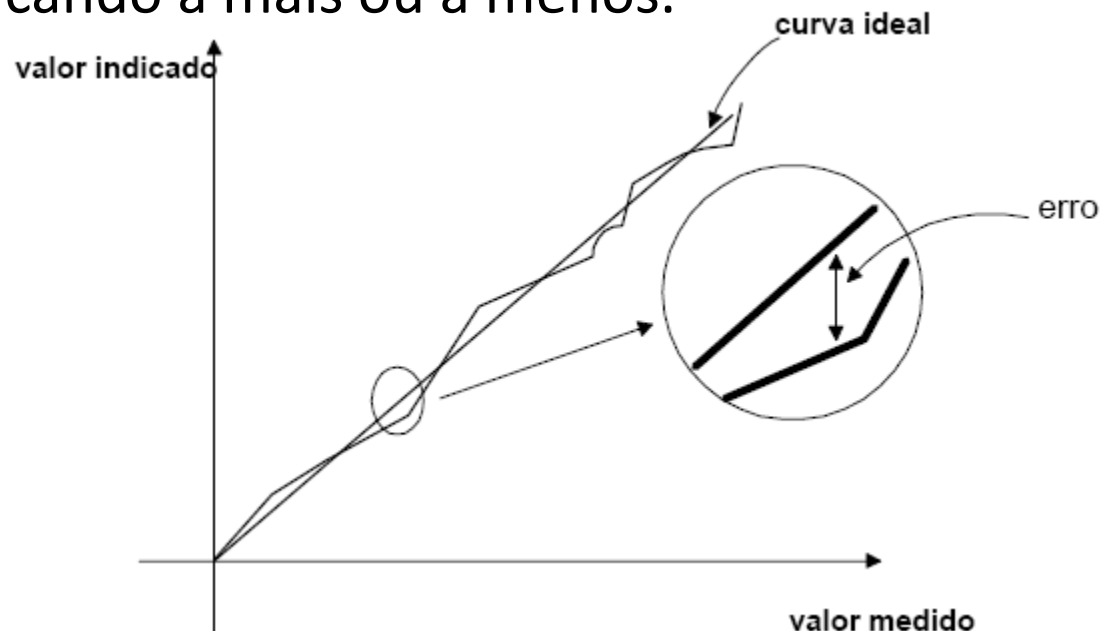


Capítulo III

- Terminologia na Metrologia
- Algarismos significativos
- Erro de Medição
- Estatística Aplicada à Metrologia

Terminologia na Metrologia

- **Erro:** É a diferença entre o valor lido ou transmitido pelo instrumento, em relação ao valor real da variável medida. Se tivermos o processo em regime permanente, chamaremos de erro estático, que poderá ser positivo ou negativo, dependendo da indicação do instrumento, o qual poderá estar indicando a mais ou a menos.



Terminologia na Metrologia

- **Erro Absoluto** - Resultado de uma medição menos o valor verdadeiro convencional da grandeza medida.
- **Erro Aleatório** - Componente do erro de medição que varia de uma forma imprevisível quando se efetuam várias medições da mesma grandeza.
- **Erro Sistemático** - Componente do erro de medição que se mantém constante ou varia de forma previsível quando se efetuam várias medições de uma mesma grandeza. Os erros sistemáticos e suas causas podem ser conhecidos ou desconhecidos. Para um instrumento de medida ver "erro de justeza".
- **Erro Combinado** - Desvio máximo entre a reta de referência e a curva de medição, incluindo os efeitos de não linearidade, histeresis e repetibilidade, expresso em porcentagem do sinal de saída nominal.

Terminologia na Metrologia

- **Valor Verdadeiro (de uma grandeza)** - Valor que caracteriza uma grandeza perfeitamente definida nas condições existentes quando ela é considerada. O valor verdadeiro de uma grandeza é um conceito ideal e não pode ser conhecido exatamente.
- **Valor Verdadeiro Convencional (de uma grandeza)** - Valor de uma grandeza que para um determinado objetivo pode substituir o valor verdadeiro. Um valor verdadeiro convencional é, em geral, considerado como suficientemente próximo do valor verdadeiro para que a diferença seja insignificante para determinado objetivo.

Terminologia na Metrologia

- **Escala** - Conjunto ordenado de marcas, associado a qualquer numeração, que faz parte de um dispositivo indicador.
- **Valor de uma Divisão** - Diferença entre os valores da escala correspondentes a duas marcas sucessivas.
- **Ajuste (de um instrumento)** - *(calibração) Operação destinada a fazer com que um instrumento de medir tenha um funcionamento e justeza adequada à sua utilização.*
- **Valor de uma Divisão** - Diferença entre os valores da escala correspondentes a duas marcas sucessivas.
- **Calibração (de um instrumento)** - *(aferição) Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. O resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações, como a determinação das correções a serem aplicadas.*

Terminologia na Metrologia

- **Faixa Nominal - (*faixa de medida, RANGE*)** Conjunto de valores da grandeza medida que pode ser fornecido por um “instrumento de medir”, consideradas todas as suas faixas nominais de escala. A faixa nominal é expressa em unidades da grandeza a medir, qualquer que seja a unidade marcada sobre a escala e é normalmente especificada por seus limites inferior e superior, como por exemplo 100°C a 200°C.
- **Amplitude da Faixa Nominal - (*alcance, SPAN*)** Módulo da diferença entre os dois limites de uma faixa nominal de um “instrumento de medir”. Exemplo: faixa nominal: -10 V a 10 V
amplitude da faixa nominal: 20 V

Terminologia na Metrologia

- **URL (Upper Range Limit)** - Limite superior da faixa nominal - máximo valor de medida que pode ser ajustado para a indicação de um instrumento de medir.
- **URV (Upper Range Value)** - Valor superior da faixa nominal - máximo valor que pode ser indicado por um instrumento de medir. O URV ajustado num instrumento é sempre menor ou igual ao URL do instrumento.
- **LRL (Lower Range Limit)** - Limite inferior da faixa nominal - mínimo valor de medida que pode ser ajustado para a indicação de um instrumento de medir.

Terminologia na Metrologia

- **LRV (Lower Range Value)** - Valor inferior da faixa nominal - mínimo valor que pode ser indicado por um instrumento de medir. O LRV ajustado num instrumento é sempre maior ou igual ao LRL do instrumento.
- **Condições de Referência** - Condições de utilização de um instrumento de medir prescritas para ensaios de funcionamento ou para assegurar a validade na comparação de resultados de medição.
- **Sensibilidade** - Quociente da variação da resposta de um instrumento de medir pela variação correspondente do estímulo. A sensibilidade pode depender do estímulo.

Terminologia na Metrologia

- **Resolução** - Expressão quantitativa da aptidão de um instrumento de medir e distinguir valores muito próximos da grandeza a medir sem necessidade de interpolação, ou seja, é a menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida. É a razão entre a variação do valor indicado ou transmitido por 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 entrada.

Exemplo: Um termômetro de vidro com range de 0 à 500 °C, possui uma escala de leitura de 50 cm.

$$\text{Sensibilidade ou Resolução} = 50/500 \text{ cm/ } ^\circ\text{C} = 0,1 \text{ cm/ } ^\circ\text{C}$$

Terminologia na Metrologia

- **Exatidão** - Podemos definir como sendo o maior valor de erro estático que um instrumento possa ter ao longo de sua faixa de trabalho. Ou ainda podemos definir como o grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando. Pode ser expresso de diversas maneiras:

Em porcentagem do alcance (span)

Um instrumento com range de 50 à 150 °C, está indicando 80 °C e sua exatidão é de $\pm 0,5\%$ do span.

Sendo, $\pm 0,5\% = \pm 0,005$ e o span = 100 °C, teremos: $0,005 \cdot 100 = \pm 0,5$ °C

Portanto, a temperatura estará entre 79,5 °C e 80,5 °C.

Em unidade da variável

Instrumento com exatidão de ± 2 °C

Em porcentagem do valor medido

Um instrumento com range de 50 à 150 °C, está indicando 80 °C e sua exatidão é de $\pm 0,5\%$ do valor medido.

Sendo, $\pm 0,5\% = \pm 0,005$ e o valor medido = 80 °C, teremos: $0,005 \cdot 80 = \pm 0,4$ °C

Portanto, a temperatura estará entre 79,6 °C e 80,4 °C.

Terminologia na Metrologia

- **Zona morta** - É a máxima variação que a variável possa ter, sem provocar variações na indicação ou sinal de saída de um instrumento ou em valores absolutos do range do mesmo.

Exemplo: Um instrumento com range de 0 °C à 200 °C, possui uma zona morta de $\pm 0,1\%$ do span. A zona morta do instrumento pode ser calculada da seguinte forma:

Sendo, $\pm 0,1\% = \pm 0,001$, teremos: $0,001 \cdot 200 = \pm 0,2 \text{ °C}$

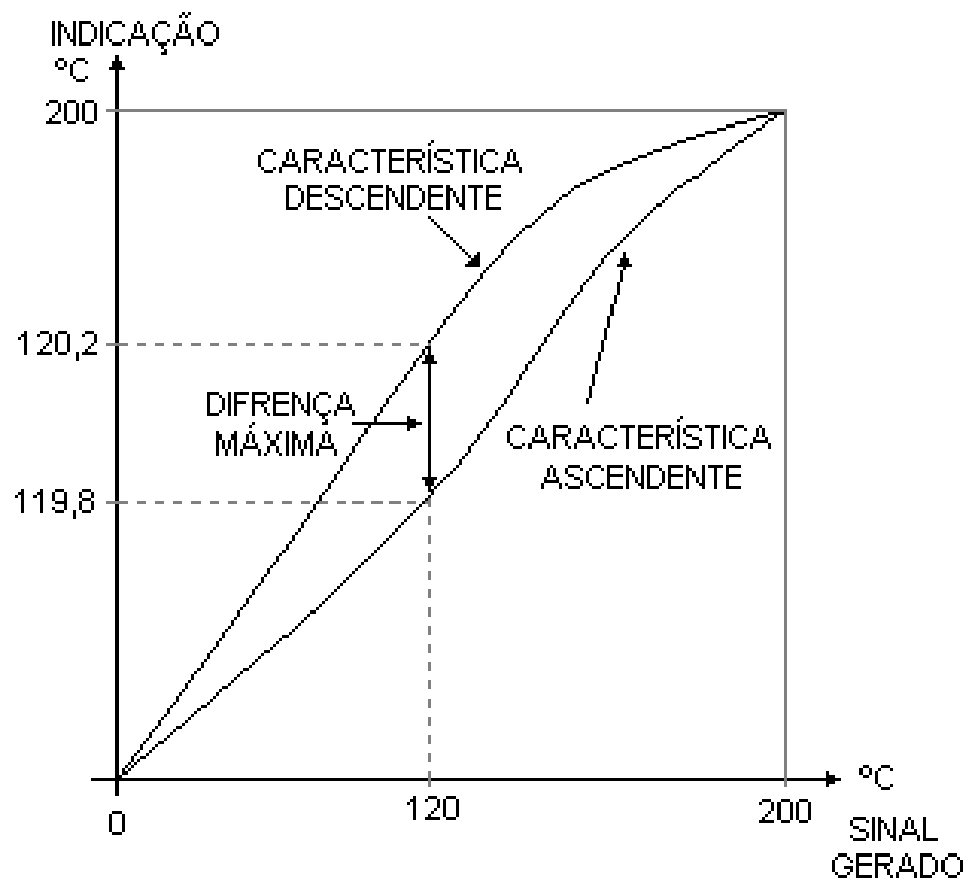
Portanto, se a variável de processo variar 0,2 °C, o instrumento não apresentará resposta alguma.

Terminologia na Metrologia

- **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 no sentido ascendente e descendente.
- É expresso em porcentagem do span.

Exemplo: Durante a calibração de um determinado instrumento com range de 0 à 200 °C, foi levantada a curva dos valores indicados, conforme mostrado na figura. A diferença entre 120,2 °C e 119,8 °C representa o erro de histeresis correspondente a 0,2 % do span.

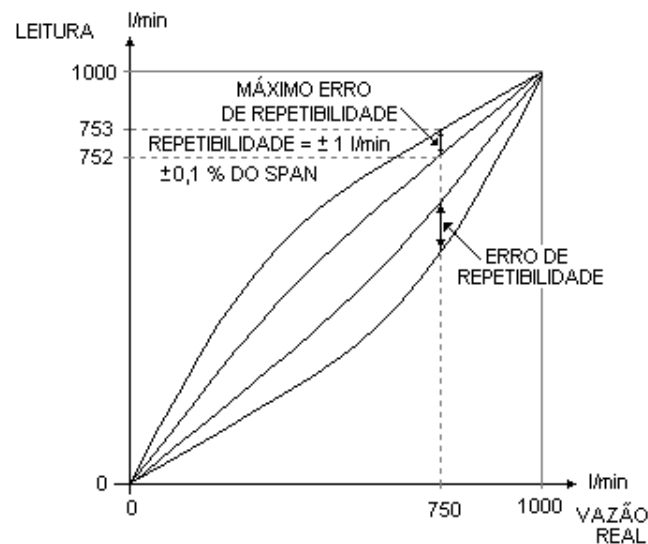
Terminologia na Metrologia



Terminologia na Metrologia

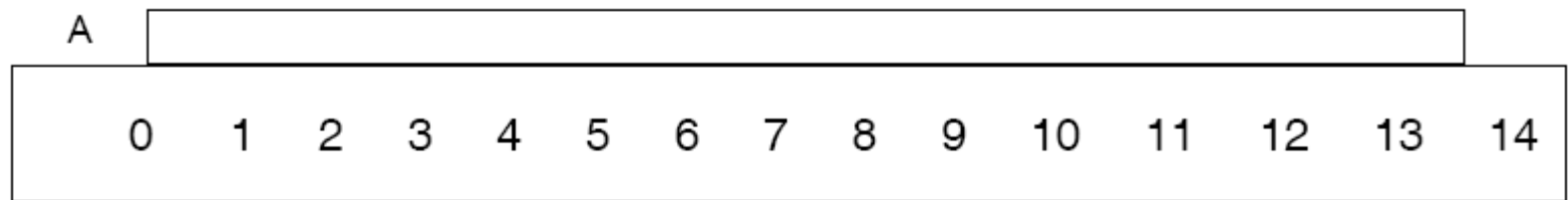
- **Repetibilidade** - É a máxima diferença entre diversas medidas de um mesmo valor da variável, adotando sempre o mesmo sentido de variação. Expressa-se em porcentagem do span.

Exemplo: Um instrumento com range de 0 à 1000 l/min, com repetibilidade de $\pm 0,1\%$ do span e com exatidão de $\pm 1\%$ do span, para uma vazão real na primeira passagem ascendente for 750 l/min e o instrumento indicar 742 l/min, numa segunda passagem ascendente com vazão real de 750 l/min o instrumento indicará 742 ± 1 l/min, conforme mostrado na figura, a seguir:



Algarismos significativos

Segmento AB



Régua graduada em centímetros
Menor divisão da escala $u = 1 \text{ cm}$

$$AB = 14 u + \text{Fração de } u$$

14 unidades completas,
portanto, exata.

Fração de u não
pode ser medida,
mas pode ser
avaliada pelo
observador dentro
dos seus limites de
percepção

Algarismos significativos

Se 3 observadores fossem anotar o comprimento AB:

Todos anotariam 14 unidades completas. Mas poderiam avaliar a fração de u de 3 modos diferentes:

Fração de u = 0,6 u

Fração de u = 0,5 u

Fração de u = 0,4 u

Nenhum dos três estava errado ! Portanto o comprimento AB pode ser:

AB = 14,4 cm

AB = 14,5 cm

AB = 14,6 cm

A medida do comprimento AB apresenta 3 algarismos significativos, sendo 2 corretos e 1 duvidoso .

AB = 14,5 cm



algarismo duvidoso

Algarismos significativos

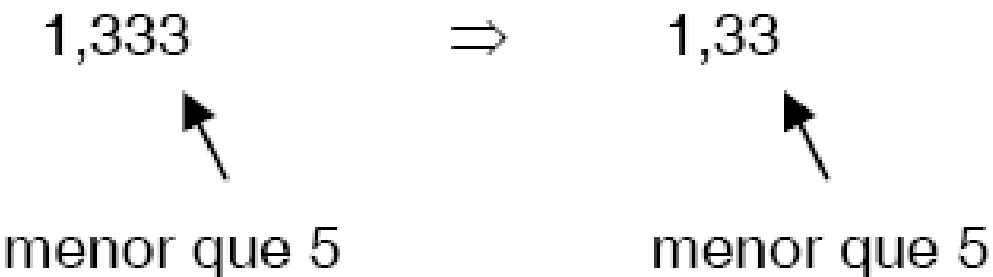
- Os algarismos significativos de um número contam-se da esquerda para a direita, a partir do primeiro não nulo. Exemplos:

0,002500	4 a.s.
83	2 a.s.
78,0	3 a.s.
0,18	2 a.s.
134,5	4 a.s.
26,10	4 a.s.
28,1	3 a.s.
0,0105	3 a.s.

Regras básicas de arredondamento (NBR-5891)

- **REGRA 1** - Quando o algarismo imediatamente seguinte ao último algarismo por conservar é menor que 5, ele permanecerá conservado sem modificações.

Exemplo: $1,333 \Rightarrow 1,33 \Rightarrow 1,3$



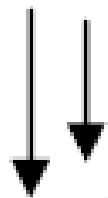
menor que 5 menor que 5

Regras básicas de arredondamento (NBR-5891)

- **REGRA 3** - Quando o algarismo imediatamente seguinte ao último algarismo por conservar é igual a 5, e for seguido de no mínimo um algarismo diferente de zero, o último algarismo por conservar deverá ser aumentado de uma unidade.

Exemplo:

4,8512 \Rightarrow 4,9



Algarismo diferente de zero

Algarismo seguinte igual a 5

Regras básicas de arredondamento (NBR-5891)

- **REGRA 4** - Quando o algarismo imediatamente seguinte ao último algarismo por conservar é um 5 seguidos de zeros, por exemplo:

4,550; 2,750; 3,650; 1,25

- É necessário observar dois casos:

Regras básicas de arredondamento (NBR-5891)

- **REGRA 4.1** - Quando o último algarismo por conservar é ímpar, arredonda-se para o algarismo par mais próximo, ou seja, aumenta-se de uma unidade o último algarismo por conservar. Exemplo:
 - 4,550 => arredondada a 1a decimal , será 4,6
 - 3,350 => arredondada a 1a decimal , será 3,4
- **REGRA 4.2** - Quando o último algarismo por conservar for par, ele permanecerá conservado sem modificação. Exemplo:
 - 2,850 => arredondada a 1a decimal , será 2,8
 - 1,650 => arredondada a 1a decimal , será 1,6

Erro de Medição

- O erro de medição é caracterizado como a diferença entre o valor da indicação do SM e o valor verdadeiro o mensurando, isto é:

$$E = I - VV$$

onde

E = erro de medição

I = indicação

VV = valor verdadeiro

- Na prática, o valor "verdadeiro" é desconhecido. Usa-se então o chamado valor verdadeiro convencional (VVC), isto é, o valor conhecido com erros não superiores a um décimo do erro de medição esperado. Neste caso, o erro de medição é calculado por:

onde

$$E = I - VVC$$

VVC = valor verdadeiro convencional

Tipos de erros

- Para fins de melhor entendimento, o erro de medição pode ser considerado como composto de três parcelas aditivas:

$$E = E_s + E_a + E_g$$

sendo

E = erro de medição

E_s = erro sistemático

E_a = erro aleatório

E_g = erro grosseiro

O erro sistemático

- *O erro sistemático (Es): é a parcela de erro sempre presente nas medições realizadas em idênticas condições de operação.* Um dispositivo mostrador com seu ponteiro "torto" é um exemplo clássico de erro sistemático, que sempre se repetirá enquanto o ponteiro estiver torto. Pode tanto ser causado por um problema de ajuste ou desgaste do sistema de medição, quanto por fatores construtivos.

O erro aleatório

- Quando uma medição é repetida diversas vezes, nas mesmas condições, observam-se variações nos valores obtidos. Em relação ao valor médio, nota-se que estas variações ocorrem de forma imprevisível, tanto para valores acima do valor médio, quanto para abaixo. Este efeito é provocado pelo *erro aleatório (Ea)*. *Diversos fatores contribuem para o surgimento do erro aleatório.*
- A existência de folgas, atrito, vibrações, flutuações de tensão elétrica, instabilidades internas, das condições ambientais ou outras grandezas de influência, contribui para o aparecimento deste tipo de erro.

O erro grosseiro

- O erro grosseiro (E_g) é, geralmente, decorrente de mau uso ou mau funcionamento do SM. Pode, por exemplo, ocorrer em função de leitura errônea, operação indevida ou dano do SM. Seu valor é totalmente imprevisível, porém geralmente sua existência é facilmente detectável. Sua aparição pode ser resumida a casos muito esporádicos, desde que o trabalho de medição seja feito com consciência.

Estatística Aplicada à Metrologia

- Estatística é ciência que se preocupa com a organização , descrição , análise e interpretação dos dados experimentais.
- A confiabilidade metrológica utiliza-se de ferramentas estatísticas para avaliar a eficiência de ensaios e produzir resultados confiáveis.

	Amostra
Nº de Observações	n
Média	$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$
Variância	$S^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}$
Desvio Padrão	$S = \sqrt{S^2}$

Caracterização da amostra

- **Média**

Se um conjunto de medições de um mesurando fornece “n” valores individuais independentes x_1, x_2, x_3 , o resultado do valor mais provável para o conjunto, é expresso como sendo a média aritmética amostral dos “n” valores individuais, a qual é definida pela expressão:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

Onde: \bar{x} = média aritmética

x_i = valores da amostra

n = números de elementos da amostra

Média

- Exemplo: Após o ajuste de um transmissor de pressão, foram feitas três leituras seguidas, a 1ª foi 4,02 mA, a 2ª foi 3,99 mA e a 3ª foi 4,10 mA. Calcule a média das 3 leituras.

$$\bar{x} = \frac{4,02 + 3,99 + 4,10}{3} = 4,036 \text{ mA,}$$

Utilizando-se a regra de arredondamento para 3 algarismos significativos o resultado da média é de 4,04 mA.

Medida de dispersão

- **Variância da amostra**

A variância da amostra avalia o quanto os valores observados estão dispersos ao redor da média.

$$S^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Onde: S^2 = Variância

X = valor de cada amostra

\bar{x} = média aritmética das amostras

n = números de elementos da amostra

Variância da amostra

- Exemplo: Após o ajuste de um transmissor de pressão, foram feitas três leituras seguidas, a 1ª foi 4,02 mA, a 2ª foi 3,99 mA e a 3ª foi 4,10 mA. Calcule a variância das 3 leituras.

X	$X - \bar{x}$	$(X - \bar{x})^2$
4,02 mA	$4,02 - 4,04 = -0,02$	0,0004
3,99 mA	$3,99 - 4,04 = -0,05$	0,0025
4,10 mA	$4,10 - 4,04 = +0,06$	0,0036
Σ	-----	0,0065

$$S^2 = \frac{0,0065}{3 - 1} = 0,00325$$

Utilizando-se a regra de arredondamento para 2 algarismos significativos o resultado da variância é de 0,0032.

Desvio padrão

- *O desvio padrão é a raiz quadrada da variância.*

$$s = \sqrt{S^2}$$

- Exemplo: A partir da variância da amostra de 0,0032, calcule o desvio padrão.

$$s = \sqrt{0,0032} = 0,05656$$

- Utilizando-se a regra de arredondamento para 2 algarismos significativos o resultado do desvio padrão é de 0,057 mA.

Capítulo IV

- Medição de Temperatura
- Medição de Viscosidade
- Medição de Densidade

Medição de Temperatura

- **O que é temperatura**

- De um modo simples, a temperatura é a medida de quanto um corpo está mais quente ou mais frio que outro.
- Quanto mais quente um corpo, maior é a sua temperatura e maior é o seu nível de calor.
- Outra definição simplificada de temperatura se baseia em sua equivalência a uma força acionadora ou potencial que provoca um fluxo de energia em forma de calor.

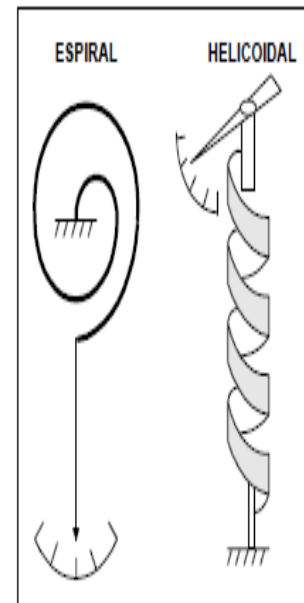
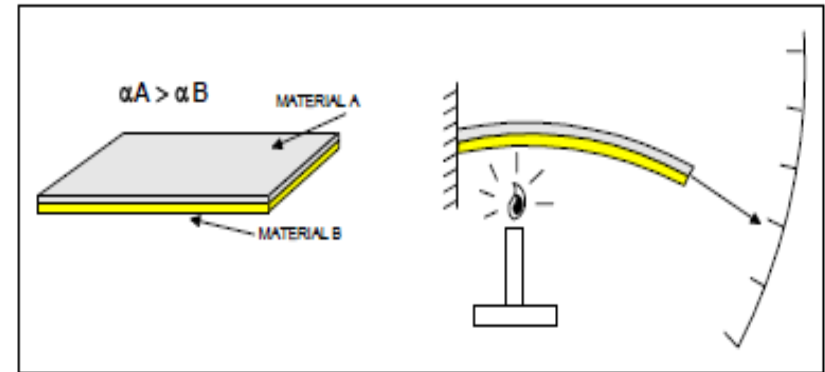
Medição de Temperatura

- Unidades de temperatura

ESCALAS DE TEMPERATURA	PONTO DE EBULIÇÃO DA ÁGUA	PONTO DE FUSÃO DA ÁGUA	ZERO ABSOLUTO
ESCALAS ABOLUTAS			
Rankine R	671,67R	491,67R	0
Kelvin K	373,15K	273,15K	0
ESCALAS RELATIVAS			
Celsius C	100°C	0°C	-273,15°C
Fahrenheit F	212°F	32°F	-456,67°F

Termômetro bimetálicos

- Baseia-se no fenômeno da dilatação linear dos metais com a temperatura.
- O termômetro bimetálico consiste em duas lâminas de metais com coeficientes de dilatação diferentes sobrepostas, formando uma só peça e tem exatidão de $\pm 1^\circ$.
- Variando-se a temperatura do conjunto, observa-se um encurvamento que é proporcional à temperatura.



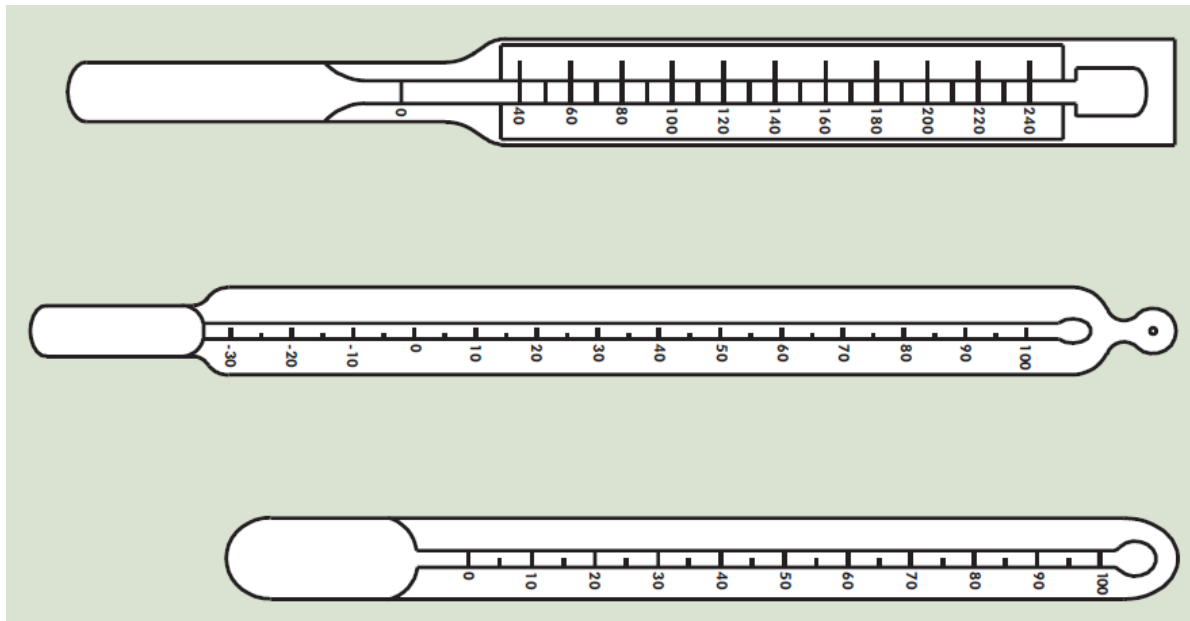
TERMÔMETROS À DILATAÇÃO DE LÍQUIDO EM RECIPIENTE DE VIDRO

- 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.
- Após a calibração, a parede do tubo capilar é graduada em graus ou frações deste.
- Os líquidos mais usados são: mercúrio, tolueno, álcool e acetona.

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

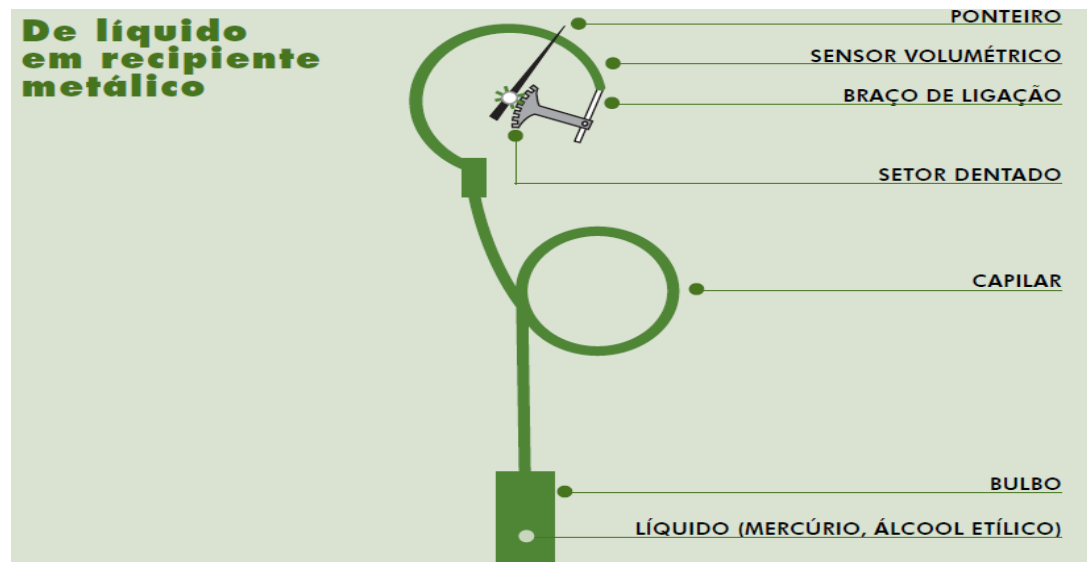
TERMÔMETROS À DILATAÇÃO DE LÍQUIDO EM RECIPIENTE DE VIDRO

- No termômetro de mercúrio, pode-se elevar o limite máximo até 550°C , injetando-se gás inerte sob pressão, para evitar a vaporização do mercúrio.
- Por ser frágil, é impossível registrar sua indicação ou transmiti-la a distância.



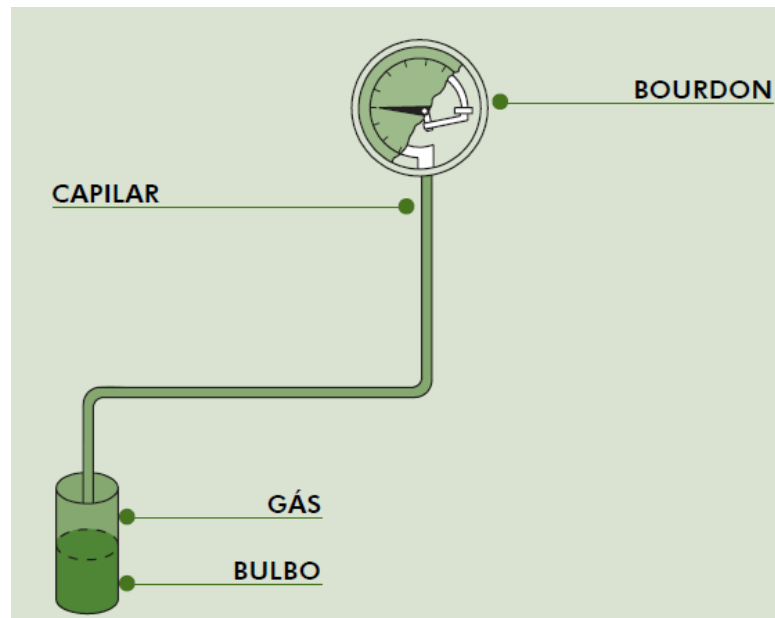
TERMÔMETRO À DILATAÇÃO DE LÍQUIDO EM RECIPIENTE METÁLICO

- Neste termômetro, o líquido preenche todo o recipiente e, sob o efeito de um aumento de temperatura, se dilata, deformando um elemento extensível.
- permitem leituras remotas e são os mais precisos dos sistemas mecânicos de medição de temperatura.
- O elemento usado é o tubo de Bourdon.



Termômetros à pressão de gás

- 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.



Detector de Temperatura à Resistência

- O princípio de medição de temperatura por meio de termômetros de resistência, repousa essencialmente sobre a medição de variação da resistência elétrica de um fio metálico em função da temperatura. A relação matemática entre a resistência de um condutor e sua temperatura é dada pela fórmula aproximada:

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$

Onde: R = resistência à t °C.

R_0 = resistência à 0 °C.

α = coeficiente de variação da resistência do metal com a temperatura.

t = temperatura.

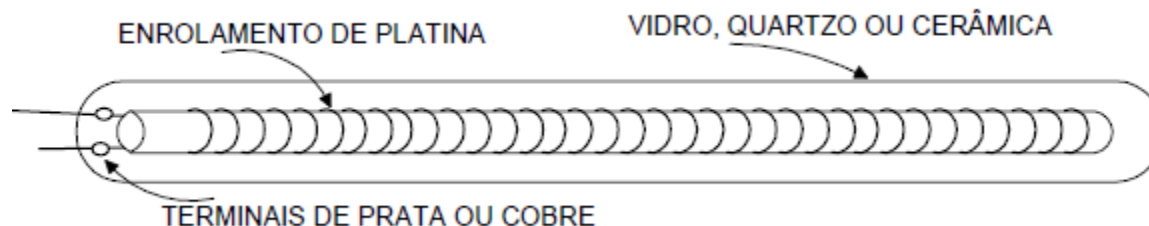
Detector de Temperatura à Resistência

- A exatidão dos termômetros de resistência, quando corretamente instalados, é grande, pode atingir a $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$. Normalmente as sondas utilizadas industrialmente apresentam uma precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.
- Os metais utilizados com maior frequência na confecção de termo resistência são:

PLATINA - faixa - 200 à 600°C - Ponto de Fusão 1774°C.

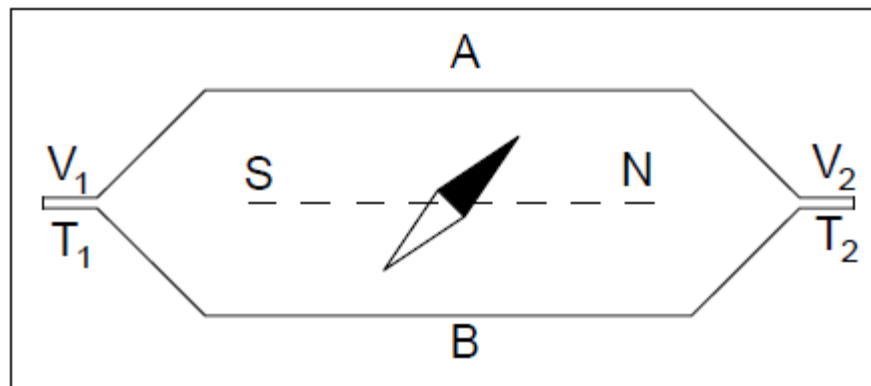
NÍQUEL - faixa - 200 à 300°C - Ponto de Fusão 1455°C.

COBRE - faixa - 200 à 120°C - Ponto de Fusão 1023°C.



Termopares

- A experiência de SEEBECK demonstrou que num circuito fechado, formado por dois fios de metais diferentes, se colocarmos os dois pontos de junção à temperaturas diferentes, se cria uma corrente elétrica cuja intensidade é determinada pela natureza dos dois metais, utilizados e da diferença de temperatura entre as duas junções.



Tipos de Termopares

- A seguir mostraremos os tipos mais usados nas indústrias:

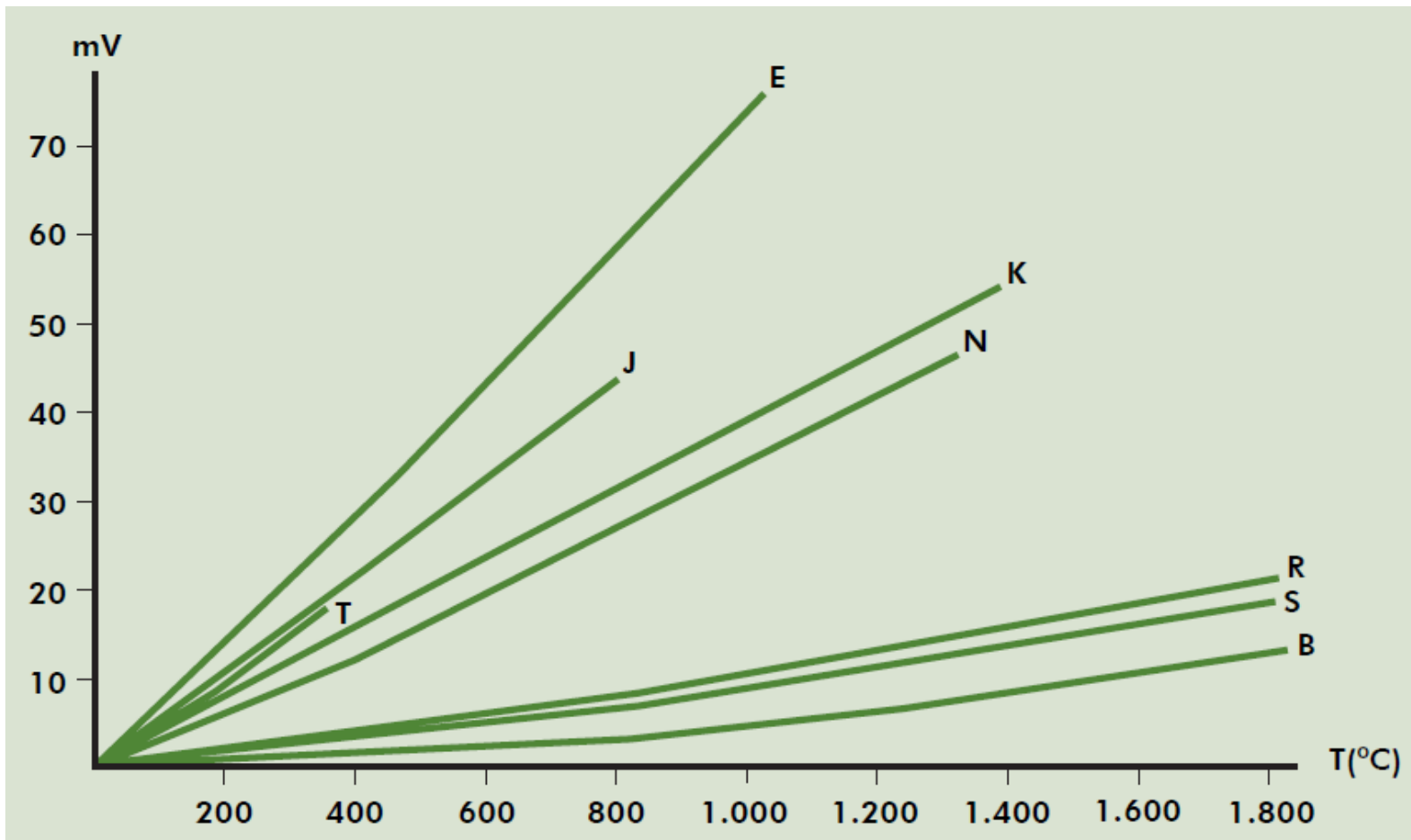
Tipo	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Faixa de temp. usual	Vantagens	Restrições
T	Cobre	Constantan	- 184 a 370°C	1) Resiste a atmosfera corrosiva. 2) Aplicável em atmosfera redutora ou oxidante abaixo de 310°C. 3) Sua estabilidade o torna útil em temperaturas abaixo de 0°C.	1) Oxidação do cobre acima de 310°C.
J	Ferro	Constantan	0 a 760°C	1) Baixo Custo. 2) Indicado para serviços contínuos até 760°C em atmosfera neutra ou redutora.	1) Limite máximo de utilização em atmosfera oxidante de 760°C devido à rápida oxidação do ferro. 2) Utilizar tubo de proteção acima de 480°C.
E	Chromel	Constantan	0 a 870°C	1) Alta potência termoelétrica. 2) Os elementos são altamente resistentes à corrosão, permitindo o uso em atmosfera oxidante.	1) Baixa estabilidade em atmosfera redutora.

Tipos de Termopares

Tipo	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Faixa de temp. usual	Vantagens	Restrições
K	Chromel	Alumel	0 a 1260°C	<ol style="list-style-type: none"> 1) Indicado para atmosfera oxidante. 2) Para faixa de temperatura mais elevada fornece rigidez mecânica melhor do que os tipos S ou R e vida mais longa do que o tipo J. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Vulnerável em atmosferas redutoras, sulfurosas e gases como SO₂ e H₂S, requerendo substancial proteção quando utilizado nestas condições.
S	Platina 10% Rhodio	Platina	0 a 1480°C	<ol style="list-style-type: none"> 1) Indicado para atmosferas oxidantes. 2) Apresenta boa precisão a altas temperaturas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Vulnerável à contaminação em atmosferas que não sejam oxidante. 2) Para altas temperaturas, utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina.
R	Platina 13% Rhodio	Platina			

Termopares

- CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA E FEM



Termistores

- são semicondutores sensíveis à temperatura.
- Existem basicamente dois tipos de termístores:
 - NTC (do inglês *Negative Temperature Coefficient*) - termístores cujo coeficiente de variação de resistência com a temperatura é negativo: a resistência diminui com o aumento da temperatura.
 - PTC (do inglês *Positive Temperature Coefficient*) - termístores cujo coeficiente de variação de resistência com a temperatura é positivo: a resistência aumenta com o aumento da temperatura.

Termistores

- O grande problema do termistor NTC, como sensor para a temperatura, é a sua calibração, isto é, a de estabelecer uma função entre resistência elétrica e temperatura. A variação de sua resistência elétrica com a temperatura não é linear (pode ser vista como uma função exponencial decrescente)

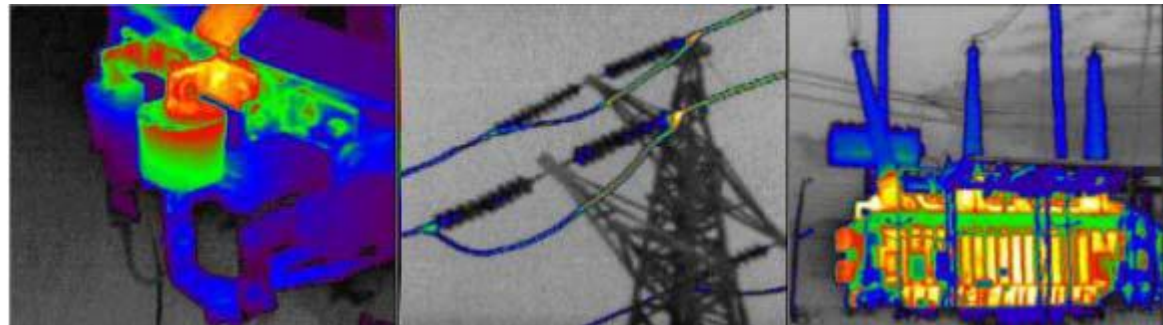


Termômetro de Radiação

- Todos os métodos de medida de temperatura discutidos até então requeriam que o termômetro estivesse em contato físico com o corpo cuja temperatura se quer medir. Além disso, a temperatura era medida quando o elemento sensor atingia a condição “idealizada” de equilíbrio térmico com o corpo ou sistema que se mede.
- Isso implica alguns problemas: medir sem interferir, medir temperaturas muito elevadas e medir objetos em movimento, à distância.
- Radiação térmica é a energia emitida por um corpo pelo fato de sua temperatura estar acima do zero absoluto e a ela podem ser atribuídas as propriedades típicas de uma onda, ou seja, a frequência e o comprimento de onda .

Termômetro de Radiação

- Termômetro de Radiação
 - Faixas típicas: 0 a 1000, 600 a 3000 e 500 a 2000°C
 - Faixa de precisão varia entre 0,25 e 2% do fundo de escala.
- Termógrafos
 - Produzem imagens com gradientes de temperatura



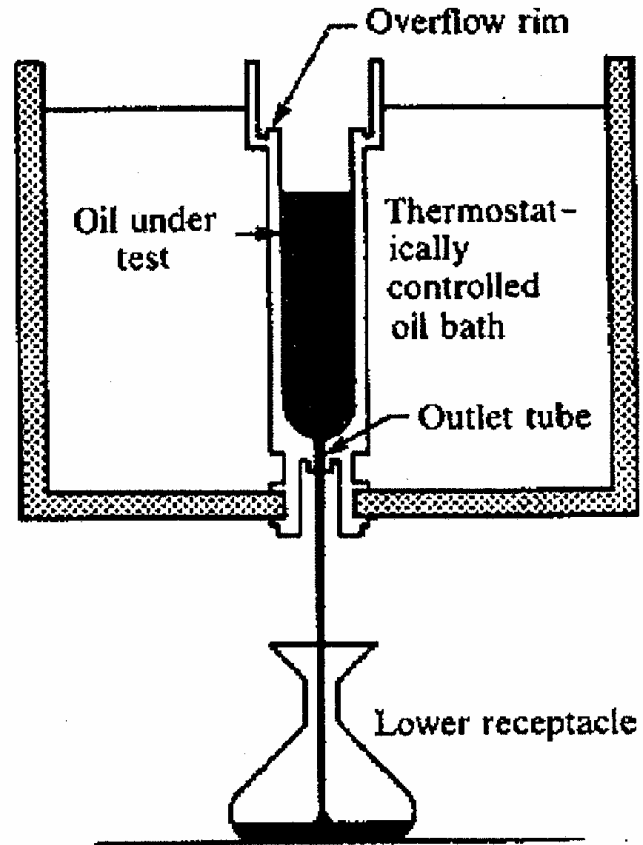
Medição de Viscosidade

- A viscosidade expressa a facilidade ou dificuldade com que um fluido escoar, quando submetido a uma força externa.
- A viscosidade é a medida dos efeitos combinados de adesão e coesão das moléculas do fluido entre si.
- A viscosidade pode ser considerada como a força de atrito que aparece quando uma camada de fluido é forçada a se mover em relação a outra.
- A viscosidade pode ser tomada como o atrito interno do fluido ou a habilidade do fluido vazar sobre si mesmo.

Medidores de Viscosidade

- Os tipos básicos de medidores de viscosidade são:
 1. Medidor rotacional: o torque requerido para girar um disco ou um cilindro e a força requerida para mover uma placa são função da viscosidade. São medidores apropriados para fluidos não newtonianos. Exemplos: viscosímetro de Couette e o de Brookfield.
 2. Medidor do fluxo através de uma restrição: inclui o viscosímetro que mede o tempo para um fluido passar através de um orifício ou de um tubo capilar, e a queda de pressão através do capilar em vazão constante. Exemplo: viscosímetro de Ostwald, de Poiseuille e o de Ford.
 3. Medidor da vazão em torno de obstruções: inclui a medição da queda vertical de uma esfera (medidor de Glen Creston) ou o rolamento de uma esfera num plano inclinado (medidor de Hoeppler) ou a subida de uma bolha de ar. A velocidade da queda da esfera ou da subida da bolha é função da viscosidade do fluido.

Exemplo de um medidor de viscosidade



Medição de Densidade

- A densidade absoluta é definida como a massa dividida pelo volume. Sua unidade é expressa em kg/m^3 ou kg/L .
- A densidade relativa de líquido é a divisão da massa da substância pela massa de um igual volume de água, tomadas ambas à mesma temperatura, pressão e gravidade.
- Densidade relativa é um numero adimensional e é a mesma em qualquer sistema de unidades. As densidades relativas da água e do ar são iguais a 1.
- Se a densidade relativa de um dado óleo é 0,650, sua densidade absoluta vale 650 kg/m^3 .

