

11

## INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE

GUIA BÁSICO

2008



Ministério de  
Minas e Energia





Confederação Nacional da Indústria  
Instituto Ewald Lodi  
Núcleo Central



EFICIÊNCIA ENERGÉTICA INDUSTRIAL



A energia que movimenta o Brasil.

# INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE

## GUIA BÁSICO

2008

© 2008. CNI – Confederação Nacional da Indústria  
IEL – Núcleo Central  
ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.  
Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

**ELETROBRÁS**  
**Centrais Elétricas Brasileiras S.A.**  
Av. Presidente Vargas, 409, 13º andar, Centro  
20071-003 Rio de Janeiro RJ  
Caixa Postal 1639  
Tel 21 2514-5151  
[www.eletrobras.com](http://www.eletrobras.com)  
[eletrobr@eletrobras.com](mailto:eletrobr@eletrobras.com)

**PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**  
Av. Rio Branco, 53, 14º, 15º, 19º e 20º andares  
Centro, 20090-004 Rio de Janeiro RJ  
[www.eletrobras.com/procel](http://www.eletrobras.com/procel)  
[procel@eletrobras.com](mailto:procel@eletrobras.com)  
Ligaçāo Gratuita 0800 560 506

**PROCEL INDÚSTRIA – Eficiência Energética Industrial**  
Av. Rio Branco, 53, 15º andar, Centro  
20090-004 Rio de Janeiro RJ  
Fax 21 2514-5767  
[www.eletrobras.com/procel](http://www.eletrobras.com/procel)  
[procel@eletrobras.com](mailto:procel@eletrobras.com)  
Ligaçāo Gratuita 0800 560 506

**INSTITUTO EUVALDO LODI**  
**IEL/Núcleo Central**  
Setor Bancário Norte, Quadra 1, Bloco B  
Edifício CNC  
70041-902 Brasília DF  
Tel 61 3317-9080  
Fax 61 3317-9360  
[www.iel.org.br](http://www.iel.org.br)

**CNI**  
**Confederação Nacional da Indústria**  
Setor Bancário Norte, Quadra 1, Bloco C  
Edifício Roberto Simonsen  
70040-903 Brasília DF  
Tel 61 3317- 9001  
Fax 61 3317- 9994  
[www.cni.org.br](http://www.cni.org.br)  
Serviço de Atendimento ao Cliente – SAC  
Tels 61 3317-9989 / 61 3317-9992  
[sac@cni.org.br](mailto:sac@cni.org.br)

159

Instrumentação e controle: guia básico / Eletrobrás [et al.]. Brasília : IEL/NC, 2008.  
218 p. : il.

ISBN 978-85-87257-36-9

1. Instrumentação industrial 2. Sistemas de controle I. Eletrobrás II. CNI – Confederação Nacional da Indústria III. IEL – Núcleo Central IV. Título.

CDU: 621.51

**ELETROBRÁS / PROCEL****Presidência**

José Antônio Muniz Lopes

**Diretoria de Tecnologia**

Ubirajara Rocha Meira

**Departamento de Desenvolvimento de Eficiência Energética**

Fernando Pinto Dias Perrone

**Divisão de Tecnologia**

Vanda Alves dos Santos

**CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI****Presidente**

Armando de Queiroz Monteiro Neto

**INSTITUTO EUVALDO LODI – IEL / NÚCLEO CENTRAL****Presidente do Conselho Superior**

Armando de Queiroz Monteiro Neto

**Diretor-Geral**

Paulo Afonso Ferreira

**Superintendente**

Carlos Roberto Rocha Cavalcante

**Equipe Técnica****ELETROBRÁS / PROCEL****Equipe PROCEL INDÚSTRIA**

Vanda Alves dos Santos

Bráulio Romano Motta

Carlos Aparecido Ferreira

Humberto Luiz de Oliveira

Roberto Piffer

Marília Ribeiro Spera

**Revisão Gráfica**

Kelli Mondaini

**CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDUSTRIA – CNI****DIRETORIA EXECUTIVA – DIREX****Diretor**

José Augusto Coelho Fernandes

**Diretor de Operações**

Rafael Esmeraldo Lucchessi Ramacciotti

**Diretor de Relações Institucionais**

Marco Antonio Reis Guarita

**Unidade de Competitividade Industrial – COMPI****Gerente-Executivo**

Maurício Otávio Mendonça Jorge

**Gerente de Infra-Estrutura**

Wagner Ferreira Cardoso

**Coordenação Técnica**

Rodrigo Sarmento Garcia

**SUPERINTENDÊNCIA DE SERVIÇOS COMPARTILHADOS – SSC****Área Compartilhada de Informação e Documentação – ACIND****Normalização**

Gabriela Leitão

**INSTITUTO EUVALDO LODI – IEL / NÚCLEO CENTRAL****Gerente-Executivo de Operações**

Júlio Cezar de Andrade Miranda

**Gerente de Desenvolvimento Empresarial – GDE**

Diana de Mello Jungmann

**Coordenação Técnica**

Patrícia Barreto Jacobs

**Gerente de Relações com o Mercado – GRM**

Oto Morato Álvares

**Responsável Técnico**

Ana Amélia Ribeiro Barbosa

**SENAI / DN****Gerente-Executivo da Unidade de Educação Profissional – UNIEP**

Alberto Borges de Araújo

**Apoio Técnico**

Diana Freitas Silva Néri

**Gerente-Executiva da Unidade de Relações com o Mercado – UNIREM**

Mônica Côrtes de Domênico

**SENAI / MG****Conteudista**

Edson Pires da Silva

**Pedagoga**

Xênia Ferreira da Silva

**Coordenação do projeto pelo SENAI / MG**

Cristiano Ribeiro Ferreira Jácome

**Supervisão Pedagógica**

Regina Averbug

**Editoração Eletrônica**

Link Design

**Revisão Gramatical**

Marluce Moreira Salgado



# SUMÁRIO

## Apresentação

### **Capítulo 1 – Introdução à instrumentação industrial 15**

- Conceito de instrumentação 17
- Conceito de processo 17
- Conceito de variável de processo 18
- Principais objetivos ao medir ou controlar as variáveis de processo 19
- Malhas de controle 19
- Controle em malha aberta 19
- Controle em malha fechada 20

### **Capítulo 2 – Conceitos básicos 27**

- Classes de instrumentos 28
- Instrumento de medição indicador 28
- Instrumento de medição registrador 29
- Transmissor 30
- Transdutor 31
- Controlador 31
- Elemento final de controle 32
- Identificação de instrumentos 33
- Instrumentos analógicos x digitais 38

### **Capítulo 3 – Terminologias 45**

- Range* 46
- Span* 46
- Zero do instrumento 47
- Exatidão de um instrumento de medição 47
- Repetibilidade 48
- Classe de exatidão 50
- Sensibilidade 51
- Resolução 51
- Tipos específicos de erros de medição 52
- Erros estáticos 52
- Linearidade e não-linearidade 53

Histerese	53
Zona mortas	54
<b>Erros dinâmicos</b>	<b>55</b>
Resposta dinâmica	55
Degrau e rampa	55
Tempo morto	56
Constante de tempo	56
Tempo de subida	57
<b>Laboratório de Metrologia</b>	<b>58</b>
Padrões de calibrações	60
Recomendações referentes à calibração	61

## **Capítulo 4 – Pressão 67**

Conceito de pressão	69
Tipos de medidores e transmissores de pressão	70
Medição da pressão	71
Pressão e a vazão	72
Principais medidores de pressão	72
Manômetros	73
Pressostato	79
<b>Instrumentos transmissores de pressão</b>	<b>80</b>
Tipos de transmissores de pressão	80

## **Capítulo 5 – Vazão 89**

Conceito de vazão	90
Tipos de medidores de vazão	91
Principais medidores de vazão	92
Medidores indiretos	93
Medidores diretos	99
Medidores especiais	102
<b>Transmissor de vazão por pressão diferencial</b>	<b>106</b>
Extrator de raiz quadrada	106
Integrador de vazão	107
Quadro comparativo da utilização dos medidores de vazão	107

## **Capítulo 6 – Temperatura 113**

Conceito de temperatura	114
Tipos de medidores de temperatura	116
Principais medidores de temperatura	117
Termômetro de dilatação de líquido	117

Termômetro à dilatação de sólido (bimetálico) 119  
Termorresistência 120  
Termopar 123  
Pirômetros 128  
**Escolha do medidor de temperatura** 131

## **Capítulo 7 – Nível 137**

Conceito de nível 138  
Classificação e tipo de medidores de nível 139  
**Tipos de medidores de nível** 140  
Medidores de nível por medição direta 140  
Medidores de nível por medição indireta 145  
**Medição de nível de sólidos** 154  
**Instrumentos para alarme e intertravamento** 154  
Chaves de nível 154  
**Escolha do tipo de medidor de nível** 155

## **Capítulo 8 – Elementos finais de controle 161**

Conceito de elementos finais de controle 162  
Válvulas de controle 163  
Partes principais de uma válvula de controle 164  
Inversores de freqüência 166  
Aplicações no controle de bomba 167

## **Capítulo 9 – Estratégias de controle de processos 173**

Controle em malha fechada 174  
Princípio 174  
Efeitos das ações PID em uma malha fechada 176  
Ação proporcional 176  
Ação integral 179  
Ação derivativa 180  
**Controle feed-forward** 181  
Controle *feed-forward* 181  
Associação da malha aberta com a malha fechada 182  
Estudo do relé somador 183  
Exemplo de controle *feed-forward* 185  
**Controle split-range** 186

**Capítulo 10 – Otimização no ajuste de malhas de controle 195**

Método de aproximações sucessivas ou tentativa e erro 196

Método *Ziegler* e *Nichols* em malha fechada 199

Cálculo das ações do controlador 202

**Glossário geral de instrumentação e controle 207**

**Referências 215**

**Anexo – *Check list* 217**





# APRESENTAÇÃO

---

O bter a eficiência energética significa utilizar processos e equipamentos que sejam mais eficientes, reduzindo o desperdício no consumo de energia elétrica, tanto na produção de bens como na prestação de serviços, sem que isso prejudique a sua qualidade.

É necessário conservar e estimular o uso eficiente da energia elétrica em todos os setores socioeconômicos do Brasil, sendo de grande importância para o país a adoção efetiva de medidas de economia de energia e o consequente impacto destas ações. Neste cenário destaca-se a indústria, não só pelo elevado potencial de conservação de energia do seu parque como também pela sua capacidade produtiva como fornecedora de produtos e serviços para o setor elétrico.

No âmbito das ações que visam criar programas de capacitação voltados para a obtenção de eficiência energética no setor industrial, inclui-se o *Curso de Formação de Agentes Industriais de Nível Médio em Otimização de Sistemas Motrizes*. Este curso tem como objetivo capacitar agentes industriais, tornando-os capazes de identificar, propor e implementar oportunidades de redução de perdas nas instalações industriais de sistemas motrizes.

O curso faz parte do conjunto de ações que vêm sendo desenvolvidas pelo governo federal para:

- fomentar ações de eficiência energética em sistemas motrizes industriais;
- facilitar a capacitação dos agentes industriais de nível médio dos diversos subsetores indústria, para desenvolverem atividades de eficiência energética;
- apresentar as oportunidades de ganhos de eficiência energética por meio de economia de energia em sistemas motrizes industriais;
- facilitar a implantação de tecnologias eficientes sob o ponto de vista energético, além da conscientização e da difusão de melhores hábitos para a conservação de energia.

Como apoio pedagógico para este curso, foram elaborados os seguintes guias técnicos:

- 1 – Correias Transportadoras
- 2 – Acoplamento Motor Carga
- 3 – Metodologia de Realização de Diagnóstico Energético
- 4 – Compressores
- 5 – Ventiladores e Exaustores
- 6 – Motor Elétrico
- 7 – Energia Elétrica: Conceito, Qualidade e Tarifação
- 8 – Acionamento Eletrônico
- 9 – Bombas
- 10 – Análise Econômica de Investimento
- 11 – Instrumentação e Controle

Este material didático – Instrumentação e Controle – faz parte do conjunto de guias técnicos do *Curso de Formação de Agentes Industriais de Nível Médio em Otimização de Sistemas Motrizes*. Ele é um complemento para o estudo, reforçando o que foi desenvolvido em sala de aula. É também uma fonte de consulta, onde você, participante do curso, pode rever e relembrar os temas abordados no curso.

Todos os capítulos têm a mesma estrutura. Conheça, a seguir, como são desenvolvidos os capítulos deste guia.

- **Iniciando nossa conversa** – texto de apresentação do assunto abordado no capítulo.
- **Objetivos** – informa os objetivos de aprendizagem a serem atingidos a partir do que foi desenvolvido em sala de aula e com o estudo realizado por meio do guia.
- **Um desafio para você** – apresenta um desafio: uma situação a ser resolvida por você.
- **Continuando nossa conversa** – onde o tema do capítulo é desenvolvido, trazendo informações para o seu estudo.

- **Voltando ao desafio** – depois de ler, analisar e refletir sobre os assuntos abordados no capítulo, você retornará ao desafio proposto, buscando a sua solução à luz do que foi estudado.
- **Resumindo** – texto que sintetiza os principais assuntos desenvolvidos no capítulo.



## Capítulo 1

---

# INTRODUÇÃO À INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

### Iniciando nossa conversa

Os modernos processos industriais de fabricação exigem sistemas de controle cada vez mais sofisticados. Esses processos são muitos variados e abrangem a fabricação de produtos diversos como os derivados do petróleo, os produtos alimentícios, o papel e a celulose, entre outros.

Em todos esses processos é absolutamente indispensável controlar ou manter constantes algumas variáveis. O objetivo é melhorar a qualidade, diminuir o desperdício de energia, aumentar a quantidade produzida e manter a segurança. Por exemplo, precisamos controlar a pressão, a vazão, a temperatura, o nível, o pH, a condutividade, a velocidade e a umidade em muitos destes processos. Os instrumentos de medição e controle são elementos que nos permitem manter controladas estas variáveis.

Os sistemas de controle mantêm a variável controlada no valor especificado, comparando o valor da variável medida, ou a condição do controlador, com o valor desejado (referência ou *set point*), e fazendo as correções em função do desvio existente entre estes dois valores (erro ou *offset*), sem a necessidade de intervenção do operador.

Neste capítulo teremos os seguintes tópicos: conceito de processo, conceito de variável de processo, principais objetivos ao se medir ou controlar variáveis de processo, conceito de instrumentação e, malhas de controle.

Ao final deste capítulo, há um pequeno glossário que visa auxiliá-lo no entendimento do texto.

## Objetivos

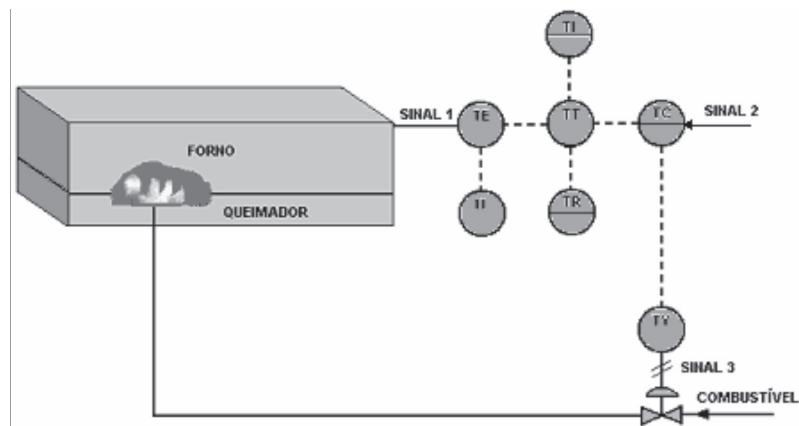
Ao estudar este capítulo, temos como objetivos:

- definir os principais conceitos de instrumentação Industrial;
- identificar num processo a variável manipulada, variável de processo e o *set point*;
- classificar os tipos de malhas de controle.

## Um desafio para você

Imagine que você é o técnico responsável pela manutenção de um processo de controle de temperatura do forno. Identifique qual é a variável de processo, a variável manipulada e o *set point* dentre os sinais indicados de 1 a 3 da Figura 1:

**Figura 1 – Controle de temperatura de um forno**



## Continuando nossa conversa

A instrumentação industrial teve seu início com a invenção da máquina a vapor por James Watt em 1775.

Daí para os dias de hoje estamos cada vez mais envolvidos por processos industriais automatizados que se utilizam da instrumentação para poderem conseguir produzir com qualidade e sem desperdícios. Dessa época em diante, cada vez

mais estamos envolvidos por processos industriais automatizados que têm na instrumentação a base para uma produção com qualidade e sem desperdícios. Dada essa importância, vamos agora conhecer alguns conceitos fundamentais para a área de instrumentação industrial.

## Conceito de instrumentação

"Instrumentação é qualquer dispositivo (instrumento), ou conjunto de dispositivos, utilizado com a finalidade de se medir, indicar, registrar ou controlar as variáveis de um processo". (STARLING, 2003, p. 2)

Existem instrumentos específicos para medição, indicação, para registro e para controle de uma variável de processo. Eles serão vistos com mais detalhes nos próximos capítulos.



### Fique ligado!

Pode-se dizer, então, que o papel da instrumentação é transformar grandezas físicas de processos em informações que possam ser utilizadas no controle do processo.

## Conceito de processo

Existem muitas definições para processo. Vejamos a seguir duas definições interessantes:

"Equipamento ou meio físico que precisa ser controlado ou monitorado de forma a transformar a matéria-prima em um produto". (STARLING, 2003, p. 1)

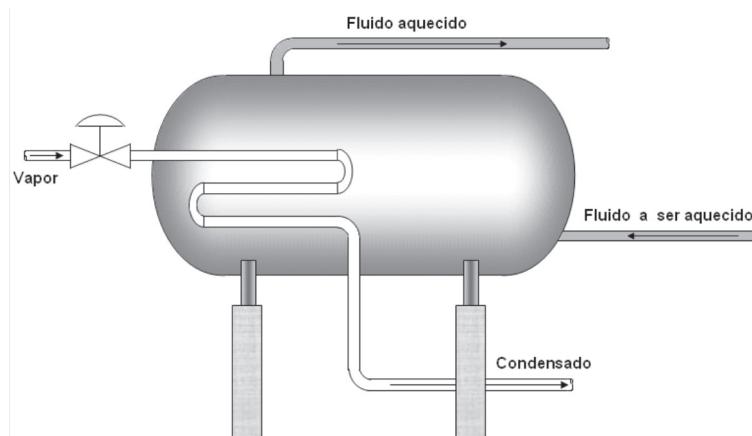
"Operação onde se varia pelo menos uma característica física ou química de um determinado material". (STARLING, 2003, p. 1)

Os diversos aspectos de instrumentação e de controle automático de processos podem ser mostrados mais apropriadamente por meio de um exemplo prático.

Para ilustrar os diversos aspectos, utilizar-se-á, como processo típico, o trocador de calor mostrado na Figura 2, que é utilizado para aquecer um fluido com vapor.

Este processo consiste em aquecer um fluido que entra frio (à direita da figura) no trocador de calor. Dentro do trocador existe uma serpentina. Ele possui um controle de temperatura formado pela válvula de vapor (à esquerda da figura). Na saída do trocador (parte superior da figura) aparece um cano de fluido aquecido que leva este fluido para um outro sistema.

**Figura 2 – Processo típico de um trocador de calor (BEGA, 2006, p. 6)**



## Conceito de variável de processo

A variável de processo é uma grandeza física ou química, cuja variação afeta na operação de um processo.

No exemplo citado anteriormente do trocador de calor, a temperatura será a variável de processo. Ela é influenciada por diversos fatores, sendo que os principais são a vazão, temperatura de entrada do fluido a ser aquecido, características do vapor utilizado no aquecimento, capacidade calórica dos fluidos, perda térmica do trocador para o ambiente, etc.

## Principais objetivos ao medir ou controlar as variáveis de processo

O objetivo principal de qualquer sistema de medição ou controle é aumentar a eficiência do processo, e consequentemente os lucros da instalação, atuando sobre:

- a qualidade do produto final;
- a segurança das pessoas e equipamentos;
- a preservação do meio ambiente;
- a economia de matéria prima, de energia e de mão de obra.



### Fique ligado!

O controle efetivo do processo está intimamente ligado à eficientização energética.

## Malhas de controle

Uma malha de controle consiste em um conjunto de equipamentos e instrumentos utilizados para controlar uma determinada variável de processo (saída). De acordo com o tipo de controle, a malha pode ser definida como aberta ou fechada.

Num processo controlado, algumas variáveis (entradas) são convertidas em sinais, possibilitando que as ações de controle sejam executadas por instrumentos elétricos, eletrônicos, mecânicos, pneumáticos, etc.

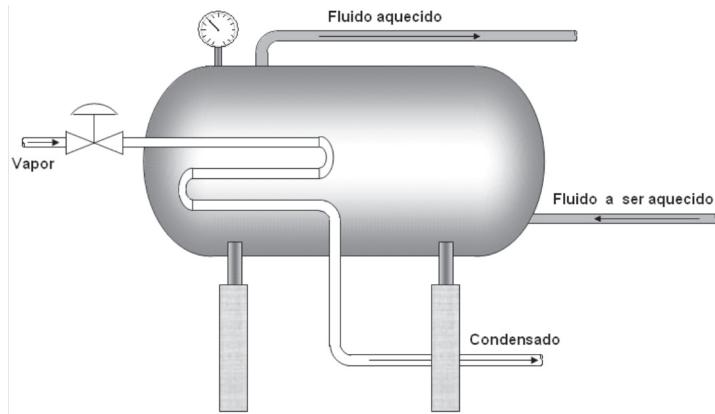
A seguir serão mostrados os dois tipos de malhas de controle existentes: malha aberta e a malha fechada.

### Controle em malha aberta

O controle em malha aberta é aquele que a informação sobre a variável controlada não é utilizada para ajustar quaisquer das variáveis de entrada.

No caso do exemplo citado anteriormente, a temperatura do fluido aquecido na saída do trocador não exercerá nenhuma influência sobre o vapor que entra no trocador de calor.

**Figura 3 – Processo típico de um trocador de calor em malha aberta (BEGA, 2006, p. 7)**



### Controle em malha fechada

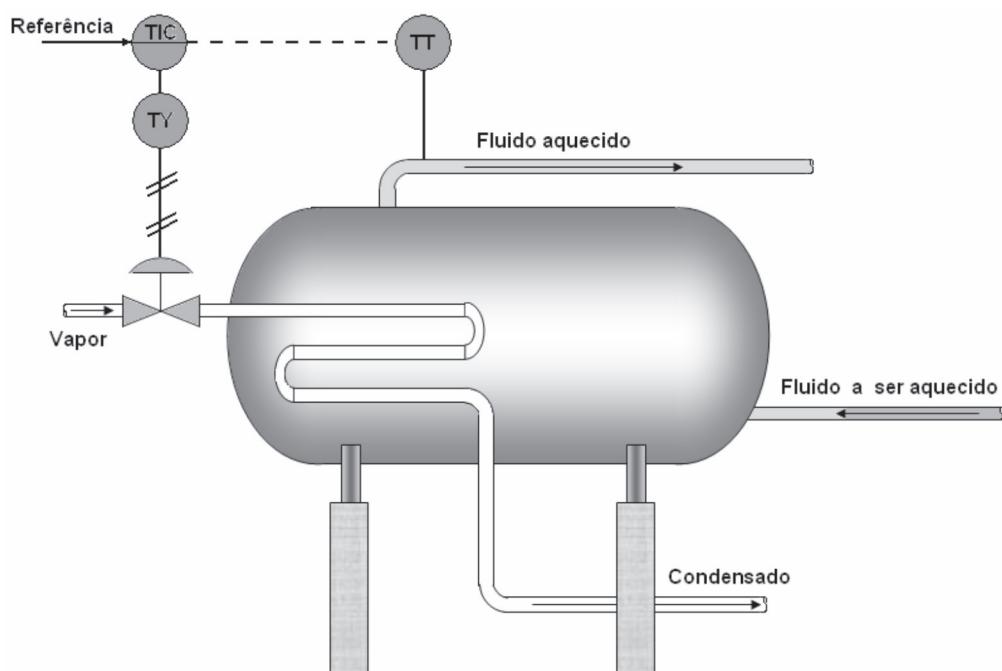
No processo típico de troca de calor do exemplo citado, bem como nos demais casos de controle de processos, a função fundamental do sistema de controle em malha fechada, ou sistema de controle com realimentação, é manipular a relação entrada/saída de energia ou material. Desta forma a variável controlada do processo será mantida dentro dos limites estabelecidos, ou seja, o sistema de controle em malha fechada regula a variável controlada, fazendo correções em outra variável de processo, que é chamada de variável manipulada.

O controle em malha fechada pode ser realizado por um operador humano (controle manual) ou mediante a utilização de instrumentação (controle automático).

No controle manual o operador terá como função medir a temperatura do fluido aquecido (variável de processo) e corrigir a vazão do vapor adicionando ao trocador (variável manipulada), de forma a manter a temperatura da variável controlada no valor desejado (referência ou *set point*). Ou seja, o operador irá medir

a temperatura do fluido aquecido por meio de um instrumento indicador e este sinal será comparado com a temperatura desejada, caso a temperatura esteja acima ou abaixo do valor desejado, o operador deverá atuar sobre a válvula de admissão de vapor fazendo a correção.

**Figura 4 – Processo típico de um trocador de calor com controle automático em malha fechada (BEGA, 2006, p. 8)**



Caso o processo típico de um trocador de calor seja controlado utilizando-se controle automático, as ações executadas pelo sistema de controle automático serão as mesmas que as executadas pelo operador quando estiver fazendo controle manual.

A medição do valor da variável de processo é feita pelo transmissor de temperatura (TT); a comparação do valor medido pelo transmissor com a referência (dado pelo operador) para obtenção do valor do erro (erro = referência – valor medido) é feita pelo controlador indicador de temperatura (TIC), enquanto a correção será efetivada pela válvula de controle, com base no valor recebido pelo TIC.

Resumindo, podemos gerar um quadro para fixar as ações de cada elemento do processo:

### Quadro 1 – Ações que serão executadas pelos elementos do processo

Ações	Executada por
Medição do valor da variável de processo,	Transmissor de temperatura (TT),
Comparação do valor medido pelo transmissor com a referência para obtenção do valor do erro,	Controlador indicador de temperatura (TIC),
Gerar Sinal de Correção levando em consideração o erro	Algoritmo de controle contido controlador indicador de temperatura (TIC),
Correção da variável.	Válvula de controle com base no valor do TIC.

### Voltando ao desafio

No controle de temperatura do forno que foi proposto no início do capítulo, temos como variável de processo a temperatura medida no forno (sinal 1), e a variável manipulada será a vazão de combustível (sinal 3) controlada pela válvula de combustível. O *set point* deste processo será um valor de referência de temperatura que está sendo inserido no controlador de temperatura TC, como pode ser visto na ilustração que é apresentada no desafio.

### Resumindo

No Capítulo 1 você estudou os conceitos básicos de instrumentação e pode aprender que:

- A *variável de processo* ou *variável controlada* é qualquer propriedade ou grandeza física monitorada pelo processo.
- A *variável manipulada* é a grandeza que é operada a fim de manter a variável de processo no valor desejado.
- O *set point* é o valor desejado estabelecido previamente como referência de ponto e controle (no qual o valor controlado deve permanecer).
- Numa malha aberta, a variável controlada não influencia na variável de processo.

- Numa malha fechada ou sistema com realimentação existe uma influência da variável controlada sobre a variável de processo, de forma que o processo verifica a todo instante as variações na saída e promove uma reação sobre os dados de entrada.

## Aprenda mais

Para que você possa aprofundar seus conhecimentos sobre o assunto, verifique na empresa onde trabalha se existem malhas de controle fechadas e/ou abertas e identifique nelas as variáveis de processo, manipulada, e *set point*.

A seguir, apresentamos uma pequena lista de termos, que irão ajudá-lo a aprender melhor o assunto tratado neste texto:

## Glossário

**Controle manual** – É quando o controlador é desligado do sistema, e um operador (humano) assume de forma empírica o controle do processo.

**Controle automático** – É quando o controlador fica responsável pela atualização da saída (variável manipulada) levando em consideração um erro na entrada.

**Entrada** – Sinal que é inserido em um equipamento para seu processamento.

**Instrumentação** - “Instrumentação é qualquer dispositivo (instrumento), ou conjunto de dispositivos, utilizado com a finalidade de se medir, indicar, registrar ou controlar as variáveis de um processo”. (STARLING, 2003, p.2)

**Malha aberta** – Malha de controle sem realimentação.

**Malha fechada** – Malha de controle com realimentação.

**Malha de controle** – Um conjunto de equipamentos e instrumentos utilizados para controlar uma determinada variável de processo (saída).

**Offset** – É a diferença entre o valor medido e o real, ou de referência.

Processo – Equipamento ou meio físico que precisa ser controlado ou monitorado de forma a transformar a matéria-prima em um produto.

Saída – Sinal que é retirado de um equipamento após seu processamento.

*Set point (SP)* – Variável de referência que será comparada (subtraída) com a variável de processo para encontrar o erro.

TAG – Símbolo de identificação formado por letras e números que representam um equipamento ou máquina instalada em um processo industrial.

Variável de processo (PV) – Variável que será subtraída do *set point* para encontrar o erro.

Variável manipulada (MV) – Variável de saída do controlador que é alterada em função do erro.





## Capítulo 2

---

### CONCEITOS BÁSICOS

#### Iniciando nossa conversa

Nas instalações industriais é comum encontrar arranjos complexos de instrumentos de medição e controle. Para se compreender mais facilmente suas funções, é necessário analisá-los, utilizando-se a classificação adequada.

Este capítulo está organizado em três tópicos: Classes dos instrumentos, Identificação dos instrumentos e Instrumentos analógicos x digitais.

No término deste capítulo você encontrará um conjunto de termos e suas definições. Consulte-o, sempre que necessário.

#### Objetivos

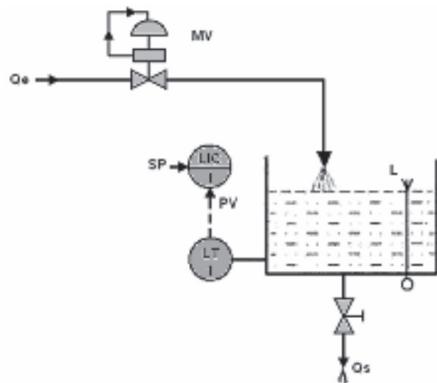
O estudo deste capítulo tem por objetivos:

- classificar os tipos de instrumentos;
- identificar os instrumentos por TAGs mnemônicos, analógicos e digitais;
- estabelecer as diferenças entre os instrumentos analógicos e digitais.

#### Um desafio para você

Imagine que você é o técnico de instrumentação, e necessita identificar dois instrumentos em um fluxograma de controle de processo da empresa. Faça a identificação pelo TAG e pela simbologia utilizada no fluxograma. Seus códigos são LIC 1, LT 1.

**Figura 5 – Esquema de controle do enchimento de um tanque (SENAI. ES, 1999, p. 19)**



### Continuando nossa conversa

## Classes de instrumentos

Podemos classificar os instrumentos e dispositivos utilizados em instrumentação de acordo com a função que desempenham no processo:

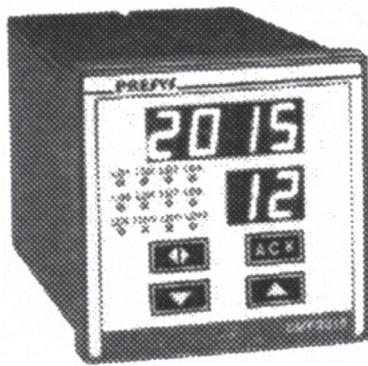
- Instrumento de medição indicador;
- Instrumento de medição registrador;
- Transmissor;
- Transdutor;
- Controlador;
- Elemento final de controle.

Veja a seguir como poderão ser definidos estes instrumentos.

### Instrumento de medição indicador

Instrumento de medição que apresenta uma indicação. A indicação pode ser analógica (contínua ou descontínua) ou digital. Os valores de mais de uma grandeza podem ser apresentados simultaneamente. Um instrumento de medição indicador pode também fornecer um registro.

Figura 6 – Indicador (SENAI. ES, 1999, p.8)



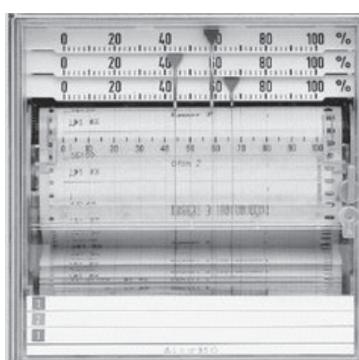
São exemplos deste tipo de instrumento:

- voltímetro analógico;
- amperímetro analógico;
- freqüencímetro digital;
- micrômetro.

### Instrumento de medição registrador

Instrumento de medição que fornece um registro da indicação. O registro pode ser analógico (linha contínua ou descontínua) ou digital. Os valores de mais de uma grandeza podem ser registrados simultaneamente. Um instrumento registrador pode também apresentar uma indicação.

Figura 7 – Registrador (SENAI. ES, 1999, p.8)



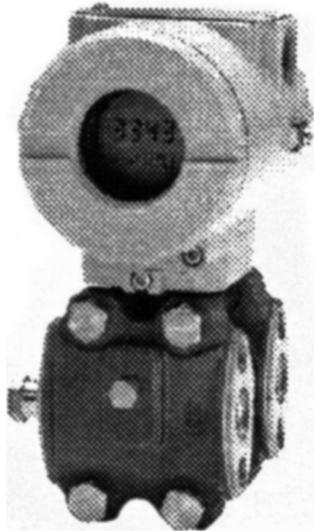
Exemplos desse tipo de instrumento:

- barógrafo;
- dosímetro termo luminescente;
- espectrômetro registrador.

### **Transmissor**

São instrumentos que detectam as variações na variável medida/controlada através do elemento primário e transmitem-na à distância. O elemento primário pode ou não fazer parte integrante do transmissor.

**Figura 8 – Transmissor (Instrumentação MBR,1999, p.9)**



Alguns tipos desses instrumentos são citados a seguir:

- transmissor de temperatura;
- transmissor de pressão;
- transmissor de vazão.

## Transdutor

Instrumento que recebe informações na forma de uma ou mais quantidades físicas, modifica, caso necessário, essas informações e fornece um sinal de saída resultante. Dependendo da aplicação, o transdutor pode ser um elemento primário, um transmissor ou outro dispositivo.

**Figura 9 – Transdutor (Instrumentação MBR, 1999, p.10)**



### Fique ligado!

O conversor é um tipo de transdutor que trabalha apenas com sinais de entradas e saídas padronizadas.

## Controlador

Instrumento que compara a variável de processo com um valor desejado e fornece um sinal de saída, a fim de manter a variável de processo em um valor específico ou entre valores determinados. A variável pode ser medida, diretamente pelo controlador ou indiretamente através do sinal de um transmissor ou transdutor.

**Figura 10 – Controlador (SENAI. ES, 1999, p.10)**



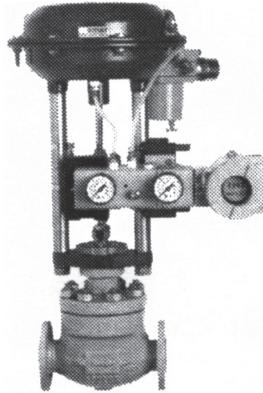
Podemos citar como exemplos de controladores:

- controlador *single loop*;
- controlador *multi loop*.

### **Elemento final de controle**

Os elementos finais de controle são mecanismos que variam a quantidade de material ou de energia em resposta ao sinal enviado pelo controlador, a fim de manter a variável controlada em um valor (ou faixa de valores) predeterminado.

**Figura 11 – Válvula de controle (SENAI. ES, 1999, p.10)**



Alguns exemplos de elementos finais de controle:

- válvula proporcional;
- inversores de freqüência;
- válvulas solenóide.

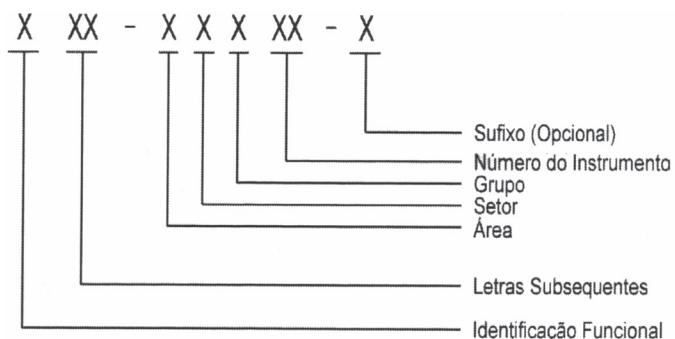
Após conhecer a classificação dos instrumentos, é necessário lembrar que eles podem ser identificados por meio de símbolos em diagramas. A seguir, vamos estudar este assunto.

## Identificação de instrumentos

As normas de instrumentação estabelecem símbolos, gráficos e codificação para identificação alfanumérica de instrumentos ou funções programadas que devem ser utilizadas nos diagramas e malhas de controle de projetos de instrumentação. Eles também são conhecidos como TAG.

De acordo com a norma ISA-S5 e a norma NBR-8190 da ABNT (figura a seguir), cada instrumento ou função programada deverá ser identificado por um conjunto de letras que o classifica funcionalmente e um conjunto de algarismos que indica a malha à qual o instrumento ou função programada pertence.

**Figura 12 – Padrão de Identificação de Instrumentos (SENAI. ES, 1999, p.11)**



Eventualmente, para completar a identificação, poderá ser acrescido um sufixo. A primeira letra identifica qual a variável medida, indicada ou iniciadora. Assim, um controle de temperatura inicia com a letra "T", de pressão com "P", de nível com "L", etc. Outras letras identificadoras são mostradas na primeira coluna do Quadro 3, apresentado adiante, e seu significado na coluna 1<sup>a</sup> letra (1a posição).

As letras subsequentes indicam a função do instrumento na malha de controle, podendo apresentar:

- Função ativa – que intervém no processo com um controlador ou
- Função passiva – como indicação, sinalização, etc.

Por exemplo, um instrumento identificado como TE significa que ele é um elemento primário de temperatura, pois a primeira letra T identifica a variável temperatura e a segunda letra E, chamada de subsequente, informa a função de sensor ou elemento primário de medição de temperatura, não importando o princípio de medição.

Outro exemplo é um instrumento FI = Indicador de Vazão, em que a primeira letra mostra a variável medida (F = vazão) e a segunda a função do instrumento: indicador. Ao acrescentarmos a letra Q, como modificadora, esta altera o nome original do FI para FQI, pois acrescenta ao instrumento à atribuição de totalização.



### Fique ligado!

A identificação funcional é estabelecida de acordo com a função do instrumento e não de acordo com sua construção, de maneira que um registrador de pressão diferencial, quando usado para registrar a vazão, é identificado por FR. Se for conectado um indicador de pressão e um pressostato num tanque onde se deseja indicar nível e um alarme de nível por chave, estes serão identificados com LI e LS, respectivamente.

A primeira letra da identificação funcional é selecionada de acordo com a variável medida e não com a variável manipulada. A variável manipulada é a variável controlada em função da variável medida. Logo, uma válvula de controle que varia a vazão para controlar um nível, comandada por um controlador de nível, é identificada como LV e não FV. As letras subsequentes identificam as funções do instrumento, podendo ser:

### Quadro 2 – Classificação das funções dos instrumentos

<b>Tipos de funções dos instrumentos</b>	
Funções passivas	Elemento primário, orifício de restrição, poço.
Funções de informação	Indicador, registrador, visor.
Funções ativas ou de saída	Controlador, transmissor, chave e outros.
Funções modificadoras	Alarmes ou indicação de instrumento multifunção.

Quadro 3 – Identificação funcional dos instrumentos (SENAI. ES, 1999, p.14)

Letras	1º grupo de letras		2º grupo de letras		
	Variável medida ou iniciadora		Função		
	1ª letra	Modificadora	Passiva ou de informação	Ativa ou de saída	Modificadora
A	Análise		Alarme		
B	Chama				
C	Escolha do usuário			Controlador	
D	Escolha do usuário	Diferencial			
E	Tensão		Sensor (elemento primário)		
F	Vazão	Razão			
G	Escolha do usuário		Visor		
H	Comando manual				Alto
I	Corrente elétrica		Indicador		
J	Potência	Varredura ou seleção manual			
K	Tempo ou temporização	Taxa de variação com o tempo		Estação de controle	
L	Nível		Lâmpada piloto		Baixo
M	Escolha do usuário	Instantâneo			Médio ou intermediário
N	Escolha do usuário		Escolha do usuário	Escolha do usuário	Escolha do usuário
O	Escolha do usuário		Orifício de restrição		
P	Pressão, vácuo		Conexão para ponto de teste		
Q	Quantidade ou evento	Integração ou totalização			
R	Radiação		Registradora ou impressora		
S	Velocidade ou freqüência	Segurança		Chave	
T	Temperatura			Transmissor	
U	Multivariável		Multifunção	Multifunção	Multifunção
V	Vibração, análise mecânica			Válvula ou defletor (damper ou louver)	
W	Peso ou força		Poço ou ponta de prova		
X	Não classificada	Eixo X	Não classificada	Não classificada	Não classificada
Y	Estado, presença ou seqüência de eventos	Eixo Y		Relé, relé de computação, conversor ou solenóides	
Z	Posição	Eixo Z		Elemento final de controle não classificado	

As letras subseqüentes usadas com modificadoras podem atuar ou complementar o significado da letra precedente. Como no caso de um LILL, em que se deseja explicar que o instrumento está indicando um nível muito baixo, utiliza-se uma quarta letra, um "L" de *low*. Se o instrumento indicasse apenas um alarme de nível baixo, teríamos: LIL. O caso citado mostra que é possível incluir uma quarta letra na identificação funcional do instrumento, sendo que esta opção deve ser apenas utilizada em casos de extrema necessidade. A seqüência de formação da identificação funcional de um instrumento é a seguinte:

- A primeira letra deve sempre indicar a variável medida. Veja a coluna "letra da variável controlada" no Quadro 3. Se a primeira letra possui sua função modificada, veja a coluna "2a posição", do referido quadro.
- As letras subseqüentes indicam as funções do instrumento na seguinte ordem:
  - Letras que designam funções passivas ou de informação, veja a coluna "3a posição", no Quadro 3;
  - Letras que designam funções ativas ou saídas, veja a coluna "4a posição", no quadro citado anteriormente.
- Se houver letras modificadoras, estas devem ser colocadas imediatamente após a letra que modificam.



### Fique ligado!

A identificação funcional deve ser composta de, no máximo, de três (3) letras. Uma quarta letra somente será permitida no caso de extrema necessidade: para explicar completamente qual é a função do instrumento. Para instrumentos mais complexos, as letras podem ser divididas em subgrupos.

No caso de um instrumento com indicação e registro da mesma variável, a letra "L" pode ser omitida. Um instrumento complexo, com diversas medições ou funções, pode ser designado por mais de uma identificação funcional. Assim, um transmissor registrador de razão de vazões, com uma chave atuada pela razão,

em fluxogramas, pode ser identificado por dois círculos tangenciais, contendo as identificações FFRT e FFS. Em outros documentos, em que são usados símbolos gráficos, o instrumento pode ser identificado por FFRT/FFS. Todas as letras da identificação funcional devem ser maiúsculas. Eventualmente, para completar a identificação, poderá ser acrescido um sufixo.

O Quadro 4, mostra um exemplo de instrumento identificado de acordo com a norma preestabelecida. O Quadro 5 apresenta a simbologia geral usada em instrumentação.

**Quadro 4 – Identificação de instrumentos de acordo com a norma ISA-S5 (SENAI. ES, 1999, p.13)**

P	RC	001	02	A
Variável	Função	Área de atividade	Nº. seqüencial da malha	S u f i x o
Identificação funcional		Identificação da malha		
Identificação do instrumento				

Onde:

P = Variável medida – Pressão;

R = Função passiva ou de informação – Registrador;

C = Função ativa ou de saída – Controlador;

001 = Área de atividade, onde o instrumento atua;

02 = Número seqüencial da malha;

A = Sufixo.

**Quadro 5 – Simbologia geral em instrumentação (SENAI. ES, 1999, p.15)**

	Localização em painel normalmente acessível ao operador	Montado no campo	Painel auxiliar normalmente acessível ao operador	Painel auxiliar normalmente não acessível ao operador
Instrumentos discretos				
Instrumentos compartilhados				
Computador de processo				
Controlador lógico programável (CLP)				

## Instrumentos analógicos x digitais

Os instrumentos também podem ser classificados com relação ao sinal que eles entregam em sua saída, em dois tipos de categorias: instrumentos analógicos e instrumentos digitais.

Os instrumentos digitais possuem em suas saídas apenas dois valores distintos de tensão elétrica. Um valor representa o bit 1, e o outro valor representa o bit 0. Sendo assim quando, por exemplo, estivermos utilizando um termostato, teremos um contato abrindo ou fechando (normalmente fechado ou aberto, respectivamente) que representa a ação da temperatura sobre o seu elemento sensor. Este contato exerce, então, um comando sobre o circuito em que o termostato está inserido, acionando uma carga (bit 1) ou desligando-a (bit 0).

No caso de instrumentos analógicos, existe uma gama de valores de tensão elétrica (ou corrente elétrica) que o sinal de saída poderá assumir. Esta gama pode variar de 0 a 10 volts, por exemplo. Isto quer dizer, então, que num termômetro teremos uma faixa de temperatura, ao qual o nosso instrumento é capaz de medir (0 a 100°C). Esta faixa é proporcional ao sinal que será apresentado em sua

saída, sendo que 0°C equivalerá a 0 volts e 100°C a 10 volts. Qualquer outro valor de temperatura que esteja dentro da faixa será apresentado na saída do instrumento em volts.

Todos os instrumentos classificados como analógicos necessitam de ter seus sinais de saída entregues em valores de tensão ou corrente padrões, de forma que os sistemas de controle possam fazer a leitura destes sinais. Se não for padrão o valor entregue, os equipamentos necessitarão de conversores adicionais para deixar os níveis de tensão e corrente em valores aceitáveis.

Podemos destacar, então, uma série de valores padrões para a saída dos instrumentos analógicos:

- Tensões padronizadas:
  - -10 a 10 volts (V);
  - -5 a 5 volts (V);
  - 0 a 10 volts (V);
  - 0 a 5 volts (V).
  - 1 a 5 volts (V).
- Correntes padronizadas:
  - -20 a 20 miliampères (mA);
  - 0 a 20 miliampères (mA);
  - 4 a 20 miliampères (mA);
  - 0 a 21 miliampères (mA).

## Voltando ao desafio

Você, como técnico da empresa, fez a identificação dos TAGs dos instrumentos LIC 1 e LT 1 da seguinte forma:

LIC 1 - Indicador Controlador de Nível.

LT 1 - Transmissor de Nível.

Obs.: Os números que acompanham a identificação servem para diferenciá-lo de um instrumento equivalente com a mesma função, porém, em outro processo.

Na classificação dos instrumentos LIC 1, LT 1, pela sua simbologia foi verificado o seguinte:



Instrumento discreto montado no campo.



Instrumento discreto montado em painel acessível ao operador.

## Resumindo

No estudo do Capítulo 2 você aprendeu que:

- Os instrumentos podem ser classificados em indicadores, registradores, transmissores, transdutores, controladores e elementos finais de controle.
- A identificação dos instrumentos é feita a partir de um resumo ou TAG, da função que o instrumento desempenha no processo que ele está inserido.
- Os instrumentos analógicos apresentam um faixa de sinais de tensão ou corrente, proporcionais ao valor da grandeza que se está medindo.
- Os instrumentos digitais apresentam em sua saída apenas uma indicação de que a grandeza física lida pelo sensor atingiu ou não o limite da referência pré-definida.

## Aprenda mais

Se você quiser aprofundar seu estudo sobre o assunto, consulte a Norma ANSI/ISA-S5.1-1984 (Revisão 1992) *Instrumentation Symbols and Identification* e também analise, na empresa em que trabalha, os fluxogramas de instrumentação identificando os principais instrumentos do processo.

A seguir, apresentamos uma pequena lista de termos, que irão ajudá-lo a aprender melhor os assuntos tratados neste texto.

## Glossário

**Analógico** – Instrumento ou sinal que tem uma faixa de valores de tensão ou corrente padronizados.

**CLP** - É um aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas, tais como lógica, seqüenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando, por meio de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos (segundo a NEMA - National Electrical Manufacturers Association).

**Controlador** – Instrumento que a partir da diferença entre o valor desejado (*set point*) e a variável de processo, altera o sinal de sua saída.

**Digital ou discreto** – Instrumento ou sinal que tem dois estados apenas 1 ou 0 (ligado ou desligado).

**Elemento final de controle** – são mecanismos que variam a quantidade de material ou de energia em resposta ao sinal enviado pelo controlador.

**Fluxograma** – São diagramas (desenhos) que representam as máquinas, equipamentos e instrumentos que são instalados no processo.

**Indicador** – Instrumento de medição que apresenta uma indicação.

**Mnemônicos** – São siglas que representam uma grandeza física ou característica de um equipamento.

Registrador – Instrumento de medição que fornece um registro da indicação.

TAG – Símbolo formado por letras que representam um equipamento ou máquina instalada em um processo industrial.

Transdutor – Instrumento que recebe informações na forma de uma ou mais quantidades físicas e as modifica.

Transmissor – São instrumentos que lêem as variações na variável medida/controlada através do elemento primário e transmitem-na à distância. O elemento primário pode ou não fazer parte integrante do transmissor.





## Capítulo 3

---

### TERMINOLOGIAS

#### Iniciando nossa conversa

Os instrumentos de controle empregados na indústria de processos têm sua própria terminologia. Os termos usados definem as características próprias de medida e controle dos diversos indicadores, registradores, controladores, transmissores e válvulas usados nos processos. A terminologia empregada é unificada entre os fabricantes, os usuários e os organismos que intervêm direta ou indiretamente no campo da instrumentação industrial. Os termos mais utilizados serão descritos a seguir para uma maior familiarização dos mesmos.

Neste capítulo iremos nos familiarizar com os seguintes tópicos: terminologias, tipos específicos de erros de medição e laboratório de metrologia. Para ajudá-lo em seu estudo, no final do capítulo, há um pequeno glossário.

#### Objetivos

Na leitura deste capítulo você tem por objetivos:

- familiarizar-se com os principais termos técnicos (terminologias) empregados em instrumentação;
- entender como é feita uma calibração de um instrumento em um laboratório de metrologia;
- identificar quais os principais erros que podem aparecer em instrumentação.

## Um desafio para você

Você precisa fazer um relatório sobre um transdutor de pressão que pode trabalhar de -14 a 236psi, e para este *range* ele fornece na saída um sinal de 375 a 875mV em relação inversa de transformação. Neste relatório, que foi pedido pelo seu superior imediato, ele necessita das seguintes características para troca do sensor por outro de mesmas características:

- a) calcule a sensibilidade do transdutor;
- b) calcule sua saída referente a zero psi;
- c) indique a equação de saída;
- d) desenhe o gráfico de resposta (saída x entrada).

## Continuando nossa conversa

A seguir teremos uma série de definições necessárias para o melhor entendimento do módulo de instrumentação e controle.

### ***Faixa de Medida (Range)***

A faixa de indicação, alcance ou *range* é o conjunto de valores limitados pelas indicações extremas (de acordo com o INMETRO), ou seja, entre os valores máximos e mínimos possíveis de serem medidos com determinado instrumento. Por exemplo, podemos citar que um instrumento que mede pressão entre 10 e 50 psi tem um *range* de 10 a 50psi.

### ***Alcance (Span)***

A amplitude nominal ou *span* diferença nominal entre os dois limites de uma faixa nominal (de acordo com o INMETRO), ou seja, é a diferença entre o maior e menor valor de uma escala de um instrumento (Procel).

Como um exemplo, apresentamos um instrumento que possui a faixa de medição de entre 200 a 1200°C, o *span* será de 1000°C.

## Zero do instrumento

É o limite inferior da faixa. Não é necessariamente o zero numérico. No exemplo do item anterior, é possível perceber que o valor mínimo da faixa é na realidade 200, sendo assim este será o zero do instrumento. Exemplificando, se tivermos um instrumento e quisermos medir o seu menor valor, dizemos que o zero é o valor mínimo da sua faixa.

## Exatidão de um instrumento de medição

É o grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando (de acordo com o INMETRO). Aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro convencional. A exatidão é um conceito qualitativo e normalmente é dada como um valor percentual do fundo de escala do instrumento. É também conhecida pelo termo em inglês *accuracy*.

Vejamos o seguinte exemplo: um voltímetro com fundo de escala 10V e classe de exatidão  $\pm 1\%$ , o erro máximo esperado é de 0,1V. Sendo assim, o instrumento poderá apresentar indicações com valores entre 9,9 e 10,1V.



### Fique ligado!

Uma regra importante é escolher instrumentos com uma faixa apropriada para os valores a serem medidos.

A exatidão de um instrumento só pode ser confirmada quando sua medida for comparada com um padrão de referência, ou com a medida feita por um segundo instrumento calibrado e com grau de exatidão maior que o primeiro instrumento.

O erro exatidão de um instrumento pode ser expresso numericamente de diversas formas, entre elas:

Exatidão por erro absoluto:

$$\text{erro} = \text{valor medido} - \text{valor real}$$

Exatidão por porcentagem do erro sobre o valor real:

$$\text{erro\% valor real} = \frac{\text{valor medido} - \text{valor real}}{\text{valor real}} \cdot 100\%$$

Exatidão por percentagem do erro sobre o span:

$$\text{erro\%span} = \frac{\text{valor medido} - \text{valor real}}{\text{span}} \cdot 100\%$$

## Repetitividade

É o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição (de acordo com o INMETRO).

O grau de repetitividade também pode ser definido como um termo que descreve o grau de liberdade a erros aleatórios, ou seja, ao nível de espalhamento de várias leituras em um mesmo ponto.



**Fique ligado!**

Antigamente a repetitividade era chamada de precisão. Como a palavra precisão era muito confundida com exatidão, o termo precisão foi substituído por repetitividade.

Um aparelho preciso não implica que seja exato. Uma baixa exatidão em instrumentos precisos discorre normalmente de um desvio ou tendência (*bias*) nas medidas, o que poderá ser corrigido por uma nova calibração.

A repetitividade descreve o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição. Estas condições são denominadas condições de repetitividade e incluem o mesmo procedimento de medição, mesmo observador, mesmo instrumento de medição utilizada nas mesmas condições, mesmo local e repetição em curto período de tempo.

O índice de precisão é comumente dado em função do desvio padrão sobre a média dos valores medidos. Acompanhe a seguir, um exemplo.

Um técnico em instrumentação utilizou um termômetro para medir a temperatura de uma das zonas de um forno. Descubra o desvio padrão e a média dos seguintes valores.

**Tabela 1 – Leituras de temperatura de uma das zonas do forno**

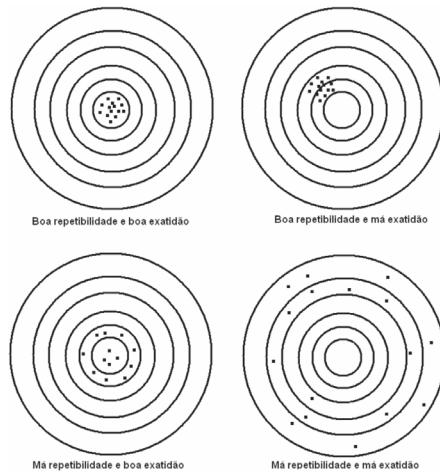
Leituras	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5
Valores	1203,5	1204,1	1201,7	1204,0	1203,4

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 0,9659$$

$$\text{Média aritmética: } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = 1203,4$$

$$\text{Índice de precisão: } ip = \frac{\sigma}{\bar{X}} = 0,0008$$

**Figura 13 – Comparativo entre repetibilidade e exatidão (SENAI. ES,1999, p.20)**



## Classe de exatidão

Classe de instrumentos de medição que satisfazem a certas exigências metrológicas destinadas a conservar os erros dentro de limites especificados (de acordo com o INMETRO).

Conforme NBR 14105, a classe de exatidão de um medidor analógico é identificada com as seguintes características físicas do instrumento:

- Diâmetro nominal da janela;
- Faixa da escala (faixa de indicação);
- Valor de uma divisão;
- Número de divisões.

Uma classe de exatidão é usualmente indicada por um número ou símbolo adotado por convenção e denominado índice de classe. Analise o exemplo a seguir.

Em um voltímetro com 300volts de fundo de escala e classe de exatidão de 1,5; o limite de erro que se pode cometer em qualquer medida feita com este voltímetro é 1,5% de 300V ou seja:

$$\Delta C = \frac{300V \times 1,5}{100} = 4,5V$$

Vê-se que o erro relativo percentual é  $erro = \frac{\Delta C}{x} \cdot 100$  para uma medição efetuada de  $x$  volts. Isso mostra que um instrumento deve ser utilizado para medir grandezas de valor o mais próximo possível do seu fundo de escala, onde teremos o erro relativo mínimo.



### Fique ligado!

Uma prática usual é selecionar um instrumento com um fundo de escala, que propicie que os valores medidos se situem no último terço da escala, evitando assim os erros relativos mínimos.

## Sensibilidade

Segundo o INMETRO, a sensibilidade é definida como a resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação no estímulo. A sensibilidade pode depender do valor do estímulo. Sendo assim, a sensibilidade pode ser contabilizada como a inclinação da reta que define a relação entre a leitura e a grandeza medida. Apresentamos a seguir alguns exemplos de sensibilidade dos transdutores de temperatura.

**Tabela 2 – Sensibilidade de alguns transdutores de temperatura (STARLING, 2003, p.14)**

Transdutor	Sensibilidade
Termopar tipo J	50mV/°C
Junção PN	-2mV/°C
Termoresistência PT100	400mΩ/°C
Termistor (10k a 25°C)	-400Ω/°C

## Resolução

O INMETRO define resolução como a menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida. Para um dispositivo mostrador digital é a variação na indicação quando o dígito menos sig-

nificativo varia de uma unidade. Este conceito também se aplica a um dispositivo registrador. Exemplificando: um voltímetro analógico com divisões na escala de 0,1V terá sua leitura apresentada com uma resolução de 0,1V.

Explicando: um instrumento com mostrador digital tem resolução correspondente ao dígito menos significativo. Assim, um voltímetro digital que tem um display com duas casas após a vírgula tem uma resolução de 0,01V.

## Tipos específicos de erros de medição

Diversos são os erros presentes nos sistemas de medição, a importância de se conhecer alguns deles e as interferências que eles causam nas medidas, vale para que se possa adotar ações apropriadas para minimizá-los ou, dependendo do caso, providenciar a substituição ou manutenção dos instrumentos envolvidos.



### Fique ligado!

É importante ressaltar que qualquer instrumento apresenta erros de medição contudo, estes não podem ser superiores aos admitidos pelo processo.

## Erros estáticos

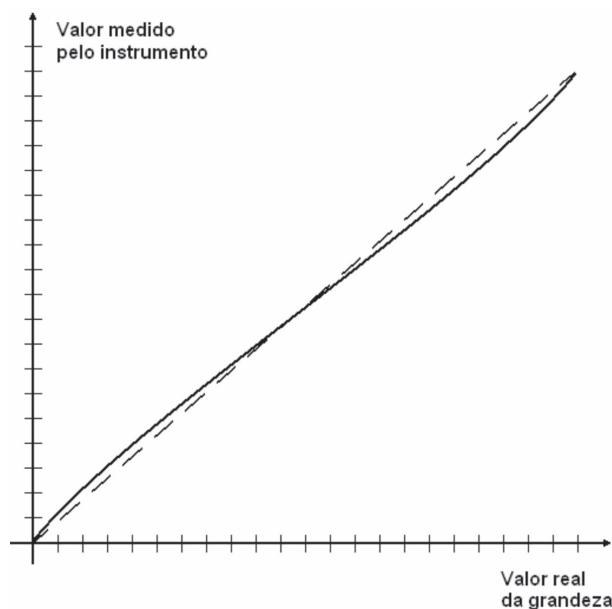
São erros que provocam o desvio da medida do valor real quando a grandeza medida se fixa num determinado valor ou apresenta variações muito lentas. Ele indica a diferença entre o valor verdadeiro de uma grandeza física que não varia com o tempo (estática) e o valor indicado pelo instrumento. Normalmente o erro estático é indicado em porcentagem do span.

Grandes erros estáticos são indesejáveis; contudo, em alguns processos não afetam significativamente o resultado final, já em outros até mesmo pequenos erros estáticos podem ser desastrosos. O erro estático é menos danoso, por exemplo, para processos que não tenham necessidade de grande exatidão de medidas.

## Linearidade e não-linearidade

A linearidade é uma característica normalmente desejável para a faixa de operação de um instrumento. O valor da resposta medida é proporcional à grandeza real que está sendo medida. Sua resposta é dada por uma curva, e o gráfico a seguir mostra a relação entre uma grandeza e o resultado de medições. Nesta figura pode-se observar certo grau de liberdade que pode ser notada mesmo visualmente. No entanto, utilizar-se-á métodos estatísticos, tais como um coeficiente de correlação, para saber o quanto a curva mostrada se aproxima de uma reta.

**Figura 14 – Resposta de medição de um sensor linear e não-linear (STAR-LING, 2003, p.16)**

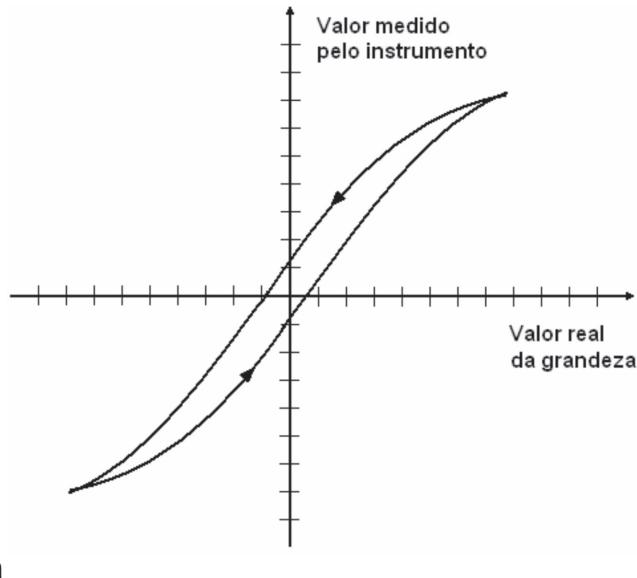


A não-linearidade, por sua vez, é definida como o máximo desvio de qualquer uma das leituras com relação à reta obtida, e é normalmente expressa como uma percentagem do fundo de escala.

## Histerese

A histerese é a tendência de um material ou sistema conservar suas propriedades na ausência do estímulo que as gerou. Pode-se encontrar diferentes manifestações desse fenômeno. A palavra histerese deriva do grego antigo e significa retardar, e foi cunhada pelo *Sir James Alfred Ewing* em 1890. Em geral os efeitos de não-linearidade e histerese estão intimamente ligados.

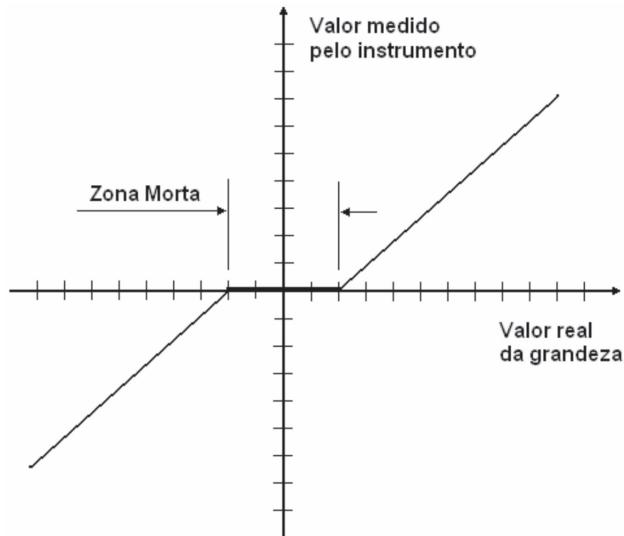
Figura 15 – Influência da histerese sobre as medidas de um sensor (STARLING, 2003, p. 17)



### Zona morta

De acordo com o INMETRO, o intervalo máximo no qual um estímulo pode variar em ambos os sentidos, sem produzir variação na resposta de um instrumento de medição. A zona morta pode depender da taxa de variação e muitas vezes ser deliberadamente ampliada, de modo a prevenir variações na resposta para pequenas variações no estímulo.

Figura 16 – Influência da zona morta sobre as medições de um sensor (STARLING, 2003, p. 17)



## Erros dinâmicos

Qualquer instrumento gasta um determinado tempo para responder às variações do sinal de entrada, pois esta resposta depende dos efeitos físicos de transporte e conversão de energia. Erros dinâmicos são aqueles que ocorrem quando a grandeza sofre variações bruscas ou variam continuamente no tempo.

### Resposta dinâmica

Os erros dinâmicos dependem da resposta dinâmica, ou seja, do comportamento da saída do instrumento com relação ao tempo quando a sua entrada varia.

### Degrau e rampa

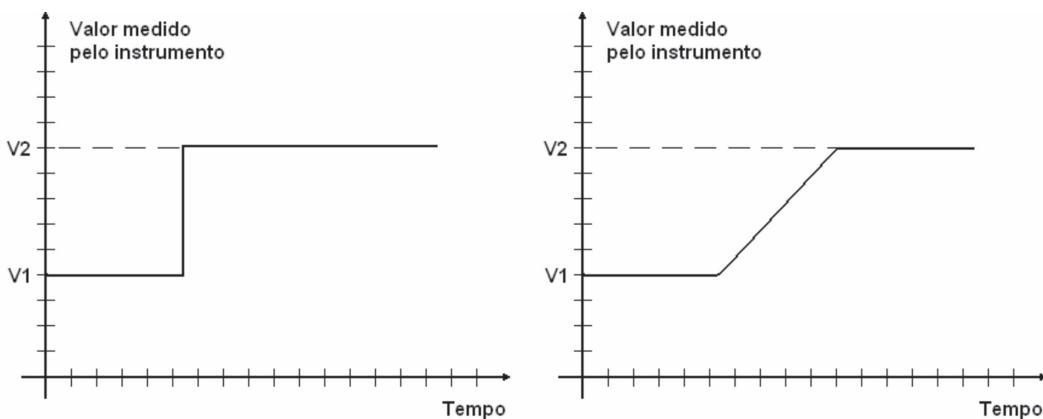
Como um instrumento mede variáveis cuja evolução no tempo é imprevisível, procura-se caracterizar sua resposta dinâmica através da análise de sua saída a alguns sinais de testes aplicados à entrada. Estes sinais são o degrau e a rampa. Variações na forma de degrau e rampa não são comuns no processo, assim, tais sinais devem ser produzidos e aplicados em ensaios de laboratório.



### Fique ligado!

A rampa é uma variação do sinal a uma taxa constante no tempo (na prática entre dois parâmetros constantes).

**Figura 17 – Sinais de degrau e rampa aplicados em ensaios de laboratório (STARLING, 2003, p. 18)**

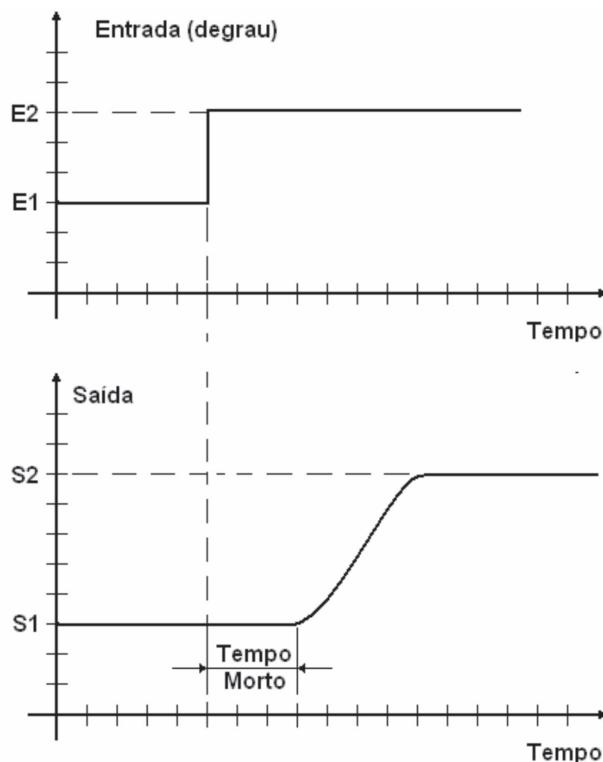


A taxa de variação de uma rampa igual a inclinação, ou seja:  $taxa = \frac{\Delta V}{\Delta t}$

### Tempo morto

É o tempo gasto entre o instante de aplicação do degrau e o início da resposta do instrumento (a saída é atrasada com relação à entrada). Este tempo é fruto, principalmente, do posicionamento do transdutor no processo. Veja o exemplo de resposta do tempo morto na Figura 18.

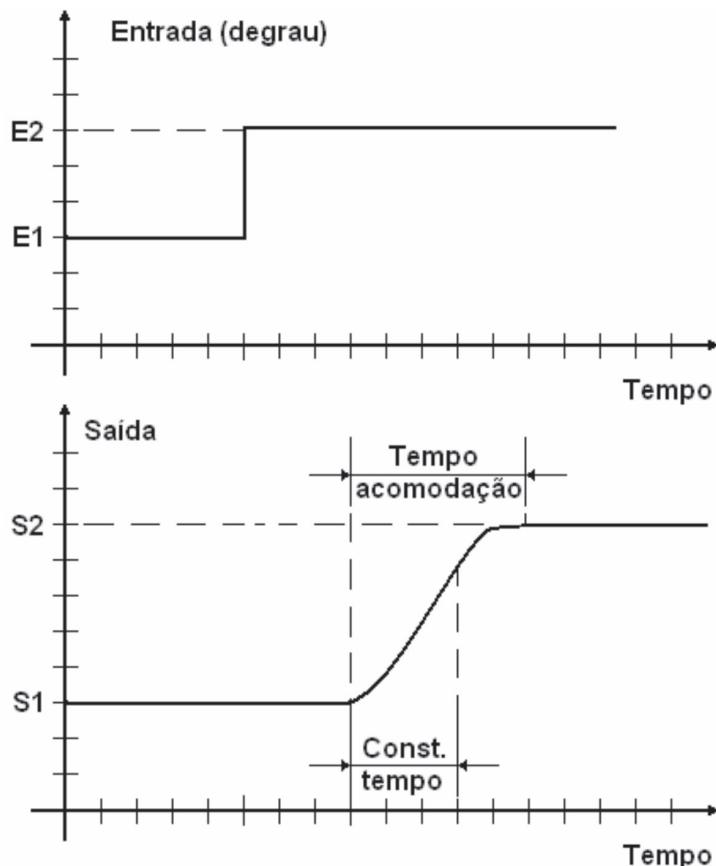
**Figura 18 – Saída com tempo morto quando aplicado um degrau a entrada (STARLING, 2003, p. 19)**



### Constante de tempo

É o tempo gasto do início de variação da saída até a mesma atingir 63,2% do valor esperado como final. Após um tempo de 3 a 5 vezes a constante de tempo, o valor da saída do instrumento é válido, ou seja, é alcançado o valor de regime permanente, este tempo é denominado Tempo de Acomodação ou *setting time*. Observe a Figura 19.

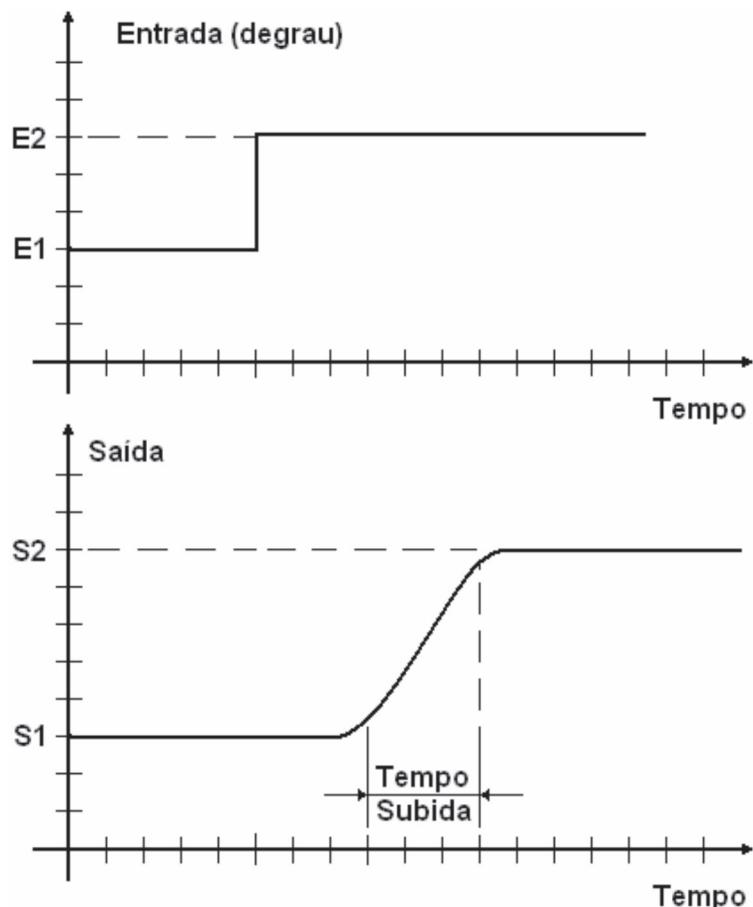
Figura 19 – Constante de tempo na saída quando aplicado degrau na entrada (STARLING, 2003, p. 19)



### Tempo de subida

O tempo de subida ou *rising time* é o tempo necessário para a resposta do instrumento excursionar dos 10% aos 90% da variação que o degrau de entrada irá provocar na saída, entre os valores permanentes, inicial e final. Veja, a seguir, na Figura 20, o conceito apresentado neste item.

**Figura 20 – Resposta da saída quando aplicado um degrau a entrada (STARLING, 2003, p.20)**



## Laboratório de Metrologia

A função principal de um laboratório de metrologia é a de calibrar instrumentos.



**Fique ligado!**

O laboratório é uma célula de vital importância para qualquer indústria que queira produzir com uma qualidade adequada.

O superdimensionamento/subdimensionamento da instrumentação é responsável por uma grande parcela das perdas e a indústria que estabelecer os seus processos com a devida confiabilidade metrológica, respeitando de forma clara a normalização, evidenciará de maneira concreta a qualidade do seu produto.



### Fique ligado!

Um fator muito importante na eficientização energética é a capacidade de se dimensionar os instrumentos de forma a atender aos padrões metrológicos.

Calibração de instrumento é um conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. Muitas vezes o termo aferição também é empregado com o sentido de calibração; no entanto, a tendência é o desuso deste, já que em nível mundial não existe o seu sinônimo em inglês ou em francês como acontece com o termo calibração (*calibration ou étalonnage*).

O resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações como a determinação das correções a serem aplicadas. Além disto, uma calibração pode, também, determinar outras propriedades metrológicas como o efeito das grandezas de influência.



### Fique ligado!

A freqüência de calibração dos instrumentos depende do tipo de construção, e normalmente é definida pelo fabricante qual será a periodicidade de calibração.

O processo de calibração envolve, geralmente, as etapas de calibração propriamente dita e documentação dos resultados.

### **Quadro 6 – Etapas do processo de calibração de instrumentos**

<b>Etapas do processo de calibração</b>	
Aferição	É o levantamento da resposta do sistema de medição mediante comparação dos padrões;
Calibração	Operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações de um instrumento de medição correspondentes com as suas incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação do instrumento de medição.
Documentação	É o levantamento de uma tabela de dados ou de um gráfico que relacione a congruência das medidas do sistema com as referências padrões. A documentação é que garante ao usuário a calibração do sistema e define as responsabilidades pelos erros apresentados.

O resultado de uma calibração pode ser registrado em um documento, algumas vezes denominado *certificado de calibração* ou *relatório e calibração*.

Além de calibrar, um Laboratório de Metrologia deve assumir as seguintes atividades:

- promover a conscientização de todos os segmentos da indústria quanto a forte interdependência entre Metrologia, Normalização e Qualidade, justificando sempre de maneira concreta e objetiva a razão de sua existência;
- atuar de forma marcante no auxílio da especificação adequada da instrumentação de um determinado processo objetivando atenuar o subdimensionamento ou superdimensionamento;
- avaliar o impacto das incertezas das grandezas que interferem em um processo de acordo com a sua tolerância objetivando uma qualidade adequada do produto.

### **Padrões de calibração**

Os padrões usados na calibração são divididos em primários e secundários. Veja o Quadro 7 para maiores detalhes.

## Quadro 7 – Padrões de calibração para instrumentos

Padrões de calibração	
Primários	São de responsabilidade de órgãos oficiais de metrologia e são guardados e manuseados sobre condições rígidas de controle ambiental, uma vez que suas propriedades têm que ser totalmente preservadas se congruentes com os padrões legais nacionais e/ou internacionais. Logo não são práticos para a realização de calibrações e aferições rotineiras.
Secundários	São padrões que são aferidos pelos órgãos competentes e, uma vez confirmadas sua boa qualidade e concordância com padrões primários, recebem destes órgãos um certificado de calibração que garante a utilização destes como referência de calibração para instrumentos localizados

## Recomendações referentes à calibração

São listados a seguir os principais pontos para uma calibração confiável no processo industrial.

- As exigências quanto à freqüência de calibração e ao grau de exatidão requeridos depende do processo onde o instrumento é aplicado.
- Ambientes agressivos (presença de gases ou líquidos corrosivos, umidade, poeira, calor, vibração, campos magnéticos, etc.) exigem uma rotina de calibração mais freqüente.
- Um instrumento ao ser adquirido deve ser calibrado para se garantir que ele atenda às especificações de exatidão e range de operação solicitada pelo comprador.
- Se durante a calibração não for possível atingir o grau de exatidão nem as especificações de variação de limites, o instrumento deve ser substituído e/ou reparado.
- Sempre que se for instalar um instrumento ao processo é bom providenciar um ajuste inicial em seu zero. Isto serve para que a curva de calibração seja válida, uma vez que fatores ambientais (temperatura, umidade, pressão, vibração etc.) e fatores de instalação física (posição de fixação do instrumento ao processo) podem causar desajustes no zero de calibração. Isto ocorre porque os instrumentos são previamente calibrados em condições ambientais e posições específicas de laboratório, o que quase nunca é conseguido no campo.

- Ao calibrar um instrumento devem-se tomar vários pontos de medida ao longo de seu *range* (do zero ao máximo). Garantir a exatidão apenas do zero e do máximo não garante a exatidão no meio da faixa, isto só poderia ser assumido se o transdutor, e todo o sistema, tiverem uma resposta perfeitamente linear com a variação da grandeza medida, o que nem sempre é verdade.

## Voltando ao desafio

Foi proposto um desafio em forma de um relatório, que será visto a seguir.

Levando-se em consideração que o transdutor de pressão trabalha com sinal de entrada de -14 a 236psi, e saída de 375 a 875mV em relação inversa de transformação, temos:

- a) Calculando a sensibilidade que é avaliada pela inclinação da reta entre a entrada e a saída, teremos:

$$\text{sensibilidade} = \text{inclinação} = \frac{\Delta \text{saída}}{\Delta \text{entrada}} = \frac{\Delta mV}{\Delta psi} = \frac{875-375}{236 - (-14)} = \frac{500}{250} = 2 \text{psi/mV}$$

- b) Para calcular a saída quando a entrada é zero psi, temos que saber onde a reta já mencionada no item anterior toca o eixo y (saída). Veja o gráfico no item d para tirar suas dúvidas.

$y=ax+b$  é a reta que relaciona entrada e saída.

O valor da inclinação a já foi calculado  $a = 2 \text{psi/mV}$  (sensibilidade)

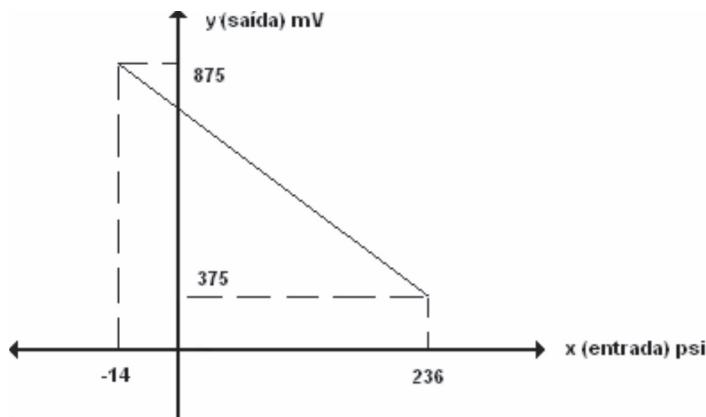
Considerando o valor mínimo para a entrada e a saída:

$$x = -14 \text{psi} \quad \text{e} \quad y = 375 \text{mV} \quad \Rightarrow \quad 375 = 2(-14) + b \quad \Rightarrow \quad b = 375 + 28 = 403 \text{mV}$$

c) A equação de saída será:  $y = -2x + 403$ .

d) Desenhe o gráfico de resposta (saída x entrada).

**Figura 21 – Relação entre a entrada e a saída para um transdutor de pressão**



## Resumindo

Estudando o Capítulo 3, você pôde:

- Aprender sobre as principais definições utilizadas em instrumentação e controle.
- Entender como pode ser feita a calibração de um instrumento.
- Familiarizar-se com o que pode ser feito num laboratório de metrologia.
- Conhecer alguns erros que podem aparecer em instrumentação, sendo eles estáticos e dinâmicos.

## Aprenda mais

Para aumentar seus conhecimentos sobre os assuntos estudados, consulte o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM) fornecido pelo INMETRO.

Procure saber em sua empresa quem é o responsável pelo envio para o laboratório de metrologia dos instrumentos, para calibração e verifique qual é a freqüência de calibração dos principais instrumentos do processo da empresa onde trabalha. Lembre-se que esta periodicidade influencia diretamente a eficiência energética do processo.

A seguir, apresentamos a definição de alguns termos usados no texto.

## Glossário

*Bias* – É um desvio ou tendência nas medidas, que poderá ser corrigido por uma nova calibração.

Calibração *calibration* ou *étalonnage* – Operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações de um instrumento de medição correspondentes com as suas incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação do instrumento de medição.

Classe de exatidão – Classe de instrumentos de medição que satisfazem a certas exigências metrológicas destinadas a conservar os erros dentro de limites específicos.

Constante de Tempo ou *setting time* – É o tempo gasto do início de variação da saída até a mesma atingir 63,2% do valor esperado como final.

Degrau – É uma variação instantânea da grandeza medida de um valor constante para outro.

Documentação – É o levantamento de uma tabela de dados ou de um gráfico que relate a congruência das medidas do sistema com as referências padrões.

Erro – Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.

Exatidão – É o grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando.

Histerese – É a curva de resposta do instrumento quando a variável lida está aumentando ou diminuindo.

Linearidade – É quando a leitura do instrumento for linearmente proporcional à grandeza que está sendo medida.

Rampa – É uma variação do sinal a uma taxa constante no tempo.

*Range* – Faixa de indicação ou alcance de um instrumento.

Repetibilidade – É o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuados sobre as mesmas condições de medição.

Resolução – É a menor diferença entre indicações de um dispositivo indicador que pode ser significativamente percebida.

Sensibilidade – É a resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação do estímulo.

*Set point (SP)* – Variável de referência que será comparada (subtraída) com a variável de processo para encontrar o erro.

*Span* – Diferença entre o maior e menor valor de medição do instrumento.

Subdimensionamento – Dimensionamento de um instrumento abaixo da sua capacidade de percepção da variável a ser medida ou controlada.

Superdimensionamento – Dimensionamento de um instrumento muito além da sua capacidade de percepção da variável a ser medida ou controlada.

Tempo de subida ou *rising time* – É o tempo necessário para a resposta do instrumento excursionar dos 10% aos 90% da variação que o degrau de entrada irá provocar na saída, entre os valores permanentes, inicial e final.

Zero – Limite inferior da faixa do instrumento.

Zona morta – Intervalo máximo no qual um estímulo pode variar em ambos os sentidos, sem produzir variação na resposta de um instrumento de medição.



## Capítulo 4

---

# PRESSÃO

### Iniciando nossa conversa

Em meio a vários pontos de pressão, temperatura, vazão e nível a serem mediados, erros de montagem podem colocar a segurança do instrumento, do operador, e até mesmo da planta (ou sistema) em risco. Isso sem falar em problemas de análise e controle quando a ligação errada de algum sensor fornece uma informação não confiável. A falta de conhecimento teórico na medição básica de variáveis do controle de processos coloca uma enorme dificuldade de operação. É de vital importância que os técnicos e engenheiros em instrumentação saibam sobre o funcionamento de um transmissor. A aplicação desse instrumento passa pelos vários princípios de medição que serão vistos a seguir.

Entre manômetros, termômetros e transmissores, por exemplo, a escolha deve ser feita levando sempre em conta as premissas de funcionamento do instrumento e das variáveis a serem medidas. Existem vários princípios para se medir variáveis, sendo assim, temos que levar em consideração em que processo será inserido o instrumento e quais as variáveis, para que possamos especificar adequadamente o equipamento.

Este capítulo engloba as medições de pressão e apresenta em seu corpo os seguintes tópicos: pressão, conceito de pressão, tipos de medidores e transmissores de pressão, pressão e vazão, medidores de pressão e escolha do tipo de medidor. Contém também um pequeno glossário com os termos usados ao longo do texto.

## Objetivos

O estudo deste capítulo tem por objetivos:

- identificar alguns tipos de instrumentos para medição de pressão;
- definir alguns conceitos básicos usados para medição de pressão;
- entender como a vazão pode ser medida indiretamente através da medição de pressão;
- reconhecer quais são as unidades de medida de pressão e as suas relações.

## Um desafio para você

Em uma empresa siderúrgica os instrumentistas estão com problemas na leitura dos sensores de pressão, pois alguns são sensíveis a variações de temperatura. Se você fosse consultado para resolver este problema, qual seria a sua solução?

## Continuando nossa conversa

A instrumentação é a ciência que se ocupa em desenvolver e aplicar técnicas de medição, indicação, registro e controle de processos de transformação, visando à otimização da eficiência dos mesmos. Essas técnicas normalmente têm por base princípios físicos e ou físico-químicos e utilizam-se das mais avançadas tecnologias de fabricação para viabilizar os diversos tipos de medição de variáveis indústria. Dentre essas variáveis encontra-se a pressão cuja medição possibilita não só sua monitoração e controle como também de outras variáveis, tais como nível, vazão e densidade. Assim, por ser sua compreensão básica para o entendimento de outras áreas da instrumentação, iniciaremos revisando alguns conceitos físicos importantes para a medição de pressão.



**Fique ligado!**

Pressão é a razão entre uma força aplicada sobre uma determinada área. A força tem que ser normal à área.  $P = F/A$

## Conceito de pressão

A pressão é uma grandeza medida com relação à referência. Se esta referência for a pressão atmosférica, a medida será dita *pressão relativa ou manométrica*. Se a referência for o vácuo, será dita *pressão absoluta*. Quando for omitida a pressão de referência, subentende-se que se trata da pressão relativa. De uma maneira geral, pode-se dizer:

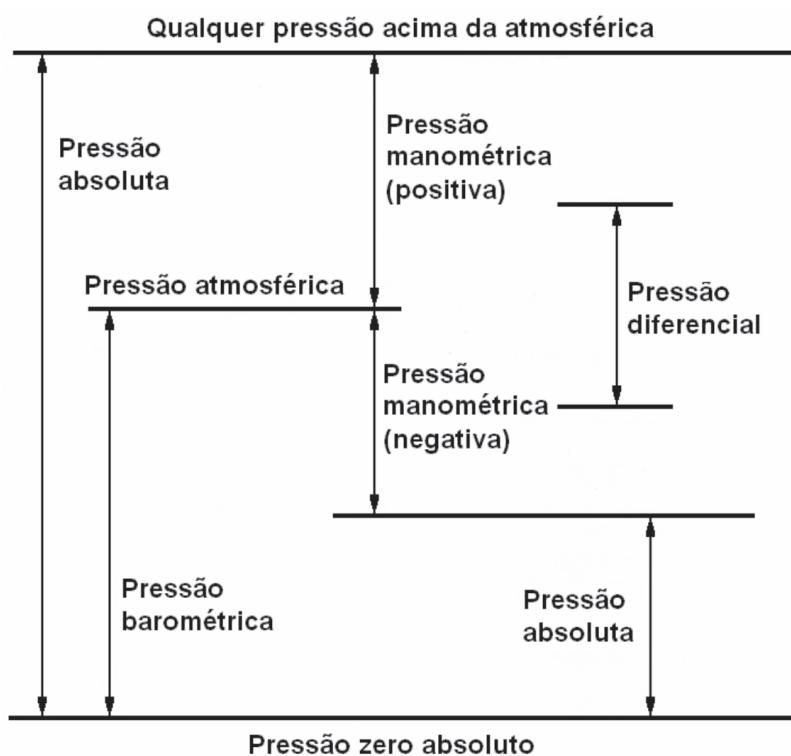
$$\text{Pressão absoluta} = \text{Pressão relativa (manométrica)} + \text{Pressão atmosférica}$$

A pressão é provavelmente a grandeza física que possua o maior número de unidades empregadas para representá-la. As relações entre as principais são mostradas a seguir:

$$1\text{atm} = 1,033\text{kgf/cm}^2 = 101325\text{Pa} = 10332\text{mmH}_2\text{O} = 760\text{mmHg} = 1,013\text{bar} = 14,695\text{psi}$$

A Figura 22 apresenta as escalas de referência para medidas de pressão.

**Figura 22 – Escalas de referência para medidas de pressão (BORTONI, p.42)**



## Tipos de medidores e transmissores de pressão

A seguir são relacionados alguns medidores e transmissores de pressão para ter uma noção da quantidade de equipamentos que podem ser utilizados para implementar a instrumentação desta grandeza física.

### Medidores de pressão

Tipos de manômetros de líquidos:

- coluna em "U";
- coluna reta vertical;
- coluna inclinada.

Tipos de manômetro elástico:

- tubo de *Bourdon*:
  - em C;
  - espiral;
  - helicoidal.
- diafragma;
- fole;
- cápsula.

### Transmissores de pressão

- Transmissores pneumáticos
- Transmissores eletrônicos:
  - capacitivo;
  - *strain gauge*;
  - silício ressonante;
  - piezoelétrico.

## Medição da pressão

Os sensores de pressão podem ser mecânicos e elétricos.

Os mais importantes sensores mecânicos são os de deformação elástica, cujo sensor principal é o tubo *Bourdon C*. Quando a pressão medida aplicada ao *Bourdon C* varia, há uma variação proporcional no formato do *Bourdon*, provocando um pequeno deslocamento mecânico que pode ser amplificado por elos e *links* ou associado a algum mecanismo de transmissão pneumática ou eletrônica.

Os outros medidores à deformação elástica incluem o espiral, fole, helicoidal, diafragma, feitos com diferentes materiais para a medição de diferentes faixas de pressão.

O manômetro é o conjunto do sensor e indicador da pressão manométrica. Ele pode ser analógico ou digital. Quando analógico, o manômetro possui uma escala fixa e um ponteiro móvel. A melhor precisão do manômetro é na faixa central tipicamente entre 25% e 75% do fundo da escala de indicação.

Os sensores elétricos de pressão são: o cristal piezoelétrico e o *strain gauge*. O cristal piezoelétrico é muito pouco usado, por ser caro. É um sensor ativo, que gera uma tensão em milivolts proporcional à pressão aplicada. O sensor de pressão mais usado é o *strain gauge* ou célula de carga (*load cell*) que varia sua resistência elétrica em função do stress mecânico (tração ou compressão). A medição da resistência do *strain gauge* é medida por meio da clássica ponte de *Wheatstone*.

Pequenas pressões expressas em comprimento de coluna d'água ou coluna de mercúrio podem ser medidas através de colunas de líquido. Na instrumentação, é também comum o uso do transmissor eletrônico para condicionar o sinal gerado pelo sensor de pressão, convertendo-o para o sinal padrão, pneumático de 20 a 100KPa ou eletrônico de 4 a 20mA. Com o transmissor, a pressão pode ser indicada remotamente, em uma sala de controle centralizada. Existem transmissores de pressão manométrica, absoluta e diferencial.



## Fique ligado!

Atualmente, a tecnologia mais usada na operação do transmissor se baseia em microprocessador e o transmissor é chamado de inteligente.

## Pressão e a vazão

A diferença de pressão é que faz o fluido escoar nas tubulações fechadas, garantindo que o fluido ocupa toda a seção transversal. Em termos de energia, a energia de pressão é transformada em energia cinética. O efeito da variação da pressão é bem definido em relação à densidade, à gravidade específica e à compressibilidade dos fluidos. O efeito da pressão é pequeno nos líquidos, exceto em altas pressões, mas deve ser definitivamente considerado para a medição de vazão de gases e vapores. Na medição da vazão de gás é mandatório a compensação da pressão estática.



## Fique ligado!

O método mais empregado para medir vazão é por meio da placa de orifício, que gera uma pressão diferencial proporcional ao quadrado da vazão. Em vazão muito laminar, a pressão diferencial é linearmente proporcional a vazão.

## Principais medidores de pressão

São relacionados a seguir os tipos de medidores de pressão mais utilizados na indústria, com uma explicação breve do seu funcionamento.

## Manômetros

Dispositivos utilizados para indicação local de pressão e são, em geral, divididos em dois tipos principais:

- o manômetro de líquidos, que utiliza um líquido como meio para se medir a pressão;
- o manômetro tipo elástico que utiliza a deformação de um elemento elástico como meio para se medir pressão.



### Fique ligado!

Os manômetros de líquido foram largamente utilizados na medição de pressão, nível e vazão nos primórdios da instrumentação. Hoje, com o advento de outras tecnologias que permitem leituras remotas, a aplicação destes instrumentos na área industrial se limita a locais ou processos cujos valores medidos não são cruciais no resultado do processo, ou em locais cuja distância da sala de controle inviabiliza a instalação de outro tipo de instrumento. Porém, é nos laboratórios de calibração que ainda encontramos sua grande utilização, pois podem ser tratados como padrões.

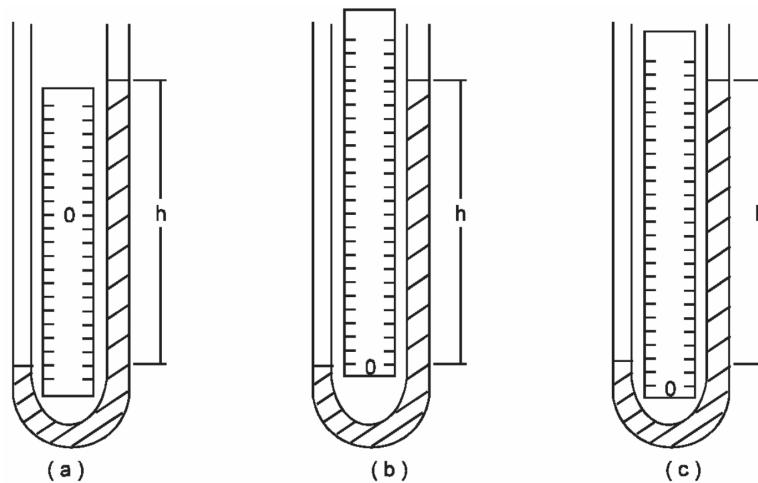
## Manômetro de líquidos

Os manômetros de líquidos são utilizados por diversas indústrias alimentícias, petroquímicas, farmacêuticas, etc. Veja a seguir alguns tipos.

### Manômetro tipo coluna em “U”

O tubo em “U” é um dos medidores de pressão mais simples entre os medidores para baixa pressão. É constituído por um tubo de material transparente (geralmente vidro) recurvado em forma de U e fixado sobre uma escala graduada. A faixa de medição é de aproximadamente 0~2000mmH<sub>2</sub>O/mmHg.

**Figura 23 – Manômetros do tipo coluna em “U” (SENAI. ES, 1999, p. 46)**



De acordo com a Figura 23 podemos definir três posições para as escalas em tubos em U. O Quadro 8 mostra como serão feitas estas medidas.

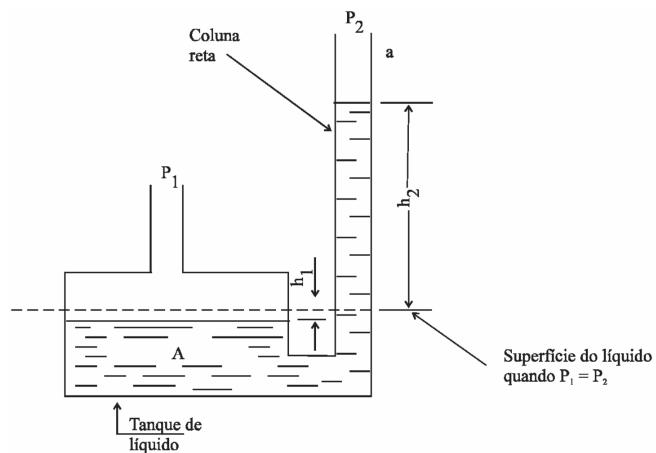
#### **Quadro 8 – Tipos de medidas em escalas de acordo com a sua posição**

<b>Medidas nas escalas</b>	
Tipo a	O zero da escala está no mesmo plano horizontal que a superfície do líquido quando as pressões P1 e P2 são iguais. Neste caso, a superfície do líquido desce no lado de alta pressão e, consequentemente sobe no lado de baixa pressão. A leitura se faz, somando a quantidade deslocada a partir do zero nos lados de alta e baixa pressão.
Tipo b	O ajuste de zero é feito em relação ao lado de alta pressão. Neste tipo há necessidade de se ajustar a escala a cada mudança de pressão.
Tipo c	A leitura é feita a partir do ponto mínimo da superfície do líquido no lado de alta pressão, subtraída do ponto máximo do lado de baixa pressão. A leitura pode ser feita simplesmente medindo o deslocamento do lado de baixa pressão a partir do mesmo nível do lado de alta pressão, tomando como referência o zero da escala.

#### **Manômetro tipo coluna reta vertical**

O emprego deste manômetro é idêntico ao do tubo em “U”. Nesse manômetro as áreas dos ramos da coluna são diferentes, sendo a pressão maior aplicada normalmente no lado da maior área. Essa pressão, aplicada no ramo de área maior, provoca um pequeno deslocamento do líquido na mesma, fazendo com que o deslocamento no outro ramo seja bem maior, em face do volume deslocado ser o mesmo e sua área bem menor.

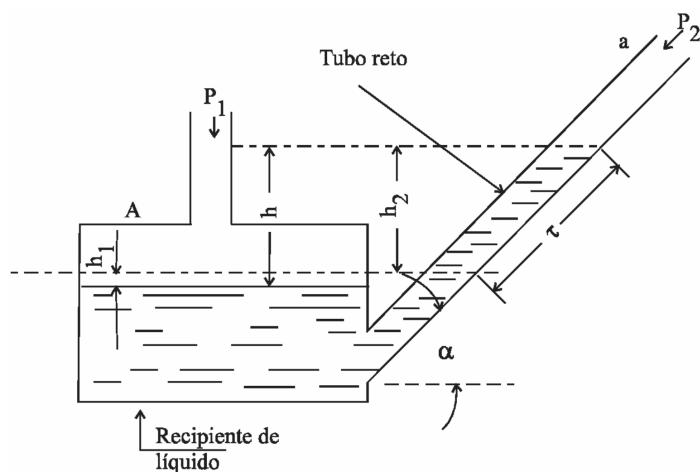
**Figura 24 – Manômetro do tipo coluna reta (SENAI. ES,1999, p. 48)**



### Manômetro tipo coluna inclinada

Este manômetro é utilizado para medir baixas pressões na ordem de 50mmH<sub>2</sub>O. Sua construção é feita inclinando um tubo reto de pequeno diâmetro, de modo a medir com boa precisão pressões em função do deslocamento do líquido dentro do tubo. A vantagem adicional é a de expandir a escala de leitura, o que é muitas vezes conveniente para medições de pequenas pressões com boa precisão ( $\pm 0,02\text{mmH}_2\text{O}$ ).

**Figura 25 – Manômetro do tipo coluna inclinada (SENAI.ES ,1999a, p.49)**



### Manômetro tipo elástico

Este tipo de instrumento de medição de pressão baseia-se na lei de *Hooke* sobre elasticidade dos materiais que diz: "o módulo da força aplicada em um corpo é proporcional à deformação provocada".

Os medidores de pressão tipo elástico são submetidos a valores de pressão sempre abaixo do limite de elasticidade, pois assim cessada a força a ele submetida o medidor retorna à sua posição inicial, sem perder suas características.

O elemento de recepção de pressão tipo elástico sofre deformação tanto maior quanto a pressão aplicada. Esta deformação é medida por dispositivos mecânicos, elétricos ou eletrônicos. O elemento de recepção de pressão tipo elástico, comumente chamado de manômetro, é aquele que mede a deformação elástica sofrida quando está submetido a uma força resultante da pressão aplicada sobre uma área específica. Essa deformação provoca um deslocamento linear, que é convertido de forma proporcional a um deslocamento angular por meio de mecanismo específico. Ao deslocamento angular é anexado um ponteiro que percorre uma escala linear e cuja faixa representa a faixa de medição do elemento de recepção.

O Quadro 8 mostra os principais tipos de elementos de recepção utilizados na medição de pressão baseada na deformação elástica, bem como sua aplicação e faixa recomendável de trabalho.

**Quadro 9 – Características de alguns medidores de pressão. (INSTRUMENTAÇÃO I, 1999, p. 50)**

Elemento de recepção de pressão	Aplicação/restrição	Faixa de pressão (Max)
Tubo de Bourdon	Não apropriada para micropressão	~1000kgf/cm <sup>2</sup>
Diaphragma	Baixa pressão	~3kgf/cm <sup>2</sup>
Fole	Baixa e média pressão	~10kgf/cm <sup>2</sup>
Cápsula	Micropressão	~300mmH <sub>2</sub> O



## Fique ligado!

Os manômetros, assim como qualquer instrumento, devem ser bem dimensionados para a faixa de trabalho onde são designados. Desta forma temos um maior aproveitamento do instrumento em sua escala de medição, e conseguimos maior eficientização energética.

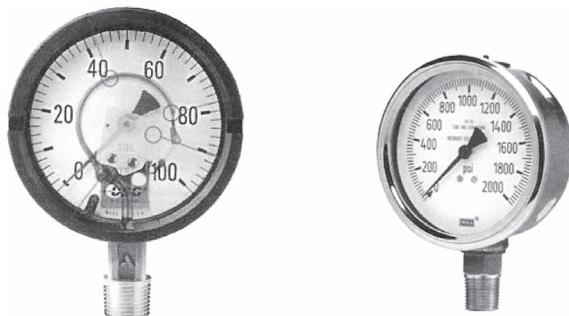
### **Manômetro tubo de Bourdon**

O tubo de Bourdon consiste em um tubo com seção oval, que poderá estar disposto em forma de “C”, espiral ou helicoidal (veja a Figura 26); tem uma de sua 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 de engrenagens é transmitido a um ponteiro que irá indicar uma medida de pressão em uma escala graduada.

**Figura 26 – Tipos de manômetros de Bourdon (SENAI. ES,1999a, p. 90)**



**Figura 27 – Manômetro do tipo Bourdon (BORTONI, p.44)**



Os manômetros tipo *Bourdon* podem ser classificados quanto ao tipo de pressão medida e quanto à classe de precisão. Quanto à pressão medida ele pode ser manométrico para pressão efetiva, vácuo, composto ou pressão diferencial. Quanto à classe de exatidão, essa classificação pode ser obtida mediante a tabela de manômetro/vacuômetro e manômetro composto, apresentada a seguir.

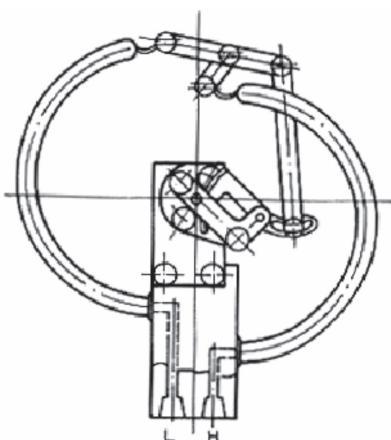
**Tabela 3 – Classe de exatidão de manômetros e vacuômetros. (INSTRUÇÃO I, 1999, p. 54)**

Classe	Erro tolerável	
	Acima de 1/10 e abaixo de 9/10 da escala	Outra faixa da escala
0,5	± 0,5%	± 0,5%
1,0	± 1,0%	± 1,5%
1,5	± 1,5%	± 2,0%
3,0	± 3,0%	± 1,5%
		± 4,0%

### Manômetro de pressão diferencial

Este tipo construtivo é adequado para medir a diferença de pressão entre dois pontos quaisquer do processo. É composto de dois tubos de *Bourdon* dispostos em oposição e interligados por articulações mecânicas. A pressão indicada é resultante da diferença de pressão aplicada em cada *Bourdon*.

**Figura 28 – Manômetro de pressão diferencial (SENAI. ES, 1999a, p. 56)**

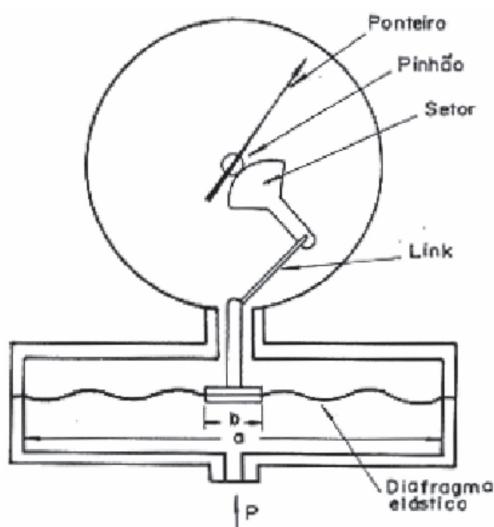


## Manômetro tipo diafragma

Este tipo de medidor utiliza o diafragma para medir determinada pressão, bem como para separar o fluido medido do mecanismo interno.

Antes foi mostrado o manômetro tipo de *Bourdon* que utiliza selagem líquida. Apresentamos agora o medidor que utiliza um diafragma elástico. A área efetiva de recepção de pressão do diafragma muda de acordo com a quantidade de deslocamento. Para se obter linearidade em função de grande deslocamento, deve-se fazer o diâmetro com dimensões maiores.

**Figura 29 – Manômetro do tipo diafragma (SENAI. ES, 1999a, p. 62)**



## Pressostato

É um instrumento de medição de pressão utilizado como componente do sistema de proteção de equipamento ou processos industriais. Sua função básica é de proteger a integridade de equipamentos contra sobrepressão ou subpressão aplicada aos mesmos durante o seu funcionamento. É constituído em geral por um sensor, um mecanismo de ajuste de *set point* e uma chave de duas posições (aberto ou fechado). Como elemento sensor, pode-se utilizar qualquer um dos tipos já estudado, sendo o mais utilizado nas diversas aplicações o diafragma.

## Instrumentos transmissores de pressão

Os instrumentos de transmissão de sinal de pressão têm a função de enviar informações à distância das condições atuais de processo dessa variável. Essas informações são enviadas, de forma padronizada, por meio de diversos tipos de sinais e utilizando sempre um dos elementos sensores já estudados anteriormente (fole, diafragma, cápsula, etc.) associados a conversores, cuja finalidade principal é transformar as variações de pressão detectadas pelos elementos sensores em sinais padrões de transmissão.

### Tipos de transmissores de pressão

Vamos analisar agora alguns tipos de transmissores de pressão.

#### Transmissores pneumáticos

Esses transmissores, pioneiros na instrumentação, possuem um elemento de transferência que converte o sinal detectado pelo elemento receptor de pressão em um sinal de transmissão pneumático. A faixa padrão de transmissão (pelo sistema internacional) é de 20 a 100KPa, porém, na prática, são usados outros padrões equivalentes de transmissão tais como 3 ~ 15psi, 0,2 a 1,0Kgf/cm<sup>2</sup> e 0,2 a 1,0 bar.

#### Transmissores eletrônicos analógicos

Esses transmissores, sucessores dos pneumáticos, possuem elementos de detecção similares ao pneumático, porém utilizam elementos de transferência que convertem o sinal de pressão detectado em sinal elétrico padronizado de 4 a 20mA. Existem vários princípios físicos relacionados com as variações de pressão que podem ser utilizados como elemento de transferência. Os mais utilizados nos transmissores mais recentes são:

- *strain gauges*;
- piezoelétrico;
- sensor capacitivo.

Vamos conhecê-los.

### Strain gauge

A fita extensiométrica ou *strain gauge* é um dispositivo que mede a deformação elástica sofrida pelos sólidos quando estes são submetidos ao esforço de tração ou compressão. São, na realidade, fitas metálicas fixadas adequadamente nas faces de um corpo a ser submetido ao esforço de tração ou compressão e que tem sua seção transversal e seu comprimento alterado devido a esse esforço imposto ao corpo. Essas fitas são interligadas em um circuito tipo ponte de *Wheatstone*. Na figura a seguir podemos ver um diagrama da configuração de uma ponte de *Wheatstone*. Na ponte temos um equilíbrio entre as resistências que têm o formato de um losango. A ponte funciona ajustando-se o balanço para condição inicial e que ao ter os valores de resistência da fita mudada com a pressão, sofre desbalanceamento proporcional à variação desta pressão.

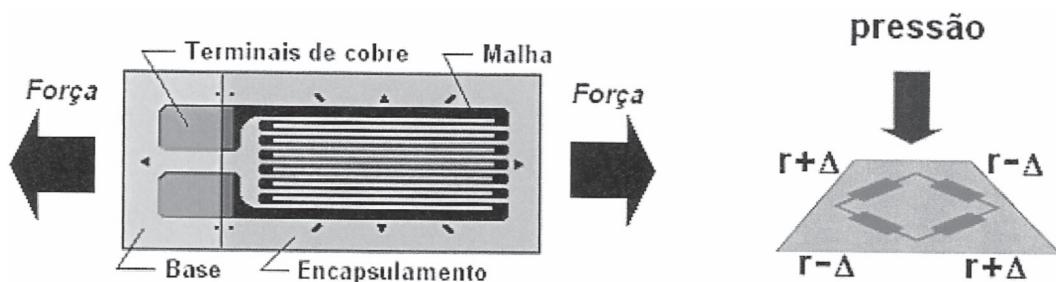
São utilizados na confecção destas fitas extensiométricas, metais que possuem baixo coeficiente de temperatura para que exista uma relação linear entre resistência e tensão numa faixa mais ampla. Vários metais são utilizados na confecção da fita extensiométrica.



#### Fique ligado!

A temperatura é um fator que altera muito as medições dos instrumentos. Entretanto, o *strain gauge* foi projetado para que não sofresse esta influência, permitindo assim uma maior exatidão em suas medições, e evitando assim erro de leitura que podem afetar a eficientização energética.

**Figura 30 – Diagrama de esforço de um *strain gauge* (BORTONI, p. 46)**

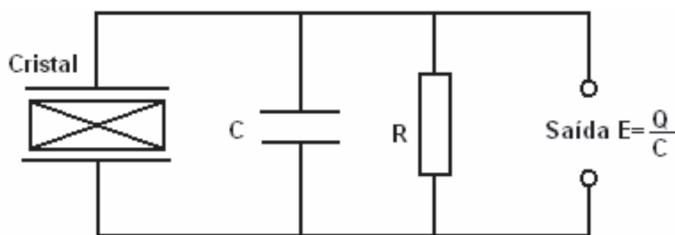


## Piezoelétrico

A medição de pressão utilizando este tipo de sensor se baseia no fato de os cristais assimétricos, ao sofrerem uma deformação elástica ao longo do seu eixo axial, produzirem internamente um potencial elétrico causando um fluxo de carga elétrica em um circuito externo. A quantidade elétrica produzida é proporcional à pressão aplicada, sendo então essa relação linear, o que facilita sua utilização. Outro fator importante para sua utilização está no fato de se utilizar o efeito piezoelétrico de semicondutores, reduzindo assim o tamanho e peso do transmissor, sem perda de precisão.

Cristais de turmalina, cerâmica policristalina sintética, quartzo e quartzo cultivado podem ser utilizados na sua fabricação, porém o quartzo cultivado é o mais empregado por apresentar características ideais de elasticidade e linearidade.

**Figura 31 – Circuito do sensor piezoelétrico (SENAI. ES, 1999, p. 72)**

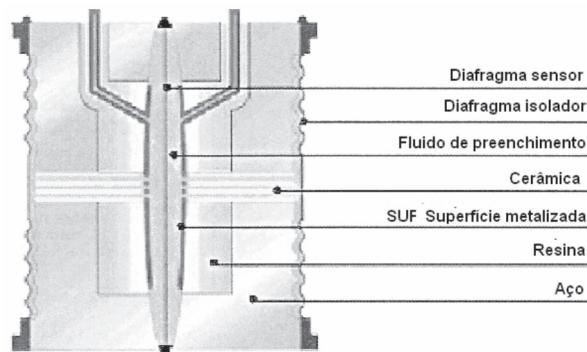


## Sensor capacitivo

Em um sensor capacitivo ou célula capacitiva, um diafragma de medição se move entre dois diafragmas fixos. Entre os diafragmas fixos e o móvel existe um líquido de enchimento que funciona como um dielétrico. Como um capacitor de placas paralelas é constituído por duas placas paralelas separadas por um meio dielétrico, ao sofrer o esforço de pressão, o diafragma móvel (que vem a ser uma das placas do capacitor) tem sua distância em relação ao diafragma fixo modificada. Isso provoca modificação na capacidade de um circuito de medição e, então, se tem a medição de pressão.

Para que ocorra a medição, o circuito eletrônico é alimentado por um sinal de corrente alternada através de um oscilador e então se modula a freqüência ou a amplitude do sinal em função da variação de pressão para se ter à saída analógica ou digital. Como líquido de enchimento utiliza-se normalmente glicerina, ou *fluor-oil*.

Figura 32 – Transmissor de pressão tipo célula capacitiva (BORTONI, p. 48)



### Fique ligado!

O sensor capacitivo ou célula capacitiva é o mais utilizado em sensores de pressão.

Quando escolher os tipos de medidores de pressão deve-se observar a faixa de medição a ser medida, a característica química do fluido e o local de instalação do instrumento. Devido a baixa precisão de medição, perto do ponto zero e proteção contra a sobrepressão é apropriado escolher um medidor de pressão que trabalhe numa faixa de 25% a 70% da pressão máxima desejada.

Como proteção da sobrepressão devemos trabalhar com medidores de pressão na faixa de 20% a 70% da pressão máxima, permitindo que tenhamos um instrumento de acordo com a eficiência energética.



## Atenção!

Pontos que devem ser observados:

- Na medição de óleos e líquidos inflamáveis, é apropriado utilizar solda na tubulação de ligação ao instrumento.
- O vapor com alta temperatura corrói o bronze fosforoso e o aço, por isso deve-se utilizar o medidor com selo d'água.
- O cloro reage com a água e corrói aço e bronze, por isso usa-se um selo de diafragma para proteger o elemento de recepção de pressão.
- A amônia corrói o bronze e o bronze fosforoso, por isso utiliza-se o aço doce.
- No caso de outros líquidos corrosivos, usar medidor do tipo diafragma.
- Se em um medidor de oxigênio for usado óleo, podem ocorrer problemas de explosão.
- Se colocar em contato cobre ou uma liga com cobre num medidor de acetileno, acontecerão reações do cobre com o acetileno com possibilidades de explosão.

## Voltando ao desafio

A resposta para o desafio quanto ao sensor de pressão para ser aplicado numa indústria siderúrgica seria: o *strain gauge*, que é o instrumento menos suscetível a mudanças de temperatura. Sendo assim, ele será o mais indicado nestas aplicações em que se queira um erro menor, quando estiver submetido a esta intempérie.

## Resumindo

No estudo do capítulo 4, você:

- Conheceu alguns tipos de instrumentos para medição de pressão.
- Verificou que os instrumentos mecânicos ainda são bastante utilizados apesar de atualmente os instrumentos eletrônicos oferecerem mais recursos.

- Aprendeu quais são as unidade de medida de pressão e suas relações.

## Aprenda mais

- A Internet é uma boa fonte de informação. Um site bastante interessante é o [www.mspc.eng.br](http://www.mspc.eng.br) (Acesso em: 06 abr.2007), que trata os instrumentos de vazão e pressão com bastante simplicidade e ainda traz mais detalhes sobre os conceitos apresentados neste capítulo.
- Consulte também a revista *Controle e Instrumentação*, número 106, que traz algumas informações sobre medição de pressão.
- Além disso, procure se informar em sua empresa quais são os medidores utilizados no processo e verifique se eles trabalham dentro da faixa de 25% a 70% da pressão máxima.

Para facilitar seu entendimento do texto e aprofundar seus conhecimentos sobre o assunto, apresentamos a seguir um conjunto de termos.

## Glossário

**Pressão absoluta** – É a pressão positiva a partir do vácuo perfeito, ou seja, a soma da pressão atmosférica do local e a pressão manométrica.

**Pressão atmosférica** – É a força exercida pela atmosfera na superfície terrestre.

**Pressão barométrica** – É a medida da força exercida pela atmosfera, considerando como referência a pressão do zero absoluto (no espaço).

**Pressão manométrica** – É a pressão medida em relação à pressão atmosférica existente no local, podendo ser positiva ou negativa.

**Pressão diferencial** – É o resultado da diferença de duas pressões medidas. Em outras palavras, é a pressão medida em qualquer ponto, menos no ponto zero de referência da pressão atmosférica.

**Piezelétrico** – sensor que se baseia na deformação elástica de um cristal, produzindo um potencial elétrico proporcional a esta deformação.

Ponte de *Wheatstone* – Circuito elétrico formado por quatro resistências (ou componentes equivalentes) dispostos na forma de um losango que fornecem tensão zero quando estão em equilíbrio.

*Strain gauge* – é um dispositivo que mede a deformação elástica sofrida pelos sólidos quando estes são submetidos ao esforço de tração ou compressão.

Tempo morto – É o tempo gasto entre a aplicação de um sinal na entrada e o início da resposta de um instrumento.





# Capítulo 5

---

## VAZÃO

### Iniciando nossa conversa

Como já foi visto no capítulo anterior, a vazão pode ser medida a partir da pressão diferencial. Desta forma a maioria dos conceitos apresentados para pressão servem também para medir vazão.

Como veremos no capítulo 5, a placa de orifício é o medidor mais simples e de menor custo para a medição de vazão, assim será o mais empregado.

Neste capítulo teremos uma formatação parecida com o anterior, onde existirão cinco tópicos: vazão, conceito de vazão, tipos de medidores de vazão, medidores de vazão e ao final um quadro comparativo.

### Objetivos

A leitura do capítulo tem como objetivos:

- nomear alguns tipos de instrumentos para medição de vazão.
- reconhecer alguns conceitos básicos usados para medição de vazão.
- estabelecer uma relação entre os tipos de medidores, para adequação ao processo.

### Um desafio para você

Uma empresa petrolífera está tendo problema com uma placa de orifício, e você precisa resolver esse desafio. Seu objetivo é evitar que partículas fiquem incrustadas nas paredes da placa, gerando assim possíveis distorções na medida de vazão.

## Continuando nossa conversa

A medição da vazão é essencial a todas as fases da manipulação dos fluidos, incluindo a produção, o processamento, a distribuição dos produtos e das utilidades. Ela está associada com o balanço do processo e está diretamente ligada aos aspectos de compra e venda dos produtos. A medição confiável e precisa requer uma correta engenharia que envolve a seleção do instrumento de medição, a sua instalação, a sua operação, a sua manutenção e a interpretação dos resultados obtidos.

O conjunto formado pelo medidor e os trechos da tubulação antes e depois do medidor devem ser considerados globalmente e não apenas o medidor isolado. Este conjunto pode incluir retificadores de vazão, reguladores do perfil da velocidade, filtros e tomadas de medições.

A vazão de fluidos é complexa e nem sempre sujeita à análise matemática exata. Diferente do sólido, os elementos de um fluido vazando podem mover em velocidades diferentes e podem ser sujeitos a acelerações diferentes.

## Conceito de vazão

Quando se toma um ponto de referência, a vazão é a quantidade do produto ou da utilidade, expressa em massa ou em volume, que passa por ele, na unidade de tempo.



**Fique ligado!**

A unidade de vazão é a unidade de volume por unidade de tempo ou a unidade de massa por unidade de tempo.

A *vazão volumétrica* é igual à quantidade de volume que escoa através de uma secção em um intervalo de tempo considerado. É representada pela letra  $Q_m$  e é expressa pela seguinte equação:

Vazão volumétrica	$Q = V/t$
-------------------	-----------

A *vazão mássica* é igual à quantidade de massa de um fluido que atravessa a secção de uma tubulação por unidade de tempo. É representada pela letra  $Q_m$  e expressa pela seguinte equação:

Vazão mássica	$Q_m = m/t$
---------------	-------------

A é igual à quantidade de peso que passa por uma certa secção por unidade de tempo. É representada pela letra  $Q_p$  (onde W é o peso) e expressa pela seguinte equação:

Vazão gravitacional	$Q_p = W/t$
---------------------	-------------

A partir da vazão volumétrica ou mássica, pode-se obter a sua totalização, através da integral da vazão instantânea.

Outra dificuldade apresentada na medição da vazão está relacionada com a grande variedade de fluidos manipulados e com o elevado número de configurações diferentes. Por isso é freqüente na medição da vazão o uso de extrapolações e de similaridades geométricas, dinâmicas e cinemáticas entre os diferentes modelos.

## Tipos de medidores de vazão

Apresentamos a seguir alguns tipos de medidores de vazão.

Medidores indiretos usando em fenômenos intimamente relacionados com quantidade de fluido passante:

Perda de carga variável (área constante):

- Tubo de *Pitot*;
- *Annubar*;
- Tubo de *Venturi*;
- Tubo de *Dall*;
- Placa de orifício;

Medição por área variável (perda de carga constante):

- Rotâmetro

Medidores diretos de volume do fluido passante:

Deslocamento positivo do fluido:

- Disco Nutante;
- Rotativos

Velocidade pelo impacto do fluido:

- Tipo turbina.

Medidores especiais:

- Efeito eletromagnético;
- Ultra-sônico;
- Vortex;
- em canal aberto;
- *Coriolis*.

## Principais medidores de vazão

Vamos estudar agora um pouco mais sobre os tipos de medidores de vazão. De todos os medidores que foram mencionados anteriormente, daremos mais ênfase a aqueles que são mais utilizados no setor industrial.

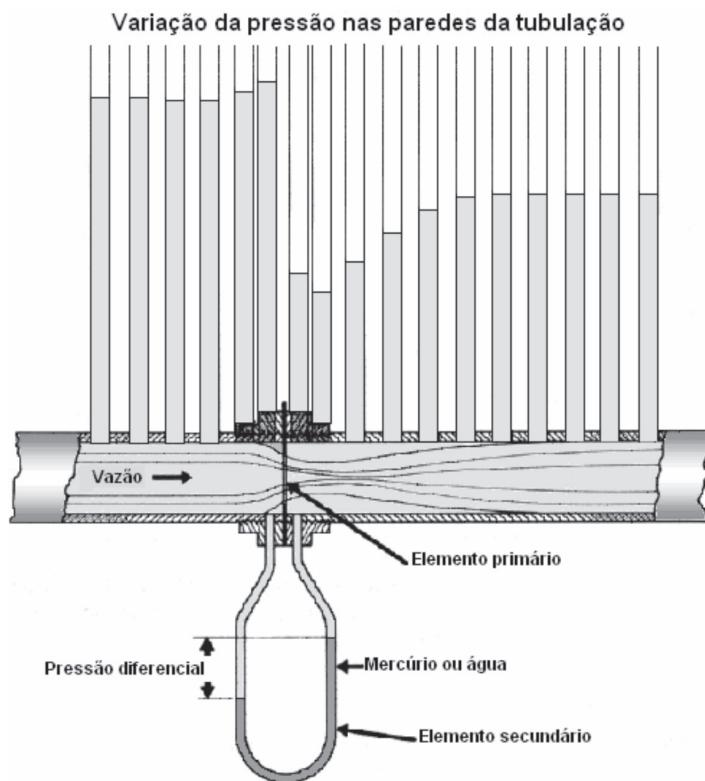
## Medidores indiretos

Os medidores indiretos de vazão podem trabalhar a partir de dois princípios: por perda de carga variável ou área variável. A seguir, veremos uma descrição do funcionamento deles.

### Medição de vazão por perda de carga variável

Considerando-se uma tubulação com um fluido passante, chama-se perda de carga dessa tubulação a queda de pressão sofrida pelo fluido ao atravessá-la. As causas da perda de carga são: atrito entre o fluido e a parede interna do tubo, mudança de pressão e velocidade devido a uma curva ou um obstáculo, etc. Os diversos medidores de perda de carga variável usam diferentes tipos de obstáculos ao fluxo do líquido, provocando uma queda de pressão.

**Figura 33 – Perda de carga com redução do diâmetro do tubo (SENAI. ES, 1999b, p.11)**

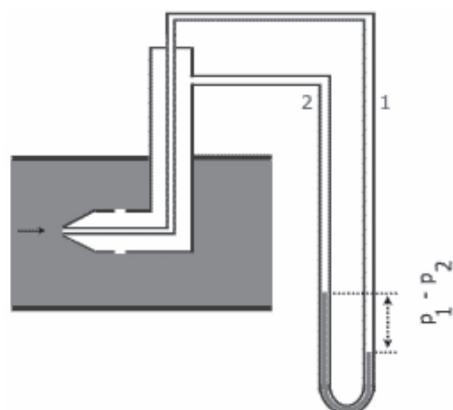


Na seqüência, serão mostrados os tipos de medidores de vazão por perda de carga variável com área constante.

### Tubo de Pitot

É um dispositivo utilizado para medição de vazão através da velocidade detectada em um determinado ponto de tubulação. O tubo de Pitot é um tubo com uma abertura em sua extremidade, sendo esta colocada na direção da corrente fluida de um duto, mas em sentido contrário. A diferença entre a pressão total e a pressão estática da linha nos fornecerá a pressão dinâmica à qual é proporcional ao quadrado da velocidade.

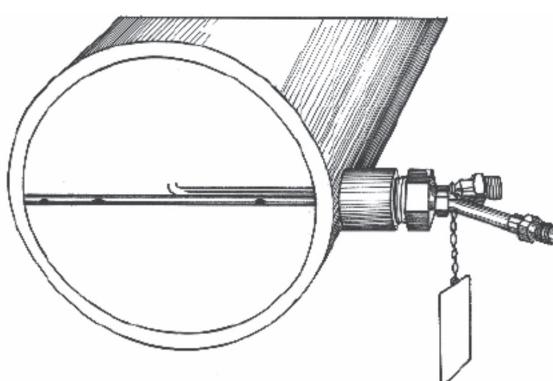
**Figura 34 – Medidor do tipo tubo de Pitot (MSPC, 2007)**



### Annubar

Este dispositivo consiste em um pequeno par de pontas de prova sensoras de pressão montadas perpendicularmente ao fluxo.

**Figura 35 – Medidor do tipo Annubar (SENAI. ES,1999b, p.14)**



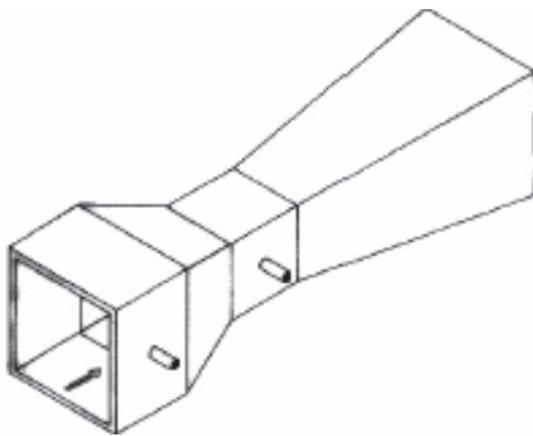
A barra sensora de pressão a jusante possui um orifício que está posicionado no centro do fluxo de modo a medir a pressão do fluxo a jusante. A barra sensora de pressão de montante possui vários orifícios, estes orifícios estão localizados criteriosamente ao longo da barra, de tal forma que cada um detecta a pressão total de um anel. Cada um destes anéis tem área da secção transversal exatamente igual às outras áreas anulares detectadas por orifício.

Outra característica do elemento de fluxo tipo *Annubar* é que, quando bem projetado, tem capacidade para detectar todas as vazões na tubulação na qual está instalado, sendo a vazão total a média das vazões detectadas.

### **Tubo Venturi**

O tubo *Venturi* combina dentro de uma unidade simples uma curta “garganta” estreitada entre duas secções cônicas e está usualmente instalado entre dois flanges; numa tubulação, seu propósito é acelerar o fluido e temporariamente baixar sua pressão estática. São fornecidas conexões apropriadas de pressão para observar a diferença nas pressões entre a entrada e a porta estreitada ou garganta.

**Figura 36 – Medidor do tipo tubo *Venturi* (SENAI. ES, 1999b, p.17)**

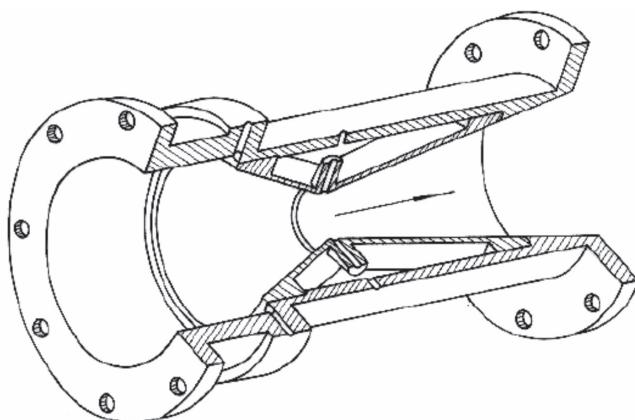


### **Tubo de Dall**

Em época mais recente foi desenvolvido um dispositivo conhecido como tubo de *Dall*, para proporcionar uma recuperação de pressão muito maior do que a obtida por um tubo Venturi. Diferentemente do tubo Venturi, que apresenta gar-

ganta paralela, o tubo de *Dall* é desprovido de garganta, é menor e mais simples. Possui um curto cone em convergência, que começa com diâmetro ligeiramente inferior ao diâmetro de conduto. Há, a seguir, um espaço anular na “garganta”, seguido pelo cone divergente. O fluido, ao passar pelo tubo, pode entrar pelo espaço anular entre o tubo de *Dall*, que funciona como um revestimento interno do tubo e este último, transmitindo assim, uma pressão média do “gargalo” ao instrumento de medida, através de uma derivação no tubo, nesse ponto.

**Figura 37 – Medidor tipo tubo de *Dall* (SENAI. ES, 1999b, p. 19)**



### Placa de orifício

A placa de orifício consiste basicamente de uma chapa metálica, perfurada de forma precisa e calculada, a qual é instalada perpendicularmente ao eixo da tubulação entre flanges. Sua espessura varia em função do diâmetro da tubulação e da pressão da linha, indo desde  $1/16"$  a  $1/4"$ . O diâmetro do orifício é calculado de modo que seja o mais preciso possível, e suas dimensões sejam suficientes para produzir à máxima vazão uma pressão diferencial adequada.



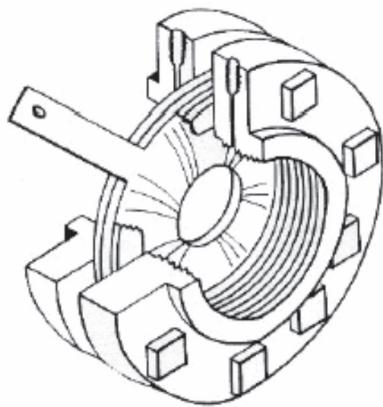
### Fique ligado!

De todos os elementos primários inseridos em uma tubulação para gerar uma pressão diferencial e assim efetuar medição de vazão, a placa de orifício é a mais simples, de menor custo e, portanto, a mais empregada.

É essencial que as bordas do orifício estejam sempre perfeitas, porque, se ficarem gastas, corroídas pelo fluido, a precisão da medição será comprometida. A placa de orifício pode ser ajustada mais convenientemente entre flanges de tubos adjacentes, pontos de tomadas e impulsos feitos em lugares adequados, um a montante da placa e o outro em um ponto no qual a velocidade, devido à restrição, seja máxima. Este ponto não é próprio orifício porque, devido à inércia do fluido, a área de sua secção transversal continua a diminuir após passar através do orifício, de forma que sua velocidade máxima está à jusante do orifício, na *vena contracta*. É neste ponto que a pressão é mais baixa e a diferença de pressão, a mais acentuada. Outros tipos de tomadas de pressão conforme veremos mais adiante, também são utilizadas.

As placas de orifício são costumeiramente fabricadas com aço inoxidável, monel, latão, etc. A escolha depende da natureza do fluido a medir.

**Figura 38 – Placa de orifício (SENAI. ES, 1999b, p.21)**



### Medição de vazão por área variável

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

Basicamente um rotâmetro consiste de duas partes:

- Um tubo de vidro de formato cônico que é colocado verticalmente na tubulação, em que passará o fluido a ser medido e cuja extremidade maior fica voltada para cima;

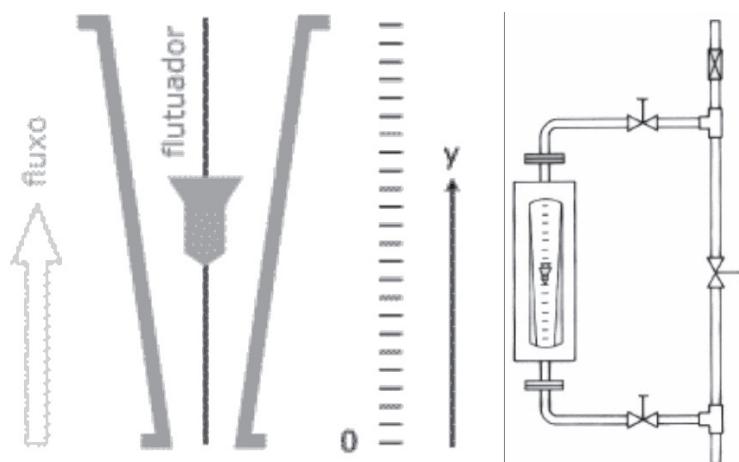
- No interior do tubo cônico, um flutuador que se moverá verticalmente em função da vazão medida.

### Rotâmetro

Neste tipo de medidor de vazão, o fluido passa através no tubo da base para o topo. Quando não há fluxo, o flutuador permanece na base do tubo e bloqueia a extremidade inferior do tubo, quase que completamente. Quando a vazão começa e o fluido atinge o flutuador, o empuxo torna o flutuador mais leve, porém como o flutuador tem uma densidade maior que a do fluido, o empuxo não é suficiente para levantar o flutuador. Com a vazão, surge também uma força de atrito, entre o fluido e o flutuador, que tende a levá-lo para cima, e é denominada força de arraste.

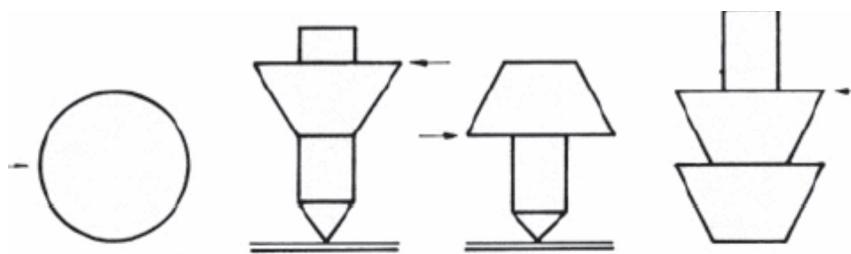
Quando a vazão atinge um valor que faça a força de arraste ser maior que a força peso do flutuador, este começará a subir. Se o tubo fosse paralelo, o flutuador subiria até o topo; mas sendo cônico a força de arraste diminui à medida que o flutuador sobe até estabilizar em uma nova posição (pois aumenta a área disponível para a passagem do fluido). Qualquer aumento na vazão movimenta o flutuador para a parte superior do tubo de vidro e a diminuição causa uma queda num nível mais baixo. Cada posição sua corresponde a um valor determinado de vazão e somente um. É necessário colocar uma escala calibrada na parte externa do tubo, para que a vazão possa ser determinada pela observação direta da posição do flutuador.

**Figura 39 – Instalação do Rotâmetro (MSPC, 2007)**



Dependendo do formato do flutuador temos um determinado ponto no qual devemos realizar a leitura.

**Figura 40 – Ponto de leitura dos flutuadores (SENAI. ES,1999b, p.45)**



## Medidores diretos

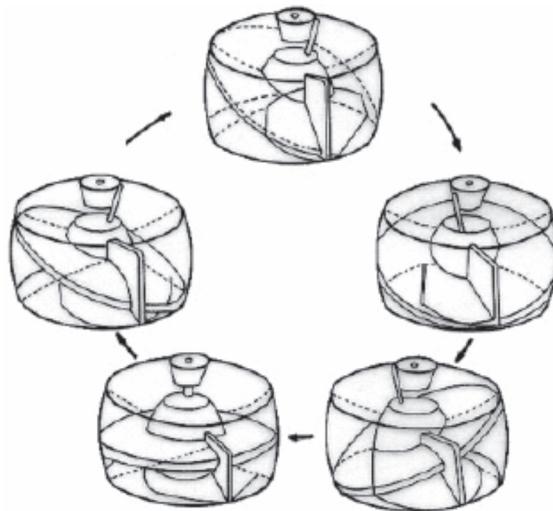
Entre os medidores diretos de vazão podemos destacar dois tipos: de deslocamento positivo do fluido e velocidade pelo impacto do fluido. Eles serão descritos a seguir.

### Medidores de vazão tipo deslocamento positivo

Entre os tipos de medidores de vazão com deslocamento positivo do fluido iremos destacar somente o disco nutante e rotativo. Os outros tipos não serão estudados neste módulo. Vale como sugestão a pesquisa em outras bibliografias, caso seja de seu interesse.

#### Disco nutante

Este tipo de medidor é utilizado principalmente para medidores de vazão de água, sendo utilizado principalmente em resistências. O líquido entra no medidor através da conexão de entrada, passa por um filtro indo ao topo da carcaça principal. O fluido, então, se movimenta para baixo, através da câmara de medição, indo da base do medidor até a conexão da saída do medidor.

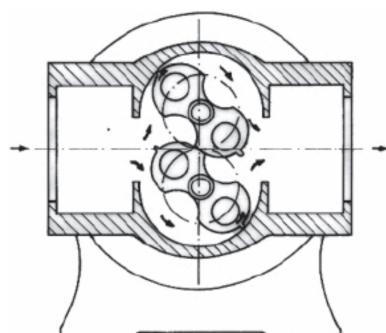
**Figura 41 – Disco nutante (SENAI. ES,1999b, p.48)**

### **Medidores rotativos**

Este tipo de medidor de vazão aciona propulsores (rotores) internos, sendo que sua velocidade de rotação será em função da velocidade do fluido, através da câmara de medição. Três tipos básicos podem ser destacados:

- rotores de lóbulos;
- palhetas corrediças;
- palhetas retráteis.

Para não nos alongarmos, vamos apresentar somente o tipo mais usado. Os rotores lobulares são os mais utilizados para medições de vazões de gases. Estes dispositivos possuem dois rotores com movimentos opostos com a posição relativamente fixa internamente, a uma estrutura cilíndrica.

**Figura 42 – Medidor rotativo tipo lóbulo (SENAI. ES,1999b, p.49)**

A câmara de medição é formada pela parede do cilindro e a superfície da metade do rotor. Estando o rotor na posição vertical, um determinado volume de gás ficará retido no compartimento de medição. Como o rotor gira devido à pequena diferença de pressão entre a entrada e saída, o volume medido do gás é descarregado na base do medidor. Esta ação sucede-se 4 vezes em uma movimentação completa com os rotores em deslocamentos opostos e a uma velocidade proporcional ao volume do gás deslocado.

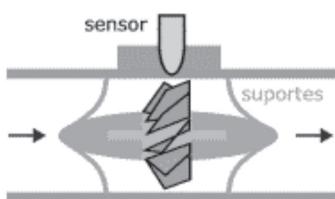
### **Medidores de vazão por impacto do fluido**

Nos medidores de vazão por impacto de fluido, estudaremos apenas o do tipo turbina. Veja a seguir.

#### **Medidor tipo turbina**

Um medidor de vazão tipo turbina, conforme a Figura 43, consiste basicamente de um rotor provido de palhetas, suspenso numa corrente de fluido com seu eixo de rotação paralelo à direção do fluxo. O rotor é acionado pela passagem de fluido sobre as palhetas em ângulo; a velocidade angular do rotor é proporcional à velocidade do fluido que, por sua vez, é proporcional à vazão do volume. Uma bobina sensora na parte externa do corpo do medidor detecta o movimento do rotor.

**Figura 43 – Medidor tipo turbina (MSPC, 2007)**



Esta bobina é alimentada, produzindo um campo magnético. Como as palhetas do rotor são feitas de material ferroso, à medida que cada palheta passa em frente a bobina, corta o campo magnético e produz um pulso. O sinal de saída é uma seqüência de pulsos de tensão, em que cada pulso representa um pequeno volume determinado de líquido. O sinal detectado é linear com a vazão. Unidades eletrônicas associadas permitem indicar a vazão unitária ou o volume totalizado, podendo efetuar a correção automática da temperatura e/ou pressão e outras funções.



## Fique ligado!

Um medidor de turbina corretamente projetado e fabricado tem uma elevada precisão numa faixa de vazão superior a 10:1 e excelente repetibilidade.

## Medidores especiais

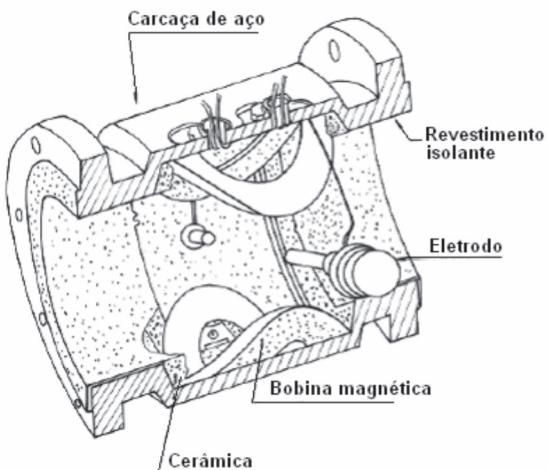
Os medidores de vazão tradicionais apresentam algumas limitações como: seus sensores primários precisam ser submersos no fluxo a ser controlado; estas características têm a desvantagem de produzir perda de pressão na linha como também o acúmulo de partículas ou impurezas no sensor, proporcionando resultados incertos de medição. Os medidores de vazão do tipo especial objetivam superar exatamente essas limitações.

### Medidor de vazão por eletromagnetismo

O princípio de medição é baseado na lei de *Faraday* que diz que: *Quando um condutor se move dentro de um campo magnético, é produzida uma força eletromotriz (f.e.m.) proporcional a sua velocidade.*

O medidor de vazão eletromagnético utiliza um campo magnético com forma de onda quadrada em baixa freqüência, e lê o sinal de vazão quando o fluxo magnético está completamente saturado, fazendo com que não ocorra influência no sinal devido a flutuações de corrente. Todos os detectores são ajustados de maneira que a relação da tensão induzida ( $E$ ) pela densidade de fluxo magnético ( $B$ ) seja mantida em um valor proporcional, somente à velocidade média do fluxo, independente do diâmetro, alimentação e freqüência.

**Figura 44–Medidor de vazão eletromagnético (SENAI. ES,1999b, p.55)**



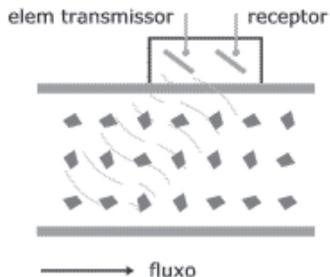
### Atenção!

É de suma importância para o medidor de vazão eletromagnético:

- Que a parede interna da tubulação não conduza eletricidade e que a parte do tubo ocupada pelo volume definido pelas bobinas não provoque distorções no campo magnético.
- Que as medições por meio de instrumentos magnéticos sejam independentes de propriedades do fluido, tais como: a densidade, a viscosidade, a pressão, a temperatura ou mesmo o teor de sólidos.
- O fluxo a ser medido deve ser condutor de eletricidade.

### Medidor de vazão por ultra-som

O medidor de vazão ultra-sônico se fundamenta no princípio da propagação de som num líquido. A noção que os pulsos de pressão sonora se propagam na água à velocidade do som vem desde os dias do primeiro desenvolvimento do sonar. Num medidor de vazão, os pulsos sonoros são gerados, em geral, por um transdutor piezoelettrico que transforma um sinal elétrico em vibração, que é transmitida no líquido como um trem de pulsos. Quando um pulso ultra-sônico é dirigido à jusante, sua velocidade é adicionada à velocidade da corrente. Quando um pulso é dirigido à montante, a velocidade do impulso no líquido é desacelerada pela velocidade da corrente. Baseado nessas informações, é possível determinar a vazão de fluidos por ultra-som.

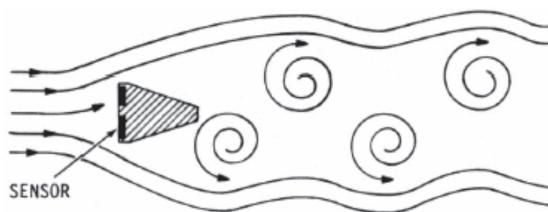
**Figura 45 – Disposição dos sensores ultra-sônicos (MSPC, 2007)**

### Fique ligado!

A técnica de medição de vazão por ultra-som vem adquirindo crescente importância para a medição industrial de vazão de fluidos em tubulações fechadas. Como a medição de vazão ultra-som é feita, geralmente, sem contato com o fluido, não há criação de turbulência ou perda de carga, que era causada pelos medidores de vazão como placas de orifício, entre outros. Além disso, possibilita a medição de vazão de fluidos altamente corrosivos, líquidos não-condutores e líquidos viscosos.

### Medidores tipo vortex

O efeito vortex pode ser observado no vibrar de fios ou cordas ao vento, ou ainda em uma bandeira que tremula. Os vortex gerados repetem-se num tempo inversamente proporcional à vazão. Nas aplicações industriais pode-se medir a vazão de gases, líquidos, incorporando ao obstáculo reto sensores que percebam as ondas dos vortex e gerem um sinal em freqüência proporcional à vazão.

**Figura 46 - Efeito vortex (SENAI. ES,1999b, p.62)**

### Medição em canal aberto

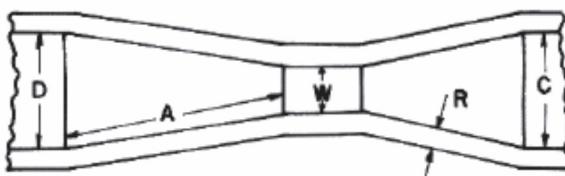
A maior parte das instalações para medição de vazão implicam medições de vazão de fluidos que circulam através de tubulações fechadas. Porém existe um

número de aplicações cada vez maior, que precisam a medição de vazão de água através de canais abertos.

A medição de vazão em canais abertos está intimamente associada aos sistemas hidráulicos, de irrigação, tratamento de esgotos e resíduos industriais, processos industriais, etc. Em muitos casos, essa medição se depara com problemas, tais como: líquidos corrosivos, viscosos, extremamente sujos, espumas, etc. Estas condições poderão fornecer informações errôneas, com a utilização dos antigos sistemas mecânicos de medidores de vazão. Devido à necessidade imperiosa de melhor controle na poluição dos rios, esgotos etc., os seguintes fatores passaram a ser críticos na escolha de um sistema de vazão: precisão e baixos custos de manutenção.

A medição de vazão em canais abertos necessitam de um elemento primário que atue diretamente no líquido sob medição e produza uma altura de líquido variável, que é medida por um instrumento de nível. Assim sendo, conhecida a área de passagem do fluido (determinada pelo perfil do dique) a altura do líquido sobre o bordo inferior do dique é transformada em unidades de peso ou volume segundo o requerido.

**Figura 47 – Medidor de vazão em canal aberto ( SENAI. ES,1999b, p.64)**

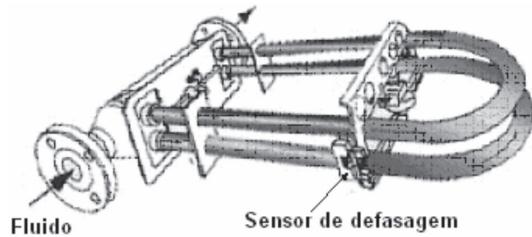


### **Medidor tipo Coriolis**

Este medidor de vazão utiliza um fenômeno físico que envolve a inércia e a aceleração centrípeta. A vazão de uma tubulação é dividida em duas por dois tubos paralelos que possuem forma de "U", e ao fim destes tubos a vazão volta a ser conduzida por um único tubo. Próximo da parte inferior de cada "U" existem eletroímãs que fazem os dois tubos oscilarem em suas freqüências naturais de vibração e cuja amplitude não ultrapassa alguns milímetros. Com o passar do fluido pelos tubos, em função desta oscilação, surge uma torção nos tubos cuja defasagem permite a medição da vazão mássica. Esta defasagem é medida por

sensores magnéticos instalados nas partes retas dos tubos em "U". Este tipo de medidor pode ser utilizado para medições de fluxos de líquidos e gases, com ou sem sólidos em suspensão.

**Figura 48 – Medidor do tipo Coriolis (SENAI. ES, 1999b, p. 65)**



Vamos agora estudar alguns tipos de transmissores de vazão.

## Transmissor de vazão por pressão diferencial

Os transmissores de vazão por pressão diferencial se baseiam nos mesmos princípios físicos utilizados na tecnologia de medição de pressão. Assim, são utilizados os tipos piezoelétrico; *strain gauge*, célula capacitiva, etc., para medir a pressão diferencial imposta por um elemento deprimogênio cuidadosamente calculado para permitir a obtenção da faixa de vazão que passa por um duto, conforme já visto em tópicos anteriores. Como a pressão diferencial é relativamente baixa, as faixas de medição destes transmissores são expressas normalmente em mmH<sub>2</sub>O, KPa ou polegada de água.

## Extrator de raiz quadrada

Uma das maneiras mais utilizadas para se medir a vazão de um fluido qualquer em um processo industrial é aproveitar-se da relação entre vazão e pressão deste fluido. Para isto, são utilizados elementos deprimogênicos, tais como placas de orifício, que atuam como elementos primários e possibilitam efetuar a medição de uma pressão diferencial que é correspondente à vazão que passa por ele. Porém, essa relação não é linear e sim quadrática. Desta forma são utilizadas unidades aritméticas denominadas extrator de raiz quadrada cuja função é a de permitir que valores medidos pelo transmissor representem a vazão medida. Esta função, extrator de raiz, pode estar incorporada ao transmissor, estar separada como um

instrumento ou até mesmo ser uma função executada via *software* em sistema de controle, em um controlador digital ou até mesmo em um controlador lógico programável.

## Integrador de vazão

As medições de vazão quase sempre têm por objetivo também apurar o consumo ao longo de um tempo pré-estabelecido de um determinado fluido, usado em um processo de transformação industrial qualquer. Isto é importante, pois, sua quantificação permite levantar custos para conhecer gastos e efetuar cobranças de fornecimento. Para conhecer esse consumo, é feito a integração dos valores instantâneos de vazão e desta forma é obtido, após um período determinado, o total consumido. Essa operação é feita por um instrumento denominado *integrador de sinal*.

## Quadro comparativo da utilização dos medidores de vazão

O Quadro 10 dá algumas informações comparativas da utilização em líquidos de alguns dos medidores mencionados neste capítulo. Não deve ser considerada uma referência absoluta. São apenas informações auxiliares obtidas de fabricantes.

Quadro 10 – Características dos medidores de vazão (MSPC, 2007)

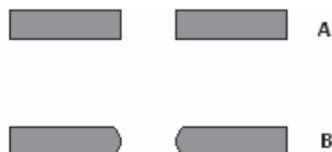
Tipo	Utilização	Faixa	Perda de pressão	Precisão aproximada %	Comprimento prévio diâmetro	Sensibilidade à viscosidade	Custo relativo
Bocal	Líquidos comuns.	4:1	Média	±1/±2 da escala	10 a 30	Alta	Médio
<i>Coriolis</i>	Líquidos comuns, viscosos, alguma suspensão	10:1	Baixa	±0,4 da proporção	Não há	Não há	Alto
Deslocamento positivo	Líquidos viscosos sem suspensões	10:1	Alta	±0,5 da proporção	Não há	Baixa	Médio
Eletromagnético	Líquidos condutivos com suspensões	40:1	Não há	±0,5 da proporção	5	Não há	Alto
Joelho	Líquidos comuns. Alguma suspensão	3:1	Baixa	±5/±10 da escala	30	Baixa	Baixo
Placa de orifício	Líquidos comuns. Alguma suspensão	4:1	Média	±2/±4 da escala	10 a 30	Alta	Baixo
Rotâmetro	Líquidos comuns	10:1	Média	±1/±10 da escala	Nenhum	Média	Baixo
Tubo de Pitot	Líquidos sem impurezas	3:1	Muito baixa	±3/±5 da escala	20 a 30	Baixa	Baixo
Tubo de Venturi	Líquidos comuns. Alguma suspensão	4:1	Baixa	±1 da escala	5 a 20	Alta	Médio
Turbina	Líquidos comuns. Pouca suspensão	20:1	Alta	±0,25 da proporção	5 a 10	Alta	Alto
Ultra-sônico ( <i>Doppler</i> )	Líquidos viscosos c/ suspensões	10:1	Não há	±5 da escala	5 a 30	Não há	Alto

## Voltando ao desafio

Vamos agora voltar ao desafio proposto no início do capítulo:

1. Em placas de orifício, normalmente se utiliza placas em que o bordo é quadrado. Porém, em aplicações onde se quer evitar a incrustação de partículas, deveremos usar o bordo arredondado, como pode ser visto pela Figura 49.

**Figura 49 – Perfil de uma chapa da placa de orifício com Bordo quadrado (A) e Bordo Arredondado (B)**



## Resumindo

Ao estudar o capítulo 5, você pode:

- Conhecer alguns tipos de instrumentos para medição de vazão.
- Estabelecer uma comparação pelo quadro que mostra os tipos de medidores com as suas principais características, permitindo assim entender onde eles podem ser usados.
- Saber que um dos meios mais usuais para se medir a vazão é pela placa de orifício, que se utiliza da pressão diferencial.

## Aprenda mais

- No sentido de aprofundar seu conhecimento sobre o tema, consulte o site [www.mspc.eng.br](http://www.mspc.eng.br), que trata os instrumentos de vazão e pressão com bastante simplicidade e ainda traz mais detalhes sobre os conceitos apresentados neste capítulo.
- Não deixe também de se informar em sua empresa quais são os medidores utilizados no processo e verifique se eles trabalham dentro das faixas indicadas pelo fabricante, evitando assim problemas com a eficiência energética.

Para facilitar sua leitura, segue uma pequena lista de termos usados ao longo do texto.

## Glossário

Aceleração centrípeta – é a aceleração originada pela variação da direção do vetor velocidade de um móvel, característico de movimentos curvilíneos ou circulares.

Deprimogênios – são elementos primários que possibilitam efetuar a medição de vazão a partir de uma pressão diferencial.

Flanges – são terminações colocadas nas extremidades dos tubos para fazerem a conexão entre eles ou para a instalação de instrumentos.

Jusante – É um ponto de tomada de medição localizado depois de uma referência do tubo ou canal onde passa um fluido.

Montante – É um ponto de tomada de medição localizado antes de uma referência do tubo ou canal.

Perda de carga – É a queda de pressão sofrida pelo fluido ao atravessar uma tubulação.

Pressão diferencial – É o resultado da diferença de duas pressões medidas. Em outras palavras, é a pressão medida em qualquer ponto, menos no ponto zero de referência da pressão atmosférica.

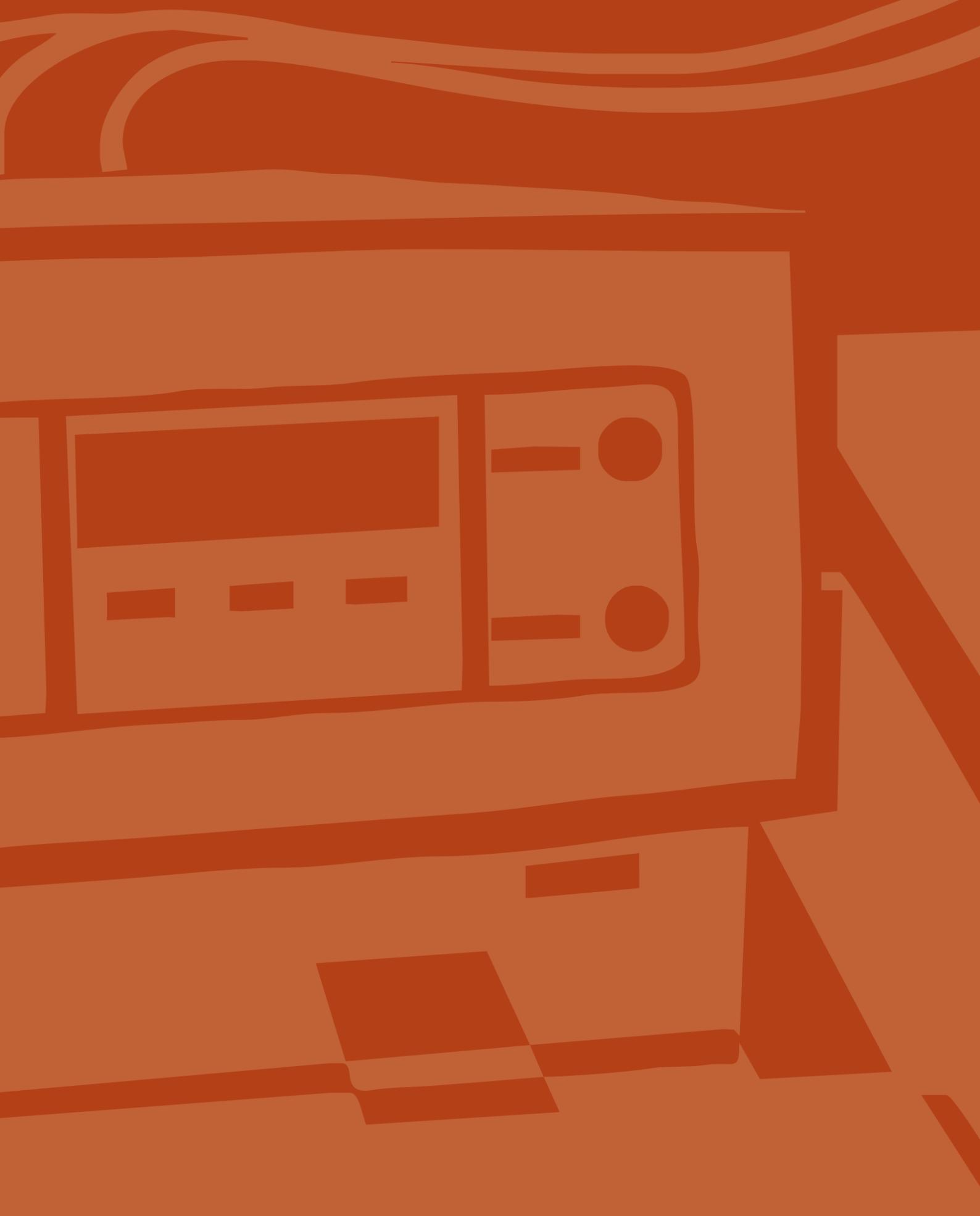
Vazão volumétrica – é igual à quantidade de volume que escoa através e uma seção em um intervalo de tempo considerado.

Vazão mássica – é igual à quantidade de massa de um fluido que atravessa a seção de uma tubulação por unidade de tempo.

Vazão gravitacional – é igual à quantidade de peso que passa por uma certa seção por unidade de tempo.

*Vena contracta* – é o ponto da tubulação onde se tem a pressão mais baixa devido a um estrangulamento do fluxo.





## Capítulo 6

---

# TEMPERATURA

### Iniciando nossa conversa

A temperatura é uma das variáveis mais importantes na indústria de processamento. Praticamente todas as características físico-químicas de qualquer substância alteram-se de uma forma bem definida com a temperatura.

Exemplificando: dimensões (comprimento, volume), estado físico (sólido, líquido, gás), densidade, viscosidade, radiação térmica, reatividade química, condutividade, pH, resistência mecânica, maleabilidade, ductibilidade.

Assim, qualquer que seja o tipo de processo, a temperatura afeta diretamente o seu comportamento provocando por exemplo: aceleração ou desaceleração do ritmo de produção, mudança de qualidade do produto, aumento ou diminuição na segurança do equipamento e/ou pessoal, maior ou menor consumo de energia.

### Objetivos

O estudo deste capítulo tem por objetivo:

- identificar alguns tipos de instrumentos para medição de temperatura;
- identificar alguns conceitos básicos usados para medição de temperatura;
- identificar quais são as unidades de medida de temperatura e as suas relações;
- conhecer quais são as faixas de trabalho dos principais medidores de temperatura.

## Um desafio para você

Na empresa onde você trabalha é necessário especificar um medidor de temperatura para ser colocado numa das zonas do forno. Quais os tipos de medidores de temperatura que usaria para este trabalho e quais as vantagens da utilização de cada um deles?

## Continuando a nossa conversa

A temperatura é, sem dúvida, a variável mais importante nos processos industriais, e sua medição e controle, embora difíceis, são vitais para a qualidade do produto e a segurança não só das máquinas, como também do homem. Não é difícil de chegar a essa conclusão, basta verificar todas as características físico-químicas de qualquer substância alteram-se de forma bem definida com a temperatura.

Assim sendo, uma determinada substância pode ter suas dimensões, seu estado físico (sólido, líquido ou gasoso), sua densidade, sua condutividade, alterados pela mudança de seu estado térmico.

Então, qualquer que seja o tipo de processo, a temperatura afeta diretamente o seu comportamento provocando, por exemplo:

- ritmo maior ou menor de produção;
- mudanças na qualidade do produto;
- aumento ou diminuição na segurança do equipamento e/ou do pessoal;
- maior ou menor consumo de energia;
- maior ou menor custo de produção.



**Fique ligado!**

Observe que a temperatura pode afetar o consumo de energia e consequentemente o custo de produção, ou seja, está diretamente ligada à eficiência energética.

## Conceito de temperatura

Todos os corpos são constituídos de moléculas que se encontram em constante agitação, quanto mais agitadas estiverem as moléculas mais quente estará o corpo e, consequentemente, quanto menos agitadas mais frio. Temperatura é o grau de agitação destas moléculas. A representação quantitativa da temperatura é feita por escala numérica, onde, quanto maior o valor mostrado, maior a energia cinética média das moléculas do corpo em questão.

Existem três divisões clássicas de medição de temperatura:

- Pirometria: termo usado para medição de altas temperaturas na faixa onde efeitos de radiação térmica passam a se manifestar.
- Criogenia: termo usado para a medição de baixas temperaturas; próximas ao zero absoluto.
- Termometria: termo abrangente usado para medição das mais diversas temperaturas.

As escalas mais comuns de temperatura são Celsius( $^{\circ}\text{C}$ ), Fahrenheit( $^{\circ}\text{F}$ ), Kelvin (K), Reamur(R) e Rankine( $^{\circ}\text{Ra}$ ).

As relações básicas entre as escalas são:

$$\frac{{}^{\circ}\text{C}}{5} = \frac{{}^{\circ}\text{F} - 32}{9} = \frac{K - 273,15}{5} = \frac{R - 491,7}{9} = \frac{{}^{\circ}\text{Ra}}{4}$$

A temperatura não pode ser determinada diretamente, mas deve ser deduzida a partir de seus efeitos elétricos ou físicos produzidos sobre uma substância, cujas características são conhecidas. Os medidores de temperatura são construídos baseados nesses efeitos. Podemos dividir os medidores de temperatura em dois grandes grupos, conforme o Quadro 11.

**Quadro 11– Comparação entre medidores de temperatura diretos e indiretos**

Aspectos	Medidor de temperatura	
	Direto	Indireto
<b>Condições necessárias para medir com precisão</b>	- Estar em contato com o objetivo a ser medido. - Praticamente não mudar a temperatura do objeto devido ao contato do detector.	A radiação do objeto medido tem que chegar até o detector.
<b>Características</b>	- É difícil medir a temperatura de um objeto pequeno, porque este tem tendência de mudança de temperatura quando em contato com um objeto cuja temperatura é diferente. - É difícil medir o objeto que está em movimento.	- Não muda a temperatura do objeto porque o detector não está em contato direto com o mesmo. - Pode medir o objeto que está em movimento. Geralmente mede a temperatura da superfície. - Depende da emissividade.
<b>Faixas de temperatura</b>	É indicado para medir temperaturas menores que 1600°C.	É adequado para medir temperaturas elevadas (>-50°C).
<b>Precisão</b>	Geralmente, $\pm 1\%$ da faixa.	Geralmente 3 a 10°C
<b>Tempos de resposta</b>	Geralmente grande (>5min)	Geralmente pequeno (0,3 ~3s)

## Tipos de medidores de temperatura

A temperatura não pode ser determinada diretamente, mas deve ser deduzida a partir de seus efeitos elétricos ou físicos produzidos sobre as substâncias, cujas características são conhecidas. Os medidores de temperatura são construídos baseados nestes efeitos.

Podemos dividir os medidores de temperatura em dois grandes grupos, conforme se segue.

### Grupo 1 – Contato direto

- Medidores que usam o princípio da expansão volumétrica de líquidos:
  - termômetros de vidro;
  - tubo de *Bourdon*

- Medidores que usam o princípio da pressão de gás a volume constante:
  - termômetro de gás pressurizado;
  - vapor em capilar metálico fechado.
- Medidores que usam o princípio da dilatação de sólidos (par bimetálico):
  - termômetros bimetálicos
- Medição de temperatura por termorresistência.

#### Grupo 2 – Contato indireto

- pirômetro óptico;
- pirômetro fotoelétrico;
- pirômetro de radiação.

### Principais medidores de temperatura

Os medidores de temperatura podem ser classificados em vários tipos e na sequência serão mostrados os principais com uma descrição sucinta do seu funcionamento.

#### Termômetro de dilatação de líquido

O princípio de funcionamento dos termômetros de dilatação de líquido baseia-se na lei de expansão volumétrica de um líquido com a temperatura dentro de um recipiente fechado.

#### Termômetro de vidro

Este termômetro consta de um bulbo de vidro ligado a um tubo capilar, também de vidro, de seção uniforme e fechado na parte superior. O bulbo e parte do capilar são preenchidos por um líquido, sendo que na parte superior do capilar existe uma câmara de expansão para proteger o termômetro no caso de a temperatura exceder o seu limite máximo. Sua escala é linear e normalmente fixada no tubo capilar no invólucro metálico. Nos termômetros industriais, o bulbo de vidro é protegido por um poço metálico e o tubo capilar pelo invólucro metálico.

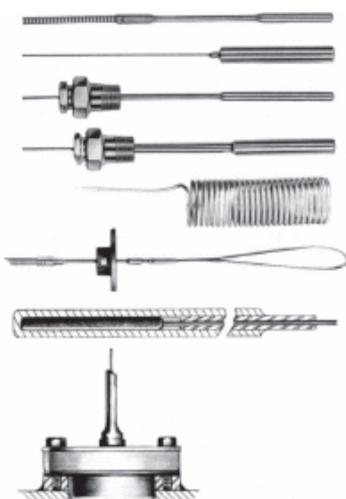
**Figura 50 – Exemplos de termômetros de vidro comerciais (BORTONI, p. 62)**



#### **Termômetro de líquido com capilar metálico**

Este termômetro consta de um bulbo de metal ligado a um capilar metálico e um elemento sensor. Neste caso, o líquido preenche todo o instrumento e com uma variação da temperatura se dilata deformando elasticamente o elemento sensor. A este elemento sensor é acoplado um ponteiro que pode girar livremente sobre uma escala graduada. Como a relação entre a deformação do elemento sensor e a temperatura é proporcional, este instrumento nos fornece uma leitura linear.

**Figura 51 – Tipos de capilares (SENAI. ES,1999b, p.81)**

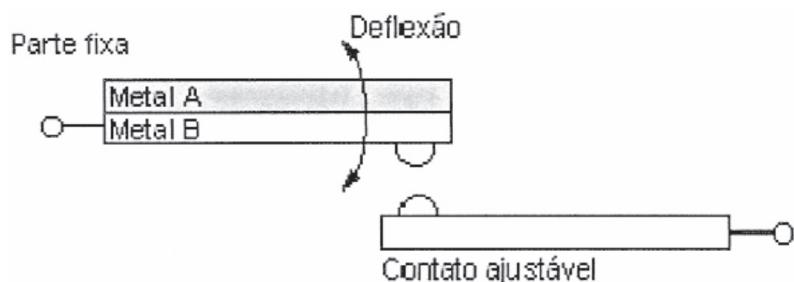


## Termômetro à dilatação de sólido (bimetálico)

O princípio de funcionamento do termômetro bimetálico baseia-se no fenômeno da dilatação linear dos metais com a temperatura.

A sua construção é baseada no fato de que dois metais diferentes modificam as suas dimensões de modo desigual ao variar a temperatura. O termômetro bimetalico consiste em duas lâminas de metal justapostas, formando uma só peça e geralmente na forma helicoidal.

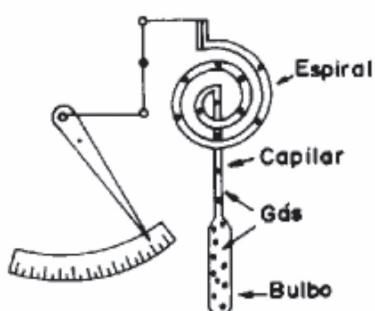
**Figura 52 – Esquema de funcionamento de um termômetro bimetálico (BORTONI, p.62)**



## Termômetro à pressão de gás

O princípio de funcionamento dos termômetros à pressão de gás baseiam-se na lei de *Charles* e *Gay-Lussac* que diz: *A pressão de um gás é proporcional à temperatura, se permanecer constante o volume do gás.*

**Figura 53 – Termômetro a pressão de gás (SENAI. ES,1999b, p.86)**



## Termômetro à pressão de vapor

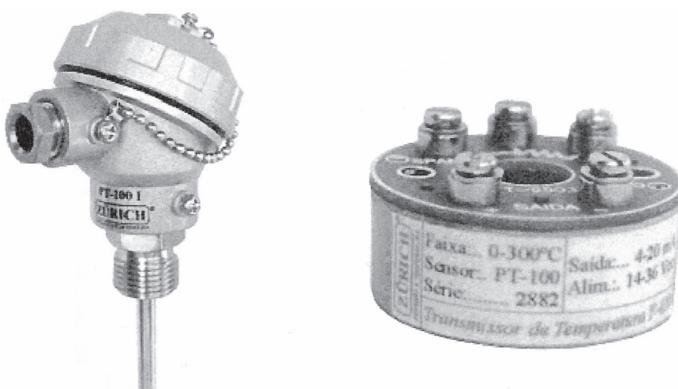
O princípio de funcionamento dos termômetros à pressão de vapor baseia-se na lei de *Dalton* que diz:

*A pressão de um vapor saturado depende única e exclusivamente de sua temperatura e não da sua mudança de volume.*

## Termorresistência

Um dos métodos elementares para medição de temperatura envolve mudança no valor da resistência elétrica de certos metais com a temperatura. São comumente chamados de bulbo de resistência e por suas condições de alta estabilidade e repetibilidade, baixa contaminação, menor influência de ruídos e altíssima precisão, são muito usados nos processos industriais. Essas características aliadas ao pequeno desvio em relação ao tempo o tornou padrão internacional (ITS-90) para a medição de temperatura na faixa de  $-259,3467^{\circ}\text{C}$  a  $961,78^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 54 – Aparência de dois tipos de termorresistências comerciais (BORTONI, p.64)**



O princípio de funcionamento das termorresistências ou bulbos de resistência ou termômetro de resistência ou RTD são sensores que se baseiam na variação da resistência ôhmica em função da temperatura. Elas aumentam a resistência com o aumento da temperatura.

O elemento sensor consiste de uma resistência em forma de fio de platina de alta pureza, de níquel ou de cobre (menos usado), encapsulado num bulbo de cerâ-

mica ou de vidro. Entre estes materiais, o mais utilizado é a platina, pois, apresenta uma ampla escala de temperatura, uma alta resistividade permitindo assim uma maior sensibilidade, um alto coeficiente de variação de resistência com a temperatura, uma boa linearidade resistência x temperatura e também por ter rigidez e ductibilidade para ser transformada em fios finos, além de ser obtida em forma puríssima. Padronizou-se, então, a termorresistência de platina.

### **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 à temperatura, pois acima de 300°C o níquel perde suas características de funcionamento como termorresistência e o cobre sofre problemas de oxidação em temperaturas acima de 310°C.

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

### **Bulbo de resistência tipo PT-100Ω**

A termorresistência de platina é a mais usada industrialmente devido a sua grande estabilidade e precisão. Esta termorresistência tem sua curva padronizada conforme norma DIN-IEC 751-1985 e possui como característica uma resistência de 100Ω a 0°C. Convencionou-se chamá-la de PT-100, (fios de platina com 100Ω a 0°C). Sua faixa de trabalho vai de -200 a 650°C, porém a ITS-90 padronizou seu uso até 962°C aproximadamente. Os limites de erros e outras características das termorresistências são referentes às normas DIN-IEC 751/1985.

A seguir encontra-se uma tabela relacionando a variação de resistência com a temperatura conforme norma DIN seguidos pelos principais fabricantes no Brasil.

**Tabela 4 – Valores de resistência em função da temperatura para PT-100 (INSTRUMENTAÇÃO II, 1999, p.97)**

°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω
-220	10,41	0	100,00	140	153,58	280	204,88	440	260,75
200	18,53	10	103,90	150	157,31	290	208,45	480	267,52
180	27,05	20	107,79	160	161,04	300	212,02	480	274,25
160	35,46	30	111,87	170	164,76	310	215,57	500	280,93
140	43,48	40	115,54	180	168,46	320	219,12	520	287,57
120	52,04	50	119,40	190	172,16	330	222,66	540	294,16
100	60,20	60	123,24	200	175,84	340	226,18	560	300,70
80	68,28	70	127,07	210	179,51	350	229,69	580	307,20
60	76,28	80	130,89	220	183,17	360	233,19	600	313,65
50	88,75	90	134,70	230	186,82	370	236,67	620	320,05
40	84,21	100	138,50	240	190,45	380	240,15	640	326,41
30	88,17	110	142,29	250	194,07	396	243,61	660	332,72
20	92,13	120	146,06	260	197,69	400	247,08	680	338,99
10	96,07	130	149,82	270	201,29	420	253,93	700	345,21

Observe no quadro a seguir, as vantagens e desvantagens na escolha da termorresistência.

#### Quadro 12– Vantagens e desvantagens sobre o uso de termorresistências

Características para a escolha das termorresistência	
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>Possui maior precisão dentro da faixa de utilização do que outros tipos de sensores.</li> <li>Tem boas características de estabilidade e repetibilidade.</li> <li>Com ligação adequada, não existe limitação para distância de operação.</li> <li>Dispensa o uso de fios e cabos especiais, sendo necessários somente fios de cobre comuns.</li> <li>Se adequadamente protegido (poços e tubos de proteção), permite a utilização em qualquer ambiente.</li> <li>Curva de resistência x temperatura mais linear.</li> <li>Menos influência por ruídos elétricos.</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>É mais caro do que os outros sensores utilizados nesta mesma faixa.</li> <li>Baixo alcance de medição (máx. 630°C).</li> <li>Deteriora-se com mais facilidade, caso ultrapasse a temperatura máxima de utilização.</li> <li>É necessário que todo o corpo do bulbo esteja com a temperatura estabilizada para a correta indicação.</li> <li>Possui um tempo de resposta elevado.</li> <li>Mais frágil mecanicamente.</li> <li>Autoaquecimento, exigindo instrumentação sofisticada.</li> </ul>

## Calibração de termorresistência

Apesar de ser um sensor de extrema precisão e altíssima repetibilidade, a calibração também é necessária para a verificação dos limites de erros do sensor. O tempo de uso, alterações na estrutura cristalina da platina ou mudanças químicas no fio podem tirar o sensor de sua curva característica. Para se realizar uma calibração de termorresistência, usa-se o Método dos Pontos Fixos ou Método de Comparação.

Os pontos fixos mais utilizados segundo a ITS-90 são:

- ponto triplo do argônio ..... -189,3442°C
- ponto triplo da água ..... +0,010°C
- ponto de solidificação do estanho ..... +231,928°C
- ponto de solidificação do zinco ..... +419,527°C

Para realizar o método da comparação é necessária a utilização de um termômetro de resistência padrão com certificado de calibração. Normalmente este padrão é um sensor Pt-25,5Ω a 0°C. A comparação é efetuada em banhos de líquido agitado num range de aproximadamente -100 a 300°C com uma excelente estabilidade e homogeneidade. A leitura dos sinais é feita em uma ponte resistiva de precisão.

## Termopar

A medição de temperatura também pode ser feita pela obtenção de uma força electromotriz gerada quando dois metais de natureza diferente têm suas extremidades unidas e submetidas a temperaturas distintas. Isto ocorre devido aos metais distintos possuírem densidades de elétrons livres específicos e quando unidos em suas extremidades provocam a migração desses elétrons do lado de maior densidade para o de menor densidade ocasionando uma diferença de potencial entre os dois fios metálicos. Esta diferença de potencial não depende nem da área de contato e nem de sua forma, mas sim da diferença de temperatura entre as extremidades denominadas junção quente e fria. Esses sensores são chamados de termopares, e serão objeto de estudo neste item.

## Construção de termopares

Como se pode ver na Figura 55, o tipo mais simples de termopar consiste em unir dois fios de diferentes naturezas por uma de suas extremidades.

Este termopar denomina-se termopar Nu.

**Figura 55 – Termopar Nu (SENAI. ES,1999b, p.109)**



Para se construir a junção de medição do termopar, deve-se tomar as seguintes precauções: remover o óxido existente na superfície do fio, colocar o par termelétrico em contato por aderência e logo após, pelo método apropriado, executar a operação de soldagem. O termopar tipo Nu, normalmente, não é utilizado nessas condições, então se usa um termopar com tubo isolante, geralmente de cerâmica, com dois ou quatro furos onde se introduz os pares termoelétricos. Como os termopares com isolantes térmicos têm facilidade para danificar-se, devido a sua fragilidade e não total proteção contra a atmosfera, costuma-se utilizá-los em raras condições. Para amenizar o problema, o termopar com isolante térmico é introduzido dentro de um poço protetor e neste estado é utilizado em larga escala.

### Tipos e características dos termopares comerciais

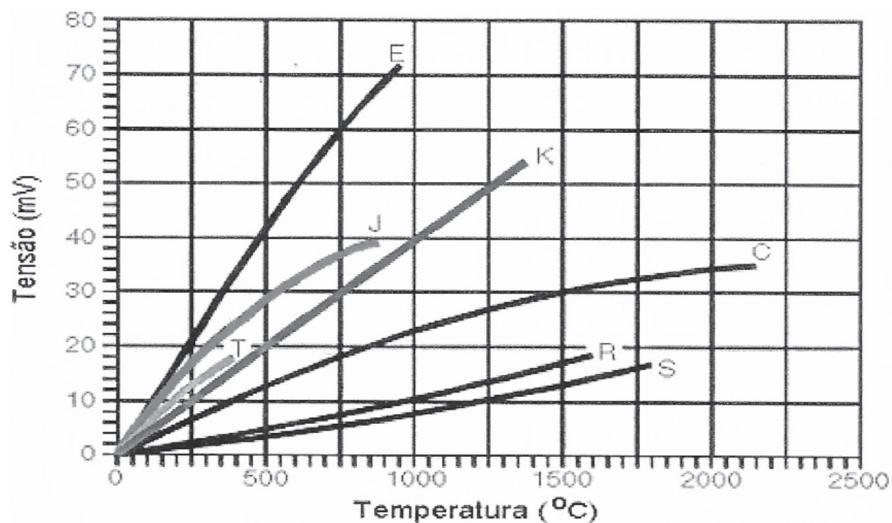
Existem várias combinações de dois metais condutores operando como termopares. As combinações de fios devem possuir uma relação razoavelmente linear entre temperatura e força eletromotriz (f.e.m.) devem desenvolver uma f.e.m. por grau de mudança de temperatura, que seja detectável pelos equipamentos 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 à 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.

Para uma melhor adaptação de termopares aos processos industriais e para atender aos objetivos de diversos tipos de medição, costuma-se utilizar de associação de termopares, em série ou em paralelo, cada qual com suas finalidades específicas.

**Quadro 13 – Tipos e termopares e faixa de temperatura usual – vantagens e restrições (INSTRUMENTAÇÃO II, 1999, p.120)**

<b>Tipo</b>	<b>Elemento positivo</b>	<b>Elemento negativo</b>	<b>Faixa de temp. usual</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Restrições</b>
T	Cobre	Constantan	184 a 370°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resiste a atmosfera corrosiva</li> <li>Aplicável em atmosfera redutora ou oxidante abaixo de 310°C.</li> <li>Sua estabilidade o torna útil em temperaturas abaixo de 0°C.</li> </ul>	Oxidação do cobre acima de 310°C.
J	Ferro	Constantan	0 a 760°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baixo Custo.</li> <li>Indicado para serviços contínuos até 760°C em atmosfera neutra ou redutora.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Límite máximo de utilização em atmosfera oxidante de 760°C devido à rápida oxidação do ferro.</li> <li>Utilizar tubo de proteção acima de 480°C</li> </ul>
E	Chromel	Constantan	0 a 870°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta potência termoelétrica.</li> <li>Os elementos são altamente resistentes à corrosão, permitindo o uso em atmosfera oxidante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baixa estabilidade em atmosfera redutora.</li> </ul>
K	Chromel	Alumel	0 a 1260°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Indicado para atmosfera oxidante.</li> <li>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.</li> </ul>	Vulnerável em atmosferas redutoras, sulfurosas e gases como SO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> S, requerendo substancial proteção quando utilizado nestas condições.
S	Platina 10% Rhodio	Platina	0 a 1480°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Indicado para atmosfera oxidante.</li> <li>Apresenta boa precisão a altas temperaturas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vulnerável à contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes.</li> <li>Para altas temperaturas, utilizar isolantes e tubos de proteção de alta alumina.</li> </ul>
R	Platina 13% Rhodio	Platina			
B	Platina 30% Rhodio	Platina 6% Rhodio	870 a 1705°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Melhor estabilidade do que os tipos S ou R.</li> <li>Melhor resistência mecânica.</li> <li>É mais adequado para altas temperaturas do que os tipos S ou R.</li> <li>Não necessita de compensação de junta de referência, se a temperatura de seus terminais não exceder 50°C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vulnerável a contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes.</li> <li>Utilizar isoladores e tubos de proteção de alta alumina.</li> </ul>

**Figura 56 – Comparativo dos *ranges* dos diferentes tipos de termopares (BORTONI, p.66)**



### Interligação de termopares

A interligação dos termopares com os instrumentos de recepção (indicador, controlador etc.) deve obedecer a critérios específicos já que na sua junção não pode ocorrer o aparecimento de novos termopares. Para isto, ou se usa cabos/fios do mesmo material ou, por questões de custo, se utiliza cabos que substituem os de mesmo material sem que haja interferência na medição.

### Cabos de extensão

São aqueles fabricados com o mesmo material do termopar devido ao seu baixo custo. Desse modo, para os termopares tipo T, J, K e E são utilizados cabos do mesmo material para sua interligação com o instrumento receptor.

### Cabos de compensação

Para os cabos dos termopares nobres (R, S e B) não seria viável economicamente a utilização de cabos de extensão. Assim, para tornar possível a utilização desses sensores, desenvolveram-se cabos de natureza diferente, porém com a característica de produzirem a mesma curva de força eletromotriz desses termopares ou, ainda, mesmo que não idênticas mas que se anulem.

## Calibração de termopar

Assim como qualquer outro sensor, medidor, transmissor, etc., o termopar está sujeito a ter suas características alteradas com o uso ao longo de um tempo, principalmente sob condições severas de temperatura e a atmosfera agressiva. Assim, para garantir a precisão da malha em que o mesmo está instalado, periodicamente o mesmo deve ser calibrado. Porém, ao contrário dos outros instrumentos e sensores, o conceito de calibração neste caso é bem diferente, pois, não se executa ajustes no mesmo e sim se executa o levantamento de sua curva de milivolt (mV) gerado com a temperatura. Deve-se verificar se a mesma está de acordo com as especificadas pela norma utilizada na fabricação dele. Se todos os valores levantados estiverem dentro das tolerâncias aceitas pela sua classe de precisão, ele poderá ser usado. Caso contrário, é recomendado que seja substituído.

Para efetuar a calibração de um termopar, existem dois métodos principais que podem ser utilizados. São eles:

### Calibração absoluta ou por ponto fixo

Esse método baseia-se no levantamento do sinal gerado por um termopar em vários pontos fixos de temperatura como pontos de solidificação, ebulação e pontos triplos de substâncias puras, padronizadas atualmente pela ITS-90 (desde 01/01/1990).

Para a realização da calibração, coloca-se o sensor a ser rastreado submetido a temperatura referente a esses pontos fixos e faz-se a leitura do sinal gerado com um instrumento padrão. O sinal lido é comparado com o valor conhecido do ponto fixo, verificando-se qual o desvio do sensor em relação ao ponto fixo. Esse procedimento é repetido em vários outros pontos fixos conhecidos de modo a cobrir toda a faixa de trabalho do sensor. Esse método é baseado na comparação dos valores obtidos pelo termopar a ser calibrado e um termopar padrão (tipo R ou S), ambos nas mesmas condições de medição. Por ser mais simples e não exigir laboratório muito sofisticado, este método é o mais utilizado na indústria.

## Calibração pelo método de comparação

Esse método é baseado na comparação dos valores obtidos pelo termopar a ser calibrado e um termopar padrão (tipo R ou S), ambos nas mesmas condições de medição. Por ser mais simples e não exigir laboratório tão sofisticado, este método é o mais utilizado na indústria. O método requer o uso de um termopar padrão e suas curvas de calibração, um sistema de medição de alta precisão, além de um forno especial para calibração. Este forno deve ter a temperatura precisamente controlada.

O termopar padrão e os termopares a serem calibrados são imersos no forno. Quando o forno atinge o equilíbrio e estabilidade térmica numa dada temperatura, esta pode ser determinada pelo termopar padrão acoplado ao sistema de medição, estabelecendo-se a correlação com cada termopar a ser calibrado. Assim, como no método anterior, se o sensor em calibração se encontrar fora de sua especificação, é feito relatório recomendando sua substituição.

## Pirômetros

Como foi visto no início do capítulo, os pirômetros são instrumentos que medem temperatura alta, e podem possuir várias formas de medição. Todas oferecem medição indireta, ou seja, sem o contato com o objeto a ser medido.

### Pirômetro de radiação

Com os semicondutores de fótons, foi possível a construção dos pirômetros de radiação, que são sensíveis ao comprimento de onda do espectro de radiação infravermelho.

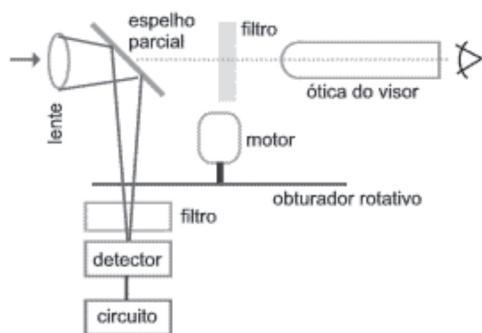
Uma das vantagens na utilização deste sensor é a medição de temperaturas com alta velocidade de resposta (10ms), podendo ser utilizados em aplicações que tenham elementos em movimento.

A desvantagem deste pirômetro é que qualquer corpo com temperatura acima de zero absoluto emite radiação. Se os valores a medir são baixos, a emissão do próprio sensor e de partes próximas são significativas e mascaram o resultado.

Uma solução que pode ser e é usada é o resfriamento do sensor com líquidos criogênicos como nitrogênio líquido. Mas não é prático para equipamentos móveis ou portáteis.

Na Figura 57, o obturador rotativo é um disco com aberturas, de forma que a radiação recebida pelo sensor é pulsante. A radiação emitida pelo sensor e de partes próximas é contínua. No circuito eletrônico a parte pulsante é facilmente separada da contínua com o uso de filtros, eliminando, portanto, o efeito da radiação residual.

**Figura 57 – Esquema de funcionamento de um pirômetro de radiação (MSPC, 2007)**



A Figura 58 apresenta alguns modelos comerciais de medidores infravermelhos. Em alguns casos, uma mira laser pontual ou de superfície é usada para assegurar que se está mediendo a temperatura da superfície de interesse.

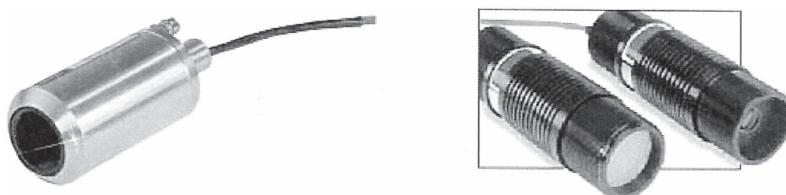
**Figura 58 – Exemplos de pirômetros de radiação portáteis (BORTONI, p.71)**



Existem também sensores especiais para montagem visando à supervisão de processos, incluindo o termopar infravermelho que nada mais é que um sensor de temperatura infravermelho que provê um sinal de saída com sensibilidade idêntica à de um termopar.

Neste caso, deve-se especificar o tipo de termopar desejado, se tipo J, K, T ou E. O sensor infravermelho poderá, então, substituir um termopar convencional aproveitando-se de toda a instalação existente.

**Figura 59 – Exemplos de pirômetros de radiação comerciais (BORTONI, p. 71)**



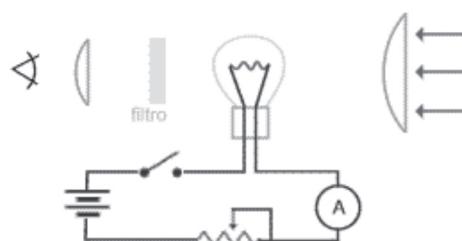
### Pirômetro óptico

Enquanto os pirômetros de radiação trabalham na faixa de luz infravermelha, os pirômetros ópticos são dispositivos que trabalham em uma faixa estrela do espectro de radiação visível. O comprimento de onda é de cerca de 0,65 microns.

O instrumento se parece com uma luneta em que o operador foca o objeto, pode-se ver também o filamento, ficando, portanto, as duas imagens superpostas uma à outra.

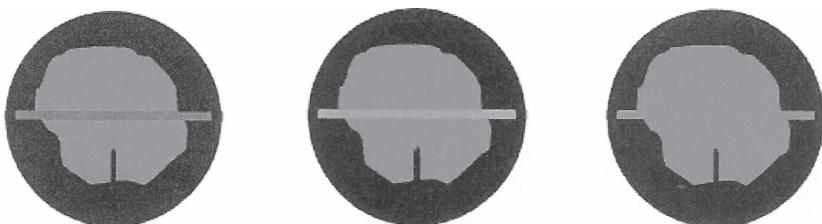
A operação é simples: a corrente que passa pelo filamento da lâmpada é regulada até que sua cor fique igual à da radiação (veja Figura 60). E o amperímetro pode ter sua escala gravada em unidades de temperatura para uma indicação direta.

**Figura 60 – Esquema de funcionamento de um pirômetro óptico (MSPC, 2007)**



A comparação pode ser feita por dois métodos. Ou varia-se a corrente através do filamento até que o seu brilho se confunda com o objeto; ou mantém-se a corrente constante e varia-se a posição do filtro. Em geral o primeiro método é mais usado. A Figura 61 ilustra o exposto.

**Figura 61 – Imagens comparativas de indicação dos pirômetros ópticos (BORTONI, p.72)**



### Fique ligado!

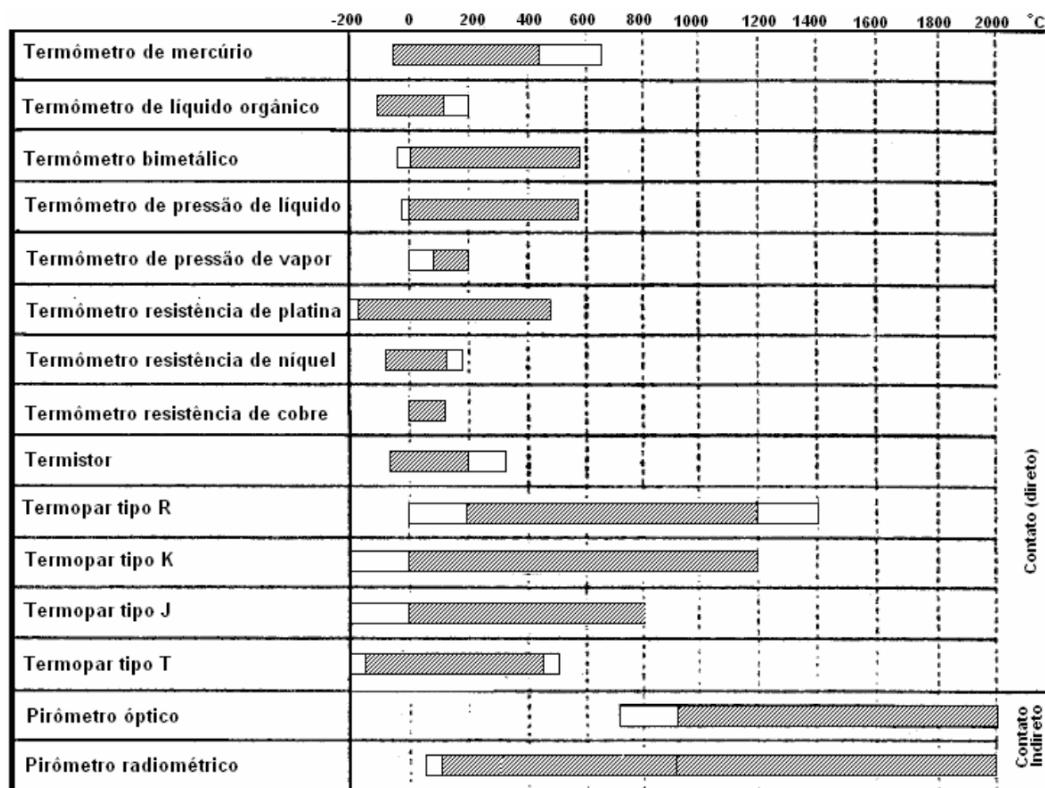
A faixa de medição é limitada no extremo inferior de cerca 750°C. Abaixo desta temperatura não há emissão de luz suficiente para uma medição precisa. A 1300°C a imagem seria brilhante demais para a observação direta. A inserção do filtro de faixa permite medir temperatura da ordem de 3500°C.

## Escolha do medidor de temperatura

Para a escolha do medidor de temperatura devem ser levadas em conta muitas características do processo onde ele será utilizado, assim como as características do instrumento. As faixas de medição são uma das primeiras características a serem observadas, já que afeta a eficientização energética quando for mal dimensionada.

Está apresentada a seguir um quadro comparativo entre as faixas de medição (*range*) dos principais medidores de temperatura existentes. Para completar a especificação, verifique neste capítulo quais as outras características que serão necessárias para uma escolha mais acertada do instrumento.

**Quadro 14 – Comparação das características dos medidores de temperatura**



### Voltando ao desafio

Para resolução do desafio proposto no início do capítulo, os medidores de temperatura que devem ser utilizados para medir a temperatura nas zonas do forno são:

- o termostato que é um instrumento capaz de trabalhar com um valor limite de temperatura regulado com ajuste único, ou seja, ele é um sensor digital, apresentando em sua saída um sinal discreto. A vantagem do seu uso é o custo baixo deste equipamento;
- a termorresistência que possui maior precisão, dentro da sua faixa de utilização, além disso, ela possui uma boa estabilidade e repetibilidade, apresentando uma curva mais linear. A sua faixa de utilização para um PT-100, por exemplo, é de -200 a 650°C;
- o termopar, que é hoje o medidor mais utilizado dentre os citados. Na maioria das aplicações em que se usa o termopar, é utilizado o tipo K, devido a sua larga faixa de medição de 0 a 1200°C.

## Resumindo

Ao longo deste capítulo você pode:

- Conhecer alguns instrumentos para medição de temperatura.
- Adquirir conceitos básicos usados para medição de temperatura.
- Conhecer quais são as unidades de medida de temperatura e as suas relações.
- Verificar na tabela apresentada quais são as faixas de trabalho dos medidores de temperatura.

## Aprenda mais

- Pesquisas em outras fontes podem conter informações importantes. Consulte o site [www.mspc.eng.br](http://www.mspc.eng.br) que trata os instrumentos de temperatura com bastante simplicidade e ainda traz mais detalhes sobre os conceitos apresentados neste capítulo.
- Na revista *Controle e Instrumentação*, número 106, você encontrará algumas informações sobre medição de temperatura.

Além dessas consultas, procure se informar em sua empresa quais são os medidores utilizados no processo e verifique se eles trabalham dentro das faixas de trabalho especificadas pelo fabricante.

A seguir, para ajudá-lo em sua leitura, apresentamos um pequeno conjunto de termos.

## Glossário

Calibração *calibration* ou *étalonnage* – Operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações de um instrumento de medição correspondentes com as suas incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação do instrumento de medição.

Criogenia – termo usado para a medição de baixas temperaturas; próximas ao zero absoluto.

Ductibilidade – é a propriedade física dos materiais de suportar a deformação plástica, sob a ação de cargas, sem se romper ou fraturar.

Pirometria – termo usado para medição de altas temperaturas na faixa onde efeitos de radiação térmica passam a se manifestar.

*Range* – Faixa de indicação ou alcance de um instrumento.

Termometria – termo abrangente usado para medição das mais diversas temperaturas.





# Capítulo 7

---

## NÍVEL

### Iniciando nossa conversa

O nível é uma variável importante na indústria não somente para a operação do processo, mas também para cálculos de custos e inventários. E os sistemas de medição variam em complexidade, de simples visores para leitura local ou remota, até registro e controles automáticos.

Para facilitar a compreensão, a definição mais simplória, para treinamentos básicos, de nível seria a altura do conteúdo de um reservatório contendo um líquido ou um sólido. E existem dois métodos para medição: um direto e outro indireto, sendo que o primeiro se utiliza da superfície do produto como sua referência, como uma bóia, um cabo com uma régua, ou uma trena milimetrada.

A medição indireta se utiliza de outras variáveis para se obter nível – como, por exemplo, num tanque de diesel, usar a pressão hidrostática na base, que é proporcional à altura e, com a fórmula de volume, chega-se ao nível. A coluna vai ter um peso – que depende do produto — mas é preciso ter cuidados porque, com o aumento de temperatura, o peso de um produto pode modificar.

Neste capítulo, além destes assuntos, teremos como tópicos: nível, conceito de nível, classificação e tipos de medidores de nível e escolha do medidor de nível.

Além desses assuntos, há um pequeno glossário no final do capítulo.

## Objetivos

O estudo deste capítulo visa:

- identificar alguns tipos de instrumentos para medição de nível;
- estabelecer uma relação entre os tipos de medidores, para adequação ao processo;
- diferenciar as vantagens e desvantagens do uso de se determinar o nível por processos indiretos e diretos.

## Um desafio para você

Você foi chamado para instalar um medidor de nível em um silo de cimento. Neste silo existem partículas em suspensão, quando está sendo feito o abastecimento. Sua tarefa é definir qual seria o medidor de nível mais adequado e com mais exatidão. Justifique a sua escolha.

## Continuando nossa conversa

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

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

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

## Conceito de nível

Costuma-se definir nível, como a altura do conteúdo de um reservatório, que poderá ser um líquido ou um sólido.

## Classificação e tipo de medidores de nível

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

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

- método de medição direta – é a medição que se faz tendo como referência a posição do plano superior da substância medida.
- método da medição indireta – é o tipo de medição que se faz para determinar o nível em função de uma segunda variável.

São apresentados a seguir os principais tipos de medidores de nível classificados por tipo de medição direta ou indireta.

Medição direta:

- Réguas ou gabaritos;
- Visores de nível;
- Bóia ou flutuador.

Medição indireta:

- *Displacer* (empuxo);
- Pressão diferencial;
- Borbulhador;
- Capacitância eletrostática;
- Ultra-sônico;
- Por pesagem;
- Por raios gama.



## Fique ligado!

Vantagens e desvantagens dos dois métodos de medição.

- Determinação do nível: a preferência será dada às medições diretas, pois o peso específico do líquido a medir varia com o tempo. Nos demais casos, usa-se o outro método, de acordo com a medição a efetuar.
- Determinação do volume: dá-se preferência às medidas diretas.

## Tipos de medidores de nível

Os tipos de medidores de nível são muito variados e seguem uma classificação quanto à medição direta ou indireta. Veja a seguir os principais tipos.

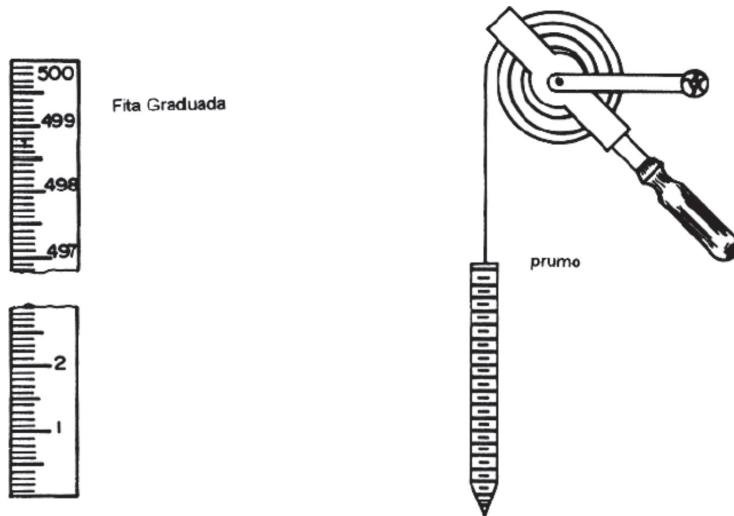
### Medidores de nível por medição direta

Veja a seguir alguns tipos de medidores de nível que usam o princípio da leitura direta.

#### Medidor de nível tipo régua ou gabarito

Consiste em uma régua graduada que tem o comprimento conveniente para ser introduzido dentro do reservatório onde vai ser medido o nível (veja a Figura 62).

**Figura 62 – Medidor de nível tipo régua graduada (SENAI. ES,1999a, p.83)**



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

### Visores de nível

Aplica-se nestes instrumentos o princípio dos vasos comunicantes. Um tubo transparente é colocado a partir da base do reservatório até o seu ponto mais alto, permitindo a leitura precisa do nível do líquido, mesmo para altas pressões. Os visores de nível se destinam exclusivamente à monitoração do nível de líquido ou da interface entre dois líquidos imiscíveis, em vasos, colunas, reatores, tanques, etc. submetidos ou não à pressão.



### Fique ligado!

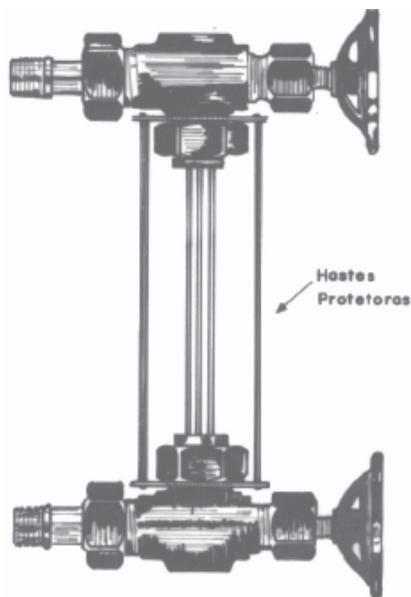
Os visores são aplicados quase na totalidade dos casos de monitoração local do nível, devido ao seu baixo custo em comparação com outros tipos de instrumentos, a não ser em casos em que a pressão e temperatura sejam excessivas e impeçam a sua utilização. Devido às suas características construtivas, os visores de nível são de fácil manutenção e construídos de maneira a oferecer segurança na operação.

Para atender as mais variadas aplicações em diversos processos, existem atualmente os visores do tipo tubular, de vidro plano, magnéticos e os especiais para uso em caldeiras.

### Visores de vidro tubulares

Estes visores são normalmente fabricados com tubos de vidro retos com paredes de espessuras adequadas a cada aplicação. Estes tubos são fixados entre duas válvulas de bloqueio de desenho especial por meio de união e juntas de vedação apropriadas a cada especificação de projetos (ver Figura 63).

Figura 63 – Medidor do tipo visor de nível (SENAI. ES, 1999a, p.84)



O comprimento e o diâmetro do tubo irão depender das condições a que estará submetido o visor, porém convém observar que os mesmos não suportam altas pressões e temperaturas. Para proteção do tubo de vidro contra eventuais choques externos, são fornecidas hastes protetoras metálicas colocadas em torno do tubo de vidro ou com tubos ou chapas plásticas envolvendo o mesmo.

### Medidor de nível tipo flutuador

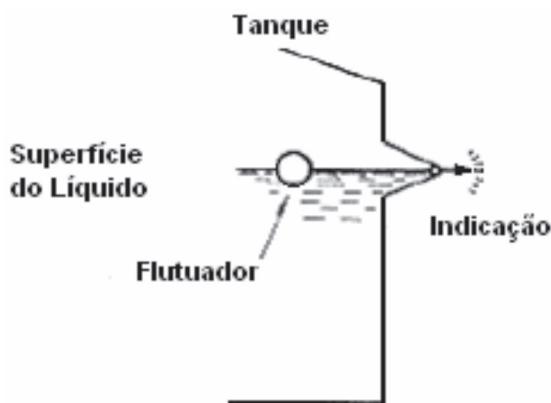
Os medidores descritos a seguir se baseiam no princípio do empuxo, que é exercido sobre um artefato (flutuador) que flutua sobre a água.

### Medidor de nível com flutuador interno

Neste medidor de nível, o flutuador é colocado no tanque, (como mostra a figura a seguir) e seu movimento vertical é convertido pela alavanca em movimento rotativo por meio de um indicador externo. A rotação da alavanca produz uma indicação direta ou de posição a partir de um contato magnético.

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

**Figura 64 – Medidor do tipo flutuador (SENAI. ES,1999a, p. 92)**



### Medidor de nível com flutuador externo

Neste medidor, o flutuador é colocado em uma câmara montada do lado de fora do tanque, como mostra a Figura 64. Conforme varia, o nível do flutuador move-se verticalmente. Este, por sua vez, transmite esta variação ao elemento indicador através de um sistema de alavancas. Sua vantagem sobre o sistema com flutuador interno está no fato de este ser menos afetado por oscilações na superfície do líquido contido no tanque ou por sua vaporização. Com este medidor pode-se obter o nível em tanques sob pressão ou vácuo, medir nível de interface entre dois líquidos de densidade diferentes e medir nível de líquidos corrosivos. É indicado especialmente para os casos em que a instalação de um flutuador tipo bóia dentro do tanque de medição não for recomendado.

Figura 65 – Medidor do tipo flutuador externo (SENAI. ES,1999a, p.93)



#### Medidor de nível tipo flutuador livre

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

Figura 66 – Medidores de nível tipo flutuador livre (SENAI. ES,1999a, p. 93)



## Medidores de nível por medição indireta

Veja a seguir alguns tipos de medidores de nível que usam o princípio da leitura indireta.

### Medidor de nível tipo deslocador (displacer)

Este medidor de nível é provido de um detector que utiliza o princípio de Arquimedes que diz: *Um corpo imerso em um líquido sofre a ação de uma força vertical dirigida de baixo para cima igual ao peso do volume do líquido deslocado.*

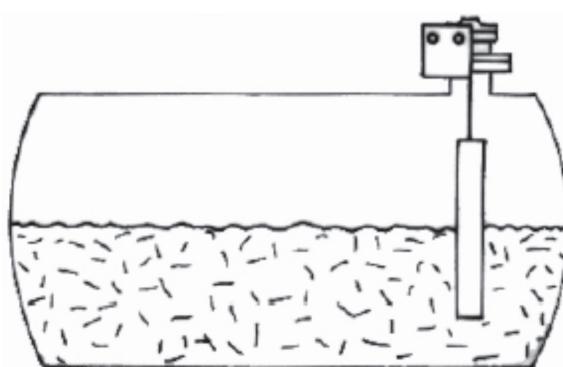


#### Fique ligado!

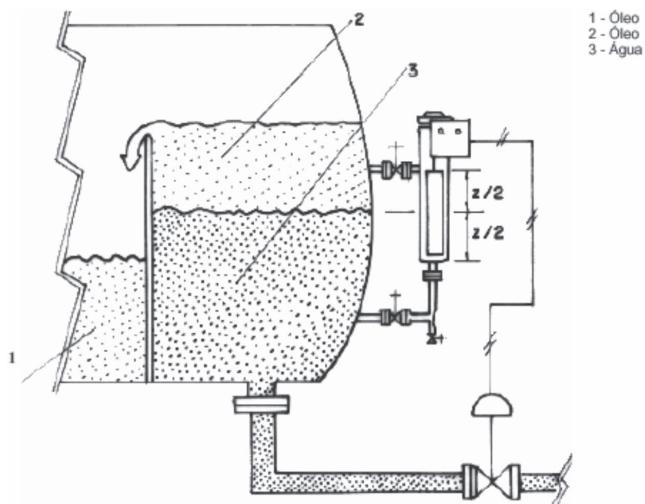
A força exercida pelo fluido no corpo nele submerso é denominada de empuxo, sendo maior quanto maior for a densidade do líquido.

O deslocador comumente utilizado como sensor de transmissores de nível tem a forma de um cilindro oco, fabricado de materiais como aço inox 304 ou 316, monel, *hastelloy*, *teflon* sólido, etc. A escolha do material adequado é determinada principalmente pela temperatura e poder corrosivo do fluido. No interior do cilindro, se necessário, são depositados contrapesos granulados, a fim de ajustar o peso do deslocador. Uma vez que o empuxo aumenta com o percentual de imersão, segue-se que o peso aparente do deslocador se reduz com o aumento do nível. Observe as Figuras 67 e 68.

**Figura 67 – Medidor de nível do tipo flutuador (SENAI. ES, 1999, p. 95)**



**Figura 68 – Medidor para líquidos imiscíveis (SENAI. ES,1999a, p.96)**



### Tubo de torque

O tubo de torque consiste em um tubo oco, fechado em uma das extremidades, fabricado a partir de materiais, tais como aço inox 304, 316, inconel, monel e outros. Quando o nível desce, o deslocador movimenta-se para baixo, devido à redução da força empuxo. Surge, então, uma torção ao longo do tubo do torque. Esta torção equivale à distensão de uma mola, que equilibra o esforço que lhe é aplicado através de uma reação proporcional à deformação linear sofrida (mesmo princípio de funcionamento dos torquímetros). Sua faixa de medição varia de acordo com a aplicação, sendo que a faixa máxima disponível normalmente no mercado é de 0 ~ 5.000mm, e que a precisão varia conforme o fabricante, entre 0,5% e 2%.

### Medidor de nível tipo pressão diferencial

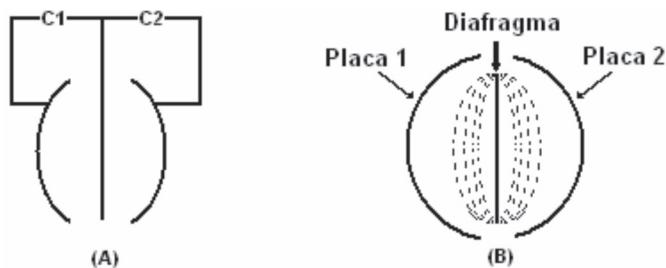
Estes instrumentos, quando utilizados em medição de nível, medem diferenciais de pressão que são provocados pela coluna líquida presente nos equipamentos cujo nível se deseja medir. A medição da coluna líquida (hidrostática) é feita utilizando-se de pressão diferencial, conectando-se transmissor de pressão diferencial, conectando-se as tomadas do instrumento diretamente ao equipamento cujo nível se deseja medir. Os instrumentos funcionando, segundo este princípio, são em geral transmissores, no qual daremos uma maior atenção neste módulo. O valor de pressão exercida pela coluna líquida (hidrostática), cujo valor é medido pelo transmissor de pressão diferencial, é da por:

$$\text{Pressão} = \text{Densidade do líquido} \cdot \text{Altura da coluna líquida}$$

e considerando-se que, usualmente, a densidade do líquido é conhecida e não varia de forma substancial, o nível (altura da coluna líquida) pode ser medido de forma inferencial, utilizando-se dispositivos do tipo pressão diferencial.

O princípio mais comum de funcionamento dos transmissores de pressão diferencial do tipo diafragma é o princípio de equilíbrio de forças; as pressões que definem um dado diferencial são aplicadas por meio das conexões de entrada do instrumento a duas câmaras situadas em lados opostos, estanques entre si e separadas por um elemento sensível (diafragma). Estas pressões, atuando sobre o elemento com uma superfície determinada, produzem forças de mesma direção e sentidos opostos, fazendo originar uma força resultante. Esta força resultante, no caso de transmissor tipo célula capacitiva, provoca uma variação na relação das capacitâncias C1 e C2 (vide Figura 68). Esta variação, proporcional à pressão diferencial, é convertida, amplificada, proporcionando um sinal de saída em corrente na saída do transmissor (normalmente de 4 a 20mA).

**Figura 69 – Medidor de nível do tipo diafragma (SENAI. ES,1999a, p.99)**

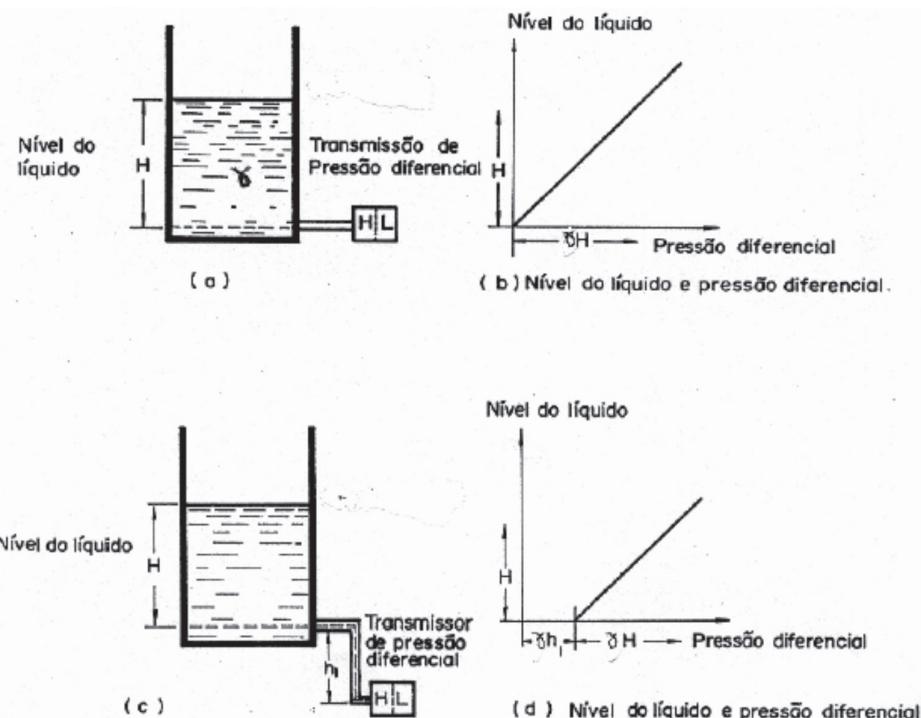


A seguir, vamos mostrar três tipos de medidores do tipo diafragma que podem ser para tanques abertos ou fechados, isso vai variar de acordo com a aplicação específica.

Para tanque aberto: o lado de alta pressão do transmissor de pressão diferencial é ligado pela tomada da parte inferior do tanque, e o lado de baixa pressão é aberto para a atmosfera. Visto que a pressão estática do líquido é diretamente proporcional ao peso do líquido, este pode ser obtido pela medida do primeiro. Neste caso, o medidor de pressão pode ser usado em vez do transmissor de pressão diferencial.

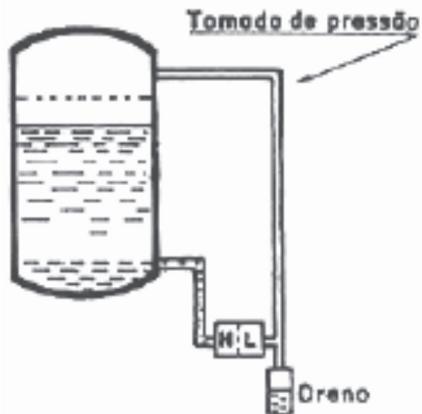
O transmissor de pressão diferencial é usualmente montado em uma posição que corresponde ao nível baixo de medição. Se isto é difícil, ele pode ser montado como mostra a figura 70 (letra c). Neste caso a regulação de zero é necessária, desde que a pressão adicional já esteja na parte baixa do nível do líquido.

**Figura 70 – Medidor de nível tipo pressão diferencial (tanque aberto).**  
(SENAI. ES, 1999a, p. 100)



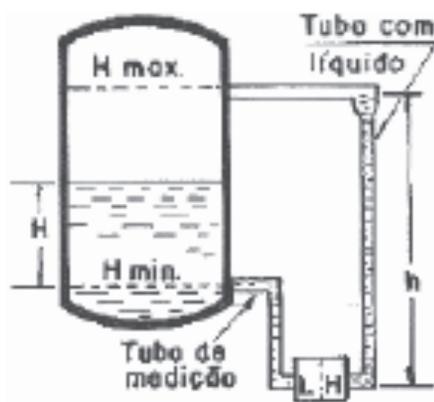
Para tanque fechado: no tanque fechado, se a pressão dentro do tanque é diferente da pressão atmosférica, os lados de alta e baixa pressão são conectados individualmente por tubos na parte baixa e alta do tanque respectivamente para obter pressão diferencial proporcional ao nível líquido. (vide Figura 71).

**Figura 71 – Medidor de nível tipo pressão diferencial (tanque fechado).**  
(SENAI. ES,1999a, p.100)



Para tanque fechado com vapor: quando se necessita medir nível em tanque fechado contendo vapor, se faz necessário preencher a tomada de alta pressão com um líquido (normalmente água) para evitar que se forme uma coluna de água nesta tomada devido à existência de condensado que se acumularia nela e provocaria medição falsa. Neste caso, deve-se fazer a correção do efeito desta coluna, como mostra a Figura 72.

**Figura 72 – Medidor de nível tipo pressão diferencial (tanque fechado com vapor)** (SENAI. ES,1999a, p.101)



#### **Medidor de nível tipo borbulhador**

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

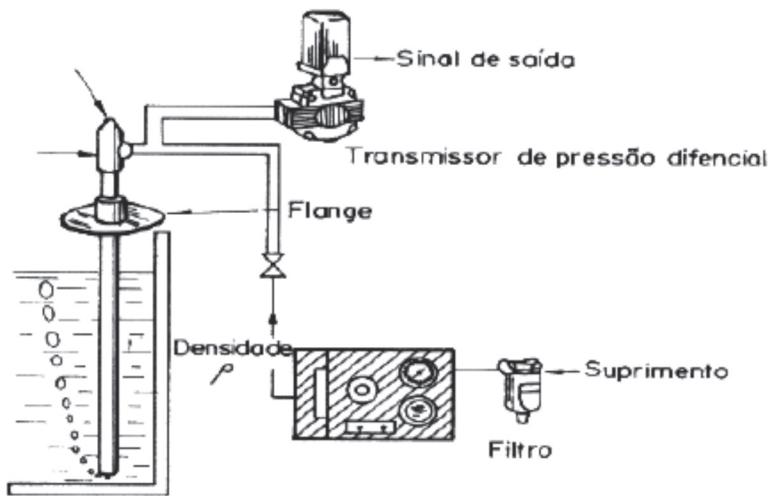


## Fique ligado!

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

Na medição é necessário que se possa saber se a pressão exercida pela coluna de líquido está sendo vencida ou não, e isto se torna possível com o escape das bolhas de ar pela ponta imersa no tubo. Este fato representa um pequeno valor adicional na pressão de ar, desprezível, desde que o borbulhamento não seja intenso. A medida se faz por meio de um instrumento receptor que pode ser um manômetro ou qualquer outro instrumento transmissor de pressão. A Figura 73 mostra um esquema deste tipo de medidor.

**Figura 73– Medidor de nível tipo borbulhador (SENAI. ES,1999a, p.105)**



## Medidor de nível tipo capacitivo

Um capacitor consiste de dois condutores, denominados placas, separados por um material dielétrico. Este componente, muito utilizado em circuitos elétricos,

tem como principal característica a propriedade de armazenar cargas elétricas. A grandeza que caracteriza um capacitor é a capacidade, expressa em Farad. Um capacitor de 1 Farad armazena 1 Coulomb de carga ao ser submetido a uma diferença de potencial de 1 Volt. Quando submetido a uma tensão alternada, o capacitor é *percorrido* por uma corrente diretamente proporcional a sua capacidade. A capacidade é estabelecida em função da área das placas, das distâncias entre elas e da constante dielétrica do meio entre as placas. Alterando-se a distância ou o material, altera-se a capacidade e o sinal de saída do medidor que é proporcional ao nível.

### **Medidor de nível tipo ultra-som**

O ultra-som é uma onda sonora (mecânica), cuja freqüência de oscilação é maior do que aquela sensível pelo ouvido humano, isto é, acima de 20KHz. A geração ocorre quando uma força externa excita as moléculas de um meio elástico. Esta excitação é transferida de molécula a molécula do meio com uma velocidade que depende da elasticidade e inércia das moléculas. A propagação do ultra-som depende, desta forma, do meio, se sólido, líquido ou gasoso, e sua componente longitudinal da onda propaga-se à velocidade característica do material, isto é, em função exclusivamente deste. Na água, a 10°C, a velocidade de propagação do som é de 1.440m/s, enquanto que no ar, a 20°C, é 343m/s. Assim sendo, a velocidade do som é a base para a medição através da técnica de eco, usada nos dispositivos tipo ultra-sônicos. Esta velocidade pode variar em função da temperatura e da pressão, porém, os efeitos em função da pressão podem ser desprezados.

### **Medidor de nível tipo radioativo**

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

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

O detector mais utilizado é formado por uma câmara contendo gás inerte (argônio, por exemplo) pressurizado, alimentado por uma tensão contínua negativa ( $-15V_{DC}$ ) e um coletor de elétrons (que são retirados da última camada do átomo pela incidência do raio gama).

A corrente elétrica, produzida pela passagem do raio gama, é diretamente proporcional à intensidade da radiação e inversamente proporcional ao nível do produto no silo ou tanque. Esse sinal é convertido em tensão e/ou freqüência para finalmente, pela unidade eletrônica, ser transmitida através de sinal de corrente de 4 a 20mA.

Muitos arranjos são utilizados na instalação desses sistemas, porém a mais típica é aquela onde a fonte é instalada de um lado do silo ou tanque e o detector no outro.



### Fique ligado!

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

### Medição de nível por pesagem

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

Célula de carga é um sensor constituído por fitas extensiométricas (*strain gauges*) fixadas adequadamente em um bloco de aço especial com dimensões calculadas para apresentar uma deformação elástica e linear quando submetido a uma força. Essa deformação é detectada pelas fitas extensiométricas através da variação de sua resistência elétrica. As células de carga podem ser instaladas sob os pontos de apoio da estrutura do silo, de tal forma que o seu peso é nelas aplicado. Para estas aplicações é necessário que as células de carga sejam imunes a esforços laterais. Para isto, seus encostos para a carga são constituídos de apoios especiais do tipo côncavo ou esférico.

O número de células de carga varia em função da forma do silo, sendo que a solução que apresenta melhor precisão é apoiar o silo em três células dispostas defasadas de 120° em relação à projeção do seu centro de simetria.



### Fique ligado!

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

Para silos pequenos podem ser usadas células de carga que são deformadas por tração, sendo neste caso o silo suspenso por uma única célula, eliminando-se o problema de distribuição de carga. Os sistemas de medição de nível através de pesagem exigem que o silo seja fisicamente isolado da estrutura do prédio, evitando, assim, que forças estranhas sejam aplicadas às células de carga, gerando erros na medição.

Algumas alterações do projeto estrutural do prédio poderão ser necessárias, uma vez que o peso do silo não está mais distribuído em uma estrutura de sustentação, mas, sim, concentrando em pontos onde serão instaladas as células de carga.

Os sistemas de enchimento e esvaziamento do silo deverão ser cuidadosamente projetados, tendo em vista minimizar sua interferência no sistema de medição. Deve ser evitada a instalação de vibradores, motores e outras fontes de vibração em contato direto com o silo.



### Atenção!

Em silos mais altos ou instalados em local sujeito a vibrações excessiva, recomenda-se a colocação de barras estabilizadoras nas laterais do silo para absorver os eventuais esforços horizontais que tendem a desequilibrar o silo, prejudicando o desempenho do sistema.

## Medição de nível de sólidos

O aparecimento de modernas plantas com processos que exigem o manuseio de materiais sólidos granulados com melhor monitoração e/ou controle vem pressionando os fabricantes de instrumentos de medição a desenvolver/melhorar as técnicas de medição dessa variável em que as tecnologias convencionais não se aplicam.

Hoje encontramos no mercado vários tipos de dispositivos eletromecânicos, eletrônicos, sônicos ou nucleares para atender às diversas situações, nas quais é necessário o controle do volume ou massa de sólidos armazenados em silos, depósitos de compensação e sistemas de dosagem. Embora alguns deles tenham aplicação quase que universal com ótimos resultados, perdem lugar, devido a seu custo elevado, para dispositivos mais simples, menos precisos, desde que estes atendam satisfatoriamente aos requisitos do processo e às condições físicas para a sua instalação.

Para a seleção do dispositivo mais adequado para cada caso, torna-se imprescindível o conhecimento do funcionamento e das limitações dos diversos tipos de transdutores existentes, devendo ser considerados ainda os fatores, tais como: material estocado, geometria e estrutura do silo, precisão requerida, custo, etc.

## Instrumentos para alarme e intertravamento

A medição de nível está sempre relacionada à monitoração e/ou controle da quantidade de fluidos estocados em silos e tanques em processos geralmente dinâmicos e assim com cargas e descargas freqüentes. Esta movimentação constante faz com que haja necessidade de utilização de medidores de nível denominados chaves de nível, que têm por objetivo acusar uma condição extrema no armazenamento do fluido. Esta condição extrema visa sempre evitar que haja ou material em excesso no reservatório, o que ocasionaria transbordo, ou falta de material, o que faria, por exemplo, uma bomba cavituar (trabalhar em vazio).

### Chaves de nível

As chaves de nível são dispositivos próprios para atuar em determinados pontos fixos de nível. Estes pontos fixos são valores de nível em equipamentos que, uma

vez alcançados, exigem o desencadeamento de alguma ação necessária à boa operação ou à segurança do sistema, ao qual pertence o equipamento. Assim sendo, uma chave de nível pode ligar uma bomba, acionar um alarme ou desencadear uma seqüência de operações automáticas, quando o nível atinge um ponto fixo, cujo valor é informado à chave através de ajuste a ela inteligível.

As chaves de nível são capazes de dar, como saída, somente um entre dois estados: energizado e desenergizado.

## Escolha do tipo de medidor de nível

A escolha do tipo de medidor de nível não é uma tarefa tão simples quanto parece ser a princípio. Excluindo aplicações para líquidos, como a água que não requer grandes cuidados na escolha, a especificação do sensor deve levar em consideração as características químicas e físicas, o estado da matéria, as interferências das variáveis temperatura e pressão e principalmente o local da instalação. Se a opção melhor for a medição por pressão diferencial, deve-se recorrer às mesmas recomendações sugeridas para os medidores de pressão de líquidos. Se o fluido for sólido granulado, é importante verificar a geração de poeira, vapores e também o perfil de carga e descarga.

De acordo com a revista *Controle e Automação* (Edição número 118):

A primeira pergunta que se faz quando se vai analisar a implantação de um medidor de nível é: só se precisa de uma idéia de quanto produto ainda resta — algo como vazio/metade/cheio — ou se precisa fazer transferência de custódia? Nesse último caso, existem muitos senões, porque se precisa de uma alta precisão.

Em transferência de custódia existe a necessidade de se comprovar que o total a pagar realmente confere com a quantidade comprada: se comprar 10 litros, é isso que se recebe. “Claro que existem medidores de vazão ultraprecisos, mas procura-se utilizar ainda a medição de nível para dar maior segurança na medição. Somente a medição de nível pode gerar dúvidas – já que um tanque está sujeito a dilatação, diminuindo a altura do nível, mas o volume continua o mesmo. É preciso então estar com tanque arqueado por um profissional do INMETRO – seu medidor de nível tem que ter boa exatidão, com certificação – e aí sim se trabalha com incerteza de medição bem menor”.

Essa incerteza nunca vai dizer que a leitura é 100% correta, mas vai dar um percentual que, dentro de uma faixa — tanto para mais como para menos —, é o mais correta possível. Dessa forma, as partes envolvidas estão de acordo com aquele valor que possui uma incerteza naquela faixa, mas nunca fora dela.

Em alguns lugares que não têm condições de comprar um bom medidor de vazão, como os ultra-sônicos — com precisão de 0,5% — pode-se utilizar a medição do nível para transferência de custódia. Mas vale lembrar que os instrumentos utilizados têm que ser muito bons, para dar exatidão à medição.

A medição direta utiliza muito a régua — em postos de gasolina, por exemplo — gabarito e trena — ainda utilizada em tanques da Petrobras. Esse tipo de medição apresenta muitas incertezas porque depende da sensibilidade humana, já que o operador sobe o tanque e insere uma trena milimetrada até um prumo maciço de cobre; então ele tem que parar a trena quando sentir que o prumo tocou o fundo do tanque, onde a pasta — passada na trena — muda de cor, faz a leitura do nível — qualquer inclinação na trena dá um nível superior ao real. “A incerteza é muito grande. Serve como referencial, mas não para transferência de custódia”.

Existem, ainda, tanques pequenos, em que só se precisa saber se ele está vazio, pela metade ou cheio. Um tanque de diesel das caldeiras, por exemplo: não há necessidade de muita exatidão, mas é necessário olhar de longe e ver sua carga. Aí um visor de nível transparente resolve, porque fica fácil de ver a coluna: barato, simples e direto, mas não se tem a informação a distância, é preciso alguém estar no local. Como a mão-de-obra é uma variável importante nas indústrias, um transmissor de nível pode levar o sinal até a sala de controle. “Mas se a empresa não pode gastar, um visor tubular ou plano — “reflex” ou não — resolve: são baratos, robustos, de fácil manutenção, não requerem energia elétrica.”



### Fique ligado!

Em caldeiras sempre se coloca um visor de nível, mesmo que ela seja toda automatizada porque, se acontecer de faltar energia, você pode manter a segurança olhando o visor já que numa caldeira pode faltar o que for, de operador a óleo, mas nunca água e a NR 13 exige, pelo menos, um visor transparente.

As medições indiretas podem ser feitas por capacidade, ultra-som, por pesagem, por raio gama, *displacers* (princípio de Arquimedes) ou pressão diferencial.

Em um tanque aberto para a atmosfera você pode ter um transmissor que só meça coluna manométrica: custa barato e a instalação é fácil. Mas quando o tanque é pressurizado, como o tubulão de uma caldeira, utiliza-se transmissor diferencial porque, como a coluna é muito pequena, um transmissor na base não suportaria a pressão apenas em uma câmara, então, utiliza-se um transmissor de pressão diferencial — onde forças iguais em sentidos opostos se anulam, fazendo com que a força da coluna seja suficiente para deslocar o sensor, tornando possível a medição.

Uma das mais antigas e interessantes medições indiretas é o borbulhador, excelente para quando se tem um tanque enterrado e não há como colocar um transmissor na base, nem um visor de nível. Um *displacer* fica caro, mas ainda pode ser usado. Calibra-se o LT com nível do tanque cheio e vazio, e assim têm-se valores diferentes entre esses pontos e a pressão — que varia — é proporcional ao nível.

## Voltando ao desafio

No desafio proposto no início do capítulo, você foi incumbido da tarefa de especificar um medidor de nível para um silo em que existam partículas em suspensão. Você deve ter concluído que será necessário um medidor que não leve em consideração as partículas em suspensão. Por isso, poderá utilizar sensores ultrassônicos que são muito precisos e ainda podem calcular o nível se a superfície do produto for irregular.

## Resumindo

Com o estudo do Capítulo 7 você:

- Conheceu alguns tipos de instrumentos para medição de nível.
- Estabeleceu por meio do texto uma relação entre os tipos de medidores, a sua adequação ao processo.
- Conheceu as vantagens e desvantagens do uso de se determinar o nível por processos indiretos e diretos.

## Aprenda mais

- Consulte o site [www.mspc.eng.br](http://www.mspc.eng.br), que trata os instrumentos de nível com bastante simplicidade e ainda traz mais detalhes sobre os conceitos apresentados neste capítulo.
- Procure também se informar em sua empresa quais são os medidores utilizados no processo e verifique se eles trabalham dentro das faixas indicadas pelo fabricante, evitando assim problemas com a eficiência energética.

Com o intuito de auxiliar seus estudos, apresentamos a seguir um pequeno conjunto de termos usados neste capítulo.

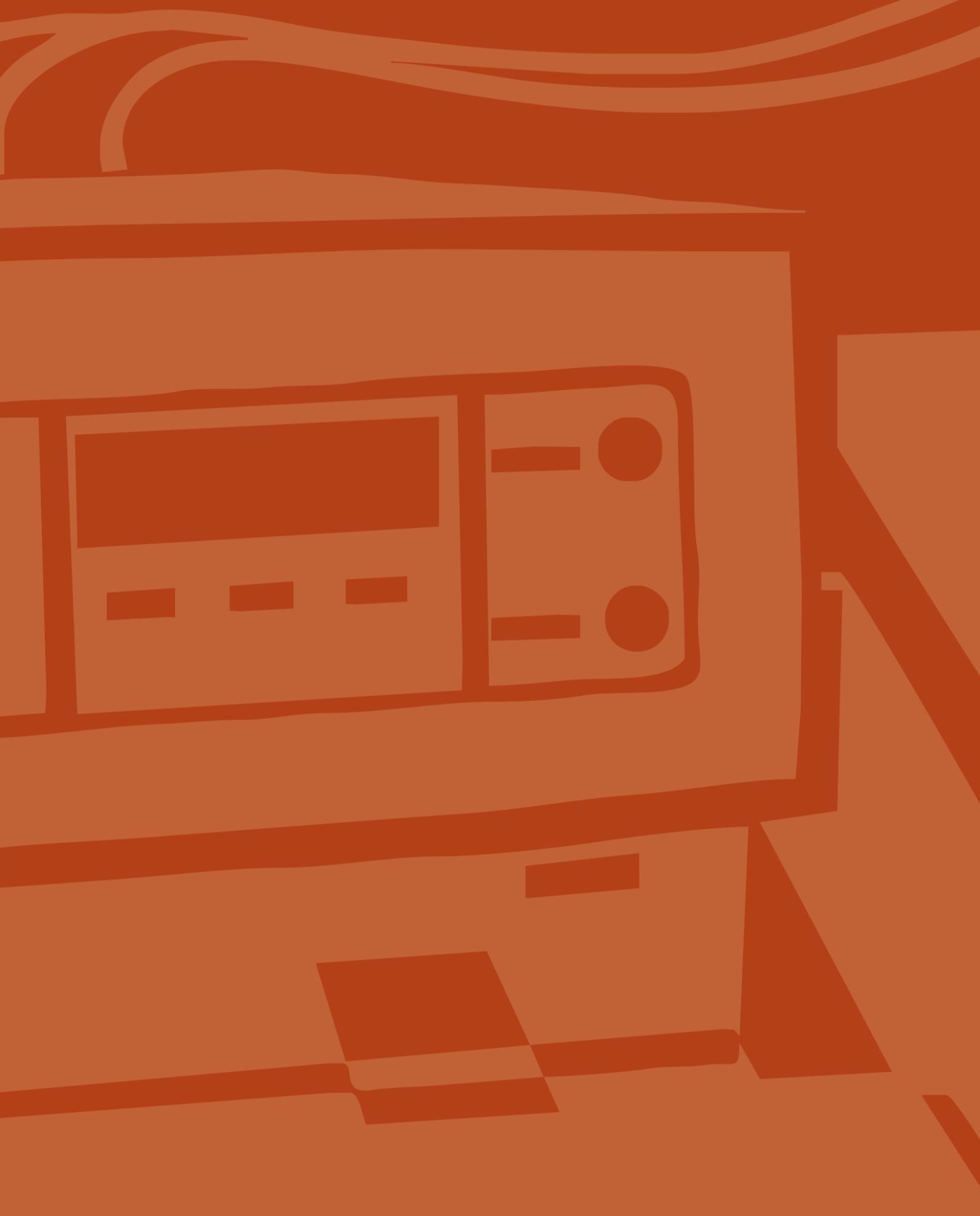
## Glossário

**Gabarito** – Régua graduada que é usada para fazer medidas métricas.

**Pressão diferencial** – É o resultado da diferença de duas pressões medidas. Em outras palavras, é a pressão medida em qualquer ponto, menos no ponto zero de referência da pressão atmosférica.

**Transmissor** – São instrumentos que detectam as variações na variável medida/controlada através do elemento primário e transmitem-na à distância. O elemento primário pode ou não fazer parte integrante do transmissor.





## Capítulo 8

---

### ELEMENTOS FINAIS DE CONTROLE

#### Iniciando nossa conversa

A atuação direta sobre os processos é confiada ao elemento final de controle, que, na maioria dos casos, é uma válvula de controle.

Na medida em que o elemento final de controle estiver mal especificado ou até em condições críticas de uso, estaremos correndo o risco de não obter a otimização do processo. Daí a importância deste elemento.

Veremos neste capítulo os principais elementos finais de controle: válvula de controle e o inversor de freqüência.

Para auxiliar a sua leitura, há também um pequeno glossário no final do capítulo.

#### Objetivos

O estudo deste tema tem por metas:

- reconhecer as principais partes da válvula de controle;
- explicar o funcionamento de um inversor de freqüência;
- conhecer uma aplicação para o inversor de freqüência.

## Um desafio para você

Numa indústria onde você é o técnico responsável pela área de instrumentação, foi pedido a você que justifique o uso de um inversor de freqüência para o controle de velocidade no motor de uma correia transportadora.

Continuando nossa conversa

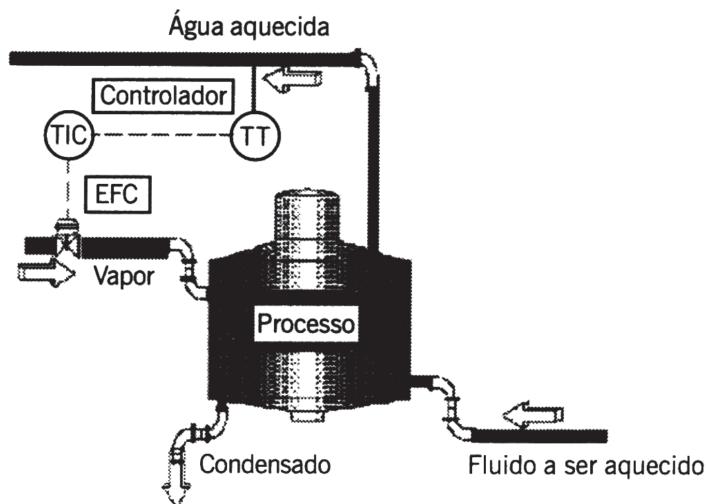
## Conceito de elementos finais de controle

Os elementos finais de controle são mecanismos que variam a quantidade de material ou de energia em resposta ao sinal enviado pelo controlador, a fim de manter a variável controlada em um valor (ou faixa de valores) predeterminado.

A válvula de controle é o elemento final mais usado nos sistemas de controle industrial. Em sistemas de controle de gases e ar também é usado o *damper*. Encontramos também outros elementos, tais como: bombas, resistências elétricas, motores, inversores de freqüência, etc.

Assim como o controlador, o elemento final de controle pode ser operado por meios elétricos, pneumáticos e mecânicos. A posição do elemento final de controle (EFC), na cadeia automática de controle, é mostrada na Figura 74.

**Figura 74 – Elemento final de controle em um processo (SENAI. ES, 1999c, p.107)**



## Válvulas de controle

As válvulas de controle desempenham um papel muito importante no controle automático de modernas indústrias, que dependem da correta distribuição e controle de fluidos líquidos e gasosos. Tais controles sejam para trocas de energia, redução de pressão ou simplesmente para encher um reservatório, dependem de algum tipo de elemento final de controle para fazer esse serviço.

Os elementos finais de controle podem ser considerados como o *músculo* do controle automático. Eles fornecem a necessária amplificação de forças entre os baixos níveis de energia, fornecidos pelos controladores, e os maiores níveis de energia necessários para desempenho de suas funções de fluidos.

A válvula de controle é o elemento final de controle mais utilizado. Outros tipos de elementos finais de controle podem ser bombas dosadoras, *dampers* e *louvers* (variação de válvula borboleta), hélice de passo variável, motores elétricos para posicionamento de equipamentos que não sejam válvulas, etc.

Apesar de largamente utilizada, provavelmente não exista outro elemento qualquer no sistema de controle que receba menor parcela de atenção. Em muitos sistemas, a válvula de controle é mais sujeita às severas condições de pressão, temperatura, corrosão e contaminação do que a qualquer outro componente, e ainda assim deve trabalhar satisfatoriamente com um mínimo de atenção.



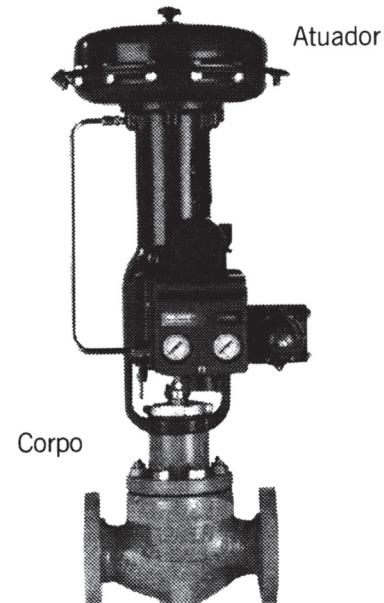
### Fique ligado!

Uma válvula de controle funciona como uma resistência variável na tubulação, e é definida por alguns autores como um orifício de dimensões variáveis.

## Partes principais de uma válvula de controle

Uma válvula de controle consiste basicamente de dois conjuntos principais: atuador e corpo. Observe a Figura 75.

Figura 75 – Partes de uma válvula de controle (SENAI. ES, 1999c, p.108)



### Corpo

É a parte da válvula que executa a ação de controle, permitindo maior ou menor passagem do fluido no seu interior, conforme a necessidade do processo. O conjunto do corpo divide-se basicamente nos seguintes subconjuntos:

- corpo propriamente dito;
- internos;
- castelo;
- flange interior.

Nem todos os tipos de válvulas possuem obrigatoriamente o seu conjunto do corpo formado por todos os subconjuntos acima mencionados. Em alguns tipos de válvulas, corpo e castelo formam uma só peça, denominada apenas corpo; outros nem existe o flange inferior. Porém, vamos por enquanto desconsiderar

tais particularidades, optando por um conceito mais global, para posteriormente irmos restringindo-o à medida que formos analisando cada tipo de válvula de controle.

Sendo o conjunto do corpo, a parte da válvula que entra em contato direto com fluido deve satisfazer aos requisitos de pressão, temperatura e corrosão do fluido.

Classificam-se os tipos de válvulas em função dos respectivos tipos de corpos e, portanto, quando estivermos falando de tipos de válvulas subentenderemos tipos de corpos. Podemos agrupar os principais tipos de válvulas em dois grupos: de deslocamento linear e de deslocamento rotativo.

Tipos de válvulas de deslocamento linear:

- Globo convencional;
- Globo três vias;
- Globo gaiola;
- Globo angular;
- Diafragma;
- Bipartido;
- Guilhotina.

Tipos de válvulas de deslocamento rotativo:

- Borboleta;
- Esfera;
- Obturador Excêntrico.

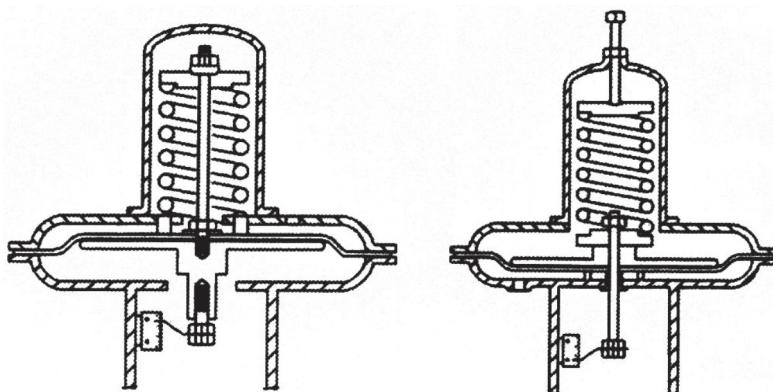
## Atuador

Constitui-se no elemento responsável em proporcionar a necessária força motriz ao funcionamento da válvula de controle. Sendo parte integrante do sistema de controle, quando corretamente selecionado, deve proporcionar à válvula meios de operacionalidade estáveis e suaves contra a ação variável das forças dinâmicas e estáticas originadas na válvula por meio da ação do fluido de processo.

Dependendo basicamente do meio de produção da força motriz, o atuador utilizado em aplicações de controle modulado classifica-se em cinco tipos principais:

- Pneumático a mola e diafragma;
- Pneumático a pistão;
- Elétrico;
- Elétrico-hidráulico;
- Hidráulico.

**Figura 76 – Modelos de válvulas e seus atuadores (SENAI. ES, 1999c, p.110)**



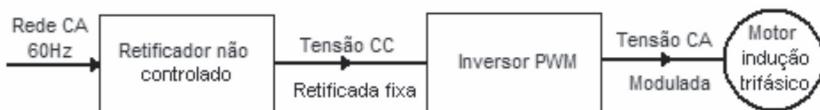
## Inversores de freqüência

O crescente desenvolvimento dos semicondutores de potência, tais como GTO (*Gate Turn – off Thyristor*), IGBT (*Insulation Gate Bipolar Transistor*), MCT (*Mos Controller Thyristor*) ou SITH (*Static Induction Thyristor*) entre outros, juntamente com a crescente oferta de microprocessadores, microcontroladores e DSP (*Digital Signal Processors*) no mercado, tornando o inversor fonte de tensão, também conhecido popularmente como Inversor de Freqüência, uma excelente opção técnico-econômica para o controle de velocidade de motores elétricos, principalmente o motor de indução trifásico e o motor de imã permanente.

O objetivo básico deste equipamento é o controle de velocidade do Motor de Indução Trifásico dentro de uma ampla faixa, mantendo otimizadas as características de torque e corrente.

Ele funciona tradicionalmente como na Figura 77. Consiste de um circuito retificador que converte o sinal alternado em contínuo e de um inversor que restaura o sinal alternado com uma alteração em sua freqüência, permitindo assim um controle sobre o motor.

**Figura 77 – Diagrama simplificado de Inversor de freqüência**



Os inversores de freqüência possuem uma série de parâmetros de configuração, que levam em consideração as características do motor ao qual ele está ligado, rampas de aceleração na partida e desaceleração na parada do motor. Além disso, eles podem possuir internamente um controlador PI (proporcional e integral) que aceita valores de *set point* externos para aumentar a eficiência do processo.



### Fique ligado!

Com um controlador PI interno o inversor de freqüência é capaz de aumentar a eficiência do controle sobre o processo.

## Aplicações no controle de bomba

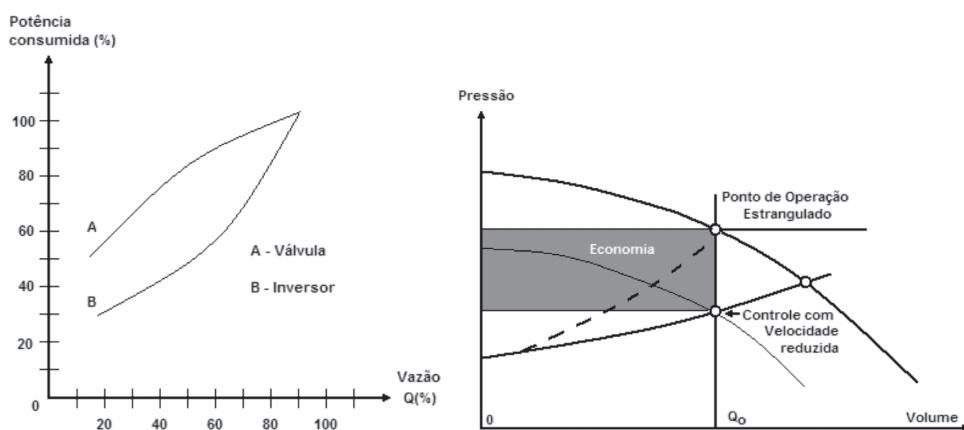
Através do ajuste de controle de velocidade do Motor de Indução Trifásico consegue-se obter uma melhor eficientização, em nível de redução de consumo de energia, na operação da bomba.

Além do aspecto econômico, o sistema de controle por variação de velocidade de uma bomba (por exemplo) apresenta uma série de vantagens em relação ao controle por válvulas:

- melhoria na eficiência do sistema pelo casamento da característica da bomba com a característica do sistema e otimização do ponto de trabalho;

- limitação da corrente de partida;
- partidas e paradas suaves do sistema de bombeamento, evitando picos na rede de energia elétrica e esforços na tubulação;
- simplificação da rede de dutos por meio da eliminação das válvulas de estrangulamento,
- aumento da vida útil da bomba devido à eliminação do desequilíbrio interno de pressões, fonte causadora do desgaste mecânico;
- eficiência otimizada de sistema do bombeamento através da obediência às variações de pressão ou fluxo;
- utilização de motores de indução trifásicos, padronizados, que requerem menor manutenção, a prova de tempo ou atmosferas quimicamente agressivas;
- método simples de *interface* para sinais de controle externos, tais como: 0 a 10 Volts ou 4 a 20mA, provenientes de transmissores de pressão, vazão, nível ou, ainda, telemetria.

**Figura 78 – Comparativo entre o acionamento de uma bomba por válvula de controle e inversor de freqüência**



### Voltando ao desafio

Na tarefa proposta no início do capítulo, foi pedido que você justificasse a utilização de um inversor de freqüência para o controle no motor de uma correia transportadora. Você deve usar o inversor de freqüência em motores de corrente alternada que requeiram uma partida suave, como é o caso da tarefa em

questão. Além disso, o inversor permite uma variação da velocidade, com um consequente aumento da demanda de matérias no processo de produção.

## Resumindo

Com a leitura do Capítulo 8, você aprendeu sobre:

- as principais partes da válvula de controle;
- o funcionamento de um inversor de freqüência;
- uma aplicação para o controle de uma bomba com inversor de freqüência.

## Aprenda mais

Para ampliar os seus conhecimentos sobre o tema, consulte os manuais dos inversores de freqüência do processo de sua empresa e verifique como são configurados os parâmetros do mesmo.

Como a saída do controlador que atua sobre as válvulas de controle deve estar muito bem regulada para que não haja um excesso de manobras, causando assim um desgaste prematuro dos componentes mecânicos desta peça, analise, no processo de sua empresa, se existe uma boa regulagem para a válvula de controle.

A seguir, apresentamos a definição de alguns termos, no sentido de ampliar seu vocabulário da área estudada.

## Glossário

**Controle PI** – São as ações proporcional e integral utilizadas por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

**Damper** – Válvula de controle de fluxo de um fluido, normalmente gasoso.

**Driver** – São equipamentos capazes de acionar ou controlar os elementos finais de controle.

Elemento final de controle – São mecanismos que variam a quantidade de material ou de energia em resposta ao sinal enviado pelo controlador.

Gabarito – Régua graduada, que é usada para fazer medidas métricas.

*Louvers* – Válvula de controle de fluxo de um fluido, que é uma variação da válvula borboleta.

Pressão diferencial – É o resultado da diferença de duas pressões medidas. Em outras palavras, é a pressão medida em qualquer ponto, menos no ponto zero de referência da pressão atmosférica.

*Set point (SP)* – Variável de referência que será comparada (subtraída) com a variável de processo para encontrar o erro.

*Soft start* – Equipamento de controle de partida suave de motores.





## Capítulo 9

---

# ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE PROCESSOS

### Iniciando nossa conversa

A verificação do tipo da malha de controle que é utilizada no processo implica o conhecimento do comportamento do mesmo.

Alguns questionamentos devem ser feitos quando é necessário conhecer seu processo. Vejamos alguns:

- O controle está instável?
- O ganho da malha de controle está alto?
- O processo possui um tempo morto?

Em resumo, quando se conhece o processo ao qual se deseja controlar, fica mais fácil aplicar um ajuste a sua malha para que ela responda da maneira mais adequada.

Este capítulo está organizado em tópicos para que você consiga entender o que é o controle de processos com mais detalhes. Os tópicos são: Controle em Malha Fechada, Controle *Feed-forward*, Controle *Split-range*, Controle em Cascata e controle de razão ou relação.

### Objetivos

O estudo deste capítulo visa conhecer:

- as ações de controle em uma malha fechada.
- o controle *feed-forward*.
- o controle *split-range*.

## Um desafio para você

Se você estivesse ajustando uma malha de controle e notasse que a válvula de controle situada na saída do seu processo está sofrendo manutenções periódicas por desgaste, que ação você faria para resolver este problema?

## Continuando nossa conversa

### Controle em malha fechada

Já foram vistas no Capítulo 1 algumas informações sobre o controle em malha fechada, porém, neste capítulo teremos outros exemplos e explicações mais detalhados de como funciona este controle.

O controle em malha fechada é aquele no qual a ação de controle depende, de algum modo, da saída. Portanto, a saída possui um efeito direto na ação de controle.

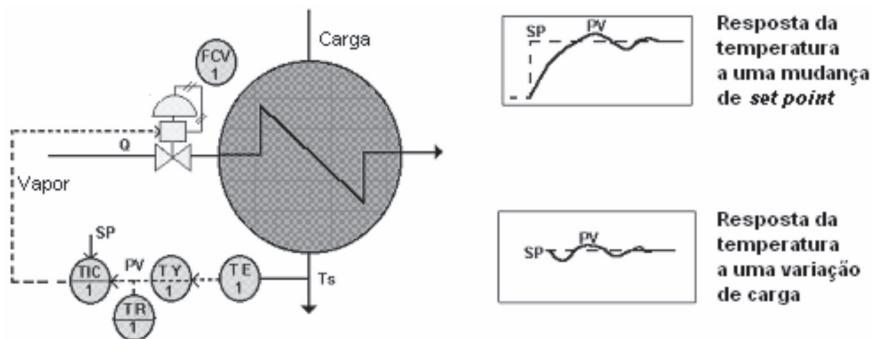
É importante lembrar que o controle de malha fechada também é conhecido como malha fechada simples ou controle *feed back*.

### Princípio

Neste tipo de controle, a ação de correção atua após a perturbação produzindo um erro entre a medida da variável de processo (PV) e o *set point* (SP). Este erro pode ser igualmente produzido por uma mudança no *set point*. Nos dois casos, a ação de correção busca eliminar o erro.

A Figura 79 representa o esquema de um controle em malha fechada simples de um trocador de calor. Este controle tem como objetivo manter a temperatura de saída  $T_s$  igual ao *set point* ajustado. Após as ações de controle PID (no controlador TIC) atuarem sobre o processo, podemos ver os efeitos através de duas curvas que mostram a evolução da medida da variável de processo (Temperatura).

Figura 798 – Controle em malha fechada simples (SENAI.ES, 1999, p. 44)

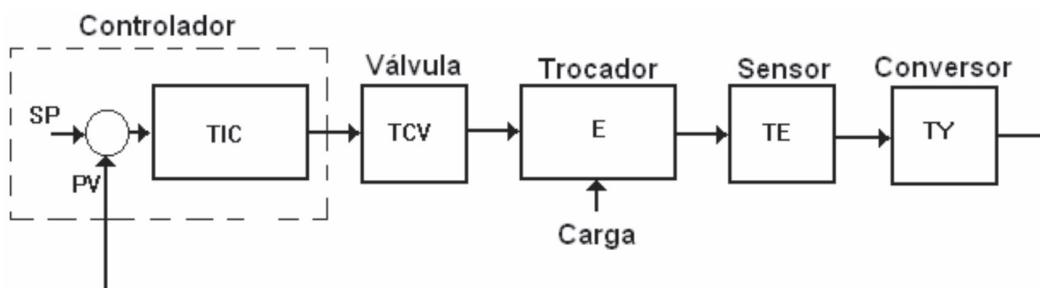


No primeiro caso (controle servo) temos a reação após uma mudança do *set point*, e notamos que a PV irá aumentar gradativamente até alcançar o valor de SP, e ultrapassa o mesmo, oscilando para cima e para baixo do seu valor até atingir definitivamente o ponto de equilíbrio.

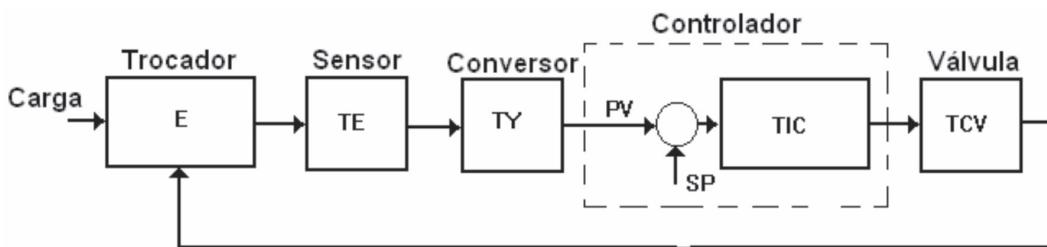
Para a segunda curva (após uma variação da vazão de carga  $Q_c$ ), a temperatura simplesmente oscila acima e abaixo do valor de SP, até o equilíbrio. Este controle é também chamado de controle regulador.

Os esquemas das Figuras 80 e 81 traduzem sobre a forma de diagramas em blocos, o funcionamento do trocador de calor mencionado anteriormente.

Figura 80 – Diagrama em blocos para mudança de SP (SENAI.ES, 1999, p. 45)



**Figura 81 – Diagrama em blocos para uma variação de carga (SENAI. ES, 1999, p.45)**



O controle em malha fechada independe do tipo do controlador utilizado, sendo que o controlador pode ser:

- tecnologia analógica ou digital;
- função contínua ou descontínua;
- algoritmo geralmente PID ou outro.

## Efeitos das ações PID em uma malha fechada

Para podermos entender melhor como funciona cada etapa do controle PID, será mostrado a seguir o efeito que cada etapa propicia no processo.

### Ação proporcional

O efeito da ação proporcional é acelerar a resposta da medida, e tem como consequência a geração do erro de . A saída do controlador proporcional puro se traduz pela relação:

$$s = G_r (PV - SP) + S_0$$

onde:

$s$  - Saída do controlador

$G_r$  - Ganho do controlador

PV - Variável de processo

SP - Set point ou referência

$S_0$  - Offset da saída quando erro igual a zero.

A diferença entre a PV – SP também é conhecido como erro. Ele foi representado na fórmula anterior, e nota-se que, quando existe o erro, existe atuação do controlador sobre a saída. Caso não exista o erro na saída teremos apenas, o sinal de offset  $S_0$ .

O estudo da ação proporcional sobre um processo estável em malha fechada mostra que após uma mudança de *set point*, em regime permanente, é gerado o erro de offset (diferente do erro, já mencionado) que tem por equação:

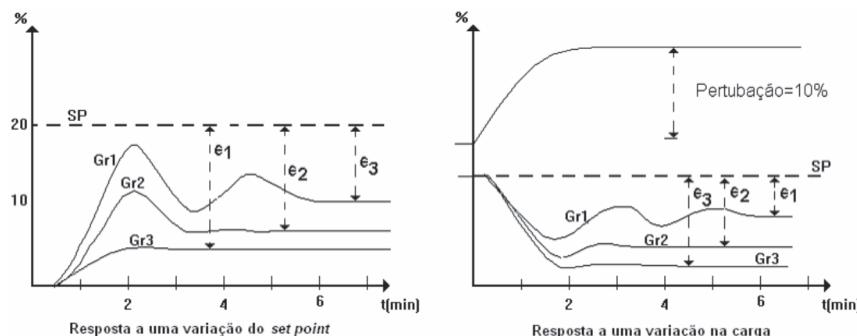
Onde:  $G_s = Gr \cdot G_p$ : Ganho da malha

$$\varepsilon = \frac{\Delta C}{(1 + G_s)}$$

Gr: Ganho do controlador

$G_p$ : Ganho do processo

**Figura 82 – Respostas de um controle proporcional em um processo estável (SENAI. ES, 1999, p. 48)**



Vejamos um exemplo: Dado:  $G_s = 1,5$       nós obtemos : ?? = 2,5%

$$G_r = 2$$

$$= 10\%$$

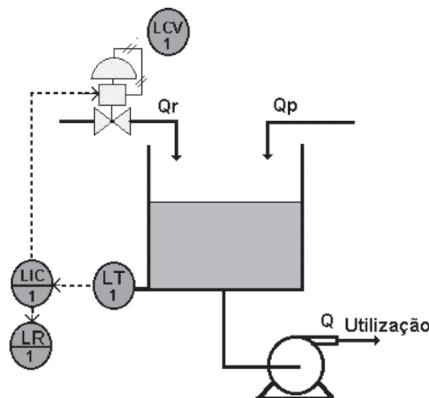
Um aumento de  $G_r$  acelera a resposta do processo provocando uma diminuição do erro de offset, mas leva a PV a oscilar mais.

O valor ótimo de  $G_r$  é aquele que dá a resposta mais rápida, com um bom amortecimento, ou seja, uma subida ao SP rápida com poucas oscilações após atingir o valor de SP.

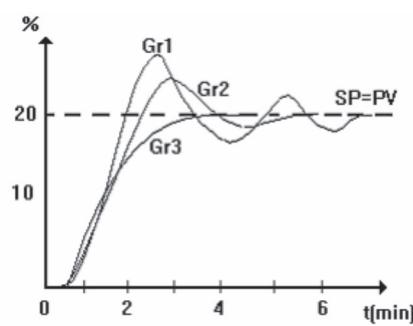
O estudo da ação proporcional sobre um processo instável (chamado de integrador), mostra que após uma variação de *set point*, a PV atingirá este mesmo valor de *set point*, em todos os casos, não gerando nunca o erro de *offset*. Mas para uma variação de carga, a medida não atingirá o *set point*, gerando assim o erro de *offset*.

Tomemos com exemplo o controle de nível do tanque, representado na Figura 83. Note que no primeiro gráfico não há erro de *offset* (para variação de *set point*), mas no segundo existirá erro de *offset* para quaisquer dos três valores do ganho  $G_r$ .

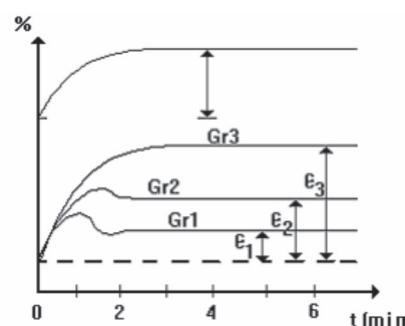
**Figura 83 – Diagrama de um processo instável**



**Figura 84 – Respostas de um controle proporcional em um processo instável (SENAI/ES, 1999, p. 49)**



Resposta do nível para uma variação de *set point*



Resposta do nível para uma variação de carga

## Ação integral

O objetivo da ação integral é anular o erro de *offset* gerado pela ação proporcional e acelerar a correção. O sinal de saída do controlador integrador puro é proporcional à integral do erro, e tem por equação:

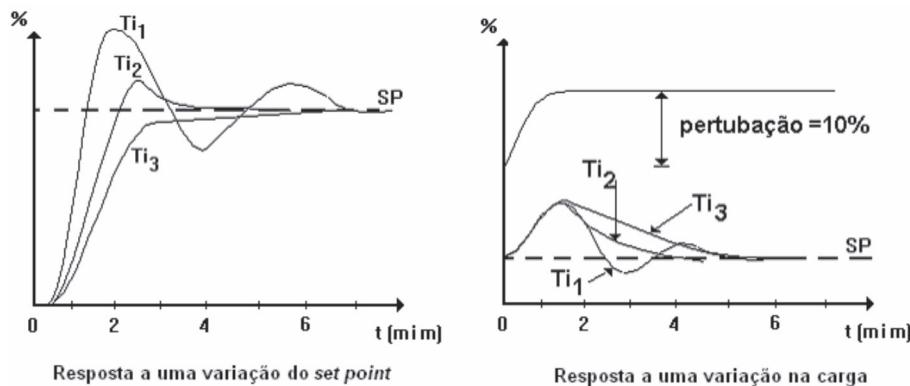
$$s = \frac{1}{Ti} \int (PV - SP) dt$$

Podemos simplificar esta equação com o conceito que a integral é o somatório do erro durante um intervalo de tempo.

A ação integral é geralmente associada à ação proporcional. Desta forma, o controlador recebe o nome de Controlador PI.

A principal desvantagem da ação integral é o *overshoot* (sobresinal), gerado toda vez que se muda o valor do SP, ou quando é gerada uma variação na carga.

**Figura 85 – Respostas de um controle PI em um processo estável (SENAI. ES, 1999, p. 50)**



Como na ação proporcional, um aumento excessivo da ação integral (diminuição do tempo de integral) pode levar a malha à oscilação, ou seja, à instabilidade, para estudar o efeito da ação integral sobre um processo estável, tomamos com exemplo o trocador de calor da Figura 78. A resposta da temperatura em função de  $Ti$  é mostrada na Figura 81. Podemos observar o valor ótimo de  $Ti$  e o compromisso entre a rapidez e a estabilidade.

O comportamento da ação integral sobre um processo instável é simplesmente o mesmo do que o do processo estável. É interessante notar que é necessário utilizar a ação integral para anular o *erro de offset*, que é produzido em função das perturbações. Após uma mudança de *set point*, o erro de *offset* irá se anular naturalmente sem a ação integral, pois o processo instável já é um integrador por natureza. Mas utilizando a ação integral, a resposta é mais rápida que com um controlador proporcional puro.

### Ação derivativa

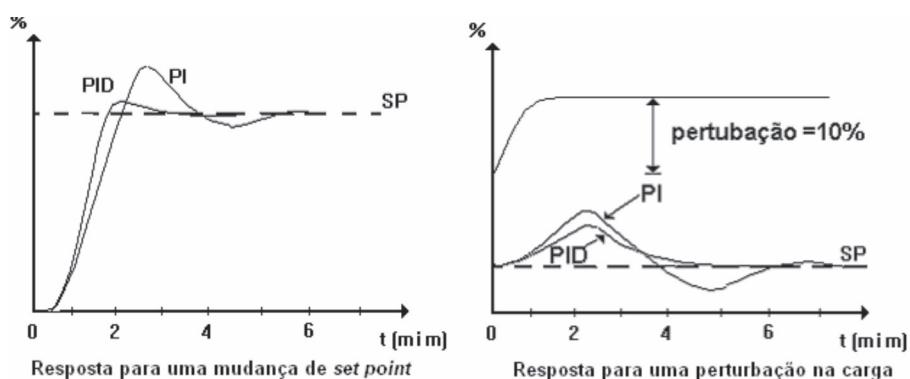
A função da ação derivativa é de compensar o efeito do tempo morto do processo. Ela tem um efeito de estabilizar a malha, mas um valor excessivo pode levar a mesma à oscilação (instabilidade). A saída do controlador derivativo é proporcional à velocidade do erro, e tem como equação:

$$s = Td \cdot \frac{d(PV - SP)}{dt}$$

Notemos que a ação derivativa não pode ser usada sozinha. Ela depende das ações integral e proporcional, para que possa ser implementada.

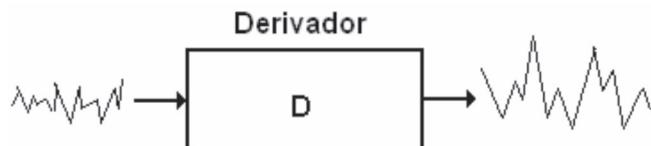
As Figuras 86 e 87 ilustram os efeitos da derivada sobre um processo com grande tempo morto.

**Figura 86 – Respostas de um controle PI e PID em um processo estável (SENAI. ES, 1999, p. 51)**



Se a medida possuir ruídos, a ação derivativa irá amplificar estes ruídos, o que torna sua utilização delicada ou impossível dependendo do processo. Veja a Figura 87.

**Figura 87 – Amplificação de ruído pela derivada (SENAI. ES, 1999, p. 51)**



A solução consiste em utilizar um módulo de derivada filtrada com ganho transitório ajustável. Em todos os algoritmos PID, a derivada é filtrada, mas o valor do ganho transitório raramente é ajustável nos controladores monoblocos; às vezes ele é ajustável nos módulos PID dos controladores digitais.

## Controle *feed-forward*

Estudaremos dois tipos de controle neste capítulo: *feed-forward* e *split-range*. O primeiro que será visto é o controle *feed-forward*.

### Controle *feed-forward*

O controle de *feed-forward* necessita de duas malhas de controle para que ele possa funcionar. A seguir apresentamos um exemplo que ilustram como interagem estas malhas.

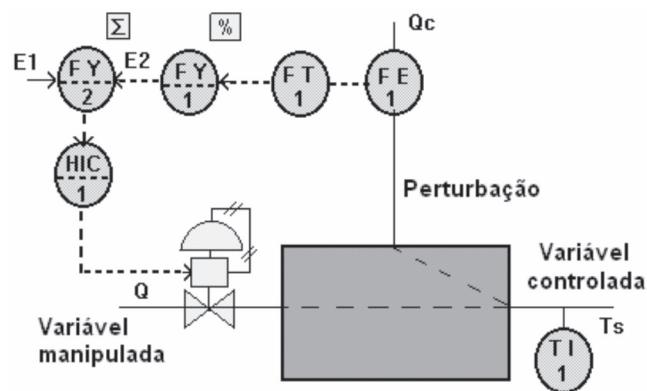
O esquema da Figura 88 representa uma malha aberta. Para o estudo e sua otimização, devemos isolar as malhas fechadas, colocando o controlador TIC1 em manual.

A malha aberta é constituída por um relé FY1 (proporcional) que permitirá a correção na válvula em função da perturbação Qc. A saída do relé FY1 atuará por meio do relé somador FY2 e do controlador manual sobre a válvula de controle. O controlador auto/manual HIC1 serve para a atuação manual do forno. No caso de HIC1 está em manual, o relé somador não atuará no processo.

O relé proporcional FY1 realizará a função de correção. Podemos também associar a ele uma função dinâmica como:

- derivada filtrada
- filtro de primeira ordem.
- *lead e lag* ( avanço e retardo ).

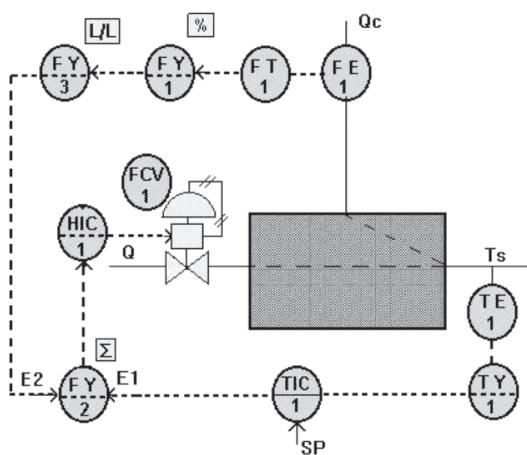
**Figura 88 – Diagrama em blocos da malha aberta (SENAI. ES, 1999, p. 57)**



### Associação da malha aberta com a malha fechada

As duas malhas são complementares e conjugam suas ações por intermédio do somador FY2 como mostra o diagrama a seguir.

**Figura 89 – Diagrama em blocos da malha aberta + fechada. (SENAI. ES, 1999, p.57)**



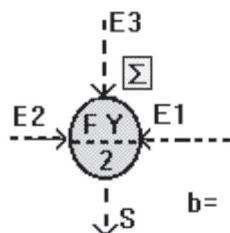
A malha aberta agirá imediatamente e unicamente em função das variações da vazão de carga, e não por meio da variável controlada.

A malha fechada atuará diretamente ou indiretamente sobre todas as perturbações do processo, mas é incapaz de corrigir uma perturbação no momento em que ela acontece, e mais, se o tempo morto for grande em relação à constante de tempo do processo, e as perturbações do processo consideráveis, sua ação é limitada.

### Estudo do relé somador

O somador é um operador estático que realiza a adição e a subtração dos sinais de suas entradas. Sua representação simbólica com três entradas é representada na Figura 90.

**Figura 90 – Diagrama do somador**



Sua equação é, por exemplo:

$$S = E1 \pm E2 \pm E3 \pm b \text{ ou}$$

$$S = K1.E1 \pm K2.E2 \pm K3.E3 \pm b$$

Onde  $K1, K2$  e  $K3$  são coeficientes que atuam nas entradas correspondentes e  $b$  é um valor de deslocamento (*bias*).  $E1, E2$  e  $E3$  são os sinais de entrada expressados em percentual. Observe o seguinte exemplo.

Um somador com equação:  $S = K_1 \cdot E_1 (+/-) K_2 \cdot E_2 (+/-) K_3 \cdot E_3 (+/-) b$

Para duas entradas:  $E_1 = 50\% (12mA)$  e  $E_3 = 50\% (12mA)$   
e os ajustes:  $K_1 = 1$   $K_2 = 0$  e  $K_3 = -0,5$

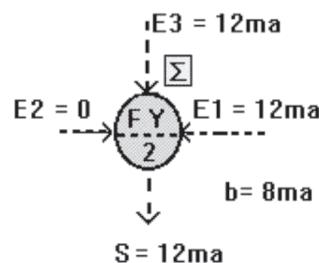
Se desejarmos a saída em 50%, é necessário ajustar o valor de  $b = 25\%$

Então:

$$S = (1 \times 50) + 0 + (-0,5 \times 50) + 25 \quad S = 50\%$$

Veja o esquema a seguir

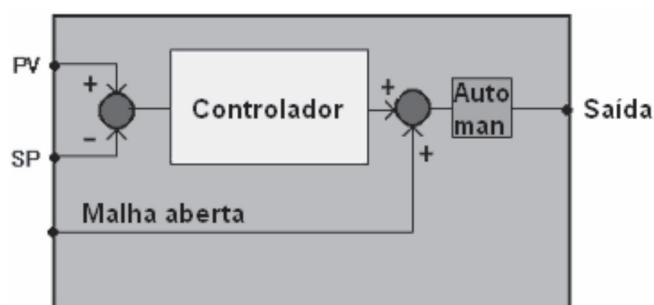
**Figura 91 – Somador do exemplo acima**



Os valores de ajuste da malha aberta são válidos em torno do ponto de funcionamento. Observe na Figura 92 que, se o ponto de funcionamento variar em função da vazão de carga  $Q_c$  ou em função da variação do *set point*, os valores ajustados nos relés deveram ser todos recalibrados.

É comum utilizar no caso de uma associação da malha fechada com a malha aberta um controlador chamado de controlador preditivo (*feed-forward*) como é mostrado no esquema a seguir.

**Figura 92 – Controlador com entrada *feed-forward***

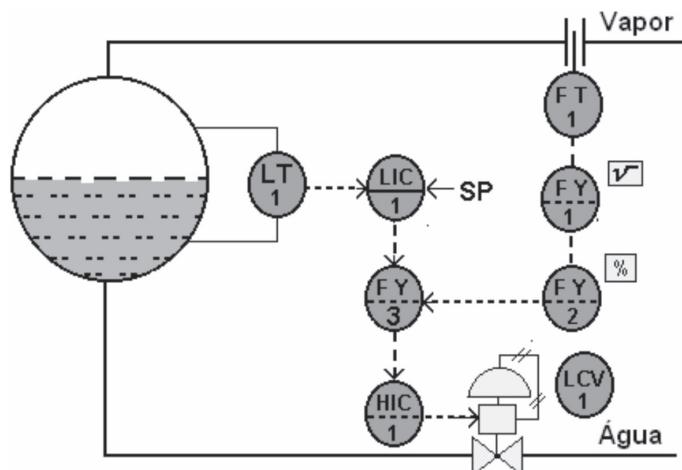


Para ajustar o ponto de funcionamento da malha aberta, podemos isolar a malha fechada ajustando uma ação proporcional mínima e uma ação integral mínima (tempo de integral máximo).

### Exemplo de controle *feed-forward*

A Figura 93 representa um controle de nível a dois elementos (nível e vapor) sobre a alimentação de uma caldeira de baixa potência. Podemos observar os princípios de malha aberta e fechada associadas.

**Figura 93 – Controle de nível a dois elementos (SENAI. ES, 1999, p. 58)**



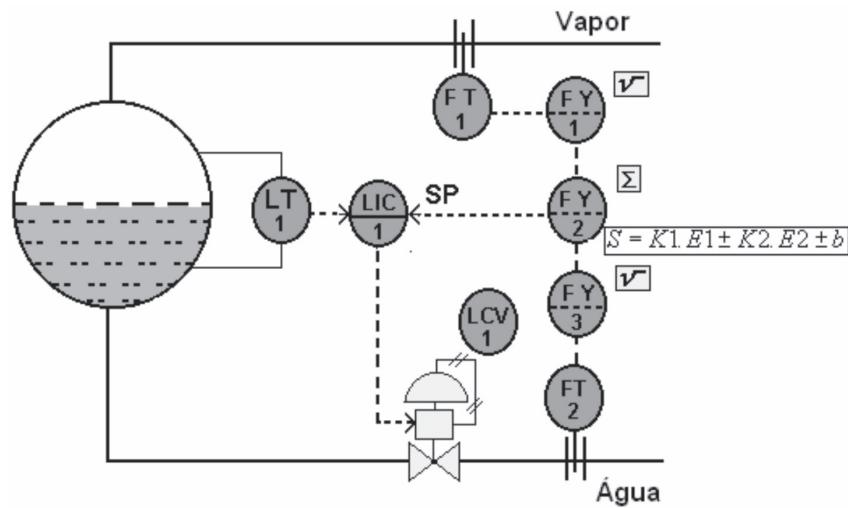
#### Fique ligado!

A malha aberta atua quando houver uma variação na vazão de vapor, e a malha fechada irá atuar quando houver uma variação de nível.

A Figura 94 mostra um controle de nível a três elementos (nível, vapor e água) sobre a alimentação de uma caldeira de média potência.

Existe uma comparação estática e dinâmica dos fenômenos de aumentar e diminuir o nível da caldeira em função de uma variação de carga.

Figura 94 – Controle de nível a três elementos (SENAI. ES, 1999, p. 58)

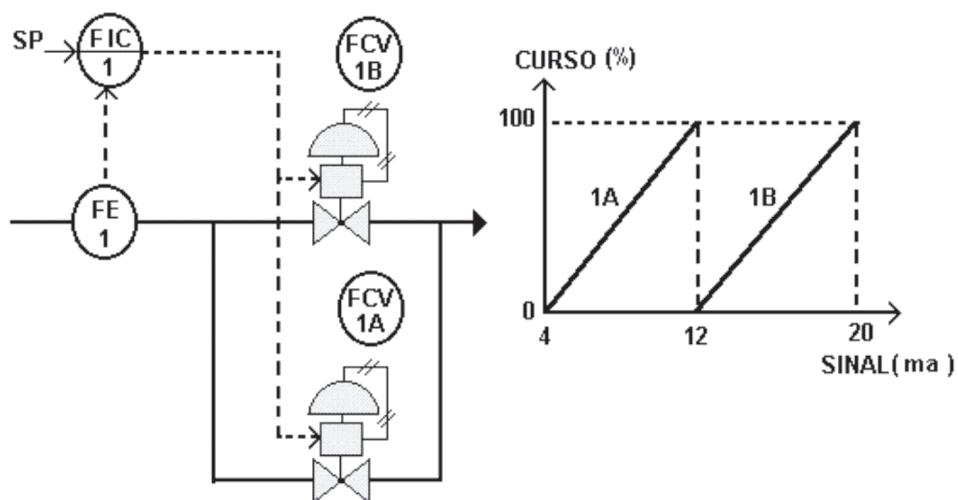


### Controle split-range

O controle *split-range* (faixa dividida) é uma montagem particular utilizando, no mínimo, duas válvulas de controle comandadas pelo mesmo controlador. Esta montagem é utilizada quando:

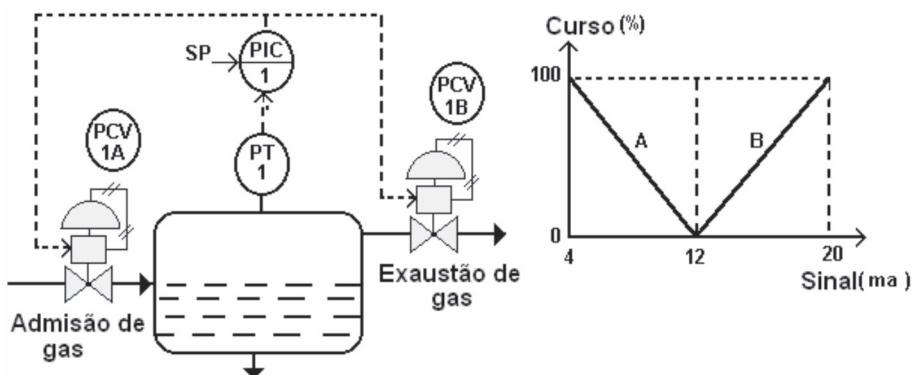
- A rangeabilidade necessária para uma dada aplicação não pode ser obtida com uma única válvula. Veja no esquema a seguir.

Figura 95 – Rangeabilidade com duas válvula (SENAI. ES, 1999, p. 59)



- É necessário utilizar duas variáveis manipuladas de efeitos opostos ou complementares sobre o processo, como é mostrado no esquema a seguir.

**Figura 96 – Válvulas complementares (SENAI. ES, 1999, p. 59)**



A montagem *split-range* necessita utilizar posicionadores que permitam efetuar sobre cada válvula sua curva nominal para uma parte do sinal de saída do controlador.



### Fique ligado!

No controle *split-range*, as características das válvulas e seus ajustes deverão ser escolhidos de tal sorte que o ganho da malha de controle possa ser o mais constante possível.

Acompanhe o seguinte exemplo. Consideremos o exemplo da figura 97. A válvula FCV1A é escolhida com um CV baixo para permitir um controle de vazão mínimo, e a válvula FCV1B é escolhida com um CV elevado para ajustar a vazão máxima.

As válvulas são definidas por:

#### Quadro 15 – Características das válvulas FCV1A e FCV1B

Válvulas	d	CV	Rangeabilidade	Tipo	Ação
FCV 1A	0,9	1	50	linear	direta
FCV 1B	0,3	4	50	igual %	direta

Os posicionadores são ajustados arbitrariamente com os seguintes valores:

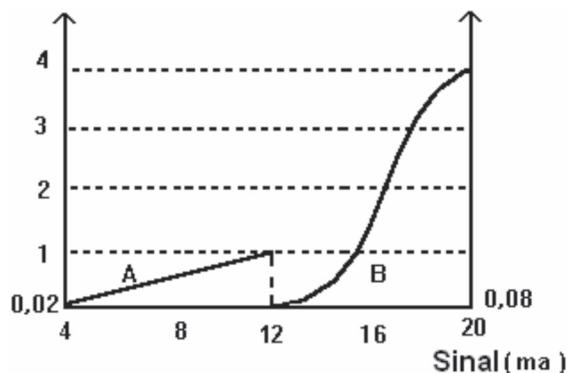
#### Tabela 5 – Valores de ajuste para a saída analógica das válvulas

FCV 1A	4 a 12mA
FCV 1B	12 a 20mA

Podemos notar que, para as válvulas em paralelo, o CV é equivalente à soma dos CVs.

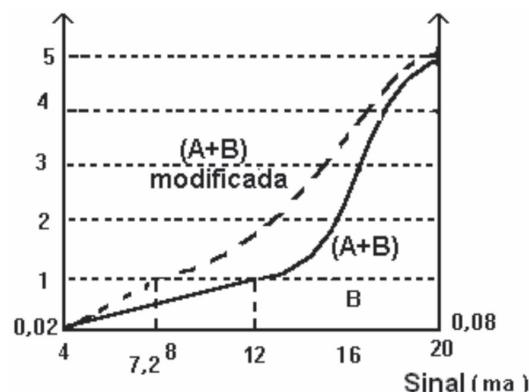
A Figura 97 representa as características instaladas das duas válvulas separadas.

#### Figura 97 – Característica instalada de duas válvulas



A Figura 98 representa a característica instalada total.

#### Figura 98 – Característica instalada total



Observamos na figura:

- uma descontinuidade do ganho da válvula á 12mA. Este inconveniente é minimizado caso o controle de vazão tenha ganho baixo. Esta descontinuidade pode ser reduzida utilizando a válvula FCV1B com uma rangeabilidade mais elevada.
- que a característica total é diferente daquela que obteríamos com uma só válvula.

A característica total pode ser modificada (melhor linearidade) pelos ajustes dos posicionadores. Os novos valores de ajuste podem ser obtidos através de gráficos.

Traçamos uma linha com os valores de CV de 0,02 a 5mA. Para o valor de CV=1, traçamos uma horizontal que corta a linha determinada anteriormente em um ponto. Uma vertical passando por este ponto determina os novos valores ajustados que são:

- Para FCV1A : 4 a 7,2mA.
- Para FCV1B : 7,2 a 10mA.

Estes ajustes não são possíveis em todos os posicionadores. Os controladores digitais compostos por blocos de funções digitais (funções matemáticas) permitem obter os resultados anteriores modificando o sinal de controle das duas válvulas. Se o CV de FCV1A é escolhido por razões econômicas, por ser muito pequeno, isto fará escolher um medidor de vazão de ganho muito alto. A característica instalada total deverá ser próxima ao linear com as escolhas feitas anteriormente.

## Voltando ao desafio

No desafio proposto no início do capítulo, para ajustar a malha de controle, impedindo assim manutenções periódicas por desgaste da válvula de controle, as providências cabíveis são:

- alterar a instabilidade do sistema modificando o valor da ação derivativa, porque ela tenta zerar o erro o mais rápido possível, gerando assim oscilações que são indesejáveis nos processos, principalmente com válvulas de controle na saída. As oscilações geram um desgaste prematuro da válvula, e a solução

é diminuir ou até eliminar esta ação, para que não haja mais o desgaste do equipamento.

## Resumindo

Com o estudo deste capítulo você pode aprender que:

- as ações de um controlador PID em malha fechada podem ser ajustadas para cada tipo de processo;
- o controle *feed-forward* é antecipativo, possibilita corrigir uma grandeza antes que o distúrbio possa ser percebido na saída do processo;
- o controle *split-range* pode ser utilizado para dividir uma vazão ou ter duas vazões, sendo uma vazão complemento da outra.



### Fique ligado!

Discuta e verifique com o técnico instrumentista responsável por sua empresa quais são os tipos de malhas de controle que existem no processo, e se a malha não for de um dos tipos relacionados, consulte o livro *Instrumentação Industrial* que foi relacionado nas referências bibliográficas.

## Aprenda mais

Se você tem acesso à Internet, consulte o site [www.isa.org](http://www.isa.org), e você encontrará mais algumas informações sobre instrumentação e controle.

Para facilitar a leitura deste capítulo, segue um conjunto de definições de termos usados ao longo do texto.

## Glossário

**Analógico** – Instrumento ou sinal que tem uma faixa de valores de tensão ou corrente padronizados.

*Bias* – É um desvio ou tendência nas medidas, que poderá ser corrigido por uma nova calibração.

Calibração *calibration* ou *étalementage* – Operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações de um instrumento de medição correspondentes com as suas incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação do instrumento de medição.

Controlador – Instrumento que a partir da diferença entre o valor desejado (*set point*) e a variável de processo altera o sinal de sua saída.

Controlador PID – São as três ações proporcional, integral e derivativa utilizadas por um controlador, para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

Controle automático – É quando o controlador fica responsável pela atualização da saída (variável manipulada) levando em consideração um erro na entrada.

Controle *feed-forward* – É um controle que trabalha com duas malhas de controle: uma aberta e a outra fechada.

Controle manual – É quando o controlador é desligado do sistema, e um operador (humano) assume, de forma empírica, o controle do processo.

Controle P – É a ação proporcional utilizada por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

Controle PI – São as ações proporcional e integral utilizadas por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

Controle PD – São as ações proporcional e derivativa utilizadas por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

Controle *split-range* – É um controle que divide os sinais de saída em duas faixas para que cada elemento final de controle opere em uma.

Digital ou discreto – Instrumento ou sinal que tem dois estados apenas 1 ou 0 (ligado ou desligado).

*Driver* – são equipamentos capazes de acionar ou controlar os elementos finais de controle.

Entrada – Sinal que é inserido em um equipamento para seu processamento.

Erro – Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.

Linearidade – É quando a leitura do instrumento for linearmente proporcional à grandeza que está sendo medida.

Malha aberta – Malha de controle sem realimentação.

Malha fechada – Malha de controle com realimentação.

*Overshut* ou sobressinal – Oscilações indesejáveis que podem aparecer quando se utiliza o controle integral. Elas normalmente ultrapassam em muito o valor do *set point*, e podem gerar danos ao equipamento ou processo.

Posicionador ou atuador – É o elemento responsável em aplicar a força motriz necessária para o funcionamento da válvula de controle.

Rangeabilidade – é um instrumento que está dentro da faixa de indicação determinada para o mesmo.

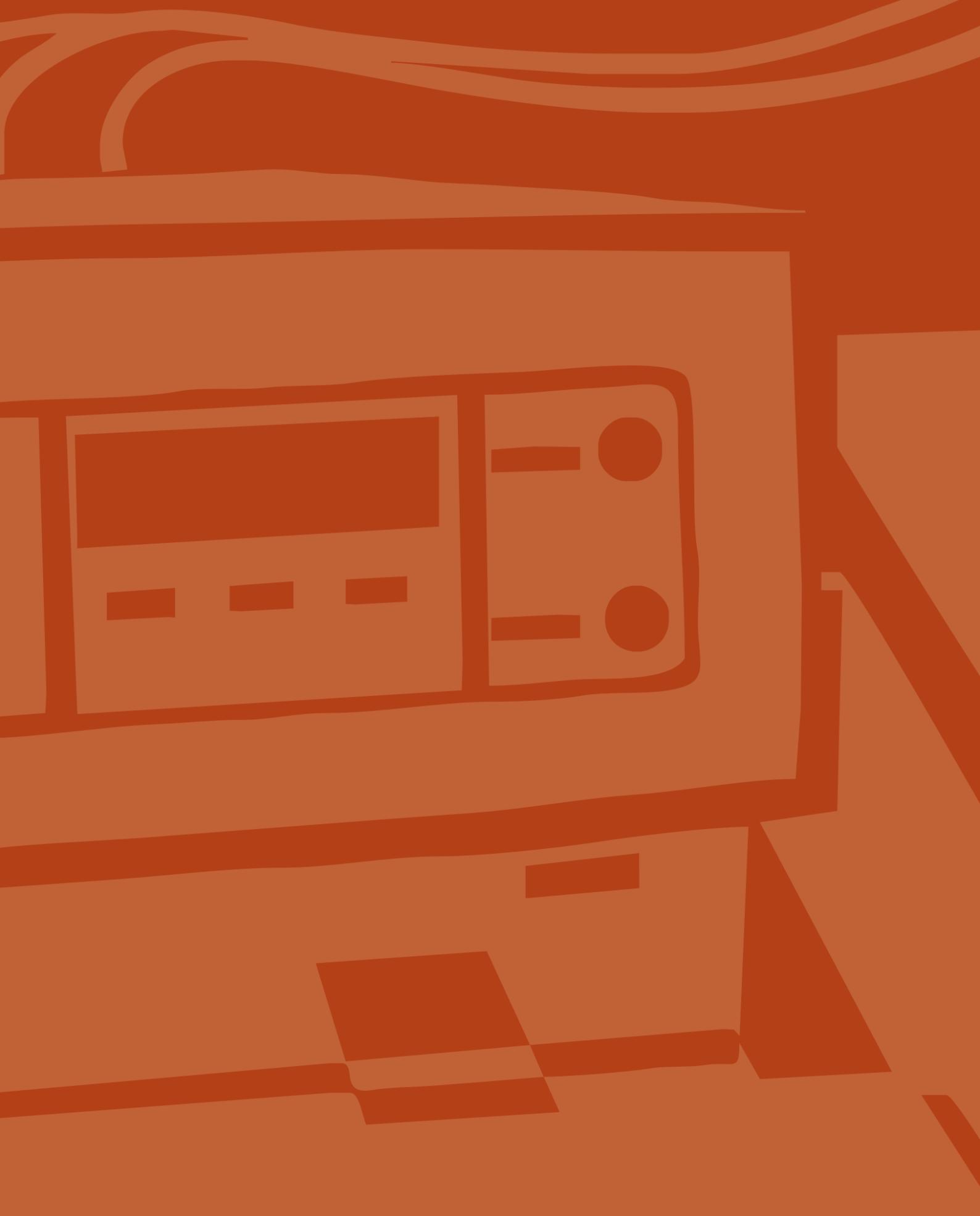
Saída – Sinal que é retirado de um equipamento após seu processamento.

*Set point* (SP) – Variável de referência que será comparada (subtraída) com a variável de processo para encontrar o erro.

Variável de processo (PV) – Variável que será subtraída do *set point* para encontrar o erro.

Variável manipulada (MV) – Variável de saída do controlador que é alterada em função do erro.





## Capítulo 10

---

### OTIMIZAÇÃO NO AJUSTE DE MALHAS DE CONTROLE

#### Iniciando nossa conversa

O foco principal deste capítulo consiste em estudar as modificações das ações de controle e observar os efeitos na variável de processo. Este procedimento é chamado de sintonia, no qual temos a oportunidade de alterar os parâmetros do controlador PID. Cada processo exige valores de sintonia diferentes. É muito importante para a eficientização energética que o sistema de controle esteja bem sintonizado, para evitar desperdícios de energia, economia de combustível, manutenção freqüente em elementos finais de controle.

Veremos ao longo do texto que existem diversos métodos de sintonia para as malhas de controle, como: método de malha fechada, tentativa e erro, método broída etc.

#### Objetivos

Ao estudar este capítulo, seus objetivos são:

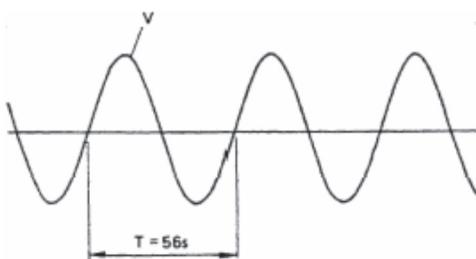
- conhecer o método de sintonia aproximações sucessivas.
- conhecer o método de sintonia *Ziegler e Nichols*
- identificar a performance de resposta da PV, quando ocorrer um distúrbio no processo.

## Um desafio para você

Imagine que você recebe um relatório com o gráfico da Figura 99. Ela mostra o sinal da válvula para um ganho crítico do controlador igual a 4. ( $G_{CR}=4$ ).

Se escolhermos um PID com estrutura série e fazendo uso da tabela de *Ziegler e Nichols*, quais os valores de sintonia obteremos?

**Figura 99 – Resposta oscilatória (SENAI. ES, 1999, p. 68)**



## Continuando nossa conversa

### Método de aproximações sucessivas ou tentativa e erro

Consiste em modificar as ações de controle e observar os efeitos na variável de processo. A modificação das ações continua até a obtenção de uma resposta ótima.

Em função da sua simplicidade, é um dos métodos mais utilizados, mas seu uso fica impraticável em processos com grandes inéncias, ou seja, processos muito lentos (exemplo: controle de temperatura).



**Fique ligado!**

É importante salientar que seja qual for o método utilizado para sintonia, sempre será necessário um conhecimento profundo do processo e do algoritmo do controlador.

A partir de agora usaremos alguns símbolos para os parâmetros de um controle PID.

$T_i$ - Tempo da ação integral
$T_d$ - Tempo da ação derivada
K - Ganho proporcional
$K_C$ - Ganho crítico

O método de sintonia PID por tentativa e erro pode ser resumido nos seguintes passos:

- eliminar a ação integral ( $T_i = \infty$ ) e a ação derivada ( $T_d = 0$ );
- colocar K num valor baixo (exemplo:  $K_c = 0,5$ ) e coloque o controlador em modo automático;
- aumentar o valor de  $K_c$  aos poucos até o processo entrar em ciclo contínuo, nos casos de alteração do *set point* (SP) e da carga;
- reduzir o valor de  $K_c$  pela metade;
- diminuir  $T_i$  aos poucos até o processo entrar em ciclo novamente nos casos de alteração do SP e da carga. Ajuste  $T_i$  para 1/3 do seu valor.

O Valor de  $K_c$ , quando o processo entrar em ciclo contínuo, é chamado de último ganho, sendo representado por  $K_{cu}$ .

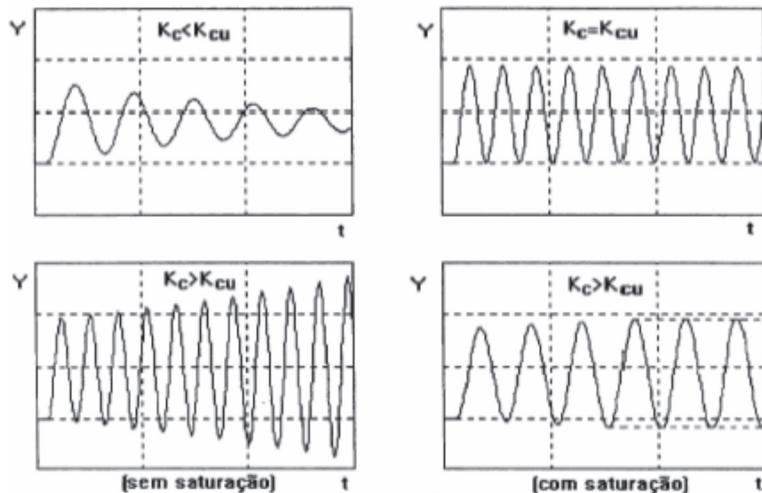


### Atenção!

Durante o teste é importante evitar que a saída do controlador não entre em saturação, pois isto afetaria o método de tentativa e erro, impedindo que se pudesse concluir-lo.

Graficamente temos as situações que podem ser vistas pelos gráficos a seguir.

**Figura 100 – Variação do ganho  $K_c \times K_{cu}$  (SENAI. ES, 1999, p. 60)**



O método de tentativa e erro tem a desvantagem de utilizar muito tempo se o número de tentativas para otimizar  $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$  for muito grande, ou se a dinâmica do processo for muito lenta.

Os testes podem ser muito caros devido à baixa produtividade ou qualidade ruim do produto durante os mesmos. Atente para:

- O ciclo contínuo pode ser dificultado, pois o processo está no limite da estabilidade e qualquer perturbação ou alteração no processo pode ocorrer durante a sintonia e causar uma operação instável ou perigosa (exemplo: disparo da temperatura de um reator químico).
- Este procedimento de sintonia não é aplicável a processos em malha aberta, pois estes processos são instáveis tanto com valores baixos de  $K_c$  como para valores altos de  $K_c$ . A estabilidade em malha fechada só é conseguida para valores intermediários de  $K_c$ .
- Alguns processos simples não têm  $K_{cu}$ .

São mostradas a seguir algumas regras que podem ser úteis na sintonia fina do controlador.

#### Quadro 16– Regras de sintonia fina do controlador.

Regras para a sintonia fina do controlador	
Regra 1	Partindo de uma pré-sintonia, o ajuste do ganho não deve ser superior a 20% do valor inicial, o ideal seria entre 5% a 10%.
Regra 2	Reduza o ganho nos seguintes casos: • A variável controlada tende a entrar em ciclo. • Há um grande <i>overshoot</i> na variável manipulada. • A variável controlada está movendo em torno do <i>set point</i> .
Regra 3	A ação integral pode ser ajustada por um fator de dois inicialmente, e então reduzida até que a sintonia se torne satisfatória. A ação integral deve ser aumentada se a variável controlada estiver lenta na sua aproximação do <i>set point</i> . Uma alteração grande na ação integral deve ser acompanhada de uma alteração no ganho do controlador, isto é, diminua o ganho levemente se o tempo integral for reduzido e vice-versa, se for aumentado.
Regra 4	A ação derivativa deve ser evitada. Se a ação derivativa for necessária, então devem ser compensados com o tempo proporcional e integral, quando alterada a ação derivativa, isto é, feito de forma semelhante ao ajuste da integral.

#### Método Ziegler e Nichols em malha fechada

Este método baseia-se na observação da resposta do processo e do conhecimento da estrutura do controlador. É um dos métodos que permite o cálculo das ações de controle sem a necessidade dos parâmetros do processo.



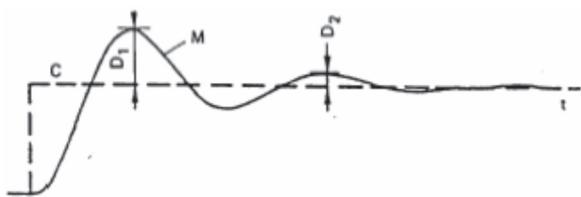
**Fique ligado!**

O método *Ziegler e Nichols* em malha fechada é indicado para processos estáveis e instáveis, mas não se adapta muito bem em malhas rápidas (vazão, por exemplo) e nos processos com tempo morto alto.

O método consiste em colocar a malha de controle em oscilação. O período das oscilações e ganho crítico do controlador  $G_{CR}$ , que ocasiona oscilações, permite os cálculos das ações a serem fixadas no controlador. O cálculo depende da estrutura do controlador utilizado e do modo de regulação escolhido (P, PI e PID).

O critério de performance escolhido por *Ziegler e Nichols* foi o de resposta de amortecimento de  $\frac{1}{4}$  como é mostrado na Figura 101.

**Figura 101 – Resposta com amortecimento de  $\frac{1}{4}$  (SENAI. ES, 1999, p. 66)**



Para executar o método de *Ziegler e Nichols* em malha fechada, são necessários alguns procedimentos:

- 1) Determinação de  $G_{CR}$  e  $T$

Obs.:  $G_{CR} = K_{cu}$

- 2) Com o controlador em manual, estabilizar o processo em torno do ponto de funcionamento.

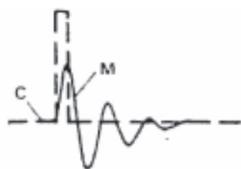
- 3) Fixar o controlador  $T_d=0$  e  $T_i=\infty$ , ou seja, controlador proporcional puro.

- 4) Colocar *set point* igual ao valor da variável do processo (PV) e passar o controlador para automático.

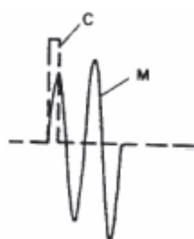
- 5) Efetuar um degrau no *set point*  $\Delta SP$  de duração limitada. O valor de  $\Delta SP$  deverá ser escolhido de modo que a amplitude de oscilação não exceda a 10%. Durante o teste é importante que a saída do controlador não sature.

- 6) Observar o sinal da variável do processo (PV) ou da variável manipulada (MV) na carta de um registrador.

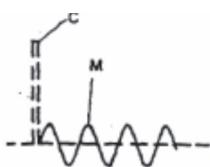
Se a variação de PV estiver amortecida, como apresentada na figura a seguir, aumentar o ganho proporcional e refazer a excitação.

**Figura 102 – Resposta amortecida (SENAI. ES, 1999, p. 66)**

Se a oscilação de PV for divergente, como mostra a Figura 103, diminuir o ganho proporcional.

**Figura 103 – Resposta divergente (SENAI. ES, 1999, p. 67)**

O teste termina quando se obtém uma oscilação contínua na variável do processo como é mostrado na Figura 104.

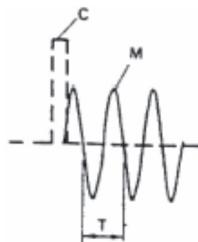
**Figura 104 – Resposta oscilatória (SENAI. ES, 1999, p. 67)**

7) Anotar o ganho do controlador que ocasionou a oscilação contínua ( $G_{CR}$ ).

8) Diminuir o ganho proporcional para estabilizar a variável controlada (PV).

9) Medir o período T, como é mostrado na Figura 105.

Figura 105 – Resposta oscilatória (SENAI. ES, 1999, p. 67)



### Cálculo das ações do controlador

Obtendo os parâmetros  $T$  e  $G_{CR}$ , usar a Tabela 6 para calcular as ações a serem fixadas no controlador.

Tabela 6 – Método de Ziegler e Nichols para processos estáveis e instáveis

Ações	Modos de regulação					
	P	PI série	PI paralelo	PID série	PID paralelo	PID misto
$G_r$	$\frac{G_{rc}}{2}$	$\frac{G_{rc}}{2,2}$	$\frac{G_{rc}}{2,2}$	$\frac{G_{rc}}{3,3}$	$\frac{G_{rc}}{1,7}$	$\frac{G_{rc}}{1,7}$
$T_i$	Máximo	$\frac{T}{1,2}$	$\frac{2.T}{G_{rc}}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{0,85.T}{G_{rc}}$	$\frac{T}{2}$
$T_d$	0	0	0	$\frac{T}{4}$	$\frac{T.G_{rc}}{13,3}$	$\frac{T}{8}$

(SENAI. ES, 1999, p.68)

### Voltando ao desafio

Retornando ao desafio proposto no início do capítulo 10, veja as observações a seguir.

No relatório que você recebeu, com um gráfico que mostra o sinal da válvula para um ganho crítico, podemos verificar que o valor de ganho crítico do controlador é igual a 4 ( $GCR=4$ ), e se escolhermos um PID com estrutura série; fazendo uso da tabela apresentada no item que explica o Método de Ziegler e Nichols para malha fechada, os valores de sintonia serão:

- obtém-se da figura que foi colocada no desafio do início do capítulo 10 o período de:  $T = 56\text{s}$ .
- se escolhermos um PID com estrutura série e fazendo uso da tabela, temos:

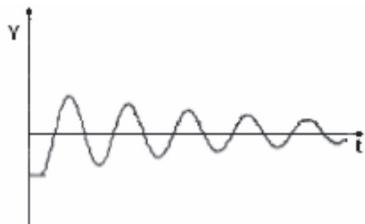
$$\text{Ganho } G_r = \frac{G_{cr}}{3,3} \text{ Então } G_r = 1,2$$

$$\text{Tempo de integração } T_i = \frac{T}{4} \quad T_i = \frac{56}{4} \quad T_i = 14 \text{ segundos}$$

$$\text{Tempo derivativo } T_d = \frac{T}{4} \quad T_d = \frac{56}{4} \quad T_d = 14 \text{ segundos}$$

- fixando os valores calculados no controlador e aplicando um degrau no SP, obtém-se uma resposta amortecida como da Figura 106:

**Figura 106 – Resposta amortecida para a válvula de controle quando aplicado um degrau no SP**



## Resumindo

Com a leitura do Capítulo 10, você pode aprender sobre:

- Sintonia de malha.
- Método de sintonia erro e tentativa.
- Método de sintonia *Ziegler e Nichols*.
- Medição e avaliação da curva de resposta do controlador com um registrador.

## Aprenda mais

Para consolidar tudo o que estudou neste capítulo, verifique com o técnico instrumentista responsável por sua empresa como está a sintonia das malhas de controle do processo, e em caso de dúvidas, consulte o livro *Instrumentação Industrial* que foi relacionado nas referências deste material.

## Glossário

Nem sempre é fácil entender todas as palavras usadas em um texto. Pensando nisso, apresentamos a seguir as definições de alguns termos usados no texto.

**Analógico** – Instrumento ou sinal que tem uma faixa de valores de tensão ou corrente padronizados.

**Controlador** – Instrumento que a partir da diferença entre o valor desejado (*set point*) e a variável de processo, altera o sinal de sua saída.

**Controlador PID** – São as três ações proporcional, integral e derivativa utilizadas por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

**Controle automático** – É quando o controlador fica responsável pela atualização da saída (variável manipulada) levando em consideração um erro na entrada.

**Controle *feed-forward*** – É um controle que trabalha com duas malhas de controle: uma aberta e a outra fechada.

**Controle manual** – É quando o controlador é desligado do sistema, e um operador (humano) assume, de forma empírica, o controle do processo.

**Controle P** – É a ação proporcional utilizada por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

**Controle PI** – São as ações proporcional e integral utilizadas por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

Controle PD – São as ações proporcional e derivativa utilizadas por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

Controle *split-range* – É um controle que divide os sinais de saída em duas faixas para que cada elemento final de controle opere em uma.

Digital ou discreto – Instrumento ou sinal que tem dois estados apenas: 1 ou 0 (ligado ou desligado).

Malha aberta – Malha de controle sem realimentação.

Malha fechada – Malha de controle com realimentação.

*Offset* – É a diferença entre o valor medido e o real, ou de referência.

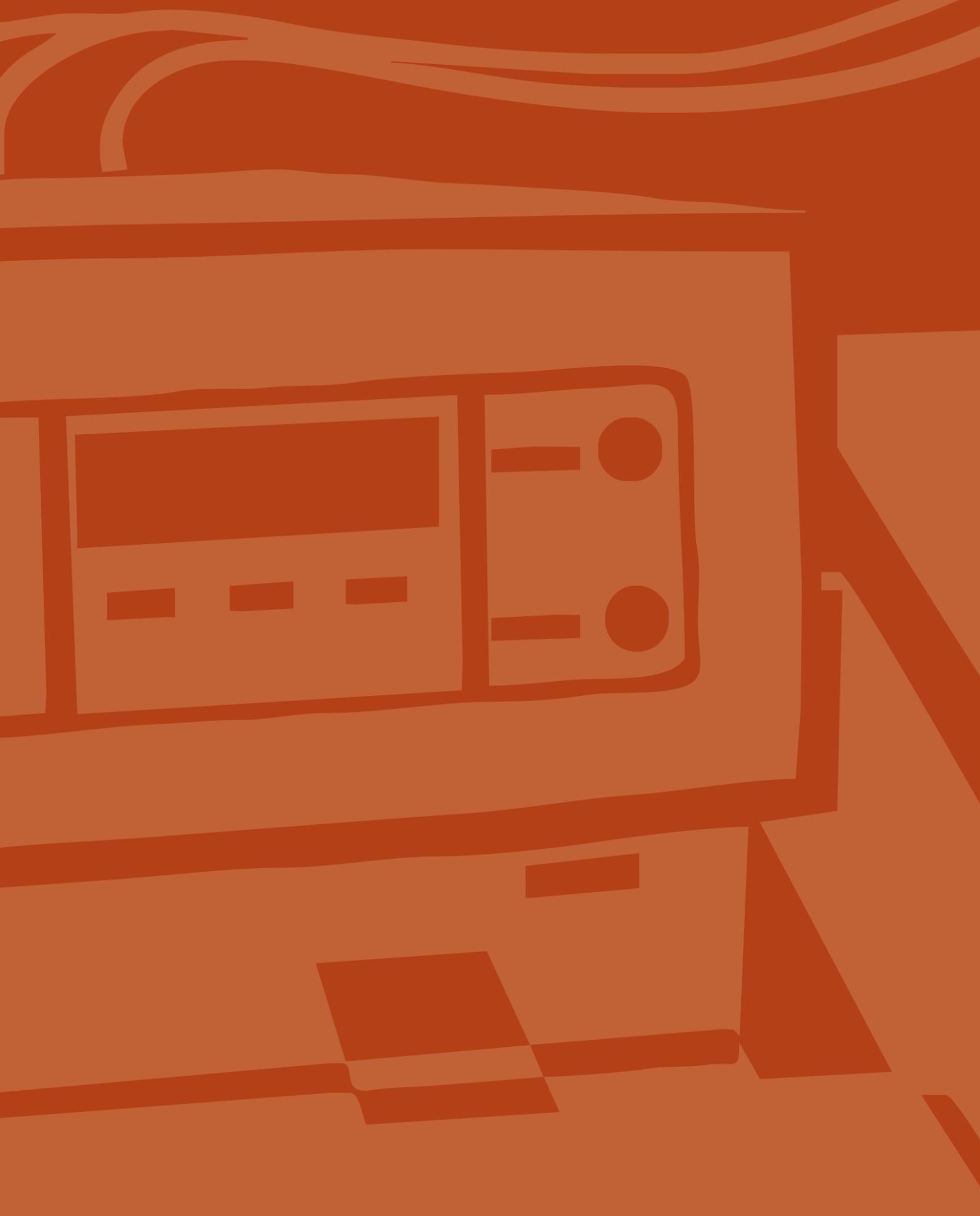
*Overshut* ou sobressinal – Oscilações indesejáveis que podem aparecer quando se utiliza o controle integral. Elas normalmente ultrapassam em muito o valor do set point, e podem gerar danos ao equipamento ou processo.

Processo – Equipamento ou meio físico que precisa ser controlado ou monitorado de forma a transformar a matéria-prima em um produto.

*Set point* (SP) – Variável de referência que será comparada (subtraída) com a variável de processo para encontrar o erro.

Variável de processo (PV) – Variável que será subtraída do *set point* para encontrar o erro.

Variável manipulada (MV) – Variável de saída do controlador que é alterada em função do erro.



## Glossário geral de instrumentação e controle

---

Apresentamos a seguir uma lista dos termos mais importantes estudados neste módulo sobre as áreas de instrumentação e controle. Estude-os com cuidado, pois eles serão muitos úteis na sua profissão.

**Aceleração centrípeta** – É a aceleração originada pela variação da direção do vetor velocidade de um móvel, característico de movimentos curvilíneos ou circulares.

**Analógico** – Instrumento ou sinal que tem uma faixa de valores de tensão ou corrente padronizados.

**Bias** – É um desvio ou tendência nas medidas, que poderá ser corrigido por uma nova calibração.

**Calibração calibration ou étalonnage** – Operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações de um instrumento de medição correspondentes com as suas incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação do instrumento de medição.  
**Classe de exatidão** – Classe de instrumentos de medição que satisfazem a certas exigências metrológicas destinadas a conservar os erros dentro de limites especificados.

**CLP** – É um aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas, tais como lógica, seqüenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando, por meio de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos (segundo a NEMA - National Electrical Manufacturers Associa-

tion).Controlador – Instrumento que, a partir da diferença entre o valor desejado (*set point*) e a variável de processo, altera o sinal de sua saída.

Controlador PID – São as três ações proporcional, integral e derivativa utilizadas por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

Controle automático – É quando o controlador fica responsável pela atualização da saída (variável manipulada) levando em consideração um erro na entrada.

Controle *feed-forward* – É um controle que trabalha com duas malhas de controle: uma aberta e a outra fechada.

Controle manual – É quando o controlador é desligado do sistema, e um operador (humano) assume, de forma empírica, o controle do processo.

Controle P – É a ação proporcional utilizada por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

Controle PI – São as ações proporcional e integral utilizadas por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

Controle PD - São as ações proporcional e derivativa utilizadas por um controlador para alterar o valor da saída em função de um erro na entrada.

Controle *split-range* – É um controle que divide os sinais de saída em duas faixas para que cada elemento final de controle opere em uma.

Constante de tempo ou *setting time* – É o tempo gasto do início de variação da saída até a mesma atingir 63,2% do valor esperado como final.

Criogenia – Termo usado para a medição de baixas temperaturas; próximas ao zero absoluto.

Ductibilidade – É a propriedade física dos materiais de suportar a deformação plástica, sob a ação de cargas, sem se romper ou fraturar.

*Damper* – Válvula de controle de fluxo de um fluido, normalmente gasoso.

Degrau – É uma variação instantânea da grandeza medida de um valor constante para outro.

Deprimogênios – São elementos primários que possibilitam efetuar a medição de vazão a partir de uma pressão diferencial.

Documentação – É o levantamento de uma tabela de dados ou de um gráfico que relate a congruência das medidas do sistema com as referências padrões.

Digital ou discreto – Instrumento ou sinal que tem dois estados apenas: 1 ou 0 (ligado ou desligado).

*Driver* – são equipamentos capazes de acionar ou controlar os elementos finais de controle.

Entrada – Sinal que é inserido em um equipamento para seu processamento.

Erro – Diferença entre o *set point* e a variável de processo, e que é necessária para o controle da variável manipulada.

Exatidão – É o grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando.

Elemento final de controle – São mecanismos que variam a quantidade de material ou de energia em resposta ao sinal enviado pelo controlador.

Estanques – São aqueles ambientes que não possuem comunicação entre si.

Flanges – São terminações colocadas nas extremidades dos tubos para fazerem a conexão entre eles ou para a instalação de instrumentos.

Fluxograma – São diagramas (desenhos) que representam as máquinas, equipamentos e instrumentos que são instalados no processo.

Gabarito – Régua graduada que é usada para fazer medidas métricas.

Histerese – É a curva de resposta do instrumento quando a variável lida está aumentando ou diminuindo.

Indicador – Instrumento de medição que apresenta uma indicação.

Jusante – É um ponto de tomada de medição localizado depois de uma referência do tubo ou canal onde passa um fluido.

Linearidade - É quando a leitura do instrumento for linearmente proporcional à grandeza que está sendo medida.

Malha aberta – Malha de controle sem realimentação.

Malha fechada – Malha de controle com realimentação.

Mnemônicos – São siglas que representam uma grandeza física ou característica de um equipamento.

Montante – É um ponto de tomada de medição localizado antes de uma referência do tubo ou canal.

*Offset* – É a diferença entre o valor medido e o real, ou de referência.

*Overshut* ou sobresinal – Oscilações indesejáveis que podem aparecer quando se utiliza o controle integral. Elas normalmente ultrapassam em muito o valor do *set point* e podem gerar danos ao equipamento ou processo.

Perda de carga – É a queda de pressão sofrida pelo fluido ao atravessar uma tubulação.

Posicionador ou atuador – é o elemento responsável em aplicar a força motriz necessária para o funcionamento da válvula de controle.

Pressão absoluta – É a pressão positiva a partir do vácuo perfeito, ou seja, a soma da pressão atmosférica do local e a pressão manométrica.

Pressão atmosférica – É a força exercida pela atmosfera na superfície terrestre.

Pressão barométrica – É a medida da força exercida pela atmosfera, considerando, como referência, a pressão do zero absoluto (no espaço).

Pressão manométrica – É a pressão medida em relação à pressão atmosférica existente no local, podendo ser positiva ou negativa.

Pressão diferencial – É o resultado da diferença de duas pressões medidas. Em outras palavras, é a pressão medida em qualquer ponto, menos no ponto zero de referência da pressão atmosférica.

Piezelétrico – Sensor que se baseia na deformação elástica de um cristal, produzindo um potencial elétrico proporcional a esta deformação.

Pirometria – Termo usado para medição de altas temperaturas na faixa onde efeitos de radiação térmica passam a se manifestar.

Ponte de *Wheatstone* – Circuito elétrico formado por quatro resistências (ou componentes equivalentes) dispostos na forma de um losango que fornecem tensão zero quando estão em equilíbrio.

Processo – Equipamento ou meio físico que precisa ser controlado ou monitorado de forma a transformar a matéria-prima em um produto.

Rampa – É uma variação do sinal a uma taxa constante no tempo.

Rangeabilidade – É um instrumento que está dentro da faixa de indicação determinada para o mesmo.

*Range* – Faixa de indicação ou alcance de um instrumento.

Registrador – Instrumento de medição que fornece um registro da indicação.

Repetibilidade – É o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuados sobre as mesmas condições de medição.

Resolução – É a menor diferença entre indicações de um dispositivo indicador que pode ser significativamente percebida.

Saída – Sinal que é retirado de um equipamento após seu processamento.

**Sensibilidade** – É a resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação do estímulo.

**Set point (SP)** – Variável de referência que será comparada (subtraída) com a variável de processo para encontrar o erro.

**Span** – Diferença entre o maior e menor valor de medição do instrumento.

**Strain gauge** – É um dispositivo que mede a deformação elástica sofrida pelos sólidos quando estes são submetidos ao esforço de tração ou compressão.

**Tempo morto** – É o tempo gasto entre a aplicação de um sinal na entrada e o início da resposta de um instrumento.

**Subdimensionamento** – Dimensionamento de um instrumento abaixo da sua capacidade de percepção da variável a ser medida ou controlada.

**Superdimensionamento** – Dimensionamento de um instrumento muito além da sua capacidade de percepção da variável a ser medida ou controlada.

**TAG** – Símbolo formado por letras que representam um equipamento ou máquina instalado em um processo industrial.

**Tempo de subida ou rising time** – É o tempo necessário para a resposta do instrumento excursionar dos 10% aos 90% da variação que o degrau de entrada irá provocar na saída, entre os valores permanentes, inicial e final.

**Tempo Morto** – É o tempo gasto entre o instante de aplicação do sinal e o início da resposta do instrumento (a saída é atrasada com relação à entrada).

**Termometria** – Termo abrangente usado para medição das mais diversas temperaturas.

**Transdutor** – Instrumento que recebe informações na forma de uma ou mais quantidades físicas e as modifica.

**Transmissor** – São instrumentos que detectam as variações na variável medida/controlada através do elemento primário e transmitem-na à distância. O elemen-

to primário pode ou não fazer parte integrante do transmissor.

Variável de processo (PV) – Variável que será subtraída do set point para encontrar o erro.

Variável manipulada (MV) – Variável de saída do controlador que é alterada em função do erro.

Vazão volumétrica – É igual à quantidade de volume que escoa através de uma seção em um intervalo de tempo considerado.

Vazão mássica – É igual à quantidade de massa de um fluido que atravessa a seção de uma tubulação por unidade de tempo.

Vazão gravitacional – É igual à quantidade de peso que passa por uma certa seção por unidade de tempo.

*Vena contracta* – É o ponto da tubulação onde se tem a pressão mais baixa devido a um estrangulamento do fluxo.

Zero do instrumento – É o limite inferior da faixa. Não é necessariamente, o zero numérico. Se tivermos um instrumento indicando o seu menor valor na faixa, dizemos que este valor é o zero do instrumento, ou seja, é o valor mínimo da sua faixa.

Zona morta – Intervalo máximo no qual um estímulo pode variar em ambos os sentidos, sem produzir variação na resposta de um instrumento de medição.



## Referências

---

AMERICAN NATIONAL STANDARD. **Instrumentation Symbols and Identification:** ANSI/ISA-S5.1-1984 (R 1992). Research Tringle Park: ANSI/ISA, 1992. 70 p.

BEGA, Egídio A. et al. **Instrumentação industrial.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 583 p.

BORTONI, Edson da Costa. **Programa de eficientização energética:** Módulo Instrumentação e Controle. Eletrobrás / Procel, [200-?].

FUPAI. **Conservação de energia:** eficiência energética de instalações e equipamentos Itajubá, MG, 2001. 467 p.

INMETRO. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia.** 4. ed. Rio de Janeiro, 2005. 75 p.

MSPC: artigos e informações técnicas. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br>>. Acesso em: 06 abr. 2007.

REVISTA CONTROLE E AUTOMAÇÃO. São Paulo: Valete, 2006. Mensal.

SENAI. DN. **Normalização de documentos institucionais:** referências. 2. ed. rev. ampl. atual. Brasília, 2002. 84 p.

SENAI. ES. **Fundamentos de controle de processo.** Espírito Santo, 1999. 72 p.

SENAI. ES. **Instrumentação I:** instrumentação básica pressão e nível. Espírito Santo, 1999a. 123 p.

SENAI. ES. **Instrumentação II**: instrumentação básica vazão, temperatura e analítica. Espírito Santo, 1999b. 242 p.

SENAI. ES. **Instrumentação MBR**. Espírito Santo, 1999c. 130p.

STARLING, Antônio N. **Controle e automação I**: introdução a instrumentação industrial. Belo Horizonte, 2003. 102 p.

## Anexo – Check list

---

### **Check list da eficientização energética para instrumentação e controle**

Neste anexo são mostrados alguns tópicos importantes que foram apresentados durante todo o módulo. Estes tópicos servem como um norteador para a eficientização energética bastando, para isso, que você confira junto com os técnicos de manutenção/instrumentação da empresa onde você trabalha cada um destes itens.

Note que, sem a ajuda de um técnico que entenda mais a fundo o processo, ficará difícil responder a esses questionamentos, já que os detalhes mais técnicos não foram totalmente abordados nesta obra.

#### **Instrumentação**

A instrumentação no processo industrial é muito abundante. Desta forma, vamos nos ater *a priori* aos instrumentos mais críticos, ou seja, àqueles que não podem parar. Depois, sim, poderemos então passar a verificar os outros instrumentos.

#### **Quadro 17– Perguntas sobre eficientização voltadas para instrumentação.**

Perguntas sobre eficientização	Sim	Não
Os instrumentos estão sendo calibrados e aferidos com a freqüência de calibração definida pelo fabricante?		
Os instrumentos de campo estão realmente dentro do <i>range</i> (faixa de trabalho) para os valores a serem medidos?		
Os medidores de pressão estão trabalhando na faixa entre 20% a 70% da pressão máxima?		
Os instrumentos de medição de bobina móvel (voltímetros e amperímetros, por exemplo) utilizam o último terço da escala para informar os valores para os quais foram especificados?		

## Controle

Assim como acontece no lado da instrumentação, vamos dar uma ênfase inicial para as malhas de controle principais (mais críticas). Aqui nestes itens teremos uma dificuldade maior se não tivermos a ajuda do técnico de instrumentação responsável pelo processo.

**Quadro 18 – Perguntas sobre eficientização voltadas para instrumentação.**

Perguntas sobre eficientização	Sim	Não
As válvulas de controle estão sendo posicionadas com movimentos abruptos, que possam levar a desgastes mecânicos excessivos?		
Os inversores de freqüência instalados no processo estão parametrizados de forma a evitar as baixas freqüências, provocando assim um aquecimento nos motores elétricos?		
Os motores elétricos ligados a inversores estão sofrendo manutenções periódicas sucessivas?		
As malhas de controle do processo de sua empresa estão bem sintonizadas?		

## Soluções para os problemas de eficientização

Não é possível aqui conseguir atender a todos os casos que porventura venham a aparecer no processo de sua empresa, porém estamos listando abaixo algumas das soluções que podem nortear ou prevenir os problemas encontrados.

- Todo instrumento novo que for adquirido pela empresa deve ser calibrado inicialmente, e deve ser verificado junto do fabricante ou técnico instrumen-tista responsável qual é a periodicidade de calibração deste instrumento.
- algumas soluções básicas que podem resolver seus problemas quanto à eficientezação na parte de controle:
- verifique a periodicidade de manutenções corretivas das válvulas de controle;
- confira os parâmetros dos inversores e qual é a periodicidade de manutenções corretivas em motores ligados em inversores de freqüência;
- caso ocorram grandes desperdícios de energia e/ou matéria-prima, no pro-cesso, verifique a sintonia nas malhas de controle.



