

INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

NA ENGENHARIA DE PROCESSOS

do analógico ao digital



Ivan Carlos Franco



INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL NA ENGENHARIA DE PROCESSOS

Do analógico ao Digital

Ivan Carlos Franco

A **SAL - Científica Acadêmica Libri** é uma plataforma dedicada à preservação e disseminação exclusiva da produção didática, científica e intelectual de docentes, pesquisadores, funcionários e estudantes de instituições de ensino superior. Sem fins lucrativos, a SAL adota a filosofia do acesso aberto em sua concepção. O portal utiliza a plataforma **OMP – Open Monograph Press**, desenvolvida pelo **PKP – Public Knowledge Project**, projetada para hospedar publicações eletrônicas, como e-books, e apoiar a editoração de livros, tanto eletrônicos quanto impressos. Seu foco principal está em editoras universitárias, priorizando a disponibilização de conteúdo em acesso aberto.

O autor e a editora se esforçam para creditar corretamente todos os detentores de direitos autorais de qualquer material utilizado neste livro. Caso alguma identificação tenha sido inadvertidamente omitida, estão à disposição para realizar os devidos ajustes. Os leitores podem enviar seus comentários à SAL pelo e-mail sal@ufv.br.

Aviso aos Leitores

A editora não se responsabiliza por quaisquer danos, perdas ou prejuízos que possam resultar do uso das informações desta publicação. Recomendamos que os leitores tomem todas as precauções de segurança necessárias antes de colocar em prática qualquer informação aqui apresentada. Sempre siga as normas e regulamentos aplicáveis para evitar riscos. O uso das informações é de responsabilidade exclusiva do leitor.



Av. P. H. Rolfs, s/n
DEQ/UFV s. 227 – CEP 36570-900
Viçosa-MG/Brazil
Tel: +55-31-3612-6609
sal@ufv.br
sal.ufv.br

Equipe Editorial

Antonio Marcos de Oliveira Siqueira (UFV, Brazil)
Wagner dos Reis Marques Araújo (UEMG, Brazil)
Aldair Oliveira de Andrade (UFAM, Brazil)
Roberta Ferreira Coelho de Andrade (UFAM, Brazil)

Designer: Ivan Carlos Franco

Imagem da Capa: NanoBanana + Ivan Carlos Franco

Editoração Eletrônica: Equipe SAL

DOI: 10.5281/zenodo.18189468

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Franco, Ivan Carlos
Instrumentação industrial na engenharia de
processos do analógico ao digital [livro
eletrônico] / Ivan Carlos Franco. -- 1. ed. --
Viçosa, MG : Ed. do Autor, 2026.

PDF

Bibliografia.

ISBN 978-65-01-88360-1

1. Automação industrial 2. Engenharia industrial
3. Tecnologia I. Título.

26-328729.0

CDD-670.427

Índices para catálogo sistemático:

1. Automação industrial : Tecnologia 670.427

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

Sumário

INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL.....	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO E CONTROLE.....	5
1.3 MALHAS DE CONTROLE.....	7
1.3.1 <i>Malha aberta</i>	7
1.3.2 <i>Malha fechada</i>	7
TERMINOLOGIA E TELEMETRIA.....	9
2.1 TERMINOLOGIA.....	9
2.2 TELEMETRIA.....	12
DIAGRAMAS: DO FLUXO DE BLOCOS AO P&ID	15
3.1 DIAGRAMAS DE ENGENHARIA.....	15
3.1.1 <i>Diagramas de Blocos – BFD</i>	15
3.1.2 <i>Diagrama de processo – PFD</i>	17
3.1.3 <i>Diagrama de tubulação e instrumentação – P&ID</i>	21
3.2– NORMA ANSI/ISA 5.1.....	22
3.2.1 <i>Símbolos dos instrumentos</i>	22
3.2.2 <i>Identificação funcional</i>	25
MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	29
4.1 CONCEITOS BÁSICOS.....	29
4.1.1 <i>Termometria</i>	29
4.1.2 <i>Temperatura e a escala termométrica</i>	29
4.2 TERMÔMETROS CONVENCIONAIS.....	31
4.3 TERMÔMETROS DE RESISTÊNCIA.....	32
4.3.1 <i>Termômetro de resistência de platina</i>	34
4.4 TERMÔMETRO DE PAR TERMOELÉTRICO (TERMOPARES)	35
4.4.1 <i>Efeitos termoelétricos</i>	36
4.4.2 <i>Leis termoelétricas</i>	37
4.4.3 <i>Tipos de termopares e suas características</i>	37
4.4.4 <i>Compensação da junta de referência</i>	40
4.4.5 <i>Conexões e associações de termopares</i>	41
4.4.6 <i>Erros de ligações em termopares</i>	46
4.5 PIRÔMETROS DE RADIAÇÃO.....	47
MEDIÇÃO DE PRESSÃO.....	49
5.1 CONCEITOS BÁSICOS.....	49
5.2 MEDIDORES DE PRESSÃO.....	51
5.2.1 <i>Manômetros de coluna de líquido</i>	51
Manômetro de coluna em U.....	52
Manômetro de coluna reta vertical.....	52
Manômetro de coluna inclinada.....	53
5.2.2 <i>Manômetros por deformação ou elemento elástico</i>	55
Manômetro de tubo de Bourdon.....	55
Manômetro de fole.....	58
Manômetro de diafragma.....	58
5.2.3 <i>Manômetros com elementos elétricos de pressão</i>	60
Transdutor indutivo.....	60
Transdutor capacitivo.....	61
Transdutor piezoelétrico.....	62
Transdutor piezoresistivo ou extensômetro.....	64
MEDIÇÃO DE VAZÃO.....	65
6.1 CONCEITOS BÁSICOS.....	65
6.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MEDIDORES DE VAZÃO.....	67
6.2.1 <i>Medição por perda de carga variável</i>	67
6.2.2 <i>Medição por área variável</i>	68
6.2.3 <i>Medidores de deslocamento positivo</i>	69
6.3 TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO.....	69
6.3.1 <i>Placa de orifício</i>	69
6.3.2 <i>Tubo de pitot</i>	74
6.3.3 <i>Tubo de Venturi</i>	76
6.3.4 <i>Rotâmetro</i>	77
6.3.5 <i>Disco nutante</i>	79
6.3.6 <i>Rodas ovais</i>	79

6.3.7 Turbina.....	80
6.3.8 Eletromagnético.....	81
6.3.9 Ultrassônico.....	82
6.3.10 Coriolis.....	84
6.3.11 Vórtex.....	85
6.3.12 Térmico.....	86
6.3.13 Calhas Parshall.....	88
MEDIÇÃO DE NÍVEL.....	91
7.1 FATORES DETERMINANTES NA MEDIÇÃO DE NÍVEL EM PROCESSOS INDUSTRIAIS	91
7.2 MEDIDORES POR MÉTODOS DIRETOS	93
7.2.1 Visores de nível.....	93
7.2.2 Flutuadores.....	94
7.2.3 Magnéticos.....	95
7.3 MEDIDORES POR MÉTODOS INDIRETOS.....	96
7.3.1 Deslocadores.....	96
7.3.2 Pressão diferencial.....	97
7.3.3 Borbulhadores.....	99
7.3.4 Capacitivos.....	100
7.3.5 Ultrassom.....	101
7.3.6 Radioativos.....	103
7.3.7 Por pesagem.....	104
7.3.8 Chaves de nível.....	105
ANALISADORES	107
8.1 MEDIÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA (DENSIDADE).....	107
8.1.1 Por carga hidrostática.....	108
8.1.2 Por borbulhadores.....	108
8.1.3 Por Efeito Coriolis.....	109
8.2 MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE.....	109
8.2.1 Viscosímetro de tubo capilar.....	110
Viscosímetro de Ostwald.....	111
Viscosímetro de Saybolt.....	112
8.2.2 Viscosímetro de esfera descendente.....	113
8.2.3 Viscosímetro rotativo.....	113
8.2.4 Viscosímetro por ultrassom.....	114
8.3 MEDIÇÃO DE PH.....	115
8.4 MEDIÇÃO DE UMIDADE	116
8.4.1 Sensor de umidade relativa capacitivo.....	118
8.4.2 Sensor de umidade relativa resistivo.....	118
8.4.3 Sensor de umidade absoluta por condutividade térmica.....	119
8.5 MEDIÇÃO DE TURBIDEZ.....	119
ATUADORES: VÁLVULAS DE CONTROLE	123
9.1 INTRODUÇÃO.....	123
9.2 COMPONENTES DA VÁLVULA DE CONTROLE	124
9.2.1 Atuador.....	125
Atuador pneumático de mola e diafragma.....	125
Atuador pneumático.....	125
Atuadores elétricos.....	126
Atuadores eletro-hidráulico.....	126
Atuadores hidráulicos	126
9.2.2 Corpo e internos	127
9.2.3 Castelo e engaxetamento	127
9.3 CLASSIFICAÇÃO DE VAZAMENTO NA SEDE	128
9.4 VÁLVULAS COM HASTES DE DESLOCAMENTO LINEAR	129
9.4.1 Válvulas globo	129
Sede simples.....	129
Sede dupla.....	130
Três vias.....	131
Corpo Bipartido.....	131
Angular	132
9.4.2 Válvulas tipo diafragma	132
9.4.3 Válvulas tipo guilhotina	133
9.5 VÁLVULAS COM HASTES DE DESLOCAMENTO ROTATIVO.....	134
9.5.1 Borboleta.....	134
9.5.2 Esfera.....	135
9.6 CARACTERÍSTICA DE VAZÃO	135

9.6.1 Característica inerente.....	136
Característica linear.....	136
Característica igual porcentagem.....	136
Característica abertura rápida.....	136
Característica raiz quadrada.....	136
Característica hiperbólica.....	136
9.7 DIMENSIONAMENTO.....	137
9.7.1 Coeficiente de vazão.....	137
9.7.2 Escolha da equação de dimensionamento.....	138
Líquido - escoamento turbulento não estrangulado (subcrítico) sem acessórios.....	140
Líquido - escoamento turbulento estrangulado (crítico) sem acessórios.....	140
Líquido - escoamento não turbulento sem acessórios.....	140
Gás ou vapor - escoamento não estrangulado (subcrítico) sem acessórios.....	140
Gás ou vapor - escoamento estrangulado (crítico) sem acessórios.....	140
Gás ou vapor - escoamento não turbulento sem acessórios.....	140
9.8 SELEÇÃO DA VÁLVULA DE CONTROLE.....	142
CLP – CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL.....	147
10.1 INTRODUÇÃO.....	147
10.2 ESTRUTURA E ARQUITETURA.....	148
10.2.1 Unidade central de processamento.....	149
10.2.2 Memória.....	149
10.2.3 Sistema de entradas e saídas E/S.....	150
Módulos de entrada.....	150
Módulos de saída.....	150
10.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	151
10.4 LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO.....	152
10.4.1 Diagrama Ladder (DL – Diagram Ladder).....	152
A lógica ladder.....	153
10.4.2 Diagrama de Blocos de Função (FBD – Function Block Diagram).....	158
10.4.3 Gráficos de funções sequenciais (SFC – Sequential Function Chart).....	159
10.4.4 Lista de instrução (IL – Instruction List).....	160
10.4.5 Texto Estruturado (ST – Structured Text).....	161
REFERÊNCIAS.....	163

PREFÁCIO

Assim como o autor desta obra, sou docente na área de engenharia voltada para controle e automação de processos industriais. Durante minha carreira, o maior contato foi com alunos de graduação em engenharia química, cuja estratégia de ensino se baseia no fato de que os equipamentos devem operar em regime permanente, e assim devem ser projetados. Entretanto, após apresentar os equipamentos das diversas operações unitárias, assim como os reatores químicos, é necessário alertar para a “vida real”: perturbações indesejadas ocorrem e, por vezes, também pode ser necessário ajustar as vazões de produção para atender diferentes demandas (perturbações conduzidas pelo operador). E isso provoca momentos de regime transiente, mesmo quando a planta industrial está em pleno funcionamento. O mais difícil é a perturbação que a disciplina voltada ao assunto provoca nos alunos. Vejam o depoimento de um deles:

“Professora, passei a maior parte das disciplinas do curso de engenharia química assumindo a ocorrência de estado estacionário nos processos e agora, mais ao final do curso, a senhora quer me dizer que tenho que estudar as variações do processo no tempo? Eu não quero voltar a usar a derivada nos cálculos de balanços do processo! Fica muito mais fácil sem ela...”

Tendo a concordar com o sentimento deste aluno pois, afinal, os cálculos de projeto permanecem apenas algébricos até então. Assim sendo, para que possamos seguir anulando as variações de massa, energia ou momentum nos balanços dos processos e evitar equações diferenciais no tempo, precisamos entender que existem instrumentos e tecnologias apropriadas para manter o processo contínuo em regime estacionário. É sobre isso que o Prof. Ivan discorre de forma fluida e leitura agradável na presente obra: Instrumentação Industrial na Engenharia de Processos – do Analógico ao digital.

O sistema de controle de processos garante a devida tomada de decisões automáticas para que a derivada no tempo permaneça nula, ou seja, para a manutenção de um regime estacionário. Para que esse regime ocorra, são necessários instrumentos de medição das variáveis de processo, assim como são necessários atuadores para mudança de condições operacionais que visem manter as variáveis de processo constantes, ou seguindo uma trajetória pré-definida.

Os instrumentos de monitoramento das variáveis de processos abordados nesta obra são os medidores de temperatura, pressão, vazão e nível, assim como os analisadores de massa específica, viscosidade, pH e umidade. Eles são os mais utilizados em indústrias químicas e de processos.

Ao escrever sobre a variável temperatura, o autor explora os principais conceitos e instrumentos para sua medição, como termômetros de resistência, termopares e termômetros convencionais, destacando seus princípios de funcionamento, vantagens e limitações.

Quando se refere à variável pressão, o autor trata de seus vários tipos de medição como: absoluta, manométrica, diferencial e dinâmica, e detalha os principais princípios envolvidos. Para além de ser usada no alcance de eficiência e do controle dos processos, a medição de pressão é fundamental para garantir a segurança em processos industriais, e pode ser utilizada também como base para inferir nível, vazão e densidade.

A medição de vazão é fundamental para garantir eficiência, o controle e a conformidade em processos industriais, abrangendo escoamentos líquidos, gasosos ou sólidos. As definições de vazão volumétrica e mássica são abordadas na presente obra, destacando fatores cruciais que influenciam a precisão das medições, como: pressão, temperatura e propriedades dos fluidos, como viscosidade e densidade. Ao leitor, o autor oferece a compreensão dos fundamentos da medição de vazão, identificação e seleção do medidor mais adequado para cada aplicação.

Sendo a medição de nível essencial para o controle de processos industriais, gerenciamento de estoques e para a segurança operacional, o autor apresenta um capítulo contendo os princípios teóricos da medição de nível. Ademais, identifica as tecnologias disponíveis e suas aplicações, além de interpretar as principais equações envolvidas no cálculo da variável, visando garantir maior precisão e eficiência nos processos industriais.

Quanto aos analisadores, estes são instrumentos fundamentais para a indústria moderna, por permitirem medições contínuas, precisas e em tempo real de variáveis físico-químicas, como: densidade, viscosidade, pH, umidade e turbidez. Essas variáveis são essenciais quando visamos otimizar um processo e/ou alcançar elevado padrão de controle de qualidade, mantendo a segurança operacional e respeitando a sustentabilidade ambiental. Ao longo do texto, o autor explica os fundamentos físicos das

medições, os tipos de sensores utilizados e as aplicações industriais específicas para cada variável.

E, como o mais importante meio de atuar no processo é sobre a variação de vazão, seja ela de processo, de resfriamento ou aquecimento, o tema sobre válvula de controle é criteriosamente apresentado, incluindo seu dimensionamento. O respectivo capítulo permite ao leitor compreender o papel da válvula como elemento final de malha responsável por modular variáveis como vazão, pressão e temperatura. O autor detalha ainda os métodos de dimensionamento e a seleção das válvulas, com base nas condições de processo e nas características do fluido, apresentando equações normativas e respectivos fatores de correção.

Para além da instrumentação presente na automação industrial, a presente obra dedica um capítulo aos controladores lógicos programáveis (CLP), que normalmente fazem parte da malha de controle na planta. O autor evidencia que tanto o CLP quanto seus periféricos associados são projetados de forma que possam ser facilmente integrados em um sistema de controle industrial e utilizados de maneira simples em todas as funções pretendidas. Ao ler este capítulo, o leitor ficará ciente que, por definição, o CLP consiste em um sistema eletrônico de operação digital, projetado para uso em ambiente industrial, que utiliza uma memória programável para armazenamento interno de instruções orientadas ao usuário, a fim de implementar funções específicas tais como: lógica, sequenciamento, temporização, contagem e operações aritméticas, para controlar, por meio de entradas e saídas digitais ou analógicas, diferentes tipos de máquinas ou processos.

Para organizar as informações sobre tudo isso, os Diagramas de Tubulação e Instrumentação (P&ID) também são abordados, pois se constituem em principal ferramenta para projeto e implementação dos sistemas de controle. Compreender e aplicar de forma adequada (seguindo as normas específicas) os principais termos e conceitos da instrumentação, assim como interpretar especificações técnicas de sensores e sistemas de medição é fundamental para garantir a comunicação clara e eficiente entre profissionais da área, possibilitando a implementação de tecnologias confiáveis de medição e controle nas plantas industriais. E o autor oferece essa oportunidade aos leitores com seu livro.

Se hoje, mais experiente, eu pudesse responder ao aluno que me fez a pergunta sobre voltar a usar as derivadas nos balanços do processo, eu diria: “aprenda, com esta obra, a fazer cálculos para mantê-las zeradas!”

Boa leitura a todos.

Prof^ª. Dr^a Ana Maria Frattini Fileti



A Prof^ª. Dr^a Ana Maria Frattini Fileti, atualmente é Pró-Reitora de Pesquisa e professora titular da Universidade Estadual de Campinas. Autora do Livro "Tudo Sob(re) Controle" publicado em 2023 pela Editora Blucher, e premiado em 2024 com Jabuti Acadêmico pela Câmara Brasileira de Livros. Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Controle de Processos experimental, atuando principalmente nos seguintes temas: inteligência artificial, redes neurais artificiais, processos em batelada, automação e instrumentação de processos e controle preditivo multivariável. Foi diretora executiva da Agência de Inovação Inova Unicamp no período 2021 a 2024.

Capítulo 1

Instrumentação industrial

Instrumentação industrial é essencial para o controle eficiente e seguro dos processos produtivos, permitindo a medição e manipulação de variáveis como temperatura, pressão e vazão. Este capítulo apresenta uma introdução à instrumentação e à sua evolução histórica, destacando sua importância na automação e na Indústria 4.0. São abordados os componentes básicos de um sistema de medição e controle — como sensores, transmissores, controladores e atuadores — e a diferença entre processos mecanizados e automatizados. Além disso, são explicados os conceitos fundamentais de malhas de controle, incluindo malha aberta e malha fechada, suas estruturas e aplicações práticas. Ao final do capítulo, o leitor será capaz de compreender o papel da instrumentação na automação industrial, identificar os principais elementos de um sistema de controle e analisar o funcionamento de diferentes tipos de malhas, construindo uma base sólida para o entendimento de sistemas automatizados.

1.1 Introdução

Instrumentação é a ciência que aplica e desenvolve técnicas de medição, indicação, registro e controle de processos de fabricação, visando à otimização da eficiência desses processos^[1]. Outra definição importante de instrumentação a ser considerada é a proposta pela International Society of Automation (ISA)^[2]: instrumentação é uma coleção de instrumentos ou sua aplicação para fins de observação, medição, controle ou qualquer combinação destes. A instrumentação é a base para o controle de processo na indústria, onde muitas variáveis de processo, como temperatura, vazão, pressão, nível, composição, distância e até tempo, podem ser detectadas simultaneamente. Essas variáveis podem ser dependentes entre si, o que exige um sistema de controle complexo^[3].

A instrumentação não é uma ciência nova. A grande maioria dos instrumentos de medição que temos hoje surgiu devido às pesquisas e ao desenvolvimento realizados durante décadas, antes mesmo da 1ª Revolução Industrial. Porém, foi na década de 1940 que a instrumentação começou seu desenvolvimento por meio da utilização de instrumentos pneumáticos, dando origem à filosofia de transmissão com sala de controle centralizada. Na década de 1950, com o advento da eletrônica, surgiram os primeiros sinais da instrumentação eletrônica e, assim, os primeiros instrumentos eletrônicos analógicos. Os primeiros sistemas de controle automático por computador e o CLP – Controlador Lógico Programável surgiram durante a década de 1960. Em 1970, surgiram as teorias de controle digital juntamente com instrumentos digitais e, com isso, foram desenvolvidos os sistemas SDCCD – Sistema Digital de Controle Distribuído^[4,5]. Os anos 2000 são um marco para a transmissão; os sistemas WSN – Wireless Sensor Networks (redes de sensores sem fio) surgem e prometem revolucionar a transmissão e os sensores; nas décadas de 2010 e 2020, aumentam as pesquisas e o desenvolvimento de sensores inteligentes (já estudados antes), que podem utilizar técnicas de IA (inteligência artificial) para melhor desempenho nas medições, e o desenvolvimento e aplicação de sensores virtuais (soft sensors) ganham destaque^[6,7,8]. Na Figura 1.1 é mostrado um breve histórico da instrumentação.

Como dito anteriormente, a instrumentação é a base para o controle de processo e, se bem utilizada, com planejamento e critérios, trará diversos benefícios, como redução de custos, aumento de produtividade, melhoria da qualidade, melhoria no desempenho do controle e segurança do processo produtivo. Para que tudo ocorra de forma correta, o sistema de controle e medição deverá conter alguns instrumentos que permitam esse desempenho. Na Tabela 1.1, são apresentadas as classes dos instrumentos presentes em um sistema de medição e controle.

HISTÓRICO DA INSTRUMENTAÇÃO

do pneumático ao digital

1940	• Operação manual e controladores elementares • Processos Contínuos • Máquina a vapor • Instrumentos pneumáticos	1970	• Instrumentos digitais • Teorias de controle digital	2000	• WSN - Wireless Sensor Networks
1950	• Sala de controle • Teoria de controle e análise dinâmica das plantas • Instrumentos eletrônicos analógicos	1980	• SDCD - Sistema Digital de Controle Distribuído	2010	• Instrumentação Inteligente
1960	• CLP - Controlador Lógico Programável	1990	• Inteligência artificial	2020	• Soft sensor a serviço da I4.0

Figura 1.1: Histórico da instrumentação industrial

Tabela 1.1: Classes dos instrumentos do sistema de medição e controle

Componente	Descrição
Elemento primário ou sensor	São dispositivos com os quais conseguimos detectar alterações na variável de determinado processo. O sensor pode ser separado ou integrado a outro elemento funcional de uma malha ^[2,3] . (Capítulo 4 , Capítulo 5 , Capítulo 6 , Capítulo 7 e Capítulo 8)
Cegos	São instrumentos que não têm indicação visível do valor da variável medida ^[9] .
Indicador	Instrumento que apresenta uma indicação visual da variável medida. Um indicador pode ser analógico ou digital ^[9] .
Transmissor	Instrumento que converte o sinal não padrão proveniente do elemento primário e o envia, como sinal padrão, à distância, para um instrumento receptor. O sinal transmitido pode ser pneumático, digital, tensão analógica, corrente analógica ou um sinal modulado por radiofrequência (RF). O elemento primário pode ser ou não parte integrante do transmissor ^[2,3,9] .
Transdutor	Termo geral para um dispositivo que recebe informações na forma de uma ou mais quantidades físicas, modifica as informações e/ou sua forma, se necessário, e produz um sinal de saída resultante. Dependendo da aplicação, o transdutor pode ser um elemento primário, transmissor, relé, conversor ou outro dispositivo. Como o termo "transdutor" não é específico, seu uso para aplicações específicas não é recomendado ^[2,3] .
Registrador	Instrumento que registra a variável medida ^[9] .
Conversor	Instrumento que recebe um sinal padrão de outro instrumento e converte em outro tipo de sinal padrão. Ex: recebe um sinal elétrico analógico de 4-20 mA e converte para um sinal pneumático 0,2-1,0 kgf/cm ² . Um conversor também é chamado de transdutor; no entanto, "transdutor" é um termo geral e seu uso específico para conversão de sinal não é recomendado ^[2,9] . Uma observação importante é que um conversor não transforma (converte) um sinal não padrão em padrão; essa função é realizada pelo transmissor.
Elemento final de controle	Dispositivo que atua e modifica diretamente o valor da variável manipulada de uma malha de controle ^[2,3,9] . Os elementos finais de controle também são conhecidos como atuadores. (Capítulo 9)
Controlador	Instrumento que tem um sinal de saída que pode ser alterada para manter a variável de processo (pressão, temperatura, vazão, nível etc.) dentro do valor de referência estabelecido, ou para alterá-la de um valor previamente determinado. Podem ser analógicos ou digitais ^[2,3,9] . (Capítulo 10)

A Indústria 4.0 (I4.0) é realidade há algum tempo nos processos industriais e representa o início da Quarta Revolução Industrial [10,11], englobando um extenso sistema de tecnologias avançadas, tais como Inteligência Artificial (IA), Sistemas Ciberfísicos (CPS – Cyber-Physical Systems), Internet das Coisas (IoT – Internet of Things) e computação em nuvem, que visam à otimização das cadeias de valor por meio da implementação de uma produção controlada de forma autônoma e dinâmica ^[12,13,14]. Para isso, necessitamos de instrumentos com maior exatidão, qualidade, precisão e desempenho e, devido ao exponencial avanço da tecnologia, os instrumentos utilizados hoje podem não ser mais úteis amanhã.

Para entrarmos nesse grandioso universo chamado instrumentação industrial, precisamos, primeiramente, entender algumas diferenças existentes entre um processo mecanizado e um processo automático. Na **mecanização**, temos máquinas que auxiliam o ser humano em suas tarefas, porém essas máquinas dependem da ação do ser humano para um bom funcionamento (operação e controle). Ou seja, toda a inteligência do sistema está centrada no ser humano. Na **automação**, também temos as máquinas auxiliando o ser humano, contudo, a inteligência do sistema está na própria máquina; a máquina controla suas operações, cabendo ao ser humano o papel de supervisionar a ação dos sistemas automatizados (Figura 1.2).

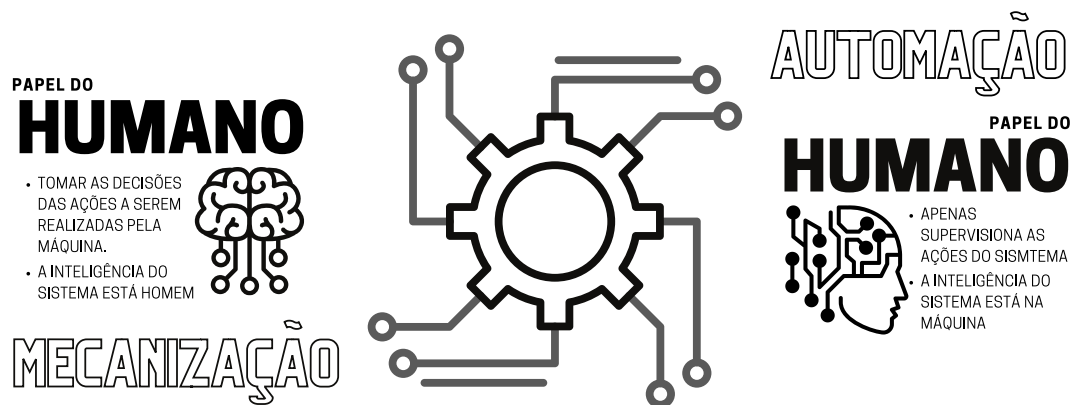


Figura 1.2: Diferença entre mecanização e automação

Sabemos, então, a diferença entre “algo” mecanizado e “algo” automatizado. Mas o que é automação? Segundo Nof^[15], diversos especialistas das áreas de engenharia de controle e automação, engenharia robótica e ciência da computação apresentam diferentes definições para automação; contudo, há um consenso de que a automação é poderosa, tem um impacto enorme na civilização e na humanidade, e pode trazer riscos.

De forma generalizada, automação significa atuar ou autorregular-se sem intervenção humana. A automação é um conjunto de técnicas que envolve máquinas, ferramentas, dispositivos e instalações que são capazes de atuar de forma eficiente, utilizando as informações recebidas do processo produtivo^[15]. Dessa forma, para que um processo industrial seja automático (possua automação), é necessário que possua um sistema de controle automático e, conseqüentemente, instrumentos (Figura 1.3).



Figura 1.3: A automação e seus atores

Compreendida a diferença essencial entre mecanização e automação, podemos avançar na discussão. Como mencionado anteriormente, a Indústria 4.0 já é uma realidade nos processos industriais. *Mas como chegamos à Quarta Revolução Industrial?* Para responder a essa pergunta, é necessário voltar ao final do século XVIII, quando ocorreu a 1ª Revolução Industrial, marcada pela introdução de sistemas mecânicos de manufatura movidos a vapor, dando início à mecanização. No século XIX, com o advento da eletricidade, teve início a 2ª Revolução Industrial, caracterizada pelo uso intensivo dessa fonte de energia. Já no século XX, a chegada da era da informação deu origem à 3ª Revolução Industrial, que se destacou pela digitalização e pela incorporação de sistemas eletrônicos e de tecnologia da informação nos processos produtivos e gerenciais. A digitalização industrial continuou evoluindo e, aliada às tecnologias de internet e máquinas inteligentes, impulsionou uma transformação fundamental

na produção, dando origem à 4ª Revolução Industrial, ou Indústria 4.0. Essa nova abordagem propõe sistemas de manufatura modulares e eficientes, nos quais os produtos controlam seu próprio processo de fabricação, possibilitando a produção personalizada sem comprometer a viabilidade econômica da produção em massa [16]. Um resumo das revoluções industriais pode ser observado na Figura 1.4[11].

Na Figura 1.4, podemos notar a importância da instrumentação devido ao fato de que a I4.0 é a era dos CPS. Nos Sistemas Ciberfísicos, temos a fusão dos níveis físico e digital, ou seja, a representação física (instrumentação) já não pode ser diferenciada da representação digital (informação)[11]; portanto, os instrumentos serão fundamentais para a nova revolução. Sistemas automatizados, algumas vezes, possuem grande complexidade; porém, ao analisarmos o sistema por partes, verificamos que seus subsistemas possuem características comuns e de fácil entendimento.

Revoluções Industriais

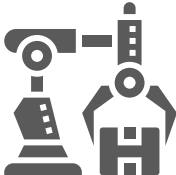
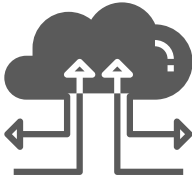
			
1ª Revolução Era do vapor	2ª Revolução Era da eletricidade	3ª Revolução Era da informação	4ª Revolução Era dos CPS
séculos XVIII e XIX	séculos XIX e XX	século XX	século XXI (atualmente)
Introdução de sistemas mecânicos de manufatura utilizando vapor	Introdução da produção em massa utilizando energia elétrica	Introdução de sistemas eletrônicos e de tecnologias de informação e comunicação para automação. Surge o conceito de Informação Industrial (*)	Introdução dos sistemas ciberfísicos (CPS - Cyber Physical Systems). Em 2013 o conceito de Indústria 4.0 é formalizado na Alemanha (**)

Figura 1.4: Evolução das revoluções industriais. Adaptado de [17](*) e [18](**).

A fim de demonstrar um sistema automático, consideremos o Exemplo 1.1, em que a manutenção da temperatura da água de um aquário deve ser realizada por meio de um controlador do tipo liga-desliga. Mesmo sendo um sistema muito simples, podemos obter uma enorme quantidade de informações e conceitos necessários para o entendimento.

EXEMPLO 1.1: A água de um aquário deve ser mantida em torno da temperatura ambiente de 25°C. Não é necessário que o controle da temperatura seja rigoroso, podendo variar de 23°C a 28°C e, em alguns casos (eliminação de doenças e estímulo à reprodução), pode chegar a 35°C. Assim, a temperatura da água deve ser ajustada de acordo com a necessidade e, para isso, um sistema simples de controle é acoplado ao aquário (Figura 1.5).

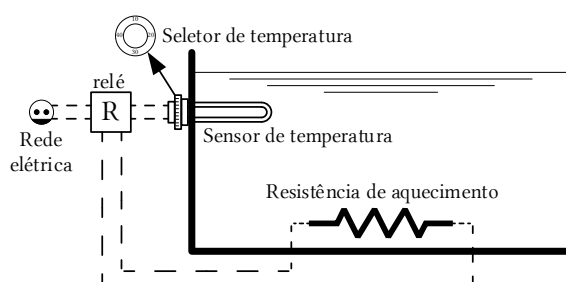


Figura 1.5: Sistema de aquecimento de água de um aquário

O sensor de temperatura apresentado na Figura 1.5 é um termostato ligado a um relé e, quando o sistema atinge a temperatura desejada, um contato elétrico é fechado, fazendo com que a resistência elétrica seja desligada.

Nesse processo representado pelo aquário, há a necessidade de controlar a temperatura da água, que é medida por um **sensor de temperatura** (como um termistor ou RTD). Essa medição é enviada a um **controlador**, que compara o valor obtido com o **valor de referência** (setpoint). Com base nessa comparação, o controlador decide se deve acionar ou desativar o relé, que, por sua vez, comuta a alimentação da resistência elétrica, responsável por aquecer a água. Essa estrutura forma um **sistema de controle em malha fechada**, pois há uma realimentação contínua da variável controlada — a temperatura — permitindo a correção automática de desvios. Em contrapartida, nos sistemas de **malha aberta**, o controlador atua sem receber informações da variável controlada, ou seja, **sem feedback**, e, portanto, sem ajuste baseado no comportamento real do processo. Outro aspecto importante a ser considerado é a influência de fatores externos, como a temperatura ambiente, que afetam diretamente a temperatura da água. Essas influências são denominadas **distúrbios**, e devem ser levadas em conta para manter o desempenho adequado do sistema de controle. ■

1.2 Sistema de medição e controle.

Um sistema de controle consiste em subsistemas reunidos com o propósito de se obter uma saída desejada, com desempenho desejado, para uma entrada específica fornecida^[19]. A fim de entendermos melhor o significado de sistema de controle, tomemos como exemplo um trocador de calor, em que um fluido de processo deve ser aquecido por meio de vapor, conforme a Figura 1.6. A função do trocador é aquecer o fluido de processo, que inicialmente se encontra a uma temperatura $T_i(t)$, até uma temperatura desejada $T(t)$. A energia necessária para o aquecimento será fornecida pelo calor latente de condensação do vapor.

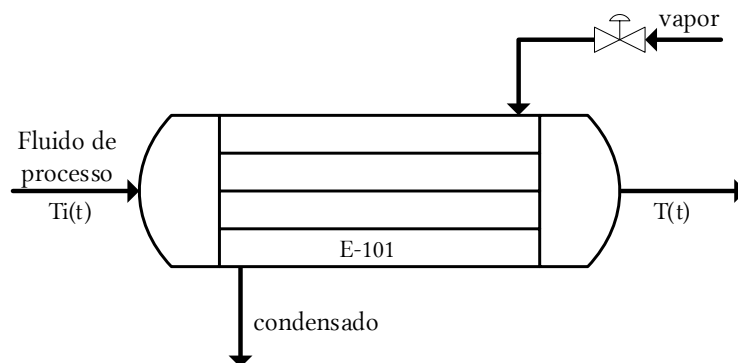


Figura 1.6: Trocador de calor para aquecimento de um fluido de processo.

No processo em questão, existem diversas variáveis que podem sofrer mudanças ao longo do tempo. Essas mudanças acarretam um desvio no valor final desejado da temperatura do fluido de processo. Como o objetivo da unidade é a manutenção da temperatura de saída do processo dentro do valor desejado, algumas medidas devem ser tomadas para corrigir esses desvios. Seria necessário realizar a medição da temperatura de saída do fluido de processo e compará-la com o valor desejado e, com base nessa comparação, tomar a decisão de como realizar a correção do desvio. Uma decisão a ser tomada é a manipulação da abertura da válvula de vapor. E, pela simplicidade, a ação de controle poderia ser realizada de forma manual por um operador, mas alguns problemas podem ser identificados nessa ação manual. Um deles é que diferentes operadores tomariam decisões diferentes em relação à abertura da válvula, resultando assim em uma operação não sistemática^[20].

A fim de corrigir esses desvios, deve-se projetar e implementar um sistema de controle contendo alguns componentes básicos, para que possamos medir a temperatura na saída do

trocador de calor e compará-la com o valor desejado, tomando uma ação automática para a correção do desvio (Figura 1.7).

Um sensor, conectado a um transmissor, localizado na saída do trocador, irá realizar a medição da temperatura do fluido e enviar o valor medido ao controlador. O controlador recebe o sinal referente ao valor medido e o compara com o valor desejado (setpoint). Uma vez realizada a comparação, o controlador toma uma decisão para corrigir o desvio e envia um sinal ao elemento final de controle, que manipula, por meio da abertura da válvula, a vazão de vapor. Assim, os componentes básicos deste sistema de controle são: **sensor**, **transmissor**, **controlador** e **elemento final de controle**.

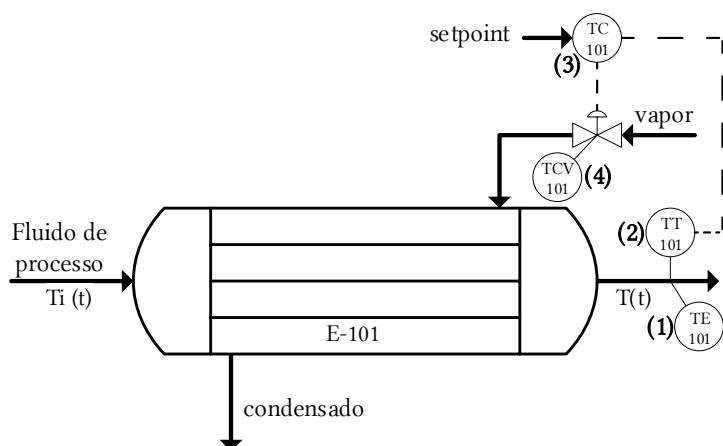


Figura 1.7: Malha de controle do trocador de calor: (1) sensor; (2) transmissor; (3) controlador; e (4) elemento final de controle (atuador)

Esses quatro componentes básicos realizam as três operações essenciais que devem estar sempre presentes em um sistema de controle:

1. A **medição** da variável a ser controlada (variável de processo), realizada pelo conjunto sensor-transmissor;
2. A **decisão**, em que o controlador irá determinar o que fazer para eliminar o desvio apresentado na variável controlada, ou seja, manter a variável no valor desejado;
3. A **ação**, que será executada pelo elemento final de controle em função da decisão do controlador.

Essas operações devem estar sempre presentes em um sistema de controle. Juntas, elas formam uma malha de controle: com base na medição, uma decisão é tomada e, com base nessa decisão, uma ação é efetuada^[20]. Em resumo, podemos representar os elementos do sistema de medição e controle conforme demonstrado na Figura 1.8. Essa representação será fundamental na construção do diagrama de tubulação e instrumentação (P&ID), tratado no [Capítulo 3](#).

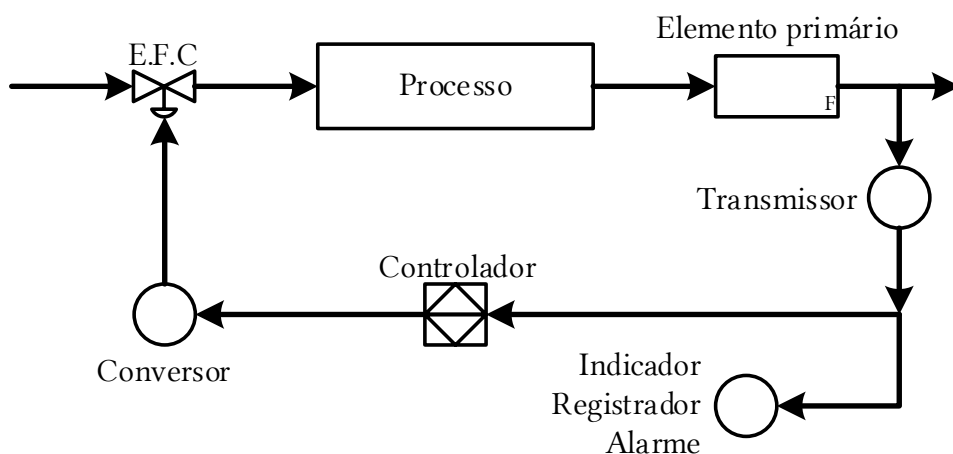


Figura 1.8: Elementos do sistema de medição e controle

1.3 Malhas de controle

Antes de definirmos como se comportam as malhas de controle, temos que compreender algumas terminologias, tais como: variável de processo, variável manipulada, setpoint, desvio e distúrbios.

Variável de Processo (PV – Process Variable) ou Variável Controlada: qualquer quantidade, propriedade ou condição física medida a fim de que se possa efetuar a indicação e/ou o controle do processo.

Variável Manipulada (MV - Manipulated Variable) ou Variável de Controle: grandeza a ser operada com a finalidade de manter a variável controlada no valor desejado.

Setpoint (SP) ou Referência: valor estabelecido previamente como referência de controle, no qual a variável deve ser mantida durante todo o tempo do processo.

Desvio ou erro: representa a diferença (numérica) entre o valor desejado e o valor da variável de processo no instante t .

Distúrbio (Ruído) ou Perturbação: sinal que tende a afetar, de forma desfavorável, o valor da variável controlada. O distúrbio pode ser observado no *setpoint* ou na carga.

1.3.1 Malha aberta

Em sistemas de controle em malha aberta (Figura 1.9), a ação de controle não é uma função da variável de processo (variável controlada). Isso quer dizer que o sistema não toma uma ação corretiva quando a variável de processo apresenta desvio em relação ao valor de referência; ou seja, a saída (variável controlada) não é medida nem comparada com a entrada. Logo, a característica que diferencia um sistema em malha aberta é a não realização de compensações para quaisquer perturbações provocadas no sistema^[20,21,22,23].

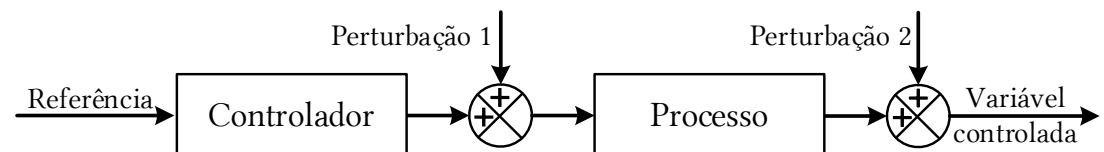


Figura 1.9: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta

Sistemas de controle em malha aberta podem ser facilmente observados no cotidiano. Em dispositivos de sinalização de trânsito (semáforos), por exemplo, independentemente do volume de tráfego, um cronômetro pré-determina o tempo em que as luzes verde, amarela e vermelha permanecem ativas. Outro exemplo é o das máquinas de lavar roupas, nas quais as operações de molho, lavagem e enxágue são executadas de forma sequenciada com base em tempos pré-determinados — ou seja, a lavadora não verifica se as roupas estão efetivamente limpas. Da mesma forma, ao fazer uma torrada para o café da manhã, a torradeira assume a hipótese de que quanto maior o tempo de exposição ao calor, mais escura ficará a torrada — sem medir, de fato, a coloração real, nem considerar o tipo de pão.

1.3.2 Malha fechada

No controle em malha fechada, a ação do controlador é baseada no erro, que é a diferença entre o valor desejado (setpoint) e o valor medido da variável de processo. Em um sistema desse tipo (Figura 1.10), o valor da variável de processo é constantemente monitorado por um sensor, e o erro gerado pela comparação com o setpoint é utilizado para ajustar a ação de controle. O objetivo é minimizar esse erro, mantendo a variável de processo o mais próxima possível da condição desejada, mesmo diante de perturbações externas. Esse tipo de controle é denominado controle por realimentação, ou *feedback*, e caracteriza os sistemas em malha fechada, nos quais há uma realimentação contínua da informação para correção do processo e a variável manipulada é função da variável controlada^[19,20,21,22,23].

Por outro lado, há também o controle por ação antecipada, conhecido como controle *feedforward*. Nesse caso, a ação de controle é baseada em medidas diretas das perturbações antes que elas afetem a variável de processo. O controlador calcula a ação corretiva

antecipadamente, sem depender da medição do erro e a variável manipulada é função dos distúrbios do sistema. Embora o controle feedforward não corrija desvios após ocorrerem, ele pode ser muito eficaz para compensar perturbações previsíveis, especialmente quando combinado com o controle por realimentação.

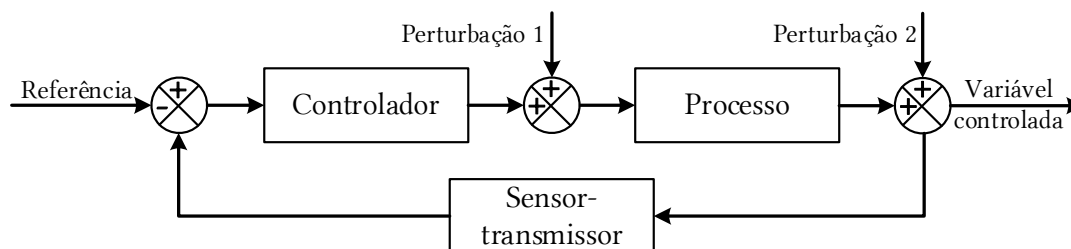
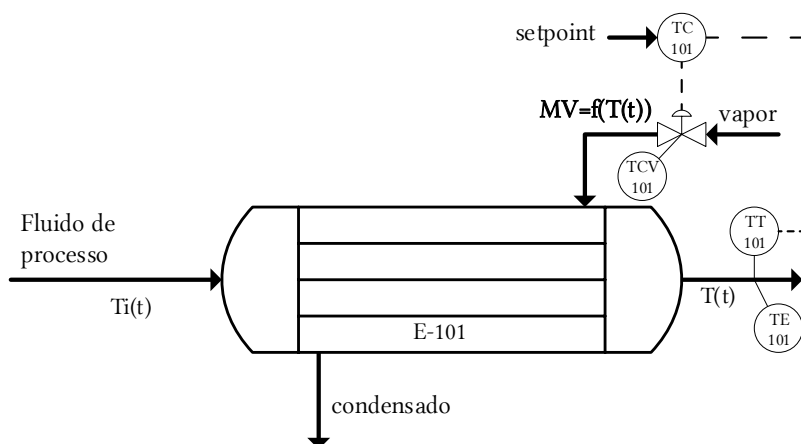
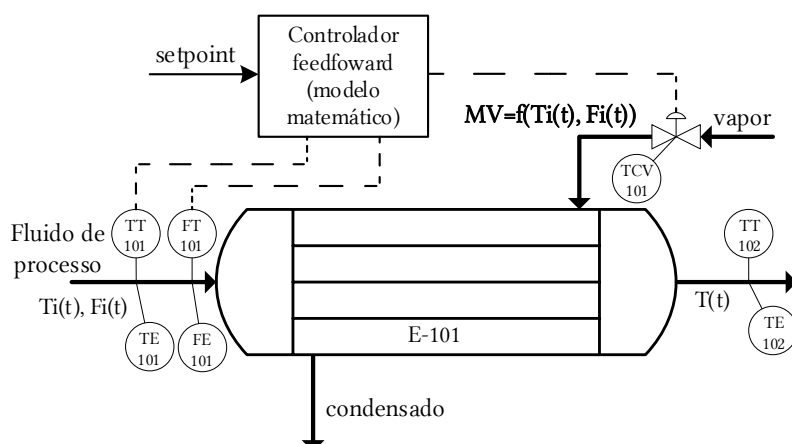


Figura 1.10: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada

Compreender e definir qual estratégia de controle será implementada — realimentação (*feedback*) ou ação antecipativa (*feedforward*) — é fundamental do ponto de vista da instrumentação, pois impacta diretamente na quantidade e no tipo de instrumentos presentes na malha de controle. Na Figura 1.11A, que representa a estratégia de feedback, a malha é composta por quatro elementos: um sensor de temperatura (TE-101), um transmissor de temperatura (TT-101), um controlador de temperatura (TC-101) e um elemento final de controle (TVC-101). Já na Figura 1.11B, que adota a estratégia de feedforward, a malha incorpora oito elementos: dois sensores de temperatura (TE-101 e TE-102), dois transmissores de temperatura (TT-101 e TT-102), um sensor de vazão (FE-101), um transmissor de vazão (FT-101), um controlador de temperatura (TC-101) e um elemento final de controle (TCV-101).



(A)



(B)

Figura 1.11: Malha fechada: (A) Feedback ou realimentação e; (B) Feedforward ou alimentação

Capítulo 2

Terminologia e Telemetria

A padronização da terminologia em instrumentação é fundamental para garantir a comunicação clara e eficiente entre profissionais da área e possibilitar o desenvolvimento de tecnologias confiáveis de medição e controle. O capítulo apresenta os principais conceitos utilizados na descrição de instrumentos, como faixa de medida, erro, exatidão, precisão, histerese, sensibilidade e repetibilidade, além de explicar como interpretar e aplicar essas definições em contextos práticos. Também aborda a evolução da telemetria e os diferentes tipos de sinais utilizados na transmissão de dados em sistemas industriais, incluindo pneumáticos, hidráulicos, elétricos e digitais. Ao final da leitura, o leitor será capaz de compreender e aplicar corretamente os principais termos e conceitos da instrumentação, interpretar especificações técnicas de sensores e sistemas de medição e entender os fundamentos da comunicação remota de sinais em ambientes industriais.

Na instrumentação industrial, emprega-se um vocabulário técnico específico para definir parâmetros, características e conceitos associados à medição e ao controle de processos. A padronização dessa terminologia é fundamental para descrever com precisão as propriedades dos sistemas de medição — tanto estáticas quanto dinâmicas — e assegurar uma comunicação clara e uniforme entre fabricantes, projetistas, usuários e demais profissionais da área. Esse alinhamento terminológico promove o entendimento comum e favorece a correta aplicação e o desenvolvimento de tecnologias em instrumentação.

2.1 Terminologia

Antes de compreendermos algumas das terminologias utilizadas na instrumentação, devemos responder a uma pergunta: *o que é um instrumento?* Segundo a International Society of Automation^[2], instrumento é um dispositivo usado direta ou indiretamente para realizar medições e/ou o controle de uma variável do processo. O termo inclui elementos primários (sensor), elementos finais de controle, dispositivos de computação e dispositivos elétricos.

Ao realizarmos a aquisição de um sensor, devemos considerar, além do tipo de sensor (qual variável será mensurada) e seu princípio de funcionamento, algumas informações relevantes. Essas informações são definidas pela terminologia padronizada utilizada na instrumentação.

Faixa de medida (RANGE): conjunto de valores da variável medida que estão dentro dos limites inferior e superior da capacidade de medição ou de transmissão do instrumento. Ao indicar a faixa de medida ou range de um instrumento, implica-se indicar o valor mínimo e o valor máximo que o instrumento é capaz de medir^[3,9,24].

EXEMPLO 2.1: Qual o range de um sensor de temperatura que realiza medições entre 250 °C e 550 °C?

O range é representado pelos limites inferior e superior de medição do sensor, logo o sensor terá um range de 250–550 °C. ■

Alcance (SPAN): é a diferença numérica entre os valores superior e inferior da faixa de medida do instrumento^[3,9,24].

EXEMPLO 2.2: Qual o span de um sensor de temperatura que realiza medições entre 250 °C e 550 °C?

O span de um instrumento corresponde à diferença numérica entre os limites superior e inferior, assim o sensor tem um alcance de 300 °C. ■

Erro (OFFSET): é considerado a diferença entre o valor que está sendo medido em relação ao valor real da variável. O erro pode ser estático, dinâmico ou médio. Quando o sistema está no estado estacionário (regime permanente), temos o erro estático. Quando o sistema se encontra em regime transitório, o valor da variável irá se alterar devido à dinâmica do sistema, e o valor medido geralmente estará defasado em relação ao valor real; essa diferença é denominada erro dinâmico. O erro médio é a média aritmética dos erros em cada ponto de medição^[3,9,24].

Precisão (ACCURACY) e Exatidão: aqui há uma questão importante. Muitos fabricantes e usuários de instrumentação definem o maior valor de erro estático que um instrumento pode apresentar ao longo de sua faixa de trabalho como precisão^[3,9,24], porém essa é, na verdade, a definição de exatidão. Segundo o VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia^[25], seguido pelo INMETRO de acordo com a Portaria nº 232 do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior^[26], temos as seguintes definições: **Precisão:** grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas. Ou seja, está relacionada à dispersão dos valores medidos. **Exatidão:** grau de concordância entre um valor medido e o valor verdadeiro do mensurando. Exemplo: um corpo de prova está a uma temperatura de 150 °C e, ao realizar três medições, o instrumento apresenta os seguintes valores: 155 °C, 155 °C e 155 °C. Este instrumento não apresenta exatidão, porém é muito preciso. A exatidão pode ser expressa em porcentagem do fundo de escala (limite superior), do span ou do valor lido (instantâneo).

EXEMPLO 2.3: Um sensor de temperatura que realiza medições entre 250 °C e 550 °C apresenta 1 % de exatidão. Em um determinado instante, mede 350 °C. Qual será a exatidão do sensor em relação ao fundo de escala, ao span e ao valor lido?

- 1) Fundo de escala: $V_{\text{real}} = 350 \pm (0,01 \times 550) = 350 \text{ °C} \pm 5,5 \text{ °C}$.
- 2) Span: $V_{\text{real}} = 350 \pm (0,01 \times 300) = 350 \text{ °C} \pm 3,0 \text{ °C}$.
- 3) Valor lido: $V_{\text{real}} = 350 \pm (0,01 \times 350) = 350 \text{ °C} \pm 3,5 \text{ °C}$. ■

Zona morta (DEAD ZONE): é a máxima variação que a variável medida pode apresentar sem que ocorra alteração na indicação ou no sinal de saída de um instrumento^[24].

EXEMPLO 2.4: Qual a zona morta de um sensor de temperatura que realiza medições entre 250 °C e 550 °C e apresenta uma zona morta de 0,1 % do span?

O sensor terá como zona morta: $\pm (0,001 \times 300) = \pm 0,3 \text{ °C}$. Isso significa que, se tivermos uma variação de $\pm 0,2 \text{ °C}$, o sensor não irá indicar alteração. ■

Sensibilidade (SENSITIVITY) ou ganho: é a razão entre a variação do valor medido ou transmitido (variação da indicação) por um instrumento e a variação da variável que o acionou (variação da grandeza medida), em regime permanente. Em outras palavras, é o valor mínimo que a variável deve mudar para que ocorra uma variação na indicação ou transmissão. É geralmente expresso em relação ao span do instrumento^[3,9,24,25].

EXEMPLO 2.5: Qual é a sensibilidade de um termômetro de vidro com range de 0 °C a 500 °C, que possui uma escala de leitura de 50 cm, e de um sensor de temperatura que realiza medições entre 250 °C e 550 °C, cujo transmissor envia um sinal de 4–20 mA?

O termômetro terá uma sensibilidade $S = 0,1 \text{ cm/°C}$ e o sensor de temperatura uma sensibilidade $S = 0,053 \text{ mA/°C}$. ■

Histerese (HYSTERESIS): é a diferença máxima apresentada por um instrumento, para um mesmo valor, em qualquer ponto da faixa de trabalho, quando a variável percorre toda a escala nos sentidos ascendente e descendente. Geralmente, a histerese é expressa em relação ao span do instrumento^[3,9].

EXEMPLO 2.6: Um sensor de temperatura com faixa de medição entre 0 °C e 500 °C apresenta o perfil de resposta mostrado na Figura 2.1. Qual é a histerese do sensor?

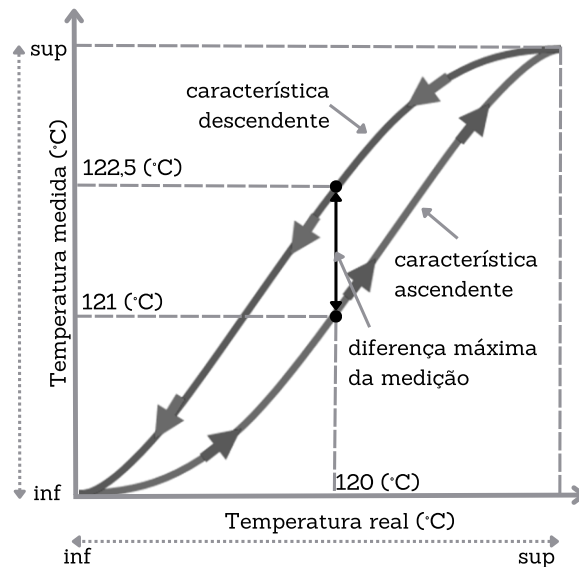


Figura 2.1: Determinação da histerese de um sensor de medição de temperatura

Observando as curvas ascendente e descendente, conclui-se que a maior diferença nas medições ocorre na temperatura de 120 °C (valor real). O instrumento apresenta 121 °C na leitura ascendente e 122,5 °C na leitura descendente, o que resulta em uma histerese de 1,5 °C, ou 0,3 % do span. ■

Repetibilidade (REPEATABILITY): é a máxima diferença entre diversas medições de um mesmo valor da variável, adotando sempre o mesmo sentido de variação. Trata-se da capacidade de reprodução da variável medida nas mesmas condições de operação. Geralmente, a repetibilidade é expressa em relação ao span do instrumento^[3,9].

EXEMPLO 2.7: Um sensor de vazão com range de 0–800 L/min apresentou os resultados do teste de repetibilidade conforme a Figura 2.2. Qual é a repetibilidade do sensor?

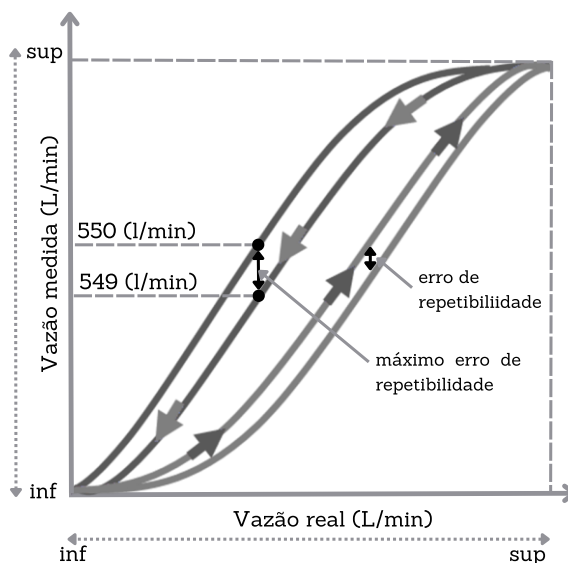


Figura 2.2: Determinação da repetibilidade de um sensor de vazão

A maior diferença observada foi entre as curvas descendentes, sendo os valores medidos de 550 L/min e 549 L/min. Assim, a repetibilidade do sensor é de $\pm 1,0$ L/min, ou 0,125 % do span. ■

2.2 Telemetria

A telemetria se desenvolveu a partir da necessidade de transmitir informações de um local para outro, eliminando a limitação do monitoramento direto do sinal. O principal objetivo da telemetria é transmitir informações precisas entre locais distantes ou remotos; trata-se da técnica de obtenção, processamento e transmissão de dados à distância^[3,27,28].

Como apresentado anteriormente (veja Figura 1.1), na década de 1940 os instrumentos eram pneumáticos, e a transmissão ocorria por meio de sinais pneumáticos. Com o desenvolvimento tecnológico, surgiram os sinais elétricos analógicos e, posteriormente, os sinais digitais (década de 1970). Atualmente, os sinais digitais são comuns na indústria e estão presentes em protocolos de redes industriais, tais como HART, Modbus, Fieldbus, dentre outros. O **sinal analógico** se caracteriza por uma variação contínua de amplitude (ex.: sinal de corrente de 4–20 mA), enquanto o **sinal digital** se caracteriza pela transmissão de informações de forma discreta (em pacotes)^[29,30].

Em sistemas de medição industriais, existem diversos tipos de sinais de transmissão — alguns já obsoletos, outros amplamente utilizados. Independentemente de sua aplicação atual, os sinais apresentados a seguir são padronizados para transmissão de informações^[1,2,24,25,27,28,29].

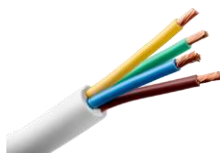
Elétrico: sinal mais utilizado industrialmente, podendo ser transmitido na forma de corrente (para longas distâncias) ou tensão (para curtas distâncias). Os padrões mais comuns são: 4–20 mA, 0–20 mA, 1–5 V, 0–10 V, –5 a 5 V. Este tipo de sinal se destaca por permitir transmissões a longas distâncias, dispensar equipamentos auxiliares, possibilitar conexão com computadores de processo, ser de fácil instalação, permitir a realização de operações matemáticas e a leitura de múltiplos sinais. As desvantagens incluem a necessidade de especialistas para instalação e manutenção, cuidados específicos em áreas classificadas e proteção contra ruídos eletromagnéticos. Na Figura 2.3, são apresentados os meios de transmissão de sinais elétricos (analógicos e/ou digital).

MEIOS DE TRANSMISSÃO DE SINAIS



Par trançado

velocidade: 375 kb/s
distância: 300 m



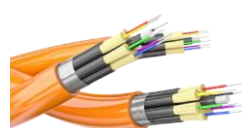
Cabos múltiplos

velocidade: 1 Mb/s
distância: 2000 m



Cabo coaxial

Altas taxas de transmissão
Várias informações
velocidade: 140 Mb/s
distância: 150 m
velocidade: 1,5 Gb/s
distância: 40 m



Fibra óptica

Altíssimas taxas de transmissão
Conexões complicadas
velocidade: 10^9 a 10^{10} bit/s

Figura 2.3: Meios de transmissão de sinais elétricos analógicos e digitais

Pneumático: sinal transmitido por meio de tubos de vinil, cobre ou aço inox, utilizando a variação da pressão de um gás comprimido (ar ou nitrogênio) para representar a variação da grandeza em todo o seu range. Como padrão, são utilizados: 0,2–1,0 kgf/cm², 3–15 psi, 3–27 psi ou 20–100 kPa. A principal vantagem desse tipo de sinal é sua aplicabilidade em áreas classificadas (com risco de explosão). Entre as desvantagens, destacam-se: necessidade de tubulações de gás comprimido e equipamentos auxiliares (compressores, filtros, desumidificadores), limitação na distância de transmissão devido à perda de carga (atraso) na linha, o que restringe o alcance a 100–150 m, dificuldade de detecção de vazamentos e inviabilidade de comunicação direta com computadores.

Hidráulico: sinal transmitido por meio de tubulação onde a variação de pressão em um

óleo hidráulico representa a variação do sinal. Tem como vantagens a geração de grandes forças para o acionamento de equipamentos de grandes dimensões e resposta rápida. Entre as desvantagens estão a impossibilidade de uso em áreas classificadas, a necessidade de inspeções periódicas no sistema de transmissão e a exigência de equipamentos auxiliares (reservatórios de óleo, filtros e bombas).

Via Rádio: sinal transmitido por ondas de rádio, dentro de uma faixa específica de frequência, a um sistema receptor. Entre suas vantagens estão a eliminação da necessidade de cabeamento e a possibilidade de envio de sinais para equipamentos móveis. As desvantagens incluem o alto custo inicial e a necessidade de técnicos especializados.

Via Modem: sinal transmitido por meio de linhas telefônicas, modulando o sinal em frequência, fase ou amplitude. Tem como vantagens o baixo custo de instalação e a possibilidade de transmissão a longas distâncias. Em contrapartida, apresenta baixa velocidade de transmissão, está sujeito a interferências externas e requer assistência técnica especializada.

Zero vivo é um conceito essencial em sistemas analógicos de transmissão de sinais. Ele define um escalonamento padronizado que permite distinguir uma leitura real de 0 % de uma falha de transmissão (isto é, um sistema “morto”, sem sinal)^[31]. Imagine um sistema operando de 0 a 20 mA: se 0 mA representa 0 %, qualquer leitura de 0 mA pode indicar tanto uma medição legítima quanto uma falha, dificultando a identificação do problema. Para evitar essa ambiguidade, recomendam-se faixas cujo limite inferior seja superior a zero. No padrão 4–20 mA, por exemplo, 4 mA representa 0 % e 20 mA representa 100 %; qualquer corrente abaixo de 4 mA denuncia automaticamente a perda de sinal ou falha no sistema.

Capítulo 3

Diagramas: do fluxo de blocos ao P&ID

Dominar os diagramas de processo, especialmente o P&ID, é indispensável na instrumentação industrial para assegurar a comunicação eficiente e detalhada de informações complexas em projetos. Este capítulo aborda os principais tipos de diagramas utilizados na engenharia: Diagramas de Blocos (BFD), Diagramas de Processo (PFD) e Diagramas de Tubulação e Instrumentação (P&ID). O BFD apresenta uma visão simplificada do processo, destacando fluxos principais e operações básicas. O PFD detalha equipamentos, fluxos e variáveis de processo, enquanto o P&ID é o mais completo, fornecendo informações específicas sobre tubulações, instrumentação e controle. São explicadas normas como a ANSI/ISA-5.1, que padronizam símbolos e identificações, permitindo integração entre projetistas e operadores. Ao final, o leitor estará apto a interpretar e construir diagramas, relacionar equipamentos e malhas de controle e aplicar normas para documentação precisa em projetos industriais.

Um processo produtivo envolve a produção de diversos produtos e, de forma geral, esses processos são complexos. Essa complexidade se deve à existência de substâncias de alta reatividade química, alta toxicidade e alto poder corrosivo. Além disso, muitas condições de processo podem atingir temperaturas e pressões extremamente elevadas. Essas características fazem com que os processos produtivos, em especial os processos químicos, sejam potencialmente perigosos. Assim sendo, é essencial que erros e/ou omissões provenientes da falta de comunicação sejam evitados por meio da efetiva comunicação visual dos processos. A forma mais simples e efetiva de comunicação visual dos processos são os diagramas; por isso, é de extrema importância que os engenheiros possuam habilidades de construção, bem como capacidade de interpretação e análise desses diagramas^[32].

3.1 Diagramas de engenharia

Os diagramas mais comuns utilizados na representação de processos são: i) Diagrama de Blocos (BFD – *Block Flow Diagrams*) ; ii) Diagrama de Processo (PFD – *Process Flow Diagrams*) e; iii) Diagrama de Tubulação e Instrumentação (P&ID – *Piping and Instrumentation Diagrams*).

3.1.1 Diagramas de Blocos – BFD

O diagrama de blocos sintetiza uma série de blocos conectados com entradas e saídas de fluxos com base em conceitos de balanço de massa e energia. Neste diagrama, são incluídas informações de condições de operação, tais como: temperatura, pressão, conversão, vazão, dentre outras. Podemos, por meio do diagrama de blocos, representar um único processo ou até mesmo uma planta.

Considere o processo de hidrodesalquilação do tolueno para produzir benzeno a partir da reação: $C_7H_8 + H_2 \rightarrow C_6H_6 + CH_4$. A reação não é completa, sendo utilizado tolueno em excesso. Os gases não condensáveis são separados e descarregados, o benzeno (produto) e o tolueno não reagido são separados em um processo de destilação, sendo o tolueno então reciclado de volta ao reator, enquanto o benzeno é removido na corrente de produto. Uma corrente de 10.000 (kg h⁻¹) de tolueno e uma corrente de 820 (kg h⁻¹) de hidrogênio entram no reator, que tem uma conversão de 75% do tolueno. A corrente de gases não condensáveis representa 2.610 (kg h⁻¹), e na corrente de produto temos 8.210 (kg h⁻¹) de benzeno.

O diagrama representado pela Figura 3.1 fornece uma visão geral da produção de benzeno. Cada bloco do diagrama representa uma função de processo e pode, na realidade, consistir em vários equipamentos. Embora várias informações sejam omitidas neste diagrama, é óbvio que esse tipo de representação é extremamente útil para um entendimento preliminar do processo, sendo um excelente ponto de partida para a elaboração do Diagrama de Processo (PFD).

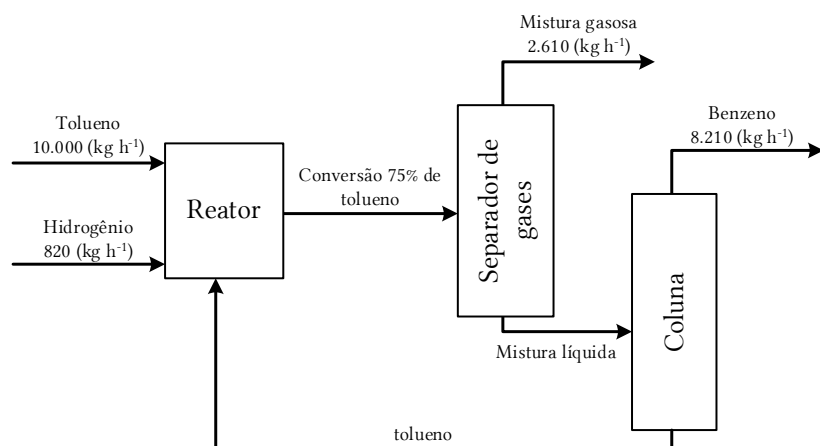


Figura 3.1: Diagrama de blocos da produção do benzeno

Alguns formatos e convenções são recomendados na construção do diagrama de blocos de processo:

1. Cada operação é representada por um bloco;
2. As linhas representam os fluxos principais e suas direções;
3. O fluxo deve ser representado da esquerda para a direita, sempre que possível;
4. Fluxos leves (gases) devem ser representados no topo dos blocos, assim como fluxos pesados (líquidos e sólidos) devem ser representados na parte inferior dos blocos;
5. Devem ser informadas apenas informações críticas;
6. Se ocorrer cruzamento de linhas, as linhas horizontais devem ser contínuas e as linhas verticais devem ser interrompidas;
7. Um balanço material simplificado deve ser apresentado.

Como dito anteriormente, podemos representar não somente um processo em um BFD, mas também uma planta. Na Figura 3.2 é apresentado o diagrama de blocos de uma planta de produção de álcool por meio de carvão, onde cada bloco representa um processo. A vantagem deste diagrama é que permite uma visualização completa da planta e das interações entre os diferentes processos que a compõem.

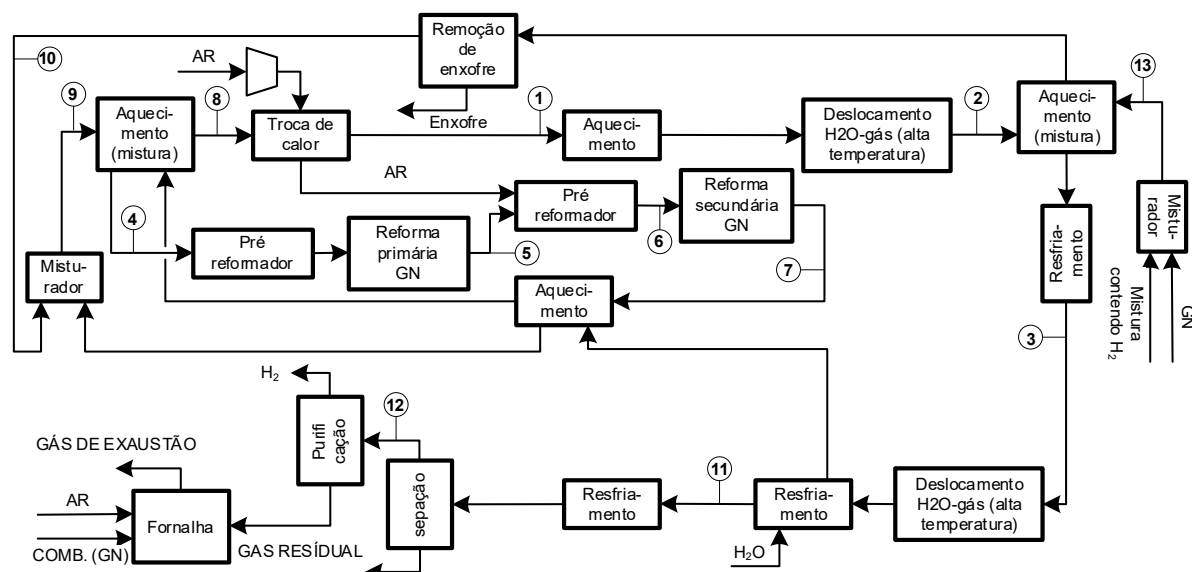


Figura 3.2: Diagrama de blocos da produção de hidrogênio por reforma do gás natural (adaptado de [33]).

3.1.2 Diagrama de processo - PFD

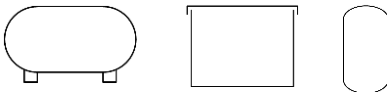
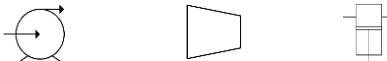
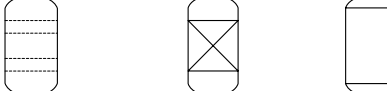
O diagrama de processo representa um avanço quanto à disponibilidade de informações em comparação ao BFD. Nele são apresentados um conjunto de dados referentes ao projeto da planta, extremamente importantes para o entendimento do processo. É importante ressaltar que não há uma norma específica para a representação de um PFD, podendo o diagrama variar dependendo de quem o confecciona. Porém, podemos afirmar que os diagramas de processo possuem informações similares, independentemente do tipo de processo ou indústria. Um típico PFD contém as seguintes informações:

1. Todos os equipamentos do processo são representados e descritos;
2. Todos os fluxos são mostrados e identificados por números. Devem ser incluídas a descrição de cada fluxo, a composição química e as condições de processo. Estes dados podem ser colocados no próprio PFD ou em uma tabela anexada;
3. As linhas de utilidades devem ser representadas;
4. As malhas de controle básicas devem ser indicadas de maneira simplificada.

As informações básicas em um diagrama de processo (PFD) podem ser categorizadas como: i) topologia do processo; ii) informações dos fluxos e; iii) informações dos equipamentos.

Em relação a **topologia do processo**, a Figura 3.3 representa o PFD do processo de hidrodesalquilação do tolueno para produzir benzeno (Figura 3.1), onde são apresentadas a localização dos principais equipamentos do processo e os fluxos entre eles. Observa-se também que cada equipamento é identificado por um número no diagrama, e uma lista de equipamentos é fornecida no topo do próprio diagrama. Como mencionado anteriormente, não há uma norma específica para a representação de um PFD e, por esse motivo, algumas vezes as empresas utilizam símbolos próprios para representar os equipamentos. Entretanto, há um consenso quanto à representação do diagrama. Os equipamentos são representados por símbolos que identificam operações unitárias específicas, e um conjunto abrangente de símbolos é apresentado pela ASME – American Society of Mechanical Engineers^[34] e por Austin^[35]. Na Tabela 3.1 são apresentados alguns símbolos de equipamentos utilizados nos PFD's.

Tabela 3.1: Símbolos de equipamentos utilizados no desenvolvimento de um PFD (adaptado de [34,35]).

Equipamento	Símbolo
Trocadores de calor	
Aquecedores	
Tanques de armazenagem e vasos	
Bombas, turbinas e compressores	
Torres	
Reatores	
Entradas e saídas de processo	
Válvulas	
Numeração de linhas e símbolo de instrumento	

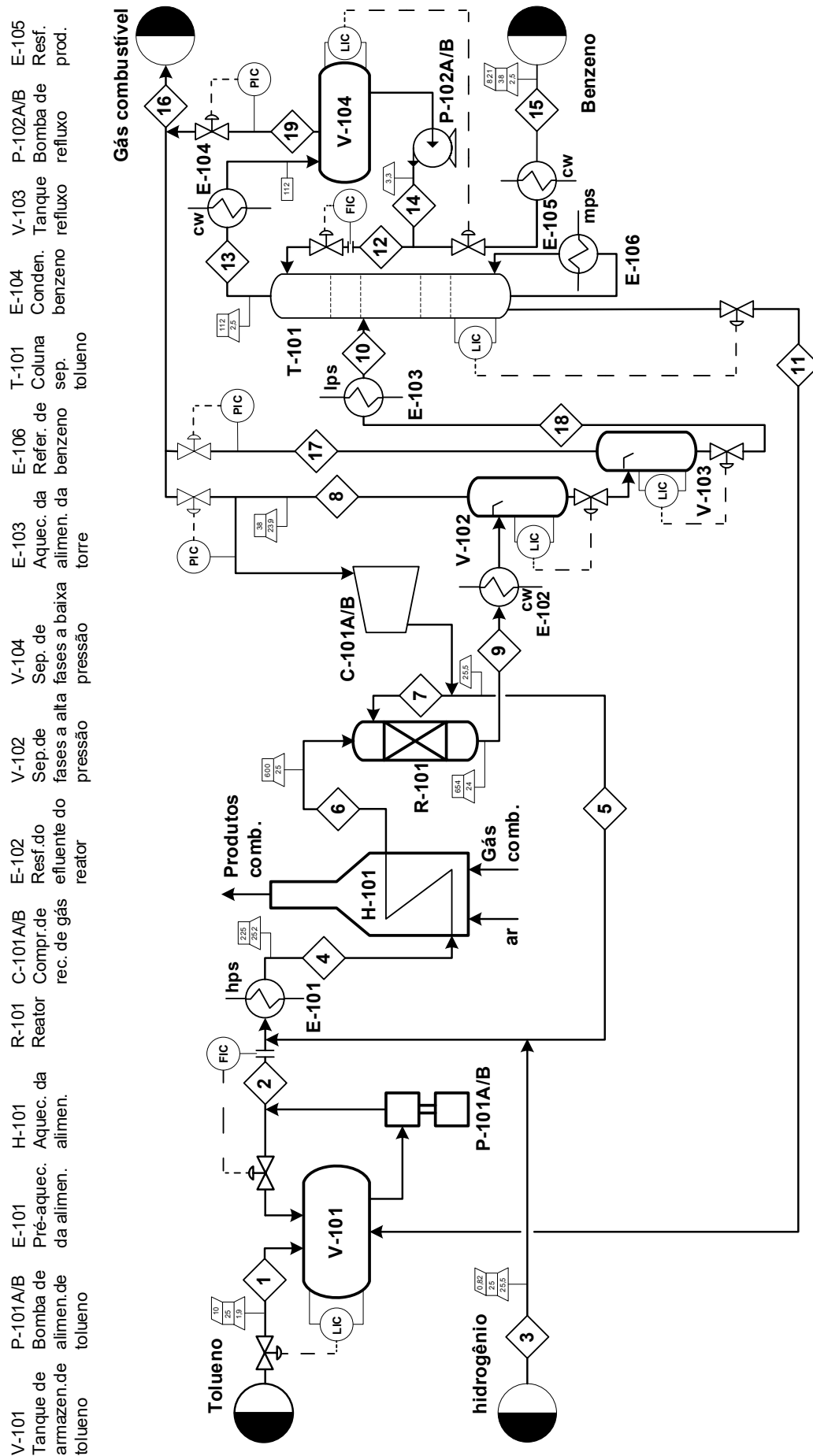


Figura 3.3: Diagrama de processo para a produção de benzeno por meio da hidrodesalquilação do tolueno (adaptado de [32]).

Podemos observar na Figura 3.3 que cada equipamento apresenta uma identificação contendo letras e números, conhecida como *tag*. A convenção para a identificação do equipamento é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Convenções utilizadas para identificar equipamentos (adaptado de [32]).

Identificação geral XX-YZZ A/B		
XX	: equipamentos	C – Compressor ou Turbina E – Trocador de Calor H – Aquecedor P – Bomba R – Reator T – Torre TK – Tanque de Armazenagem V – Vaso
Y	: numeração da área dentro da planta	
ZZ	: numeração serial do equipamento dentro de cada área	
A/B	: identifica equipamentos com backup ou redundância	

EXEMPLO 3.1: Para exemplificar o uso da convenção apresentada na Tabela 3.2, consideremos a operação unitária C-101A/B existente no PFD do processo de hidrodesalquilação do tolueno para produzir benzeno (Figura 3.3).

C-101A/B identifica o equipamento como compressor.

C-**1**01A/B identifica que o compressor está localizado na área 100 da planta.

C-1**01**A/B identifica que este é o compressor número 01 na área 100

C-101**A/B** identifica que um compressor de backup está instalado.

Portanto, existem dois compressores idênticos: C-101A e C-101B. ■

Outras informações importantes que devem fazer parte do PFD são a numeração da corrente (losango numerado) e as linhas de utilidades. Na Tabela 3.3 são apresentadas as convenções para a identificação das linhas de utilidades.

Tabela 3.3: Convenções utilizadas para identificação das utilidades (adaptado de [32]).

Símbolo	Utilidades
lps	Vapor a baixa pressão: 3-5 barg (saturado)
mps	Vapor a média pressão: 10-15 barg (saturado)
hps	Vapor a alta pressão: 40-50 barg (saturado)
cw	Água de resfriamento: torre de resfriamento a 30 °C retornando a < 45 °C
wr	Água de rio: captação a 25 °C retornando a < 35 °C
rw	Água resfriada: 5 °C, retornando a < 15 °C
rb	Brine a -45 °C, retornando a < 0 °C
cs	Efluente químico com alta COD
ss	Efluente sanitário com alta BOD
el	Aquecimento elétrico (220, 440, 660V)
ng	Gás Natural
fg	Gás Combustível
fo	Óleo Combustível
fw	Água para incêndio

Em relação às **informações de fluxo**, os diagramas de processo mais simples dispõem das características das correntes — tais como temperatura, pressão, composição e vazões — apresentadas no próprio diagrama, adjacente ao fluxo. Contudo, quando os diagramas são mais complexos, essas informações são apresentadas separadamente. As informações normalmente disponibilizadas no PFD podem ser verificadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Informações das correntes do processo (adaptado de [32]).

Informações essenciais	Informações opcionais
Número do fluxo	Fração molar por componente
Temperatura (°C)	Fração mássica por componente
Pressão (bar)	Vazão mássica por componente (kg/h)
Fração de Vapor	Vazão Volumétrica (m ³ /h)
Vazão Mássica (kg/h)	Densidade
Vazão molar (kmol/h)	Viscosidade
Vazão molar por componente (kmol/h)	Calor Específico

Para o processo de produção de benzeno correspondente ao PFD representado na Figura 3.3, poderíamos, devido à quantidade de informações, demonstrar as características dos fluxos conforme a Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Informações das correntes do PDF do processo de produção de benzeno (adaptado de [32]).

Corrente	T (°C)	P (bar)	F (t/h)	F _{molar} (kmol/h)	F _{H2} (kmol/h)	F _{met} (kmol/h)	F _{ben} (kmol/h)	F _{tol} (kmol/h)
1	25,00	1,90	10,00	108,70	0,00	0,00	0,00	108,70
2	59,00	25,80	13,30	144,20	0,00	0,00	1,00	143,20
3	25,00	25,50	0,82	301,00	286,00	15,00	0,00	0,00
4	225,00	25,20	20,50	1204,40	735,40	317,30	7,60	144,00
5	41,00	25,50	6,41	758,80	449,40	302,20	6,60	0,70
6	600,00	25,00	20,50	1204,40	735,40	317,30	7,60	144,00
7	41,00	25,50	0,36	42,60	25,20	16,95	0,37	0,04
8	38,00	23,90	9,20	1100,80	651,90	438,30	9,55	1,05
9	654,00	24,00	20,90	1247,00	652,60	442,30	116,00	36,00
10	90,00	2,60	11,60	142,20	0,02	0,88	106,30	35,00
11	147,00	2,80	3,27	35,70	0,00	0,00	1,10	34,60
12	112,00	3,30	14,00	185,20	0,00	0,00	184,30	0,88
13	112,00	2,50	22,70	290,70	0,02	0,88	289,46	1,22
14	112,00	3,30	22,70	290,70	0,00	0,00	289,46	1,22
15	38,00	2,30	8,21	105,60	0,00	0,00	105,20	0,40
16	38,00	2,50	2,61	304,20	178,00	123,05	2,85	0,31
17	38,00	2,80	0,07	4,06	0,67	3,10	0,26	0,03
18	38,00	2,90	11,50	142,20	0,02	0,88	106,30	35,00

Como visto até aqui, um PFD apresenta muitas informações sobre o processo. Vimos as convenções adotadas para demonstrar as informações da topologia do processo e as informações sobre os fluxos e, agora, veremos as informações dos equipamentos. Segundo Turton et al. [32], as informações sobre os equipamentos são particularmente úteis para a estimativa de custos e o detalhamento de projeto. A Tabela 3.6 fornece as informações necessárias para a inclusão dos dados sobre os equipamentos no PFD.

Tabela 3.6: Informações sobre os equipamentos presentes no PFD (adaptado de [32]).

Tipo do equipamento	Informações do equipamento
Torres	tamanho: altura e diâmetro; número e tipo de pratos; altura e tipo de recheio; material de construção
Trocadores de calor	Tipo: gás-gás; gás-líquido; líquido-líquido; condensador; evaporador. Processo: função, área, temperatura e pressão dos fluxos, número de passes no casco, número de tubos, material de construção
Tanques	Veja vasos
Vasos	Altura, diâmetro, pressão, temperatura, material de construção.
Bombas e compressores	Vazão, pressão de descarga, temperatura, ΔP , tipo, potência, material de construção.
Aquecedores	Tipo, pressão e temperatura nos tubos, função, combustível, material de construção.

De uma forma mais prática, podemos gerar as **informações dos equipamentos** separadas por classes, como apresentado na Tabela 3.6 e dispor as informações dos equipamentos conforme a Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Informações sobre trocadores de calor (adaptado [32]).

Trocadores de calor	E-101	E-102	E-103	E-104
Tipo	FLH.	FLH.	MDP	FLH.
Área (m ²)	36	763	11	35
Serviço (MJ/h)	15.190	46.660	1055	8335
Casco				
T (°C)	225	654	160	112
P (bar)	26	24	6	3
Fase	Vap.	Par. Cond.	Cond.	Cond.
MOC	316SS	316SS	CS	CS
Tubo				
T (°C)	258	40	90	40
P (bar)	42	3	3	3
Fase	Cond.	Liq.	Liq.	Liq.
MOC	316SS	316SS	CS	CS

FLH – cabeça flutuante; MDP – Tubo duplo múltiplos; MOC – material de construção (OBS: Legenda apenas para indicar as siglas apresentadas. Não é necessário apresentar legenda)

3.1.3 Diagrama de tubulação e instrumentação – P&ID

O diagrama de tubulação e instrumentação é o mais importante para o início da construção de uma planta. O P&ID é desenvolvido com base no diagrama de processo e, dependendo da complexidade da planta, cada PFD requer um ou mais diagramas P&ID. Como característica principal, o P&ID fornece informações relativas às tubulações do processo e ao detalhamento da instrumentação e suas funções. Na Figura 3.4 é apresentado um diagrama de tubulação e instrumentação para o processo de destilação de benzeno.

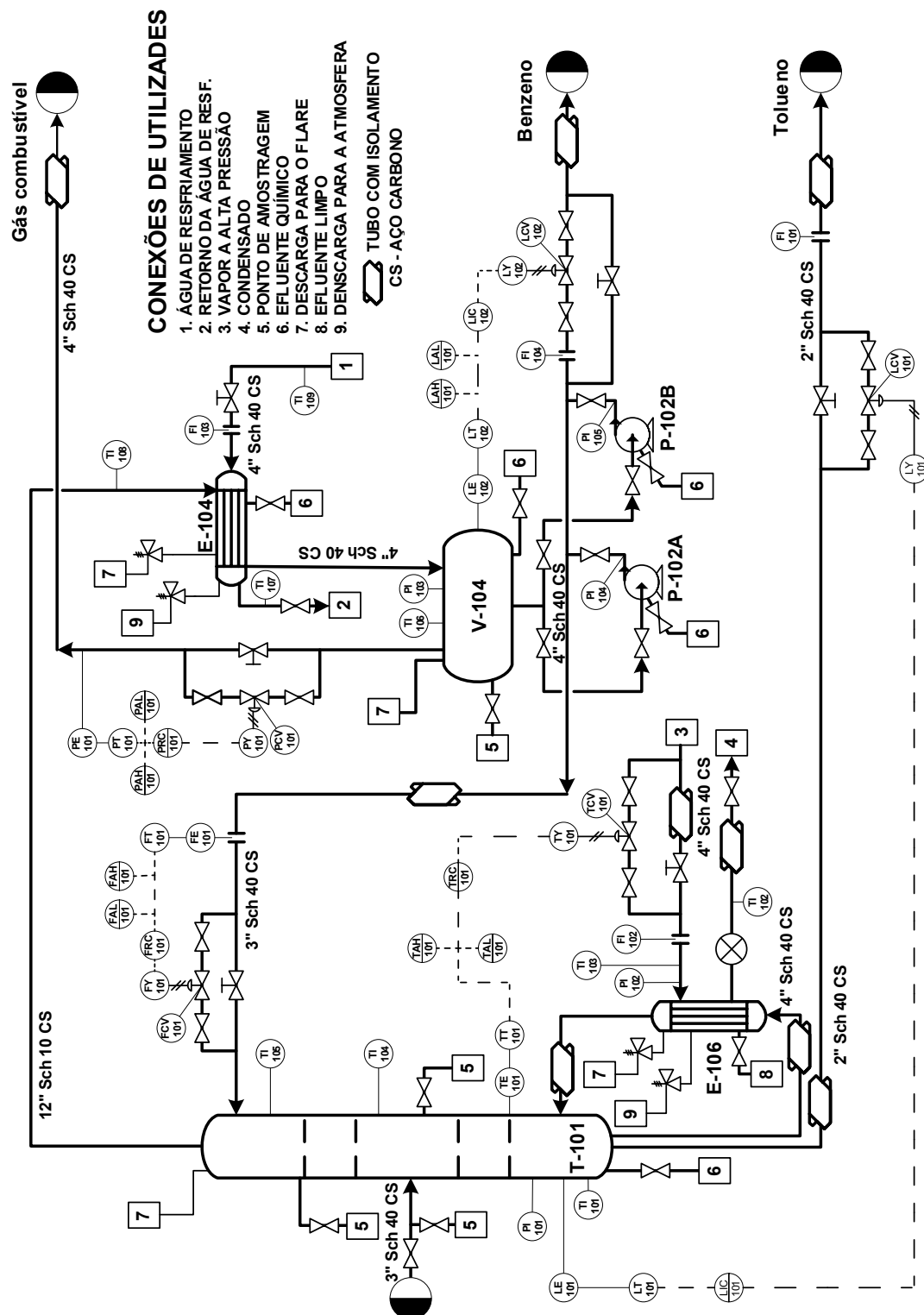


Figura 3.4: P&ID - Diagrama de tubulação e instrumentação para processo de destilação de benzeno (adaptado de [32]).

Diferentemente do desenvolvimento do PFD, que não segue uma norma específica, mas sim convenções, o desenvolvimento do P&ID segue uma norma específica que estabelece símbolos e identificações dos instrumentos. O propósito da utilização de uma norma para estabelecer símbolos e identificações dos instrumentos é facilitar o entendimento dos diagramas e das malhas de instrumentação, além de auxiliar na comunicação entre usuários, projetistas e fornecedores. Para isso, a ISA – International Society of Automation desenvolveu a norma ANSI/ISA–5.1: *Instrumentation Symbols and Identification*.

3.2– Norma ANSI/ISA 5.1

A codificação de símbolos de instrumentação mais utilizada mundialmente é a padronizada na norma 5.1 da ISA [2,9]. Esta norma estabelece um meio uniforme de representar e identificar instrumentos ou dispositivos e suas funções inerentes, sistemas e funções de instrumentação e funções de software de aplicação usadas para medição, monitoramento e controle, apresentando um sistema de designação que inclui esquemas de identificação e símbolos gráficos.

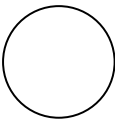
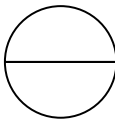
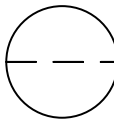
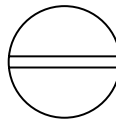
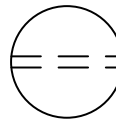
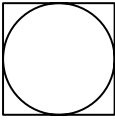
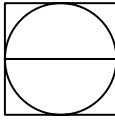
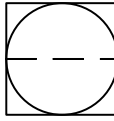
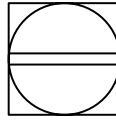
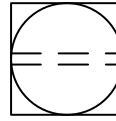
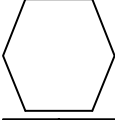
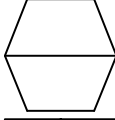
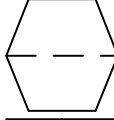
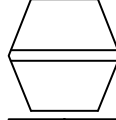
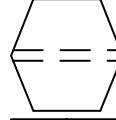
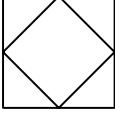
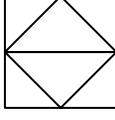
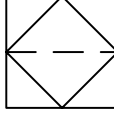
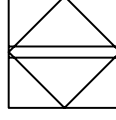
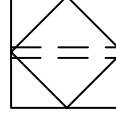
A norma ANSI/ISA-5.1 atende a diferentes procedimentos de vários usuários que necessitam identificar e representar graficamente equipamentos e sistemas de medição e controle, fornecendo símbolos alternativos e métodos de identificação. É adequada para uso nas indústrias química, de petróleo, geração de energia, refino de metais, papel e celulose, e várias outras indústrias contínuas, em batelada, de processamento de peças discretas e de manuseio de materiais [2].

De acordo com ISA [2], esta norma é utilizada na elaboração dos seguintes documentos: fluxogramas de processo e mecânicos; diagramas de sistemas de instrumentação; especificações; listas de instrumentos; identificação de instrumentação e funções de controle.

3.2.1 Símbolos dos instrumentos

No P&ID, os símbolos gerais utilizados para representar instrumentos ou funções programadas devem seguir a norma ANSI/ISA-5.1. Na Tabela 3.8 são apresentados os símbolos padronizados.

Tabela 3.8: Símbolos gerais para representar instrumento (adaptado de [2])

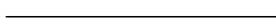
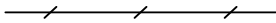
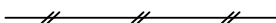
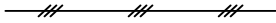
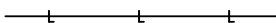
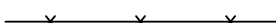
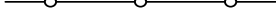
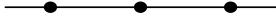
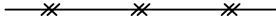
Tipo	Localização				
	Montado em campo	Painel principal acessível ao operador (1)	Painel principal não acessível ao operador (2)	Painel auxiliar acessível ao operador (1)	Painel auxiliar não acessível ao operador (2)
Instrumentos analógicos					
Instrumentos compartilhados					
Computador de processo					
Computador programável					

Notas:

- (1) Localização principal corresponde normalmente, para instrumentos discretos, ao painel central. Analogamente localização auxiliar corresponde ao painel local ou casa de controle dedicada a um conjunto de específicas de um sistema de processo.
- (2) Os dispositivos ou funções programadas, normalmente inacessíveis ou “atrás do painel” devem ser desenhados usando o mesmo símbolo mas com a linha horizontal central tracejada.

Além dos símbolos gráficos dos instrumentos, a norma ANSI/ISA-5.1 estabelece a representação das conexões do processo e dos sinais de controle e medição que conectam os instrumentos e funções ao processo e entre si. Na Tabela 3.9 são apresentados os símbolos das linhas de comunicação entre o processo e os instrumentos.

Tabela 3.9: Símbolos das linhas de comunicação (adaptado de [2]).

Representação gráfica	Definição
	suprimento (2) (3) ou impulso
	sinal a ser definido (7)
	sinal pneumático
 ou (5)	sinal elétrico
	
	sinal hidráulico
	tubo capilar
	sinal eletromagnético (6) ou sônico (transmissão guiada)
	sinal eletromagnético (6) ou sônico (transmissão não guiada) ou wi-fi
	ligação configurada internamente ao sistema (ligação de “software”)
	ligação mecânica
	sinal binário pneumático
 ou (5)	sinal binário elétrico
	

Notas para Tabela 3.9^[2]

- (1) Todas as linhas devem ser mais finas que as linhas de processo.
- (2) Quando necessário, devem ser acrescentadas as abreviaturas abaixo, para a designação do tipo de suprimento.
 - (A) AS – ar;
 - (B) ES – elétrico;
 - (C) GS – gás;
 - (D) HS – hidráulico;
 - (E) NS – nitrogênio;
 - (F) SS – vapor;
 - (G) WS – água
- (3) Quando necessário deve ser acrescentado o nível de suprimento.

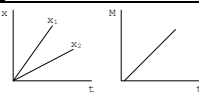
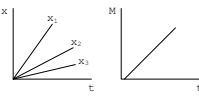
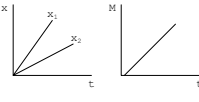
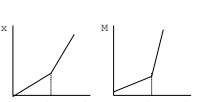
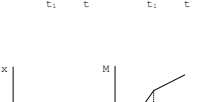
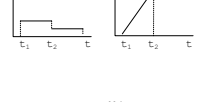
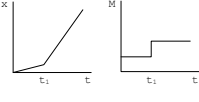
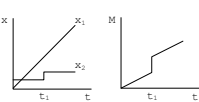
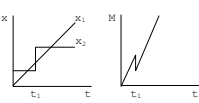
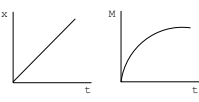
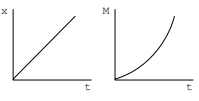
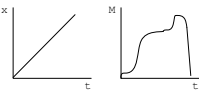
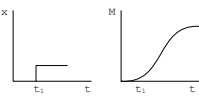
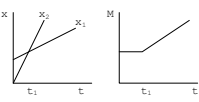
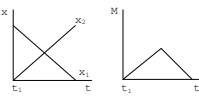
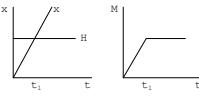
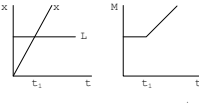
Ex. 1: AS-7, isto é, suprimento de ar a 7 kgf/cm²

Ex. 2: ES-24 vcc, isto é, suprimento elétrico, em corrente contínua de 24 v
- (4) O símbolo de sinal pneumático se aplica a sinais que usem qualquer gás como meio de transmissão. Com exceção do ar, os demais devem ser identificados.
- (5) A utilização de qualquer das alternativas apresentadas é aceitável, desde que, a opção seja mantida para todos os documentos de projeto.
- (6) O fenômeno eletromagnético inclui calor, ondas de rádio, radiação nuclear e luz.
- (7) Aplicação restrita aos fluxogramas simplificados e conceituais.

Em um diagrama de tubulação e instrumentação, muitas vezes há a necessidade de representar algumas funções, tais como divisão de sinais, soma de sinais, razão entre sinais, dentre outras. A norma ANSI/ISA-5.1 também padroniza a indicação dessas funções matemáticas no P&ID. Os blocos de função (Tabela 3.10) podem ser representados nos diagramas, seguindo as seguintes recomendações ^[2,9,24]:

- (a) Representar o instrumento ou função programada interligando diretamente na malha;
- (b) Representar a função matemática adjacente ao símbolo do instrumento ou função programada;
- (c) Combinar os itens anteriores quando houver instrumentos com funções múltiplas, onde os blocos de funções e o símbolo do instrumento que os contém são adjacentes, podendo as linhas de sinal entrar ou sair de qualquer um deles.

Tabela 3.10: Blocos de funções (adaptado de [2])

Função	Símbolo	Equação matemática	Representação gráfica	Definição
Soma	Σ	$M = X_1 + X_2 + \dots + X_n$		A saída é igual a soma algébrica das entradas
Média	Σ/n	$M = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N}$		A saída é igual a soma algébrica dividida pelo número de entradas
Diferença	Δ	$M = X_1 - X_2$		A saída é igual a diferença algébrica das duas entradas
Proporcional	$1:1$	$M = KX$		A saída é diretamente proporcional a entrada. No caso de reforçador (booster) de volume deve ser representado 1:1. Para ganhos inteiros, 2:1, 3:1, etc.
	$2:1$			
	$3:1$			
Integral	$\int$	$M = \frac{1}{T_i} \int X dt$		A saída varia de acordo com a intensidade e a duração da entrada. A função de saída é proporcional a integral da função de entrada em função do tempo
Derivativo	d/dt	$M = T_D \frac{dx}{dt}$		A saída varia de acordo com a intensidade e a duração da entrada. A função de saída é proporcional a derivada da função de entrada em função do tempo
Multiplicação	$\times$	$M = X_1 X_2$		A saída é igual ao produto de duas entradas
Divisão	$\div$	$M = \frac{X_1}{X_2}$		A saída é igual ao quociente de duas entradas
Radiciação	$\sqrt[n]{}$	$M = \sqrt[n]{X}$		A saída é a raiz enésima. Assume-se o valor 2 quando "n" for omitido
Exponenciação	X^n	$M = X^n$		A saída é igual a entrada elevada a enésima potência
Função não linear ou não específica	$f(x)$	$M = f(x)$		A saída é igual a uma função, não linear ou não específica da entrada.
Tempo	$f(t)$	$M = Xf(t)$ $M = f(t)$		A saída é igual ao produto da entrada por uma variável função do tempo ou é igual a variável função do tempo sozinha.
Seleção de alta	$>$	$M = \begin{cases} X_1 & p/ X_1 \geq X_2 \\ X_2 & p/ X_1 \leq X_2 \end{cases}$		A saída é igual a maior das entradas
Seleção de baixa	$<$	$M = \begin{cases} X_1 & p/ X_1 \leq X_2 \\ X_2 & p/ X_1 \geq X_2 \end{cases}$		A saída é igual a menor das entradas
Limite superior	$\nlessgtr$	$M = \begin{cases} X & p/ X \leq H \\ H & p/ X \geq H \end{cases}$		A saída é o menor valor entre a entrada e o valor limite superior
Limite inferior	$\nlessgtr$	$M = \begin{cases} X & p/ X \geq L \\ L & p/ X \leq L \end{cases}$		A saída é o maior valor entre a entrada e o valor limite inferior
Inversamente proporcional	K	$M = -KX$		A saída é inversamente proporcional a entrada

3.2.2 Identificação funcional

A norma ANSI/ISA-5.1 estabelece que cada instrumento ou função programada deve ser indicado por um conjunto de letras, conforme apresentado na Tabela 3.11, e por um conjunto de números. A primeira letra do conjunto indica a variável de processo (variável medida ou controlada) e as letras subsequentes indicam a função que o instrumento exerce na malha de controle. O primeiro grupo numérico indica a área dentro do processo, e o segundo grupo corresponde à numeração sequencial do instrumento dentro da malha^[2,9]. Combinações das letras da identificação funcional são apresentadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.11: Letras de Identificação de Instrumentos (adaptado de [2,9])

L E T R A	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 (1)		Alarme		
B	Chama				
C	Escolha do usuário (2)			Controlador	
D	Escolha do usuário	Diferencial			
E	Tensão		Sensor (elemento primário)		
F	Vazão	Razão			
G	Escolha do usuário		Visor (3)		
H	Comando manual				Alto (4)(5)
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 (4)(5)
M	Escolha do usuário	Instantâneo			Médio ou intermediário (4)
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		Registrador ou impressora		
S	Velocidade ou frequência	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 sequência de eventos	Eixo y		Relé, relé de computação, conversor ou solenoides	
Z	Posição	Eixo z		Elemento final de controle n/classificado	

Notas para Tabela 3.11^[2,9]

- (1) A letra **A** abrange todos os tipos de analisadores. Recomenda-se que o tipo de análise realizada pelo instrumento seja definido fora do círculo de identificação.
- (2) Uma letra do tipo escolha do usuário é utilizada para cobrir significados não listados.
- (3) A função passiva **G** aplica-se a instrumento e dispositivo que fornecem uma indicação visual não calibrada (Ex: visor de vidro).
- (4) Os termos modificadores **alto**, **baixo**, **médio** ou **intermediário** correspondem aos valores das variáveis medidas e dependem da característica do processo (Ex: para um processo 1 bar pode ser uma pressão alta e para outro ser pressão baixa).
- (5) As letras modificadoras de função **L** ou **H** quando repetidas, representam a graduação de valores de uma variável em uma mesma malha. Ex.: HH - muito alto e LL - muito baixo

Tabela 3.12: Combinação de identificação funcional típicas (adaptado de [2,24]).

LETRA	VAR. MEDIDA OU INDICADA	CONTROLADORES				DISP. DE INFO.		CHAVE E DISP. DE ALAR.			TRANSMISSORES			ELEM. PRIM.	PONTO DE TESTE	POÇO OU PONTA DE PROVA	VISÃO DIRETA
		R (1)	I (2)	CEGO	VC (3)	R (1)	I (2)	ALTO	BAIXO	COMB.	R (1)	I (2)	CEGO				
A	Análise	ARC	AIC	AC	ACV	AR	AI	ASH	ASL	ASHL	ART	AIT	AT	AE	AP	AW	
B	Chama	BRC	BIC	BC		BR	BI	BSH	BSL	BSHL	BRT	BIT	BT	BE		BW	BG
C	Condutividade	CRC	CIC	CC		CR	CI	CSH	CSL	CSHL	CRT	CIT	CT	CE			
D	Densidade	DRC	DIC	DC		DR	DI	DSH	DSL	DSHL	DRT	DIT	DT	DE			
E	Tensão	ERC	EIC	EC		ER	EI	ESH	ESL	ESHL	ERT	EIT	ET	EE			
F	Vazão	FRC	FIC	FC	FCV	FR	FI	FSH	FSL	FSHL	FRT	FIT	FT	FE	FP		FG
H	Manual		HIC	HC						HS							
I	Corrente elétrica	IRC	IIC			IR	II	ISH	ISL	ISHL	IRT	IIT	IT	IE			
J	Potência	JRC	JIC			JR	JI	JSH	JSL	JSHL	JRT	JIT	JT	JE			
K	Tempo	KRC	KIC	KC	KCV	KR	KI	KSH	KSL	KSHL	KRT	KIT	KT	KE			
L	Nível	LRC	LIC	LC	LCV	LR	LI	LSH	LSL	LSHL	LRT	LIT	LT	LE		LW	LG
P	Pressão	PRC	PIC	PC	PCV	PR	PI	PSH	PSL	PSHL	PRT	PIT	PT	PE	PP		
Q	Quantidade	QRC	QIC			QR	QI	QSH	QSL	QSHL	QRT	QIT	QT	QE			
R	Radiação	RRC	RIC	RC		RR	RI	RSH	RSL	RSHL	RRT	RIT	RT	RE		RW	
S	Velocidade	VRC	VIC	SC	SCV	SR	SI	SSH	SSL	SSHL	VRT	VIT	VT	VE			
T	Temperatura	TRC	TIC	TC	TCV	TR	TI	TSH	TSL	TSHL	TRT	TIT	TT	TE	TP	TW	
U	Multivariável					UR	UI										
V	Viscosidade					VR	VI	VSH	VSL	VSHL	VRT	VIT	VT	VE			
W	Peso ou força	WRC	WIC	WC	WCV	WR	WI	WSH	WSL	WSHL	WRT	WIT	WT	WE			
X	Não classificada																
Y	Estado presença		YIC	YC		YR	YI	YSH	YSL	YSHL			YT	YE			
Z	Posição	ZRC	ZIC	ZDC	ZCV	ZR	ZI	ZSH	ZSL	ZSHL	ZRT	ZIT	ZT	ZE			

Notas para Tabela 3.12: (1) registrador; (2) indicador; (3) válvula de controle

Segundo a norma ANSI/ISA-5.1, o instrumento deve apresentar a identificação funcional e um número que identificará a malha à qual pertence, sendo este número comum a todos os instrumentos que compõem a mesma malha. Caso um instrumento pertença a mais de uma malha, ele deverá receber o número da malha principal. A numeração da malha pode ser feita de forma paralela ou sequencial. Usualmente, na indústria, utiliza-se a numeração paralela [2,9,24].

Numeração paralela: inicia-se uma sequência numérica para cada variável de processo (primeira letra), por exemplo: TIC-201; FIC-201; LC-201; AI-201 etc. **Numeração sequencial (serial):** segue uma sequência numérica única e contínua, por exemplo: TIC-201; FIC-202; LC-203; AI-204 etc.

EXEMPLO 3.2: Em um P&ID um instrumento apresenta a seguinte identificação funcional e numérica TIC-201. Com o auxílio da Tabela 3.11 identifique o instrumento.

T: variável medida (**temperatura**)

I : função passiva ou de informação (**indicador**)

C: função ativa ou de saída (**controlador**)

2 : área de atividade, onde o instrumento ou função atua

01 : número sequencial do instrumento ou função. ■

EXEMPLO 3.3: Considere os diagramas representados na Figura 3.5. Faça uma análise dos instrumentos apresentados.

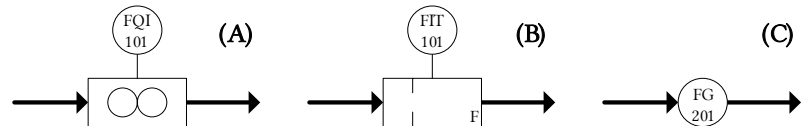


Figura 3.5: Diagramas de instrumentação seguindo norma ANSI/ISA-5.1

Figura 3.5A – medição de vazão (hidrômetro): temos um indicador e totalizador de vazão que está em campo na área 100 sendo o instrumento nº 01 da malha.

Figura 3.5B – medição de vazão (placa de orifício): temos um sensor de vazão do tipo placa de orifício, um transmissor e indicador de vazão que está em campo na área 100 sendo o instrumento nº 01 da malha.

Figura 3.5C – observação de líquido: temos um visor de vazão que está em campo na área 200 sendo o instrumento nº 01 da malha. ■

EXEMPLO 3.4: Considere o sistema de controle de nível do tanque de armazenamento TK-201 representado no P&ID da Figura 3.6. Faça uma análise dos instrumentos apresentados.

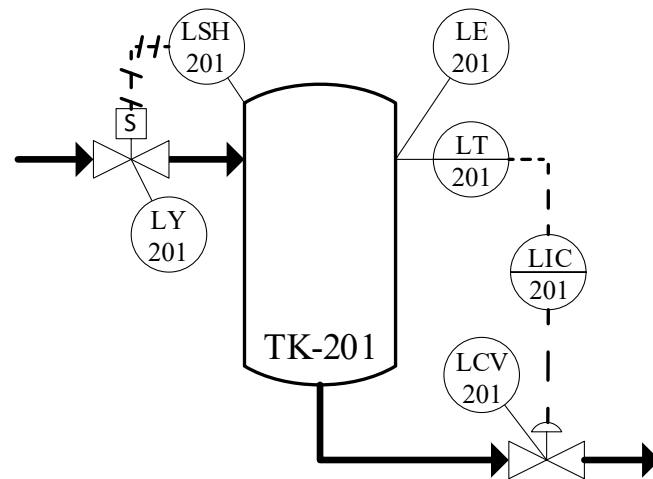


Figura 3.6: Diagrama de instrumentação de um tanque de armazenamento

O sistema ilustrado na Figura 3.6 possui um controle de nível e um sistema de segurança representado pelos instrumentos LSH-201 e LY-201.

Detalhando os instrumentos.

LE: elemento sensor número 01, alocado em campo ou local) na área 200 do processo.

LT-201: transmissor de nível número 01, alocado em um painel principal na área 200 do processo, acessível ao operador que transmite um sinal elétrico analógico para o instrumento LIC-201.

LIC-201: controlador e indicador de nível número 01, alocado em um painel principal na área 200, acessível ao operador que envia um sinal elétrico analógico para o instrumento LCV-201.

LCV-201: válvula de controle de nível número 01, alocada em campo (ou local), na área 200 do processo, de atuação elétrica.

LSH-201: chave de nível alto número 01, alocada em campo (ou local), na área 200 do processo, que envia um sinal elétrico binário (ou discreto) para o instrumento FY-201.

FY-201: válvula de posição número 01 (válvula solenoide de acionamento elétrico), alocada em campo (ou local) na área 200 do processo. ■

EXEMPLO 3.5: Descreva a funcionalidade, a localização e os sinais de transmissão dos instrumentos que compõem o P&ID representado pela Figura 3.7.

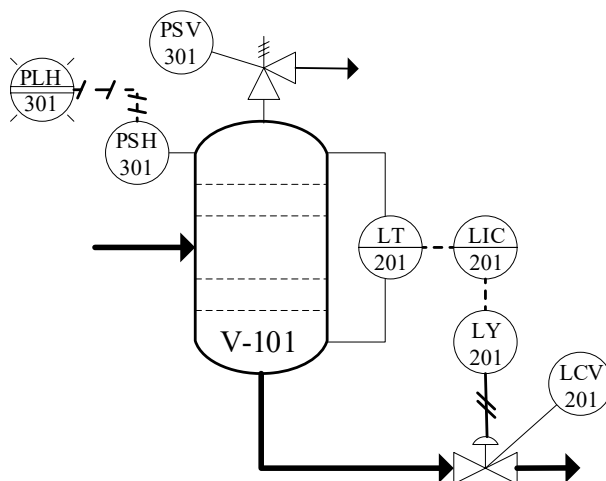


Figura 3.7: Diagrama de instrumentação de um vaso pressurizado

Uma forma interessante de análise dos instrumentos é por meio de tabelas. A Tabela 3.13 apresenta a análise do exemplo 3.5.

Tabela 3.13: Instrumentos presentes no P&ID do exemplo 3.5

Instrumento	Função	Local	Sinal
LT-201	Transmissor de nível	PPAO	Elétrico analógico
LIC-201	Controlador e indicador de nível	PPAO	Elétrico analógico
LY-201	Conversor de nível	Campo	Pneumático analógico
LCV-201	Válvula de controle de nível	Campo	Pneumático analógico
PSV-301	Válvula de segurança de pressão	Campo	
PSH-301	Chave de pressão alta	Campo	Elétrico binário
PLH-301	Lâmpada de pressão alta	PAAO	

PPAO – painel principal acessível ao operador; PAAO – painel auxiliar acessível ao operador

Uma observação importante neste exemplo são as identificações numéricas apresentadas. Primeiramente, temos a identificação do equipamento V-101 (lembrando que não se utiliza da norma ANSI/ISA 5.1 para a nomenclatura). V-101 é a representação do vaso pressurizado, estando ela localizada na área 100 do processo. Depois, temos uma malha de controle de nível identificada como 200 e um sistema de segurança que está vinculado a uma malha 300. O fato de o equipamento estar localizado na área 100 não implica que os instrumentos também devam pertencer à área 100. ■

Na norma ANSI/ISA-5.1 são apresentados diversos exemplos que podem ser utilizados como base para o desenvolvimento do P&ID.

Capítulo 4

Medição de temperatura

A medição de temperatura é crucial para garantir a qualidade, segurança e eficiência em processos industriais, influenciando diretamente a operação e o desempenho de equipamentos. Este capítulo explora os principais conceitos e instrumentos de medição de temperatura, como termômetros de resistência (RTD), termopares e termômetros convencionais, destacando seus princípios de funcionamento, vantagens e limitações. São abordados fundamentos de termometria, pirometria e escalas de temperatura, além das leis termoeletrônicas que sustentam o funcionamento dos termopares. O capítulo também detalha as configurações de ligação dos sensores e as técnicas de compensação para medições precisas. Ao final, o leitor será capaz de selecionar sensores adequados com base nas condições do processo e aplicar os conceitos de termometria para garantir medições confiáveis em ambientes industriais.

A medição de temperatura é uma das variáveis mais relevantes nos processos industriais, sendo essencial para garantir a qualidade e a especificação dos produtos. Sua importância decorre do fato de ser a grandeza física mais monitorada e uma das variáveis fundamentais da engenharia. Independentemente do setor – seja químico, petroquímico, siderúrgico, cerâmico, farmacêutico, alimentício, de papel e celulose, hidrelétrico ou nuclear – o controle preciso da temperatura é indispensável para a eficiência e segurança dos processos. Sua medição é crucial tanto para o monitoramento e controle de processos físicos e químicos quanto para a proteção de equipamentos. Além disso, é importante destacar que poucos fenômenos físicos ocorrem de maneira independente da temperatura, o que reforça sua influência em praticamente todas as áreas da engenharia e da indústria. [\[3,9,20,24\]](#).

4.1 Conceitos básicos

Para um melhor entendimento da medição de temperatura, devemos ter em mente alguns conceitos básicos da termodinâmica e da transferência de calor que influenciam e possibilitam sua medição.

4.1.1 Termometria

Termometria refere-se à medição de temperatura em sentido amplo, abrangendo diferentes métodos, instrumentos e faixas de operação. Em alguns contextos, o termo pirometria é utilizado como sinônimo, embora exista uma distinção técnica entre os dois. Contudo, ao considerarmos o significado etimológico dos termos, temos as seguintes definições [\[36\]](#).

Pirometria: Medição de altas temperaturas, considerando a manifestação dos efeitos da radiação térmica.

Criometria: Medição de baixas temperaturas. Considere-se, para criometria, que baixas temperaturas são aquelas próximas ao zero absoluto.

Termometria: Termo mais amplo que inclui a medição de altas temperaturas (pirometria) e de baixas temperaturas (criometria).

4.1.2 Temperatura e a escala termométrica

A grandeza física **temperatura** é a medida da quantidade média de energia cinética das moléculas de um sistema (grau de agitação), e, por meio da temperatura, podemos quantificar o **calor**. Quanto maior a agitação das moléculas, maior será a quantidade de calor transferida e maior será a temperatura. Em termos de medição, ela representa o aquecimento ou resfriamento relativo de um meio [\[3,9,37\]](#). Ao longo da história, diversas escalas de temperatura

foram criadas com o objetivo de facilitar a medição e a compreensão do calor, dentre as quais se destacam:

Fahrenheit (1724)^[38]: Criada pelo físico alemão Daniel Gabriel Fahrenheit, essa escala se baseava em dois pontos de referência: o congelamento da água a 32 °F e a ebulição a 212 °F. A diferença entre esses pontos foi dividida em 180 partes iguais, originando o grau Fahrenheit (°F).

Celsius (1742)^[39]: Desenvolvida pelo físico sueco Anders Celsius, essa escala dividia a diferença entre os pontos de fusão e ebulição da água em 100 partes iguais. Inicialmente chamada de escala centígrada, foi posteriormente renomeada para Celsius (°C) e se tornou uma das mais utilizadas no mundo para medições de temperatura.

Kelvin (1832)^[40]: Proposta por William Thomson, conhecido como Lord Kelvin, essa escala termodinâmica absoluta é baseada na escala Celsius. Cada variação de temperatura corresponde a 1 K, com o ponto triplo da água fixado em 273,15 K. O zero absoluto (0 K) representa a menor temperatura possível, onde o movimento molecular cessa completamente.

Rankine (1859)^[41]: Criada pelo físico escocês William John Macquorn Rankine, essa escala é semelhante à de Kelvin, mas utiliza graus Fahrenheit como base. Na escala Rankine (°R), 1 °R equivale a 1 °F, com os pontos de fusão e ebulição da água definidos em 491,6 °R e 671,6 °R, respectivamente.

Podemos observar a comparação entre as escalas de temperatura citadas na Figura 4.1.

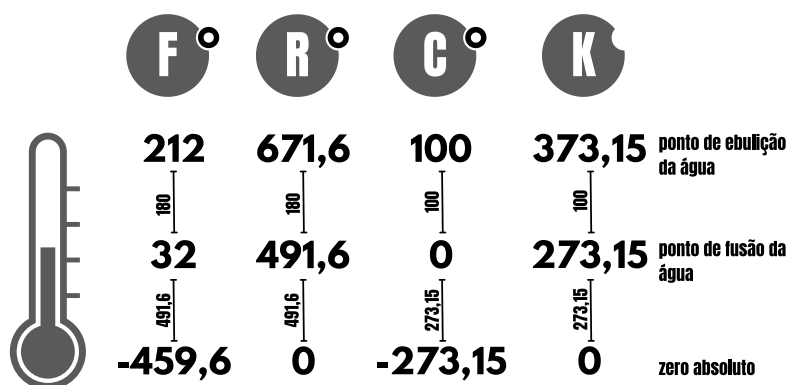


Figura 4.1: Comparação entre as escalas de temperatura

Um acordo realizado em 1911 entre os diretores dos Laboratórios Nacionais da Alemanha, da Grã-Bretanha e dos Estados Unidos estabeleceu a unificação das escalas de temperatura em seus respectivos países. Esse acordo foi aprovado em 1913 pela Quinta Conferência Geral de Pesos e Medidas e, em 1927, na Sétima Conferência Geral, foi adotada por unanimidade a resolução proposta pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas, que reconhecia a importância prática da representação de uma escala internacional de temperatura. Além do reconhecimento, o Comitê recomendou à Conferência que aceitasse, de forma provisória, os referenciais de temperatura, as equações de interpolação e os métodos de medição propostos pelos Laboratórios Nacionais da Alemanha, da Grã-Bretanha e dos Estados Unidos. Com isso, foi criada a primeira escala internacional de temperatura^[42,43].

A **Escala Internacional de Temperatura (ITS)** é a base para a maioria das medições de temperatura atuais. A primeira escala adotada ficou conhecida como **Escala Internacional de Temperatura de 1927 (ITS-27)** e foi formulada para permitir medições de temperatura com exatidão, precisão e reprodutibilidade próximas das temperaturas termodinâmicas vigentes na época. Tinha como base o ponto de ebulição do oxigênio e o ponto de congelamento do ouro, sendo a temperatura medida por um termômetro de resistência de platina para as medidas inferiores e um termômetro de platina + platina-ródio para temperaturas acima de 600 °C. Para as regiões acima do ponto de congelamento do ouro, foi utilizada a lei de radiação de Wien para a definição das temperaturas^[37,43,44,45].

A **Escala Internacional de Temperatura de 1948 (ITS-48)** substituiu a ITS-27, tendo como mudanças o ponto de ebulição do oxigênio, que passou de -190 °C para -182,97 °C, e o

ponto de congelamento do ouro, que foi substituído pelo ponto de fusão de 1063 °C. A lei de Wien foi substituída pela lei da radiação de Planck. Mais tarde, em 1960, a ITS-48 foi corrigida, passando a ser chamada de **Escala Prática Internacional de Temperatura de 1948 (IPTS-48)**. As modificações não se restringiram à adição da palavra "Prática", mas também incluíram a definição do ponto triplo da água em 0,01 °C [37,44,45,46].

Em 1968, a IPTS-48 foi substituída pela **Escala Prática Internacional de Temperatura de 1968 (IPTS-68)**. Nessa nova reforma, dentre várias alterações, destaca-se a mudança do ponto de ebulição do oxigênio para 90,188 K e o ponto de congelamento do ouro, de 1063 °C para 1064,58 °C. Uma correção na IPTS-68 foi realizada em 1975, tendo como principal alteração a substituição do ponto de ebulição do oxigênio pelo ponto de condensação do oxigênio [37,44,45,47].

A IPTS-68 foi substituída pela Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90), a qual não apresenta impacto prático significativo nas medições industriais. Foi estabelecida para corrigir alguns valores de temperatura que definem os padrões primários utilizados até os dias atuais. Uma comparação entre os pontos fixos determinados pelas ITS pode ser observada na Tabela 4.1, e a diferença entre alguns desses pontos fixos pode ser observada na Figura 4.2.

Tabela 4.1: Comparação entre diferentes pontos fixos e as Escalas Internacionais de Temperatura.

Pontos Fixos	ITS-27 ^[43]	IPTS-48 ^[46]	IPTS-68 ^[47]	ITS-90 ^[45]
	T ₂₇ (°C)	T ₄₈ (°C)	T ₆₈ (°C)	T ₉₀ (°C)
Ponto triplo do hidrogênio			-259,340	-259,3467
Ponto de ebulição do hidrogênio			-252,870	-252,8500
Ponto de ebulição do neon			-246,048	-248,5939
Ponto triplo do oxigênio			-218,789	-218,7916
Ponto de ebulição do oxigênio	-182,97	-182,970	-182,962	
Ponto de congelamento do mercúrio	-38,87	-38,870	-38,862	-38,8344
Ponto triplo da água	0,00	0,010	0,010	0,0100
Ponto de ebulição da água	100,00	100,000	100,000	100,0000
Ponto de congelamento do índio			156,634	156,5985
Ponto de congelamento do cádmio	320,90	321,030	321,108	
Ponto de congelamento do zinco	419,45	419,505	419,580	419,5270
Ponto de ebulição do enxofre	444,60	444,600		
Ponto de congelamento da prata	960,50	960,800	961,930	961,7800
Ponto de congelamento do cobre	1083,00	1083,000	1083,000	1084,6200
Ponto de congelamento do ouro	1063,00	1063,000	1064,430	1064,1800
Ponto de congelamento do paládio	1555,00	1552,000	1554,000	
Ponto de fusão do tungstênio	3400,00	3380,000	3387,000	

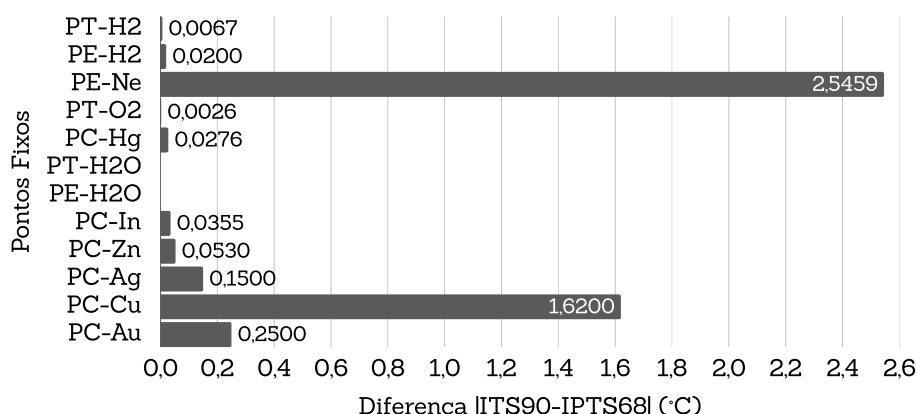


Figura 4.2: Diferenças absolutas as Escalas Internacionais de Temperatura IPTS-68 e ITS-90. Nota: PC – ponto de congelamento; PE – ponto de ebulição; PT – ponto triplo.

4.2 Termômetros convencionais

Toda medição de temperatura é feita de forma indireta, ou seja, é baseada na alteração de alguma propriedade física de um material. Essas propriedades podem ser o comprimento, o volume, a resistência elétrica, entre outras. Na Tabela 4.2, podemos verificar alguns tipos de sensores de temperatura tradicionais, conhecidos como termômetros.

Tabela 4.2: Tipos de sensores de temperatura e suas principais características (adaptado de [3,9]).

Tipo	Princípio	Construção	Observações
Dilatação de líquidos ou bimetálico	O líquido presente no sensor sofre a dilatação ou contração frente ao aquecimento ou resfriamento, respectivamente, seguindo a lei da expansão volumétrica: $V_t = V_0 (1 + \beta \Delta t)$ Onde: V_0 – volume inicial do líquido a temperatura t_0; V_t – volume do líquido a temperatura t; β – coeficiente de expansão de líquido.	Recipiente de vidro transparente ou metálico.	O líquido mais utilizado é o mercúrio, porém, devido a algumas restrições, são utilizados outros componentes orgânicos como álcoois. Esse tipo de termômetro é utilizado apenas como indicador local e não permite leitura remota.
Dilatação de sólidos	Tem como princípio o fenômeno da dilatação linear dos metais em função da temperatura: $L_t = L_0 (1 + \alpha \Delta t)$ Onde: L_0 – comprimento do metal à temperatura inicial de referência t_0; L_t – comprimento do metal a temperatura t; α – coeficiente de dilatação linear.	Consiste em duas lâminas metálicas com diferentes coeficientes de dilatação, sobrepostas para formar uma única peça. Quando há uma variação de temperatura no conjunto, observa-se uma deformação proporcional à variação de temperatura.	Os metais mais utilizados são o invar (liga de ferro e níquel), que tem baixo coeficiente de dilatação, juntamente com outra liga de alta dilatação. Assim como os termômetros de dilatação de líquido, esse tipo de termômetro também não permite leituras remotas, sendo utilizado apenas como indicador local.
Pressão de gás (1)	O princípio de funcionamento se dá pela Lei de Gay-Lussac. Segundo Gay-Lussac, a pressão de um gás é proporcional à sua temperatura, desde que se mantenha constante o volume, e essa relação pode ser expressa por: $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n}{T_n}$ Onde: P_n – pressão do gás no estado n; T_n – temperatura do sistema no estado n.	Constituído por um bulbo e um elemento de medição conectados por um tubo capilar. O conjunto é preenchido com gás a alta pressão. O sistema é hermeticamente selado, permitindo seu funcionamento a volume constante.	O gás mais utilizado é o N_2 , e geralmente é pressurizado entre 20 e 50 atm. Outros gases utilizados são He , H_2 e CO_2 . Também são utilizados como indicadores locais de temperatura.
Pressão de vapor (2)	Tem seu funcionamento baseado na Lei de Dalton: A pressão de vapor saturado depende somente de sua temperatura, independentemente de seu volume.	Sua construção se assemelha à do termômetro de pressão a gás, sendo preenchido com líquido e vapor de cloreto de metila, álcool etílico, éter ou tolueno.	A mínima temperatura a ser medida nesse termômetro deve ser superior ao ponto de ebulição do líquido, enquanto a temperatura máxima deve ser limitada pela temperatura crítica do líquido.

Notas (1) e (2): Os termômetros de pressão a gás e de pressão de vapor também são conhecidos como sistemas de bulbo-capilar. O bulbo é conectado, via capilar, a um tubo de Bourdon (semelhante aos utilizados em manômetros, [Seção 5.2.2](#)), podendo ser: Tipo espiral, Tipo C ou Tipo helicoidal.

4.3 Termômetros de resistência

Os termômetros de resistência, também conhecidos como RTD (*Resistance Temperature Detectors*), são amplamente utilizados nas medições de temperatura de processos industriais. Foram inventados em 1821 por Thomas Johann Seebeck, porém foi somente em 1887 que Paul Callendar desenvolveu os primeiros termômetros de resistência práticos [9,48].

O princípio de medição é baseado na variação da resistência elétrica de um condutor metálico em função da temperatura, sendo a medição realizada por meio de um sistema do tipo ponte de Wheatstone (Figura 4.3). Na ponte de Wheatstone, a tensão de saída é indicada de forma indireta pela resistência do RTD, representada por R4 na Figura 4.3. A ponte é composta por quatro fios de conexão, uma fonte externa e três resistores que possuem coeficiente de temperatura igual a zero [48].

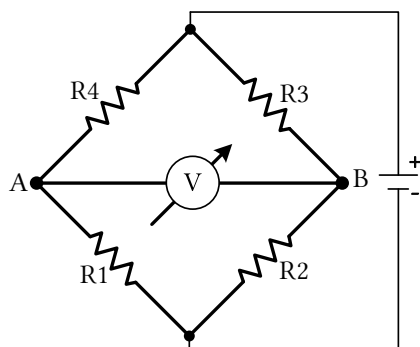


Figura 4.3: Representação da ponte de Wheatstone

A variação da resistência em função da temperatura pode ser determinada pelas Eq. 4.4 e 4.5 [9,36,49]:

$$R(T) = R_o(1 + \alpha T) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$\alpha = \frac{R(T) - R_o}{R_o T} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Onde: $R(T)$ – resistência na temperatura medida (Ω); R_o – resistência na temperatura de referência (Ω); α – coeficiente de variação da resistência em função da temperatura medida ($1/^\circ\text{C}$)

Os metais utilizados nos termômetros de resistência são o cobre, o níquel e a platina. A relação da resistência relativa desses metais com a variação de temperatura pode ser observada na Figura 4.4, e na Tabela 4.3 são apresentadas as principais propriedades termoeletricas e características desses metais.

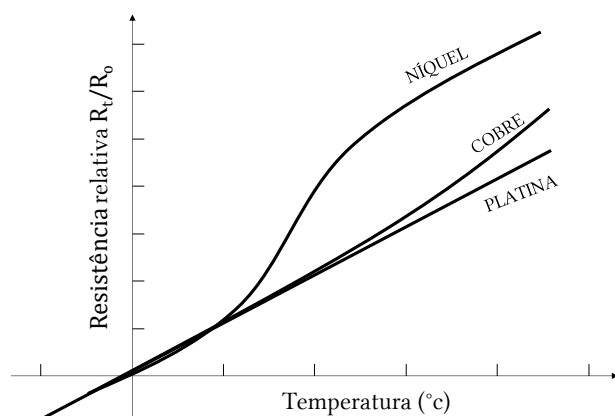


Figura 4.4: Resistência relativa em função da temperatura para o Cu, Ni e Pt (adaptado de [37] e [42]).

Tabela 4.3: Propriedades termoeletricas, faixa de utilização e características dos metais mais utilizados em termômetros de resistência (adaptado de [36,37]).

Metal	Range de operação ($^\circ\text{C}$)		Resistividade a 0 $^\circ\text{C}$ ($\mu\Omega \text{ m}$)	R_t/R_o	Características
	Normal	Especial			
Cu	-50 a 150	-50 a 150	0,017 a 0,018	1,426	baixa resistência frente a oxidação limita sua faixa de temperatura utilizada
Ni	-60 a 150	-60 a 180	0,090 a 0,110	1,617	baixo custo e alta sensibilidade, porém a baixa linearidade limita seu uso
Pt	-200 a 850	-260 a 1000	0,100 a 0,110	1,385	metal mais empregado na construção de termômetros de resistência, possuindo boa linearidade e resistência a oxidação

4.3.1 Termômetro de resistência de platina

O termômetro de resistência de platina, também conhecido como Pt-100, possui um elemento de platina e resistência padronizada (R_4 da Figura 4.3) de $100\ \Omega$ a $0\ ^\circ\text{C}$. É o termômetro mais utilizado industrialmente devido à sua estabilidade, exatidão, precisão, repetibilidade, ampla faixa de operação e bom tempo de resposta^[9,36,50].

Para o Pt-100, a variação da resistência em função da temperatura pode ser determinada pelas equações de Callendar (Eq. 4.6) e Van Dusen (Eq. 4.7). A Eq. 4.6 é utilizada no intervalo de $-248\ ^\circ\text{C}$ a $0\ ^\circ\text{C}$, e a Eq. 4.7 no intervalo de $0\ ^\circ\text{C}$ a $850\ ^\circ\text{C}$ ^[3,6,9,37,48,51,52].

$$R_{(T)} = R_o(1 + aT + bT^2 + cT^3(T - 100)) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$R_{(T)} = R_o(1 + aT + bT^2) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Onde: $R_{(T)}$ – resistência na temperatura medida (Ω); R_o – resistência na temperatura de referência (Ω); a , b , c – constantes do metal ($^\circ\text{C}^{-1}$; $^\circ\text{C}^{-2}$; $^\circ\text{C}^{-4}$).

Assim como todo termorresistor, o Pt-100 funciona associado a circuitos que realizam a conversão da variação de resistência em uma leitura de temperatura ou em um sinal padronizado. Como dito anteriormente, esse circuito pode ser a ponte de Wheatstone. Um dos motivos para se utilizar a ponte de Wheatstone é a alta precisão e exatidão de medição em diversos sistemas industriais^[9,36,50].

Segundo Bega et al^[9], não há necessidade de se preocupar com os circuitos que formam o transmissor, pois estes são fornecidos pelos fabricantes. Contudo, é muito importante compreendermos a conexão entre o sensor e o transmissor, que pode apresentar as seguintes configurações: ligação a 2 fios, ligação a 3 fios e ligação a 4 fios.

Na **ligação a 2 fios** (Figura 4.5A), R_4 é a resistência do Pt-100, R_3 é uma resistência variável destinada à aferição do circuito, e RL_1 e RL_2 são as resistências associadas à fiação. As resistências RL_1 e RL_2 tendem a aumentar com o aumento da distância entre o sensor e o circuito, com a bitola dos fios e com a temperatura ambiente. Quando a ponte estiver balanceada, teremos^[9,36,50]:

$$R_1 \times R_3 = R_2 \times (RL_1 + RL_2 + R_4) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Sendo, na Eq. 4.8, $R_1=R_2$ obtemos:

$$R_3 = RL_1 + RL_2 + R_4 \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Essa configuração é utilizada quando não há exigência de alta exatidão e/ou precisão na medição. Mesmo com a ponte balanceada (Eq. 4.9), dependendo dos valores de RL_1 e RL_2 , podem surgir erros na medição. Esses erros decorrem do comprimento dos fios de ligação e de variações na temperatura. Recomenda-se que a distância entre os pontos de medição e leitura não ultrapasse 3 m^[9,50].

A **ligação a 3 fios** (Figura 4.5B) é a configuração mais utilizada na indústria. Nessa configuração, R_4 é a resistência do Pt-100, R_3 é uma resistência variável destinada à aferição do circuito, RL_1 e RL_2 são as resistências associadas à fiação e RL_3 é a resistência do condutor de compensação. Estando o circuito balanceado, temos^[9,36,50]:

$$R_1 \times (R_3 + RL_1) = R_2 \times (R_4 + RL_2) \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Sendo, na Eq. 4.10, $R_1=R_2$ obtemos:

$$R_3 + RL_1 = R_4 + RL_2 \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Quando os fios de ligação têm o mesmo comprimento, são compostos do mesmo material, possuem a mesma bitola e estão submetidos à mesma temperatura, podemos considerar, na Eq. 4.11, que $RL_1 = RL_2$. Assim, o circuito estará balanceado na forma $R_3 = R_4$. Esta é a configuração mais comum na indústria e pode ser utilizada em distâncias superiores a 3 m entre os pontos de medição e leitura.

Os problemas apresentados nas ligações anteriores podem ser eliminados com a **ligação**

a 4 fios (Figura 4.5C). Uma fonte de corrente contínua (S) alimenta o circuito, minimizando o erro provocado pela resistência dos condutores, o que permite o balanceamento total das resistências da fiação. Este tipo de configuração é pouco utilizado na indústria devido à sua complexidade de montagem, mas é amplamente empregado em laboratórios de calibração^[9,36,50].

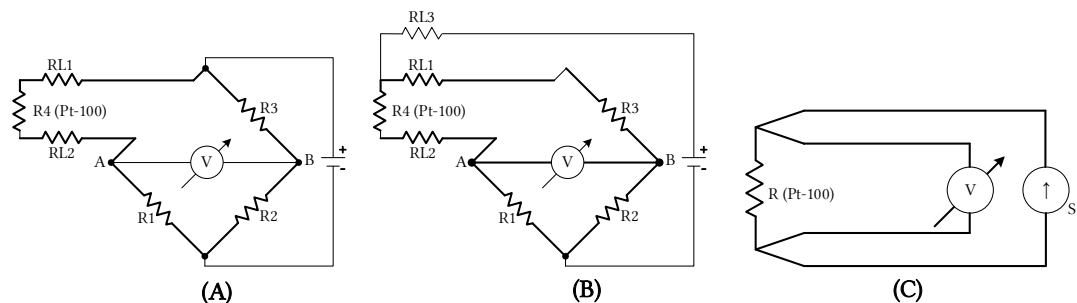


Figura 4.5: Circuito de ligação de termômetros de resistência: (A) 2 fios; (B) 3 fios e; (C) 4 fios.

Uma comparação entre os termômetros de resistência e os termopares (veremos a seguir) é apresentada na Tabela 4. 4.

Tabela 4. 4: Comparação entre as caraterísticas dos termômetros de resistência e os termopares.

Características	Pt-100	Termopar
Maior precisão dentro da faixa de utilização	☒	☐
Melhor estabilidade e repetibilidade	☒	☐
Maior limitação para distância de operação (exige ligação adequada)	☐	☒
Necessita de fios/cabos de extensão e compensação específicos	☐	☒
Menor influência de ruídos elétricos na medição	☒	☐
Menor custo (considerando a faixa de medição)	☐	☒
Maior range de medição	☐	☒
Pode se deteriorar se ultrapassada a temperatura máxima de operação	☒	☐
Necessidade de que todo o bulbo esteja em temperatura estabilizada	☒	☐
Menor tempo de resposta	☐	☒
Fragilidade mecânica	☒	☐
Auto aquecimento	☒	☐

4.4 Termômetro de par termoelétrico (termopares)

Os termopares são frequentemente referidos como o carro-chefe da medição de temperatura. São muito utilizados devido ao seu baixo custo, simplicidade, robustez, ampla faixa de operação e resposta rápida. Porém, apresentam menor exatidão em relação aos termômetros de resistência. Ao contrário dos RTDs, que necessitam da aplicação de uma corrente elétrica externa para funcionarem como sensores de temperatura, os termopares geram seu próprio potencial elétrico, evitando assim o autoaquecimento^[49,51].

Um termopar (Figura 4.6) é constituído por dois condutores metálicos distintos, unidos em uma extremidade, chamada de junta de medição ou junta quente. A outra extremidade é conectada ao instrumento de medição e é conhecida como junta de referência ou junta fria. Se as duas junções estiverem em temperaturas diferentes, uma corrente fluirá no circuito, gerando uma força eletromotriz (FEM) na forma de uma diferença de potencial^[3,6,9,36,37,42,49,50,51]. O princípio de funcionamento dos termopares está resumido na Figura 4.7.

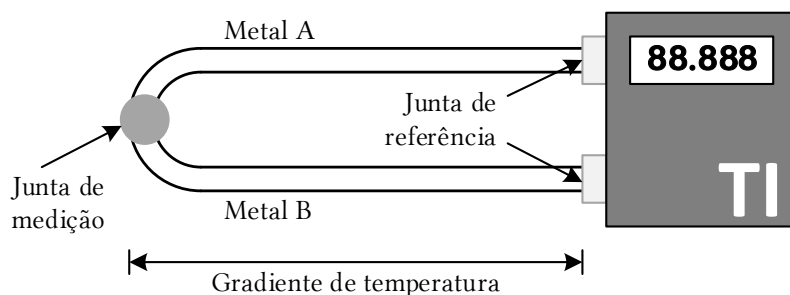


Figura 4.6: Representação de um termômetro de par termoelétrico (termopar)

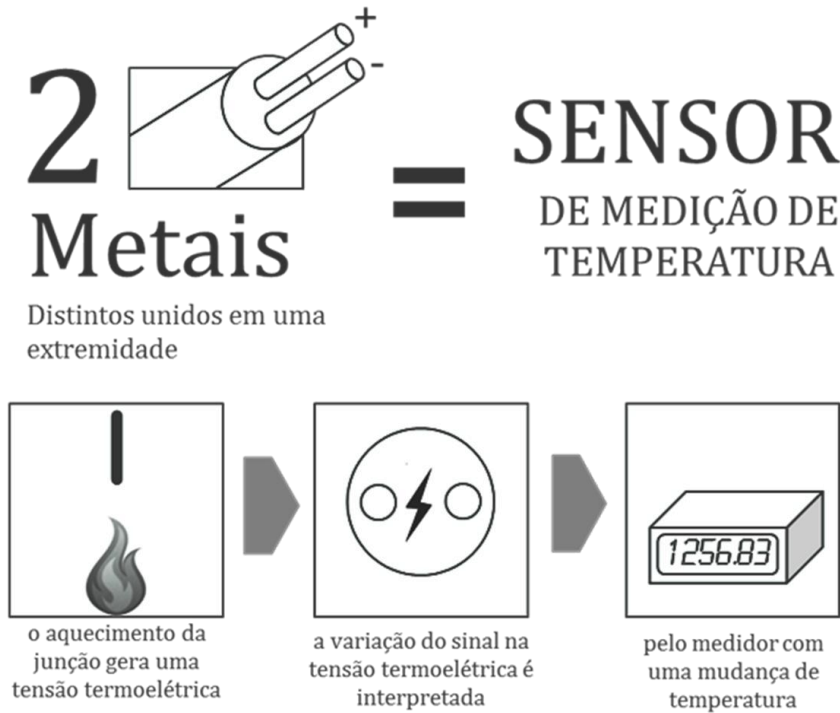


Figura 4.7: Princípio de funcionamento dos termopares

4.4.1 Efeitos termoeétricos

A FEM gerada no circuito que constitui o termopar está diretamente relacionada a três efeitos termoeétricos conhecidos^[3,36,50,52]: efeito Seebeck, efeito Peltier e efeito Thomson.

Efeito Seebeck: Em 1821, Thomas Johann Seebeck descobriu a existência de uma FEM atuando em um circuito fechado formado por dois condutores metálicos diferentes (metal A e metal B), quando há um gradiente de temperatura no circuito ($T_1 - T_2$). Ao manter a junta de referência a uma temperatura constante T_2 , observa-se que a FEM produzida é uma função da temperatura T_1 (Figura 4.8A). O efeito Seebeck afirma que a tensão produzida em um termopar é proporcional à diferença de temperatura entre as duas junções, T_1 e T_2 .

Efeito Peltier: Jean Charles Athanase Peltier, em 1834, verificou que, quando uma corrente i flui através do circuito, uma junção será aquecida (libera energia) e outra será resfriada (absorve energia). O que define se o calor será gerado (Figura 4.8B) ou absorvido (Figura 4.8C) é o sentido da corrente. Uma aplicação prática do efeito Peltier é a refrigeração termoeétrica, em que a circulação da corrente no sentido apropriado substitui os condutores comuns por semicondutores especiais.

Efeito Thomson: Em 1854, William Thomson, com o auxílio da termodinâmica, concluiu que a condução de calor ao longo de um circuito composto por um par de metais diferentes, quando não circula corrente, gera uma distribuição uniforme de temperatura em cada fio. O efeito Thomson trata da liberação ou absorção de calor quando uma corrente flui ao longo do termopar em uma região com diferença de temperatura. A ocorrência de liberação ou absorção de calor depende da composição do metal que constitui o circuito.

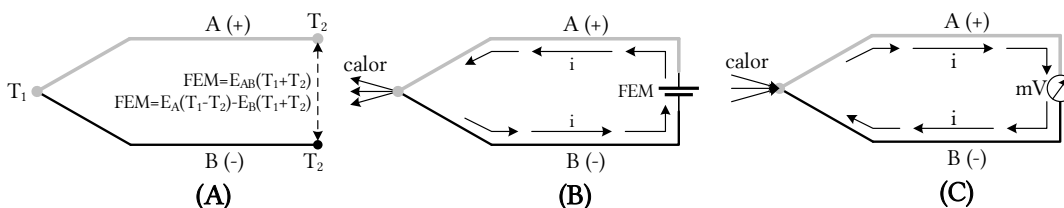


Figura 4.8: Efeitos termoeétricos: (A) efeito Seebeck; (B) e (C) efeito Peltier (adaptado de [36] e [52]).

4.4.2 Leis termoeétricas

Após a descoberta dos efeitos termoeétricos mencionados anteriormente, formularam-se três leis práticas que formalizam a base teórica da medição de temperatura por meio de termopares (termômetros de par termoeétrico). Essas leis são [3,36,49]: Lei do circuito homogêneo, Lei dos metais intermediários e Lei das temperaturas intermediárias.

Lei do circuito homogêneo: Sendo o termopar formado por condutores homogêneos, a FEM gerada é função apenas do gradiente de temperatura entre as junções de medição e de referência (Figura 4.9A). Assim, a FEM não depende do comprimento do termopar, do diâmetro dos fios condutores ou da distribuição de temperatura ao longo do fio. Em resumo, a FEM gerada em um circuito onde as juntas de medição e de referência se encontram nas temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente, depende exclusivamente da composição dos metais e das temperaturas T_1 e T_2 .

Lei dos metais intermediários: Independentemente do número de metais que compõem o termopar, a soma das FEMs será zero se todas as junções estiverem à mesma temperatura. Portanto, em um circuito composto por dois metais, caso seja introduzido um terceiro metal (C) – Figura 4.9B –, a FEM não será alterada desde que a nova junção (T_3) esteja na mesma temperatura das demais.

Lei das temperaturas intermediárias: Se o circuito apresentar uma junção intermediária T_2 entre as junções T_1 e T_3 , como ilustrado na Figura 4.9C, a FEM total gerada no circuito será a soma das FEMs geradas pelas junções T_1-T_2 e T_2-T_3 , ou seja: $E = E_{12} + E_{23} = (T_1 - T_2) + (T_2 - T_3)$.

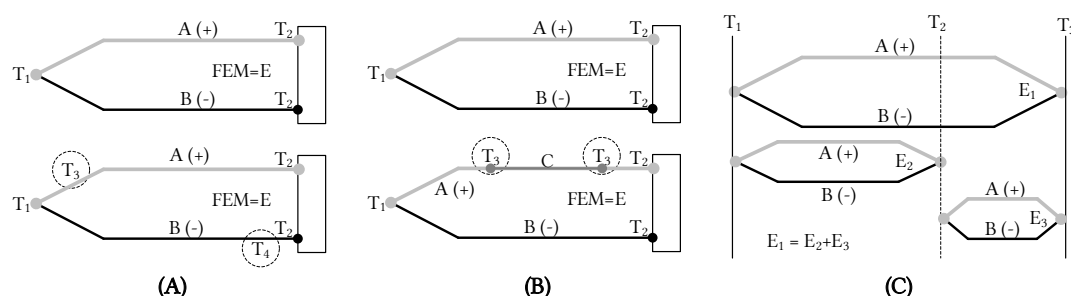


Figura 4.9: Leis termoeétricas: (A) Lei do circuito homogêneo; (B) Lei dos metais intermediários e; (C) Lei das temperaturas intermediárias (adaptado de [9], [36] e [49]).

4.4.3 Tipos de termopares e suas características

A quantidade de combinações de pares termoeétricos disponíveis é extensa. Ao longo do tempo, foram desenvolvidos diversos pares de ligas metálicas, cada uma com suas características específicas para diferentes aplicações. Os critérios para a seleção [36,51] do termopar envolvem, entre outros: custo, faixa de temperatura operacional (range), estabilidade, precisão, exatidão, condições atmosféricas, limitações mecânicas, vida útil e sensibilidade.

Já vimos que o efeito Seebeck trata da geração de uma FEM em um circuito composto por um par de condutores metálicos, em função da variação de temperatura, e que essa FEM depende dos tipos de metais utilizados no par. As curvas de variação da FEM em função da temperatura foram determinadas considerando a junta de referência à temperatura de 0 °C e foram originalmente padronizadas de acordo com a IPTS-68 [53], sendo posteriormente atualizadas para a ITS-90 [54]. Essas curvas são apresentadas na Tabela 4.5 e na Figura 4.10. Além das curvas FEM vs. temperatura, cada tipo de termopar possui uma condição apropriada de uso, que deve considerar a atmosfera do local e condições específicas de temperatura.

Tabela 4.5: Relação de FEM em função da temperatura de acordo com a ITS-90 e considerando a junta de referência a 0 °C [48,54].

Tipo	Range (° C)	FEM (mV)	Tipo	Range (° C)	FEM (mV)
J	-210 a 1200	-8,095 a 69,553	N	-270 a 1300	-4,345 a 47,513
K	-270 a 1372	-6,458 a 54,886	R	-50 a 1768	-0,226 a 21,101
T	-270 a 400	-6,258 a 20,872	S	-50 a 1768	-0,236 a 18,693
E	-270 a 1000	-9,835 a 76,373	B	0 a 1820	0 a 13,820

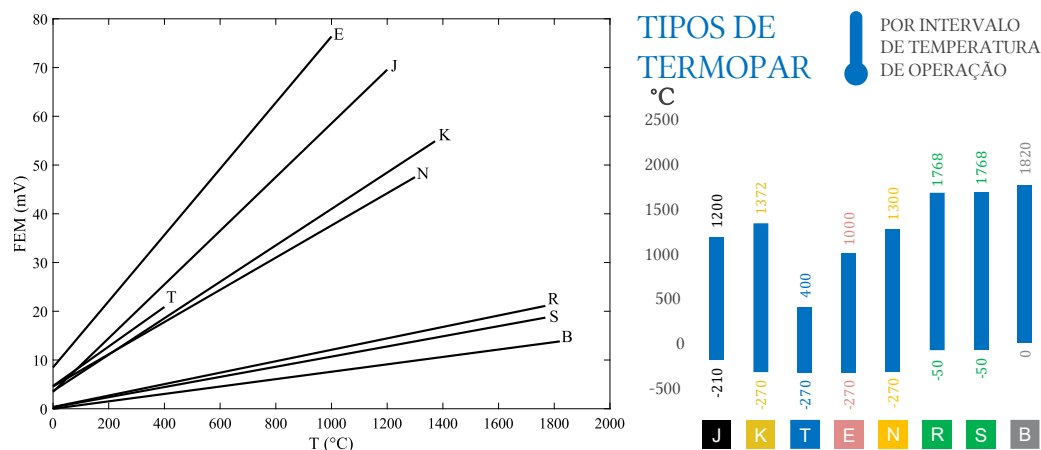


Figura 4.10: FEM gerada em função da temperatura para os termopares mais utilizados.

Tabela 4.6: Descrição das características de uso para os termopares básicos e nobres mais utilizados (adaptado de [9], [36], [50] e [51])

Tipo	Liga	Range (°C)	Custo	EFTE ⁽¹⁾	Breve descrição
J	Ferro (+) Constantan (-) ⁽²⁾	-210 a 1200	Baixo	Baixa	Devido ao baixo custo, é um dos mais utilizados. Aplicado em vácuo, atmosferas oxidantes ⁽⁷⁾ e inertes. Não é recomendado em atmosferas com alto teor de umidade. A temperaturas abaixo de 0°C, o fio de ferro se degrada rapidamente (torna-se quebradiço). Acima de 480°C, recomenda-se o uso de tubo de proteção para evitar a oxidação do ferro. Aplicações típicas: centrais de energia, metalurgia, indústria química e petroquímica.
K	Cromel (+) ⁽³⁾ Alumel (-) ⁽⁴⁾	-270 a 1372	Baixo	Baixa	Utilizado em atmosferas oxidantes ou inertes. Alta resistência à oxidação quando comparado aos tipos T, J e E. É amplamente utilizado em temperaturas acima de 540°C. Ocasionalmente é usado abaixo de zero, mas não deve ser aplicado em atmosferas redutoras ⁽⁸⁾ ou sulfurosas. Aplicações: metalurgia, siderurgia, cimento, vidro, cerâmica.
T	Cobre (+) Constantan (-)	-270 a 400	Baixo	Baixa	Boa resistência à corrosão em atmosferas úmidas, oxidantes e vácuo. Muito utilizado em medições de temperaturas abaixo de zero. Acima de 310°C, o cobre oxida rapidamente. Aplicações: refrigeração, climatização e criometria.
E	Cromel (+) Constantan (-)	-270 a 1000	Baixo	Baixa para média	Aplicado em atmosferas oxidantes, inertes e vácuo. Em atmosferas úmidas abaixo de 0°C, pode ocorrer corrosão. Apresenta a maior geração de tensão (V/°C) entre os termopares básicos. Indicado para detecção de pequenas variações de temperatura. Aplicações: indústria química e petroquímica.
N	Nicrosil (+) ⁽⁵⁾ Nisil (-) ⁽⁶⁾	-270 a 1300	Baixo	Média para alta	Recomendado para atmosferas oxidantes e inertes. Mais resistente à corrosão que o tipo K. Não deve ser utilizado em atmosferas sulfurosas. Aplicações: metalurgia, siderurgia, cimento, vidro, cerâmica.
R	Platina (+) Ródio 13% (-)	-50 a 1768	Alto	Alta	Utilizado em atmosferas inertes e oxidantes. Apresenta alta precisão em temperaturas elevadas. Não deve ser exposto a atmosferas redutoras ou com vapores metálicos. É padrão de calibração para outros termopares. Se for submetido a temperaturas acima de 1480°C, deve ser recalibrado. Não recomendado para uso abaixo de 0°C. Aplicações: metalurgia, química, cerâmica.
S	Platina (+) Ródio 10% (-)	-50 a 1768	Alto	Alta	Apresenta as mesmas características do tipo R. Aplicações: idênticas ao tipo R.
B	Platina (+) Ródio 30% (-)	0 a 1820	Alto	Alta	Mais estável e robusto que os tipos S e R em altas temperaturas. É utilizado para medições acima de 1400 °C. Aplicações: indústria de metais, cimento, vidro e cerâmica.

Notas: (1) EFTE – Estabilidade na faixa de temperatura especificada; (2) Liga de Cu+Ni; (3) Liga de Ni+Cr; (4) Liga de Ni+Al; (5) Liga de Ni-Cr-Mg; (6) Liga de Ni-Si-Mg; (7) Onde há excesso de O₂; (8) Onde há ausência de O₂ ou excesso de H₂ ou CO.

A nomenclatura dos termopares foi definida pelo Comitê E20 da ASTM (American Society for Testing and Materials), sendo utilizada nas normas da ANSI/ASTM e da IEC (International Electrotechnical Commission). Nessas normas, são especificados os materiais utilizados na fabricação dos termopares, e atribuem-se letras específicas aos diferentes tipos.

Os códigos de cores definidos pelas normas ANSI/ASTM E-230^[53] e IEC 584-3^[54,55], bem como as características dos tipos de termopares mais utilizados, são apresentados na Tabela 4.7. De forma geral, os termopares podem ser agrupados em duas categorias: **básicos** (J, K, T, E, N) e **nobres** (R, S, B).

Tabela 4.7: Códigos de cores ANSI/ASTM e IEC para termopares e fios e conectores (adaptado de ^[48]).

Código ANSI	ANSI/ASTM E-230 Codificação por cores		Combinações da liga		IEC 584-3 Codificação de cores		Código IEC
	Cabo termopar	Cabo de extensão	Polo +	Polo -	Cabo termopar	intrinsecamente seguro(*)	
J			Fe	Cu-Ni			J
K			Ni-Cr	Ni-Al			K
T			Cu	Cu-Ni			T
E			Ni-Cr	Cu-Ni			E
N			Ni-Cr-Mg	Ni-Si-Mg			N
R	Nenhum estabelecido		Pt-Rh(13%)	Pt			R
S	Nenhum estabelecido		Pt-Rh(10%)	Pt			S
B	Nenhum estabelecido		Pt-Rh(30%)	Pt-Rh(6%)			B

Nota: (*) incapacidade de liberar energia elétrica ou térmica a ponto de provocar a ignição de misturas explosivas.

As tabelas de referência de termopares podem ser obtidas em Powell et al.^[53] ou em Burns et al.^[54]. No entanto, diversos fabricantes de termopares disponibilizam tabelas consolidadas e bastante úteis para os tipos mais utilizados na indústria. Na Figura 4.11, é apresentada uma parte de uma tabela de referência para o termopar tipo J, fornecida pelo fabricante Omega Engineering. Essa tabela foi elaborada com base na Monografia 175 do National Institute of Standards and Technology, revisada segundo a ITS-90^[54].

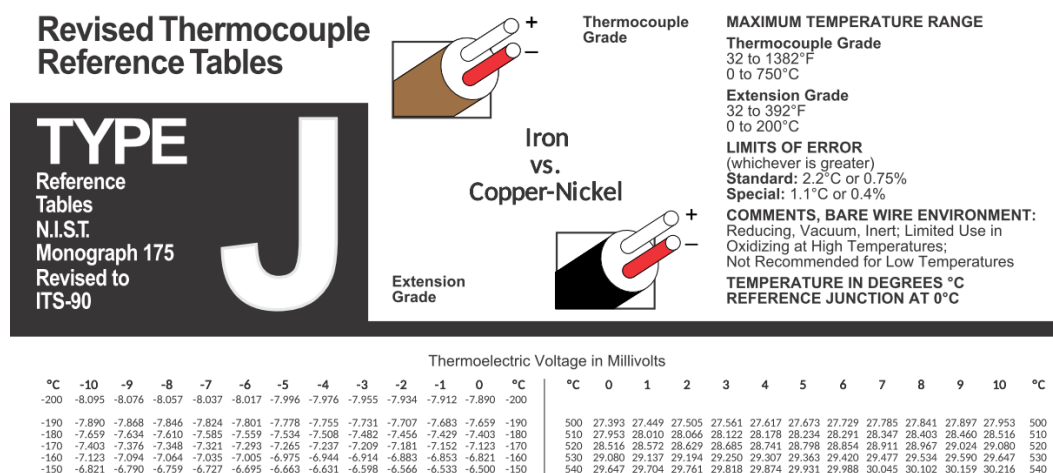


Figura 4.11: Tabela de referência de termopares para temperatura de -200 a -150 °C e de 500 a 550 °C^[48].

4.4.4 Compensação da junta de referência

Como observado anteriormente na Figura 4.6, o termopar possui dois pontos importantes: a junta de medição (JM) e a junta de referência (JR). A JR é o ponto onde o termopar é conectado ao instrumento. Uma questão importante a se considerar é que as tabelas de relação entre FEM e temperatura para os termopares^[53,54] foram elaboradas considerando a temperatura da JR igual a 0°C. Contudo, na prática, isso não ocorre, já que os instrumentos (e não o sensor) estão à temperatura ambiente, o que torna necessário realizar uma correção na medição. Essa correção pode ser feita por meio de um circuito eletrônico que adiciona, à tensão que chega ao instrumento, o valor da FEM correspondente à diferença entre a temperatura ambiente e os 0°C de referência. Outra forma de realizar a compensação é adicionar ao sistema uma tensão correspondente a uma temperatura de referência fixa, como 20°C ou 25°C (dependendo do instrumento). No entanto, essa abordagem está sujeita a erro, devido às variações da temperatura ambiente^[9,36,49].

EXEMPLO 4.1: Considere o sistema de medição de temperatura representado na Figura 4.12. Um termopar tipo K é utilizado para medir a temperatura de um forno, que se encontra a 50°C. O indicador de temperatura que recebe a informação do termopar está a 25°C. Como essa informação chega ao instrumento?

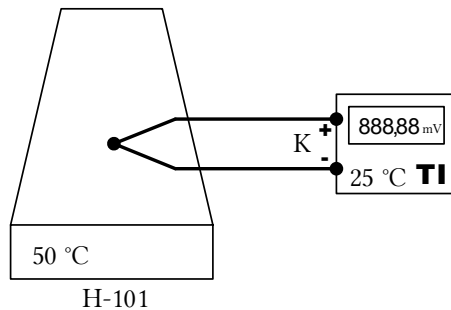


Figura 4.12: Medição de temperatura de um forno industrial utilizando termopar tipo K.

A FEM gerada no sistema será dada por:

$$FEM = E_{total} = \Delta E = E_{JM(50^{\circ}C)} - E_{JR(25^{\circ}C)}$$

Utilizando as tabelas de referência de termopares, temos os seguintes valores de tensão: $E_{JM(50^{\circ}C)} = 2,023 \text{ mV}$ e $E_{JR(25^{\circ}C)} = 1,000 \text{ mV}$.

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397	0
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798	10
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203	20
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612	30
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023	40
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436	50
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851	60

Logo, a tensão lida no indicador será:

$$E_{total} = 2,023 \text{ mV} - 1,000 \text{ mV} = 1,023 \text{ mV}$$

Retornando à tabela de referência, essa tensão corresponde a aproximadamente 26°C, implicando em um erro absoluto de 24°C.

A pergunta a ser respondida é: *A que se deve esse erro na medição?*

O efeito Seebeck refere-se à geração de uma FEM em um circuito submetido a um gradiente de temperatura. No sistema analisado, isso ocorre devido à diferença entre a temperatura do forno (50°C) e a do instrumento (25°C). Se ambas estivessem à mesma temperatura, não haveria geração de FEM. Assim, o sinal que chega ao instrumento corresponde à diferença de potencial entre a junta de medição (JM) e a

junta de referência (JR). Para garantir precisão, é necessário compensar essa diferença.

Fazendo a compensação:

$$E_{total} = \Delta E + E_{JR(25^\circ C)} = E_{JR(50^\circ C)} - E_{JR(25^\circ C)} + E_{JR(25^\circ C)}$$

$$E_{total} = 2,023 \text{ mV} - 1,000 \text{ mV} + 1,000 \text{ mV} = 2,023 \text{ mV}$$

Esse valor corresponde corretamente à temperatura de 50°C. A compensação pode ser feita de forma automática (eletrônica) ou manual. ■

4.4.5 Conexões e associações de termopares

Algumas vezes, é necessário realizar configurações específicas nas medições de temperatura, como a determinação da temperatura média ou da diferença de temperatura em um determinado processo. Para isso, podem ser realizadas associações entre termopares.

A **associação em paralelo** (Figura 4.13A) é utilizada quando se deseja medir a temperatura média de um sistema. A FEM gerada é dada pela Eq. 4.12. Para compensação, deve-se somar ao sistema a FEM da junta de referência:

$$FEM = E_{total} = \sum_{n=1}^j \frac{\Delta E_n}{n} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

Onde: E_{total} – potencial total gerado no sistema (mV); ΔE_n – potencial gerado no termopar n (mV).

Na **associação em série simples** (Figura 4.13B), temos um somatório das FEMs geradas individualmente. Assim, a FEM resultante será representada pela Eq. 4.13. Neste caso, para realizar a compensação, temos que multiplicar a FEM da junta de referência pelo número de termopares existentes na associação.

$$FEM = E_{total} = \sum_{n=1}^{\infty} \Delta E_n \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Onde: E_{total} – potencial total gerado no sistema (mV); ΔE_n – potencial gerado no termopar n (mV).

Quando se deseja realizar a medição de uma diferença de temperatura, utiliza-se a **associação em série oposta**, (Figura 4.13C). Nesta associação, a FEM gerada será a diferença entre as FEMs individuais de cada termopar e é dada pela Eq. 4.14. Para a medida da diferença de temperatura, devido à FEM oposta que é gerada no segundo termopar, não é necessário a compensação na junta de referência.

$$FEM = E_{total} = \Delta E_1 - \Delta E_2 \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Onde: E_{total} – potencial total gerado no sistema (mV); ΔE_1 – potencial gerado no termopar 1 (mV); ΔE_2 – potencial gerado no termopar 2 (mV).

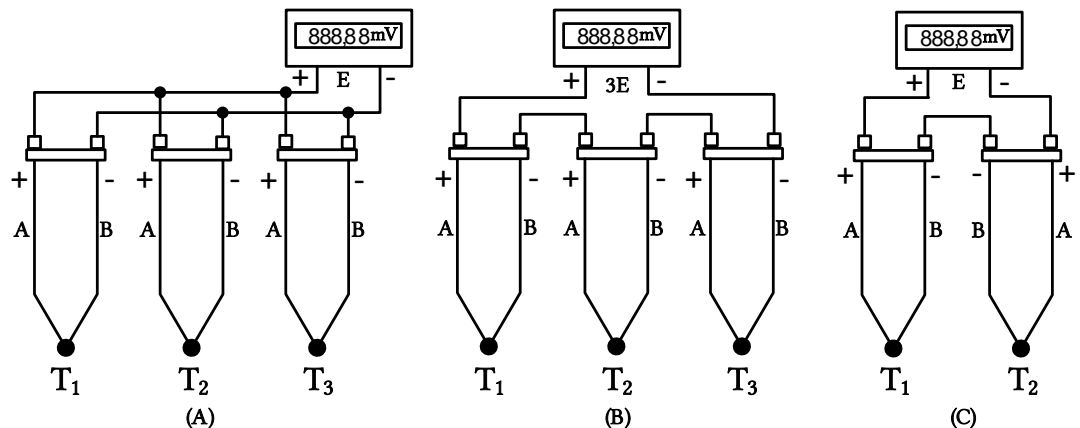


Figura 4.13: Associação de termopares: (A) em paralelo; (B) em série simples e; (C) em série oposta.

EXEMPLO 4.2: Em um sistema de medição, foram utilizados três termopares tipo K, associados em paralelo, para realizar a medição de temperatura (Figura 4.14). O que a FEM gerada no sistema indicará? Qual será o valor observado no instrumento indicador?

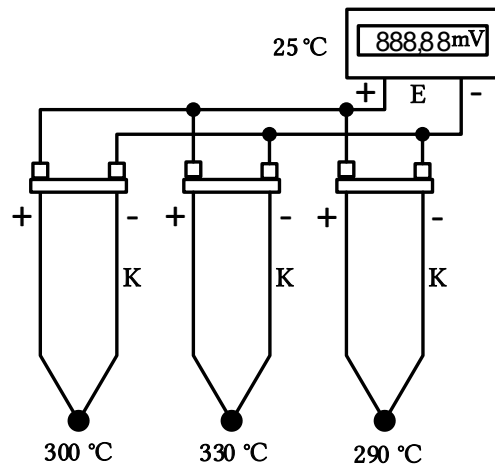


Figura 4.14: Medição de temperatura com associação em paralelo

Como os termopares estão associados em paralelo, a indicação da FEM será a média das temperaturas medidas individualmente por cada termopar. O valor observado será:

$$E_{total} = \frac{1}{3}(\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3) \quad (\text{sem compensação na JR})$$

$$E_{total} = \frac{1}{3}[(E_{JM(300^\circ\text{C})} - E_{JR(25^\circ\text{C})}) + (E_{JM(330^\circ\text{C})} - E_{JR(25^\circ\text{C})}) + (E_{JM(290^\circ\text{C})} - E_{JR(25^\circ\text{C})})]$$

Da tabela de referência de termopares temos:

$$E_{JR(25^\circ\text{C})} = 1,000 \text{ mV}, \quad E_{JM(290^\circ\text{C})} = 11,795 \text{ mV}, \quad E_{JM(300^\circ\text{C})} = 12,209 \text{ mV}, \\ E_{JM(330^\circ\text{C})} = 13,457 \text{ mV}.$$

Logo, a FEM gerada será:

$$E_{total} = \frac{1}{3}[(12,209 - 1,000)\text{mV} + (13,457 - 1,000)\text{mV} + (11,795 - 1,000)\text{mV}]$$

$$E_{total} = 11,487 \text{ mV}$$

Retornando à tabela de referência, temos que esse valor corresponde a $T \cong 283^\circ\text{C}$. No entanto, a média das temperaturas medidas é $T \cong 308^\circ\text{C}$. Esse erro ocorre devido à ausência de compensação na JR. Recalculando com a compensação na junta de referência, teremos:

$$E_{total} = \frac{1}{3}(\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3) + E_{JR(25^\circ\text{C})} \quad (\text{com compensação})$$

$$E_{total} = \frac{1}{3}[(12,209 - 1,000)\text{mV} + (13,457 - 1,000)\text{mV} + (11,795 - 1,000)\text{mV}] + 1,000 \text{ mV}$$

$$E_{total} = 12,487 \text{ mV}$$

Na tabela de referência, esse valor corresponde a aproximadamente 308°C . ■

EXEMPLO 4.3: Em um sistema de medição, foram utilizados dois termopares tipo K, associados em série oposta, para realizar a medição de temperatura (Figura 4.15). O que indicará a FEM gerada no sistema? Qual será o valor observado no instrumento indicador?

Da tabela de referência de termopares, temos:

$$E_{JR(25^\circ\text{C})} = 1,000 \text{ mV}, \quad E_{JM(80^\circ\text{C})} = 3,267 \text{ mV}, \quad E_{JM(20^\circ\text{C})} = 0,798 \text{ mV}.$$

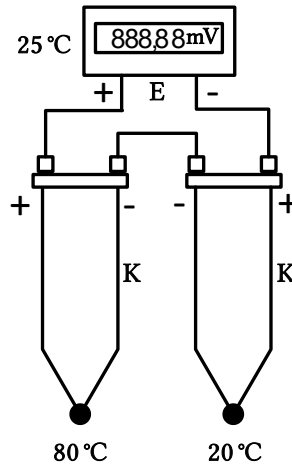


Figura 4.15: Medição de temperatura com associação em série oposta

Como os termopares estão associados em série oposta, teremos a medição da diferença de temperatura entre as medições individuais dos termopares. O valor observado será:

$$E_{total} = \Delta E_1 - \Delta E_2 = (E_{JM(80\text{ }^{\circ}\text{C})} - E_{JR(25\text{ }^{\circ}\text{C})}) - (E_{JM(20\text{ }^{\circ}\text{C})} - E_{JR(25\text{ }^{\circ}\text{C})})$$

$$E_{total} = (3,267 - 1,00) \text{ mV} - (0,798 - 1,00) \text{ mV}$$

$$E_{total} = 2,469 \text{ mV}$$

Na tabela de referência de termopares, esse valor corresponde a 60 °C, que é o valor correto da diferença entre as temperaturas. Note que, na série oposta, não é necessária a compensação da JR. ■

Podemos observar na Tabela 4.7 que, na norma ANSI/ASTM E-230, são apresentados padrões para cabos de extensão. *Mas, afinal, o que é um cabo de extensão?* Dentro de uma planta industrial, os sensores (termopares) estão instalados nos equipamentos, enquanto os instrumentos (transmissores, indicadores, controladores) estão localizados na sala de controle. A conexão com o termopar é feita por meio de fios ou cabos de extensão e/ou de compensação.

Bega et al.^[9] e Thomazini e Albuquerque^[50], descrevem os cabos de extensão como sendo constituídos das mesmas ligas que compõem o termopar a ser conectado ao instrumento, sendo utilizados quando o termopar é composto por metais menos nobres. Já os cabos de compensação são feitos de ligas diferentes daquelas que compõem o termopar, mas devem apresentar comportamento termoelétrico similar, sendo utilizados quando os metais do termopar são raros e de alto custo. Os cabos ou fios de extensão são identificados pela letra **X** após a representação do termopar — exemplos: JX, TX, EX, KX —, enquanto os cabos de compensação são representados pela letra **C**, como em SC, BC.

Esses cabos podem ser considerados como um novo termopar inserido no circuito. Sua função é conduzir o sinal gerado pelo sensor e compensar o gradiente de temperatura existente entre a junção de referência no ponto de conexão e a junção de referência do instrumento.

EXEMPLO 4.4: Em um sistema de medição de temperatura de um forno, foi utilizado um termopar tipo K com cabo de extensão KX (Figura 4.16). O forno encontra-se à temperatura $T_1 = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, o ponto de conexão (cabeçote) à temperatura $T_2 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o instrumento encontra-se à temperatura $T_3 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Como a FEM gerada chega ao instrumento?

Da tabela de referência de termopares temos:

$$E_{JR(25\text{ }^{\circ}\text{C})}=1,000 \text{ mV}, E_{JR(40\text{ }^{\circ}\text{C})}=1,612 \text{ mV}, E_{JM(350\text{ }^{\circ}\text{C})}=14,293 \text{ mV}.$$

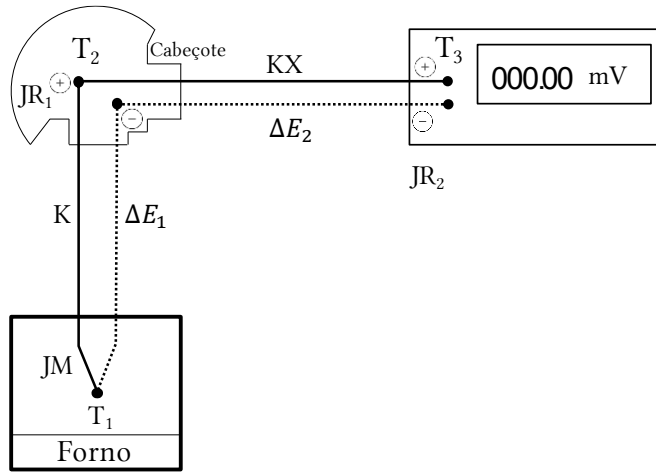


Figura 4.16: Medição utilizando cabo de extensão na interligação

Neste exemplo, podemos verificar a aplicação da Lei das Temperaturas Intermediárias. A FEM gerada pelo sistema será a soma das FEMs geradas entre a junta de medição (JM) e a junta de referência 1 (JR₁) e entre JR₁ e a junta de referência 2 (JR₂). Assim:

$$E_{total} = \Delta E_1 + \Delta E_2 \text{ (sem compensação na JR)}$$

$$E_{total} = (E_{JM(350^\circ C)} - E_{JR1(40^\circ C)}) + (E_{JR1(40^\circ C)} - E_{JR2(25^\circ C)})$$

$$E_{total} = (14,293 - 1,612) \text{ mV} + (1,612 - 1,000) \text{ mV}$$

$$E_{total} = 13,293 \text{ mV}$$

Retornando à tabela de referência, para a FEM de 13,293 mV, temos uma temperatura de aproximadamente 326 °C, o que implica em um erro absoluto de 24 °C, causado pela ausência de compensação na JR. Para realizar a compensação, deve-se somar à FEM gerada a tensão correspondente à junta de referência do instrumento, que, neste caso, é a JR₂:

$$E_{total} = \Delta E_1 + \Delta E_2 + E_{JR2(25^\circ C)} \text{ (com compensação na JR)}$$

$$E_{total} = (E_{JM(350^\circ C)} - E_{JR1(40^\circ C)}) + (E_{JR1(40^\circ C)} - E_{JR2(25^\circ C)}) + E_{JR2(25^\circ C)}$$

$$E_{total} = (14,293 - 1,612) \text{ mV} + (1,612 - 1,000) \text{ mV} + 1,000 \text{ mV}$$

$$E_{total} = 14,293 \text{ mV}$$

Agora, com a compensação, temos $T = 350^\circ C$. ■

Como dito anteriormente, o termopar (sensor de temperatura) e o instrumento (registrador, indicador, controlador) encontram-se afastados do processo, sendo necessário realizar a interligação do termopar com o instrumento. Verificamos no Exemplo 4.4 que, ao utilizarmos um fio ou cabo de extensão, não há prejuízo nas medições, desde que seja feita a compensação na junta de referência. Porém, nem sempre são utilizados fios ou cabos de extensão, por se tratarem de componentes que aumentam o custo de implementação do sistema de medição. Uma alternativa muito utilizada é a interligação com fios de cobre.

EXEMPLO 4.5: Consideremos agora que a interligação feita no sistema apresentado no exemplo anterior seja feita com fios de cobre (Figura 4.17). O forno encontra-se à temperatura $T_1=350^\circ C$, o ponto de conexão (cabeçote) à temperatura $T_2=40^\circ C$ e o instrumento encontra-se à temperatura $T_3=25^\circ C$. Como a FEM gerada chega ao instrumento?

Da tabela de referência de termopares temos:

$$E_{JR2(25\text{ }^{\circ}\text{C})}=1,000\text{ mV}, E_{JR1(40\text{ }^{\circ}\text{C})}=1,612\text{ mV}, E_{JM(350\text{ }^{\circ}\text{C})}=14,293\text{ mV}.$$

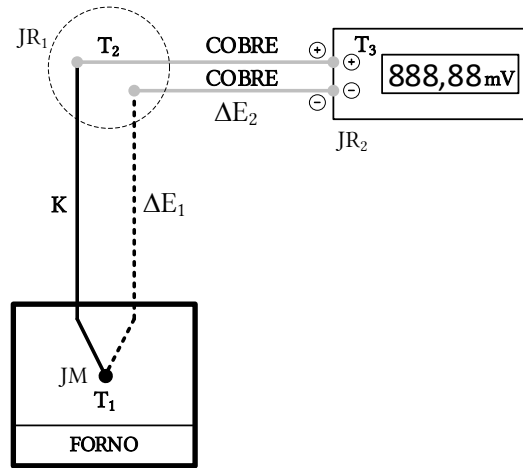


Figura 4.17: Medição utilizando fio de cobre/cobre na interligação

Quando utilizamos fios de cobre para a interligação do termopar, é como se o instrumento estivesse conectado diretamente no ponto de junção (cabeçote). Assim, a FEM gerada será:

$$E_{total} = \Delta E_1 + \Delta E_2 \text{ (sem compensação na JR)}$$

$$E_{total} = (E_{JM(350\text{ }^{\circ}\text{C})} - E_{JR1(40\text{ }^{\circ}\text{C})}) + 0$$

$$E_{total} = (14,293 - 1,612)\text{ mV}$$

$$E_{total} = 12,681\text{ mV}$$

Na tabela de referência de termopares, temos $T \approx 311\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que representa um erro absoluto de $39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou 11,14%. Lembrando que essa informação corresponde à condição sem compensação na JR. Fazendo a compensação, temos:

$$E_{total} = \Delta E_1 + \Delta E_2 + E_{JR2(25\text{ }^{\circ}\text{C})} \text{ (com compensação na JR)}$$

$$E_{total} = (E_{JM(350\text{ }^{\circ}\text{C})} - E_{JR1(40\text{ }^{\circ}\text{C})}) + 0 + E_{JR2(25\text{ }^{\circ}\text{C})}$$

$$E_{total} = (14,293 - 1,612)\text{ mV} + 1,000\text{ mV}$$

$$E_{total} = 13,681\text{ mV}$$

Retornando à tabela de referência, para a FEM gerada de 13,681 mV, a temperatura correspondente será de aproximadamente $336\text{ }^{\circ}\text{C}$. Isso significa que temos um erro absoluto de $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou 4%. Um ponto importante a ser observado é que o fio de cobre não compensou a diferença de temperatura entre o instrumento e o ponto de conexão.

E se trocarmos o termopar utilizado no exemplo por um do tipo B, o que teríamos na medição?

Da tabela de referência de termopares temos:

$$E_{JR2(25\text{ }^{\circ}\text{C})}=-0,002\text{ mV}, E_{JR1(40\text{ }^{\circ}\text{C})}=0,000\text{ mV}, E_{JM(350\text{ }^{\circ}\text{C})}=0,596\text{ mV}.$$

$$E_{total} = \Delta E_1 + \Delta E_2 + E_{JR2(25\text{ }^{\circ}\text{C})} \text{ (com compensação na JR)}$$

$$E_{total} = (E_{JM(350\text{ }^{\circ}\text{C})} - E_{JR1(40\text{ }^{\circ}\text{C})}) + 0 + E_{JR2(25\text{ }^{\circ}\text{C})}$$

$$E_{total} = (0,596 - 0)\text{ mV} - 0,002\text{ mV}$$

$$E_{total} = 0,594\text{ mV}$$

Essa FEM, na tabela de referência, equivale a aproximadamente $349\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que significa um erro de 0,28%. Por que aqui temos um erro desprezível e, utilizando o termopar tipo K, um erro de 4%? Isso se

deve ao fato de que o termopar tipo B possui uma FEM muito baixa na faixa de medição de 0 a 50 °C, não causando erros significativos na medição. ■

4.4.6 Erros de ligações em termopares

Ao realizarmos a interligação de termopares, podemos sujeitar o sistema de medição a erros operacionais, conhecidos como erro de ligação. Esses erros ocorrem principalmente quando há a necessidade de se realizar uma manutenção no sistema e podem ser uma **inversão simples** ou uma **inversão dupla**.

A **inversão simples** é um tipo de erro de fácil detecção, pois o instrumento indicará uma temperatura negativa (mesmo sendo positiva) ou atingirá o início da faixa de medição. Geralmente, ocorre pela falta de atenção ao código de cores do termopar. Se não for observado rapidamente, pode acarretar riscos em sistemas controlados.

EXEMPLO 4.6: Em uma medição de temperatura de um forno, onde $T_1 = 150\text{ °C}$, o ponto de conexão (cabeçote) está à temperatura $T_2 = 38\text{ °C}$, e o instrumento encontra-se à temperatura $T_3 = 25\text{ °C}$, foi cometido o erro de inversão simples, conforme a Figura 4.18. Qual o valor da FEM que chegará ao instrumento?

Da tabela de referência de termopares, temos:

$$E_{JR2(25\text{ °C})} = 1,000\text{ mV}, E_{JR1(38\text{ °C})} = 1,530\text{ mV}, E_{JM(150\text{ °C})} = 6,138\text{ mV}.$$

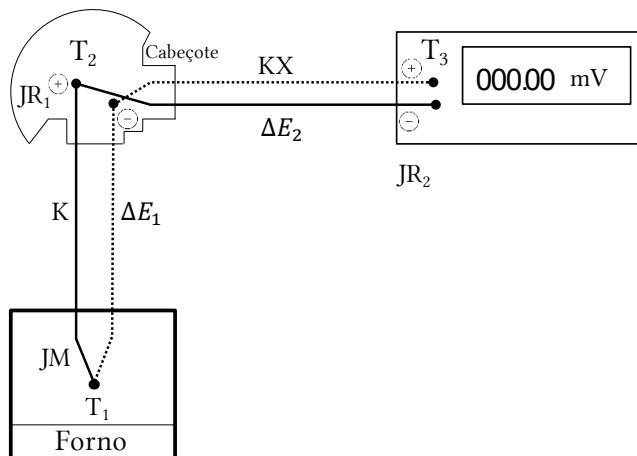


Figura 4.18: Medição de temperatura em um forno industrial com inversão simples

$$E_{total} = -\Delta E_1 + \Delta E_2 + E_{JR2(25\text{ °C})} \quad (\text{com compensação na JR})$$

Note que a primeira FEM gerada será uma FEM inversa.

$$E_{total} = -(E_{JM(150\text{ °C})} - E_{JR1(38\text{ °C})}) + (E_{JR1(38\text{ °C})} - E_{JR2(25\text{ °C})}) + E_{JR2(25\text{ °C})}$$

$$E_{total} = -(6,138 - 1,530)\text{ mV} + (1,530 - 1,000)\text{ mV} + 1,000\text{ mV}$$

$$E_{total} = -3,078\text{ mV}$$

Na tabela de referência, $-3,078\text{ mV}$ corresponde a uma temperatura de aproximadamente -85 °C , o que é incoerente. ■

A **inversão dupla** é um tipo de erro mais difícil de identificar, pois a FEM gerada pode assumir valores positivos ou negativos compatíveis com a temperatura medida. Em outras palavras, não há inversão evidente do sinal da FEM, o que impede a detecção imediata do problema — especialmente porque o valor gerado permanece próximo do valor real esperado. Esse tipo de erro ocorre quando uma inversão simples é identificada, mas a correção é feita em um ponto diferente daquele onde a inversão realmente aconteceu, mantendo o erro ativo no sistema.

EXEMPLO 4.7: Em uma medição de temperatura de um forno, onde $T_1=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, o ponto de conexão (cabeçote) está à temperatura $T_2=38\text{ }^{\circ}\text{C}$, e o instrumento encontra-se à temperatura $T_3 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, foi cometido o erro de inversão dupla, conforme a Figura 4.19. Qual o valor da FEM que chegará ao instrumento?

Da tabela de referência de termopares temos:

$E_{JR2(25\text{ }^{\circ}\text{C})}=1,000\text{ mV}$, $E_{JR1(38\text{ }^{\circ}\text{C})}=1,530\text{ mV}$, $E_{JM(1000\text{ }^{\circ}\text{C})}=41,276\text{ mV}$.

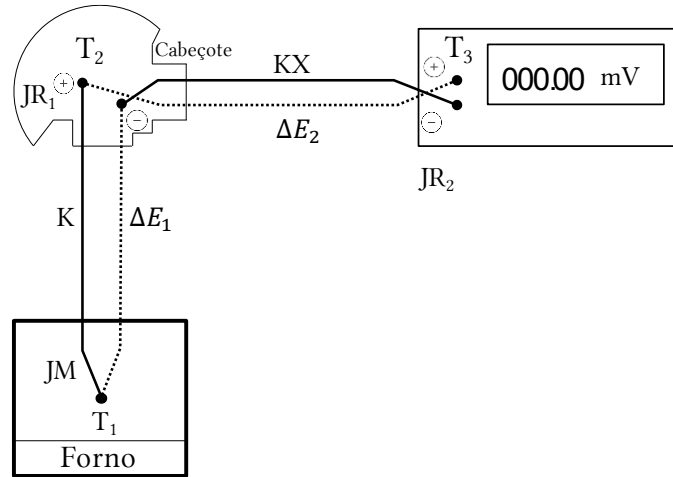


Figura 4.19: Medição de temperatura em um forno industrial com inversão dupla

$$E_{total} = \Delta E_1 - \Delta E_2 + E_{JR2(25\text{ }^{\circ}\text{C})} \quad (\text{com compensação na JR})$$

$$E_{total} = (E_{JM(1000\text{ }^{\circ}\text{C})} - E_{JR1(38\text{ }^{\circ}\text{C})}) - (E_{JR1(38\text{ }^{\circ}\text{C})} - E_{JR2(25\text{ }^{\circ}\text{C})}) + E_{JR2(25\text{ }^{\circ}\text{C})}$$

$$E_{total} = (41,276 - 1,530)\text{ mV} - (1,530 - 1,000)\text{ mV} + 1,000\text{ mV}$$

$$E_{total} = 40,216\text{ mV}$$

Na tabela de referência, temos, para a FEM de 40,216 mV, uma temperatura de aproximadamente 973 °C. ■

4.5 Pirômetros de radiação

Segundo Coulson e Richardson^[58] e Incropera et al.^[59], a radiação térmica está associada à taxa de energia emitida pela matéria, desde que sua temperatura seja diferente de zero, e toda forma de matéria emite radiação. A radiação térmica se manifesta na forma de onda, e sua magnitude varia com o comprimento de onda, podendo ser visível ou não (Figura 4.20).

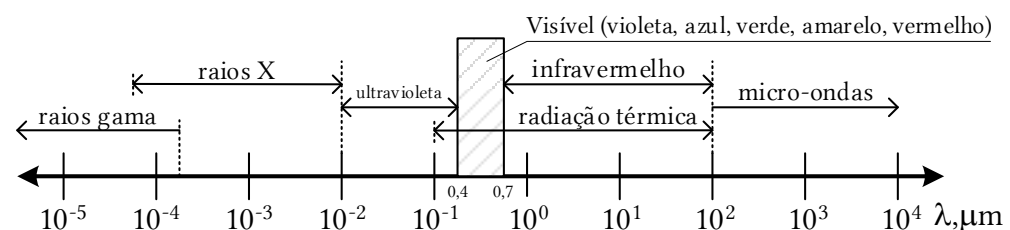


Figura 4.20: Comprimento de onda (adaptado de ^[59]).

Tendo em vista que todo corpo emite uma quantidade de radiação térmica, podemos, por meio dessa radiação, medir sua temperatura. Isso é possível porque Stefan enunciou a lei que relaciona a radiação térmica de um corpo com sua temperatura, e Boltzmann, mais tarde, afirmou por meio de análise termodinâmica. Esses dois estudos deram origem à lei de Stefan-Boltzmann, que descreve que a radiação emitida por um corpo é proporcional à quarta potência de sua temperatura e pode ser definida pela Eq. 4.14^[9,36].

$$W = \varepsilon \delta T^4 \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Onde: T – temperatura absoluta (K); W – energia emitida por unidade de área (W/m²); δ – constante de Stefan-Boltzmann $5,7 \times 10^{-8}$ (W K⁴/m²); ε – emissividade.

Incropera et al. [59] definem emissividade como sendo a razão entre a radiação emitida por um corpo não negro e a radiação emitida por um corpo negro, ambos estando à mesma temperatura. Um corpo negro é um corpo que absorve toda a radiação que incide sobre ele, sem distinção do comprimento de onda ou de sua direção. O corpo negro serve como padrão de comparação entre as propriedades radiantes de superfícies reais e possui emissividade $\varepsilon=1$.

Para a medição da temperatura por meio da radiação térmica dos corpos, utiliza-se o princípio dos detectores de radiação, que consiste em focalizar a radiação emitida por um corpo em um detector do tipo termopilha (associação de termopares em série) ou do tipo semiconductor. O detector comporta-se como um corpo negro, absorvendo, de forma ideal, toda a radiação incidente [30,36].

Os instrumentos utilizados para realizar a medição de temperatura por meio da radiação são conhecidos como pirômetros e realizam a medição sem contato direto com o meio. Dentre os dispositivos, temos os **pirômetros ópticos** e os **pirômetros infravermelhos**.

Os **pirômetros ópticos** realizam a medição de temperatura com base na emissividade do corpo, comparando o comprimento de onda emitido pelo corpo com aquele emitido pelo padrão do instrumento (Figura 4.21). Esses pirômetros realizam a medição de temperaturas acima de 500/600 °C (início da emissão de radiação térmica no espectro visível) até temperaturas de 5000 °C [9].

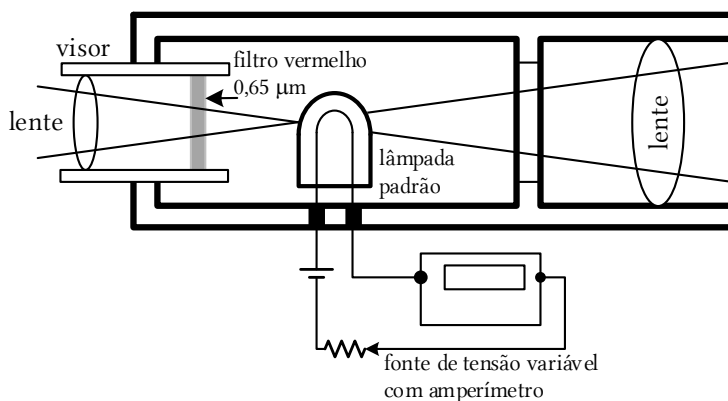


Figura 4.21: Esquema de um pirômetro óptico

Os **pirômetros infravermelhos** (Figura 4.22) usam detectores do tipo termopar (associação em série) ou semicondutores especiais que realizam a varredura do espectro infravermelho e, eventualmente, do espectro visível e do início do ultravioleta. Esses dispositivos podem ser compactos e portáteis, permitindo seu uso em diversas aplicações, e operam em uma faixa de medição entre 0 °C e 4000 °C

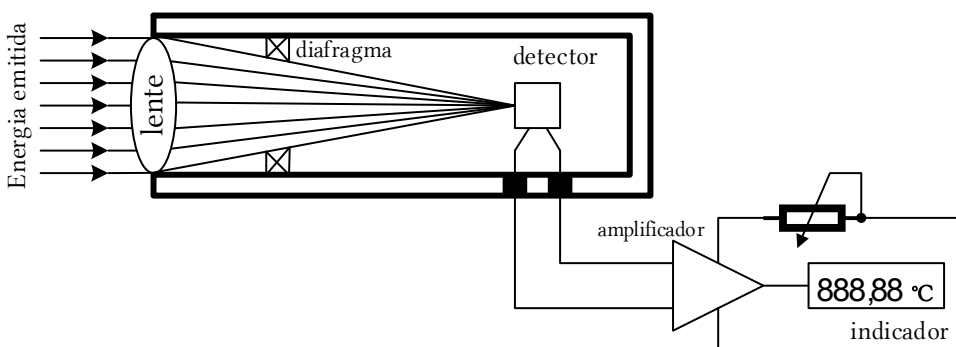


Figura 4.22: Esquema de um pirômetro infravermelho

Capítulo 5

Medição de pressão

A medição de pressão é fundamental em processos industriais, pois assegura operação segura, controle adequado e avaliação de variáveis associadas, como nível, vazão e densidade. O capítulo apresenta os conceitos básicos de pressão, suas classificações e relações fundamentais, além dos princípios físicos que sustentam sua medição. Descreve também os principais instrumentos utilizados, incluindo manômetros de coluna de líquido, elementos elásticos como tubo de Bourdon, fole e diafragma, e sensores elétricos baseados em variações indutivas, capacitivas, piezoelétricas e piezoresistivas. Cada dispositivo é introduzido com seus princípios de funcionamento, características, vantagens e aplicações. Ao final, o leitor será capaz de compreender os fundamentos da medição de pressão, identificar os diferentes tipos de instrumentos e selecionar o sensor mais adequado às necessidades de um processo industrial.

A medição de pressão é uma das variáveis de processo mais importantes na indústria, sendo essencial para o controle e monitoramento de processos, segurança e controle de qualidade, dentre outras aplicações. A medição de pressão também é utilizada como variável primária na medição de nível, de vazão e de massa específica. Na indústria de petróleo e gás, a medição de pressão é essencial para garantir a segurança e a integridade dos dutos e equipamentos. Na indústria química, a medição de pressão é fundamental para o monitoramento e controle de tanques de armazenamento de produtos químicos, reatores, colunas de destilação, caldeiras, dentre outros. Em resumo, a medição de pressão está presente em praticamente todas as aplicações industriais.

5.1 Conceitos básicos

Segundo Halliday et al.^[60], **pressão** é a força exercida sobre uma determinada área e pode ser representada pela Eq. 5.1.

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Onde: P – pressão exercida (N m⁻²); F – força exercida (N); A – área (m²);

A pressão é um conceito mais complexo do que o sugerido pela equação 5.1. Para entender melhor a pressão, é importante conhecer os seguintes termos: vácuo total, vácuo, pressão atmosférica, pressão absoluta, pressão manométrica, pressão diferencial, pressão total, pressão estática e pressão dinâmica.

O **vácuo total** é uma região onde a pressão é zero. Isso significa que não há nenhuma matéria presente, nem mesmo átomos ou moléculas. Como é impossível criar uma região completamente livre de matéria, o vácuo total é um conceito teórico. O vácuo, por outro lado, é uma condição real de pressão reduzida. Ele é medido em relação à pressão atmosférica normal, que é de 1 atm ou 101,325 kPa^[3,61].

A **pressão atmosférica** é a força exercida pela atmosfera sobre a superfície terrestre. Seu valor ao nível do mar é de 1 atm, 101,325 kPa ou 760 mmHg. No entanto, esse valor diminui com a altitude. A **pressão absoluta** é a pressão medida em relação ao vácuo, sendo sempre maior que a pressão atmosférica, e pode ser expressa pela Eq. 5.2. A **pressão manométrica** ou relativa é a pressão medida em relação à pressão atmosférica. Ela é comumente usada para medir a pressão de fluidos em tubos ou recipientes^[3,9,30]. As pressões descritas podem ser representadas em uma escala conforme a Figura 5.1.

$$P_{abs} = P_{rel} + P_{atm} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Onde: P_{abs} – pressão absoluta; P_{rel} – pressão relativa; P_{atm} – pressão atmosférica.

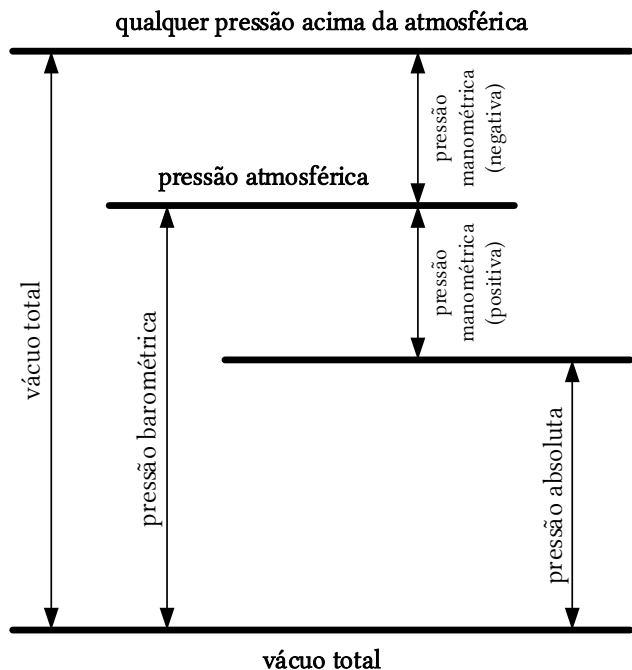


Figura 5.1: Escala representativa de pressões

Quando fluidos circulam dentro de tubulações, é importante entender os conceitos de pressão diferencial, estática, dinâmica e total. A **pressão diferencial** é a diferença entre duas pressões medidas em pontos diferentes da tubulação. Ela é usada para determinar o fluxo de fluido na tubulação. A **pressão estática** é a pressão exercida por um fluido em repouso ou em movimento perpendicular à corrente do fluido. Ela é usada para determinar a altura de um fluido em um recipiente. A **pressão dinâmica** é a pressão exercida por um fluido em movimento paralelo à corrente do fluido e pode ser expressa pela Eq. 5.3. Ela é usada para determinar a energia cinética do fluido. A **pressão total** é a soma das pressões estática e dinâmica. Ela é usada para determinar a força total exercida pelo fluido sobre as paredes da tubulação.

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2g} \gamma v^2 \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Onde: P_d – pressão dinâmica (N m^{-2}); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); v – velocidade do fluido (m s^{-1}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); γ – peso específico do fluido (N m^{-3})

As unidades de pressão mais utilizadas na prática industrial são as derivadas do sistema métrico. Nos países que utilizam esse sistema, a unidade mais comum é o kgf cm^{-2} . Essa unidade é equivalente a $98,0665 \text{ N m}^{-2}$. Nos países de língua inglesa, é mais comum o uso da unidade psi. Essa unidade é equivalente a $6,894757 \text{ N m}^{-2}$. Na Tabela 5.1 são apresentadas algumas unidades de pressão mais utilizadas em processos.

Tabela 5.1: Unidades de pressão comumente utilizadas e suas conversões.

	kgf/cm^2	lbf/in^2	bar	inHg	inH ₂ O	atm	mmHg	mmH ₂ O	kPa
kgf/cm^2	1,000	14,2330	0,9807	28,9600	393,8300	0,9678	735,5800	10003,0000	98,0665
lbf/in^2	0,0703	1,0000	0,0689	2,0360	27,6890	0,0680	51,7100	70329,0000	6,8950
bar	1,0197	14,5040	1,0000	29,5300	401,6000	0,9869	750,0600	10200,0000	100,0000
inHg	0,0345	0,4911	0,0339	1,0000	13,5990	0,0334	25,3990	345,4000	3,3863
inH ₂ O	0,0025	0,0361	0,0025	0,0735	1,0000	0,0024	1,8665	25,3990	0,2488
atm	1,0332	14,6960	1,0133	29,9210	406,9330	1,0000	760,0500	10335,0000	101,3250
mmHg	0,0013	0,0193	0,0013	0,0394	0,5354	0,0013	1,0000	13,5980	0,1333
mmH ₂ O	0,0001	0,0014	0,0010	0,0029	0,0394	0,0001	0,0735	1,0000	0,0098
kPa	0,0102	0,1450	0,0100	0,2954	4,0158	0,0099	7,5006	101,9980	1,0000

Nota: H₂O à 15,5 °C e Hg à 0 °C

A medição de pressão é uma operação fundamental em diversas áreas da engenharia, como mecânica dos fluidos, hidráulica, pneumática e controle de processos. Para realizar essa medição, é necessário conhecer dois conceitos importantes: o **Teorema de Stevin** e o **Princípio de Pascal**.

O Teorema de Stevin *estabelece que a diferença de pressão entre dois pontos de um fluido em repouso é igual ao produto da massa específica do fluido pela aceleração da gravidade e pela diferença de altura entre os dois pontos*^[9]. Essa relação pode ser expressa pela Eq. 5.4.

$$\Delta P = \rho g \Delta h \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Onde: ΔP – diferença de pressão entre os dois pontos (Pa); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); Δh – diferença de altura entre os dois pontos (m)

O Princípio de Pascal *estabelece que a alteração de pressão produzida em um fluido em equilíbrio é transmitida integralmente a todos os pontos do fluido e às paredes do recipiente*^[3,9,49]. Esse princípio é a base da hidráulica, ciência que estuda a aplicação da pressão dos fluidos, e pode ser observado na Figura 5.2, onde, em uma determinada altura de fluido manométrico, temos a mesma pressão sendo exercida, ou seja, $P_1 = P_2 = P_3 = P_4$.

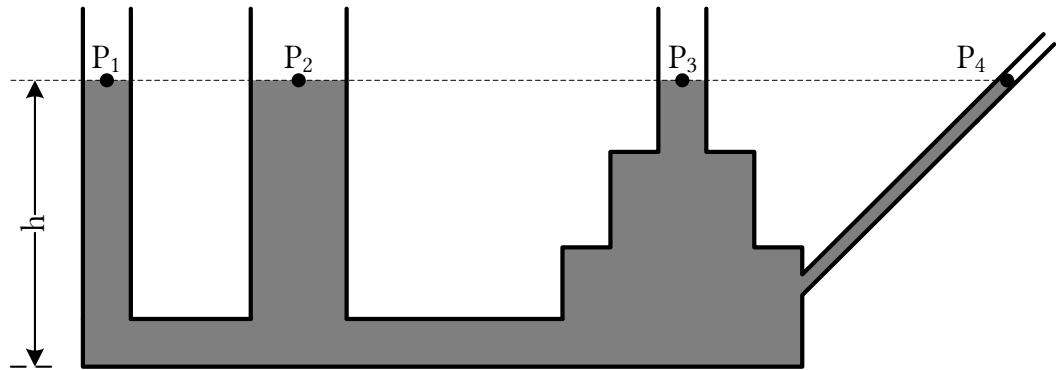


Figura 5.2: Visualização do princípio de Pascal (adaptado de [49]).

Os dois conceitos mencionados acima são amplamente utilizados em diversas aplicações práticas. Por exemplo, o Teorema de Stevin é empregado para calcular a pressão hidrostática, que é a pressão exercida por um fluido em repouso. Já o Princípio de Pascal é aplicado em diversos dispositivos hidráulicos, como bombas, cilindros e sistemas de freios.

5.2 Medidores de pressão

A medição da variável pressão pode ser realizada com base em vários princípios, cuja escolha está sempre associada às condições da aplicação. Os principais medidores são os manômetros e os dispositivos classificados como especiais.

Os manômetros são instrumentos dedicados à indicação local da pressão e podem realizar a medição por meio de uma coluna de líquido ou por meio de um elemento elástico. Os **manômetros de coluna de líquido** empregam um fluido como meio para a medição da pressão. Por outro lado, os **manômetros por deformação** ou **elemento elástico** utilizam a deformação de um componente elástico como meio para aferir a pressão. Existem também os dispositivos de medição especiais, conhecidos como **elementos elétricos de pressão**, constituídos por transformadores que convertem a pressão de entrada em um sinal elétrico proporcional.

5.2.1 Manômetros de coluna de líquido

São dispositivos que medem pressões relativamente baixas com excelente precisão. Os manômetros de coluna de líquido são constituídos por um tubo transparente de seção circular e uniforme, contendo um líquido de massa específica conhecida. Os líquidos manométricos mais comuns são a água e o mercúrio. A leitura do manômetro é feita por meio do deslocamento do líquido, que equilibra a pressão aplicada. As unidades mais utilizadas para medir pressões com manômetros são: mmH₂O (milímetros de coluna de água), inH₂O (polegadas de coluna de água), mmHg (milímetros de mercúrio) e inHg (polegadas de mercúrio). A manutenção de manômetros é simples. Para alterar sua capacidade de medida, basta substituir o líquido manométrico, alterando assim a massa específica. Os manômetros mais utilizados industrialmente são o **manômetro de coluna em U**, o **manômetro de coluna reta vertical** e o **manômetro de coluna inclinada**^[3,9,36,42,44,62,63].

Manômetro de coluna em U

É um dispositivo utilizado para medir pressões (Figura 5.3A), pressões diferenciais (Figura 5.3B) e vácuo (Figura 5.3C). Ele é composto por um tubo de vidro transparente em forma de U, contendo um fluido manométrico, como água, mercúrio ou álcool. A diferença entre as pressões aplicadas nas extremidades do manômetro está relacionada com a diferença de altura h entre os níveis do fluido manométrico e pode ser determinada por meio do Teorema de Stevin (Eq. 5.4). Este tipo de manômetro possui uma faixa de aplicação extensa, já que o fluido manométrico pode ser escolhido de acordo com as necessidades específicas da aplicação [3,9,36,42,44,62,63].

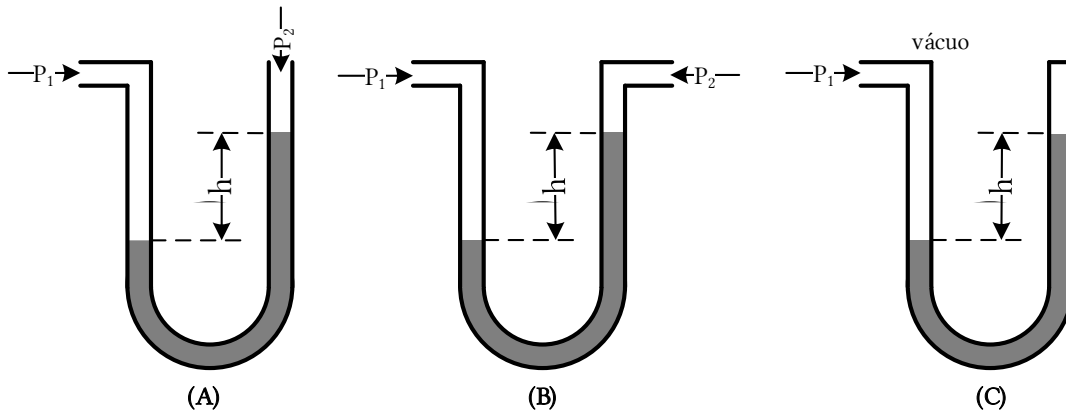


Figura 5.3: Manômetros de coluna em U

EXEMPLO 5.1: Um manômetro em forma de U preenchido com mercúrio mostra uma deflexão de 0,940 m quando uma diferença de pressão de ar é aplicada em suas duas extremidades. Qual é a diferença de pressão indicada em kPa? Considere a massa específica do ar desprezível. A densidade relativa do mercúrio $\rho_{e(Hg)} = 13,613$.

A diferença de pressão indicada no manômetro é determinada pela Eq. 5.4.

$$\Delta P = \rho g h$$

Sendo a aceleração da gravidade $g = 9,81 \text{ (m s}^{-2}\text{)}$ e a densidade relativa do mercúrio é determinada por: $\rho_{e(Hg)} = \frac{\rho_{Hg}}{\rho_{H_2O}}$, teremos:

$$\Delta P = \rho_{e(Hg)} \rho_{H_2O} g h = (13,613) \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (0,94 \text{ m})$$

$$\Delta P = 125380 \text{ Pa} = 125,380 \text{ kPa} \quad \blacksquare$$

Manômetro de coluna reta vertical

É um dispositivo de medição de pressão. Seu princípio de funcionamento é o mesmo do manômetro de coluna em U, mas com uma diferença importante: as áreas dos ramos da coluna são diferentes (Figura 5.4). A diferença de pressão entre as extremidades do medidor é equilibrada pelo deslocamento do líquido manométrico na coluna. No entanto, como o ramo de menor área tem uma seção transversal menor, o deslocamento do líquido neste braço é maior do que no ramo de maior área. Isso ocorre porque o volume de líquido deslocado é o mesmo nos dois braços [3,9,42,62,63].

Com o auxílio do teorema de Stevin (Eq. 5.4), podemos expressar a diferença de pressão em um manômetro de coluna reta vertical por meio da Eq. 5.5.

$$\Delta P = \rho g (H + h) \quad (\text{Eq. 5.5})$$

Onde: ΔP – diferença de pressão entre os dois pontos (Pa); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); h – altura do líquido manométrico no braço menor (m); H – altura do líquido manométrico no braço maior.

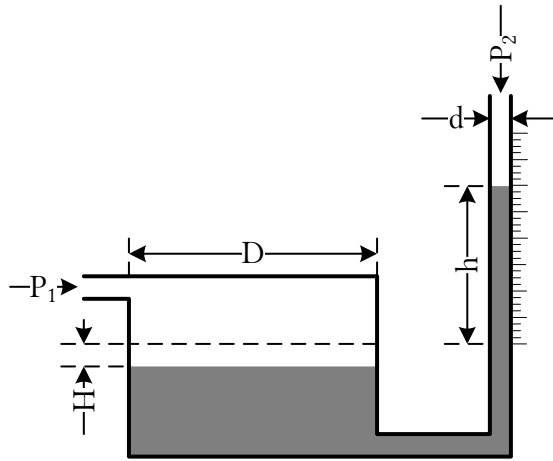


Figura 5.4: Manômetro de coluna reta.

Como o volume deslocado do volume no braço maior é o mesmo no braço menor do manômetro podemos admitir que $AH = ah$, sendo A e a as áreas do braço maior e do braço menor, respectivamente. Em função dos diâmetros dos braços teremos $D^2H = d^2h$ o que implica em $H = \frac{d^2}{D^2}h$. Assim, a diferença de pressão pode ser expressa pela Eq. 5.6.

$$\Delta P = \rho gh \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right) \quad (\text{Eq. 5.6})$$

Onde: ΔP – diferença de pressão entre os dois pontos (Pa); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); d – diâmetro do braço menor (m); D – diâmetro do braço maior (m); h – altura do líquido manométrico do braço menor (m).

Sendo $A \gg a$, podemos reescrever a Eq. 5.6 e a determinação da pressão no manômetro ser dado pelo próprio teorema de Stevin (Eq. 5.4).

EXEMPLO 5.2: Considerando o manômetro de coluna reta representado pela Figura 5.4, preenchido com um fluido de massa específica $\rho = 850 \text{ kg m}^{-3}$. Os diâmetros dos braços maior (D) e menor (d) são, respectivamente, 0,04 m e 0,02 m. A altura da coluna do braço menor (h) é de 0,6 m. Determine: 1) a diferença de pressão entre os pontos P_1 e P_2 , em kPa; 2) a diferença de pressão se os diâmetros D e d fossem iguais a 0,04 m; 3) a diferença de pressão se $D=2,4$ e $d=0,02$.

A diferença de pressão para uma coluna líquida reta é dada pela Eq. 5.6.

No item 1, teremos a diferença de pressão sendo calculada como:

$$\Delta P = \left(850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (0,6 \text{ m}) \left(1 + \frac{(0,02 \text{ m})^2}{(0,04 \text{ m})^2} \right)$$

$$\Delta P = 6254 \text{ Pa} = 6,254 \text{ kPa}$$

No item 2, teremos a diferença de pressão sendo calculada como:

$$\Delta P = \left(850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (0,6 \text{ m}) \left(1 + \frac{(0,04 \text{ m})^2}{(0,04 \text{ m})^2} \right)$$

$$\Delta P = 10006 \text{ Pa} = 10 \text{ kPa}$$

No item 3, podemos considerar que $D \gg d$, assim teremos a diferença de pressão sendo calculada pela Eq. 5.4.

$$\Delta P = \left(850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (0,6 \text{ m}) = 5003 \text{ Pa} = 5 \text{ kPa} \quad \blacksquare$$

Manômetro de coluna inclinada

É um dispositivo utilizado para medir baixas pressões, da ordem de 50 mmH₂O (0,00484 atm). Seu princípio de funcionamento é o mesmo do manômetro de coluna reta, contudo sua construção é feita inclinando-se um tubo reto de pequeno diâmetro, de modo a medir com boa

precisão pressões em função do deslocamento do líquido dentro do tubo (Figura 5.5). Uma vantagem adicional neste tipo de dispositivo é a possibilidade de **ampliar o range de medição** [9,42,62,63].

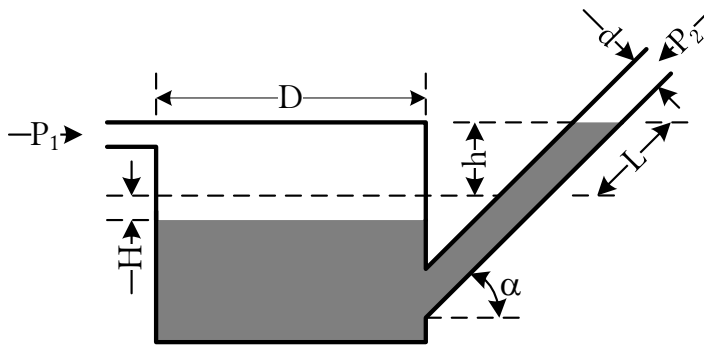


Figura 5.5: Manômetro de coluna inclinada.

Como o princípio é o mesmo do manômetro de coluna reta vertical, a determinação da diferença de pressão é dada pela Eq. 5.6, porém considerando $h = L \sin(\alpha)$. Assim, a diferença de pressão para o manômetro de coluna inclinada pode ser expressa pela Eq. 5.7.

$$\Delta P = \rho g L \sin(\alpha) \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right) \quad (\text{Eq. 5.7})$$

Onde: ΔP – diferença de pressão entre os dois pontos (Pa); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); d – diâmetro do braço menor (m); D – diâmetro do braço maior (m); L – comprimento do tubo inclinado preenchido pelo líquido manométrico (m); α – ângulo de inclinação do tubo (m).

EXEMPLO 5.3: Considere o manômetro de coluna inclinada representado na Figura 5.5, preenchido com mercúrio ($\rho_{\text{Hg}} = 13613 \text{ kg m}^{-3}$). O comprimento da coluna inclinada é $L = 1,2 \text{ m}$ e o ângulo de inclinação em relação à horizontal é $\alpha = 30^\circ$. Os diâmetros do braço maior (D) e do braço menor (d) são, respectivamente, $0,05 \text{ m}$ e $0,025 \text{ m}$. Determine a diferença de pressão entre os pontos P_1 e P_2 .

A diferença de pressão para a coluna inclinada é calculada pela Eq. 5.7.

$$\Delta P = \left(13610 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (1,2 \text{ m}) \sin(30) \left(1 + \frac{(0,025 \text{ m})^2}{(0,050 \text{ m})^2} \right)$$

$$\Delta P = 100000 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa} \quad \blacksquare$$

Independentemente do tipo de manômetro de coluna de líquido, a medida da pressão depende da massa específica do líquido manométrico. Como a massa específica do líquido é uma função da temperatura, a temperatura do ambiente onde o instrumento está instalado influencia no resultado da leitura. Para compensar essa influência, é necessário considerar a temperatura do ambiente na construção da escala do manômetro. Essa escala é geralmente construída com base na massa específica do líquido a uma temperatura de referência de 20°C . Se a temperatura do ambiente for diferente, a massa específica também será distinta. Para compensar essa diferença, aplica-se a Eq. 5.8 [4,36,62].

$$\rho(T) = \frac{\rho_0}{1 + \beta(T - T_0)} \quad (\text{Eq. 5.8})$$

Onde: $\rho(T)$ – massa específica do fluido manométrico em função da temperatura (kg m^{-3}); ρ_0 – massa específica do fluido manométrico a temperatura de referência (kg m^{-3}); β – coeficiente de expansão volumétrica ($^\circ \text{C}^{-1}$); T – temperatura do fluido manométrico ($^\circ \text{C}$); T_0 – temperatura de referência ($^\circ \text{C}$).

De acordo com Kuphaldt [49], os manômetros inclinados são mais sensíveis do que os verticais porque, quando o tubo é inclinado, o líquido percorre uma distância maior para gerar a mesma variação de altura. Essa amplificação do movimento do líquido permite medições de pressão com maior precisão.

Para os manômetros de coluna de líquido, o tipo de líquido utilizado depende da pressão e da natureza do fluido cuja pressão se deseja medir. Líquidos de menor massa específica são utilizados para medir pequenos diferenciais de pressão, como a pressão atmosférica. A água é

um líquido conveniente e barato que pode ser utilizado nessas circunstâncias, mas evapora rapidamente e é difícil de visualizar, necessitando de corantes para realce^[44]. Na Tabela 5.2, são apresentados líquidos comuns de manômetros.

Tabela 5.2: Líquidos comumente utilizados em manômetros à 15,5 °C (Adaptado de [44] e [64])

Líquido	Densidade específica ⁽¹⁾	Aplicações	Vantagens	Desvantagens
Óleo dielétrico de transformador	0,864	Indicado para medidores de vazão por pressão diferencial ⁽²⁾ e medição de pequenas pressões	A baixa massa específica proporciona variações notáveis de altura para pequenas alterações de pressão. Resistente à amônia (em medidores de vazão), é facilmente visível pela coloração castanha e não evapora rapidamente.	A densidade específica do líquido pode variar com o tempo, portanto, é recomendável comprar um tambor que dure por toda a vida útil do instrumento.
Anilina, fenilamina ou aminobenzeno	1,025	Adequado para medidores de vazão de ar ou gás de baixa pressão, com exceção de amônia e cloro	Baixa massa específica. Evapora lentamente. Não se mistura com água. Facilmente visível.	Ataca superfícies pintadas. Altamente tóxica em contato com a pele ou corrente sanguínea. Deve ser armazenada em recipiente vedado, pois escurece ao contato com o ar.
Dibutilftalato	1,047	Adequado para instalações de gás amônia.	Não se mistura com a água	
Tetracloreto de carbono	1,605	Indicado para medidores de vazão de gás cloro e como medida temporária quando for necessário medir uma diferença de pressão maior.	Não é atacado pelo cloro.	Pouco visível. Evapora facilmente em locais quentes, exigindo reabastecimento frequente.
Tetrabromoetano	2,964	Indicado para instalações de gás amônia	Evapora lentamente. Útil para medições de diferença de pressão elevadas, ou seja, sistemas que requerem fluidos manométricos de densidade específica alta.	
Mercúrio	13,560	Utilizado em medidores de vazão de água, vapor, líquido e gás comprimido.	Alta massa específica. Facilmente visto. Não se mistura com outros líquidos. Não evapora nem adere nas laterais do tubo.	Alto custo. Mobilidade e massa específica são afetadas por contaminação. Altamente tóxico, podendo causar problemas neurológicos e endócrinos em exposições prolongadas.

Notas: (1) Densidade específica e a relação da massa específica de um líquido e a massa específica da água, ou da massa específica de um gás em relação a massa específica do ar, ou seja, $\rho_e = \frac{\rho_{liq}}{\rho_{H_2O}}$ ou $\rho_e = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{ar}}$. (2) Os medidores de vazão serão tratados no [Capítulo 6](#).

5.2.2 Manômetros por deformação ou elemento elástico

Este tipo de dispositivo tem como princípio de funcionamento a **Lei de Hooke**, que define que *a deformação de um corpo sólido é diretamente proporcional ao esforço aplicado sobre ele, até que esse esforço atinja o limite de elasticidade do material*. Na prática, este tipo de medidor de pressão utiliza um fluido incompressível para medir a pressão. O fluido se deforma quando a pressão aumenta, e essa deformação pode ser convertida em uma medida de pressão por meio de uma escala calibrada ^[9,30,63,65].

Os elementos elásticos mais utilizados para a medição de pressão em manômetros são o **tubo de Bourdon**, o **fole** e o **diafragma**.

Manômetro de tubo de Bourdon

Os tubos de Bourdon (Figura 5.6) são dispositivos versáteis na medição de pressão. Eles consistem em tubos de seção transversal oval, dobrados em círculos e conectados a mecanismos de indicação que movimentam um ponteiro em uma escala calibrada. Podem ser fabricados nos tipos **C**, **helicoidal** e **espiral**, sendo os dois últimos utilizados para aumentar a sensibilidade e a linearidade. Esses dispositivos podem operar em uma ampla faixa de pressão,

Medição de pressão

com boa exatidão, resposta rápida e sensibilidade em diversas aplicações científicas e industriais[9,24,30,62,63]. Conforme ilustrado na Figura 5.7, os tubos de Bourdon podem ter diferentes seções transversais, e a espessura de suas paredes varia de acordo com a pressão interna a que serão submetidos e com o material de fabricação, como aço inoxidável, latão, aço carbono ou ligas de níquel-cobre[66].

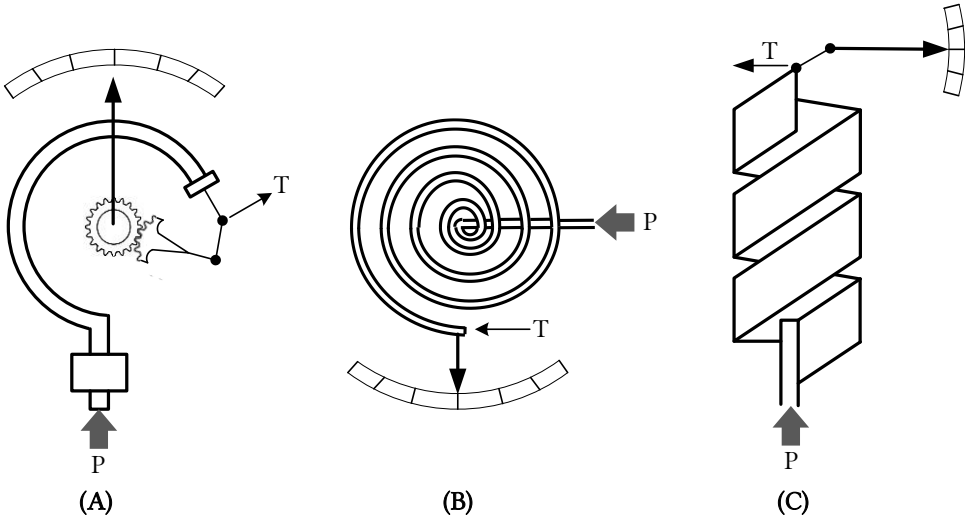


Figura 5.6: Tubos de Bourdon utilizados industrialmente: (A) Tipo C; (B) Tipo espiral; e (C) Tipo helicoidal (adaptado de [42]).

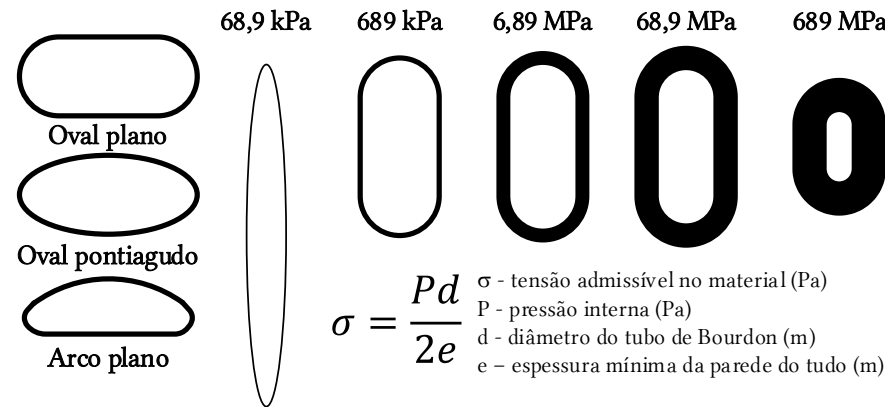


Figura 5.7: Exemplos de seções transversais de tubos de Bourdon, destacando a relação entre a espessura da parede e a pressão interna aplicada (adaptado de [66]).

Há uma ampla diversidade de dimensões de tubos empregadas na fabricação do manômetro de tubo de Bourdon. Na Tabela 5.3 são apresentas especificações para uma determinada faixa de pressão, considerando um tubo com seção transversal oval pontiaguda.

Tabela 5.3: Dimensões para tubos de Bourdon de seção transversal oval pontiaguda (adaptado de [66]).

Faixa de medição (kPa)	Dimensões do tubo (mm)		
	2a	2b	d
69	13,55	2,50	0,14
103	13,40	2,70	0,15
207	13,25	2,40	0,20
414	10,30	2,65	0,18
689	10,40	2,70	0,30
1103	10,45	2,70	0,30
1379	10,20	2,70	0,35
2758	10,15	3,10	0,40
4137	10,10	3,05	0,50

O diagrama ao lado da tabela mostra uma seção transversal oval pontiaguda com as dimensões 2a (largura máxima), 2b (largura mínima) e d (espessura da parede) indicadas.

Utilizando a Lei de Hooke, $F = kx$, para analisar o comportamento do manômetro de Bourdon do tipo C e assumindo que sua seção transversal seja circular, é possível expressar a força atuante no tubo por meio da Eq. 5.9. A partir dessa relação, pode-se determinar a pressão exercida no sistema.

$$P = \frac{3EI}{L^3} \frac{x}{A} \quad (\text{Eq. 5.9})$$

$$\text{Sendo: } F = PA \text{ e } k = \frac{3EI}{L^3}$$

Onde: P – pressão exercida no tubo (Pa); E – módulo de Young (Pa); I – momento de inércia (m⁴); x – deslocamento do manômetro (m); L – comprimento do manômetro (m); A – área da seção transversal (m).

EXEMPLO 5.4: Um manômetro de tubo de Bourdon-C, fabricado em aço inoxidável 316 (resistente à corrosão) e com um comprimento total de 200 mm, foi projetado para operar em uma faixa de pressão de 689 kPa. 1) Durante uma medição, observa-se um deslocamento de 2,8 mm no tubo de Bourdon. Qual será a pressão indicada pelo manômetro? 2) Para que a pressão medida atinja 850 kPa, qual deve ser o deslocamento do tubo? Considere que o módulo de Young do aço inox 316 é de 200 GPa.

Utilizando a Tabela 5.3, temos que as dimensões recomendadas para um manômetro do tipo tubo de Bourdon operando na faixa de 689 kPa são: 2a=10,40 mm, 2b = 2,70 mm e d = 0,3 mm.

Calculando o momento de inércia para um anel oval temos:

$$I_x = \frac{\pi}{4} (a_1^3 b_1^3 - a_2^3 b_2^3)$$

$$I_y = \frac{\pi}{4} (a_1^3 b_1 - a_2^3 b_2)$$

$$a_1 = \frac{2a}{2} = 0,00520 \text{ m e } a_2 = a_1 - d = 0,00490 \text{ m}$$

$$b_1 = \frac{2b}{2} = 0,00135 \text{ m e } b_2 = b_1 - d = 0,00105 \text{ m}$$

$$I_x = \frac{\pi}{4} [(0,00520 \text{ m})(0,00490 \text{ m})^3 - (0,00135 \text{ m})(0,00105 \text{ m})^3]$$

$$I_x = 5,5933 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

$$I_y = \frac{\pi}{4} [(0,00520 \text{ m})^3(0,00490 \text{ m}) - (0,00135 \text{ m})^3(0,00105 \text{ m})]$$

$$I_y = 5,2064 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$I = I_x + I_y = 5,7657 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

Para o anel oval temos a área da seção transversal como:

$$A = \pi a_2 b_2 = \pi(0,00490 \text{ m})(0,00105 \text{ m}) = 1,6153 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

No item 1 temos um deslocamento de 2,8 mm no manômetro durante a medição. Assim, utilizando a Eq. 5.9, a pressão indicada pelo sensor será:

$$P = \frac{3(200 \times 10^9 \text{ Pa})(5,7657 \times 10^{-11} \text{ m}^4)(0,0028 \text{ m})}{(0,2 \text{ m})^3(1,6153 \times 10^{-5} \text{ m}^2)}$$

$$P = 7,4909 \times 10^5 \text{ Pa} = 749 \text{ kPa}$$

No item 2 foi identificada uma leitura de 850 kPa. Logo, utilizando a Eq. 5.9, o deslocamento pode ser determinado como:

$$x = \frac{(850 \times 10^3 \text{ Pa})(0,2 \text{ m})^3(1,6153 \times 10^{-5} \text{ m}^2)}{3(200 \times 10^9 \text{ Pa})(5,7657 \times 10^{-11} \text{ m}^4)}$$

$$x = 0,0032 \text{ m} = 3,2 \text{ mm} \quad \blacksquare$$

As variações de temperatura provocam alterações no tensionamento do tubo de Bourdon. Esse fenômeno ocorre devido à diminuição da elasticidade dos materiais quando a temperatura aumenta, resultando em erro de medição. Esse erro é representado pela Eq. 5.10^[9,30].

$$E = 0,02\Delta T \left(\frac{P}{P_S} \right) \quad (\text{Eq. 5.10})$$

Onde: E – erro na indicação do manômetro (%); P – pressão aplicada (Pa); PS – spam do manômetro (Pa); ΔT – variação de temperatura com relação a temperatura de calibração (°C).

Neste tipo de sensor, é importante tomar cuidado com os limites de elasticidade do material que compõe o manômetro, para evitar que ele se rompa ou deforme permanentemente. Segundo Bega et al.^[9], para prolongar a vida útil de um manômetro é importante não exceder 2/3 do seu limite superior de medição quando a pressão a ser medida for constante. Quando a pressão apresentar variações significativas, o limite máximo deve ser reduzido para 1/2.

Manômetro de fole

O elemento elástico do tipo fole é um dispositivo mecânico, em formato cilíndrico, que converte pressão em movimento linear seguindo a Lei de Hooke. Possui diafragmas de paredes finas, geralmente metálicos, capazes de expandir significativamente em resposta à pressão, permitindo medições manométricas, absolutas ou diferenciais. Pode alcançar uma faixa de até 5,5 MPa (55 bar) (Figura 5.8)^[3,6,9,24,30,36,42].

O deslocamento linear do fole ocorre em resposta à pressão interna, gerando uma deflexão proporcional, conforme a Eq. 5.11.

$$x = A_e P C_b \quad (\text{Eq. 5.11})$$

Onde: x – deslocamento do fole (m); A_e – área efetiva do receptor de pressão (m²); P – pressão exercida (N m⁻²); C_b – coeficiente de rigidez do material do fole (m N⁻¹)

Em resumo, manômetros de fole são dispositivos versáteis, sensíveis e adaptáveis. Apresentam alta sensibilidade e capacidade de se ajustar a diversas faixas de pressão e tipos de medição, graças à tensão armazenada na mola. Devido à sua fragilidade, são indicados apenas para baixas e médias pressões.

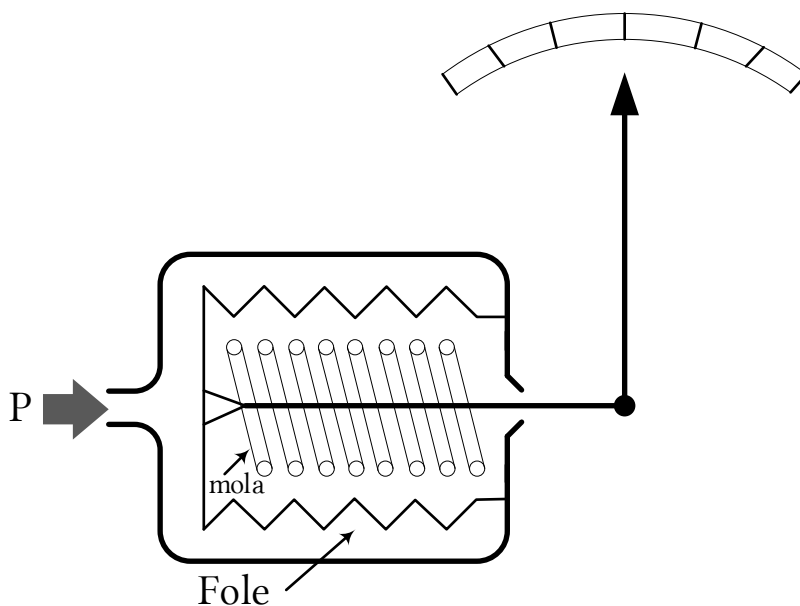


Figura 5.8: Manômetro de fole.

Manômetro de diafragma

O diafragma é um elemento elástico em forma de disco flexível, fabricado em metal ou materiais não metálicos, geralmente com ondulações concêntricas. É usado para converter pressão em deflexão (Figura 5.9). Seu projeto busca otimizar a linearidade dentro de uma faixa de pressão específica, minimizando histerese e deslocamentos de ponto zero. Em alguns casos, como em sensores de altitude, pode-se projetar deliberadamente o diafragma para apresentar comportamento não linear. A linearidade e a sensibilidade do diafragma são determinadas pela profundidade, número de ondulações e ângulo de conformação^[42,67].

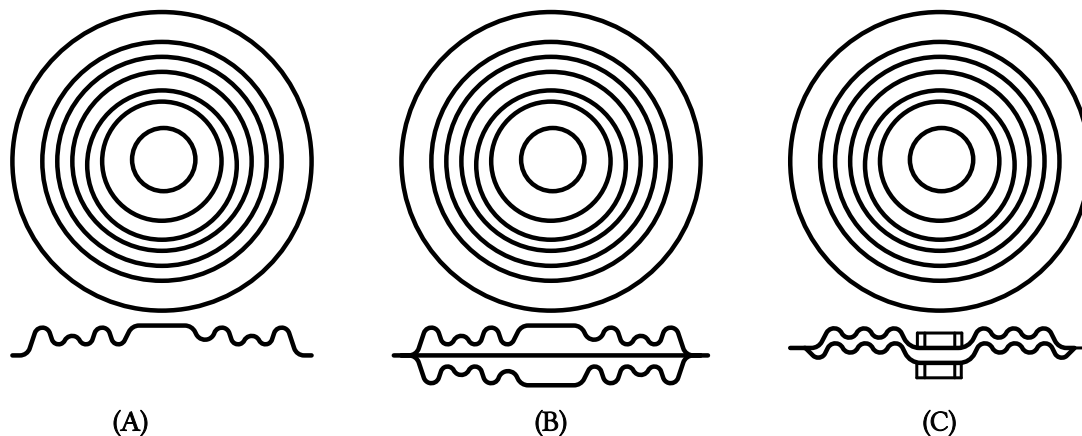


Figura 5.9: Diafragma padrão: (A) Diafragma único corrugado; (B) Cápsula com Diafragma Convexo; e (C) Cápsula de Diafragmas Conjugados (adaptado de [24]).

Uma vantagem do sensor de diafragma é que a baixa massa e a elevada rigidez relativa do diafragma fino proporcionam ao sensor uma frequência natural muito alta, com uma pequena taxa de amortecimento, permitindo medições transitórias ou dinâmicas com maior precisão. A frequência natural de um diafragma circular pode ser estimada pela Eq. 5.12^[67] e a deflexão elástica máxima de um diafragma circular, uniformemente carregado e apoiado em torno de sua circunferência, pode ser estimada pela Eq. 5.13^[66,67]. Vale ressaltar que a deformação nos diafragmas é detectada por meio de extensômetros individuais^[30].

$$\omega_n = 10,21 \sqrt{\frac{Et^2}{12(1-\nu_p^2)\rho r^4}} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

Onde: ω_n – frequência natural do diafragma (rad s^{-1}); E – módulo de elasticidade volumétrica do material ou módulo de Young (N m^{-2}); t – espessura do diafragma (m); r – raio do diafragma (m); ρ – massa específica do material do diafragma (kg m^{-3}); ν_p – coeficiente de Poisson para o material do diafragma (–).

$$y_{\max} = \frac{3P(1-\nu_p^2)r^4}{16Et^3} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

Onde: $y_{\max}$ – deflexão elástica máxima (m); E – módulo de elasticidade volumétrica do material ou módulo de Young (N m^{-2}); t – espessura do diafragma (m); r – raio do diafragma (m); P – pressão exercida no diafragma (N m^{-2}); ν_p – coeficiente de Poisson para o material do diafragma (–).

O **coeficiente de Poisson** (ν_p) é um parâmetro que descreve a relação entre a deformação transversal e a deformação axial de um material. Nos **diafragmas de medidores de pressão**, o coeficiente de Poisson influencia a resposta mecânica do material quando submetido à pressão. Na Tabela 5.4, são apresentados valores do coeficiente de Poisson para diferentes materiais que compõem o diafragma.

Tabela 5.4: Coeficiente de Poisson para materiais usados em diafragmas de medidores de pressão.

Material	Coef. de Poisson (ν_p)	Aplicações
Aço Inoxidável 316	0,30 – 0,31	Sensores industriais; alta resistência química
Aço Inoxidável 304	0,29	Sensores industriais; resistente à corrosão
Titânio (Ti-6Al-4V) ⁽¹⁾	0,34	Sensores em ambientes agressivos e biomédicos
Hastelloy C-276 ⁽²⁾	0,30 – 0,33	Indústria química; alta resistência à corrosão
Monel 400 ⁽³⁾	0,32	Indústria marinha e química
Tântalo	0,34	Ambientes altamente corrosivos; sensores químicos
Níquel	0,31	Aplicações especiais em alta temperatura
Inconel 718 ⁽⁴⁾	0,29 – 0,32	Ambientes de alta temperatura e corrosão

Notas: (1) liga de titânio contendo 6% de alumínio e 4% de vanádio; (2) liga de Ni-Mo-Cr-Fe-W e elementos em menor quantidade como Co, Mn e V; (3) liga de Ni-Cu e em pequenas quantidades Fe, Mn, C e Si; (4) liga de Ni-Cr-Fe-Ni-Mo.

Conforme discutido anteriormente, os manômetros que empregam elementos elásticos ou que sofrem deformação apresentam ampla aplicabilidade em diversas situações. Esses dispositivos destacam-se por sua sensibilidade e pela capacidade de se adaptar a diferentes faixas de medição. Na Tabela 5.5, são apresentadas as faixas de medição dos manômetros que utilizam diafragma, fole e tubo de Bourdon.

Tabela 5.5: Aplicação e faixa de medição dos manômetros por deformação ou elemento elástico

Elemento	Aplicação	Faixa de medição	
		Mínimo	Máximo
Diafragma	Pressão	0 a 5 mmH ₂ O	0 a 2800 kPa ^[9] 0 a 6800 kPa ^[42]
	Vácuo	-5 a 0 mmH ₂ O	-760 a 0 mmHg
	Vácuo e pressão	Qualquer intervalo dentro das faixas de pressão e vácuo, com um intervalo total de 5 mmH ₂ O.	
Fole	Pressão	0 a 130 mmH ₂ O	0 a 5800 kPa ^[9] 0 a 13600 kPa ^[42]
	Vácuo	-130 a 0 mmH ₂ O	-760 a 0 mmHg
	Vácuo e pressão	Qualquer intervalo dentro das faixas de pressão e vácuo, com um intervalo total de 130 mmH ₂ O.	
Bourdon	Pressão	0 a 83 kPa	0 a 690 MPa ^[9,42]
	Vácuo	-760 a 0 mmHg	
	Vácuo e pressão	Qualquer intervalo dentro das faixas de pressão e vácuo, com um intervalo total de 83 kPa	

5.2.3 Manômetros com elementos elétricos de pressão

São dispositivos que convertem a pressão medida em um sinal elétrico proporcional. Esse sinal pode manifestar-se na forma de tensão (mV), corrente (mA), resposta de frequência ou largura de pulso (ms), como no padrão analógico 4–20 mA, ou ainda em formato digital, como HART ou FOUNDATION Fieldbus. Para possibilitar a leitura por meio de instrumentos de indicação ou registro, faz-se necessária a implementação de um circuito que converta a variação de resistência, indutância ou capacitância em um sinal padronizado.

Diversos princípios de medição são empregados nos instrumentos de pressão elétricos. A maioria deles fundamenta-se na medição por deslocamentos ou forças, ou seja, busca converter a variável física “pressão” em uma variável eletricamente mensurável. Diferentemente dos métodos mecânicos tradicionais, essa conversão exige uma fonte de alimentação externa para o sensor de pressão.

Uma característica importante desses dispositivos é o pequeno deslocamento mecânico envolvido. Enquanto os elementos mecânicos tradicionais apresentam deformações típicas entre 0,1 e 0,3 mm, os sensores de pressão elétricos operam com deslocamentos na ordem de micrômetros. Segundo Von Beckerath^[66], essa mínima deformação contribui significativamente para as excelentes características dinâmicas desses instrumentos, resultando em **baixa deformação do material, alta resistência a cargas alternadas e maior durabilidade**. Além disso, tais sensores podem ser fabricados em **dimensões reduzidas**, especialmente quando são empregados materiais semicondutores. Entre os manômetros com elementos elétricos, destacam-se os transdutores **indutivos, capacitivos, piezoelétricos e piezoresistivos (extensométricos)**.

Transdutor indutivo

O transdutor LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), ou transformador diferencial de núcleo variável, é o transdutor indutivo mais utilizado para medição de pressão. O LVDT (Figura 5.10) consiste em uma bobina primária (b_p), disposta concentricamente com duas bobinas secundárias (bs_1 e bs_2). Quando o núcleo ferromagnético está centralizado, as tensões induzidas nas bobinas secundárias são iguais. Ao ocorrer deslocamento do núcleo, provocado pela pressão aplicada através de um elemento elástico (geralmente um diafragma), altera-se o acoplamento magnético e, conseqüentemente, surge uma diferença de tensão entre U_1 e U_2 . Ligando-se as bobinas bs_1 e bs_2 em oposição, a tensão resultante é proporcional ao deslocamento e, portanto, à pressão aplicada ^[24,63,66,67,68].

Segundo Von Beckerath^[66], a relação entre o sinal de saída e a pressão aplicada é dada pela Eq. 5.14.

$$U_2 = U_{2a} - U_{2b} = kU_1S \quad (\text{Eq. 5.14})$$

Onde: U_1 , U_2 , U_{2a} , U_{2b} – tensões elétricas (V); k – coeficiente de sensibilidade (m^{-1}); S – curso da mola (m).

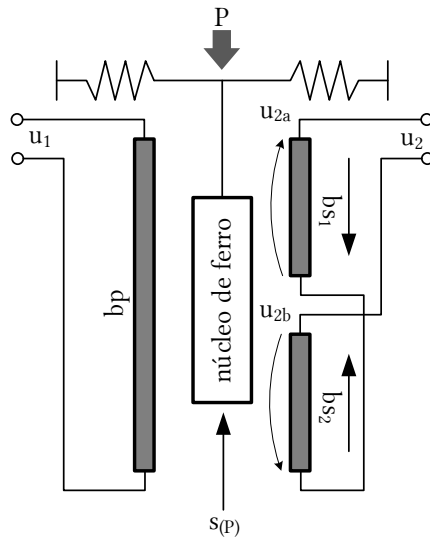


Figura 5.10: Transformador diferencial de núcleo variável (LVDT) (adaptado de [66]).

Transdutor capacitivo

O princípio de operação dos sensores de pressão capacitivos baseia-se na variação da capacitância resultante da deformação de um diafragma metálico (elemento elástico) submetido à pressão. O sensor é composto por duas placas condutoras separadas por um fluido dielétrico, também conhecido como fluido de enchimento. Uma das placas é fixa; a outra é o diafragma sensível à pressão. O diafragma é exposto à pressão do processo em um lado e a uma pressão de referência no outro, ou a uma pressão diferencial. A variação da pressão causa o deslocamento do diafragma, resultando em uma alteração na distância entre as placas do capacitor. (Figura 5.11)^[9,24,42,63,66,67,68]. A variação na distância entre as placas modifica a capacitância, conforme Eq. 5.15^[69].

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0 - \Delta d} \quad (\text{Eq. 5.15})$$

Sendo: $d = d_0 - \Delta d$

Onde: C – capacitância gerada pela pressão aplicada (F); ϵ_0 – constante dielétrica do vácuo ($\cong 8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$); ϵ_r – constante dielétrica relativa do fluido de enchimento (–); A – área de sobreposição das placas (m^2); d – distância entre as placas do capacitor que varia com a pressão aplicada (m); d_0 – distância inicial entre as placas na ausência de pressão (m); Δd – deslocamento do diafragma devido a pressão deslocada (m).

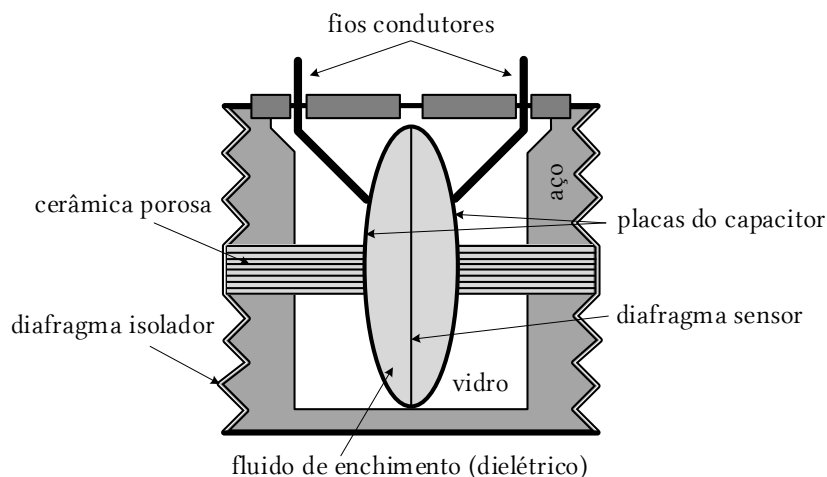


Figura 5.11: Transdutor de pressão capacitivo (adaptado de [30])

Os sensores capacitivos utilizam fluidos de enchimento para melhorar a transmissão da pressão, proteger componentes internos e minimizar efeitos térmicos. A escolha do fluido depende da aplicação, considerando fatores como **compatibilidade química**, **temperatura de operação** e **resposta dinâmica**. Na Tabela 5.6, são apresentados fluidos de enchimento comumente utilizados em sensores de pressão capacitivos.

Tabela 5.6: Fluidos de enchimentos utilizados em sensores de pressão capacitivos.

Fluido	Características	Aplicação	Constante Dielétrica (ϵ_r)
Óleo de Silicone	Alta estabilidade térmica e química, baixa compressibilidade	Indústria química e farmacêutica.	2.7
Óleo Mineral	Boa estabilidade, compatível com várias aplicações industriais	Indústria geral	2.1
Óleo Vegetal	Biodegradável, atóxico, compatível com aplicações sanitárias	Indústria alimentícia e farmacêutica	3.1
Glicerina	Boa estabilidade química e térmica, não tóxico	Alimentos e bebidas e aplicações sanitárias	42.5
Fluoropolímero Líquido (Fluorinert™)	Alta compatibilidade química, adequado para ambientes agressivos	Indústria química e petroquímica.	1.9
Álcool Benzílico	Estável, mas pode ser tóxico em algumas aplicações	Aplicações específicas	13.3
Gases Inertes (Hidrogênio, Nitrogênio)	Baixa viscosidade, resposta rápida, usado em alta precisão	Pesquisa científica, aeroespacial e sensores de alta precisão	1.0

EXEMPLO 5.5: Um sensor de pressão capacitivo é utilizado para medir a pressão em um sistema industrial. O sensor é composto por um diafragma de aço inoxidável 316 ($E = 200 \text{ GPa}$), que se deforma quando submetido à pressão, e por um fluido de enchimento de óleo de silicone, responsável por melhorar a transmissão da pressão ao diafragma. O diafragma tem 25 mm de diâmetro e 0,2 mm de espessura, e a distância inicial entre as placas é de 3 mm. Qual será a pressão indicada pelo sensor quando, em um determinado instante, a capacitância resultante da deformação do diafragma for $5,87 \times 10^{-12} \text{ F}$?

Inicialmente, deve-se calcular a distância deslocada do diafragma após a aplicação da pressão. A partir da capacitância resultante da deformação, é possível determinar o deslocamento utilizando a Eq. 5.15. O valor da constante dielétrica do óleo de silicone é obtido na Tabela 5.6.

$$A = \frac{\pi}{4} (0,025 \text{ m})^2 = 4,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\Delta d = \frac{(5,87 \times 10^{-12} \text{ F})(0,003 \text{ m}) - \left[(8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}})(2,7)(4,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \right]}{(5,87 \times 10^{-12} \text{ F})}$$

$$\Delta d = 0,001 \text{ m} = 1 \text{ mm}$$

Após determinar a distância deslocada do diafragma, é possível calcular a pressão exercida sobre o sensor utilizando a Eq. 5.13. O coeficiente de Poisson para o aço inoxidável 316 pode ser consultado na Tabela 5.4.

$$P = \frac{16(0,001 \text{ m})(200 \times 10^9 \text{ Pa})(0,0002 \text{ m})^3}{3(1-0,3^2)(0,0125 \text{ m})^4} = 384,8 \text{ kPa} \quad \blacksquare$$

Transdutor piezoelétrico

Cristais piezoelétricos geram carga elétrica quando submetidos a uma carga mecânica (pressão), devido ao desalinamento das estruturas atômicas e geração de dipolos elétricos (Figura 5.12). Esse fenômeno é denominado efeito piezoelétrico. A carga elétrica gerada é proporcional a carga mecânica (força) aplicada e é descrita pela Eq. 5.16^[62,67].

$$Q = K_p F \quad (\text{Eq. 5.16})$$

Onde: Q – carga gerada pelo cristal piezoelétrico (C); K_p – sensibilidade do cristal piezoelétrico (C N^{-1}); F – carga mecânica aplicada no cristal (N).

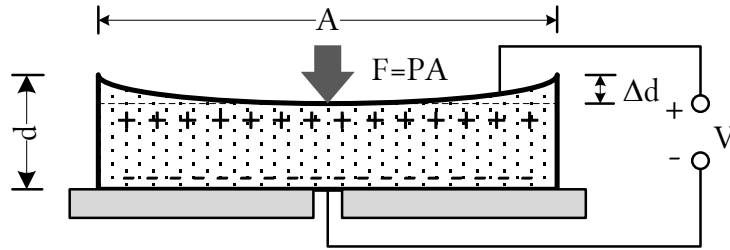


Figura 5.12: Transdutor piezoelétrico (adaptado de [70]).

A tensão é a relação entre a carga elétrica e a capacitância. Segundo Fraden[68], podemos combinar as Eq. 5.15 e 5.16, obtendo assim a tensão gerada no sistema, que pode ser representada pela Eq. 5.17, considerando $F=PA$.

$$V = \frac{K_p P d}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (\text{Eq. 5.17})$$

Onde: V – tensão gerada pelo cristal piezoelétrico (V); K_p – sensibilidade do cristal piezoelétrico (C N^{-1}); P – pressão aplicada sobre o cristal piezoelétrico (N m^{-2}); d – deformação do cristal devido a pressão aplicada (m); ϵ_0 – constante dielétrica do vácuo ($\cong 8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$); ϵ_r – constante dielétrica relativa do cristal piezoelétrico (-).

Os sensores piezoelétricos são úteis na medição de pressão dinâmica, pois mudanças lentas ou pressões estáticas provocam o descarregamento das cargas elétricas [66], o que limita seu uso nessas condições. Aguire[30] destaca que os sensores com quartzo e turmalina são sensíveis a variações de pressão de alta frequência e pouco sensíveis a variações de pressão de baixa frequência.

Uma característica importante a ser observada nos cristais piezoelétricos é a direção específica da tensão de entrada e saída. Segundo Padmanabhan[6], a manifestação do efeito piezoelétrico é direcionalmente dependente, ocorrendo apenas em eixos específicos de tensão aplicada e de resposta (saída). Geralmente, os cristais são cortados em fatias em orientações particulares e empregados como sensores. As convenções para identificar os eixos e direções de corte são bem definidas e estabelecidas e podem ser verificadas em Terman[71]. Na Tabela 5.7 são apresentadas as características de alguns materiais piezoelétricos que podem ser utilizados como sensor de pressão.

Tabela 5.7: Propriedades de materiais piezoelétricos[6].

Material	Corte cristalino ⁽¹⁾	Propriedades			
		ϵ_r	K_p (C N^{-1})	ρ (kg m^{-3})	$Y^{(2)}$ (N m^{-2})
Quartzo	0°x-TE	4,5	$2,3 \times 10^{-12}$	2,65	$80,0 \times 10^6$
	0°x-LE	4,5	$2,3 \times 10^{-12}$		
Turmalina	0°z-TE	6,6	$1,9 \times 10^{-12}$	3,10	$160,0 \times 10^6$
	0°z-VE	6,6	$2,4 \times 10^{-12}$		
Sal de Rochelle	0°x-FS	350,0	$550,0 \times 10^{-12}$	1,77	–
	45°x-LE	350,0	$275,0 \times 10^{-12}$		$19,3 \times 10^6$
	0°y-FS	9,4	$54,0 \times 10^{-12}$		–
	45°y-LE	9,4	$27,0 \times 10^{-12}$		$10,7 \times 10^6$
Dihidrogenofosfato de Amônio (ADP)	0°z-FS	15,3	$48,0 \times 10^{-12}$	1,80	–
	45°z-LE	15,3	$24,0 \times 10^{-12}$		$19,3 \times 10^6$
Sulfato de Lítio	0°y-TE	10,3	$16,0 \times 10^{-12}$	2,06	$46,0 \times 10^6$
	0°y-VE	10,3	$13,5 \times 10^{-12}$		–

Notas: (1) Descrevem as diferentes orientações de corte cristalino e as direções específicas de tensão aplicada e saída em cristais piezoelétricos. Exemplos: 0°x-TE: nesta configuração, o cristal é cortado de forma que a direção do eixo x está alinhada com a direção da tensão, onde a tensão é aplicada perpendicularmente à direção do corte. Isso implica que a direção de saída também está ao longo do eixo x; 45°x-LE: nesta configuração, a tensão elétrica é aplicada em um ângulo de 45 graus em relação ao eixo x, enquanto a saída é ao longo do eixo x. TE–Transverse Electric. LE–Longitudinal Electric. VE–Vertical Electric. FS–Flexural Shear[71].
(2) O parâmetro Y (módulo de Young), também conhecido como módulo de elasticidade, é uma medida da rigidez ou da capacidade de um material cristalino para se deformar elasticamente sob tensão. Em termos simples, o módulo de Young indica a resistência de um material à deformação elástica quando submetido a uma força externa. Cristais com módulos de Young mais altos são mais rígidos e menos propensos a se deformar sob uma carga dada, enquanto cristais com módulos de Young mais baixos são mais flexíveis e deformam-se mais facilmente[72].

EXEMPLO 5.6: Um cristal de quartzo com corte cristalino 0°x-TE gerou uma tensão de 1,17 V ao sofrer uma deformação de 0,1 mm. Determine a pressão aplicada ao cristal durante esse processo.

A pressão aplicada ao cristal pode ser calculada utilizando a Eq. 5.17. Os valores da constante dielétrica e da sensibilidade do cristal são encontrados na Tabela 5.7.

$$P = \frac{(1,17 \text{ V}) \left(8,85 \times \frac{10^{-12} \text{ F}}{\text{m}} \right) (4,5)}{\left(2,3 \times 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}} \right) (0,0001 \text{ m})} = 2,026 \times 10^5 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) = 202,6 \text{ kPa} \quad \blacksquare$$

Transdutor piezoresistivo ou extensômetro

Os **transdutores** piezoresistivos, também conhecidos como extensômetros, são amplamente utilizados para medição de pressão. Segundo Bega et al.^[9] esses sensores operam com base na variação da resistência em resposta à deformação elástica causada pela pressão aplicada, fenômeno conhecido como efeito piezoresistivo. Eles são comumente compostos por *strain gauges* que formam uma ponte de Wheatstone, onde uma força mecânica equilibra a queda de pressão na ponte (Figura 5.13).

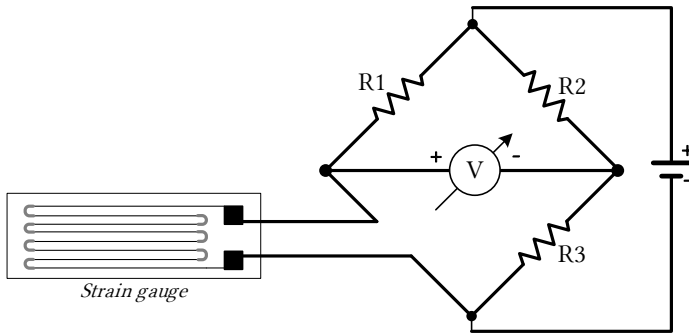


Figura 5.13: Transdutor piezoresistivo ou extensômetros (adaptado de [49]).

Os extensômetros têm a capacidade de identificar deformações nos diafragmas causadas pela pressão exercida. A sensibilidade do extensômetro é expressa pelo fator de medição, que representa a variação fracionária na resistência por unidade de deformação. Os transdutores piezoresistivos mais comuns incluem *strain gauges* metálicos e de silício^[73]. A variação relativa na resistência elétrica é dada pela Eq. 5.18^[66].

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{G_f F}{AE} \quad (\text{Eq. 5.18})$$

Onde: $\Delta R/R$ – variação relativa na resistência elétrica; G_f – fator de sensibilidade piezoresistivo ou fator gauge (–); $F=PA$ – força aplicada (N); A – área da seção transversal do material (m^2); E – módulo de elasticidade do material, ou módulo de Young (Pa).

De acordo com Webster^[73], *strain gauges* metálicos possuem um fator de gauge de aproximadamente 2. Já os *strain gauges* de silício policristalino apresentam um fator de gauge entre 10 e 35, enquanto os *strain gauges* de silício monocristalino possuem um fator de gauge variando de 50 a 150.

Capítulo 6

Medição de vazão

A medição de vazão é fundamental para garantir a eficiência, o controle e a conformidade em processos industriais que envolvem líquidos, gases e sólidos. Este capítulo aborda os conceitos essenciais de vazão volumétrica e mássica, analisando a influência de propriedades físicas como densidade, viscosidade e número de Reynolds. São detalhados os princípios de funcionamento, equacionamento e aplicações de uma ampla gama de medidores, incluindo dispositivos de pressão diferencial (placa de orifício, Venturi, Pitot), área variável, deslocamento positivo, turbina, eletromagnéticos, ultrassônicos, Coriolis, Vórtex, térmicos e calhas Parshall. Ao final, o leitor será capaz de compreender os fundamentos físicos da medição de fluxo, distinguir as características operacionais das diferentes tecnologias e aplicar cálculos teóricos e práticos para determinar a vazão em diversos cenários industriais.

A medição precisa de fluxos de líquidos, gases, vapores e sólidos é essencial para o atendimento aos requisitos contábeis e para a eficiência dos processos. A prática de medir vazão remonta a Heron de Alexandria (150 a.C.), que desenvolveu um sistema de sifões para regular o fluxo de água. Os romanos aprimoraram essa tecnologia com sistemas de abastecimento urbano, utilizando vertedores e tubos de terracota. Mais tarde, Leonardo da Vinci (1452-1519) formalizou o princípio da continuidade, relacionando a área do conduto à velocidade do fluido, conceito posteriormente refinado por Benedetto Castelli. As bases matemáticas dos medidores modernos foram estabelecidas por Newton, Bernoulli e Euler. No século XIX, os conceitos de continuidade, energia e momento possibilitaram os cálculos de perdas de pressão e de coeficientes hidráulicos, fundamentais para o projeto de medidores de vazão. A necessidade de quantificar e controlar o fluxo de fluidos impulsionou avanços tecnológicos, tornando esses dispositivos indispensáveis em diversas indústrias. Hoje, a medição de vazão é um campo consolidado, e compreender suas diversas tecnologias exige o conhecimento dos princípios fundamentais que regem seu funcionamento.

6.1 Conceitos básicos

A vazão pode ser definida como a quantidade de fluido (seja em volume, massa ou peso) que atravessa uma determinada área em um determinado tempo. Em outras palavras, é a medida da velocidade com que um fluido escoar por um duto. A medição pode ser de vazão volumétrica, Q (volume por tempo), ou de vazão mássica, Q_m (massa por tempo). As vazões podem ser calculadas pelas Eqs. 6.1 e 6.2.

$$Q = vA \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Onde: Q – vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ou $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$ ou $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); v – velocidade (m h^{-1} ou m min^{-1} ou m s^{-1}); A – área da seção transversal do duto (m^2)

$$Q_m = \rho Q \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Onde: Q_m – vazão mássica (kg h^{-1} ou kg min^{-1} ou kg s^{-1}); Q – vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ou $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$ ou $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}).

Na medição da vazão volumétrica, a pressão e a temperatura desempenham um papel crucial, principalmente quando se trata de gases e vapores. Isso ocorre porque o volume de um gás é diretamente influenciado por essas variáveis. Portanto, é essencial estabelecer as condições de pressão e temperatura de referência para garantir a precisão das medições.

Segundo Bega et al.^[9], a medição precisa da vazão exige um profundo conhecimento das propriedades dos fluidos, como a **massa específica**, a **viscosidade absoluta** e **cinemática**. Essas propriedades, que variam com a temperatura e a pressão, especialmente em gases e

vapores, influenciam diretamente o comportamento do fluido durante o escoamento e, conseqüentemente, a escolha do equipamento de medição e a precisão dos resultados obtidos. Por exemplo, a viscosidade de um fluido afeta a perda de carga em um sistema de tubulação, enquanto a massa específica influencia a força de impacto do fluido sobre os elementos de medição.

A **massa específica** de um fluido, definida pelas equações 6.3 (para líquidos) e 6.4 (para gases), representa a quantidade de massa por unidade de volume^[3,9,63].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

$$\rho = \frac{PM}{RTZ} \quad (\text{Eq. 6.4})$$

Onde: ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); m – massa do fluido (kg); V – volume ocupado pelo fluido (m^3); P – pressão do gás (Pa); M – massa molar do gás (kg kmol^{-1}); R – constantes dos gases ($\text{kJ kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$); T – temperatura do gás (K); Z – fator de compressibilidade (–).

A **viscosidade** pode ser entendida como a dificuldade que um fluido apresenta para que suas partículas se movimentem em resposta a uma força aplicada. Esse conceito está diretamente relacionado ao modo como o fluido escoar. Para os líquidos, a **viscosidade absoluta** é determinada com base no experimento de Newton, no qual o fluido ocupa o espaço entre duas placas paralelas, e é expressa na Eq. 6.5, já a **viscosidade cinemática**, que é a razão entre a viscosidade absoluta e a massa específica do fluido, é definida pela Eq. 6.6^[74,75].

$$\mu = \frac{Fx}{VA} \quad (\text{Eq. 6.5})$$

Onde: μ – viscosidade absoluta (Pa s); F – força aplicada (N); x – espaço entre as placas (m); V – velocidade (m s^{-1}); A – área da superfície da placa (m^2).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{Eq. 6.6})$$

Onde: ν – viscosidade cinemática ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); μ – viscosidade absoluta (Pa s); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}).

Para estimar a viscosidade absoluta de um gás puro em diversas temperaturas, a correlação de Sutherland (Eq. 6.7) oferece um modelo empírico, utilizando a viscosidade a 0°C como ponto de partida. Quando se trata de misturas gasosas, a correlação de Herning-Zipperer (Eq. 6.8) permite prever a viscosidade de uma mistura gasosa com base nas viscosidades de seus componentes individuais^[9,74].

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,5} \left[\frac{T_0 + C_n}{T + C_n} \right] \quad (\text{Eq. 6.7})$$

Onde: μ – viscosidade absoluta do gás na temperatura T (Pa s); μ_0 – viscosidade absoluta na temperatura de referência T_0 (Pa s); T – temperatura do gás (K); T_0 – temperatura de referência (K); C_n – constante de Sutherland (K).

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_i M_i^{0,5}}{\sum_{i=1}^n y_i M_i^{0,5}} \quad (\text{Eq. 6.8})$$

Onde: μ_{mix} – viscosidade da mistura gasosa (Pa s); y_i – fração molar do componente i ; μ_i – viscosidade do componente i na mistura (Pa s); M_i – massa molar do componente i (kg mol^{-1}).

Além das propriedades mencionadas anteriormente, é essencial compreender o tipo de escoamento e a distribuição de velocidade dentro dos dutos ao medir a vazão. O escoamento pode ser classificado como laminar ou turbulento. No regime laminar, o fluido se movimenta em camadas paralelas, sem troca de partículas entre elas, mantendo uma velocidade uniforme e sendo influenciado principalmente pela geometria do duto. Já no regime turbulento, o movimento das partículas ocorre de forma caótica, com trajetórias indefinidas e variações tanto na velocidade quanto na pressão. O regime de escoamento pode ser identificado calculando a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido. Essa relação é conhecida como **número de Reynolds** e é expressa pela Eq. 6.9^[74,75].

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (\text{Eq. 6.9})$$

Onde: Re – número de Reynolds (–); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); V – velocidade média do escoamento (m s^{-1}); D – diâmetro do duto (m); μ – viscosidade absoluta (Pa s); ν – viscosidade cinemática ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Este número, aplicável a qualquer tipo de fluido, permite classificar o escoamento em

três faixas: laminar, para $Re < 2000$; transição, para $2000 \leq Re \leq 4000$; e turbulento, quando $Re > 4000$.

6.2 Classificação dos medidores de vazão

Os medidores de vazão podem ser classificados de diversas maneiras, sendo as mais comuns por tipo e por princípio de medição. Quanto aos tipos, destacam-se os **medidores diretos**, que realizam a medição da vazão com base em fenômenos diretamente relacionados ao volume de fluido que passa pelo dispositivo, e os **medidores indiretos**, que determinam a vazão de forma indireta, a partir de variáveis intermediárias, como pressão, velocidade ou força, utilizando modelos matemáticos para realizar os cálculos. Já os **medidores especiais** empregam tecnologias mais avançadas e teorias complexas, muitas vezes fundamentadas em princípios modernos da física ou da engenharia [9,63].

Os medidores também podem ser classificados conforme os princípios de funcionamento que utilizam. Entre eles, destaca-se a **medição por perda de carga variável**, que se baseia na diferença de pressão gerada, e a **medição por área variável**, em que a posição de um elemento dentro de um duto varia de acordo com a vazão. Outro princípio é a **medição por deslocamento positivo**, na qual o volume de fluido é diretamente deslocado por mecanismos rotativos ou alternativos. Além disso, há os dispositivos que operam com base na velocidade ou no impacto do fluido, que associam a velocidade do fluido à vazão [9,63].

Na Tabela 6.1 é apresentada uma classificação abrangente dos principais medidores de vazão, considerando tanto os tipos quanto os princípios de medição empregados.

Tabela 6.1: Classificação dos principais medidores de vazão [9,63].

Tipo	Princípio	Medidor	Compatibilidade
Medidores diretos	Perda de carga variável (área constante)	Tubo Pitot	T
		Tubo de venturi	T
		Tubo de Dall	T
		Placa de Orifício	T
	Área variável (perda de carga constante)	Rotâmetro	Λ
Medidores indiretos	Deslocamento positivo do fluido	Disco Nutante	L
		Pistão Flutuante	L
		Rodas Ovais	L
		Roots	L
	Velocidade pelo impacto do fluido	Tipo Hélice	L
		Tipo turbina	L
Especiais		Eletromagnético	LC
		Vórtex	T
		Ultrassônico	T
		Calhas Parshall	L
		Coriolis	Λ

Notas T – líquidos, gases e vapor; L – exclusivamente para medição de líquidos; LC – exclusivamente para medição de líquidos condutores de corrente elétrica; Λ – não é utilizado para medição de vapores, salvo exceções.

6.2.1 Medição por perda de carga variável

Este princípio, um dos mais antigos, baseia-se no fato de que a matéria só se desloca em uma direção específica quando existe uma força motriz, ou seja, um potencial que varia ao longo dos diferentes pontos do fluxo. Em muitos casos, esse potencial é a pressão, que diminui gradualmente do valor mais alto para o mais baixo, de forma distribuída uniformemente ao longo de toda a extensão do fluxo (Figura 6.1). No entanto, é possível inserir elementos locais de queda de pressão no caminho do fluxo, utilizando restrições que criam uma diferença de pressão antes e depois do elemento. Esta pressão diferencial é uma função da velocidade do fluxo e da massa específica do fluido e pode ser obtida a partir da Equação de Bernoulli (Eq. 6.10) [9,24,62,67,76,77].

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 \quad (\text{Eq. 6.10})$$

Onde: P_1 – pressão na seção 1 do duto (Pa); v_1 – velocidade na seção 1 do duto (m s^{-1}); h_1 – altura do ponto 1 em relação à referência (m); P_2 – pressão na seção 2 do duto (Pa); v_2 – velocidade na seção 2 do duto (m s^{-1}); h_2 – altura do ponto 2 em relação à referência (m); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}).

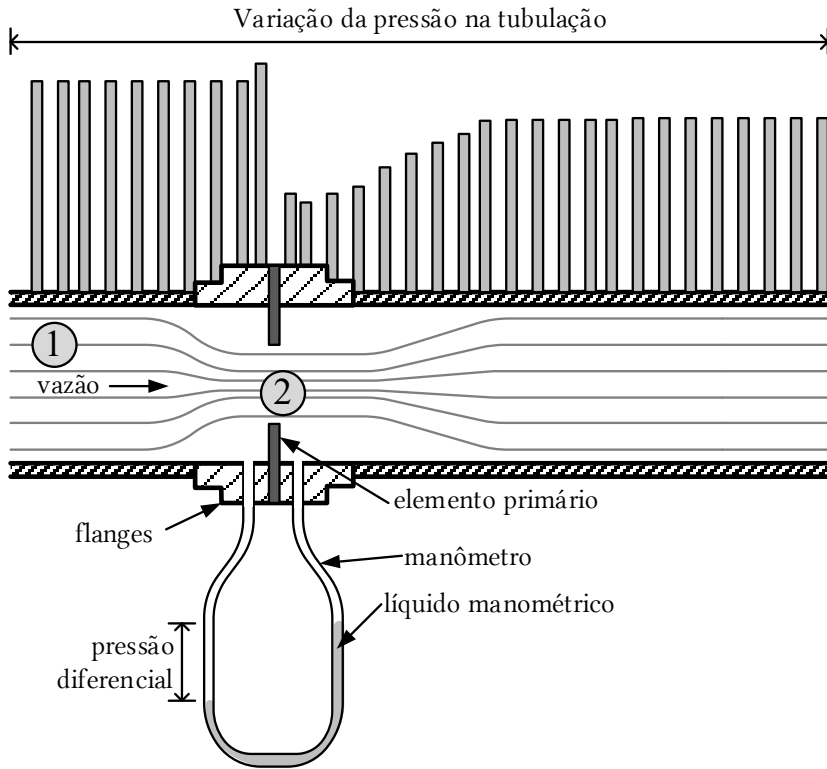


Figura 6.1: Medição de pressão por perda de carga variável (adaptado de [42]).

Considerando que $h_1 \approx h_2$, a Equação de Bernoulli (Eq. 6.10) pode ser reduzida para:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (\text{Eq. 6.11})$$

Aplicando a lei da conservação de massa no duto e levando em consideração a massa específica constante, obtemos a relação de velocidade e área nas duas seções do duto (Eq. 6.12).

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (\text{Eq. 6.12})$$

One: v_1 – velocidade do fluido na seção 1 do duto (m s^{-1}); A_1 – área da seção transversal do duto na seção 1 (m^2); v_2 – velocidade do fluido na seção 2 do duto (m s^{-1}); A_2 – área da seção transversal do duto na seção 2 (m^2).

Resolvendo a Eq. 6.12 em relação a v_1 e substituindo na Eq. 6.11, obtemos:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]}} \quad (\text{Eq. 6.13})$$

Onde: d – diâmetro da seção 2 (m); D – diâmetro da seção 1 (m).

Assim, considerando $\beta = d/D$, a vazão medida por um elemento ideal, por meio de queda de pressão variável, pode ser expressa por:

$$Q = A_2 v_2 = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]}} = \frac{A_2}{\sqrt{(1 - \beta^4)}} \sqrt{(2/\rho)(P_1 - P_2)} \quad (\text{Eq. 6.14})$$

6.2.2 Medição por área variável

O princípio de medição discutido anteriormente depende de uma restrição no fluxo que gera uma variação de pressão proporcional à taxa de fluxo. Porém, existe uma categoria de dispositivos de pressão diferencial que opera mantendo uma pressão diferencial nominalmente constante, permitindo que a área efetiva aumente conforme o fluxo aumenta, ou seja, possuem área variável. Os medidores de área variável são amplamente aplicados em medições de pequenas taxas de fluxo, em instalações de purga e nas indústrias em geral, sendo encontrados em versões com tubos de vidro ou de metal. Sua operação baseia-se na variação da área de passagem, a qual é controlada pelo movimento de um flutuador, de um pistão ou

de uma válvula em resposta ao fluxo, conforme apresentado na Figura 6.2. Embora simples e versáteis, apresentam limitações, como tamanhos reduzidos e baixa precisão nos modelos de vidro. Os modelos metálicos oferecem maior resistência, podem ser equipados com transmissores e suportam altas pressões^[3,6,9,24,42,62,73].

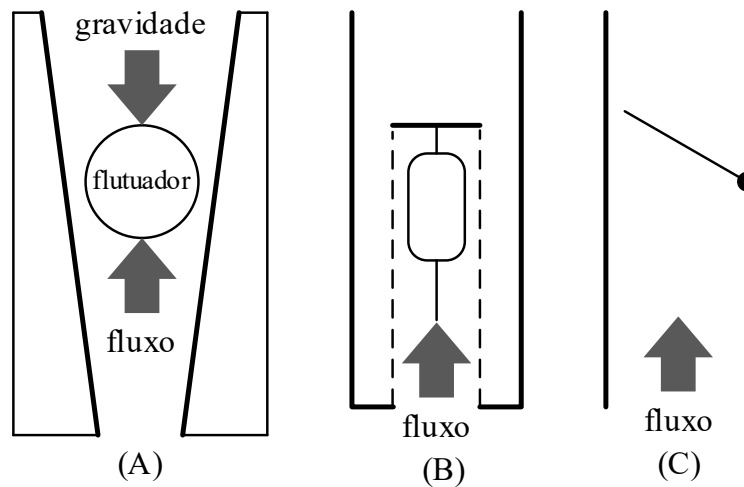


Figura 6.2: Medidores de vazão pelo princípio de área variável: A) com flutuador; B) com pistão e; C) com válvula (adaptado de [63]).

6.2.3 Medidores de deslocamento positivo

Os medidores de deslocamento positivo (PD) são dispositivos usados para medir diretamente o volume total de fluido que passa por eles. Operam capturando volumes fixos de fluido em câmaras internas, que são preenchidas e esvaziadas ciclicamente, permitindo alta precisão e repetibilidade. São amplamente utilizados em aplicações que exigem medições precisas, como formulação de receitas, contabilização de vendas e distribuição de *commodities* como água, gás e combustíveis. Esses medidores são ideais para líquidos de alta viscosidade e não são influenciados por fluxos pulsantes, mas exigem fluidos limpos devido à sua sensibilidade a partículas abrasivas. Apesar de volumosos e de custo elevado, seu *design* permite medições confiáveis, especialmente em sistemas de automação. A precisão pode ser afetada por fatores como folgas internas, viscosidade e torque, mas avanços eletrônicos têm minimizado essas limitações, permitindo monitoramento remoto e correções para variações de temperatura e pressão^[3,6,9,24,42,62,67,73].

6.3 Tipos de medidores de vazão

6.3.1 Placa de orifício

Uma placa de orifício (Figura 6.3) é um medidor de fluxo diferencial simples e econômico, composta por uma placa fina de aço com um orifício que pode ser concêntrico, excêntrico ou segmentado, de dimensões conhecidas. Geralmente instalada entre flanges em uma tubulação, essa placa gera uma queda de pressão ao acelerar o fluido através do orifício^[9,62,73].

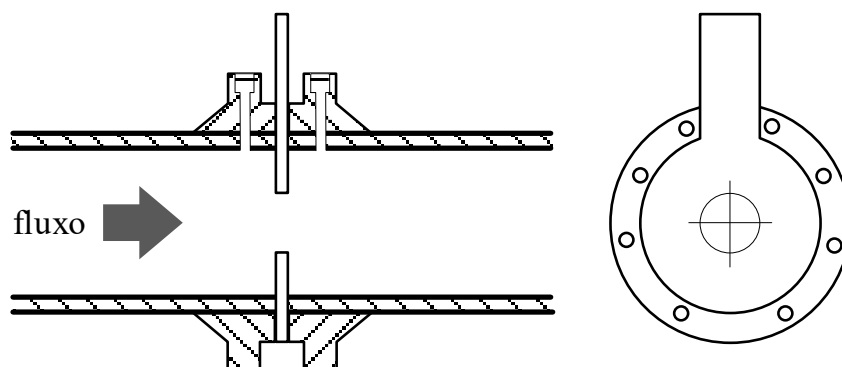


Figura 6.3: Representação simplificada de uma placa de orifício e seu posicionamento na tubulação.

O orifício de uma placa pode ser projetado nos formatos concêntrico, excêntrico ou segmentado (Figura 6.4), de acordo com as características do fluido e as condições de operação. O **orifício concêntrico** é ideal para líquidos, gases e vapores livres de sólidos em suspensão. A face de entrada deve ser cuidadosamente polida, com um ângulo de 90° na borda de entrada, apresentando aresta viva e isenta de rebarbas ou imperfeições. O **orifício excêntrico** é recomendado para fluidos que contêm sólidos em suspensão, especialmente em tubulações horizontais. Esse design evita o acúmulo de partículas na base da placa, problema comum em placas de orifício concêntricas, garantindo um fluxo mais eficiente. Já o **orifício segmentado** é adequado para fluidos em regime laminar e com alta concentração de sólidos em suspensão. Esse formato facilita a passagem do fluido e reduz a possibilidade de bloqueios, tornando-o eficaz em aplicações específicas. Esses diferentes formatos de orifícios permitem uma melhor adaptação às necessidades do processo, maximizando a eficiência e a confiabilidade da medição de fluxo^[9.63,77].

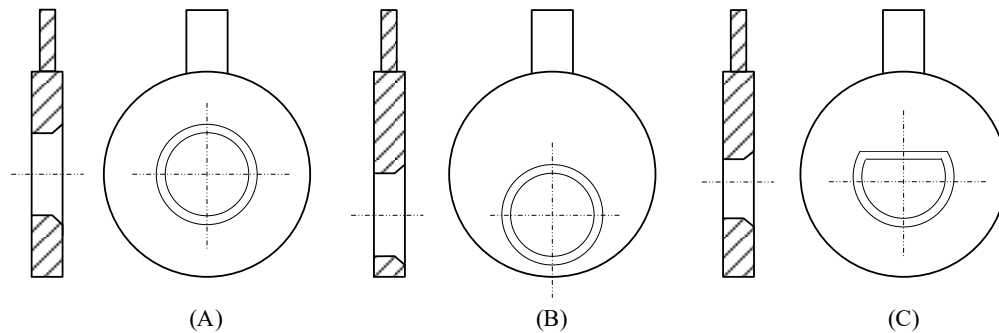


Figura 6.4: Tipos de orifícios da placa: A) concêntrico; B) excêntrico e; C) segmentado

Uma variável crucial nas placas de orifício é o tipo de borda do orifício, que pode assumir diferentes configurações, incluindo quadrada, arredondada, chanfrada e quadrada com rebaixo na face jusante, conforme apresentado na Figura 6.5. Cada uma dessas bordas é projetada para aplicações específicas e permite atender a requisitos específicos de medição, garantindo maior precisão e eficiência no monitoramento do fluxo de diversos tipos de fluido^[9.62,63,73].

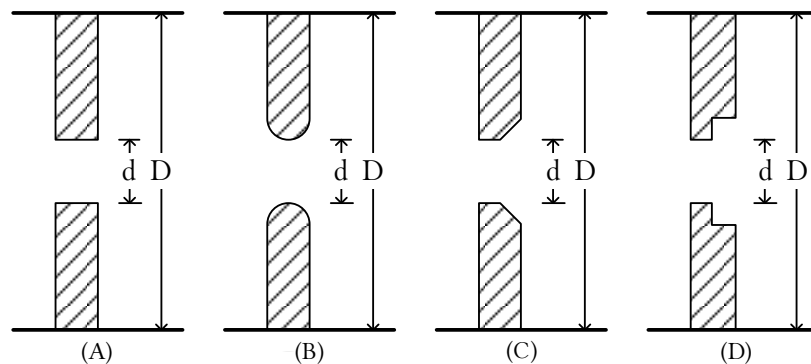


Figura 6.5: Configurações mais usuais das bordas dos orifícios

Borda Quadrada: Apresenta um ângulo de 90° em relação a ambas as faces da placa. É comumente empregada em tubulações com diâmetro superior a 6 in (152,4 mm). No entanto, não é recomendada para medições de vazão em fluidos com baixo número de Reynolds devido à sensibilidade ao regime de escoamento. **Borda Arredondada:** Ideal para fluidos altamente viscosos, nos quais o número de Reynolds é geralmente em torno de 300. Esse formato reduz o impacto da viscosidade no desempenho da medição. **Borda Chanfrada:** De uso geral, possui um chanfro na face jusante com o objetivo de minimizar a turbulência gerada pela passagem do fluido. O ângulo do chanfro pode variar entre 30° e 45° , dependendo das condições operacionais e do tipo de fluido. **Borda Quadrada com Rebaixo na Face Jusante:** Aplicada em situações que demandam alta precisão, especialmente em tubulações menores que 4 in (101,6 mm). Essa configuração é projetada para melhorar a exatidão da medição em diâmetros reduzidos.

O fluxo volumétrico é calculado a partir dessa diferença de pressão (Eq. 6.14), corrigida por fatores empíricos, como o coeficiente de descarga (C_d) e o fator de expansibilidade (ε), que levam em conta características como o número de Reynolds e a compressibilidade do fluido. Modificações no *design*, como orifícios segmentados ou excêntricos, são usadas para lidar com condições adversas, como fluidos viscosos, sólidos em suspensão, condensados ou gases não dissolvidos [9,62,73].

O coeficiente de descarga (C_d) é a relação entre a vazão real e a vazão teórica (ideal) que passa pelo duto $C_d = \frac{Q_{real}}{Q_{teórica}}$. Podemos calcular a vazão teórica tendo conhecimento das dimensões exatas do elemento, da massa específica do fluido e da diferença de pressão gerada pela restrição; a vazão real pode ser obtida pela medida do tempo necessário para o preenchimento de um determinado volume. Assim, a medida da vazão por meio de uma placa de orifício pode ser expressa pela Eq. 6.15.

$$Q = \frac{C_d A_2 \varepsilon}{\sqrt{(1-\beta^4)}} \sqrt{(2/\rho)(P_1 - P_2)} \quad (\text{Eq. 6.15})$$

Onde: Q - vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); C_d - coeficiente de descarga (-); A_2 - área do orifício (m^2); ε - fator de expansibilidade (-); β - relação do diâmetro do orifício e o diâmetro da tubulação (-); P_1 - pressão na seção 1 (tubulação) (Pa); P_2 - pressão na seção 2 (orifício) (Pa); ρ - massa específica do fluido (kg m^{-3}).

O fator de expansibilidade, aplicado em medidas de fluidos gasosos e vapores, pode ser determinado pela Eq. 6.16 para tomadas de impulso tipo flange e tipo canto, e pela Eq. 6.17 para tomada de impulso tipo *vena contracta* [6,9,79].

$$\varepsilon = 1 - \left[(0,41 + 0,35\beta^4) \left(\frac{P_1 - P_2}{kP_1} \right) \right] \quad (\text{Eq. 6.16})$$

$$\varepsilon = 1 - \left[0,333 + 1,145(\beta^2 + 0,75\beta^5 + 12\beta^{13}) \left(\frac{P_1 - P_2}{kP_1} \right) \right] \quad (\text{Eq. 6.17})$$

$$\text{Sendo: } k = \frac{C_p}{C_v}.$$

Onde: ε - fator de expansibilidade (-); β - relação do diâmetro do orifício e o diâmetro da tubulação (-); k - expoente isentrópico (-); P_1 - pressão na seção 1 (tubulação) (Pa); P_2 - pressão na seção 2 (orifício) (Pa); C_p - calor específico à pressão constante ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$); C_v - calor específico à volume constante ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

O coeficiente de descarga pode ser obtido pela equação empírica de Reader-Harris/Gallaghan (Eq. 6.18) [78,79].

$$\begin{aligned} C_d = & 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,2160\beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + \\ & 0,0063A)\beta^{3,5} \max \left\{ \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3}; 22,7 - 4700 \left(\frac{Re_D}{10^6} \right) \right\} + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - \\ & 0,123e^{-7L_1})(1 - 0,11A) \frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0,031(M'_2 - 0,8M'^{1,1}_2) \left(1 + \right. \\ & \left. 8 \max \left\{ \log \left(\frac{3700}{Re_D} \right); 0,0 \right\} \right) \beta^{1,3} + 0,011(0,75 - \beta) \max \left\{ 2,8 - \frac{D}{25,4}; 0,0 \right\} \quad (\text{Eq. 6.18}) \end{aligned}$$

$$\text{Sendo: } A = \left(\frac{19000\beta}{Re_D} \right)^{0,8}, M'_2 = \frac{2L'_2}{1-\beta}, L_1 = \frac{\ell_1}{D} \text{ e } L'_2 = \frac{\ell'_2}{D} \text{ (Ver Figura 6.6).}$$

Onde: C_d - coeficiente de descarga (-); β - relação do diâmetro do orifício e o diâmetro da tubulação (-); Re_D - número de Reynolds relativo ao diâmetro D (-); L_1 - quociente da distância da tomada de impulso a montante da face a montante da placa e o diâmetro da tubulação (-); L'_2 - quociente da distância da tomada de impulso a jusante da face a jusante da placa e o diâmetro da tubulação (L'_2 denota a referência do espaçamento a jusante a partir da face a jusante, enquanto L_2 denotaria a referência do espaçamento a jusante a partir da face a montante), D - diâmetro da tubulação (mm).

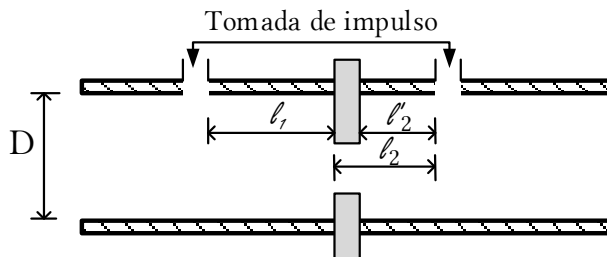


Figura 6.6: Espaços a montante e a jusante da tomada de impulso utilizados na Eq. 6.18.

A localização da tomada de pressão (ou de impulso) em placas de orifício é fundamental, pois afeta não apenas o cálculo do coeficiente de descarga (C_d), mas também a precisão, a confiabilidade e a consistência das medições de vazão. Existem vários padrões para a localização das tomadas de pressão em placas de orifício. Idealmente, a tomada de pressão a montante deve medir a pressão do fluido em um ponto de velocidade mínima, enquanto a tomada a jusante deve captar a pressão na *vena contracta* (ponto de velocidade máxima). Na prática, esse ideal nunca é totalmente alcançado. Independentemente da localização das tomadas, é essencial que os furos estejam completamente alinhados e nivelados com a parede interna da tubulação ou do flange. Mesmo a menor reentrância ou rebarba deixada durante a perfuração pode causar erros de medição. A seguir, é apresentada uma visão geral das localizações mais comuns para tomadas de pressão em placas de orifício^[9,49].

Tomadas de flange: São as mais populares em medidores de placa de orifício. Flanges podem ser fabricados com os furos de tomada já perfurados e finalizados antes de serem soldados à tubulação, tornando essa configuração muito conveniente. Outras configurações geralmente exigem a perfuração da tubulação após a instalação, o que não apenas é trabalhoso, mas também pode enfraquecer a tubulação nos locais dos furos. As tomadas são feitas a uma distância de 1 in (25,4 mm) a montante e a jusante das faces da placa, conforme apresentado na Figura 6.7.

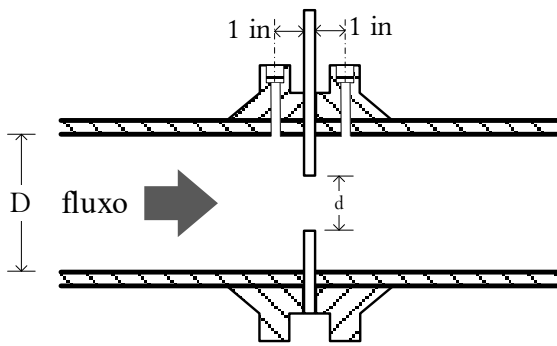


Figura 6.7: Tomada de flange

Tomadas de *vena contracta*: Oferecem a maior diferença de pressão para uma determinada taxa de fluxo, mas exigem cálculos precisos para posicionar corretamente a tomada de pressão a jusante. Este tipo de tomada é recomendado para tubulações com diâmetros superiores a 4 in (101,6 mm). A tomada de alta pressão deve estar entre $D/2$ e $2D$ a montante da placa, enquanto a tomada de baixa pressão deve ser posicionada no ponto de menor pressão, a *vena contracta*. Para relações d/D menores que 0,72, a tomada de baixa pressão pode ser colocada a $D/2$ a jusante da placa com erro desprezível. A distância até a *vena contracta* (D_v) varia conforme o valor de β , que determina a localização exata desse ponto (Figura 6.8). Em tubulações com diâmetro inferior a 6 in (152,4 mm), a tomada de baixa pressão é feita no flange, o que pode ser menos conveniente. Uma característica desfavorável dessas tomadas é a necessidade de perfurar a parede da tubulação, o que pode enfraquecê-la.

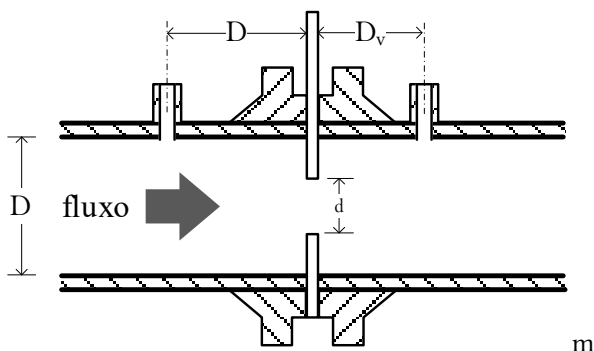


Figura 6.8: Tomada de vena contracta

Tomadas de Canto: Devem ser utilizadas em tubulações de pequeno diâmetro, abaixo de 2 in (50,8 mm), onde a *vena contracta* está muito próxima da face a jusante da placa de

orifício, tornando inviável o uso de tomadas de flange, pois essas captariam pressão em uma região altamente turbulenta (muito distante da *vena contracta*). As tomadas de canto exigem flanges especiais (e caros), sendo usadas apenas quando absolutamente necessário (Figura 6.9).

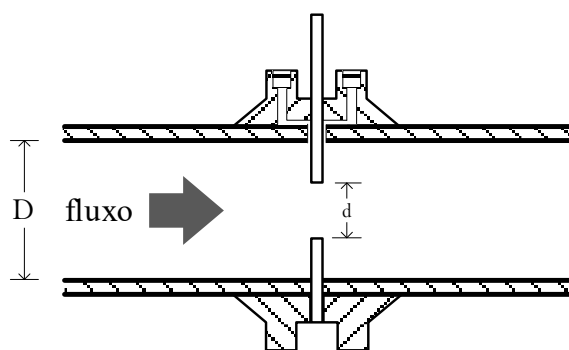


Figura 6.9: Tomada de canto

Tomadas de Tubulação (ou tomadas de fluxo completo): São posicionadas a $2,5D$ de tubulação a montante e $8D$ de tubulação a jusante da placa de orifício para evitar medir a pressão em uma região altamente turbulenta após a *vena contracta*, permitindo que o fluxo se estabilize e forneça leituras de pressão mais consistentes. Apesar de serem mais adequadas para o cálculo de orifícios de restrição, também podem ser aplicadas na medição de vazão (Figura 6.10).

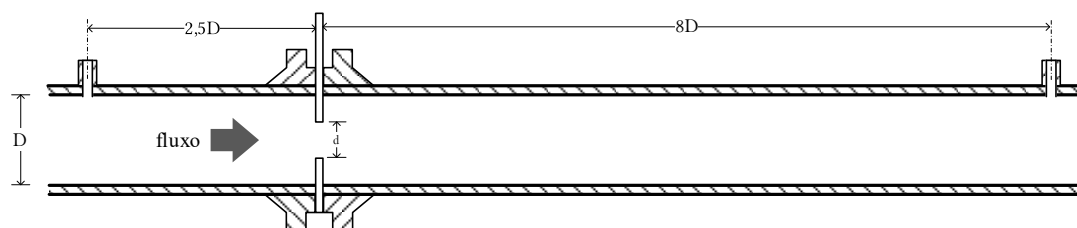


Figura 6.10: Tomada de tubulação

EXEMPLO 6.1: Uma placa de orifício com tomada de pressão tipo flange é instalada em uma tubulação de 100 mm de diâmetro interno para medir a vazão de água a 20 °C. O diâmetro do orifício é de 50 mm, e a diferença de pressão medida entre as seções antes e depois da restrição é de 8 kPa. Sabendo que a massa específica da água a 20 °C é de 998 kg m⁻³, determine a vazão volumétrica medida pelo sensor.

Para um sensor de placa de orifício, a vazão volumétrica é determinada pela Eq. 6.15. Para o cálculo, é necessário obter o coeficiente de descarga (C_d), a área do orifício (A_2), o fator de expansibilidade (ϵ), a relação entre o diâmetro da tubulação e o diâmetro do orifício (β) e a diferença de pressão (ΔP) entre as tomadas de pressão antes e depois da placa.

O coeficiente de descarga pode ser determinado pela Eq. 6.18; porém, para isso, são necessárias informações específicas, como o número de Reynolds relativo ao diâmetro da tubulação (D). Na ausência desses dados, adotaremos um valor aproximado de 0,61, conforme indicado na Tabela A.5 da ISO 5167-2^[78].

$$\text{A área do orifício é: } A_2 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(0,05 \text{ m})^2}{4} = 0,02 \text{ m}^2$$

Para uma tomada de impulso do tipo flange, o fator de expansibilidade é calculado pela Eq. 6.16. No entanto, como se trata da medição de vazão de líquidos, assume-se $\epsilon=1$, pois a compressibilidade do fluido pode ser desprezada.

$$\text{A relação entre os diâmetros } D \text{ e } d \text{ será: } \beta = \frac{d}{D} = \frac{50 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 0,5.$$

Portanto, a vazão volumétrica será:

$$Q = \frac{(0,61)(0,02 \text{ m}^2)(1)}{\sqrt{1 - 0,5^4}} \sqrt{\frac{2}{\left(998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}} 8000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}\right)$$

$$Q = 0,0049 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 17,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \blacksquare$$

EXEMPLO 6.2: Um sistema industrial utiliza uma placa de orifício com tomada de impulso tipo *vena contracta* para medir a vazão de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) a 20 °C em uma tubulação de 100 mm de diâmetro interno. Sabendo que o diâmetro do orifício é de 50 mm; a massa específica do GLP a 20 °C e 300 kPa é de 2,25 kg m⁻³; os calores específicos à pressão constante e a volume constante são, respectivamente, 1,65 kJ kg⁻¹ °C⁻¹ e 1,46 kJ kg⁻¹ °C⁻¹; a pressão antes do orifício é de 300 kPa e a pressão depois do orifício é de 288 kPa, determine a vazão volumétrica medida pelo sensor.

O coeficiente de descarga pode ser determinado pela Eq. 6.18; porém, para isso, são necessárias informações específicas, como o número de Reynolds relativo ao diâmetro da tubulação (D). Assim como no Exemplo 6.1, adotaremos um valor aproximado de 0,61, conforme indicado na Tabela A.5 da ISO 5167-2. [78].

$$\text{A área do orifício é: } A_2 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(0,05 \text{ m})^2}{4} = 0,02 \text{ m}^2.$$

$$\text{A relação entre os diâmetros D e d será: } \beta = \frac{d}{D} = \frac{50 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 0,5.$$

$$\text{O expoente isentrópico é: } k = \frac{1,65 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}\right)}{1,46 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}\right)} = 1,13.$$

Para uma tomada de impulso do tipo *vena contracta*, o fator de expansibilidade é calculado pela Eq. 6.17, logo, $\varepsilon = 0,6559$.

Assim, a vazão volumétrica será:

$$Q = \frac{(0,61)(0,02 \text{ m}^2)(0,6559)}{\sqrt{1 - (0,5)^4}} \sqrt{\frac{2}{\left(2,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}} 12 \times 10^3 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}\right)$$

$$Q = 0,004 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 14,32 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \blacksquare$$

6.3.2 Tubo de pitot

O tubo de Pitot, representado pela Figura 6.11, é um dispositivo utilizado para medir a velocidade de um fluido com base na diferença de pressão entre dois pontos: a pressão dinâmica (ou de impacto), onde o fluido é desacelerado até parar, e a pressão estática, medida no fluxo livre. Esse diferencial de pressão reflete a conversão da energia cinética em energia de potencial, permitindo calcular a velocidade do fluido pela equação de Bernoulli (Eq. 6.10). Considerando que $h_1 \cong h_2$ e que a velocidade na entrada do tubo seja nula ($v_2 = 0$), a Eq. 6.10 pode ser reduzida à Eq. 6.18, calculando assim a velocidade no ponto 1, e a vazão pode ser expressa pela Eq. 6.19 [6,42,69,77].

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}} \quad (\text{Eq. 6.18})$$

$$Q = A_1 \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}} \quad (\text{Eq. 6.19})$$

Onde: v_1 – é a velocidade do fluxo livre (m s⁻¹); P_1 – pressão estática (Pa); P_2 – pressão dinâmica (Pa); ρ – massa específica (kg m⁻³); Q – vazão volumétrica (m³ s⁻¹); A_1 – área da seção transversal da tubulação (m²).

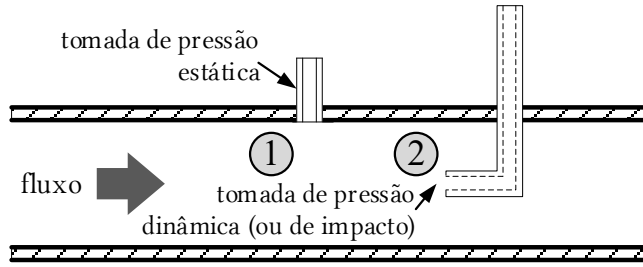


Figura 6.11: Representação do princípio de funcionamento do tubo de Pitot.

Por ser um dispositivo que necessita ser inserido diretamente no fluxo de um fluido (intrusivo), nem todo o fluxo é completamente desacelerado e uma parte é desviada ao redor do tubo. Para compensar essa limitação, é aplicado um coeficiente de correção (C) na Eq. 6.19, além de um fator de correção de compressibilidade ($1-\varepsilon$), resultando na expressão da vazão conforme a Eq. 6.20^[80].

$$Q = C(1 - \varepsilon)A_1 \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}} \quad (\text{Eq. 6.20})$$

$$\text{Sendo: } 1 - \varepsilon = \left[1 - \frac{1}{2k} \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{k-1}{6k^2} \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ e } k = \frac{c_p}{c_v}$$

Onde: Q - vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); C - coeficiente de correção (-); ε - coeficiente de expansibilidade (-); A_1 - área da seção transversal da tubulação (m^2); ρ - massa específica (kg m^{-3}); k - expoente isentrópico (-); ΔP - variação da pressão (Pa); $(1-\varepsilon)$ - coeficiente de correção de compressibilidade (-).

O coeficiente de correção (C) é dependente da geometria da tubulação e pode ser encontrado em manuais, catálogos de fabricantes e normas como a ISO 3966^[80] e a ASME MFC-3M^[81]. Para elemento ideal, $C=1$, e o coeficiente de expansibilidade para líquidos é $\varepsilon=0$.

Esse dispositivo pode ser usado em medições pontuais de velocidade ou para estimativas aproximadas de vazão volumétrica. É amplamente empregado em laboratórios e medições temporárias, sendo ideal para obter perfis de velocidade em dutos e tubulações. Contudo, apresenta limitações em cenários com perfis de fluxo irregulares e requer manutenção para evitar entupimentos.

EXEMPLO 6.3: O tubo de Pitot é um dispositivo essencial em aeronaves, utilizado para medir a velocidade do ar em relação ao avião, conhecida como velocidade indicada (IAS - *Indicated Airspeed*). Ele funciona captando a pressão dinâmica do ar (pressão total) e comparando-a com a pressão estática (pressão do ar ambiente). A diferença entre essas pressões é usada para calcular a velocidade do avião. Um avião comercial, em altitude de cruzeiro, utiliza um tubo de Pitot para medir sua velocidade em relação ao ar. Durante o voo, o sensor registra uma pressão total (dinâmica) de 85 kPa e uma pressão estática (P_1) de 60 kPa. Sabendo que a densidade do ar a essa altitude é de $0,9 \text{ kg/m}^3$, determine a velocidade do avião em relação ao ar.

A determinação da velocidade com um tubo de Pitot é realizada utilizando a Eq. 6.18, onde P_2 representa a pressão dinâmica e P_1 corresponde à pressão estática do fluido. Assim:

$$v = \sqrt{\frac{2 \left(85 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} - 60 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)}{0,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 235,7 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 848 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

OBS: O tubo de Pitot mede a IAS, que precisa ser corrigida para que possa levar em conta fatores como a densidade do ar (que depende da altitude e da temperatura) e o vento relativo. Essas correções são conhecidas como *True Airspeed* (TAS) e *Ground Speed* (GS). ■

EXEMPLO 6.4: Uma indústria necessita medir a velocidade do ar a 20 °C em um duto de ventilação utilizando um tubo de Pitot. O equipamento registra uma pressão estática de 101,3 kPa e uma pressão total (dinâmica) de 101,8 kPa. Sabendo que o duto de ar possui um diâmetro de 250 mm, determine a vazão de ar no duto.

Para determinar a vazão utilizando um tubo de Pitot, é necessário aplicar a Eq. 6.20. O cálculo exige a obtenção dos seguintes parâmetros: massa específica do ar nas condições de processo (ρ), coeficiente de correção de compressibilidade ($1-\epsilon$), coeficiente de correção (C) e área da seção transversal da tubulação (A_1).

A massa específica é calculada utilizando a Eq. 6.4, considerando $Z=0,99963$ ^[9]:

$$\rho = \frac{(101,8 \times 10^3 \text{ Pa})(28,9 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})}{(8,314 \times 10^3 \frac{\text{m}^3 \text{Pa}}{\text{kmol K}})(293 \text{ K})(0,99963)} = 1,208 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

O expoente isentrópico a 20°C e 101,3 kPa é:

$$k = \frac{1,006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}}{0,717 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}} = 1,402$$

Para a determinação do fator de correção de compressibilidade ($1-\epsilon$), é necessário obter o valor de $\left(\frac{\Delta P}{\rho}\right)$ em função da razão k. Para $k=1,402$ temos $\left(\frac{\Delta P}{\rho}\right) = 0,046$ (Tabela 1^[80]).

Assim, o fator de correção de compressibilidade será:

$$(1 - \epsilon) = \left[1 - \frac{1}{2(1,402)} 0,046 + \frac{(1,402-1)}{6(1,402)^2} (0,046)^2 \right] = 0,9918$$

A área da seção transversal do duto será:

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (0,25 \text{ m})^2 = 0,0491 \text{ m}^2$$

Considerando o sensor como um elemento ideal, onde $C=1$, a vazão é calculada da seguinte forma (Eq. 6.20):

$$Q = (1)(0,9918)(0,0491 \text{ m}^2) \sqrt{\left(\frac{2}{1,208 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}\right) \left(500 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)} = 1,4 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \blacksquare$$

6.3.3 Tubo de Venturi

O tubo de Venturi é um medidor de vazão diferencial caracterizado por um estreitamento gradual do tubo, que reduz o diâmetro do fluxo até uma constrição, seguido por uma seção divergente que restaura o diâmetro inicial. Essa configuração resulta em uma perda de pressão permanente relativamente baixa, geralmente entre 10% e 15%. A diferença de pressão entre o fluxo antes da constrição e na garganta é facilmente medida com dispositivos simples, como um manômetro de tubo em U ou uma célula de pressão diferencial. O tubo de Venturi é ideal para líquidos que contenham partículas sólidas ou fluidos altamente viscosos, já que sua precisão não é significativamente afetada por variações na viscosidade^[73,79].

Seu *design* e instalação são regulamentados por normas internacionais, como ASME MFC-3M^[81] e ISO 5167-4^[82]. O tubo de Venturi clássico consiste em quatro seções principais, conforme demonstrado na Figura 6.12^[79,81,82]: **Cilindro de entrada:** Uma seção paralela onde o fluxo é estabilizado. **Convergente:** Parte gradualmente estreita, onde a velocidade do fluido aumenta e a pressão diminui. **Garganta:** Seção cilíndrica de menor diâmetro onde a pressão diferencial é medida. **Divergente:** Seção que retorna o fluxo ao diâmetro inicial de forma gradual, minimizando perdas de pressão.

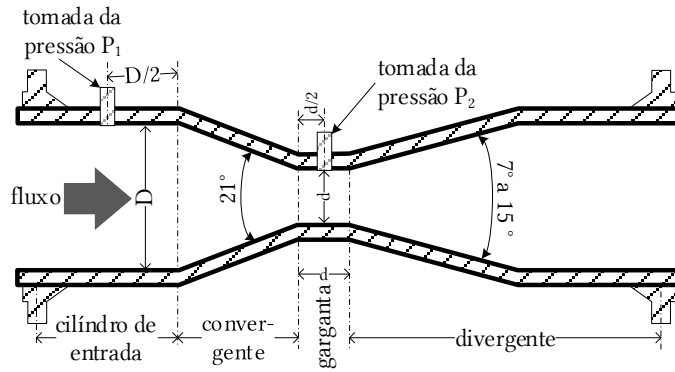


Figura 6.12: Medidor de vazão tipo tubo de Venturi (adaptado de [82]).

A vazão pode ser calculada utilizando a mesma equação para placas de orifício (Eq. 6.15). O coeficiente de expansibilidade (ϵ) é determinado a partir da Eq. 6.21[82].

$$\epsilon = \sqrt{\left(\frac{k\tau^{2/k}}{k-1}\right)\left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4\tau^{2/k}}\right)\left(\frac{1-\tau^{(k-1)/k}}{1-\tau}\right)} \quad (\text{Eq. 6.21})$$

Sendo: $\tau = P_2/P_1$

Onde: ϵ - coeficiente de expansibilidade (-); τ - razão de pressão (-); β - relação do diâmetro do orifício (garganta) e o diâmetro da tubulação (-); k - expoente isentrópico (-).

O **tubo de Dall** é uma modificação do tubo de Venturi, oferecendo uma maior pressão diferencial enquanto mantém uma perda de carga inferior à do Venturi convencional. Uma de suas principais vantagens é o comprimento reduzido em comparação ao Venturi para o mesmo diâmetro. O dispositivo completo possui aproximadamente duas vezes o diâmetro do tubo em comprimento total. Sua configuração típica (Figura 6.13) inclui: uma curta seção reta na entrada, uma seção convergente de entrada, um anel de garganta estreito e um cone de recuperação divergente e curto. A aplicação do tubo de Dall é recomendada em sistemas de grandes vazões, como em tubulações de águas residuais e esgotos, onde os medidores de vazão padrão, como a placa de orifício, não são adequados[62,77,83].

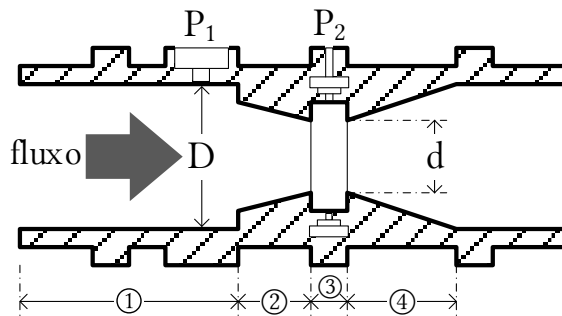


Figura 6.13: Medidor de vazão tipo tubo Dall. (1) cilindro de entrada; (2) convergente; (3) garganta; e (4) divergente.

6.3.4 Rotâmetro

O rotâmetro é o tipo mais comum de medidor de vazão de área variável, onde um fluido passa por uma restrição cuja área aumenta à medida que a vazão aumenta. Seu *design* consiste em um flutuador inserido em um tubo vertical com seção transversal cônica, que se alarga na saída (Figura 6.14). Quando o fluido passa pelo tubo, um diferencial de pressão é gerado ao longo do flutuador. Esse diferencial cria uma força ascendente proporcional à área efetiva do flutuador. Caso essa força exceda o peso do flutuador, ele se desloca para cima. Com o movimento ascendente, a área entre o flutuador e as paredes do tubo aumenta, permitindo que o fluido escoe com menor aceleração e reduzindo a queda de pressão. O flutuador se estabiliza em uma posição onde a força resultante do diferencial de pressão equilibra exatamente o seu peso. Nessa posição, a vazão é indicada pela altura do flutuador em relação a uma escala graduada no tubo[24,69].

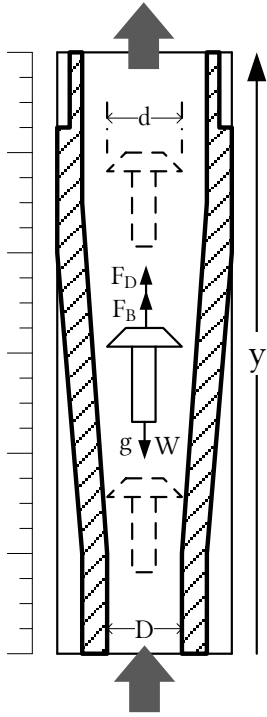


Figura 6.14: Princípio de funcionamento de um rotâmetro

O funcionamento do rotâmetro é baseado no equilíbrio entre três forças principais: a força de arrasto (F_D), o peso do flutuador (W) e a força de empuxo (F_B) (Figura 6.14). A força de arrasto, que depende da velocidade do fluido sobre o flutuador, é o componente variável no sistema. A posição do flutuador é diretamente proporcional à vazão do fluido. À medida que o fluido flui para cima no tubo, ele sustenta o flutuador em uma posição de equilíbrio onde as forças atuantes se compensam. Para medir a vazão, uma escala graduada é posicionada ao lado do tubo, indicando o fluxo correspondente à altura do flutuador^[63,67,69]. Assim, o equilíbrio das forças atuantes se dará quando $\sum F_y = F_D + F_B - W = 0$. A força de arrasto (F_D), o peso do flutuador (W) e a força de empuxo (F_B) podem ser determinadas pela Eq. 6.22, Eq. 6.23 e Eq. 6.24, respectivamente.

$$F_D = \frac{1}{2} C_{df} \rho \bar{v}^2 A_f \quad (\text{Eq. 6.22})$$

$$W = \rho_f g V_f \quad (\text{Eq. 6.23})$$

$$F_B = \rho g V_f \quad (\text{Eq. 6.24})$$

Onde: C_{df} – coeficiente de arrasto (–); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); $\bar{v}$ – velocidade média do fluxo que passa entre flutuador e a parede do rotâmetro (m s^{-1}); A_f – área frontal do flutuador (m^2); ρ_f – massa específica do flutuador (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); V_f – volume do flutuador (m^3).

A velocidade do fluido que passa pelo rotâmetro é então determinada pela Eq. 6.25 sendo a vazão expressa pela Eq. 6.26.

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2gV_f}{C_{df}A_f} \left(\frac{\rho_f}{\rho} - 1 \right)} \quad (\text{Eq. 6.25})$$

Onde: C_{df} – coeficiente de arrasto (–); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); $\bar{v}$ – velocidade média do fluxo que passa entre flutuador e a parede do rotâmetro (m s^{-1}); A_f – área frontal do flutuador (m^2); ρ_f – massa específica do flutuador (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); V_f – volume do flutuador (m^3).

$$Q = A \bar{v} = A \sqrt{\frac{2gV_f}{C_{df}A_f} \left(\frac{\rho_f}{\rho} - 1 \right)} \quad (\text{Eq. 6.26})$$

$$\text{Sendo: } A = \frac{\pi}{4} [(D + ay)^2 - d^2]$$

Onde: A – área entre o flutuador e a parede do rotâmetro (m^2); D – diâmetro da entrada do tubo (m); d – diâmetro máximo do flutuador (m); y – distância vertical da entrada (m); a – constante indicando o estreitamento do tubo (–).

O coeficiente de arrasto é determinado em função do número de Reynolds (Re) e de sua

geometria. Para um flutuador do tipo esfera, por exemplo, podemos ter $C_{df} = 24/R_e$, quando o escoamento for laminar e $C_{df} \cong 0,4$ para regime turbulento^[84].

Os flutuadores utilizados em medidores de vazão podem ter diferentes perfis de construção (Figura 6.15). **Esférico**: ideal para baixas vazões, oferece menor precisão e é significativamente influenciado pela viscosidade do fluido. **Cilíndrico com borda plana**: adequado para vazões médias e altas, apresenta uma influência moderada da viscosidade do fluido. **Cilíndrico com borda saliente inclinada no sentido do fluxo**: projetado para reduzir a influência da viscosidade do fluido. **Cilíndrico com borda saliente inclinada contra o fluxo**: minimiza a influência da viscosidade do fluido, sendo ideal para maior estabilidade. Outro fator importante é o ponto de leitura da vazão, sendo influenciado pelo formato do flutuador^[73].

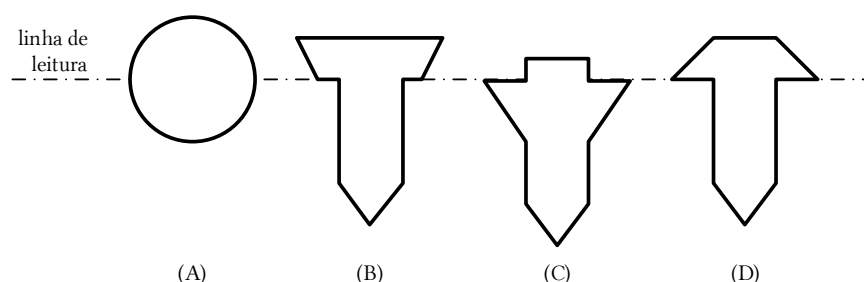


Figura 6.15: Tipos de flutuadores e seus pontos de leitura: (A) esférico; (B) cilíndrico com borda plana; (C) cilíndrico com borda saliente inclinada no sentido do fluxo e; (D) cilíndrico com borda saliente inclinada contra o fluxo.

6.3.5 Disco nutante

O medidor de disco de nutação, ou disco nutante (Figura 6.16) é amplamente utilizado para medir líquidos de forma econômica, especialmente onde a precisão não é uma prioridade, como em hidrômetros. O funcionamento baseia-se em um disco ranhurado que divide a câmara de medição em quatro volumes: dois acima da entrada e dois abaixo da saída. O líquido flui pelo medidor, causando uma queda de pressão que faz o disco oscilar em um movimento circular, sem girar em torno de seu eixo. A extremidade do pino axial aciona uma came (componente mecânico usado para converter movimento rotativo em movimento linear ou vice-versa) conectada a engrenagens e a um registrador totalizador, permitindo medir volumes líquidos. Esse tipo de medidor é o mais encontrado no mundo para aplicações comerciais, residenciais e industriais, com destaque para a medição de água. Em sistemas residenciais, ele é usado em serviços de água fria, enquanto em processos industriais pode incluir acessórios para dosagem e mistura^[24,42,62,73].

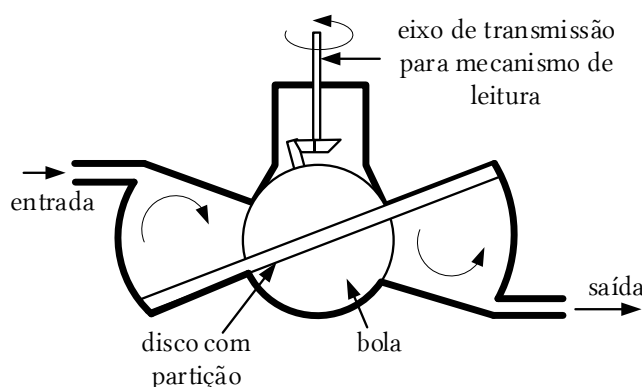


Figura 6.16: Medidor de vazão tipo disco nutante

6.3.6 Rodas ovais

O medidor de rodas ovais é um dispositivo utilizado para medição precisa de vazão volumétrica de líquidos, funcionando através de duas rodas dentadas ovais interligadas que giram impulsionadas pelo fluxo do fluido. Durante uma revolução, quatro volumes parciais são transferidos, e cada rotação das rodas transporta um volume definido de líquido,

permitindo que o número de rotações seja diretamente proporcional à quantidade de fluido que passa pelo medidor (Figura 6.17). A rotação é transmitida mecanicamente ou por acoplamento magnético e pode ser convertida em unidades de engenharia. Quando devidamente calibrados, esses dispositivos apresentam erros mínimos de medição, na ordem de $\pm 0,1\%$, em condições de alta viscosidade (>10 cP) e vazões superiores a 4 L/min. Contudo, em situações de baixa vazão, o "fluxo de deslizamento" entre as engrenagens e a carcaça tende a aumentar, resultando em uma redução na precisão, que pode atingir aproximadamente $\pm 0,5\%$. Esses medidores são amplamente utilizados em aplicações industriais que demandam alta precisão, como em sistemas hidráulicos, adesivos, polímeros, combustíveis, solventes, glicose, álcoois, entre outros [24,62,73,77,83,85].

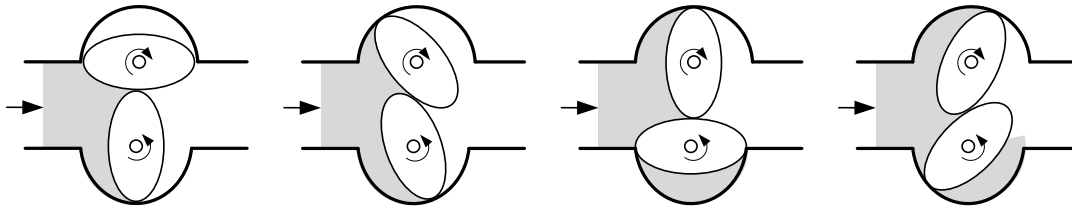


Figura 6.17: Princípio de funcionamento do medidor tipo rodas ovais

6.3.7 Turbina

Os medidores de vazão tipo turbina utilizam uma roda de turbina de giro livre para medir a velocidade do fluido. O objetivo central do *design* desses medidores é permitir que o elemento da turbina gire com o mínimo de resistência, eliminando a necessidade de torque para sustentar a rotação. A velocidade de rotação da turbina é diretamente proporcional à vazão volumétrica do fluido, sendo detectada por uma bobina de captação instalada externamente na carcaça (Figura 6.18). Para operação ideal, recomenda-se uma seção de tubo reto de 10D a montante e 5D a jusante. Esses medidores apresentam baixa queda de pressão, sendo ideais para fluidos limpos e estáveis, já que partículas e turbulências podem prejudicar o desempenho. O rotor é projetado para minimizar atrito e desgaste, com rolamentos duráveis, permitindo até cinco anos de operação sem falhas. São instrumentos precisos, mas de custo elevado, e requerem instalação cuidadosa com seções retas de tubo a montante e a jusante para garantir precisão e exatidão [62,67,69].

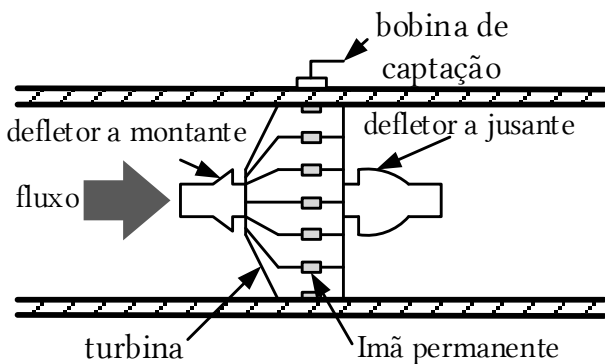


Figura 6.18: Medidor de vazão tipo turbina (adaptado de [69]).

Como a vazão volumétrica e a frequência de saída da bobina de captação são diretamente proporcionais, podemos expressar essa relação conforme a Eq. 6.27 e a vazão pela Eq. 6.28[49].

$$f = kQ \quad (\text{Eq. 6.27})$$

$$Q = \frac{f}{k} \quad (\text{Eq. 6.28})$$

Onde: f – frequência (Hz); k – fator do elemento da turbina (m^{-3}); Q – vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

Esse tipo de medidor também pode ser utilizado como totalizador considerando a vazão média ou frequência média, sendo o volume dado pela Eq. 6.29.

$$V = \bar{Q}t = \frac{\bar{f}}{k}t \quad (\text{Eq. 6.29})$$

Uma abordagem mais avançada para calcular o volume total que passa por um medidor de turbina envolve o uso de integração. Nesse método, o volume total (V) é determinado como a integral, ao longo do tempo, da frequência instantânea do sinal multiplicada pelo fator k, no intervalo de $t=0$ a $t=t_f$ (Eq. 6.30).

$$V = \int_0^{t_f} \frac{f}{k} dt \quad (\text{Eq. 6.30})$$

6.3.8 Eletromagnético

Quando um condutor elétrico se movimenta perpendicularmente a um campo magnético, uma tensão é induzida perpendicularmente tanto às linhas do campo magnético quanto à direção do movimento. Esse fenômeno, conhecido como indução eletromagnética, fundamenta o funcionamento de geradores eletromecânicos e, no caso de medidores de vazão eletromagnéticos, aplica-se a líquidos ou gases condutores. O princípio de funcionamento dos medidores de vazão eletromagnéticos, representado pela Figura 6.19, é baseado na lei da indução de Faraday^[86], que estabelece que uma força eletromotriz (E) é induzida em um condutor em movimento dentro de um campo magnético (B). No caso de líquidos condutores, essa tensão é gerada ao longo de um eixo perpendicular ao campo magnético e à direção do fluxo. A tensão resultante, proporcional à velocidade do fluido, é captada por eletrodos instalados nas paredes do tubo de medição que estão dispostos a uma distância L (=D) e é descrita pela Eq. 6.31^[49,62,63,67].

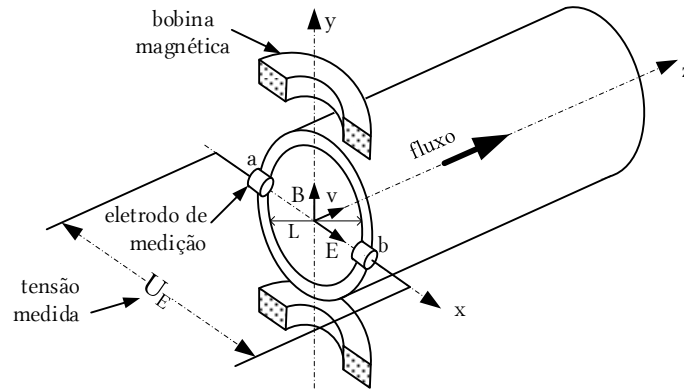


Figura 6.19: Princípio de funcionamento do medidor de vazão tipo magnético (adaptado de [85]).

$$E = \int_a^b \vec{v} \vec{B} dL \quad (\text{Eq. 6.31})$$

Onde: E – força eletromotriz induzida do ponto a ao ponto b (V); $\vec{B}$ – massa específica do fluxo magnético (T), L – distância dos eletrodos ($b-a=D$) (m); $\vec{v}$ – velocidade do fluido na tubulação ($m\ s^{-1}$).

Considerando que o fluxo magnético e a velocidade são uniformes e que $\vec{B}$, $\vec{v}$ e E são mutuamente ortogonais, a Eq. 6.31 pode ser simplificada para:

$$E = \vec{B} \vec{v} D = B \bar{v} D \quad (\text{Eq. 6.32})$$

Assim, com o auxílio da Eq. 6.32, a vazão pode ser determinada pela Eq. 6.33.

$$Q = A \bar{v} = \frac{\pi D^2}{4} \frac{E}{BD} = \frac{\pi DE}{4B} \quad (\text{Eq. 6.33})$$

Onde: Q – vazão volumétrica ($m^3\ s^{-1}$); D – diâmetro do tubo (m); E – força eletromotriz induzida (V); B = massa específica do fluxo magnético (T)

EXEMPLO 6.5: De acordo com Hall e Hall^[87], a velocidade do fluxo sanguíneo nas artérias humanas varia conforme o tipo de vaso sanguíneo e as condições fisiológicas do indivíduo. Em artérias de grande calibre, como a aorta, a velocidade média do sangue pode atingir entre 30 e 40 $cm\ s^{-1}$ durante a sístole, quando o coração se contrai, e reduzir para valores entre 20 e 25 $cm\ s^{-1}$ em estado de repouso. Já em artérias menores e arteríolas, essa velocidade se torna

significativamente menor, situando-se entre 0,5 e 1 cm s⁻¹. Nos capilares, o fluxo sanguíneo ocorre de forma ainda mais lenta, com valores variando entre 0,1 e 0,5 cm s⁻¹.

Hall e Hall^[87] também apontam que o diâmetro das artérias varia de acordo com sua função e localização no organismo. A aorta, por exemplo, em um adulto saudável, possui um diâmetro que pode variar de 20 a 30 mm, enquanto artérias de menor porte, como as braquiais, femorais e carótidas, apresentam diâmetros entre 5 e 10 mm. As arteríolas, por sua vez, possuem diâmetros menores, situando-se entre 0,01 e 0,5 mm, e os capilares, que são os menores vasos do sistema circulatório, possuem diâmetros variando de 0,005 a 0,01 mm.

Um medidor de vazão eletromagnético é empregado para quantificar o fluxo sanguíneo. Considerando a aplicação de um campo magnético de 0,05 T durante a medição, qual será a força eletromotriz induzida para a medição do fluxo sanguíneo na aorta, levando em conta seus respectivos limites de velocidade e diâmetro?

A força eletromotriz induzida pode ser determinada pela Eq. 6.32. Assim, para a aorta durante a sístole, temos:

$$E_{min} = (0,05 \text{ T}) \left(0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (0,02 \text{ m}) = 3,0 \times 10^{-4} \text{ V} = 300 \mu\text{V}$$

Aplicando a Eq. 6.32 para todas as condições temos:

Aorta	v (m s ⁻¹)		d (m)		E (μV)	
	min	max	min	max	min	max
sístole	0,300	0,400	0,020	0,030	300	600
descanso	0,200	0,250	0,020	0,030	200	375

EXEMPLO 6.6: Uma indústria química precisa medir a vazão de ácido sulfúrico diluído (H₂SO₄) em uma tubulação de 50 mm de diâmetro em sua linha de processo. O ácido sulfúrico, embora seja um líquido condutivo e corrosivo, apresenta uma condutividade moderada, variando entre 1000 e 5000 μS cm⁻¹, o que exige a aplicação de um campo magnético mais intenso para garantir uma tensão induzida adequada e uma medição precisa. Para esse fim, um campo magnético de 0,15 T é aplicado ao sistema. Se a tensão induzida no sensor for de 1,5 mV, qual será a vazão medida?

Para determinar a vazão por meio de um medidor magnético, aplica-se a Eq. 6.33. Assim, temos:

$$Q = \frac{\pi(50 \times 10^{-3} \text{ m})(1,5 \times 10^{-3} \text{ V})}{4(0,15 \text{ T})} = 3,927 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1,414 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Medidores eletromagnéticos oferecem vantagens significativas, como medições não invasivas, insensibilidade à viscosidade e massa específica do fluido, resposta rápida às variações de fluxo e alta linearidade. Além disso, são adequados para fluxos reversos e têm aplicações amplas na indústria. Embora sejam altamente precisos (com erros geralmente entre 0,25% e 1%), podem apresentar imprecisões em condições adversas, como líquidos com baixa condutividade ou eletrodos com resistência de contato elevada^[6,73].

6.3.9 Ultrassônico

Os medidores de vazão ultrassônicos determinam a velocidade de um fluido utilizando ondas sonoras de alta frequência que atravessam o fluxo. O movimento do fluido modifica a propagação dessas ondas, possibilitando a medição de sua velocidade. Existem dois tipos principais de medidores ultrassônicos (Figura 6.20): os de **tempo de passagem** e **efeito Doppler**. Ambos operam enviando uma onda sonora de alta frequência para a corrente do fluido e analisando o sinal refletido^[49,67].

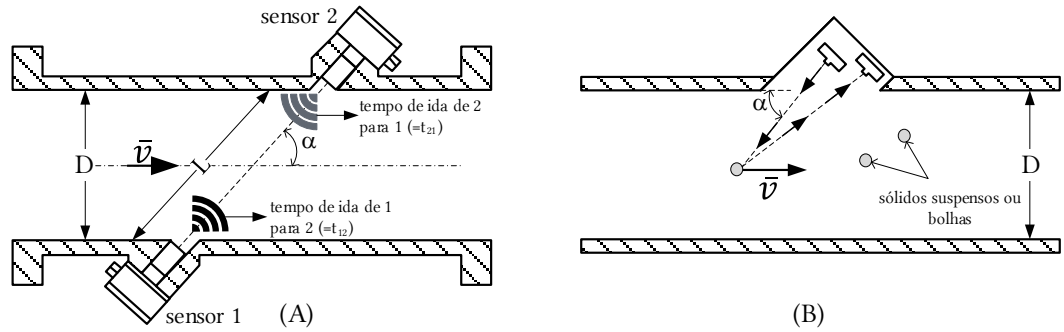


Figura 6.20: Medidor de vazão tipo ultrassônico: (A) por tempo de passagem e; (B) de efeito Doppler

O método de tempo de passagem mede a diferença no tempo que ondas ultrassônicas levam para viajar entre dois transdutores posicionados ao longo do tubo, em direções a favor do fluxo (t_{12}) e oposta ao fluxo (t_{21}). Essa diferença está diretamente relacionada à velocidade média do fluido. As velocidades dos sinais propagando-se do sensor 1 para o sensor 2 (v_{12}) e no sentido oposto (v_{21}) são descritas pela Eq. 6.34 e Eq. 6.35, respectivamente [62,63,67].

$$v_{12} = v_s + \bar{v} \cos(\alpha) \quad (\text{Eq. 6.34})$$

$$v_{21} = v_s + \bar{v} \cos(\alpha) \quad (\text{Eq. 6.35})$$

Onde: v_{12} – velocidade do sinal enviado do sensor 1 para o sensor 2 (m s^{-1}); v_{21} – velocidade do sinal enviado do sensor 2 para o sensor 1 (m s^{-1}); v_s – velocidade do som no fluido (m s^{-1}); $\bar{v}$ – velocidade média do fluido (m s^{-1}); α – ângulo dos sensores (–).

A partir da Eq. 6.34 e Eq. 6.35, pode-se determinar a velocidade média do fluido, expressa como:

$$\bar{v} = \frac{v_{12} - v_{21}}{2 \cos(\alpha)}$$

$$\text{Sendo } v_{12} = \frac{L}{t_{12}}, v_{21} = \frac{L}{t_{21}} \text{ e } \sin(\alpha) = \frac{D}{L}.$$

$$\bar{v} = \frac{D}{2 \cos(\alpha) \sin(\alpha)} \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (\text{Eq. 6.36})$$

Onde: $\bar{v}$ – velocidade média do fluido (m s^{-1}); D – diâmetro do tubo (m); t_{12} – tempo para o sinal enviado pelo sensor 1 chegar ao sensor 2 (s); t_{21} – tempo para o sinal enviado pelo sensor 2 chegar ao sensor 1 (s); α – ângulo dos sensores (–).

A vazão é calculada utilizando a Eq. 6.37.

$$Q = \bar{v} A = \frac{\pi D^3}{8 \cos(\alpha) \sin(\alpha)} \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (\text{Eq. 6.37})$$

Esse tipo de medidor é especialmente adequado para fluidos limpos, já que sua operação não depende da presença de partículas para refletir o sinal. Além disso, sua instalação não invasiva elimina quedas de pressão no sistema e pode ser realizada externamente ao tubo, proporcionando praticidade para diagnósticos em campo. Esses dispositivos também são capazes de monitorar variações temporais na vazão e na direção do fluxo, apresentando uma incerteza relativa que varia entre 1% e 5% [6,42,73].

EXEMPLO 6.7: Em uma planta química, uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10% em massa, destinada a um reator de neutralização, é transportada por uma tubulação com 150 mm de diâmetro interno. Para garantir um controle preciso do processo, a vazão da solução deve ser monitorada por um medidor de vazão ultrassônico do tipo tempo de passagem. Sabendo que os sensores estão posicionados em um ângulo de 60° e que o tempo de transmissão do sinal no sentido do fluxo é de 0,8 ms, enquanto no sentido contrário ao fluxo é de 0,95 ms, qual será a vazão volumétrica medida pelo sensor?

A medição da vazão por meio de um sensor ultrassônico do tipo tempo de passagem pode ser expressa pela Eq. 6.37.

$$Q = \frac{\pi (0,15 \text{ m})^3}{8 \cos(60^\circ) \sin(60^\circ)} \left(\frac{1}{0,0008 \text{ s}} - \frac{1}{0,00095 \text{ s}} \right) = 0,186 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 668,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \blacksquare$$

O medidor baseado no **efeito Doppler** mede a alteração na frequência de uma onda sonora refletida por partículas ou bolhas no fluido em movimento. A frequência refletida será maior que a emitida se a partícula se aproximar do transdutor e a frequência será menor se a partícula se afastar do transdutor. A magnitude dessa mudança de frequência é usada para inferir diretamente a velocidade do fluido. Diferentemente de métodos baseados em tempo de passagem, o efeito Doppler não depende do intervalo entre a emissão e o retorno do sinal, mas apenas da variação de frequência entre os sinais incidente e refletido. Contudo, os medidores Doppler requerem a presença de bolhas ou partículas no fluido para refletir as ondas sonoras^[6,42,62,67,73].

A velocidade média do fluxo ($\bar{v}$) pode ser determinada pela Eq. 6.38 e vazão volumétrica pela Eq. 6.39^[63].

$$\bar{v} = \frac{(f_1 - f_0)v_s}{2f_0 \cos(\alpha)} = \frac{f_D v_s}{2f_0 \cos(\alpha)} \quad (\text{Eq. 6.38})$$

$$Q = \bar{v}A = \frac{\pi D^2 f_D v_s}{8f_0 \cos(\alpha)} \quad (\text{Eq. 6.39})$$

Onde: f_D – frequência Doppler (Hz); v_s – velocidade do som no fluido (m s^{-1}); f_0 – frequência emitida (Hz); f_1 – frequência refletida (Hz); α – ângulo dos sensores (°).

Em resumo, **efeito Doppler** requer a presença de partículas ou bolhas, sendo adequado para fluidos contaminados, e o **tempo de passagem** funciona melhor com fluidos limpos.

EXEMPLO 6.8: Em uma planta química dedicada à fabricação de tintas, uma suspensão de carbonato de cálcio (CaCO_3) em água é transportada por uma tubulação com diâmetro interno de 150 mm. Como a suspensão contém partículas sólidas capazes de refletir ondas ultrassônicas, o método Doppler é adequado para a medição da vazão. Os sensores ultrassônicos estão posicionados em um ângulo de 60°, enquanto as frequências emitida e refletida são, respectivamente, 2 MHz e 2,0012 MHz. A velocidade do som na suspensão é de 1480 m s^{-1} , um valor típico para água contendo partículas. Com base nessas condições, determine a vazão de carbonato de cálcio que passa pela tubulação neste momento.

A vazão, quando medida por um sensor baseado no efeito Doppler, pode ser calculada utilizando a Eq. 6.39. Assim, temos:

$$Q = \frac{\pi(0,15 \text{ m})^2 (2,0012 \times 10^6 \text{ Hz} - 2,0 \times 10^6 \text{ Hz}) \left(1480 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{8(2,0 \times 10^6 \text{ Hz}) \cos(60^\circ)}$$

$$Q = 0,0157 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 56,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \blacksquare$$

6.3.10 Coriolis

Pseudoforças, como a força centrífuga e a força de Coriolis, são efeitos percebidos em referenciais acelerados ou rotativos, mas não correspondem a forças reais. A força centrífuga, por exemplo, é a sensação de ser empurrado para fora em um movimento circular, embora a força real que age seja a centrípeta, que mantém o objeto na trajetória curvada. Já a força de Coriolis aparenta desviar objetos em movimento dentro de um sistema rotativo, mas esse desvio é apenas uma ilusão criada pela rotação do referencial. Em ambos os casos, essas forças decorrem da inércia e são observadas apenas em sistemas não inerciais. O princípio de funcionamento desses medidores de vazão baseia-se na geração artificial da aceleração de Coriolis, permitindo a medição da massa do fluido por meio da detecção do movimento angular. Quando o fluido escoar por uma tubulação, ele é submetido à aceleração de Coriolis, induzida mecanicamente pela rotação da tubulação, conforme observado na Figura 6.21^[49,63].

A força total de deflexão causada pela inércia de Coriolis é diretamente proporcional à massa do fluido e está associada à sua velocidade angular, resultando em dois componentes de aceleração: a aceleração centrípeta (a_r) e a aceleração de Coriolis (a_c), descritas pelas Eq. 6.40 e 6.41.

$$a_r = \omega^2 r \quad (\text{Eq. 6.40})$$

$$a_c = 2\omega v \quad (\text{Eq. 6.41})$$

Onde: a_r – aceleração centrípeta (m s^{-2}); a_c – aceleração de Coriolis (m s^{-2}); ω – velocidade angular (rad s^{-1}); r – raio (m); v – velocidade do fluido (m s^{-1}).

Com base na segunda lei de Newton, a força de Coriolis pode ser expressa conforme descrito na Eq. 6.42.

$$F_c = ma_c = 2\omega vm \quad (\text{Eq. 6.42})$$

Sendo: $m = \rho AL$ e $Q_m = \rho Av$, a vazão mássica é determinada pela Eq. 6.43.

$$Q_m = \frac{F_c}{2\omega L} \quad (\text{Eq. 6.43})$$

Onde: Q_m – vazão mássica (kg s^{-1}); F_c – força de Coriolis (N); ω – velocidade angular (rad s^{-1}); L – comprimento do segmento da tubulação do sensor (m).

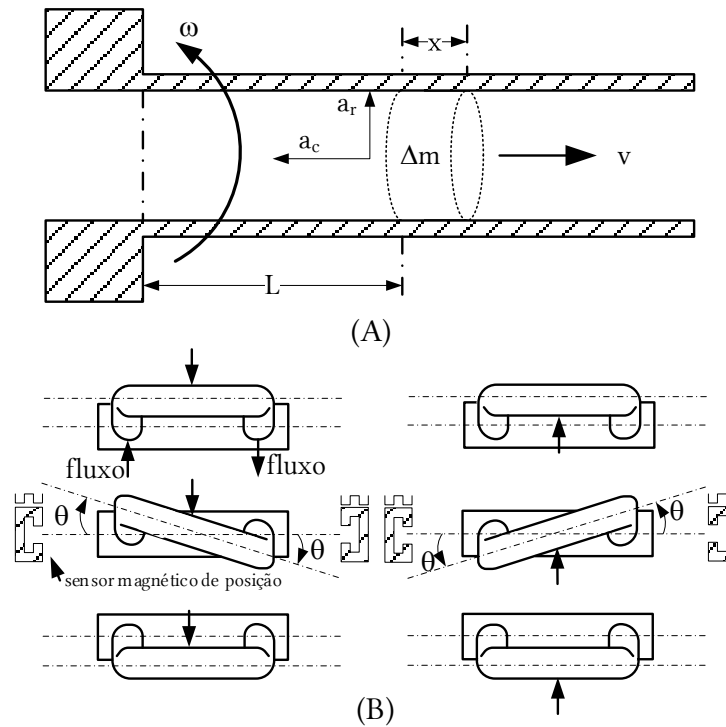


Figura 6.21: Medição de vazão por Coriolis: (A) princípio de Coriolis e; (B) variação de torção com a vibração (adaptado de [63] e [83])

Os medidores de vazão Coriolis são altamente precisos, com uma margem de erro típica de $\pm 0,5\%$, e não são influenciados por variações de pressão, temperatura, viscosidade ou massa específica do fluido, eliminando a necessidade de recalibração para diferentes aplicações. Embora inicialmente projetados para líquidos, eles também se adaptaram ao uso com gases, ampliando suas aplicações. Apesar do custo inicial elevado, sua versatilidade, robustez e confiabilidade os tornam ideais para plantas industriais que lidam com diferentes tipos de fluidos, mesmo em condições adversas [67,68,69].

6.3.11 Vórtex

O medidor de vazão por desprendimento de vórtices (vórtex) utiliza o fenômeno de formação alternada de vórtices quando um fluido (líquido, gás ou vapor) flui ao redor de um corpo não aerodinâmico (gerador de vórtice) posicionado dentro de um tubo, conforme Figura 6.22. À medida que o fluido contorna o corpo, vórtices são formados alternadamente em ambos os lados, criando uma frequência de desprendimento proporcional à velocidade média do fluido. Essa frequência pode ser detectada por sensores de alta sensibilidade, como cristais piezoelétricos ou dispositivos ultrassônicos, que convertem os sinais em uma medida da vazão. Medidores de vórtices são amplamente utilizados para líquidos e gases, oferecendo saídas independentes de variáveis como massa específica, temperatura ou pressão [6,62,69].

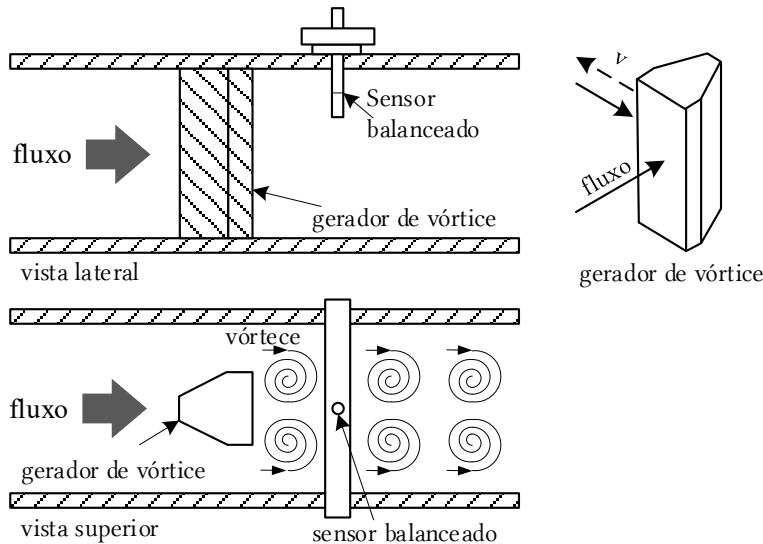


Figura 6.22: Princípio de funcionamento do medidor de vazão tipo vórtex (adaptado de [24]).

O número de Strouhal (St), um parâmetro adimensional, relaciona a frequência de desprendimento à velocidade do fluido e à dimensão característica do corpo não aerodinâmico. Essa relação é representada pela Eq. 6.44, sendo St aproximadamente constante em uma ampla faixa de números de Reynolds. Os corpos não aerodinâmicos são projetados para garantir a formação regular e estável de vórtices, proporcionando medições de alta precisão e repetibilidade^[6.62.69.77.83].

$$St = \frac{fD}{v} \quad (\text{Eq. 6.44})$$

Onde: St – número de Strouhal (–); f – frequência de desprendimento (Hz); D – dimensão característica do corpo não aerodinâmico (m); v – velocidade do fluido (m s^{-1}).

A vazão é determinada pela Eq. 6.45.

$$Q = Av = \frac{AfD}{St} \quad (\text{Eq. 6.45})$$

Onde: Q – vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), A – área da tubulação (m^2); St – número de Strouhal (–); f – frequência de desprendimento (rad s^{-1}); D – dimensão característica do corpo não aerodinâmico (m); v – velocidade do fluido (m s^{-1}).

O número de Strouhal depende da geometria do corpo não aerodinâmico gerador de vórtice. Na Figura 6.23 são apresentados alguns valores para St em função da geometria do corpo não aerodinâmico.

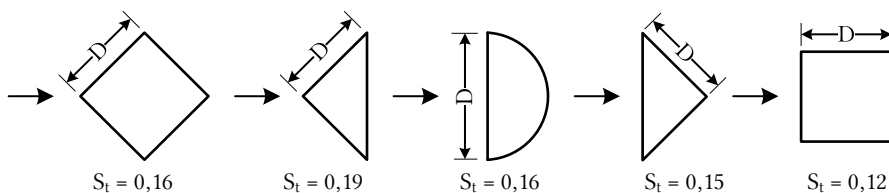


Figura 6.23: Número de Strouhal para diferentes geometrias de geradores de vórtices para $Re_d \geq 10^4$ (adaptado de [67])

6.3.12 Térmico

Os medidores de vazão térmicos medem diretamente a vazão mássica de fluidos, baseando-se, em sua maioria, na dispersão de calor. Esses dispositivos convertem o fluxo mássico em variações de temperatura, que são posteriormente transformadas em sinais elétricos, como corrente ou tensão. A medição é fundamentada na taxa de transferência de calor por convecção entre o sensor e o fluido, sendo influenciada principalmente pela vazão e pelas propriedades termofísicas do fluido, como condutividade térmica, calor específico e massa específica. Um sensor de vazão térmico geralmente é composto por um elemento aquecedor e um ou mais sensores de temperatura do tipo RTD (veja [Capítulo 4](#)). Dependendo do tipo de elemento de aquecimento, o anemômetro térmico pode operar em diferentes modos,

como o anemômetro de temperatura constante e o anemômetro de corrente constante. No modo de temperatura constante, o fio aquecido é mantido em uma temperatura operacional fixa (e, consequentemente, resistência constante), permitindo que a inércia térmica do sensor se ajuste automaticamente às variações nas condições de fluxo do fluido [24,42,67,83,88].

Adicionando uma corrente através de um elemento resistivo (RTD), este será aquecido a uma temperatura maior que a temperatura do fluido. A temperatura do elemento resistivo e sua resistência estarão em equilíbrio entre a potência elétrica (Eq. 6.45) e o calor dissipado (taxa de transferência de calor por convecção, Eq. 6.46).

$$P = iE \quad (\text{Eq. 6.45})$$

Onde: P – potência elétrica (W); E – tensão gerada (V); i – corrente elétrica (A)

$$q_d = h_{(v)} A_s (T - T_f) \quad (\text{Eq. 6.46})$$

Onde: q_d – calor dissipado do elemento resistivo (W); $h_{(v)}$ – coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); A_s – área da seção aquecida (m^2); T – temperatura do elemento resistivo ($^\circ\text{C}$); T_f – temperatura do fluido ($^\circ\text{C}$).

Com o auxílio da Lei de Ohm ($E = iR$), podemos escrever o equilíbrio térmico como sendo:

$$i^2 R = h_{(v)} A_s (T - T_f) \quad (\text{Eq. 6.47})$$

O coeficiente de transferência de calor pode ser estimado utilizando a correlação universal de Kramer, desenvolvida especificamente para sensores de fluxo, conforme apresentado por Bekraoui e Hadjadj [88] e descrito pela Eq. 6.48.

$$Nu = 0,42 P_r^{0,2} + 0,57 P_r^{0,33} R_e^{0,5} \quad (\text{Eq. 6.48})$$

Onde: Nu – número de Nusselt (–); P_r – número de Prandtl (–); R_e – número de Reynolds (–).

Sendo: $Nu = \frac{hD}{k}$, $P_r = \frac{\mu C_p}{k}$ e $R_e = \frac{\rho v D}{\mu}$ podemos reescrever a Eq. 6.48 como:

$$\frac{h_{(v)} D}{k} = 0,42 P_r^{0,2} + 0,57 P_r^{0,33} \left(\frac{\rho v D}{\mu} \right)^{0,5} \quad (\text{Eq. 6.49})$$

Onde: $h_{(v)}$ – coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); D – diâmetro da tubulação (m); k – condutividade térmica do fluido ($\text{W } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-1}$); v – velocidade do fluido (m s^{-1}); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); D – diâmetro da tubulação (m); μ – viscosidade dinâmica do fluido ($\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

Considerando $C_0 = \frac{k}{D} 0,42 P_r^{0,2}$ e $C_1 = \frac{k}{D} 0,57 P_r^{0,33} \left(\frac{\rho D}{\mu} \right)^{0,5}$ a Eq. 6.49 resulta em:

$$h_{(v)} = C_0 + C_1 v^{0,5} \quad (\text{Eq. 6.50})$$

Para um elemento resistivo (RTD), a resistência é dada por (ver [Capítulo 4](#)):

$$R = R_0 [1 + \alpha (T - T_\infty)] \quad (\text{Eq. 6.51})$$

Para um anemômetro de temperatura constante, a diferença de temperatura pode ser reescrita como $\Delta T = (T - T_\infty) = \frac{R - R_0}{\alpha R_0}$. Substituindo essa relação para a variação de temperatura, juntamente com a Eq. 6.50, na Eq. 6.47, obtém-se:

$$i^2 R = A_s (C_0 + C_1 v^{0,5}) \frac{(R - R_0)}{\alpha R_0}$$

Onde: i – corrente elétrica (A); R – resistência elétrica na temperatura T (Ω); A_s – área seção aquecida (m^2); C_0 – constante ($\text{W } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-2}$); C_1 – constante ($\text{W s}^{0,5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ m}^{0,5}$); R_0 – resistência elétrica na temperatura T_0 (Ω); α – coeficiente de variação da resistência em função da temperatura medida ($^\circ\text{C}^{-1}$)

Sendo: $K_1 = \frac{A_s}{\alpha R_0} C_0$ e $K_2 = \frac{A_s}{\alpha R_0} C_1$

$$\frac{i^2 R}{(R - R_0)} = K_1 + K_2 v^{0,5} \quad (\text{Eq. 6.52})$$

Onde: i – corrente elétrica (A); R – resistência elétrica na temperatura T (Ω); R_0 – resistência elétrica na temperatura T_0 (Ω); K_1 – constante ($\text{W } \Omega^{-1}$); K_2 – ($\text{W s}^{0,5} \Omega^{-1} \text{ m}^{0,5}$); v – velocidade do fluido (m s^{-1})

De acordo com a Lei de Ohm, a corrente pode ser expressa como $i = E/R$. Substituindo

essa relação na Eq. 6.45, a potência elétrica é dada por $P = E^2/R$. Desta forma, a Eq. 6.52 pode ser reescrita como:

$$E^2 = R(R - R_0)(K_1 + K_2 v^{0.5})$$

A velocidade do fluido é calculada utilizando a Eq. 6.53, enquanto a vazão volumétrica é determinada pela Eq. 6.54 e a vazão mássica pela Eq. 6.55:

$$v = \left[\frac{E^2 - K_1[R(R - R_0)]}{K_2 R(R - R_0)} \right]^2 \quad (\text{Eq. 6.53})$$

Onde: E – tensão elétrica gerada (V); R – resistência elétrica na temperatura T (Ω); R – resistência elétrica na temperatura T (Ω); R0 – resistência elétrica na temperatura T0 (Ω); K1 – constante ($W \Omega^{-1}$); K2 – ($W s^{0.5} \Omega^{-1} m^{-0.5}$); v – velocidade do fluido ($m s^{-1}$)

$$Q = Av = A \left[\frac{E^2 - K_1[R(R - R_0)]}{K_2 R(R - R_0)} \right]^2 \quad (\text{Eq. 6.54})$$

$$Q_m = \rho Av = \rho A \left[\frac{E^2 - K_1[R(R - R_0)]}{K_2 R(R - R_0)} \right]^2 \quad (\text{Eq. 6.55})$$

Onde: A – área da seção transversal da tubulação (m^2); v – velocidade do fluido ($m s^{-1}$); ρ – massa específica do fluido ($kg m^{-3}$)

6.3.13 Calhas Parshall

Desenvolvida por R. L. Parshall em colaboração com o Departamento de Agricultura dos EUA, a calha Parshall é amplamente reconhecida por sua eficiência. A calha Parshall, Figura 6.24, opera de maneira análoga a um "tubo de Venturi", aproveitando a diferença de altura do líquido entre pontos distintos para calcular o fluxo. Ela apresenta uma perda de carga significativamente menor em relação a vertedouros de capacidade equivalente, além de velocidades de fluxo elevadas que reduzem o acúmulo de sedimentos, resultando em medições mais confiáveis e consistentes. Apesar de sua precisão não ser extremamente alta, a calha Parshall oferece excelente repetibilidade, confiabilidade e exige manutenção mínima. As calhas Parshall são amplamente utilizadas em aplicações como irrigação, tratamento de resíduos e esgoto. Sua versatilidade e confiabilidade as tornam uma solução prática e eficaz para a medição de vazão em canais abertos^[3,24,49].

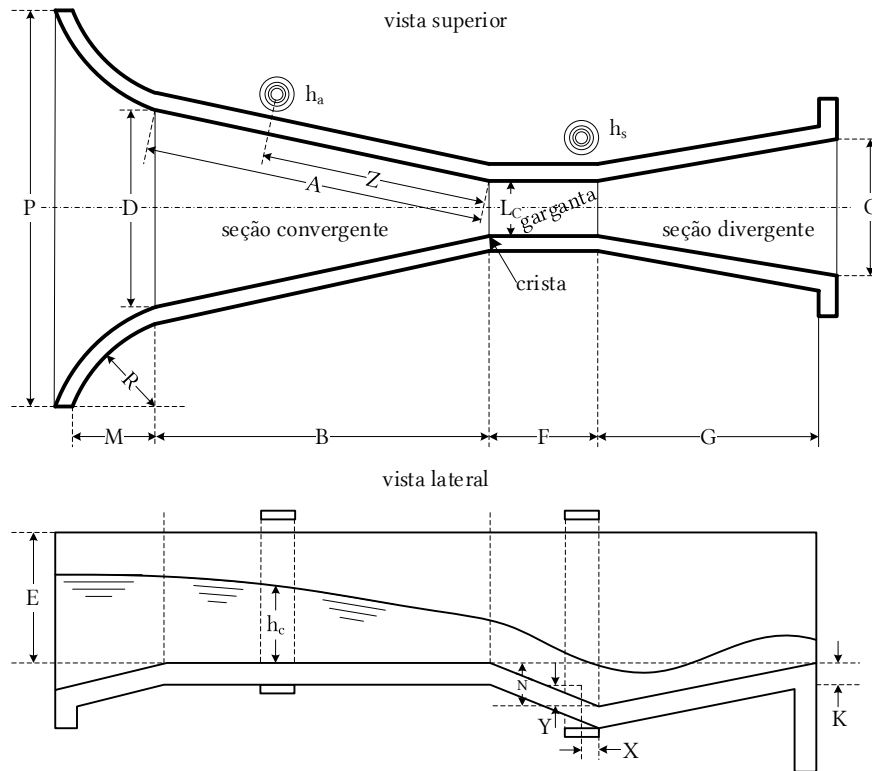


Figura 6.24: Representação das dimensões da calha Parshall (adaptado de [9]). Nota: a determinação das dimensões A, B, C, D, E, F, G, K, N, M, P, X, Y e Z são apresentadas na norma ISO 9826:1992[89].

Em condições normais de operação, a vazão pode ser calculada com base em uma única medição do nível a montante (h_a). Contudo, em situações de submersão, quando o nível a jusante (h_s) excede 60% do nível a montante, torna-se necessário aplicar fatores de correção. Essa condição pode reduzir a precisão da medição e demandar o uso de equipamentos específicos. A detecção dos níveis a montante e a jusante pode ser feita por diversos métodos, sendo o sensor ultrassônico amplamente utilizado devido à sua adequação às características do fluido e aos cálculos das vazões^[9,24]. A relação entre a vazão e o nível a montante (h_c), para calhas padrão é descrita pela Eq. 6.56^[89].

$$Q = ah_c^b \quad (\text{Eq. 6.56})$$

$$\text{Sendo: } a = 3,279^b C_D^{L_c}$$

Onde: Q – vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); L_c – largura da crista (m); h_c – altura da crista (m), C_D – coeficiente de descarga (–), a – constante empírica; b – expoente que depende de L_c (–).

Na Tabela 6.2 são apresentados alguns valores para os coeficientes a e b da Eq. 6.56.

Tabela 6.2: Características de vazão de calhas Parshall padrão^[89]

Lc (m)	Coeficiente (Eq. 6.56)		h _c (m)		Q (m ³ s ⁻¹) × 10 ⁻³	
	a	b	min	max	min	max
0,152	0,381	1,580	0,03	0,45	1,5	100,0
0,250	0,561	1,513	0,03	0,60	1,0	250,0
0,300	0,679	1,521	0,03	0,75	3,5	400,0
0,750	1,772	1,557	0,06	0,75	25,0	1100,0
0,900	2,147	1,565	0,06	0,75	30,0	1250,0
1,000	2,397	1,569	0,06	0,80	30,0	1500,0
2,100	5,222	1,599	0,08	0,80	95,0	3600,0
2,400	6,004	1,605	0,08	0,8	100,0	4000,0

Para calhas de grandes dimensões, a relação entre a vazão e o nível a montante (h_c) é descrita pela Eq. 6.57, e na Tabela 6.3 são apresentados alguns valores para os coeficientes a_1 e b_1 ^[89].

$$Q = a_1 h_c^{b_1} \quad (\text{Eq. 6.57})$$

$$\text{Sendo: } a_1 = C_D L_c$$

Onde: Q – vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); L_c – largura da crista (m); h_c – altura da crista (m), C_D – coeficiente de descarga (–), a_1 – constante empírica; b_1 – expoente que depende de L_c (–).

Tabela 6.3: Características de vazão de calhas Parshall de grandes dimensões^[89].

Lc (m)	Coeficiente (Eq. 6.56)		h _c (m)		Q (m ³ s ⁻¹)	
	a ₁	b ₁	min	max	min	max
3,05	7,463	1,6	0,09	1,07	0,16	8,28
3,68	8,859	1,6	0,09	1,37	0,19	14,68
6,10	14,450	1,6	0,09	1,83	0,31	37,97
7,62	17,950	1,6	0,09	1,83	0,38	47,16
12,19	28,430	1,6	0,09	1,83	0,60	74,70
15,24	35,410	1,6	0,09	1,83	0,75	93,04

Capítulo 7

Medição de nível

A medição de nível é essencial para o controle de processos, a segurança operacional e o gerenciamento eficiente de custos e estoques industriais. Este capítulo detalha os principais métodos diretos e indiretos, explorando tecnologias como visores, flutuadores, medidores magnéticos, deslocadores, sensores de pressão diferencial, borbulhadores, sondas capacitivas, ultrassom, radiação gama, pesagem e variados tipos de chaves de nível. São analisados os princípios físicos, as influências de densidade e temperatura, e os critérios técnicos rigorosos para a seleção do instrumento de medição ideal. O texto também apresenta as equações matemáticas e físicas essenciais para o dimensionamento correto. Ao final, o leitor será capaz de compreender profundamente o funcionamento de cada método, aplicar cálculos teóricos para determinar o nível, identificar as limitações operacionais de cada sensor e selecionar a tecnologia mais adequada para garantir a precisão, a confiabilidade e a segurança exigidas nas diversas aplicações e ambientes industriais.

A medição de nível, embora conceitualmente simples, frequentemente demanda técnicas apuradas e o uso de artifícios tecnológicos. Essa variável desempenha um papel crucial na operação de processos industriais, além de contribuir significativamente para o cálculo de custos e inventários. Os sistemas de medição de nível podem variar em complexidade, desde visores simples para leituras locais até sistemas sofisticados com indicação remota, registro e controle automático. Na indústria, mede-se tanto o nível de líquidos quanto de sólidos, sendo o nível definido como a altura do conteúdo (líquido ou sólido) em um reservatório. Em recipientes que contêm camadas estratificadas de fluidos, é necessário medir a altura do ponto de interface entre as camadas, devido às diferenças de densidade. Diversas tecnologias exploram princípios distintos da física para medir o nível em recipientes. Esses métodos atendem à necessidade de determinar a quantidade de conteúdo de tanques e outros recipientes, especialmente quando a visualização direta é inviável. De maneira geral, o nível é medido a partir do fundo do recipiente até a superfície do material, seja líquido ou sólido, abrangendo aplicações como a medição de grãos em silos, combustíveis, reservatórios de água, lagos e oceanos [\[6,62,63,69,73\]](#).

Os instrumentos de medição de nível podem ser classificados de acordo com a forma de medição, que pode ser **direta** ou **indireta (inferencial)**, e pelo método utilizado, como boias ou flutuadores, deslocadores, pressão diferencial, pesagem e sistemas eletromecânicos. Cada abordagem possui vantagens específicas, sendo escolhida conforme as necessidades da aplicação. A medição direta determina a distância entre o nível do produto (líquido ou sólido) e um referencial previamente definido. Essa medição pode ser feita visualmente, utilizando uma escala graduada, ou por meio da posição de um detector, como um flutuador. Por outro lado, a medição indireta calcula a posição da superfície livre do produto utilizando parâmetros como a pressão hidrostática, entre outros métodos [\[9\]](#).

7.1 Fatores determinantes na medição de nível em processos industriais

A escolha da tecnologia de medição de nível exige análise dos requisitos da aplicação, instalação e ambiente. Não há tecnologia universal, o que requer avaliação de várias opções disponíveis. É essencial considerar a capacidade de medição, a resistência do dispositivo e se a tecnologia necessita contato com o material ou é não intrusiva, impactando custos de manutenção e operação. A análise do custo total de propriedade, incluindo aquisição, instalação e treinamento, é fundamental. A qualidade das informações deve atender às exigências do processo, considerando especificações do instrumento e fatores ambientais. Selecionar a tecnologia adequada garante precisão e desempenho alinhados às demandas

específicas do processo. Na Figura 7.1 são apresentados diversos fatores que impactam a medição de nível, acompanhados dos problemas gerados por esses fatores, bem como das tecnologias afetadas e não afetadas.

Tabela 7.1: Fatores que influenciam na medição de nível[9,24,42,49,

Fator	Problema identificado	Tecnologia impactada	Tecnologia não impactada
Densidade e Viscosidade	Materiais viscosos travam interruptores mecânicos; alta densidade danifica sensores; mudanças de densidade afetam leituras.	Mecânica (ex.: interruptores mecânicos), hidrostática (burbulhadores, deslocadores, instrumentos hidrostáticos).	Não contactantes (ex.: radar, ultrassom).
Composição Química	Mudanças químicas alteram constantes dielétricas, condutividade, pH e podem corroer sensores.	Capacitância, ultrassônica.	Não contactantes (ex.: radar, ultrassom, gama).
Temperatura Ambiente	Temperaturas extremas danificam sensores; variações causam falhas em hidrostáticos com selos remotos.	Hidrostática com selos remotos.	Difícil de determinar
Temperatura do Processo	Altas temperaturas podem comprometer materiais do sensor; hidrostáticos não compensam variações rápidas.	Hidrostática.	Difícil de determinar
Pressão do Processo	Mudanças de pressão estática ou vácuo afetam leituras; medição hidrostática não funciona sob pressão de carga elevada.	Hidrostática.	Pressão diferencial (dentro de limites).
Agitação do Processo	Superfícies onduladas ou vórtices dificultam medições confiáveis.	Capacitância.	Não contactantes (ex.: radar, ultrassom).
Vapor, Névoa e Poeira	Partículas atenuam sinais acústicos ou eletromagnéticos, prejudicando leituras.	Laser, micro-ondas, radar, ultrassom.	Difícil de determinar
Interfaces ou Gradientes	Interfaces mal definidas ou variações tornam medições difíceis.	Capacitância, ultrassônica.	Radar, gama, flutuador magnético (em alguns casos).
Conductividade e Constantes Dielétricas	Variações imprevisíveis comprometem medições capacitivas.	Capacitância.	Difícil de determinar
Vibração	Danos ao sensor ou interferência em medições devido a vibrações externas.	Poucos sensores que dependem de vibrações.	Difícil de determinar
Acúmulo de Material ou Adesividade	Acúmulo de material causa falhas ou leituras imprecisas.	Sensores de contato (diversos).	Difícil de determinar
Carga Estática	Descargas eletrostáticas danificam componentes eletrônicos.	Capacitância.	Princípios resistentes a descarga eletrostática.
Umidade	Variações na umidade afetam propriedades dielétricas e causam condensação.	Capacitância.	Difícil de determinar

7.2 Medidores por métodos diretos

7.2.1 Visores de nível

Os visores de nível são utilizados exclusivamente para monitorar o nível de líquidos ou a interface entre líquidos imiscíveis em qualquer tipo de equipamento, pressurizado ou não, que contenha líquidos, como colunas, tanques de armazenamento e reatores, entre outros. A medição com visores de nível é feita por meio da inserção de uma régua ou gabarito no reservatório (ou equipamento), alinhando o zero da régua ao fundo do reservatório, ou simplesmente observando o local onde se encontra o nível, nos casos em que não é necessário determinar um valor exato. O visor de nível desempenha para a medição de nível de líquidos um papel equivalente ao dos manômetros na medição de pressão: uma tecnologia simples e eficaz para a indicação visual direta do nível do processo. Na forma mais básica, um indicador de nível consiste em um tubo transparente que permite a visualização do líquido presente no processo ^[49,63].

Os visores de nível podem ser fabricados em **vidro tubular** ou **vidro plano**, conforme a aplicação (Figura 7.1). Os **visores tubulares**, compostos por tubos conectados a válvulas de bloqueio, possuem diâmetros e comprimentos padronizados que devem ser avaliados de acordo com as condições de temperatura e pressão do sistema, sendo desaconselhados para líquidos tóxicos, inflamáveis ou condições acima dos limites especificados pelos fabricantes, devido ao risco de rompimento e acidentes. É importante evitar comprimentos superiores ao recomendado, e, para faixas maiores, a instalação de múltiplos visores é indicada. Já os **visores de vidro plano**, mais robustos devido à sua construção, substituíram muitas aplicações dos visores tubulares e podem ser compostos por módulos, permitindo maior resistência a altas temperaturas e pressões, embora apresentem a desvantagem de não oferecer visibilidade contínua entre as seções. Por serem menos suscetíveis a rupturas por choques mecânicos, são frequentemente preferidos em aplicações mais exigentes ^[9,63].

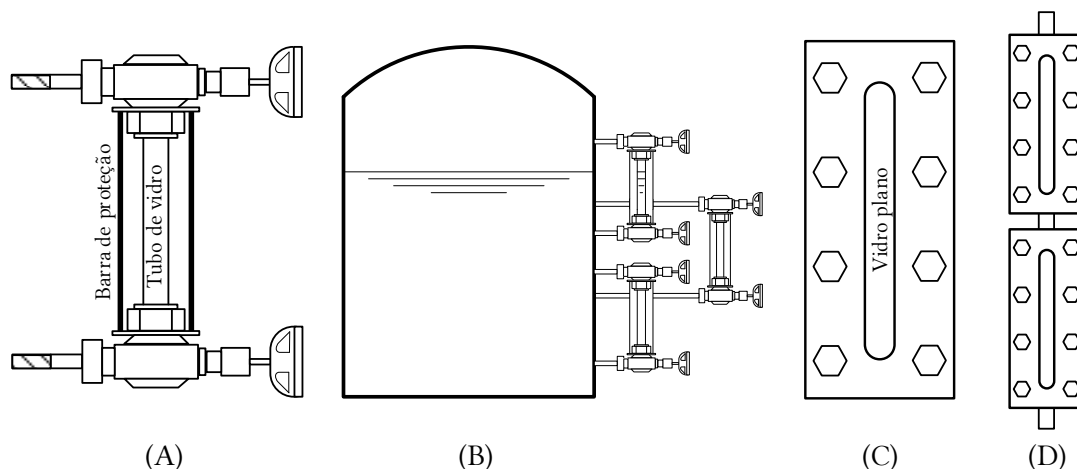


Figura 7.1: Visores de nível: (A) visor de vidro tubular; (B) instalação de múltiplos visores de vidro tubular; (C) visor de vidro plano e; (D) instalação de múltiplos visores de vidro plano (adaptado de ^[9,63])

Apesar de parecerem simples e livres de problemas, indicadores de nível podem apresentar erros em condições específicas, como na presença de uma camada de líquido mais leve entre as portas de conexão. Em sistemas com dois líquidos de massas específicas diferentes, o indicador pode não mostrar a interface corretamente ou até falhar em indicar qualquer nível. Isso ocorre porque o líquido mais leve pode não entrar no tubo do visor (Figura 7.2A), limitando a medição ao líquido mais pesado. Mesmo que um pouco do líquido mais leve entre no visor (Figura 7.2B), a interface exibida pode não corresponder à real dentro do vaso, caso os níveis retornem às posições originais. Para garantir a medição correta da interface, é essencial que ambas as portas do visor permaneçam submersas, conforme observado na Figura 7.2C.

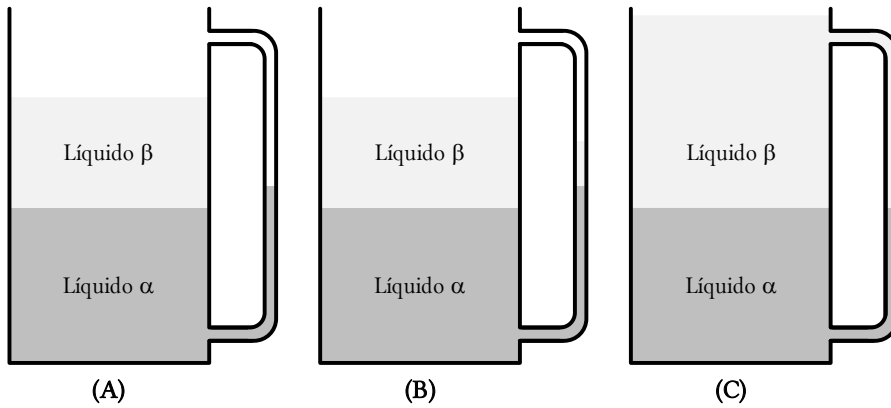


Figura 7.2: Visores de nível instalados em sistema com interface de líquidos ($\rho_\alpha > \rho_\beta$).

7.2.2 Flutuadores

Esses medidores utilizam um flutuador, que pode ser esférico, achatado ou cilíndrico, posicionado sobre o material cujo nível será monitorado. O flutuador pode ser conectado a uma haste, fita ou cabo. Existem variações com **flutuador interno**, **externo** ou **livre**, dependendo da aplicação.

Os medidores com **flutuadores internos** (Figura 7.3) utilizam um flutuador esférico que flutua sobre a superfície do líquido no tanque. Quando o nível varia, o deslocamento vertical do flutuador é convertido em movimento rotacional por meio de uma alavanca, acionando um indicador externo ou ativando um contato magnético. Embora amplamente empregados em tanques abertos, sua aplicação em sistemas pressurizados ou a vácuo requer cuidados adicionais para evitar vazamentos^[9,63].

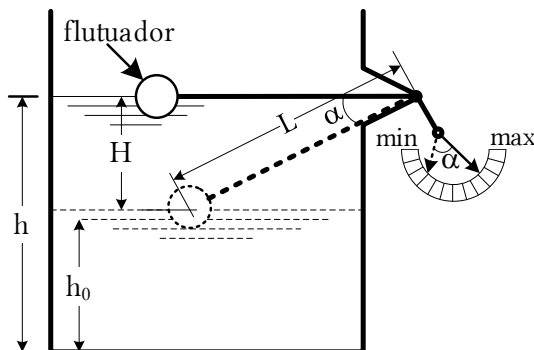


Figura 7.3: Medidor de nível tipo flutuador interno

O deslocamento efetivo do flutuador e o comprimento da haste devem respeitar restrições práticas de instalação e operação. Para assegurar uma resposta eficiente às mudanças de nível, o ângulo α deve permanecer dentro do intervalo de $\pm 30^\circ$ em relação à horizontal. O valor máximo do deslocamento do flutuador pode ser calculado pela Eq. 7.1.

$$\frac{H}{2} = L \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$H = 2L \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (\text{Eq. 7.1})$$

Onde: H – deslocamento efetivo do flutuador (unidade de comprimento que melhor corresponde à medida); L – comprimento da haste do flutuador (mesma unidade de H); α – ângulo da haste do flutuador em relação à horizontal ($^\circ$).

Quando $\alpha = 60^\circ$, o valor de $H_{\max}$ será igual a L, o que significa que a variação máxima do nível medido será determinada pelo comprimento da haste.

EXEMPLO 7.1: Em uma indústria de química, um tanque de armazenamento utiliza um sistema de medição de nível baseado em um flutuador acoplado a uma haste articulada. O tanque possui uma altura total de 10 m, e a haste do flutuador tem um comprimento de 2 m. O sistema permite um ângulo máximo de inclinação da haste de 60° , e

quando a haste está na posição 0° , o nível do tanque é 5 m. Sabendo que, em um determinado instante, o ângulo da haste é de 45° , determine o nível indicado pelo sistema de medição.

O nível do tanque pode ser determinado pela equação: $h = h_0 + H$. Quando a haste está em repouso na base ($\alpha=0^\circ$), o nível inicial é $h_0=5$ m. Para obter o nível final, é necessário calcular o valor de H utilizando a Eq. 7.1.

$$H = 2(2\text{ m})\sin\left(\frac{45}{2}\right) = 1,53\text{ m}$$

Assim o nível do tanque será: $h = (5\text{ m}) + (1,53\text{ m}) = 6,53\text{ m}$ ■

Nos **flutuadores externos** (Figura 7.4A), o flutuador é posicionado em uma câmara externa conectada ao tanque. À medida que o nível do líquido varia, o flutuador se move verticalmente, transmitindo esse deslocamento a um indicador por meio de alavancas. Este sistema é menos influenciado por oscilações na superfície do líquido e é adequado para tanques pressurizados, a vácuo ou com líquidos corrosivos, além de possibilitar a medição de interfaces entre líquidos com densidades diferentes. É especialmente indicado para casos em que o uso de um flutuador interno não é viável. Já os medidores com **flutuadores livres** (Figura 7.4B) operam com um flutuador conectado a uma fita metálica ou cabo em uma extremidade e a um peso na outra. O flutuador se move verticalmente conforme o nível do líquido varia, permitindo medições precisas em faixas de até 30 m^[9,63].

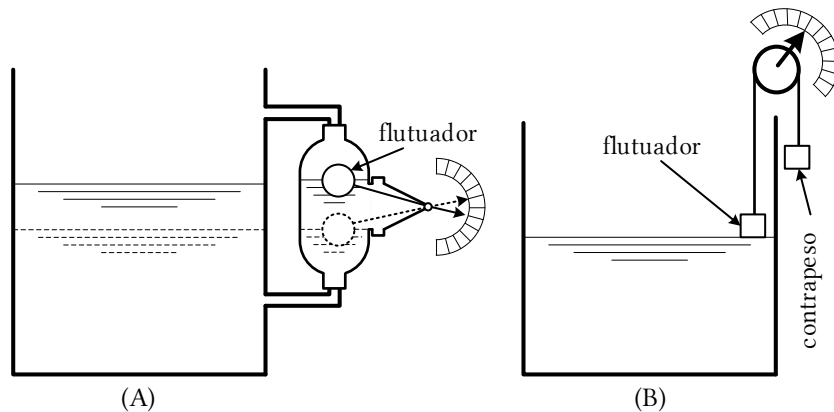


Figura 7.4: Medidor de nível tipo flutuador: (A) externo e; (B) livre

7.2.3 Magnéticos

Os medidores de nível magnéticos funcionam de maneira semelhante aos medidores com flutuadores, mas diferem pela comunicação magnética entre o flutuador e o indicador, conforme Figura 7.5.

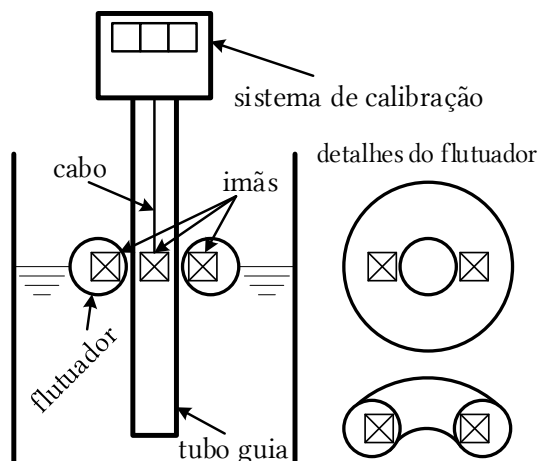


Figura 7.5: Medidor de nível magnético

O flutuador contém um ímã de alta potência que se desloca ao longo de um tubo guia, acompanhando a variação do nível do líquido. Dentro do tubo, outro ímã é acionado pelo movimento do flutuador. Este ímã interno pode estar conectado a um indicador que acompanha seu movimento ou a um cabo integrado a um sistema de calibração/indicação, que fornece a leitura do nível medido^[63].

7.3 Medidores por métodos indiretos

7.3.1 Deslocadores

O método do deslocador é baseado na medição da força resultante (F_R) entre o peso de um corpo e o empuxo causado pelo fluido onde ele está parcialmente submerso. Este princípio, fundamentado na Lei de Arquimedes, afirma que um corpo imerso em um fluido experimenta uma força de empuxo (F_E) equivalente ao peso do fluido deslocado (F_G), Figura 7.6. À medida que o nível do fluido varia, o empuxo aumenta ou diminui, gerando alterações na força percebida. Em sistemas industriais, os deslocadores estão conectados a mecanismos que convertem essas variações em leituras de nível. Para que o deslocador funcione corretamente, sua densidade deve ser maior que a do líquido^[42,49,63,69].

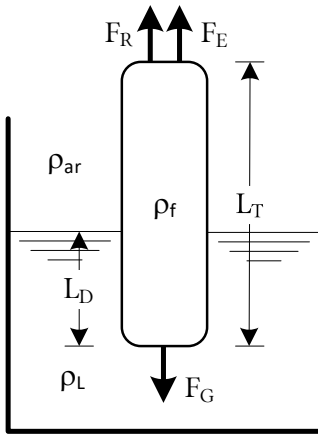


Figura 7.6: Princípio de funcionamento de um deslocador (Princípio de Arquimedes)

A força resultante (peso aparente) corresponde à diferença entre o peso real e o empuxo e constitui a base para a medição, sendo representada pela Eq. 7.2.

$$F_R = F_G - F_E \quad (\text{Eq. 7.2})$$

Onde: F_R – força resultante ou peso aparente (N); F_E – força de empuxo (N); F_G – força peso (N).

A força de empuxo, levando em conta a correção referente ao empuxo do ambiente, é expressa pela Eq. 7.3.

$$F_E = m_L g + m_{ar} g = \rho_L V_{LD} g + \rho_{ar} V_{arD} g \quad (\text{Eq. 7.3})$$

Sendo: $V_{LD} = A_f L_D$ e $V_{arD} = A_f (L_T - L_D)$.

Onde: F_E – força de empuxo (N); m_L – massa de líquido deslocado (kg); m_{ar} – massa de ar deslocado (kg); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); ρ_L – massa específica do líquido (kg m^{-3}); ρ_{ar} – massa específica do ar (kg m^{-3}); V_{LD} – volume de líquido deslocado (m^3); V_{arD} – volume de ar deslocado (m^3); A_f – área da seção transversal do flutuador (m^2); L_D – altura do líquido deslocado (m); L_T – comprimento total do flutuador (m).

O peso do flutuador pode ser determinado pela Eq. 7.4.

$$F_G = m_f g = \rho_f V_f g \quad (\text{Eq. 7.4})$$

Sendo: $V_f = A_f L_T$.

Onde: F_G – força peso (N); g – aceleração da gravidade; ρ_f – massa específica do flutuador (kg m^{-3}); V_f – volume do flutuador (m^3); A_f – área da seção transversal (m^2); L_T – comprimento total do flutuador (m).

Substituindo as Eqs. 7.3 e 7.4 na Eq. 7.2, o peso aparente pode ser calculado da seguinte forma:

$$F_R = \rho_f A_f L_T g - [\rho_L A_f L_D g + \rho_{ar} A_f (L_T - L_D) g] \quad (\text{Eq. 7.5})$$

O deslocador converte a força de empuxo em movimento mecânico, que é traduzido em sinais de leitura por sensores magnéticos ou de efeito Hall. Este método, sem contato direto, é eficaz para medir níveis em tanques contendo líquidos de diferentes densidades ou com interfaces líquido-líquido. Quando dois líquidos de densidades distintas estão presentes, o empuxo combinado é utilizado para identificar a interface. Os instrumentos modernos com deslocadores podem integrar tecnologias avançadas, como microprocessadores, que permitem calibração remota, transmissão de sinais padrão (4 a 20 mA), alarmes e ajustes automáticos. Esses sistemas são amplamente utilizados para medição de níveis em tanques de armazenamento e processos industriais^[49: 63].

EXEMPLO 7.2: Um tanque de armazenamento de água ($\rho=1000 \text{ kg m}^{-3}$) está equipado com um sensor de nível do tipo deslocador. O flutuador desse sensor é fabricado em aço inoxidável 316 ($\rho_f=7900 \text{ kg m}^{-3}$) e possui um diâmetro de 100 mm e um comprimento total de 500 mm. Em um determinado instante, o sistema de medição registra uma força de 290 N. Determine o nível de água deslocado pelo flutuador nesse momento, considerando que a massa específica do ar seja $1,2 \text{ kg m}^{-3}$.

Para determinar o volume de água deslocado, é necessário calcular a altura do nível deslocado por meio da Eq. 7.5. Dessa forma, temos:

$$A_f = \frac{\pi}{4} (0,1 \text{ m})^2 = 0,0079 \text{ m}^2$$

$$L_D = \frac{(0,0079 \text{ m}^2)(0,5 \text{ m})\left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)\left(7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) - \left(300 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}\right)}{(0,0079 \text{ m}^2)\left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)\left(7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}$$

$$L_D = 0,1857 \text{ m}$$

■

7.3.2 Pressão diferencial

A medição de nível de líquido pode ser feita indiretamente pela medição da pressão diferencial (ΔP) causada pela coluna de líquido em um recipiente. A diferença de pressão é determinada pelo teorema de Stevin (Eq. 5.4), e, a massa específica do líquido permanecendo constante, a pressão medida será diretamente proporcional à altura, ou seja, ao nível do líquido no tanque (Eq. 7.6).

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (\text{Eq. 7.6})$$

Onde: h – nível do líquido dentro do recipiente (m); ΔP – pressão diferencial exercida pela coluna de líquido (Pa); ρ – densidade do líquido (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2})

Na medição de nível por pressão diferencial, o fato de o recipiente ser aberto ou fechado influencia diretamente na maneira como o sensor de pressão diferencial será instalado (Figura 7.7).

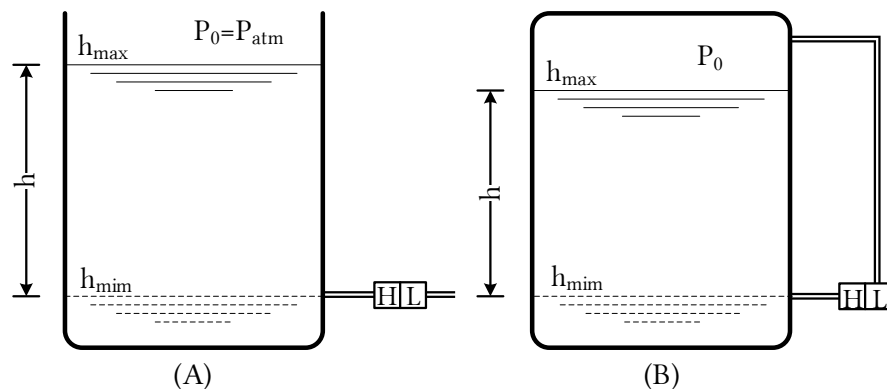


Figura 7.7: Medição de nível por diferencial de pressão: (A) tanque aberto e; (B) tanque fechado

Para **tanques abertos** à atmosfera, o lado de alta pressão do instrumento é conectado à base do tanque, enquanto o lado de baixa pressão é ventilado para a atmosfera. Em **tanques fechados** (pressurizados), o lado de referência também é conectado ao tanque, permitindo que

o instrumento registre apenas a diferença de pressão hidrostática causada pela coluna de líquido. Transmissores de pressão diferencial, como os de diafragma, são amplamente utilizados para medir níveis em tanques abertos ou fechados. Em sistemas pressurizados, esses transmissores subtraem a pressão superficial da pressão total, deixando apenas a pressão gerada pela coluna de líquido, garantindo uma medição precisa do nível [24,42, 49,69,90].

Outro aspecto crucial na medição de nível com sensores de pressão diferencial é o ajuste de elevação e supressão de zero. Na **supressão de zero**, o transmissor é instalado abaixo da base do tanque, o que exige a compensação da pressão adicional gerada pela coluna de líquido entre o transmissor e o tanque. Isso significa que o ponto zero da escala é ajustado para desconsiderar essa pressão extra. Já na **elevação de zero**, o transmissor está posicionado acima da base do tanque, sendo necessário compensar a pressão não detectada pela coluna de líquido abaixo do transmissor. Nesse caso, o ponto zero da escala é ajustado para incluir a pressão perdida devido à diferença de altura entre o transmissor e o tanque. Na Figura 7.8 são apresentadas as configurações típicas de instalações dos sensores de pressão diferencial para a medição de nível.

O cálculo do ajuste de zero para instalações do tipo elevação de zero, aplicadas em tanques abertos e fechados, é determinado pela Eq. 7.7.

$$\Delta P = \rho gh - \rho gy$$

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g} + y \quad (\text{Eq. 7.7})$$

Onde: ΔP – pressão diferencial exercida pela coluna de líquido (Pa); ρ – massa específica do líquido (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); y – posição do sensor de nível (m).

O cálculo do ajuste de zero para instalações do tipo supressão de zero, aplicadas em tanques abertos e fechados, é determinado pela Eq. 7.8.

$$\Delta P = \rho gh + \rho gy$$

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g} - y \quad (\text{Eq. 7.8})$$

Onde: ΔP – pressão diferencial exercida pela coluna de líquido (Pa); ρ – massa específica do líquido (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); y – posição do sensor de nível (m).

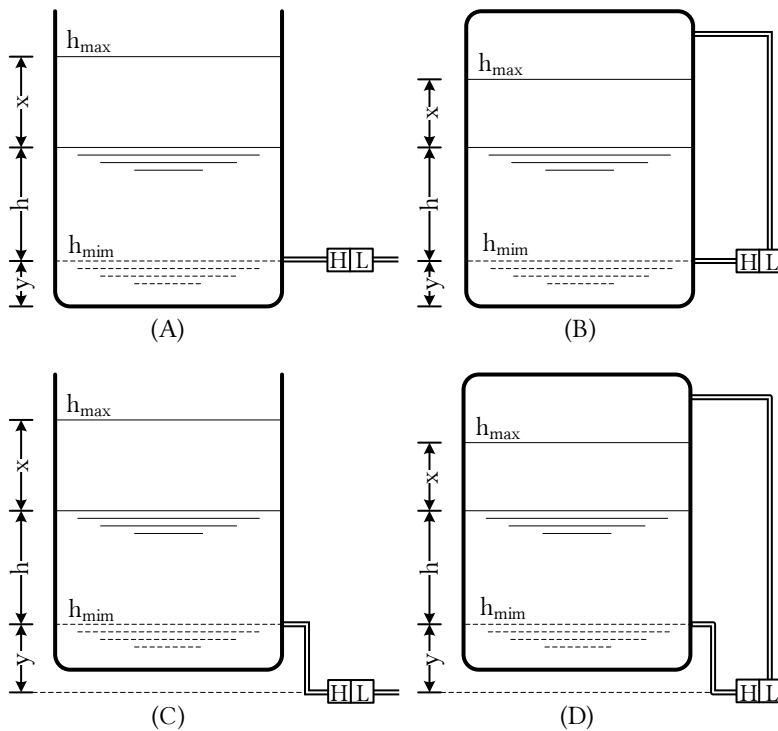


Figura 7.8: Instalação do sensor de pressão diferencial: (A) elevação de zero em tanque aberto; (B) elevação de zero em tanque fechado; (C) supressão de zero em tanque aberto e; (D) supressão de zero em tanque fechado.

EXEMPLO 7.3: Um sensor de nível por pressão diferencial é utilizado para monitorar o nível de um tanque de armazenamento de glicerina ($\rho=1261 \text{ kg m}^{-3}$). Se o sensor registra uma pressão diferencial de 37 kPa, determine o nível do fluido no tanque considerando os seguintes cenários: 1) o sensor está instalado na base do tanque; 2) o sensor está elevado em 20 cm em relação ao zero de medição e; 3) o sensor está instalado com uma supressão de zero de 20 cm abaixo da base do tanque.

Para o cenário 1, o nível do tanque será determinado pela Eq. 7.6:

$$h = \frac{\left(37000 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}\right)}{\left(1261 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 2,99 \text{ m}$$

Para o cenário 2, o nível do tanque será determinado pela Eq. 7.7:

$$h = \frac{\left(37000 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}\right)}{\left(1261 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} + (0,2 \text{ m}) = 3,19 \text{ m}$$

Para o cenário 3, o nível do tanque será determinado pela Eq. 7.8:

$$h = \frac{\left(37000 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}\right)}{\left(1261 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} - (0,2 \text{ m}) = 2,79 \text{ m}$$

7.3.3 Borbulhadores

A medição de nível com borbulhador é eficiente, especialmente para líquidos corrosivos, pois evita o contato direto entre o fluido e o medidor. O sistema utiliza ar comprimido com pressão superior à da coluna líquida (cerca de 20% superior), permitindo que bolhas escapem pelo tubo submerso, indicando a pressão hidrostática e, conseqüentemente, a altura do líquido. O princípio de funcionamento baseia-se na aplicação de uma pressão de ar igual à da coluna líquida presente no recipiente. Essa pressão permite que o ar escape pela extremidade inferior do tubo, formando bolhas, o que confirma que a pressão hidrostática da coluna de líquido foi superada, conforme demonstrado na Figura 7.9. À medida que o nível do líquido aumenta ou diminui, a pressão interna no tubo também varia proporcionalmente, sendo detectada pelo instrumento receptor. Para colunas de líquido mais altas, é necessária uma pressão de ar maior para expulsar as bolhas, enquanto colunas menores requerem pressões de ar mais baixas. Em tanques pressurizados, a conexão do ponto de baixa pressão ao espaço de vapor compensa a pressão acima do líquido. O tubo de imersão deve alcançar o nível mínimo a ser medido. O sistema controla o fluxo de gás de purga para garantir bolhas constantes e leituras confiáveis, embora variações na densidade do líquido possam levar a erros [24,49,63].

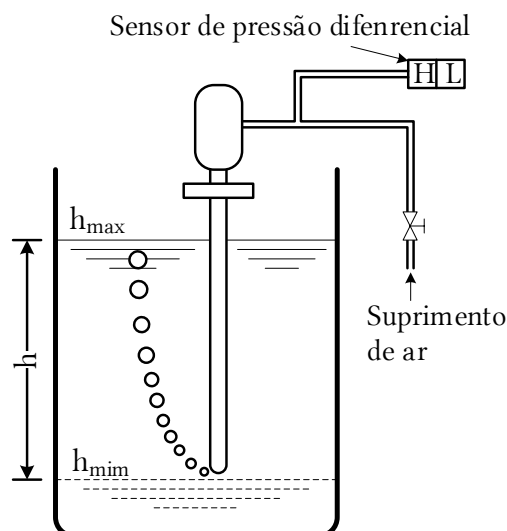


Figura 7.9: Princípio de funcionamento do medidor de nível tipo borbulhador.

Desprezando-se perdas na tubulação e a massa específica do gás, a pressão hidrostática é calculada por meio do teorema de Stevin (Eq. 5.4). Desta forma, o nível será determinado por:

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g} + h_{min} \quad (\text{Eq. 7.9})$$

Onde: h – nível do líquido dentro do recipiente (m); ΔP – pressão diferencial exercida pela coluna de líquido (Pa); ρ – densidade do líquido (kg m^{-3}); g – aceleração da gravidade (m s^{-2})

7.3.4 Capacitivos

As sondas capacitivas são amplamente empregadas para medir o nível de líquidos não condutores e sólidos que fluem livremente. Esses sensores funcionam com base na alteração da capacitância gerada pela presença de materiais dielétricos, como líquidos ou sólidos, entre as placas de um capacitor. Essa capacitância aumenta por um fator proporcional à constante dielétrica do material. Uma aplicação comum de sensores capacitivos envolve o uso de dois cilindros condutores concêntricos ou uma haste metálica dentro de um cilindro. Essas partes atuam como as placas do capacitor, enquanto o líquido dentro do tanque funciona como o dielétrico. Em líquidos condutores, o meio dielétrico não pode ser o próprio líquido, então a sonda é revestida com um material isolante, como plástico, para funcionar como uma das placas do capacitor, enquanto o líquido condutor atua como a outra placa. Conforme demonstrado na Figura 7.10, esse arranjo cria dois capacitores em paralelo: um associado à parte submersa no líquido e outro à seção das placas em contato com o ar. Quando o nível do líquido varia, a capacitância total do sistema também muda proporcionalmente^[6,49,77,90].

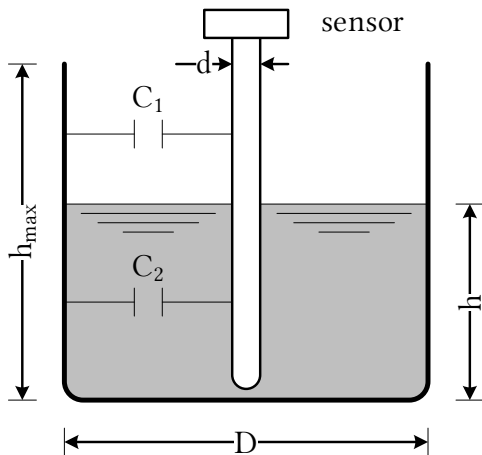


Figura 7.10: Sensor de nível capacitivo com eletrodo cilíndrico coaxial.

A capacitância é a capacidade de armazenar carga elétrica em um circuito, sendo sua magnitude influenciada pela área das placas condutoras, pela distância que as separa e pela constante dielétrica do material isolante entre elas. De acordo com Ripka e Tipek^[72], para sondas cilíndricas coaxiais, a capacitância pode ser determinada utilizando a Eq. 7.10.

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 K L}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (\text{Eq. 7.10})$$

Onde: C – capacitância (F); ϵ_0 – permissividade dielétrica do vácuo, $8,85 \times 10^{-12} \text{ (F m}^{-1}\text{)}$; K – constante dielétrica do material (-); L – comprimento da sonda (m); D – diâmetro do tanque (m); d – diâmetro da sonda (m).

A capacitância total do sistema ilustrado na Figura 7.10 é obtida somando-se a capacitância C_1 (referente à ausência de líquido) com a capacitância C_2 (referente à presença de líquido). Dessa forma, a capacitância total pode ser representada pela Eq. 7.11.

$$C = 2\pi\epsilon_0 K_{ar} \frac{(h_{max} - h)}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} + 2\pi\epsilon_0 K \frac{h}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (7.11)$$

Na Eq. 7.11, $L = h_{max} - h$ representa o comprimento da sonda que não está submersa no líquido ou sólido e $L = h$ o comprimento da sonda que está submersa no líquido ou sólido. Na Tabela 7.2 estão listados os valores das constantes dielétricas de diferentes materiais.

Tabela 7.2: Constante dielétrica^[9].

Estado físico	Material	Constante dielétrica ¹ K
Gases	Ar	1,0
Sólidos	Ácido acético	4,1
	Açúcar	3,0
	Asfalto	4,8
	Carbonato de cálcio	9,1
	Celulose	3,9
	Enxofre	3,4
	Polietileno	4,5
	Polipropileno	1,5
	Sulfato de zinco	8,2
	Ureia	3,5
	Vidro	3,7
Líquidos ²	Ácido clorídrico (28 °C)	4,6
	Água (0 °C)	88
	Água (100 °C)	48
	Água (20 °C)	80
	Amônia (-32 °C)	22,4
	Benzeno (20 °C)	2,3
	Butano (-1 °C)	1,4
	Cloro (0 °C)	2
	Enxofre (400 °C)	3,4
	Etanol (25 °C)	24,3
	Etilbenzeno (20 °C)	2,5
	Glicol (20 °C)	41,2
	Hexano (28 °C)	1,9
	Metanol (25 °C)	33,6
	Propano (0 °C)	1,6
	Querosene (21 °C)	1,8
	Tolueno (20 °C)	2,4

Notas: [1] O valor da constante dielétrica é relativo à permissividade dielétrica do vácuo ($8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$)

[2] Para líquidos a constante dielétrica é influenciada pela temperatura.

EXEMPLO 7.5: Em uma planta química, um tanque de armazenamento cilíndrico vertical é utilizado para ácido clorídrico (HCl). O tanque possui um diâmetro de 1,5 m e uma altura máxima de 3 m. Para monitorar o nível do ácido clorídrico, é empregado um sensor de nível capacitivo, composto por uma sonda coaxial com 20 mm de diâmetro e 3 m de comprimento total. Sabendo que a capacitância medida pelo sensor é de $1,5 \times 10^{-10} \text{ F}$, determine o nível do fluido no tanque.

Para determinar o nível do tanque com um sensor de nível capacitivo, aplica-se a Eq. 7.11. Dessa forma, temos:

Da Tabela 7.2: $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ (F m}^{-1}\text{)}$, $K_{\text{ar}} = 1$ e $K_{\text{HCl}} = 4,6$.

$$h = \frac{\left[\frac{(2\pi)(8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}})(1)(3 \text{ m})}{\ln\left(\frac{1,5}{0,02}\right)} \right] - (1,5 \times 10^{-9} \text{ F})}{\left[\frac{(2\pi)(8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}})(1-4,6)}{\ln\left(\frac{1,5}{0,02}\right)} \right]} = 2,4 \text{ m} \quad \blacksquare$$

7.3.5 Ultrassom

Uma técnica indireta para medição de nível consiste na análise do tempo de eco de uma onda, que pode se propagar sobre a superfície de um líquido ou sólido ou no interior do líquido, conforme observado na Figura 7.11. Essa abordagem é especialmente indicada para situações em que o contato direto entre o instrumento de medição e o líquido deve ser evitado. O método utiliza sensores que podem operar de forma independente, emitindo e recebendo ondas separadamente, ou ainda funcionar simultaneamente como transmissores e receptores. Esses sensores podem ser, por exemplo, transdutores piezoelétricos ultrassônicos ou antenas de radar.

Na propagação da onda sobre a superfície, um sinal modulado é emitido em direção ao material, sendo refletido na superfície e detectado por um sensor. Para a propagação de ondas dentro do líquido, o sensor é posicionado no fundo do reservatório. Nesse caso, é fundamental

conhecer a velocidade do som no líquido, que depende da temperatura e da composição do material. Esse método é análogo ao uso de ecosondas em navios para medir profundidades. Ondas ultrassônicas, com frequências acima de 20 kHz, são amplamente utilizadas devido à sua natureza acústica e longitudinal. Essas ondas refletem na superfície do material com eficiência próxima a 100% e transdutores piezoelétricos, acoplados por membranas, são comumente usados para emissão e recepção do sinal.

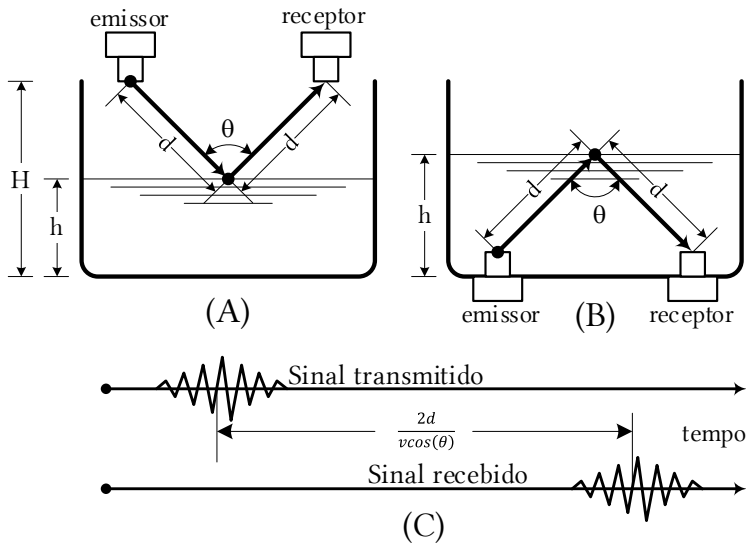


Figura 7.11: Medição de nível por meio de ultrassom: (A) propagação da onda na superfície do líquido; (B) propagação da onda dentro do líquido e; (C) intervalo de tempo entre a emissão e a recepção do sinal (adaptado de [73]).

A medição de nível utilizando sensores ultrassônicos utiliza as propriedades do som para determinar distâncias. Como a velocidade do som em uma dada temperatura é constante e conhecida, o tempo entre a emissão do pulso e o retorno do eco é proporcional à distância entre o sensor e a superfície refletora, considerando o ângulo formado pelo sensor transmissor e receptor (ângulo de incidência). Essa relação é expressa pela Eq. 7.12^[63,68,73]

$$d = \frac{vt \cos(\theta)}{2} \quad (\text{Eq. 7.12})$$

Onde: d – é a distância entre o sensor e a superfície refletora (m); v – velocidade do som no meio (m s^{-1}); t – tempo entre a emissão e o retorno do eco (s); θ – ângulo de incidência da onda na superfície ($^{\circ}$).

Dois fatores essenciais a serem considerados na Eq. 7.12 são a velocidade de propagação do som no meio e a disposição dos sensores emissor e receptor. Segundo Friend^[92], a velocidade do som varia conforme o meio em que se propaga, sendo aproximadamente $347,36 \text{ m s}^{-1}$ no ar a 22°C e 1 atm e $1487,89 \text{ m s}^{-1}$ na água a 27°C e 1 atm. Além disso, quando os sensores estão muito próximos ou quando um único sensor atua simultaneamente como emissor e receptor (Figura 7.11), o ângulo de incidência se torna zero, resultando em $\cos(\theta)=1$.

Quando a medição ocorrer por meio da propagação da onda na superfície do líquido (Figura 7.11A), o nível será determinado pela Eq. 7.13. Por outro lado, caso a medição seja realizada com a propagação da onda dentro do líquido (Figura 7.11B), o nível será diretamente expresso pela Eq. 7.12.

$$h = H - d \quad (\text{Eq. 7.13})$$

Onde: h – nível do reservatório (m); H – altura máxima do recipiente (m); d – distância entre o sensor e a superfície refletora (m).

EXEMPLO 7.6: Um sensor de nível ultrassônico com propagação na superfície do líquido é instalado em um tanque contendo água a 50°C , cuja altura máxima é de 5 m. O emissor e o receptor da onda ultrassônica operam com um ângulo de incidência de 60° , e o tempo medido entre a emissão e o retorno do eco é de 5 ms. Com base nesses dados, determine o nível do líquido indicado pelo sensor.

O nível do tanque será calculado utilizando a Eq. 7.13. Para isso, é necessário determinar a distância entre o sensor e a superfície refletora, que pode ser obtida por meio da Eq. 7.12.

A velocidade do som para água a 50° é $v=1542,25 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$ ^[92].

$$d = \frac{(1542,25 \frac{m}{s})(5 \times 10^{-3} s)(\cos(60^\circ))}{2} = 1,91 \text{ m}$$

$$h = (5 \text{ m}) - (1,91 \text{ m}) = 3,09 \text{ m}$$

■

7.3.6 Radioativos

Um método eficiente para a medição de nível baseia-se no uso de radiação gama emitida por fontes radioativas, como ^{60}Co , ^{137}Ce ou ^{226}Ra . Nesse sistema, uma fonte de radiação é estrategicamente posicionada em um lado do recipiente, enquanto um detector é instalado no lado oposto. A quantidade de radiação que atravessa o recipiente e atinge o detector depende diretamente do volume de líquido presente, permitindo a determinação precisa do nível do fluido (Figura 7.12). Esse método é particularmente vantajoso em aplicações onde medições convencionais não são viáveis, como em ambientes de alta temperatura, pressão ou em fluidos corrosivos. A medição de nível por radiação pode ser realizada tanto para detecção em um único ponto quanto para monitoramento contínuo. Embora o princípio de funcionamento seja o mesmo, a configuração dos equipamentos varia conforme a aplicação^[6,42,49,69].

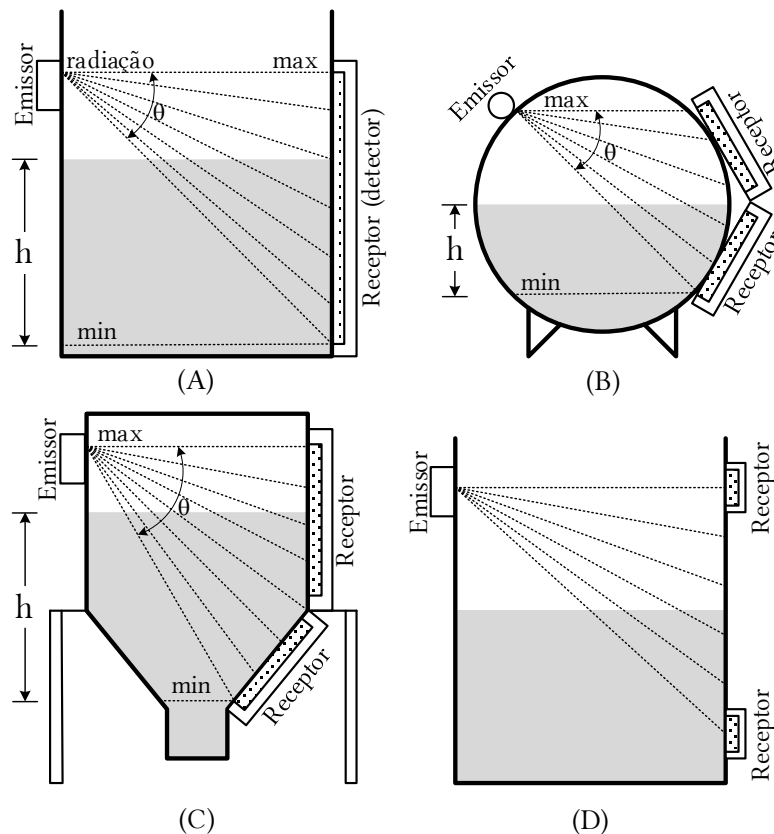


Figura 7.12: Medição de nível por radiação: (A-C) – medição contínua de nível; (D) – medição pontual de nível (adaptado de [36]).

Na medição pontual de nível por radiação, uma fonte radioativa é instalada de um lado do recipiente e um detector com amplificador no lado oposto. Dependendo da aplicação, podem ser utilizados vários detectores para medir o nível em diferentes pontos, considerando fatores como tamanho da fonte, espaçamento e diâmetro do recipiente. Para segurança, a fonte é blindada com chumbo, e o detector mais comum é o tubo Geiger-Mueller. Os raios gama atravessam o tanque e o material armazenado, sofrendo atenuação conforme a quantidade de líquido presente. Quando o nível atinge o detector, a radiação captada diminui, acionando um relé de controle. Embora eficaz para medições pontuais, a medição contínua é recomendada para múltiplos pontos^[6,42,49,69].

A medição contínua por radiação gama pode ser realizada de duas formas. Na primeira, uma fonte pontual emite radiação para um detector estendido ao longo da faixa de medição. Conforme o nível do líquido sobe, a absorção da radiação aumenta, reduzindo a quantidade de raios gama captados, mas com resposta não linear. Na segunda configuração, múltiplas fontes irradiam diferentes células de medição, minimizando distorções. Detectores como câmaras de ionização e cintiladores convertem a radiação em sinais elétricos proporcionais ao nível do fluido. Embora esse método seja caro, é altamente confiável quando outras tecnologias são inviáveis. No entanto, recipientes de paredes espessas e variações de densidade podem afetar a medição, exigindo calibração e ajustes operacionais.

Independentemente da configuração do sistema de medição, a quantidade de radiação detectada depende da absorção dos raios gama pelo fluido contido no reservatório. A intensidade da radiação captada pelo detector é correlacionada ao percurso da onda através da equação de Lambert-Beer (Eq. 7.14), permitindo a determinação do nível, representado pela Eq. 7.15.

$$I = I_0 e^{(-\mu \rho x)} \quad (\text{Eq. 7.14})$$

$$\text{Sendo: } x = \frac{h}{\cos(\theta)}.$$

$$h = \left[\frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{\mu \rho} \right] \cos(\theta) \quad (\text{Eq. 7.15})$$

Onde: I – intensidade de radiação gama detectada (contagem); I_0 – intensidade de radiação emitida (contagem); μ – coeficiente de absorção mássica ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$); ρ – densidade do fluido (kg m^{-3}); x – comprimento do trajeto da onda (m); h – nível do reservatório (m); θ – ângulo de abertura do feixe de raios gama ($^\circ$).

7.3.7 Por pesagem

A medição de nível por pesagem utiliza células de carga instaladas no reservatório para converter a força exercida pelo material armazenado em peso. Essas células, compostas por *strain-gauges* fixados em um bloco de aço, detectam a deformação elástica causada pela carga, resultando em variações de resistência elétrica que permitem a medição precisa do peso (Figura 7.13).

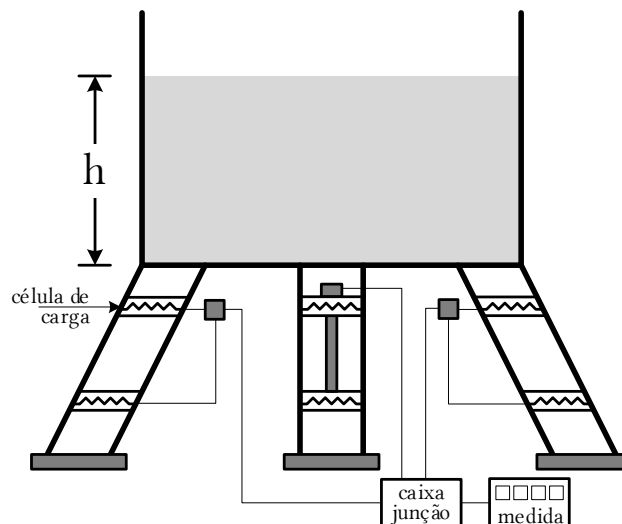


Figura 7.13 – Medição de nível por pesagem.

Esse método se destaca por não exigir contato direto com o fluido, porém requer uma estrutura projetada para esse fim. Fatores como desgaste estrutural, acúmulo de resíduos e influências externas podem comprometer a precisão, exigindo ajustes de zero e calibrações frequentes. Em casos em que outras técnicas de medição falham, a pesagem pode ser uma solução confiável, especialmente para recipientes sujeitos a temperaturas elevadas ou conteúdos altamente viscosos. No entanto, para garantir resultados precisos, o sistema deve ser projetado para esse tipo de medição, pois a adaptação de células de carga em recipientes não preparados pode comprometer a precisão [49,63,90].

A força peso exercida pelo material armazenado, medida pela célula de carga, é determinada pela Eq. 7.16. Com base nessa força e conhecendo a geometria do reservatório e a massa específica do material, o nível pode ser calculado de acordo com a Eq. 7.17.

$$F_P = mg \quad (\text{Eq. 7.16})$$

$$\text{Sendo: } m = m_r + m_f; m_f = \rho V \text{ e } V = Ah$$

$$h = \frac{F_P - m_r g}{A \rho g} \quad (\text{Eq. 7.17})$$

Onde: h – nível do material armazenado (m); F_P – força peso exercida na célula de carga pelo material (N); m – massa total do sistema de medição (kg); m_r – massa do reservatório (kg); m_f – massa do material armazenado (fluido ou sólido) (kg); ρ – massa específica do material armazenado (kg m^{-3}); V – volume ocupado pelo material (m^3); A – área da seção transversal do reservatório (m^2); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}).

Em tanques suportados por várias células de carga (Figura 7.13), a leitura total do peso pode ser a soma das forças medidas por todas as células, ou seja, $F_P = \sum_{i=1}^n F_{Pi}$, onde F_{Pi} são as leituras individuais das células de carga.

EXEMPLO 7.7: Uma indústria de alimentos armazena molho de tomate ($\rho=1200 \text{ kg m}^{-3}$) em grandes tanques de armazenamento. Para otimizar o controle de nível e garantir a eficiência no processo de enchimento e esvaziamento, a empresa implementou um sistema de medição de nível por pesagem. O tanque é sustentado por 4 células de carga, possui um diâmetro de 3 m, altura máxima de 4 m, espessura de 10 mm e é fabricado em aço inoxidável 316 ($\rho=7600 \text{ kg m}^{-3}$). Em um determinado momento, as células de carga registram os seguintes valores: $F_{P1}=54 \text{ kN}$, $F_{P2}=55 \text{ kN}$, $F_{P3}=55,5 \text{ kN}$ e $F_{P4}=53,5 \text{ kN}$. Com base nessas informações, determine o nível do molho de tomate indicado no sistema.

Para resolver este problema, utilizamos a Eq. 7.17. Primeiro, determinamos a força peso total medida (F_P), a massa do reservatório (m_r) e a área da seção transversal do tanque (A) onde o fluido está armazenado.

$$\text{A força peso total será: } F_P = \sum_{i=1}^n F_{Pi} = 218 \text{ kN}$$

$$\text{A massa do reservatório será: } m_r = \rho_r V_r$$

$$\text{Sendo: } V_r = \frac{\pi}{4} d^2 H - \frac{\pi}{4} (d - 2e)^2 (H - e)$$

$$V_r = \frac{\pi}{4} (3 \text{ m})^2 (4 \text{ m}) - \frac{\pi}{4} (3 \text{ m} - 2 \times 0,01 \text{ m})^2 (4 \text{ m} - 0,01 \text{ m})$$

$$V_r = 0,4455 \text{ m}^3$$

$$m_r = \left(7600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0,4455 \text{ m}^3) = 3385,7 \text{ kg}$$

A área da seção transversal é:

$$A = \frac{\pi}{4} (3 \text{ m} - 2 \times 0,01 \text{ m})^2 = 6,975 \text{ m}^2$$

$$h = \frac{\left[218000 \text{ N} - (3385,7 \text{ kg}) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \right]}{(6,975 \text{ m}^2) \left(1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} = 2,25 \text{ m} \quad \blacksquare$$

7.3.8 Chaves de nível

As chaves de nível são dispositivos projetados para monitorar pontos fixos de nível em equipamentos, garantindo ações operacionais ou de segurança quando esses pontos são atingidos. Elas podem ativar bombas, alarmes ou iniciar sequências automáticas conforme um nível predeterminado. Seu funcionamento se baseia em dois estados: energizado e desenergizado, dependendo da detecção do nível pelo sensor. Cada chave é composta por um detector de nível e um circuito de saída, onde o detector identifica a presença ou ausência do

fluido e o circuito responde alterando seu estado. Alguns tipos de chaves de nível são apresentados a seguir.

- **Chave de Nível Tipo Boia:** Utiliza um flutuador que se move conforme o nível do líquido, acionando um interruptor mecânico ou magnético. É confiável e amplamente utilizada.
- **Chave de Nível Vibratória:** Composta por uma haste ou garfo vibratório cuja frequência muda ao entrar em contato com o material. Ideal para sólidos granulados e líquidos viscosos.
- **Chave de Nível Capacitiva:** Mede variações na capacitância causadas pela presença ou ausência do material entre o sensor e a parede do tanque, sendo aplicável a líquidos e sólidos condutivos ou não.
- **Chave de Nível Condutiva:** Baseia-se na condutividade elétrica do líquido. Quando o fluido atinge os eletrodos, uma corrente elétrica é estabelecida, ativando o dispositivo. Indicada para líquidos condutivos.
- **Chave de Nível Ultrassônica:** Utiliza ondas ultrassônicas refletidas na superfície do líquido para detectar sua presença sem contato direto. Ideal para substâncias corrosivas ou aplicações que exigem isolamento.
- **Chave de Nível por Pressão Diferencial:** Mede a diferença de pressão entre dois pontos do tanque para determinar o nível do líquido, sendo comum em processos que exigem alta precisão.

Cada tipo de chave de nível deve ser escolhido com base nas características do processo, do material a ser monitorado e das condições operacionais.

Capítulo 8

Analísadores

Os analisadores industriais são ferramentas vitais para a otimização de processos, a garantia da qualidade e a segurança ambiental, permitindo a medição contínua e precisa de propriedades físico-químicas essenciais. Este capítulo detalha os princípios operacionais de instrumentos para monitoramento de densidade, viscosidade, pH, umidade e turbidez, abordando tecnologias específicas como células de carga hidrostática, medidores Coriolis, viscosímetros capilares, rotativos e ultrassônicos, eletrodos de vidro, sensores de umidade capacitivos e resistivos, e turbidímetros nefelométricos. São exploradas as leis físicas regentes, como as de Poiseuille, Stokes e Lambert-Beer, além das equações matemáticas de conversão e compensação térmica. Ao final, o leitor será capaz de compreender profundamente a física por trás de cada método analítico, aplicar cálculos complexos para dimensionamento e interpretação de leituras, identificar as limitações técnicas de cada sensor e selecionar criteriosamente a tecnologia ideal para assegurar a eficiência produtiva e a conformidade estrita com normas operacionais em variados contextos industriais.

Os analisadores são instrumentos sofisticados que transformam propriedades físicas e químicas de amostras em sinais elétricos, permitindo a quantificação precisa de variáveis como densidade, viscosidade, pH, umidade, composição e turbidez. Originários dos laboratórios, esses equipamentos foram adaptados para operar em linha, proporcionando medições contínuas ou por amostragem em processos industriais. Ao fornecer dados em tempo real sobre a qualidade dos produtos e matérias-primas, os analisadores desempenham um papel crucial na otimização de processos.

Assim como os demais sensores já tratados, os analisadores asseguram a conformidade dos produtos com as especificações, reduzindo a ocorrência de desvios (controle de qualidade); contribuem para a estabilidade dos processos, minimizando oscilações e desvios indesejados (redução da variabilidade); e permitem a detecção precoce de desvios e a tomada de ações corretivas, evitando perdas de material e energia. Na indústria de utilidades, os analisadores garantem a qualidade da água, vapor e ar utilizados nos processos, prevenindo a corrosão de equipamentos e otimizando o consumo de recursos. No setor ambiental, são essenciais para o monitoramento e controle da poluição, contribuindo para a sustentabilidade e o cumprimento das normas regulatórias.

Em resumo, os analisadores são ferramentas indispensáveis para a indústria moderna, proporcionando informações precisas e em tempo real sobre a qualidade dos produtos e processos. Ao otimizar a produção e garantir a conformidade com os padrões de qualidade e segurança, os analisadores contribuem para a eficiência e a sustentabilidade das operações industriais.

8.1 Medição de massa específica (densidade)

A densidade, definida como a massa por unidade de volume, é uma propriedade fundamental utilizada para determinar características como concentração, composição e teor energético de combustíveis, além de ser essencial em aplicações de fluxo de massa e volumétrico. A medição da densidade é crucial em processos industriais, não apenas para conhecer a densidade em si, mas também para inferir a composição ou concentração de substâncias em soluções ou suspensões. Instrumentos como densímetros medem automaticamente a densidade, muitas vezes baseando-se em princípios como **peso, fluabilidade, carga hidrostática, ressonância, radiação e efeito Coriolis**. A densidade dos gases, por ser muito baixa, requer instrumentos altamente sensíveis, enquanto a densidade de líquidos, pouco afetada pela pressão, é amplamente utilizada em aplicações industriais, sempre

considerando a influência da temperatura para garantir precisão. A seguir são apresentados alguns métodos de determinação de massa específica.

8.1.1 Por carga hidrostática

A medição da massa específica de líquidos por meio da carga hidrostática (ou pressão diferencial) baseia-se no Teorema de Stevin e segue o mesmo princípio da medição de nível por pressão diferencial (veja [Capítulo 7](#)). A Figura 8.1 ilustra o esquema desse método, onde a diferença de pressão (ΔP) entre os pontos 1 e 2 é medida, mantendo fixa a distância (h) entre os pontos de tomada de pressão. Na Figura 8.1A, observa-se uma coluna de líquido acima do ponto de medição 1, cuja altura pode variar ao longo do tempo. Em contraste, na Figura 8.1B, essa variação não ocorre, pois há uma saída no reservatório, garantindo que o nível do fluido permaneça constante.

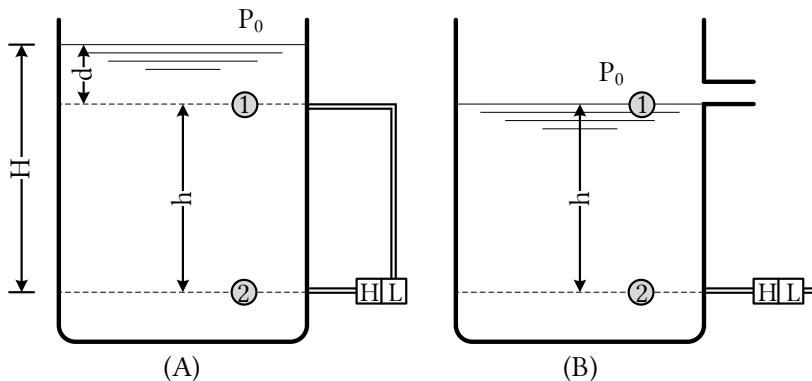


Figura 8.1: Determinação da massa específica de líquidos: (A) reservatório com líquido acima do ponto de medição de pressão baixa e; (B) reservatório sem líquido acima do ponto de medição de pressão baixa.

Utilizando a Eq. 7.6 (veja [Seção 7.3.2](#)), podemos determinar os dois níveis (d e H) do reservatório representado na Tabela 8.1A.

$$d = \frac{P_1 - P_0}{\rho g} \quad (\text{Eq. 8.1})$$

$$H = \frac{P_2 - P_0}{\rho g} \quad (\text{Eq. 8.2})$$

Sendo $h = H - d$, temos:

$$h = \left(\frac{P_2 - P_0}{\rho g} \right) - \left(\frac{P_1 - P_0}{\rho g} \right) = \frac{P_2 - P_1}{\rho g}$$

Como o valor de h é conhecido, a massa específica pode ser determinada utilizando a Eq. 8.3.

$$\rho = \frac{P_2 - P_1}{hg} = \frac{\Delta P}{hg} \quad (\text{Eq. 8.3})$$

Onde: ρ - massa específica (kg m^{-3}); $\Delta P = P_2 - P_1$ - pressão diferencial entre os pontos de medição fixos 1 e 2 (Pa); h - distância entre as tomadas de pressão (m); g - aceleração da gravidade (m s^{-2})

Se a tomada de pressão for instalada conforme ilustrado na Figura 8.1B, a diferença de pressão será dada por $\Delta P = P_2 - P_0$.

8.1.2 Por borbulhadores

Assim como a medição de massa específica por pressão diferencial, a medição utilizando borbulhadores também se baseia no Teorema de Stevin e no princípio dos medidores de nível do tipo borbulhador (veja [Capítulo 7](#)). Nesse método, conhecendo-se a distância entre a extremidade do tubo submerso do borbulhador e a superfície do líquido, a massa específica do fluido pode ser determinada a partir da pressão necessária para vencer a coluna de líquido (Figura 7.9). Aplicando a Eq. 7.9 (veja [Seção 7.3.3](#)), a massa específica do líquido pode ser calculada como:

$$\rho = \frac{P_B}{hg} \quad (\text{Eq. 8.4})$$

Onde: ρ - massa específica (kg m^{-3}); P_B - pressão necessária para vencer a coluna de líquido; h - distância da extremidade do tubo submerso e a superfície do líquido (m); g - aceleração da gravidade (m s^{-2})

8.1.3 Por Efeito Coriolis

O medidor de vazão por efeito Coriolis (veja [Seção 6.3.8](#)) possui a capacidade de medir tanto a vazão mássica de um fluido quanto sua massa específica. Com base na Eq. 6.42, a massa específica pode ser determinada pela Eq. 8.5.

$$\rho = \frac{F_c}{2\omega vAL}$$

Onde: ρ - massa específica do fluido (kg m^{-3}); F_c - força de corilis (N); ω - velocidade angular (rad s⁻¹); A - área da seção transversal do segmento da tubulação do sensor (m^2); L - comprimento do segmento da tubulação do sensor (m); v - velocidade do fluido (m s^{-1})

Como a força de Coriolis, a área da seção transversal do segmento da tubulação do sensor e o comprimento do segmento da tubulação são variáveis conhecidas do sensor, e a velocidade do fluido é determinada pelo próprio sistema, a massa específica pode ser expressa pela Eq. 8.6.

$$\rho = \frac{K_C}{v} \frac{1}{\omega} \quad (\text{Eq. 8.6})$$

$$\text{Sendo: } K_C = \frac{F_c}{2AL}$$

Onde: K_C - constante do sensor ($\text{kg s}^{-2} \text{m}^{-2}$).

Como K_C é uma constante característica do sensor, a massa específica pode ser expressa em função da velocidade angular (ω), a qual é determinada pela frequência de oscilação (f) do tubo gerada pela força de Coriolis, ou seja, $\omega = 2\pi f$.

8.2 Medição de viscosidade

A viscosidade é uma propriedade mecânica essencial dos fluidos, influenciando diversos sistemas, desde o escoamento em tubulações e a circulação sanguínea até a lubrificação de componentes mecânicos. De acordo com Coulson e Richardson^[58] e Fox et al.^[64], a viscosidade pode ser definida como a resistência de um fluido ao escoamento. Essa resistência ocorre devido às forças de atração intermoleculares, que dificultam qualquer alteração no movimento do fluido. O conceito oposto à viscosidade é a fluidez.

Quando uma força é aplicada a um fluido em repouso, suas camadas moleculares tendem a deslizar umas sobre as outras. A resistência a esse movimento, expressa matematicamente pela Eq. 8.7, caracteriza a viscosidade do fluido.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau y}{v} \quad (\text{Eq. 8.7})$$

$$\text{Sendo: } \tau = \frac{F}{A}$$

Onde: μ - viscosidade dinâmica (Pa s); τ - tensão de cisalhamento (Pa); $\dot{\gamma}$ - taxa de deformação (s^{-1}); y - distância entre as camadas do fluido (m); v - velocidade relativa (m s^{-1}); F - força de resistência ao movimento (N); A - área da superfície em movimento (m^2).

Os viscosímetros são instrumentos desenvolvidos para medir a viscosidade de um fluido com base em sua resistência ao escoamento. A forma como o fluido se comporta dentro da estrutura do viscosímetro determina as taxas de deformação, enquanto as tensões resultantes refletem sua resistência ao fluxo. Caso a taxa de deformação ou a tensão sejam previamente controladas, a outra variável será diretamente influenciada pela viscosidade do fluido, desde que todas as demais condições permaneçam inalteradas^[73].

O princípio fundamental dos viscosímetros é proporcionar um fluxo cinematicamente simples, preferencialmente unidimensional, permitindo a determinação precisa da taxa de deformação de cisalhamento, independentemente do tipo de fluido analisado. A resistência ao escoamento (F/A) é quantificada, possibilitando o cálculo da tensão de cisalhamento (τ). Dessa forma, a viscosidade dinâmica (μ) é obtida como a razão entre a tensão de cisalhamento e a

taxa de deformação correspondente (v/y).

O fluxo de um fluido pode ser gerado de diferentes maneiras, como pelo **arrasto causado por uma superfície deslizante ou rotativa**, pela **movimentação de um corpo através do fluido**, ou ainda pelo **escoamento forçado devido a uma pressão externa ou à ação da gravidade**. Esse fluxo pode ocorrer dentro de uma geometria fixa, como um **tubo capilar**, **um anel**, **uma fenda entre duas placas paralelas** ou **um orifício**. A resistência ao escoamento é então medida por meio da **força ou torque aplicado nas bordas do fluido**, ou **pela queda de pressão ao longo da geometria**.

De acordo com Webster^[73], obter um fluxo perfeitamente unidimensional e uma geometria ideal na prática é um grande desafio. Diversos fatores podem interferir na medição, resultando em erros que precisam ser avaliados. Na Tabela 8.1 são apresentadas as principais causas de erro em viscosímetros.

Tabela 8.1 - Fontes de incertezas na medição com viscosímetros

Erro/Efeito	Causa/Comentário
Efeito de borda	Perda de energia durante a entrada e saída do fluido na geometria de teste.
Perdas de energia cinética	Conversão de pressão em energia cinética, resultando em perda de pressão efetiva.
Fluxo secundário	Desenvolvimento de fluxos indesejados, como vórtices e recirculações, que aumentam com o número de Reynolds.
Geometria não ideal	Pequenas variações no formato, alinhamento ou acabamento da geometria podem comprometer a precisão da medição.
Não uniformidade da taxa de cisalhamento	Essencial para medições de fluidos não newtonianos, onde a taxa de deformação pode variar dentro da amostra.
Variação de temperatura e aquecimento viscoso	Mudanças de temperatura ao longo do tempo ou do espaço afetam a viscosidade medida.
Turbulência	Mesmo em baixos números de Reynolds, pode ocorrer turbulência localizada que compromete a estabilidade do fluxo.
Tensão superficial	Diferenças nas tensões interfaciais podem afetar a medição, especialmente em fluidos com alta capilaridade.
Efeitos elásticos	Podem surgir tanto devido às características estruturais do fluido quanto ao comportamento elástico do equipamento.
Efeitos diversos	Incluem fenômenos como tixotropia ⁽¹⁾ , reopexia ⁽²⁾ e outras propriedades reológicas do fluido em teste.

Notas: (1) Propriedade de certos fluidos cuja viscosidade diminui sob cisalhamento e retorna ao estado original em repouso. Exemplos incluem tintas, géis e ketchup, que fluem mais facilmente quando agitados.

(2) propriedade de certos fluidos cuja viscosidade aumenta sob cisalhamento e retorna ao estado original em repouso. Exemplos incluem alguns géis e suspensões, que se tornam mais espessos quando agitados.

A medição da viscosidade de líquidos e gases apresenta características distintas devido às diferenças fundamentais entre esses dois estados da matéria. Líquidos possuem viscosidade muito maior e altamente sensível à temperatura, diminuindo conforme a temperatura aumenta, e são pouco afetados pela pressão. Podem apresentar comportamento não-newtoniano, exigindo métodos como viscosímetros rotacionais ou capilares. Já os gases têm viscosidade muito menor, que aumenta com a temperatura e é praticamente independente da pressão em condições normais. Seu comportamento é geralmente newtoniano, e métodos como o fluxo capilar e correlações teóricas (como a equação de Sutherland) são comuns.

Os **viscosímetros de tubo capilar** são exemplos de instrumentos baseados em escoamento forçado. Na categoria de viscosímetros que utilizam a movimentação de um corpo através do fluido, destaca-se o **viscosímetro de esfera descendente**. Já entre os viscosímetros que medem a resistência ao fluxo por arrasto gerado por uma superfície deslizante ou rotativa, os **viscosímetros rotativos** são os mais representativos.

8.2.1 Viscosímetro de tubo capilar

Em 1840, Poiseuille^[93,94] formulou a lei que descreve o escoamento laminar de um fluido newtoniano em um tubo cilíndrico. A Lei de Poiseuille relaciona a vazão de um fluido newtoniano viscoso às características do tubo pelo qual ele escoar, conforme a Eq. 8.8.

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\mu L} \quad (\text{Eq. 8.8})$$

Sendo: $Q = \frac{V}{t}$, a viscosidade pode ser determinada pela Eq. 8.9.

$$\mu = \frac{\pi r^4 \Delta P t}{8VL} \quad (\text{Eq. 8.9})$$

Onde: μ - viscosidade dinâmica (Pa s); ΔP - diferença de pressão entre as extremidades do tubo capilar (Pa); r - raio do tubo capilar (m); t - tempo de escoamento do fluido pelo tubo capilar (s); V - volume que flui pelo tubo capilar no tempo t (m³); L - comprimento do tubo capilar (m).

Como as dimensões do viscosímetro são conhecidas, podemos reescrever a Eq. 8.9 como:

$$\mu = K \Delta P t \quad (\text{Eq. 8.10})$$

$$\text{Sendo: } K = \frac{\pi r^4}{8VL}.$$

Onde: K - constante do viscosímetro (-).

A Eq. 8.9, e consequentemente a Eq. 8.10, é válida para a determinação da viscosidade de líquidos. No caso dos gases, é necessário introduzir a equação de estado dos gases ideais, sendo o volume do gás representado pela Eq. 8.11.

$$V = \frac{mRT}{Mp} \quad (\text{Eq. 8.11})$$

$$\text{Sendo: } n = \frac{m}{M}$$

Onde: V - volume do tubo capilar (volume do gás no tubo) (m³); m - massa de gás que escoou pelo tubo capilar (kg); T - temperatura do gás (K); M - massa molar do gás (kg kmol⁻¹); p - pressão que se encontra o gás no tubo capilar (Pa); R - constante universal dos gases ideais (Pa m³ kmol⁻¹ K).

Substituindo a Eq. 8.11 na Eq. 8.9, obtém-se a expressão para a viscosidade do gás determinada por meio de um viscosímetro do tipo tubo capilar.

$$\mu = \frac{\pi r^4 \Delta P M p t}{8L R T m} \quad (\text{Eq. 8.12})$$

Os viscosímetros do tipo tubo capilar mais utilizados incluem o viscosímetro de Ostwald, aplicado principalmente na medição da viscosidade de soluções líquidas e solventes, e os viscosímetros de Engler e Saybolt, comumente empregados na análise de óleos lubrificantes.

Viscosímetro de Ostwald

O viscosímetro de Ostwald determina a viscosidade de um líquido com base na comparação com uma substância de referência. Seu princípio consiste em medir o tempo de escoamento de um fluido de viscosidade conhecida (geralmente a água) e compará-lo ao tempo de escoamento do fluido cuja viscosidade se deseja determinar. Aplicando a Eq. 8.9 para ambos os fluidos, temos^[62,63]:

$$\mu_1 = \frac{\pi r^4 \Delta P_1 t_1}{8VL} \quad (\text{Eq. 8.13})$$

$$\mu_2 = \frac{\pi r^4 \Delta P_2 t_2}{8VL} \quad (\text{Eq. 8.14})$$

Considerando que ambos os fluidos escoam sob o mesmo volume e nas mesmas condições ambientais, e utilizando a relação $\Delta P = \rho gh$ (Teorema de Stevin), a viscosidade pode ser determinada pela razão entre μ_1 e μ_2 , conforme apresentado na Eq. 8.15.

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2} \quad (\text{Eq. 8.15})$$

Onde: μ_1 - Viscosidade do fluido padrão (Pa s); μ_2 - viscosidade do fluido analisado (Pa s); ρ_1 - massa específica do fluido padrão (kg m⁻³); ρ_2 - massa específica do fluido analisado (kg m⁻³); t_1 - tempo de escoamento do fluido padrão (s); t_2 - tempo de escoamento do fluido analisado (s).

O viscosímetro de Saybolt (Figura 8.2) determina a viscosidade de um fluido com base no tempo necessário para que um volume fixo escoe por um orifício padronizado, mantendo-se o fluido a temperatura constante durante todo o ensaio^[62]. O método de medição está descrito nas normas ASTM D88-07:2013^[95] e ASTM E102/E102M-93^[96], que regulam os procedimentos de ensaio para determinação da viscosidade Saybolt. O viscosímetro de Saybolt dispõe de dois tipos de orifícios padronizados: o **Universal** e o **Furol**.

Conforme especificado na norma ASTM D88-07:2013^[95], o orifício Universal é recomendado para a medição da viscosidade de lubrificantes e destilados com tempos de escoamento superiores a 32 s. No entanto, para fluidos cujo tempo de escoamento ultrapasse 1000 s, seu uso não é indicado devido à ausência de dados experimentais confiáveis nessa faixa. Já o orifício Furol é destinado à análise de materiais residuais, sendo recomendado para líquidos com tempos de escoamento superiores a 25 s, proporcionando maior precisão para fluidos mais viscosos.

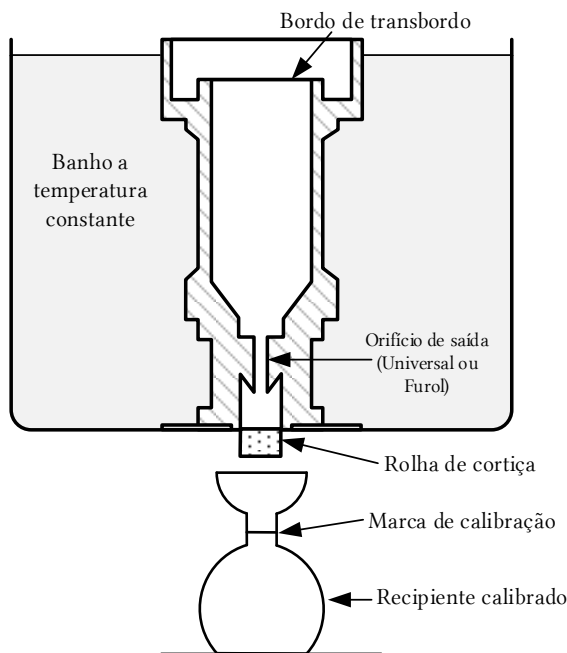


Figura 8.2: Viscosímetro de Saybolt

O **orifício Universal** é o mais amplamente utilizado, e os resultados obtidos são expressos em Segundos Saybolt Universal (SSU). A medição consiste em registrar o tempo necessário para que 60 cm³ de fluido escoem por um orifício com 1,76 mm de diâmetro e 12,25 mm de comprimento, sob temperatura controlada. Por sua vez, a medição com o **orifício Furol** segue o mesmo princípio, sendo o tempo necessário para que 60 cm³ de fluido escoem por um orifício de 3,15 mm de diâmetro e 12,25 mm de comprimento, com os resultados expressos em Segundos Saybolt Furol (SSF)^[95].

Os valores de viscosidade SSU e SSF podem ser convertidos em viscosidade cinemática (v) por meio das seguintes equações^[97]:

$$U_{(100\text{ }^{\circ}\text{F})} = 4,6324v + \frac{1+0,03264v}{(3930,2+262,7v+23,97v^2+1,646v^3)\times 10^{-5}} \quad (\text{Eq. 8.16})$$

$$U_{(t)} = v[1 + 0,000061(t - 100)] \text{ SSU}_{(100\text{ }^{\circ}\text{F})} \quad (\text{Eq. 8.17})$$

$$F_{(122\text{ }^{\circ}\text{F})} = 0,4717v + \left[\frac{13924}{(v^2 - 72,59v + 6816)} \right] \quad (\text{Eq. 8.18})$$

$$F_{(210\text{ }^{\circ}\text{F})} = 0,4792v + \left[\frac{5610}{(v^2 + 2130)} \right] \quad (\text{Eq. 8.19})$$

Onde: $U_{(100\text{ }^{\circ}\text{F})}$ – viscosidade Segundos Saybolt Universal a 100 °F (SSU); $SSU_{(t)}$ – viscosidade Segundos Saybolt Universal a t °F (SSU); t – temperatura do ensaio diferente de 100 °F (°F); v – viscosidade cinemática (m² s⁻¹); $F_{(122\text{ }^{\circ}\text{F})}$ – viscosidade Segundos Saybolt Furol a 122 °F (SSF); $F_{(210\text{ }^{\circ}\text{F})}$ – viscosidade Segundos Saybolt Furol a 210 °F (SSF).

8.2.2 Viscosímetro de esfera descendente

A lei formulada por Stokes^[98] descreve a força de resistência viscosa atuante sobre uma esfera em movimento em um fluido, sob condições de baixa velocidade, caracterizando um escoamento laminar. Essa força é expressa pela Eq. 8.20:

$$F = 6\pi\mu r v \quad (\text{Eq. 8.20})$$

Onde: F – força de arrasto (N); μ – viscosidade absoluta (Pa s); r – raio da esfera (m); v – velocidade da esfera em relação ao fluido (m s^{-1})

Com base nesse princípio, o viscosímetro de esfera descendente (Figura 8.3) configura-se como um dos métodos mais antigos e simples para a determinação da viscosidade absoluta de fluidos newtonianos. Seu funcionamento consiste em permitir a queda livre de uma esfera através de um líquido viscoso, determinando sua velocidade terminal ou o tempo necessário para que a esfera percorra a distância entre dois pontos fixos de medição^[24,29,62,73]. A partir da Eq. 8.20, a viscosidade absoluta do fluido pode então ser calculada por meio da Eq. 8.21.

$$\mu = \frac{2r^2 g \Delta \rho t}{9d} \quad (\text{Eq. 8.21})$$

Sendo: $\Delta \rho = \rho_e - \rho_l$.

Onde: μ – viscosidade absoluta (Pa s); r – raio da esfera (m); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); $\Delta \rho$ – diferença entre a massa específica da esfera e a massa específica do líquido (kg m^{-3}); ρ_e – massa específica da esfera (kg m^{-3}); ρ_l – massa específica do líquido (kg m^{-3}); d – distância entre os pontos fixos de medição (m); t – tempo necessário para percorrer a distância d (s).

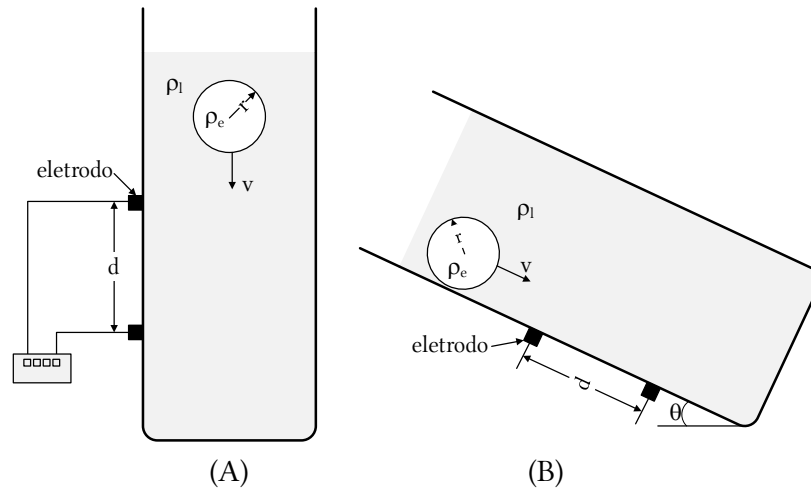


Figura 8.3: Viscosímetros de esfera descendente: (A) em tubo reto; (B) em tubo inclinado.

Quando uma esfera se desloca em um tubo inclinado e seu tamanho é muito pequeno em comparação com o diâmetro do tubo, a viscosidade absoluta do fluido pode ser calculada com base na Eq. 8.22^[99].

$$\mu = \frac{r^2 g \Delta \rho t}{d} \sin(\theta) \quad (\text{Eq. 8.22})$$

Onde: μ – viscosidade absoluta (Pa s); r – raio da esfera (m); g – aceleração da gravidade (m s^{-2}); $\Delta \rho$ – diferença entre a massa específica da esfera e a massa específica do líquido (kg m^{-3}); d – distância entre os pontos fixos de medição (m); t – tempo necessário para percorrer a distância d (s); θ – ângulo de inclinação do tubo ($^\circ$).

8.2.3. Viscosímetro rotativo

O viscosímetro rotativo baseia-se na medição do torque necessário para manter constante a rotação de um cilindro (ou outro corpo geométrico) imerso em um fluido. Esse princípio explora a resistência ao movimento rotacional imposta pelo fluido ao corpo submerso em rotação. Na configuração mais comum, o fluido é colocado entre dois cilindros concêntricos: o interno (rotor), que gira a uma velocidade angular constante, e o externo, que permanece fixo. O torque necessário para vencer a resistência viscosa do fluido é então medido (Figura 8.4). Essa resistência está diretamente relacionada à viscosidade do fluido, conforme descrito pela lei da viscosidade de Newton (Eq. 8.7).

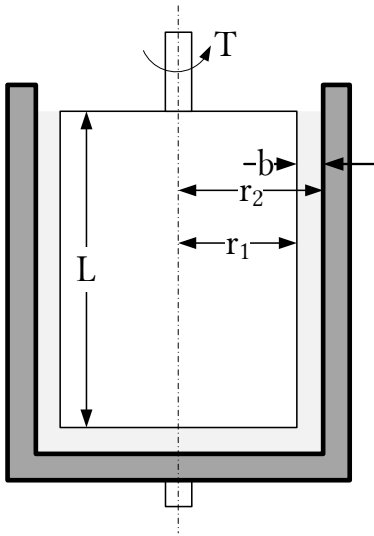


Figura 8.4: Viscosímetro rotacional (cilindros concêntricos)

Nesses viscosímetros, a distância entre o cilindro fixo e o cilindro rotativo é mantida muito pequena. Essa configuração garante uma **taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) uniforme** em toda a amostra de fluido. Nessa condição, a taxa de deformação pode ser expressa por^[99]:

$$\dot{\gamma} = \frac{r_2 \omega}{r_2 - r_1} \quad (\text{Eq. 8.23})$$

Onde: $\dot{\gamma}$ – taxa de deformação (s^{-1}); r_1 – raio do cilindro interno (m); r_2 – raio do cilindro externo (m); ω – velocidade angular (s^{-1}).

A tensão de cisalhamento (τ) é definida como a força por unidade de área aplicada na superfície do cilindro interno. Considerando que o torque aplicado no cilindro interno é T , a força tangencial correspondente é dada por $F = \frac{T}{r_1}$. A área da superfície lateral onde essa força atua é $A = 2\pi r_1 L$. Assim, a tensão de cisalhamento pode ser expressa por:

$$\tau = \frac{T}{2\pi r_1^2 L} \quad (\text{Eq. 8.24})$$

Onde: τ – tensão de cisalhamento (Pa); T – torque aplicado no cilindro interno (N m); r_1 – raio do cilindro interno (m); L – comprimento do cilindro interno (m).

Substituindo as Eq. 8.23 e 8.24 na Eq. 8.7, obtém-se uma expressão para a viscosidade absoluta em função do torque aplicado no cilindro interno e da velocidade angular resultante do sistema.

$$\mu = \frac{Tb}{2\pi r_1^2 r_2 L \omega} \quad (\text{Eq. 8.25})$$

Onde: μ – viscosidade absoluta (Pa s); T – torque aplicado no cilindro interno (N m); b – diferença entre os raios do cilindro externo e cilindro interno (m); r_1 – raio do cilindro interno (m); r_2 – raio do cilindro externo (m); L – comprimento do cilindro interno (m); ω – velocidade angular (s^{-1}).

A viscosidade pode ser determinada por dois métodos distintos: no modo **controlado por tensão** (*controlled-stress*), aplica-se um torque constante e mede-se a velocidade angular resultante; já no modo **controlado por deformação** (*controlled-rate*), fixa-se a velocidade angular e mede-se o torque necessário para mantê-la.

8.2.4 Viscosímetro por ultrassom

O viscosímetro por ultrassom determina a viscosidade de um fluido com base na propagação de ondas acústicas de alta frequência através do meio. Seu princípio de funcionamento consiste em analisar a atenuação e o amortecimento dessas ondas, uma vez que a absorção acústica está diretamente relacionada à viscosidade dinâmica, à massa específica do fluido e à frequência da onda. Quando uma onda ultrassônica percorre um fluido viscoso, parte de sua energia é dissipada devido aos efeitos internos de viscosidade, fenômeno conhecido como atenuação acústica (Figura 8.5). Por ser um método não invasivo, o

viscosímetro por ultrassom é particularmente adequado para aplicações em que se requer monitoramento em tempo real, análise de fluidos não-newtonianos ou situações industriais em que os métodos convencionais, como os rotacionais, não são viáveis^[29,73,99].

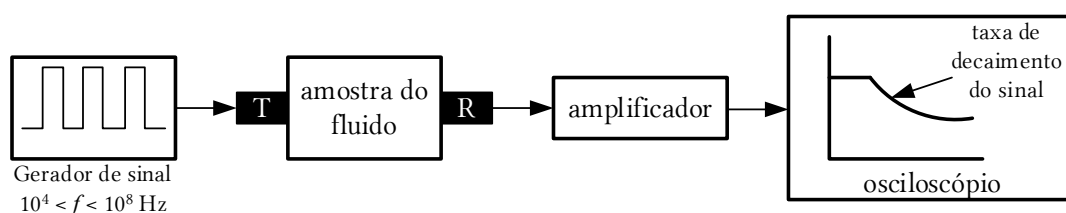


Figura 8.5: Princípio da medição de viscosidade por ultrassom

A taxa de decaimento do sinal ultrassônico recebido e amplificado é registrada pelo osciloscópio em função do tempo. Esse comportamento pode ser descrito pela Eq. 8.26^[29,73]

$$A = A_0 e^{-[b+(\alpha c)]t} \quad (\text{Eq. 8.26})$$

Onde: A – amplitude do sinal recebido (V); A₀ – amplitude inicial do sinal (V); b – constante do sistema (de calibração) (s⁻¹); α – coeficiente de absorção da onda pelo líquido (m⁻¹); c – velocidade do som no fluido (m s⁻¹); t – tempo (s).

A partir da taxa de decaimento do sinal recebido, é possível determinar o coeficiente de absorção da onda pelo líquido (α). Em condições de baixas frequências, a viscosidade absoluta pode ser calculada utilizando a Eq. 8.27. É importante destacar que, para líquidos, a contribuição da viscosidade volumétrica é geralmente desprezível nessa equação.

$$\mu = \frac{3}{4} \left[\left(\frac{\alpha \rho c^3}{2\pi^2 f^2} \right) - \mu_v \right] \quad (\text{Eq. 8.27})$$

Onde: μ – viscosidade absoluta (Pa s); α – coeficiente de absorção da onda pelo líquido (m⁻¹); ρ – massa específica do fluido (kg m⁻³); c – velocidade do som no fluido (m s⁻¹); f – frequência do sinal de ultrassom (s⁻¹); μ_v – viscosidade volumétrica (Pa s).

8.3 Medição de pH

O pH é uma escala numérica adimensional utilizada para indicar o grau de acidez ou basicidade de uma solução aquosa. Inicialmente, o pH foi definido por Sørensen e Linderstrøm-Lang^[100] como o logaritmo negativo da concentração de íons hidrogênio em solução, conforme representado pela Eq. 8.28.

$$pH = -\log_{10}[H^+] \quad (\text{Eq. 8.28})$$

Onde: pH – potencial hidrogeniônico (-); [H⁺] – concentração de íons de hidrogênio (mol L⁻¹).

Com o avanço dos estudos sobre o comportamento de solutos iônicos em solução, verificou-se que as técnicas utilizadas na medição de pH determinam, na verdade, a atividade dos íons hidrogênio – também conhecida como concentração efetiva. Assim, a definição moderna de pH, proposta por Kilpatrick e Kilpatrick^[101], passou a ser o logaritmo negativo da atividade do íon hidrogênio em solução, como expressa pela Eq. 8.29.

$$pH = -\log_{10} a_{H^+} = -\log_{10} \gamma[H^+] \quad (\text{Eq. 8.29})$$

Onde: pH – potencial hidrogeniônico (-); a_{H⁺} – atividade do íon hidrogênio (-); γ – coeficiente de atividade (-); [H⁺] – concentração de íons de hidrogênio na solução (mol L⁻¹)

A medição eletroquímica de pH baseia-se na utilização de dispositivos que convertem a atividade dos íons hidrogênio (H⁺) em sinais eletrônicos, como uma diferença de potencial ou uma variação na condutância elétrica. Trata-se de uma das técnicas analíticas mais amplamente empregadas na indústria, dada a influência significativa do pH sobre inúmeros processos químicos. Setores como o de alimentos, tratamento de água, indústria farmacêutica, geração de vapor em usinas termelétricas e fabricação de bebidas alcoólicas fazem uso intensivo da medição – e do controle – de pH. Além disso, o pH é um fator crítico na corrosão de tubulações e vasos metálicos que conduzem soluções aquosas, tornando seu monitoramento essencial para prolongar a vida útil de equipamentos e proteger os investimentos industriais.

O método mais comum para medir pH é o eletrodo de membrana de vidro (Figura 8.6), que converte a atividade de íons hidrogênio em uma diferença de potencial elétrico. Esse

potencial é medido entre um eletrodo indicador e um eletrodo de referência, geralmente combinados em uma única sonda. A membrana de vidro gera um potencial dependente do pH por meio de troca iônica entre os íons H^+ da amostra e os cátions do vidro. Devido à elevada resistência elétrica da membrana de vidro, o medidor de pH deve possuir alta impedância de entrada, de modo a evitar que o circuito retire corrente significativa do eletrodo e, assim, garantir a exatidão da medição do potencial. O eletrodo de referência mantém o contato elétrico com a amostra por meio de uma junção líquida, que pode afetar a precisão e confiabilidade da medição. Os eletrodos modernos utilizam vidros formulados com sílica, óxidos de metais alcalinos e alcalino-terrosos, que conferem seletividade e estabilidade. A maioria dos pHmetros atuais conta com microprocessadores para calibração automática, compensação de temperatura e diagnósticos^[49,73].

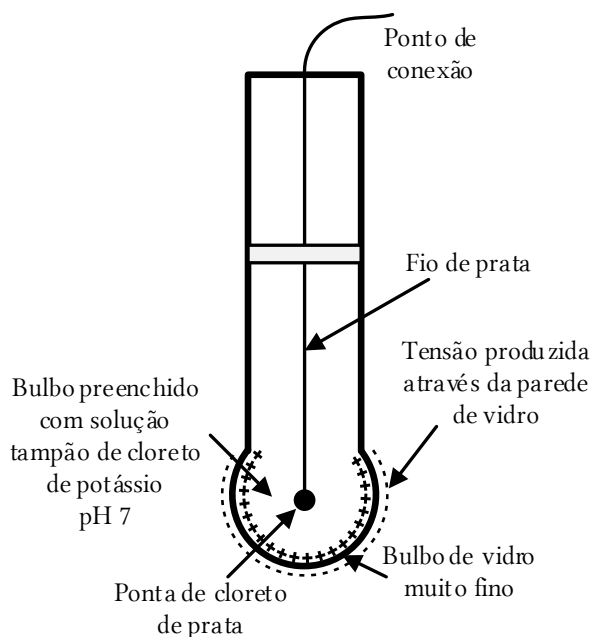


Figura 8.6: Princípio de funcionamento do pHmetro de eletrodo de membrana de vidro.

Assim como em outras medições analíticas potenciométricas, a determinação eletroquímica do pH é fundamentada na Equação de Nernst^[102], que descreve o potencial elétrico gerado pela diferença de concentração iônica entre duas soluções separadas por uma membrana seletivamente permeável a íons.

$$V = 2,303 \frac{RT}{nF} \log_{10} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (\text{Eq. 8.30})$$

Onde: V – tensão produzida através da membrana devido à troca iônica (V); R – constante universal dos gases ($J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); T – temperatura absoluta (K); n – número de elétrons transferidos por íon trocado (–); F – constante de Faraday ($C \text{ (mol e}^{-1})^{-1}$); C_1 – concentração do íon na solução medida (mol L^{-1}); C_2 – concentração do íon na solução de referência (mol L^{-1})

8.4 Medição de umidade

Para compreendermos a medição de umidade, é essencial entendermos alguns conceitos fundamentais^[103,104]: **umidade absoluta** (U_A), **umidade relativa** (U_R) e **umidade específica** (U_E).

A **umidade absoluta** representa a massa de vapor d'água contida em um determinado volume de ar seco. Sua determinação pode ser expressa pela Eq. 8.31.

$$U_A = \frac{m_v}{V} = \frac{p_v}{R_v T} \quad (\text{Eq. 8.31})$$

Onde: U_A – umidade absoluta (kg m^{-3}); m_v – massa de vapor d'água (kg); V – volume de ar seco (m^3); M_v – massa molar do vapor d'água (kg kmol^{-1}); p_v – pressão parcial do vapor d'água (Pa); $R_v = R/M_v$ – constante específica do gás para o vapor ($J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); T – temperatura do ar (K).

A **umidade relativa**, por sua vez, é uma medida percentual que indica o quão próximo o ar está da saturação. Ela é definida como a razão entre a pressão parcial do vapor d'água presente no ar e a pressão de saturação do vapor à mesma temperatura. Esse parâmetro é

amplamente utilizado por refletir a sensação térmica e as condições ambientais percebidas no cotidiano e é determinada pela Eq. 8.32.

$$U_R = \frac{p_v}{p} \quad (\text{Eq. 8.32})$$

Onde: U_R – umidade relativa (-); p_v – pressão parcial do vapor d'água (Pa); p – pressão de saturação do vapor (ou pressão máxima de vapor) (Pa).

Já a **umidade específica** corresponde à razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco na mistura. Trata-se de uma medida útil em processos de engenharia e climatização, pois se mantém constante durante mudanças de temperatura, desde que não ocorra condensação ou adição de vapor. A umidade específica é expressa pela Eq. 8.33.

$$U_E = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_v p_v}{M_a (P - p_v)} \quad (\text{Eq. 8.33})$$

Onde: U_E – umidade específica (kg kg^{-1}); m_v – massa de vapor d'água (kg); m_a – massa de ar seco (kg); M_v – massa molar do vapor (kg kmol^{-1}); p_v – pressão parcial do vapor (Pa); M_a – massa molar do ar (kg kmol^{-1}); P – pressão total (Pa).

O monitoramento da umidade relativa (U_R) é indispensável em diversos contextos industriais, como nas indústrias farmacêutica, alimentícia, eletrônica e têxtil, bem como em ambientes controlados, incluindo salas cirúrgicas, laboratórios, museus e bibliotecas. No setor agrícola, o controle da umidade também desempenha papel crucial. A presença indesejada de umidade pode comprometer as propriedades físicas de materiais, afetar a estabilidade de produtos e favorecer a contaminação e a degradação de ambientes e insumos. Na Tabela 8.2, são apresentados os impactos da U_R para diversos setores e aplicações.

Tabela 8.2: Impactos da umidade relativa (U_R) e condições ideais por setor

Setor	Problemas causados pela umidade inadequada	UR recomendada
Indústria eletrônica / semicondutores	Descarga eletrostática, falhas em circuitos	35% – 45%
Indústria farmacêutica	Higroscopicidade, alteração da estabilidade e prazo de validade	40% – 55%
Processamento de alimentos	Crescimento microbiano, alteração de textura e shelf life	50% – 60%
Indústria têxtil	Ruptura de fibras, eletricidade estática, variação na qualidade do fio	45% – 60%
Indústria de papel e celulose	Enrugamento, ondulação e variação na gramatura e impressão	50% – 55%
Museus, arquivos e bibliotecas	Mofo, degradação de papel, tintas e materiais históricos	45% – 55%
Salas cirúrgicas e hospitais	Proliferação de microrganismos, desconforto térmico	50% – 60%
Laboratórios químicos/biológicos	Interferência em reações químicas e medições, contaminações	45% – 55%
Armazenamento de grãos e sementes	Fermentação, mofo, perda de viabilidade	< 65%
Setor gráfico / impressão	Enrugamento do papel, má qualidade de impressão	45% – 55%

Na medição de umidade, há diversos tipos de sensores disponíveis, entre os quais se destacam os **higrômetros** e os **psicrômetros**. Os higrômetros funcionam com base na variação da capacitância ou da condutividade de um material higroscópico — ou seja, que absorve a umidade do ambiente — em resposta às mudanças na umidade do ar. Entre os higrômetros, destacam-se os sensores de umidade relativa do tipo **capacitivo** e **resistivo**.

Já os psicrômetros utilizam dois sensores de temperatura: um exposto diretamente ao ambiente e outro mantido em condições específicas, geralmente selado. Entre os psicrômetros, destaca-se o sensor de **umidade absoluta por condutividade térmica**, que se baseia na diferença de transferência de calor entre ar seco e ar úmido.

8.4.1 Sensor de umidade relativa capacitivo

Uma forma de se medir a umidade relativa é por meio do princípio da capacitância. A umidade relativa do ar influencia diretamente sua permissividade elétrica. Com base nesse princípio, é possível utilizar o ar como meio dielétrico em capacitores que atuam como sensores de umidade relativa. Uma alternativa ao uso do ar é empregar um material isolante cuja constante dielétrica apresente variações significativas em função das mudanças na umidade relativa. A relação da permissividade elétrica e a umidade relativa pode ser representada pela Eq. 8.34^[68].

$$k = 1 + \frac{211}{T} \left(P + \frac{48p}{T} U_R \right) 10^{-6} \quad (\text{Eq. 8.34})$$

Onde: k – permissividade elétrica (–); T – temperatura do meio (K); P – pressão total do ar úmido (Pa); p – pressão de saturação do vapor (ou pressão máxima de vapor) (Pa). U_R – umidade relativa (%); constante 211 (K Pa⁻¹); constante 48 (K).

Sendo: $\alpha = \frac{211 \times 10^{-6} P}{T} + \frac{211 \times 48 \times 10^{-6} p}{T^2}$, a Eq. 8.35 pode ser escrita como:

$$k = 1 + \alpha U_R \quad (\text{Eq. 8.35})$$

A capacitância será proporcional à umidade relativa de acordo com a Eq. 8.36.

$$C_h = kC_0 = (1 + \alpha U_R)C_0 \quad (\text{Eq. 8.36})$$

Onde: C_h – capacitância em uma dada umidade relativa (pF); k – permissividade elétrica (–); α – constante de proporcionalidade em função de P , p e T (–); C_0 – capacitância quando $U_R=0$ (pF).

O sensor pode ser construído na forma de filme-fino (thin-film), conforme observado na Figura 8.7.

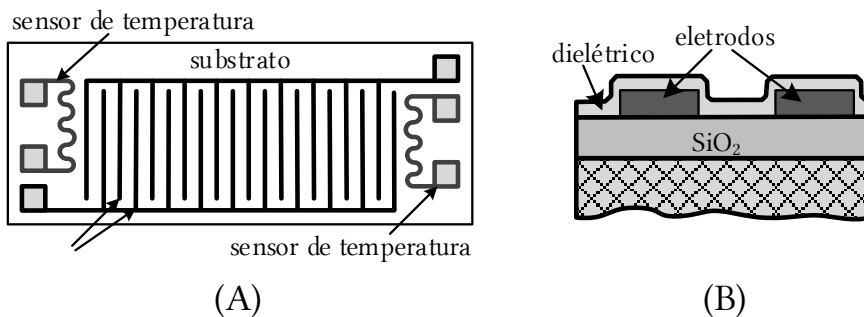


Figura 8.7: (A) Sensor de umidade relativa capacitivo (thin-film) e; (B) Seção transversal do thin-film (adaptado de [68]).

8.4.2 Sensor de umidade relativa resistivo

Outra abordagem para medir a umidade relativa é baseada na variação da impedância de um sensor resistivo em resposta às mudanças na umidade do ambiente. Esses sensores são, em geral, constituídos por eletrodos metálicos depositados sobre um substrato polimérico condutivo. O material sensível é aplicado sobre eletrodos com formato de pentes entrelaçados, o que proporciona uma ampla área de contato (Figura 8.8)^[3,63,68].

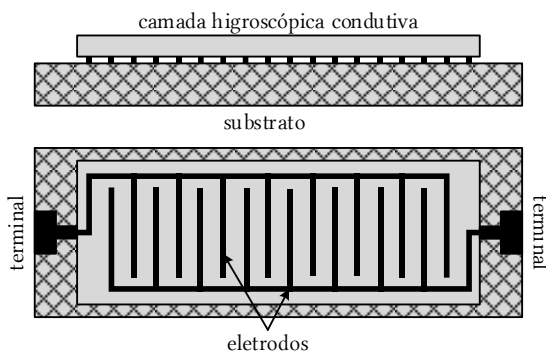


Figura 8.8: Sensor de umidade relativa resistivo (adaptado de [68])

À medida que moléculas de água são absorvidas pela camada sensível, ocorre uma alteração na resistividade entre os eletrodos, a qual pode ser detectada eletronicamente. A umidade relativa é então calculada utilizando-se a Eq. 8.37^[63] (válida para $5^{\circ}\text{C} \leq T \leq 45^{\circ}\text{C}$).

$$U_R = ACZ^{\left(\frac{T}{DT+B}\right)} \quad (\text{Eq. 8.37})$$

Onde: U_R – umidade relativa (%); Z – impedância ($\text{M}\Omega$); T – temperatura (K); A, B, C, D – constantes em função da impedância (unidades ver Tabela 8.3).

Tabela 8.3 – Valores das constantes do sensor resistivo em função da faixa de impedância (adaptado de [63])

Faixa de Z [$\text{M}\Omega$]	A (–)	B (K)	C (Ω^{-1})	D (–)
$Z > 30$	2.795953	-1304.992	0.129985	4.067295
$12 < Z \leq 30$	10.833240	-1315.021	28.188570	3.016073
$5 < Z \leq 12$	29.290390	-1347.797	49399.250000	1.993527
$0.05 < Z \leq 5$	2.797110	-4340.667	100848.400000	9.437572
$0.005 < Z \leq 0.05$	5.729313	-2976.170	19934420.000000	4.242907
$Z \leq 0.005$	3.158756	-3549.363	1247857.000000	5.748199

8.4.3 Sensor de umidade absoluta por condutividade térmica

Sensores de umidade absoluta baseados em condutividade térmica utilizam termistores como elemento sensível. O sistema é composto por dois termistores: um exposto ao ambiente e outro hermeticamente selado contendo ar seco (Figura 8.9).

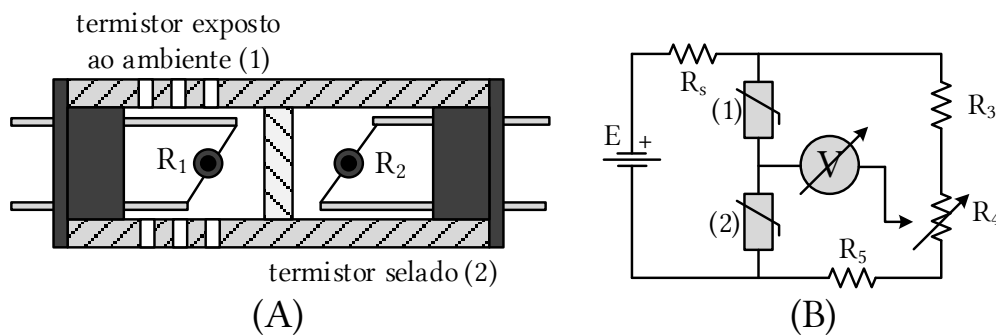


Figura 8.9: (A) Sensor de umidade absoluta com termistor e; (B) circuito condicional para o sensor (adaptado de [63,68])

Ambos sofrem autoaquecimento devido à passagem de corrente elétrica, e a diferença na condutividade térmica entre o ar seco e o ar úmido provoca uma variação de temperatura entre eles. Essa diferença gera uma tensão de saída proporcional à umidade absoluta do ar. Por exemplo, um sensor desse tipo pode fornecer uma saída de 0 a 13 mV para uma faixa de medição de 0 a 130 g m^{-3} . A relação entre a umidade absoluta (U_A) e a umidade relativa (U_R), válida para temperaturas de até 60°C , é dada pela Eq. 8.38^[63].

$$U_R = \frac{U_A(273,3+T)}{13,243e^{\left(\frac{17,269T}{237,16+T}\right)}} \quad (\text{Eq. 8.38})$$

Onde: U_R – umidade relativa (%); U_A – umidade absoluta (g m^{-3}); T – temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$); constante 13,243 ($\text{m}^3 \text{ g}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

8.5 Medição de turbidez

O **turbidímetro** é um instrumento utilizado para medir a turbidez de líquidos, ou seja, a concentração de partículas em suspensão que causam a dispersão da luz. Esse equipamento é amplamente empregado em análises de qualidade da água, bebidas, efluentes industriais e em processos laboratoriais^[105,106].

Seu princípio de funcionamento baseia-se na **dispersão da luz** pelas partículas presentes no fluido, fenômeno conhecido como **espalhamento óptico** — mais especificamente, **espalhamento nefelométrico**, quando a luz espalhada é medida em um ângulo definido. Conforme apresentado na Figura 8.10, uma fonte de luz, como um LED ou laser, incide sobre a amostra, e as partículas em suspensão provocam a dispersão do feixe luminoso. Quanto maior a concentração de partículas, maior será a intensidade da luz espalhada. Um ou mais detectores posicionados, geralmente a 90° da fonte, captam essa luz dispersa. A intensidade

ou potência detectada é então convertida em uma unidade de turbidez, como NTU (*Nephelometric Turbidity Units*), JCU (*Jackson Candle Unit*) e FTU (*Formazine Turbidity Unit*), de acordo com a configuração e a calibração do equipamento^[73].

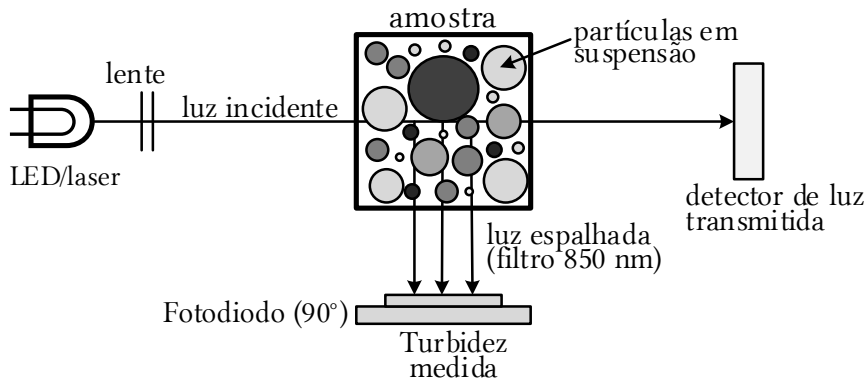


Figura 8.10: Princípio do funcionamento do turbidímetro.

A Lei de Lambert-Beer descreve os efeitos combinados da absorção e da turbidez sobre a intensidade da luz transmitida. Esses efeitos podem ser expressos em função da intensidade luminosa (Eq. 8.39) ou da potência da luz transmitida (Eq. 8.40)^[73].

$$I_T = I_0 e^{-(\alpha+\tau)l} \quad (\text{Eq. 8.39})$$

$$P_T = P_0 e^{-(\alpha+\tau)l} \quad (\text{Eq. 8.40})$$

Onde: I_T – intensidade da luz transmitida (W m^{-2}); I_0 – intensidade da luz incidente (W m^{-2}); P_T – potência transmitida (W); P_0 – potência incidente (W); α – coeficiente de absorção (m^{-1}); τ – turbidez (m^{-1}); l – comprimento do caminho da luz na amostra (m).

A extinção da radiação em um meio ocorre devido a dois processos físicos principais: o **espalhamento** e a **absorção**. Quando tanto o meio quanto as partículas presentes são não absorventes, a extinção se deve exclusivamente ao espalhamento. A turbidez está diretamente relacionada à concentração de partículas por unidade de volume (n) e à seção transversal de espalhamento (C) de cada partícula. Essas partículas desviam a luz de sua trajetória original, reduzindo a quantidade de radiação transmitida que chega ao detector. A relação entre a turbidez e a potência da luz transmitida pode ser descrita pela Eq. 8.41^[73].

$$P_T = P_0 e^{-(nCl)} \quad (\text{Eq. 8.41})$$

Sendo: $\tau = nC$

Onde: P_T – potência transmitida (W); P_0 – potência incidente (W); n – concentração de partículas (m^{-3}); C – seção transversal de espalhamento (m^2); l – comprimento do caminho da luz na amostra (m); τ – turbidez (m^{-1}).

Em determinadas situações, a medição de turbidez precisa ser realizada com elevado grau de exatidão e precisão, especialmente em ambientes laboratoriais. Para esses casos, devem ser utilizados turbidímetros de precisão, que são classificados em dois tipos principais: sensores de **feixe único** e sensores de **feixe duplo**.

Os sensores de feixe único operam com uma fonte de luz de intensidade estabilizada, utilizada para medir a potência da luz transmitida pela amostra. A detecção pode ser feita em corrente contínua (DC) ou corrente alternada síncrona (AC). A detecção síncrona em AC proporciona maior estabilidade a longo prazo e melhor imunidade a interferências de fontes de luz externas. Com base na Eq. 8.40, juntamente com a Lei de Ohm e a definição de potência elétrica, a turbidez pode ser relacionada à tensão de saída contínua (V_{DC}) por meio da Eq. 8.42^[73].

$$V_{DC} = B e^{-(\alpha+\tau)l} \quad (\text{Eq. 8.42})$$

Sendo: $B = AP_0$

Onde: V_{DC} – tensão medida no sensor de turbidez (V); B – constante do instrumento (V); A – constante de conversão do nível de potência da luz para corrente no fotodiodo (V W^{-1}); P_0 – potência incidente (W); α – coeficiente de absorção (m^{-1}); τ – turbidez (m^{-1}); l – comprimento do caminho da luz na amostra (m).

A turbidez então é determinada pela Eq. 8.43.

$$\tau = \frac{1}{l} \ln \left(\frac{B}{V_{DC}} \right) - \alpha \quad (\text{Eq. 8.43})$$

Os sensores de **feixe duplo** dividem o feixe de laser em duas partes: um feixe de amostra e um feixe de referência. O sinal da amostra ($V_{sig} = AP_T$) é dividido simultaneamente pelo sinal de referência ($V_{ref} = CP_R$), corrigindo desvios na fonte de luz e perdas por reflexão. Isso permite comparar amostras com pequenas diferenças de turbidez. A potência da luz transmitida de referência é dada pela Eq. 8.44^[73].

$$P_R = f P_0 e^{-(\alpha_R + \tau_R) l_R} \quad (\text{Eq. 8.44})$$

Onde: P_R – potência da luz transmitida de referência (W); P_0 – potência de incidência (W); f – constante determinada pelo divisor do feixe (–); α_R – coeficiente de absorção da amostra de referência (m^{-1}); τ_R – turbidez da amostra de referência (m^{-1}); l_R – comprimento do caminho da luz da amostra de referência (m).

O sinal de saída do sensor será:

$$V_{out} = \frac{V_{sig}}{V_{ref}} = \frac{AP_T}{CP_R} = D \frac{P_0 e^{-(\alpha + \tau) l}}{P_0 e^{-(\alpha_R + \tau_R) l_R}}$$

Considerando $l_R = l$ e sendo $D = \frac{A}{Cf}$, a turbidez pode ser relacionada com a tensão de saída conforme a Eq. 8.45 e determinada pela Eq. 8.46.

$$V_{out} = D \frac{e^{-(\alpha + \tau) l}}{e^{-(\alpha_R + \tau_R) l}} \quad (\text{Eq. 8.45})$$

$$\tau = \frac{1}{l} \ln \left(\frac{D}{V_{out}} \right) - \alpha + \alpha_R + \tau_R \quad (\text{Eq. 8.46})$$

Capítulo 9

Atuadores: Válvulas de controle

Essencial para a eficiência, segurança e desempenho das malhas de controle industriais, o estudo dos atuadores, com ênfase nas válvulas de controle, é fundamental para a correta modulação de variáveis como vazão, pressão, temperatura e nível em processos automatizados. Este Capítulo apresenta uma abordagem abrangente sobre válvulas de controle, contemplando sua evolução histórica, definições fundamentais, classificações, componentes principais — atuador, corpo, internos, castelo e engaxetamento — e diferentes tipos construtivos. O capítulo discute ainda os princípios de funcionamento, características de vazão inerentes e instaladas, classes de vazamento segundo normas técnicas, bem como critérios e equações normativas para o dimensionamento e a seleção adequada de válvulas em função das condições de processo e das propriedades dos fluidos. Ao final, o leitor será capaz de compreender o papel das válvulas como elementos finais de controle, identificar e classificar diferentes tipos de válvulas e atuadores, interpretar curvas características, avaliar limitações operacionais e aplicar metodologias normativas para o correto dimensionamento e seleção desses dispositivos em sistemas industriais.

Os elementos finais de controle nem sempre recebem a devida atenção durante a seleção; porém, o desempenho de toda a malha depende diretamente da escolha apropriada desse componente. Na instrumentação industrial há vários tipos de elementos finais de controle, como resistências elétricas, inversores de frequência (motores) e, principalmente, válvulas de controle — as mais empregadas e, por isso, as mais relevantes. Essenciais para o controle automático de processos, as válvulas de controle asseguram a distribuição e a regulação precisas de líquidos, gases e vapores^[9,42].

9.1 Introdução

De maneira geral, uma válvula de controle é um dispositivo projetado para gerar uma obstrução — parcial ou total — em uma tubulação, regulando a passagem do fluido. Essa obstrução pode ser ajustada manual ou automaticamente, permitindo variar o fluxo conforme a necessidade do processo.

A válvula de controle é o componente final da malha, convertendo o sinal gerado pelo controlador em ação direta sobre o fluido de processo. Sua função é manter variáveis como pressão, vazão, temperatura ou nível no valor desejado, mesmo diante de mudanças na dinâmica e na carga do sistema. Para isso, ela deve ser projetada de acordo com as propriedades e exigências do fluido que manipula, além de responder de forma adequada ao protocolo e às demandas dos dispositivos presentes no sistema de controle^[42,91,107,108]. Suas principais características são^[91]:

1. **Resistência variável controlada:** é a única parte do sistema que ajusta intencionalmente sua resistência para compensar as mudanças indesejáveis no fluxo.
2. **Modulação contínua:** opera dinamicamente, respondendo a sinais de um controlador para manter a estabilidade do processo.
3. **Flexibilidade de projeto:** pode ser dimensionada com diferentes capacidades (rangeabilidade), tipos de atuar, características de vazão e *designs* de internos.

A evolução das válvulas de controle reflete a interação entre as necessidades do

processo e os requisitos dos sistemas que as comandam — algo visível nas configurações de corpos, atuadores, posicionadores e demais acessórios de interface^[42,107]. Essa evolução pode ser observada na Figura 9.1.

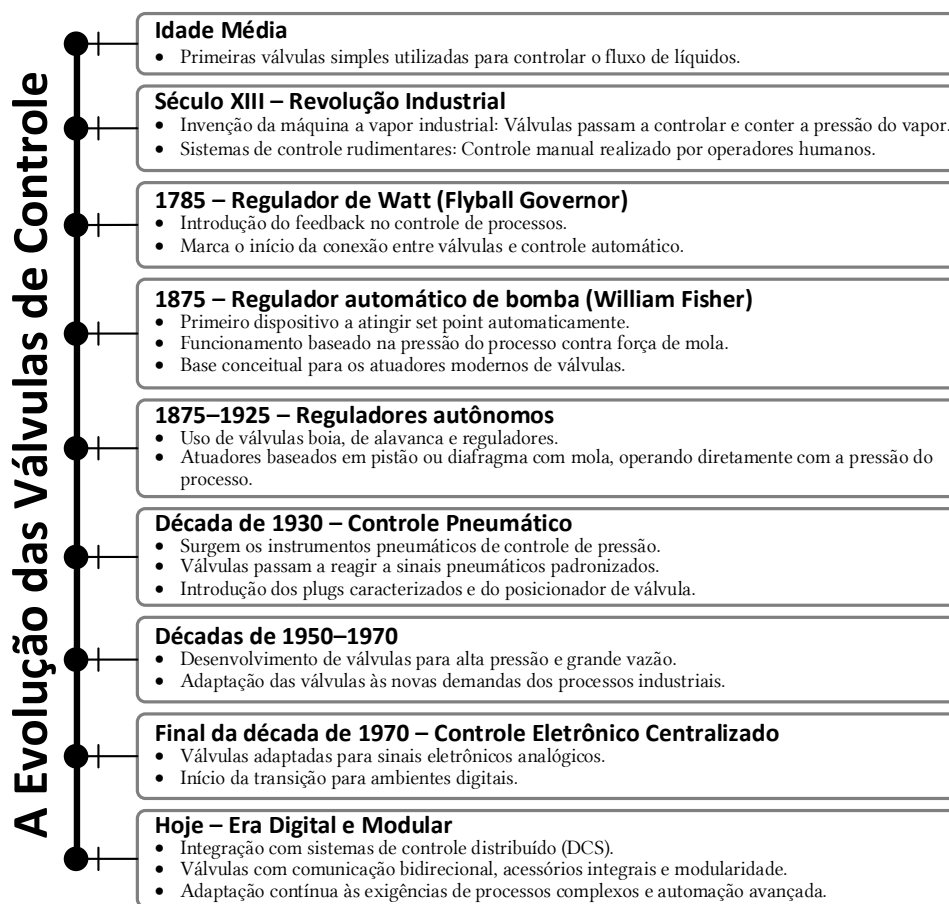


Figura 9.1: Linha do tempo da evolução das válvulas de controle

As válvulas de controle podem ser classificadas com base em seu princípio de funcionamento e no tipo do corpo. Na Tabela 9.1 são apresentadas essas classificações de forma organizada.

Tabela 9.1: Classificação das válvulas de controle

Critério	Tipo de Válvula	Descrição
Princípio de Funcionamento	Manual	Operada diretamente pelo ser humano.
	Autorreguladora	Utiliza a energia do próprio fluido para abrir ou fechar, sem fonte externa (ex: válvula reguladora de pressão).
	Automática	Utiliza força auxiliar e responde a sinais dos controladores.
Tipo do corpo	Deslocamento Linear	O obturador se move em linha reta, acionado por uma haste deslizante.
	Deslocamento Rotativo	O obturador realiza um movimento de rotação, acionado por um eixo girante.

9.2 Componentes da válvula de controle

Uma válvula de controle é composta, em sua forma básica, por três elementos principais^[108]: atuador, corpo com internos e o conjunto castelo com engaxetamento. É importante destacar que nem todas as válvulas apresentam esses componentes de forma separada — em certos modelos, o corpo e o castelo são integrados em uma única peça, chamada simplesmente de corpo. Além disso, por estar em contato direto com o fluido do processo, o corpo da válvula deve atender rigorosamente aos requisitos de resistência à pressão, temperatura e corrosão, garantindo a segurança e a durabilidade do equipamento.

9.2.1 Atuador

O atuador é o componente que fornece a força motriz indispensável para a operação da válvula de controle. Em resposta ao sinal do controlador, ele gera o esforço necessário para deslocar o elemento vedante (obturador) e regular a abertura da válvula conforme a demanda do processo. Quanto ao meio utilizado para produzir essa força, os atuadores empregados em controle modulado agrupam-se em cinco categorias principais: i) pneumático de mola e diafragma; ii) pneumático de pistão; iii) elétrico; iv) eletro-hidráulico; e v) hidráulico.

Atuador pneumático de mola e diafragma

Esse atuador utiliza um diafragma flexível submetido a uma pressão de carga variável que se opõe à força de uma mola. O diafragma fica alojado em uma câmara bipartida, sendo uma delas totalmente estanque para receber o sinal de pressão. A força motriz resulta do produto entre essa pressão (proveniente do controlador ou posicionador) e a área efetiva do diafragma. Dependendo da posição de segurança exigida em caso de falha ou perda de pressão, o atuador mola-diafragma opera em dois modos (Figura 9.2)^[9,42,109,110].

Ação direta: O acréscimo da pressão de ar comprime o diafragma, desloca a haste para baixo e fecha a válvula; se o sinal pneumático falhar, a válvula retorna à posição totalmente aberta.

Ação reversa: O aumento da pressão de ar tensiona o diafragma, ergue a haste e abre a válvula; na perda do sinal pneumático, a válvula passa para a posição totalmente fechada.

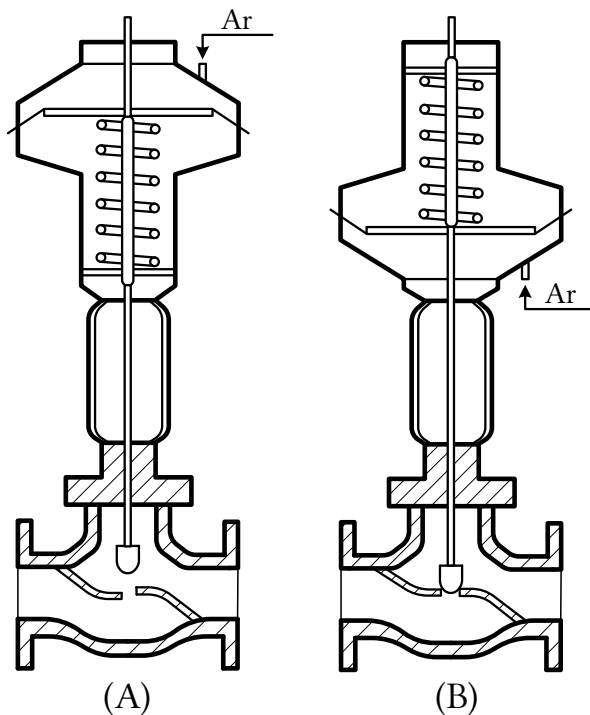


Figura 9.2: Atuador tipo mola e diafragma: (A) de ação direta; (B) de ação reversa (adaptado de [9]).

Atuador pneumático

Esses atuadores são mais compactos e fornecem torque ou força superiores aos modelos mola-diafragma, sendo indicados para válvulas de bloqueio, nas quais a posição deve ser totalmente aberta ou totalmente fechada. Uma mola é instalada em uma câmara oposta àquela que recebe o ar de acionamento, possibilitando dois modos: (1) ar para abrir e (2) ar para fechar (Figura 9.3). Dessa forma, se o sinal pneumático falhar, a válvula permanece fechada no modo 1 e aberta no modo 2^[9,42,110].

O emprego desse atuador torna-se limitado em linhas de alta pressão, pois a mola precisa ser suficientemente rígida para vencer a força do escoamento. Sob esforço constante, entretanto, a mola pode sofrer relaxamento, o que compromete a vedação da válvula^[9].

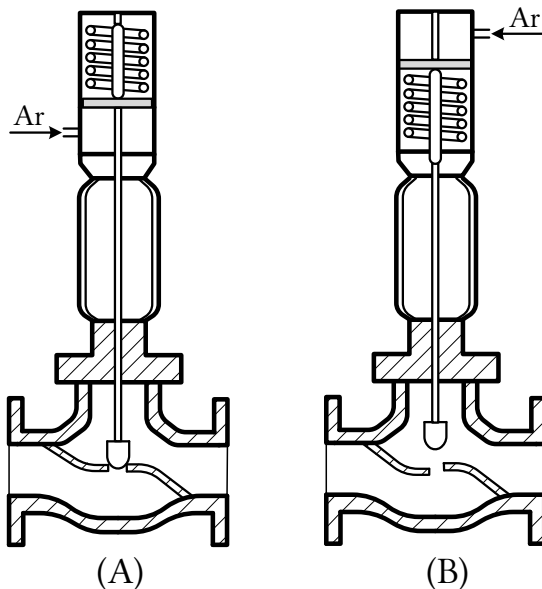


Figura 9.3: Atuador tipo pistão: (A) injeção de ar para abrir e; (B) injeção de ar para fechar.

Atuadores elétricos

Os atuadores elétricos são, essencialmente, compostos por um motor elétrico acoplado a uma caixa de redução. São componentes cruciais para válvulas de controle presentes em tubulações de grandes diâmetros, onde as forças requeridas para abertura e fechamento são maiores que as fornecidas pelos atuadores pneumáticos. Uma das grandes vantagens desses atuadores é a sua aplicabilidade em locais remotos, onde outras fontes de energia podem ser escassas. Além disso, são ideais quando há necessidade de grande empuxo ou rigidez para resistir às forças da válvula, tornando-os uma excelente escolha para o controle preciso de válvulas maiores e de alta pressão [9,42,108].

Atuadores eletro-hidráulico

Os atuadores eletro-hidráulicos constituem uma solução de elevada robustez para acionar válvulas, utilizando óleo pressurizado como meio intermediário para deslocar um pistão. O bombeamento desse óleo pode ser contínuo ou, nos modelos mais recentes, sob demanda por meio de motor de passo. As versões modernas, equipadas com motor de passo, reforçam ainda mais a robustez e oferecem benefícios adicionais: ciclo de trabalho de 100% e a possibilidade de incorporar mola de retorno para ação de segurança (*fail-safe*). Portanto, atuadores eletro-hidráulicos são indicados para aplicações em que robustez e segurança são essenciais, desde que os custos, o consumo de energia e a manutenção sejam considerados na escolha [42,108].

Atuadores hidráulicos

Esses atuadores operam segundo o princípio de Pascal: um cilindro com pistão recebe fluido hidráulico, bombeado em maior ou menor quantidade conforme o sinal de controle (Figura 9.4). O fluido, introduzido sob alta pressão, desloca o pistão — normalmente ligado diretamente à válvula. Quando necessário, o movimento linear do pistão pode ser transformado em movimento rotativo para acionar outros mecanismos.

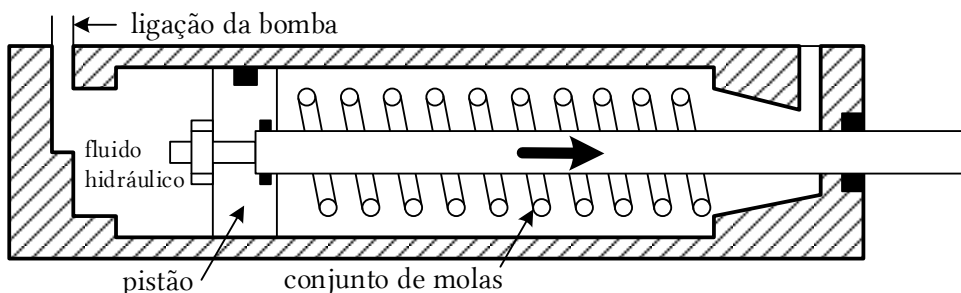


Figura 9.4: Atuador hidráulico

9.2.2 Corpo e internos

A válvula de controle, conforme já mencionado, regula a vazão ao restringir a passagem do fluido, dissipando parte da energia proveniente de uma fonte de pressão — geralmente uma bomba centrífuga em sistemas de transporte de líquidos. O corpo da válvula desempenha a função principal de contenção da pressão do processo e pode ser classificado em função do movimento do obturador em **linear** e **rotativo**. O conjunto de internos inclui o **obturador**, a **sede** e a **haste** (Figura 9.5) [9,108,110,111].

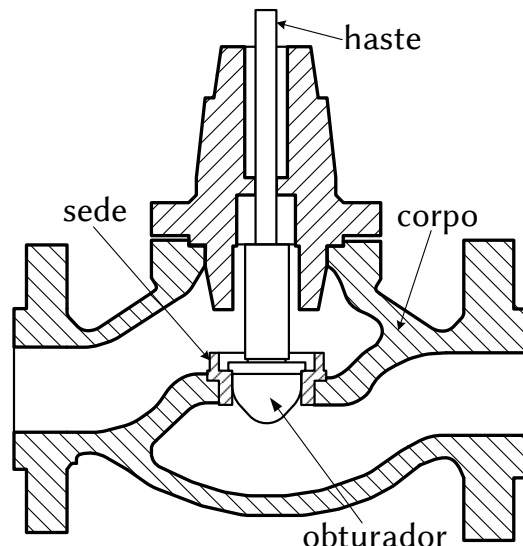


Figura 9.5: Representação do corpo com internos da válvula de controle (adaptado de [9])

O elemento móvel responsável pela restrição do fluxo é o **obturador**, cujo formato determina a relação entre a abertura da válvula e a vazão correspondente, caracterizando o comportamento de escoamento do equipamento. A **sede** da válvula atua como a superfície de vedação para o obturador, enquanto a **haste** estabelece a ligação entre o atuador e o corpo da válvula, sendo responsável pelo posicionamento preciso do obturador [112].

De acordo com o tipo de movimento do obturador, os corpos das válvulas são classificados em dois grupos: de **deslocamento linear** — englobando modelos como *globo convencional*, *globo de três vias*, *globo em gaiola*, *globo angular*, *diafragma*, *bipartido* e *guilhotina* — e de **deslocamento rotativo**, que inclui válvulas do tipo *borboleta*, *esfera*, *obturador excêntrico* e *segmento de esfera*.

Outro aspecto relevante é o tipo de conexão do corpo com a tubulação. As conexões das válvulas podem ser **flangeadas**, **wafer**, **roscadas** ou **soldadas**. As **conexões flangeadas** predominam na maioria das aplicações e são indispensáveis em serviços com fluidos tóxicos, onde versões roscadas não são aceitáveis. Já as **conexões wafer**, instaladas entre flanges adjacentes, reduzem peso, espaço e facilitam a montagem, sendo comuns em válvulas borboleta. As **conexões roscadas** destinam-se a diâmetros pequenos, normalmente até duas polegadas (25 a 50 mm). Por fim, as **conexões soldadas** atendem processos com fluidos altamente tóxicos, inflamáveis ou de alta pressão e podem ser fornecidas na forma de solda de topo, em que as extremidades são chanfradas para coincidir com o tubo, ou de solda de soquete, na qual o extremo da válvula apresenta diâmetro interno ligeiramente maior que o diâmetro externo da tubulação [110].

9.2.3 Castelo e engaxetamento

O castelo é o componente da válvula responsável por conectar o atuador ao corpo, guiando a haste que contém o obturador por meio de um sistema de vedação (engaxetamento) projetado para evitar vazamentos, funcionando como elemento secundário de contenção. Em geral, o castelo é uma peça separada e removível, permitindo acesso às partes internas da válvula para manutenção. No entanto, em determinados tipos de válvulas — como as rotativas (borboleta, esfera e excêntrica) e a bipartida — o castelo é integrado ao corpo, formando uma

única estrutura. Os castelos podem ser classificados em quatro tipos principais: (i) **castelo normal**; (ii) **castelo longo**; (iii) **castelo extralongo**; e (iv) **castelo com fole de selagem**^[9,111].

O **castelo normal** é o modelo padrão utilizado em aplicações convencionais, onde a temperatura do processo permanece entre -20 °C e 230 °C e o fluido não apresenta características tóxicas ou inflamáveis. Isso se deve ao fato de a caixa de gaxetas estar posicionada próxima ao flange superior do corpo, ou seja, em contato relativamente próximo com o fluido. Já o **castelo longo** possui a caixa de gaxetas afastada da região de escoamento, permitindo seu uso em temperaturas mais baixas, até cerca de -45 °C, evitando o congelamento das gaxetas, e em aplicações com temperaturas elevadas, até aproximadamente 540 °C. O **castelo extralongo**, por sua vez, apresenta a maior distância entre a caixa de gaxetas e o fluido, sendo indicado para aplicações criogênicas. Em situações especiais, como no manuseio de fluidos radioativos, tóxicos ou explosivos, onde não se admite qualquer vazamento para o ambiente por meio da gaxeta, recomenda-se a utilização do **castelo com fole de selagem**, que garante vedação adicional e maior segurança operacional^[9,111].

9.3 Classificação de vazamento na sede

Um aspecto importante nas aplicações de válvulas de controle é a sua rangeabilidade, definida como a razão entre a maior e a menor vazão que pode ser controlada com exatidão e precisão. Para um desempenho adequado, a vazão mínima desejada deve ser superior à taxa de vazamento da válvula — um fator crítico, especialmente em válvulas destinadas a pequenas vazões ou em modelos do tipo borboleta^[110]. O vazamento na sede é a quantidade de fluido que passa por uma válvula montada na posição fechada e é classificado segundo a norma ANSI/FCI 70-2-2006^[113] em classe I, II, III, IV, V e VI conforme apresentado na Tabela 9.2.

Tabela 9.2: Classificação de vazamento na sede de válvulas de controle^[113].

Classe	Vazamento Permitido	Fluido de Teste	Queda de Pressão de Teste
I	Nenhum teste requerido	—	—
II	0,5 % da capacidade nominal	Ar ou água à temperatura ambiente	310–414 kPa ou a maior diferença de pressão operacional permitida, prevalecendo o menor valor entre eles.
III	0,1 % da capacidade nominal	Ar ou água à temperatura ambiente	310–414 kPa ou a maior diferença de pressão operacional permitida, prevalecendo o menor valor entre eles.
IV	0,01 % da capacidade nominal	Ar ou água à temperatura ambiente	310–414 kPa ou a maior diferença de pressão operacional permitida, prevalecendo o menor valor entre eles.
V	0,0005 (mL _{H2O} min ⁻¹) por polegada de diâmetro de sede	4,7 mL _{Ar/N2} min ⁻¹ por polegada de diâmetro de sede	345 kPa ou a maior diferença de pressão operacional permitida, prevalecendo o menor valor entre eles.
VI	Ver tabela específica (Tabela 9.3)	Ar ou nitrogênio 10–52 °C	345 kPa ou a maior diferença de pressão operacional permitida, prevalecendo o menor valor entre eles.

Notas:

Classe I: Modificação de outras classes (II, III ou IV) sem necessidade de teste, desde que acordado entre fornecedor e usuário.

Classe II: Vazamento máximo permitido para válvulas comerciais de duplo assento ou de assento simples balanceadas com anel pistão e sede metal-metal.

Classe III: Semelhante à Classe II, mas com maior rigor de vedação.

Classe IV: Para válvulas de assento simples não balanceadas ou balanceadas com anel extra justo e sede metal-metal.

Classe V: Indicada para aplicações críticas com alta pressão diferencial sem válvula de bloqueio. Exige fabricação e testes especiais.

Classe VI: Aplicável a válvulas com sede resiliente e vedação com anéis “O” ou similares.

Tabela 9.3: Tabela de vazamentos Classe VI (tabela completa em ^[113])

Diâmetro da sede in	Vazamento máximo permitido	
	mL min ⁻¹	Bolha min ⁻¹
≤ 1,0	0,15	1
1,5	0,30	2
2,0	0,45	3
2,5	0,60	4
3,0	0,90	6
4,0	1,70	11
6,0	4,00	27
8,0	6,75	45

9.4 Válvulas com hastes de deslocamento linear

As válvulas de movimento linear possuem um design com haste deslizante que desloca o obturador até a posição desejada, seja para abertura ou fechamento. Esse tipo de válvula é reconhecido por sua construção simples, facilidade de manutenção e alta versatilidade, oferecendo uma ampla variedade de tamanhos, classes de pressão e configurações. Essas características fazem das válvulas de movimento linear as mais utilizadas atualmente em sistemas de controle de processo^[108,110,114,115].

9.4.1 Válvulas globo

O princípio de funcionamento dessas válvulas consiste em restringir o fluxo de fluido por meio da variação da distância entre um obturador móvel e um assento fixo (sede). O fluido escoar por um orifício no centro da sede, sendo sua passagem controlada pela posição do obturador em relação a esse orifício. Esse tipo de válvula é um dos mais comuns entre os projetos de haste deslizante e é especialmente indicado para aplicações de estrangulamento^[9,108,114,116].

Um aspecto fundamental nas válvulas globo é o desequilíbrio de forças que incidem sobre o obturador. Esse desbalanceamento refere-se às **forças assimétricas que atuam sobre o obturador durante a operação**, provocadas principalmente pela pressão do fluido agindo de forma desigual, geralmente apenas de um dos lados do obturador. Na Tabela 9.4 são apresentadas as vantagens e desvantagens dos obturadores balanceados e não balanceados.

Tabela 9.4: Obturadores balanceados × não balanceados

Obturador	Vantagens	Desvantagens
Balanceados	Permitem o uso de atuadores menores em comparação aos obturadores não balanceados. São indicados para aplicações com altas pressões diferenciais. Apresentam maior rangeabilidade e capacidade de vazão em relação aos modelos não balanceados. Oferecem menor vibração, menor carga lateral e possibilitam o uso de hastes de menor diâmetro. Em contrapartida, sofrem maior desgaste, resultando em menor vida útil. Destacam-se pela facilidade de manutenção.	Introduz um ponto extra de possível vazamento entre o anel pistão e a sede. Não é recomendado para fluidos com presença de particulados. Apresenta custo mais elevado em comparação aos obturadores não balanceados.
Não balanceados	Possuem vedação eficiente, geralmente atendendo à Classe IV. São adequadas para fluidos sujos, viscosos ou com sólidos em suspensão. Destacam-se em aplicações que envolvem altas temperaturas	Requerem atuadores de maior porte em comparação aos obturadores balanceados. Apresentam limitação quanto à pressão diferencial suportada. Não são recomendadas para aplicações com risco de cavitação. Devem ser evitados em válvulas com diâmetro superior a 6 polegadas.

Sede simples

A válvula globo de sede simples, Figura 9.6, possui construção simplificada e representa o modelo mais amplamente utilizado entre as válvulas do tipo globo. Destaca-se por sua excelente capacidade de vedação, menor suscetibilidade a vibrações — devido à massa reduzida do obturador — e facilidade de manutenção^[9,91,114,115]. No entanto, pode estar sujeita a **forças de desbalanceamento** elevadas, o que requer o uso de atuadores mais robustos.

As sedes dessas válvulas podem ser classificadas em três categorias principais: **sede flutuante**, que é fixada ao corpo com uma junta de vedação e mantida no lugar por uma gaiola ou anel de retenção; **sede rosqueada**, instalada por rosca diretamente no corpo, com ou sem junta de vedação; e **sede integral**, usinada diretamente no corpo da válvula. Enquanto as sedes flutuantes e rosqueadas permitem substituição após desgaste, a sede integral requer usinagem do corpo para reparo ou recuperação^[109].

As principais características da válvula globo de sede simples incluem sua excelente capacidade de vedação e o uso de um obturador estaticamente desbalanceado. Com isso, é possível alcançar, quando totalmente fechada, um nível de vazamento máximo de até 0,01% da sua vazão nominal (Classe IV)^[9].

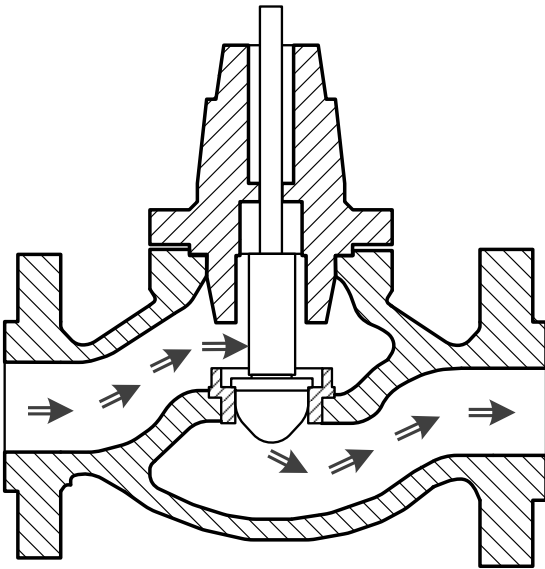


Figura 9.6: Válvula globo de sede simples
Sede dupla

As válvulas de sede dupla, Figura 9.7, possuem um obturador balanceado, o que permite a utilização de atuadores de menor porte. O fluido escoar da entrada da válvula em direção à galeria do corpo, onde estão localizadas duas sedes e um obturador com duas cabeças. Durante a abertura, as forças exercidas pelo fluido sobre as duas sedes tendem a se contrabalançar: a pressão empurra a cabeça superior do obturador para fora da sede, enquanto a inferior é puxada para dentro, contra essa pressão. No fechamento, esse comportamento se inverte. Embora essas válvulas sejam projetadas como balanceadas, na prática situam-se entre os modelos balanceados e não balanceados, devido à assimetria na interação do fluido com as sedes e as cabeças do obturador. Apesar de suas vantagens, as válvulas de sede dupla apresentam limitações, sendo a principal delas a necessidade de alinhamento preciso entre o obturador e as sedes. Pequenos desalinhamentos podem comprometer a vedação, resultando em vazamentos. Em geral, o limite de vazamento permitido para esse tipo de válvula é de até 0,5% da capacidade nominal (Classe II) ^[9,91,109,114].

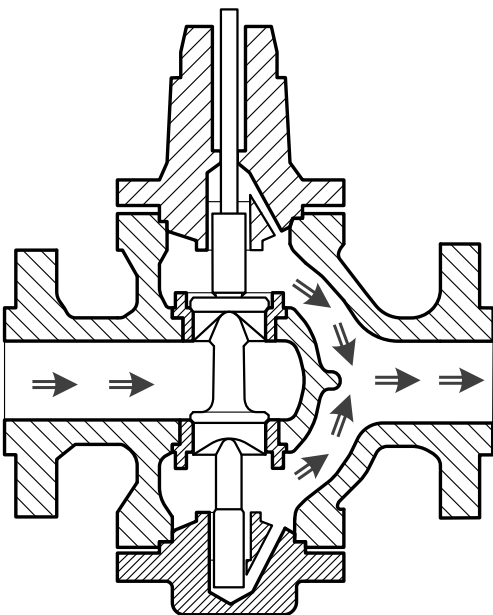


Figura 9.7: Válvula globo de sede dupla

As válvulas globo de três vias são equipamentos versáteis, amplamente empregados na indústria para funções de mistura ou desvio de fluxos de fluidos. Elas oferecem vantagens em termos de economia de espaço e simplicidade operacional, pois podem substituir dois arranjos convencionais de válvulas de passagem direta. Em aplicações de mistura (**convergente**), essas válvulas possuem duas entradas e uma saída (Figura 9.8A); já nas aplicações de desvio (**divergente**), há uma entrada e duas saídas (Figura 9.8B). Em ambos os casos, a proporção do fluxo é ajustada, mas sem controle preciso^[9,91,114].

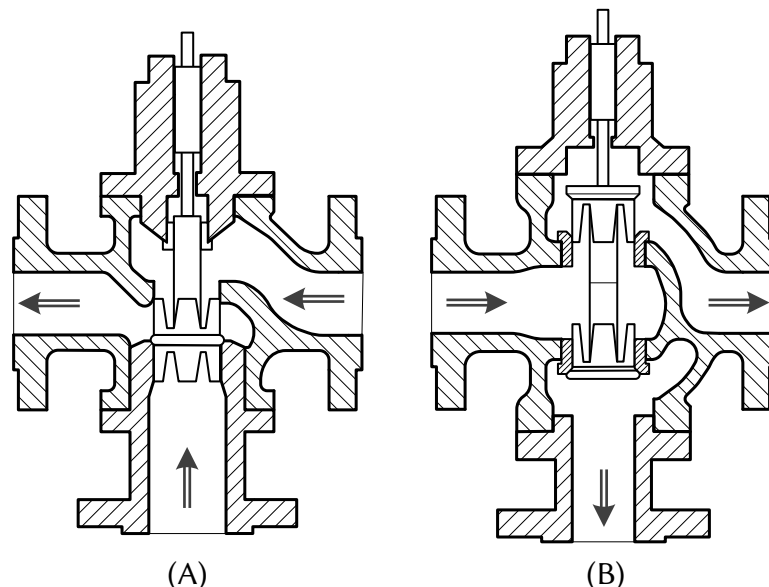


Figura 9.8: Válvula globo: (A) Convergente e; (B) Divergente

Para a função de mistura, as válvulas de três vias geralmente utilizam um corpo de sede simples modificado. Já para a função de desvio, são empregados corpos de sede dupla modificados. Uma característica importante a ser considerada nesse tipo de válvula são os desbalanceamentos de forças que atuam sobre o obturador. Essa condição requer o uso de atuadores de maior porte e cuidados específicos na instalação, a fim de evitar efeitos indesejáveis, como o golpe de aríete — fenômeno caracterizado pelo fechamento rápido e abrupto do obturador, que é impulsionado contra sua sede devido à dinâmica do escoamento ou à ação do atuador^[91].

As válvulas de três vias podem ser configuradas com sede dupla, adaptando-se de válvulas globo convencionais de sede simples. Elas são utilizadas para controlar a mistura de dois fluxos distintos ou para redirecionar um único fluxo para múltiplos destinos. Contudo, as válvulas de três vias equipadas com obturadores duplos e sede dupla não alcançam o mesmo nível de balanceamento que as válvulas de duas vias. Isso se deve à diferença de pressão existente entre os três canais e às distintas forças dinâmicas que atuam sobre cada cabeça do obturador^[109].

Corpo Bipartido

As válvulas do tipo corpo bipartido (*split-body*) são formadas por duas metades de corpo com um anel de sede fixado entre elas (Figura 9.9). Essa configuração facilita a montagem e desmontagem, permitindo a substituição ágil de componentes internos, como o obturador e a sede. Além disso, apresenta baixo custo de fabricação e boa resistência à erosão. Inicialmente desenvolvidas para processos químicos com fluidos complexos — como polpas, substâncias viscosas e produtos corrosivos —, são especialmente indicadas para aplicações em tubulações de menor diâmetro. Comparadas às válvulas globo convencionais, as válvulas *split-body* são mais econômicas e de manutenção simplificada, além de reduzirem a formação de zonas de acúmulo de sedimentos. Esse tipo de válvula possui apenas uma sede e apresenta um índice de vazamento correspondente a 0,01% de sua capacidade máxima de vazão. Sua principal limitação está relacionada à força de atuação, que pode ser afetada pelo desequilíbrio das forças dinâmicas do fluido sobre o obturador^[2,91,109].

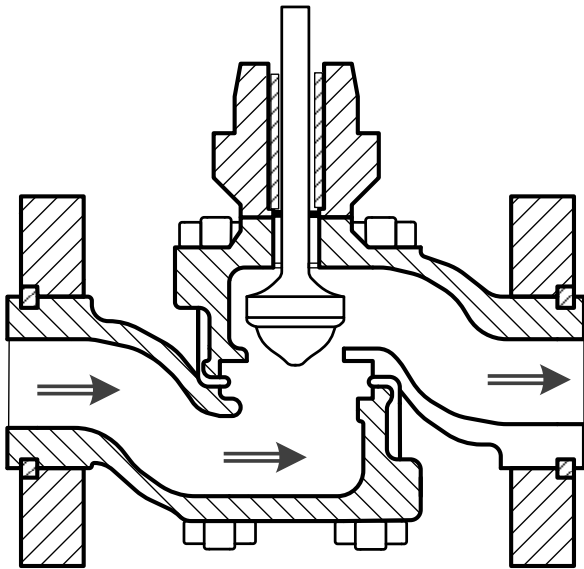


Figura 9.9: Válvula globo de sede única de corpo bipartido
Angular

As válvulas angulares, representada na Figura 9.10, são um tipo de válvula globo de sede simples, amplamente utilizadas em aplicações que requerem economia de espaço, eliminação de curvas de 90° na tubulação e resistência a fluidos erosivos ou difíceis, como polpas, líquidos viscosos e corrosivos. Também são úteis para drenagem, alívio de erosão e serviços severos como o craqueamento de hidrocarbonetos. Essas válvulas apresentam boas características de controle, ampla faixa de regulação e suportam altas pressões e temperaturas. São facilmente removíveis da linha e aceitam diferentes estilos construtivos, como o corpo bipartido [\[9,91,108,109,110\]](#).

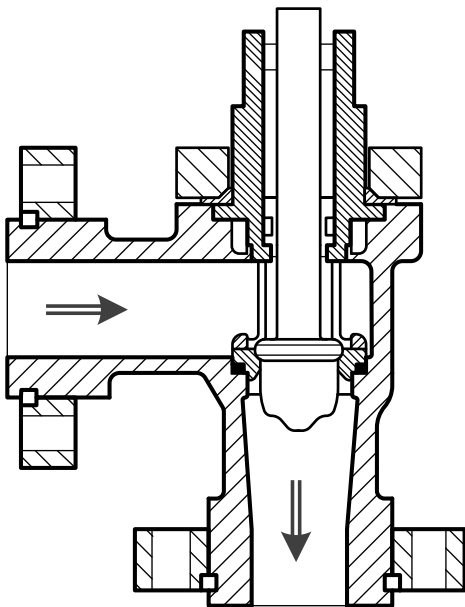


Figura 9.10: Válvula globo angular

9.4.2 Válvulas tipo diafragma

As válvulas diafragma (Figura 9.11) são amplamente utilizadas em aplicações que exigem isolamento completo entre o fluido de processo e os componentes internos da válvula. Sua estrutura básica é composta por um corpo rígido, uma tampa superior e um diafragma flexível que atua como elemento de vedação ao ser pressionado contra um assento. Podem ser classificadas em dois tipos principais: **weir** (com barreira interna elevada), que reduz o curso do diafragma, prolongando sua vida útil e minimizando os esforços mecânicos; e **straightway** (fluxo direto), que não possui barreira interna e permite uma passagem desobstruída, sendo mais indicada para fluidos altamente viscosos ou com sólidos em suspensão. No entanto, esse

segundo tipo exige maior curso do diafragma, o que limita as opções de materiais para sua fabricação^[91,107,115].

Essas válvulas são particularmente adequadas para fluidos corrosivos, viscosos ou contendo sólidos, como lodos e polpas. Um de seus principais diferenciais é o isolamento total entre o fluido e os componentes móveis da válvula, evitando contaminação cruzada e tornando-as ideais para aplicações nas indústrias farmacêutica, alimentícia e de bioprocessos. Apesar da vedação eficiente, apresentam limitações em controle de processo, como baixa faixa de regulação e resposta lenta — especialmente nos modelos com grande área de diafragma, que exigem atuadores mais robustos ou de dois estágios^[49,91,107,108,109].

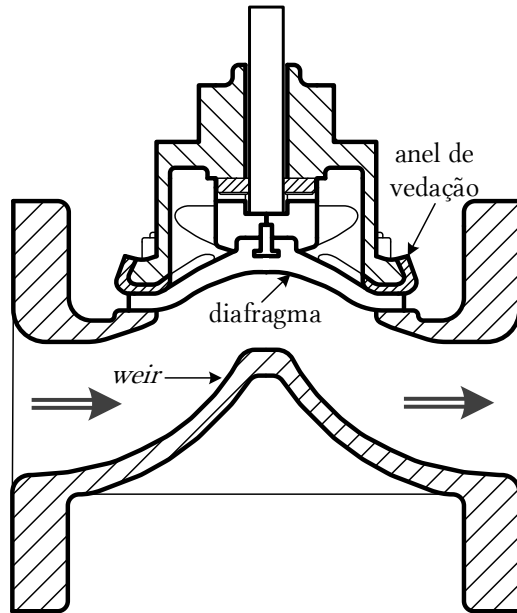


Figura 9.11: Válvula diafragma

9.4.3 Válvulas tio guilhotina

As válvulas tipo guilhotina são especialmente desenvolvidas para aplicações com fluidos que contêm sólidos em suspensão, como polpas, lodos e substâncias abrasivas. Seu principal diferencial é a capacidade de cortar esses sólidos durante o fechamento, evitando o acúmulo entre os assentos e assegurando a interrupção eficiente do fluxo (Figura 9.12). Por essa razão, são amplamente utilizadas em indústrias como papel e celulose, tratamento de efluentes e mineração^[9,109].

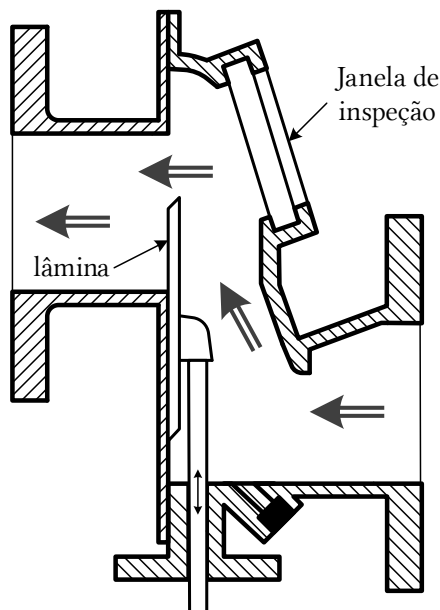


Figura 9.12: Válvula tipo guilhotina

Apresentam uma construção simples e de baixo custo, com corpo isento de tampa, o que elimina potenciais pontos de vazamento nessa junção. A vedação externa é realizada por gaxetas instaladas em um rebaixo ao redor da haste, que permanece totalmente fora do corpo da válvula. O obturador é uma lâmina plana que se desloca verticalmente para abrir ou fechar a passagem do fluido. Apesar de sua alta capacidade de vazão, essas válvulas não oferecem vedação estanque nem desempenho adequado para controle de fluxo. Por isso, são recomendadas apenas para aplicações de baixa pressão, devido à dificuldade de vedar o amplo perímetro do obturador^[109,116].

9.5 Válvulas com hastes de deslocamento rotativo

As válvulas rotativas utilizam um elemento giratório, como um eixo que aciona o obturador, ao contrário das válvulas de haste deslizante, que operam por movimento linear. Sua principal vantagem é oferecer um caminho de escoamento quase sem obstrução quando abertas, reduzindo a perda de carga. Têm ganhado espaço pelo menor custo, peso e maior capacidade de vazão relativa em comparação às válvulas globo, sendo adequadas tanto para controle quanto bloqueio. Contudo, são mais propensas à cavitação e ruído, devido ao menor porte e uso de redutores, o que provoca perda de pressão e distorções no escoamento. A qualidade de controle pode ser afetada pela relação não linear entre atuador e válvula, além da histerese e zona morta introduzidas pelas ligações mecânicas. Em processos rápidos, essas limitações tornam o uso de posicionadores essencial para garantir precisão^[49,109].

9.5.1 Borboleta

As válvulas borboleta estão entre os dispositivos de controle de fluxo mais antigos ainda em uso e pertencem à classe das válvulas rotativas de quarto de volta. Sua construção consiste em um disco montado em um eixo que gira perpendicularmente à direção do escoamento (Figura 9.13), oferecendo uma solução compacta, leve e de baixo custo, especialmente vantajosa em aplicações com grandes diâmetros. O controle de vazão é realizado pela rotação do disco, normalmente entre 15° e 70°, permitindo desde uma obstrução mínima ao fluxo até o bloqueio completo, dependendo da posição relativa do disco. O uso de sedes macias possibilita vedação estanque, porém impõe limitações quanto à resistência à temperatura e à pressão diferencial suportada^[49,91, 107,109,110, 115,116].

Entre os principais benefícios destacam-se o baixo custo de aquisição, elevada capacidade de vazão, simplicidade construtiva e facilidade de manutenção. Contudo, apresentam desvantagens como comportamento não linear, elevada exigência de torque em aplicações de estrangulamento, suscetibilidade à cavitação em elevadas quedas de pressão e desempenho limitado em controle de precisão sem o uso de atuadores e posicionadores adequados^[42,49,109,110].

Devido à sua robustez, simplicidade e à capacidade de manipular fluidos com sólidos em suspensão, as válvulas borboleta são amplamente utilizadas em setores industriais como o químico, papel e celulose, saneamento e tratamento de efluentes, desde que suas limitações operacionais e construtivas sejam devidamente consideradas^[109,115].

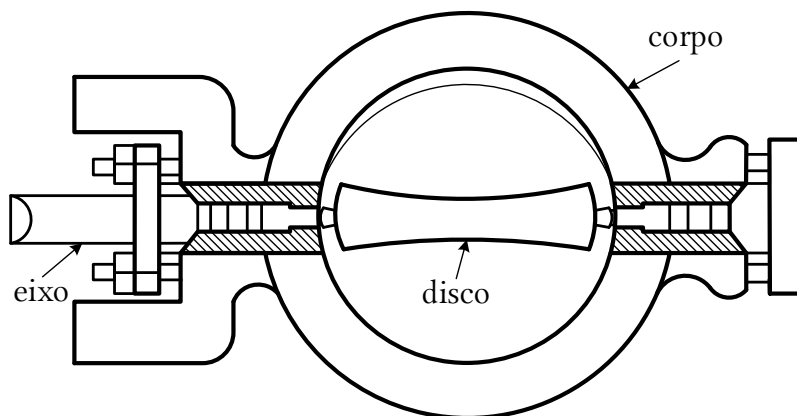


Figura 9.13: Válvula borboleta

9.5.2 Esfera

As válvulas esfera são dispositivos rotativos de um quarto de volta amplamente utilizadas para bloqueio e controle de fluxo, com destaque para a construção simples, excelente vedação e baixa perda de carga. Seu elemento de controle é uma esfera vazada que, ao girar, permite ou interrompe o escoamento, garantindo ação autolimpante e alta recuperação de pressão. Existem versões de passagem integral, que eliminam a retenção de sólidos ao permitir fluxo total com 90° de abertura, e versões de passagem reduzida, que diminuem a área de escoamento em até 40%, sendo úteis para ajustar velocidade de saída, reduzir vibrações e dissipar energia. São ideais para processos que exigem vedação segura e manipulação de fluidos viscosos ou com sólidos, sendo comuns nas indústrias de papel e celulose, química e de fluidos corrosivos^[49,91].

Entre as principais vantagens estão: alta vazão, leveza, baixo custo, vedação eficaz (Classes IV e VI), manutenção simples e compatibilidade com atuadores pneumáticos, elétricos e hidráulicos. Contudo, sua aplicação em estrangulamento é limitada, devido à relação não linear entre atuador e abertura, histerese e folgas, o que demanda posicionadores em malhas rápidas para manter precisão^[109,110].

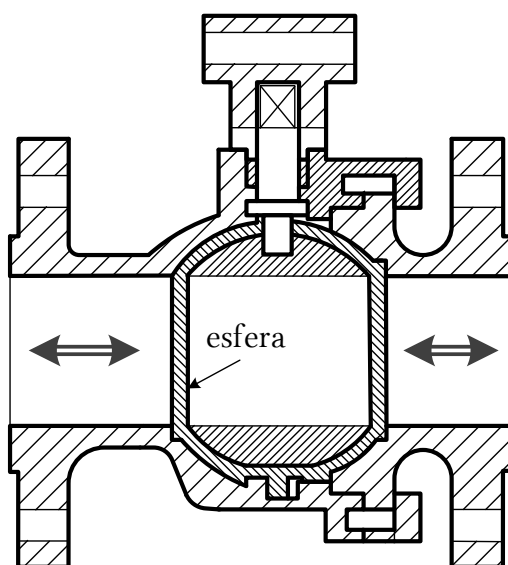


Figura 9.14: Válvula esfera de passagem integral

9.6 Característica de vazão

Uma válvula de controle regula o escoamento ajustando a abertura de seu orifício, alterando, assim, a vazão do fluido. Essa vazão depende do projeto da válvula e da geometria combinada do obturador com a sede — a chamada característica de vazão, que descreve como a posição do obturador se relaciona com a vazão que atravessa o equipamento. A expressão que descreve esse escoamento é derivada da Equação de Bernoulli (Eq. 6.10, [seção 6.2.1](#)) e é apresentada como Eq. 9.1 (para líquido) e Eq. 9.2 (para gás ou vapor).

$$Q = C_v f(x_v) \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_{rL}}} \quad (\text{Eq. 9.1})$$

$$Q = C_v f(x_v) \sqrt{\frac{P_1 \Delta P}{\rho_{rg} T_g}} \quad (\text{Eq. 9.2})$$

Onde: Q – vazão volumétrica do líquido ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ou gal min^{-1}), C_v – coeficiente de vazão, [ver seção 9.6.1](#), (unidade depende das unidades de Q e P); $f(x_v)$ – curva característica da válvula (—), x_v – fração de abertura da válvula (—); ΔP – diferença de pressão entre os pontos de medição a montante e a jusante ($P_1 - P_2$) (psi ou bar ou kPa); P_1 – pressão a montante da válvula de controle (psi ou bar ou kPa); ρ_{rL} – densidade relativa do líquido (—); ρ_{rg} – densidade relativa do gás ou vapor (—); T_g – temperatura do gás em escoamento (K).

A característica de vazão divide-se em dois tipos: (1) **inerente (teórica)**, determinada em ensaios de bancada com a queda de pressão na válvula mantida constante; e (2) **instalada (real)**, obtida em campo, onde a queda de pressão varia conforme as condições do processo e as perdas de carga da tubulação^[107].

9.6.1 Característica inerente

Característica linear

Uma válvula de característica linear fornece vazão proporcional ao deslocamento do obturador: cada incremento de curso resulta no mesmo incremento de vazão, mantendo-se constante a queda de pressão. Em teoria, essa curva é a mais adequada para controle, porém, na prática é comum que o comportamento linear se altere devido às condições do sistema, o que limita sua aplicação. Por isso, costuma-se aplicá-la a sistemas onde quase toda a perda de carga está na própria válvula. Obturadores lineares são preferidos em controle de nível de líquido e em processos que exigem ganho constante da malha de controle^[30,91,114]. A curva característica da válvula é representada pela Eq. 9.3.

$$f(x_v) = x_v \quad (\text{Eq. 9.3})$$

Onde: $f(x_v)$ – curva característica da válvula (–); x_v – fração de abertura da válvula (–).

Característica igual porcentagem

A característica de vazão de igual porcentagem descreve válvulas em que incrementos idênticos no curso da haste geram variações percentuais iguais na vazão existente, resultando em pequenas mudanças quando o fluxo é baixo e em grandes mudanças quando o fluxo é alto. Esse comportamento, proporcional à vazão do momento, é amplamente especificado para válvulas de estrangulamento e especialmente útil quando apenas uma fração da queda total de pressão do sistema está disponível na válvula. O perfil de igual porcentagem proporciona controle preciso na primeira metade do curso, onde o obturador é mais sensível às forças do processo, e maior capacidade na segunda metade, melhorando a faixa de controle, a repetibilidade e a resolução. Essa curva não parte de vazão zero: apresenta ganho reduzido no início da abertura e aumento progressivo à medida que o curso cresce, característica inicialmente concebida para compensar ganhos não lineares dos sistemas e que também corrige variações de queda de pressão nas válvulas instaladas^[30,91,114]. A curva característica deste tipo de válvula é descrita pela Eq. 9.4.

$$f(x_v) = R^{(x_v-1)} \quad (\text{Eq. 9.4})$$

Onde: $f(x_v)$ – curva característica da válvula (–); x_v – fração de abertura da válvula (–); R – rangeabilidade (–).

Característica abertura rápida

A característica de abertura rápida gera grandes variações de vazão com pequenos deslocamentos da haste e mantém uma relação praticamente linear durante boa parte do curso. Com apenas cerca de 25% de abertura, a válvula já permite passar quase toda a vazão nominal. Nesse perfil, o ganho é muito elevado nas primeiras posições de abertura e diminui significativamente acima de 80%. Por isso, obturadores de abertura rápida são empregados, sobretudo, em válvulas “liga-desliga”, dispositivos autoatuados ou reguladores. Também se mostram úteis em circuitos com queda de pressão constante, quando se busca um comportamento linear^[30,91,114]. Essa característica de vazão pode ser representada pela Eq. 9.5.

$$f(x_v) = 1 - e^{kx_v} \quad (\text{Eq. 9.5})$$

Onde: $f(x_v)$ – curva característica da válvula (–); x_v – fração de abertura da válvula (–); k – constante numérica (–).

Característica raiz quadrada

Essa característica de vazão segue uma relação proporcional à raiz quadrada da abertura da válvula. Nos estágios iniciais do curso, o aumento da vazão é acentuado; entretanto, conforme a válvula se abre mais, o acréscimo na vazão torna-se gradualmente menor para cada novo incremento de abertura. Seu comportamento é representado pela Eq. 9.6.

$$f(x_v) = \sqrt{x_v} \quad (\text{Eq. 9.6})$$

Onde: $f(x_v)$ – curva característica da válvula (–); x_v – fração de abertura da válvula (–).

Característica hiperbólica

A curva hiperbólica representa uma característica de válvula em que o aumento da vazão é muito reduzido nas primeiras aberturas, mesmo com deslocamentos significativos da

haste. Somente a partir de aproximadamente 75% de abertura observa-se um crescimento acentuado da vazão. Trata-se, portanto, de uma característica inversa à de abertura rápida. Essa curva é descrita matematicamente pela Eq. 9.7.

$$f(x_v) = \frac{1}{R - (R-1)x_v} \quad (\text{Eq. 9.7})$$

Onde: $f(x_v)$ – curva característica da válvula (–); x_v – fração de abertura da válvula (–); R – rangeabilidade (–).

Conforme mencionado anteriormente, a curva característica de vazão inerente é obtida considerando uma queda de pressão constante na válvula de controle. Na Figura 9.15 são apresentadas algumas curvas típicas de vazão inerente; entretanto, as mais empregadas são as curvas de abertura rápida, linear e de igual porcentagem.

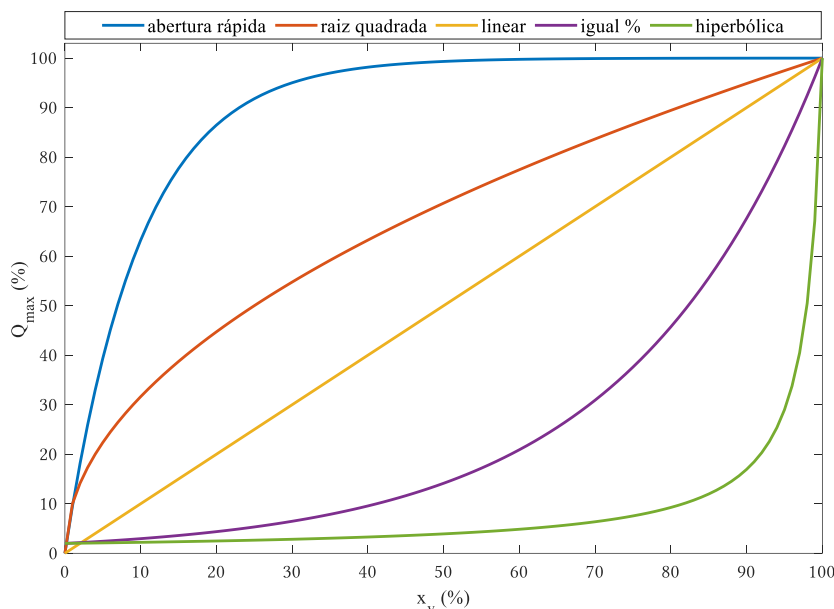


Figura 9.15: Curvas de características típicas de vazão inerente

9.7 Dimensionamento

A válvula de controle é um componente fundamental nas malhas de controle, e seu dimensionamento correto é crucial para assegurar o desempenho eficiente do sistema. Para que esse elemento atue de forma adequada, dois pré-requisitos principais devem ser observados: (1) a obtenção precisa dos dados do processo e (2) a seleção da equação de dimensionamento mais apropriada. Esses requisitos estão detalhados na Tabela 9.5.

Tabela 9.5: Pré-requisitos para o dimensionamento de válvulas de controle^[109].

Pré-requisito	Detalhamento	
Conhecimento dos dados de processo	Vazões mínima e máxima	
	Perdas de carga disponíveis	
Escolha da equação de dimensionamento adequada	Pressão máxima de entrada	
	Temperatura de entrada	
	Viscosidade do fluido	
	Presença ou não de escoamento bifásico	
	<i>Para líquidos</i>	<i>Para gases</i>
	Turbulento, não estrangulado	Turbulento não estrangulado
	Turbulento, estrangulado	Estrangulado
	Saturado	Laminar (válvulas pequenas)
	Laminar (viscoso)	
	Não newtoniano	
	Bifásico	

9.7.1 Coeficiente de vazão

O processo de dimensionamento visa determinar o coeficiente de vazão (C_v) requerido, sendo que a escolha da válvula ideal deve considerar não apenas esse valor, mas também a análise da curva característica de vazão. Para isso, é fundamental levar em conta as posições de abertura mínima e máxima da válvula durante a seleção do C_v .

O C_v de uma válvula de controle é um valor numérico que representa, de forma geral, sua capacidade máxima de vazão. Por definição, C_v corresponde à vazão de água, em galões por minuto, que atravessa a válvula sob uma queda de pressão de 1 psi. No entanto, esse valor também pode ser calculado com unidades do Sistema Internacional (SI), conforme estabelecido pela norma ISA-75.01.01-2007^[117].

9.7.2 Escolha da equação de dimensionamento

A escolha das equações de dimensionamento de válvulas deve considerar simultaneamente o tipo de escoamento (turbulento ou não turbulento), o estado físico do fluido (líquido, gás ou vapor), a possibilidade de estrangulamento (fluxo crítico ou subcrítico) e a presença ou ausência de acessórios como redutores, expansores ou outros encaixes próximos à válvula. Aqui serão apresentadas algumas condições de dimensionamento; caso o leitor necessite de outras condições de operação, recomenda-se a consulta à norma ISA-75.01.01-2007. Nas equações de dimensionamento é fundamental definir alguns parâmetros, entre eles: o fator de recuperação de pressão em líquidos (F_L), o fator de razão de pressão crítica para líquidos (F_F), o fator de expansão (Y) e o fator do número de Reynolds (F_R)^[117].

O **fator de recuperação de pressão do líquido (sem acessórios acoplados) (F_L)** indica quanto a geometria interna da válvula afeta sua vazão quando ocorre estrangulamento. Ele é definido como a razão entre a vazão real máxima sob fluxo estrangulado e a vazão teórica que se obteria se o diferencial de pressão considerado fosse a diferença entre a pressão de entrada da válvula e a pressão aparente na *vena contracta* (região logo a jusante do orifício onde a seção do fluxo é mínima) nessas mesmas condições. Determinado por ensaio, o valor de F_L varia conforme o tipo de válvula; a Tabela 9.6 apresenta valores típicos para o fator.

O **fator de expansão (Y)** leva em conta a variação de densidade que ocorre quando o fluido se desloca da entrada da válvula até a *vena contracta*. Ele também considera a mudança de área da *vena contracta* conforme se varia o diferencial de pressão e é descrito pela Eq. 9.8.

$$Y = 1 - \frac{x}{3F_k x_T} \quad (\text{Eq. 9.8})$$

$$\text{Sendo: } x = \frac{\Delta P}{P_1} \text{ e } F_k = \frac{\gamma}{1,4}$$

Onde: Y – fator de expansão (–); x – razão de diferencial de pressão (–); ΔP – diferença de pressão entre os pontos de medição a montante e a jusante ($P_1 - P_2$) (psi ou bar ou kPa); P_1 – pressão a montante da válvula de controle (psi ou bar ou kPa); F_k – fator da razão de calor específico (–); x_T – fator de razão de diferencial de pressão de uma válvula de controle sem acessórios acoplados em escoamento estrangulado (–) (Tabela 9.6); γ – razão de calor específico (–).

O **fator do número de Reynolds (F_R)** é requerido quando o escoamento através de uma válvula de controle ocorre em regime não turbulento, o que pode ser causado por baixa pressão diferencial, alta viscosidade, coeficiente de vazão muito reduzido ou pela combinação desses fatores. Esse fator é obtido pela razão entre a vazão sob condições de escoamento não turbulento e a vazão medida na mesma instalação sob condições turbulentas.

A determinação do fator do número de Reynolds é um processo iterativo. Inicialmente, calcula-se o coeficiente de vazão (C_v) para escoamento turbulento. Em seguida, determina-se C_i conforme a Eq. 9.9.

$$C_i = 1,3C_v \quad (\text{Eq. 9.9})$$

Onde: C_i – coeficiente de vazão iterativo (unidade depende da unidade de Q e P); C_v – coeficiente de vazão (unidade dependente da unidade de Q e P).

Com o valor de C_i , determina-se o **número de Reynolds da válvula** calculado pela Eq. 9.10.

$$R_{ev} = \frac{N_4 F_d Q}{v \sqrt{C_i F_L}} \left(\frac{F_L^2 C_i^2}{N_2 D^4} + 1 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Eq. 9.10})$$

Onde: R_{ev} – número de Reynolds da válvula (–); N_2 e N_4 – constante numérica (–) (Tabela 9.7); F_d – modificador de estilo da válvula (–); Q – vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ ou gal min^{-1} ou $\text{ft}^3 \text{ h}^{-1}$); F_L – fator de recuperação de pressão do líquido (–) (Tabela 9.6); C_i – coeficiente de vazão iterativo (unidade depende da unidade de Q e P); D – diâmetro interno da tubulação (mm ou in); v – viscosidade cinemática ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ou cS).

Com o valor de Re_v , o valor de F_R pode ser estimado por meio das curvas da Figura 9.16. Uma vez determinado o valor de F_R , verifica-se a condição da Eq. 9.11.

$$\frac{C_v}{F_R} \leq C_i \quad (\text{Eq. 9.11})$$

Onde: C_i – coeficiente de vazão iterativo (unidade depende da unidade de Q e P); C_v – coeficiente de vazão (unidade dependente da unidade de Q e P); F_R – fator do número de Reynolds (–).

Se a condição for satisfeita, utiliza-se o valor de C_i obtido pela Eq. 9.9. Caso contrário, o valor de C_i deve ser aumentado em 30% e o cálculo repetido, até que os critérios estabelecidos na Eq. 9.9 sejam atendidos.

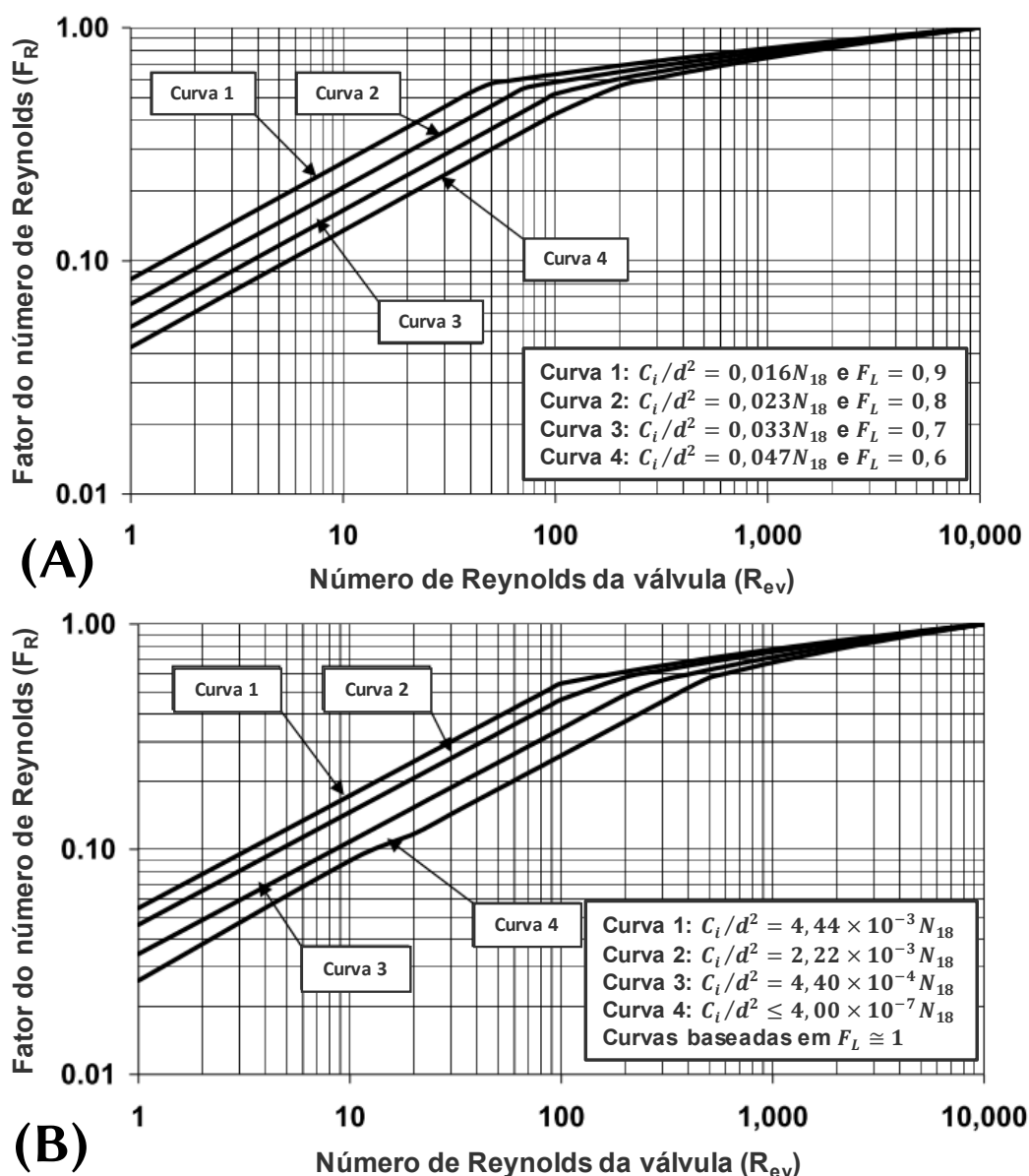


Figura 9.16: – Fator do número de Reynolds (F_R): (A) para válvulas com obturador em tamanho total e; (B) para válvulas com obturador reduzido (C_v pequeno/baixas vazões). OBS: d – tamanho nominal da válvula (mm ou in); N_{18} – constante numérica (–) (Tabela 9.7) (adaptado de [117]).

O fator de razão de pressão crítica para líquidos (F_F), representa a relação entre a pressão aparente na *vena contracta* sob fluxo estrangulado e a pressão de vapor do líquido à temperatura de entrada. Ele é calculado pela Eq. 9.12; para líquidos com pressão de vapor muito baixa, utiliza-se o valor aproximado $F_F \approx 0,96$.

$$F_F = 0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{P_v}{P_c}} \quad (\text{Eq. 9.12})$$

Onde: F_F – fator de razão de pressão crítica para líquidos (–); P_v – pressão de vapor do líquido (psi ou bar ou kPa); P_c – pressão crítica do líquido (psi ou bar ou kPa).

Líquido - escoamento turbulento não estrangulado (subcrítico) sem acessórios

$$\text{Se: } \Delta P < F_L^2 (P_1 - F_F P_v)$$

$$C_v = \frac{Q}{N_1} \sqrt{\frac{\rho_{rL}}{\Delta P}} \quad (\text{Eq. 9.13})$$

Onde: C_v – coeficiente de vazão (unidade depende da unidade de Q e P); Q – vazão volumétrica do líquido ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ou gal min^{-1}); N_1 – constante numérica (Tabela 9.7); ρ_{rL} – densidade relativa do líquido (–); ΔP – diferença de pressão entre os pontos de medição a montante e a jusante ($P_1 - P_2$) (psi ou bar ou kPa).

Líquido - escoamento turbulento estrangulado (crítico) sem acessórios

$$\text{Se: } \Delta P \geq F_L^2 (P_1 - F_F P_v)$$

$$C_v = \frac{Q}{N_1 F_L} \sqrt{\frac{\rho_{rL}}{\Delta P}} \quad (\text{Eq. 9.14})$$

Onde: C_v – coeficiente de vazão (unidade depende da unidade de Q e P); Q – vazão volumétrica do líquido ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ou gal min^{-1}); F_L – fator de recuperação de pressão do líquido (–) (Tabela); N_1 – constante numérica (Tabela 9.7); ρ_{rL} – densidade relativa do líquido (–); ΔP – diferença de pressão entre os pontos de medição a montante e a jusante ($P_1 - P_2$) (psi ou bar ou kPa).

Líquido - escoamento não turbulento sem acessórios

$$\text{Se: } R_{ev} < 10.000$$

$$C_v = \frac{Q}{N_1 F_R} \sqrt{\frac{\rho_{rL}}{\Delta P}} \quad (\text{Eq. 9.15})$$

C_v – coeficiente de vazão (unidade depende da unidade de Q e P); Q – vazão volumétrica do líquido ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ou gal min^{-1}); N_1 – constante numérica (Tabela 9.7); ρ_{rL} – densidade relativa do líquido (–); F_R – fator do número de Reynolds (–); ΔP – diferença de pressão entre os pontos de medição a montante e a jusante ($P_1 - P_2$) (psi ou bar ou kPa).

Gás ou vapor - escoamento não estrangulado (subcrítico) sem acessórios

$$\text{Se: } x < F_k x_T$$

$$C_v = \frac{W}{N_6 Y \sqrt{x P_1 \rho_1}} \quad (\text{Eq. 9.16})$$

$$C_v = \frac{Q}{N_7 P_1 Y} \sqrt{\frac{\rho_{rg} T_1 Z}{x}} \quad (\text{Eq. 9.17})$$

Onde: C_v – coeficiente de vazão (unidade depende da unidade de Q e P); W – vazão mássica do gás ou vapor (kg h^{-1} ou lb h^{-1}); Q – vazão volumétrica do gás ou vapor ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ou gal min^{-1}); N_6 e N_7 – constantes numérica (–) (Tabela 9.7); Y – fator de expansão (–); x – razão de diferencial de pressão (–); P_1 – pressão a montante da válvula de controle (psi ou bar ou kPa); ρ_1 – densidade do gás ou vapor a montante da válvula (kg m^{-3} ou lb ft^{-3}); ρ_{rg} – densidade relativa do gás ou vapor (–); T_1 – temperatura a montante da válvula de controle (K); Z – fator de compressibilidade do gás ou vapor (–).

Gás ou vapor - escoamento estrangulado (crítico) sem acessórios

$$\text{Se: } x \geq F_k x_T$$

$$C_v = \frac{W}{0,667 N_6 \sqrt{F_k x_T P_1 \rho_1}} \quad (\text{Eq. 9.18})$$

$$C_v = \frac{Q}{0,667 N_7 P_1} \sqrt{\frac{\rho_{rg} T_1 Z}{F_k x_T}} \quad (\text{Eq. 9.19})$$

Onde: C_v – coeficiente de vazão (unidade depende da unidade de Q e P); W – vazão mássica do gás ou vapor (kg h^{-1} ou lb h^{-1}); Q – vazão volumétrica do gás ou vapor ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ou gal min^{-1}); N_6 e N_7 – constantes numérica (–) (Tabela 9.7); F_k – fator da razão de calor específico (–); x_T – fator de razão de diferencial de pressão de uma válvula de controle sem acessórios acoplados em escoamento estrangulado (–); P_1 – pressão a montante da válvula de controle (psi ou bar ou kPa); ρ_1 – densidade do gás ou vapor a montante da válvula (kg m^{-3} ou lb ft^{-3}); ρ_{rg} – densidade relativa do gás ou vapor (–); T_1 – temperatura a montante da válvula de controle (K); Z – fator de compressibilidade do gás ou vapor (–).

Gás ou vapor - escoamento não turbulento sem acessórios

$$\text{Se: } R_{ev} < 10.000$$

$$C_v = \frac{W}{N_{27} F_R} \sqrt{\frac{T_1}{\Delta P (P_1 + P_2) M}} \quad (\text{Eq. 9.20})$$

$$C_v = \frac{Q}{N_{22} F_R} \sqrt{\frac{M T_1}{\Delta P (P_1 + P_2)}} \quad (\text{Eq. 9.21})$$

Onde: C_v – coeficiente de vazão (unidade depende da unidade de Q e P); W – vazão mássica do gás ou vapor (kg h^{-1} ou lb h^{-1}); Q – vazão volumétrica do líquido ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ou gal min^{-1}); N_{22} e N_{27} – constantes numérica (–) (Tabela 9.7); F_R – fator do número de Reynolds (–); ΔP – diferença de pressão entre os pontos de medição a montante e a jusante ($P_1 - P_2$) (psi ou bar ou kPa); P_1 – pressão a montante da válvula de controle (psi ou bar ou kPa); P_2 – pressão a jusante da válvula de controle (psi ou bar ou kPa); M – massa molar do fluido (kg kmol^{-1}); T_1 – temperatura a montante da válvula de controle (K).

Tabela 9.6: Valores típicos¹ dos fatores F_L , x_T e F_d (adaptado de [117]).

Tipo de válvula	Tipo do interno	Sentido de fluxo ²	F_L	x_T	F_d
Globo (sede simples)	Obturador V 3 vias	Abrir ou Fechar	0,90	0,70	0,48
	Obturador V 4 vias	Abrir ou Fechar	0,90	0,70	0,41
	Obturador V 6 vias	Abrir ou Fechar	0,90	0,70	0,30
	Obturador perfilado (linear/equal %)	Abrir	0,90	0,72	0,46
		Fechar	0,80	0,55	1,00
	Gaiola 60 furos iguais	Para fora/Para dentro ³	0,90	0,68	0,13
	Gaiola 120 furos iguais	Para fora/Para dentro ³	0,90	0,68	0,09
	Gaiola caracterizada 4 portas	Para fora	0,90	0,75	0,41
		Para dentro	0,85	0,70	0,41
Globo (sede dupla)	Obturador portado	Entre as sedes	0,9	0,75	0,28
	Obturador perfilado	Ambos	0,85	0,70	0,32
Globo angular	Obturador perfilado	Abrir	0,90	0,72	0,46
		Fechar	0,80	0,65	1,00
Globo (fluxo pequeno)	Assento plano (curso curto)	Fechar	0,85	0,70	0,30
Rotativa	Obturador esférico excêntrico	Abrir	0,85	0,60	0,42
		Fechar	0,68	0,40	0,42
	Obturador cônico excêntrico	Abrir	0,77	0,54	0,44
		Fechar	0,79	0,55	0,44
Borboleta	Swing-through 70°	Ambos	0,62	0,35	0,57
	Swing-through 60°	Ambos	0,70	0,42	0,50
	Fluted vane 70°	Ambos	0,67	0,38	0,30
Esfera	Passagem plena 70°	Ambos	0,74	0,42	0,99
	Segmentada	Ambos	0,60	0,30	0,98

Notas: 1 – Os valores específicos devem ser fornecidos pelo fabricante; 2 – “Abrir” ou “Fechar” indicam o sentido em que o fluxo movimenta o obturador; “Ambos” significa que a válvula opera nos dois sentidos; 3 – “Para fora” = fluxo do centro da gaiola para o exterior; “Para dentro” = fluxo do exterior para o centro.

Tabela 9.7: Constante numérica N para C_v (adaptado de [117]).

Constante	Valor	Unidades dos parâmetros das Eq. 9.11 a 9.15						
		W	Q	$P, \Delta P$	ρ	T	d, D	v
N_1	$8,650 \times 10^{-2}$	—	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	kPa	indiferente	—	—	—
	$8,650 \times 10^{-1}$	—	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	bar	indiferente	—	—	—
	$1,000 \times 10^0$	—	gal min^{-1}	psi	Indiferente	—	—	—
N_2	$2,140 \times 10^{-3}$	—	—	—	—	—	mm	—
	$8,900 \times 10^2$	—	—	—	—	—	in	—
N_4	$7,600 \times 10^{-2}$	—	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	—	—	—	—	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
	$1,730 \times 10^4$	—	gal min^{-1}	—	—	—	—	cS
	$2,153 \times 10^3$	—	$\text{ft}^3 \text{h}^{-1}$	—	—	—	—	cS
N_6	$2,730 \times 10^0$	kg h^{-1}	—	kPa	kg m^{-3}	—	—	—
	$2,730 \times 10^1$	kg h^{-1}	—	bar	kg m^{-3}	—	—	—
	$6,330 \times 10^1$	lb h^{-1}	—	psi	lb ft^{-3}	—	—	—
N_7 ($T=15,6 \text{ }^\circ\text{C}$)	$4,170 \times 10^0$	—	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	kPa	—	K	—	—
	$4,170 \times 10^2$	—	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	bar	—	K	—	—
	$1,360 \times 10^3$	—	$\text{ft}^3 \text{h}^{-1}$	psi	—	R	—	—
N_{18}	$1,000 \times 10^0$	—	—	—	—	—	mm	—
	$6,450 \times 10^2$	—	—	—	—	—	in	—
N_{22} ($T=0 \text{ }^\circ\text{C}$)	$1,500 \times 10^1$	—	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	kPa	—	K	—	—
	$1,500 \times 10^3$	—	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	bar	—	K	—	—
	$4,920 \times 10^3$	—	$\text{ft}^3 \text{h}^{-1}$	psi	—	R	—	—
N_{22} ($T=15,6 \text{ }^\circ\text{C}$)	$1,590 \times 10^1$	—	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	kPa	—	K	—	—
	$1,590 \times 10^3$	—	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	bar	—	K	—	—
	$5,200 \times 10^3$	—	$\text{ft}^3 \text{h}^{-1}$	psi	—	R	—	—
N_{27} ($T=0 \text{ }^\circ\text{C}$)	$6,700 \times 10^{-1}$	kg h^{-1}	—	kPa	—	K	—	—
	$6,700 \times 10^1$	kg h^{-1}	—	bar	—	K	—	—
	$1,370 \times 10^1$	lb h^{-1}	—	psi	—	R	—	—

EXEMPLO 9.1: Um sistema de controle de vazão utiliza uma válvula globo de sede simples, com diâmetro nominal de 150 mm. A válvula, sem acessórios acoplados, possui obturador com característica de igual porcentagem e configuração de fluxo no sentido abrir. Com base nas condições de processo apresentadas na Tabela 9.8, determine o coeficiente de vazão (C_v) correspondente à válvula especificada.

Tabela 9.8: Condições operacionais da válvula de controle do exemplo 9.1.

Fluido: água			
Variável	Descrição	valor	Unidade
T_1	Temperatura a montante	363,0	K
ρ_1	Massa específica a montante	965,4	kg m ⁻³
P_c	Pressão crítica	22.120,0	kPa
P_v	Pressão de vapor	70,1	kPa
P_1	Pressão a montante	680,0	kPa
P_2	Pressão a jusante	220,0	kPa
Q	Vazão volumétrica	360,0	m ³ h ⁻¹
$D_1=D_2$	Diâmetro da tubulação	150,0	mm
ν	Viscosidade cinemática	$3,26 \times 10^{-7}$	m ² s ⁻¹

1º Passo: Determinar o fator de razão de pressão crítica para o líquido utilizando a Eq. 9.12.

$$F_F = 0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{70,1 \text{ kPa}}{22.120 \text{ kPa}}} = 0,944$$

2º Passo: Calcular o tipo de escoamento. Sendo o fator de recuperação de pressão de líquido $F_L=0,9$ (Tabela 9.6).

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (680 - 220) \text{ kPa} = 460 \text{ kPa}$$

$$F_L^2 (P_1 - F_F P_v) = (0,9)^2 (680 - (0,944)(70,1 \text{ kPa})) = 497,2 \text{ kPa}$$

Como $\Delta P < F_L^2 (P_1 - F_F P_v)$ temos escoamento não estrangulado (subcrítico).

3º Passo: Assumindo que o escoamento é turbulento, o coeficiente de vazão é determinado pela Eq. 9.13 (subcrítico). Para vazão em (m³ h⁻¹) e pressão em (kPa), temos $N_1=8,65 \times 10^{-2}$ (Tabela 9.7)

$$\rho_{rL} = \frac{965,4 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,9654$$

$$C_v = \frac{360 \text{ m}^3/\text{h}}{8,65 \times 10^{-2}} \sqrt{\frac{0,9654}{460 \text{ kPa}}} = 190,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h kPa}^{0,5}}$$

4º Passo: Calcular o número de Reynolds da válvula utilizando a Eq. 9.10 considerando $C_i=C_v$ e $F_d = 0,46$ (Tabela 9.6). Para vazão em (m³ h⁻¹), viscosidade cinemática em (m² s⁻¹) e o diâmetro da tubulação em (mm), temos $N_2 = 2,140 \times 10^{-3}$ e $N_4 = 7,6 \times 10^{-2}$ (Tabela 9.7)

$$R_{ev} = \frac{(7,6 \times 10^{-2})(0,46)}{(3,26 \times 10^{-7})\sqrt{(190,7)(0,9)}} \left[\frac{(0,9)^2 (190,7)^2}{(2,14 \times 10^{-3})(150)^4} \right] = 1,19 \times 10^6$$

Como o número de Reynolds da válvula excede 10.000, o escoamento é caracterizado como turbulento, e o coeficiente de vazão (C_v) obtido é considerado válido. ■

9.8 Seleção da válvula de controle

A seleção adequada de válvulas de controle é complexa e dinâmica e exige a consideração de diversos fatores, incluindo as características do processo (tipo de fluido, pressão, vazão e temperatura), o dimensionamento correto da válvula para evitar operação fora da faixa ideal (10%–90%), a escolha da característica de vazão compatível com a aplicação

(como linear ou igual porcentagem), e o modo de segurança em caso de falha (como válvula normalmente aberta ou fechada). Além disso, é essencial selecionar o corpo da válvula (deslocamento linear ou rotativo do obturador) e os acessórios apropriados, especialmente para fluidos tóxicos ou perigosos, e garantir que a instalação siga rigorosamente as recomendações do fabricante^[9,91,108,109,110].

A perda de carga tem impacto direto tanto no dimensionamento quanto na definição da característica de vazão da válvula de controle. Em diversas situações práticas, pode-se obter uma estimativa inicial dessa característica verificando a razão entre a maior e a menor queda de pressão na válvula ($\Delta P_{\max}/\Delta P_{\min}$), como mostrado na Tabela 9.9. A Tabela 9.10 reúne, de forma concisa, orientações adicionais que consideram outros fatores e podem ajudar na escolha da característica de vazão mais apropriada. Essas orientações, contudo, devem ser aplicadas com cautela, pois somente uma análise dinâmica completa do processo permite determinar, com segurança, a característica de vazão capaz de garantir a estabilidade do sistema de controle.

Tabela 9.9: Guia de seleção de características de válvulas em função da queda de pressão^[109].

Aplicação	Característica de vazão	
	$(\Delta P_{\max}/\Delta P_{\min})$ abaixo de 2:1	$(\Delta P_{\max}/\Delta P_{\min})$ entre 2:1 e 5:1
Escoamento por orifício	Abertura rápida	Linear
Vazão	Linear	Igual %
Nível	Linear	Igual %
Pressão de gás	Linear	Igual %
Pressão de líquido	Igual %	Igual %

Tabela 9.10: Guia de seleção de características de válvulas em função de condições de processo^[108].

Aplicação	Condições do processo	Característica
Controle de nível de líquido	• Queda de pressão constante	Linear
	• Quando a queda de pressão diminui com o aumento da vazão e, na vazão máxima, ainda é superior a 20 % da queda mínima.	Linear
	• Quando a queda de pressão diminui com o aumento da vazão e, na vazão máxima, é inferior a 20 % da queda mínima.	Igual porcentagem
	• Quando a queda de pressão cresce com o aumento da vazão e, na vazão máxima, supera em mais de 20 % a queda mínima.	Linear
	• Quando a queda de pressão cresce com o aumento da vazão e, na vazão máxima, permanece abaixo de 20 % da queda mínima.	Abertura rápida
Controle de pressão	• Líquidos	Igual porcentagem
	• Gases – sistemas rápidos: volume reduzido, com menos de 3 m de tubulação a jusante da válvula de controle.	Igual porcentagem
	• Gases – sistemas lentos: volume elevado (o processo dispõe de recipiente, rede de distribuição ou linha de transmissão com mais de 30 m de tubulação a jusante). Se a queda de pressão cai com o aumento da vazão e, na vazão máxima, supera 20 % da queda mínima.	Linear
	• Gases – sistemas lentos: volume elevado. Se a queda de pressão cai com o aumento da vazão e, na vazão máxima, permanece abaixo de 20 % da queda mínima.	Igual porcentagem
Controle de vazão	• Sensor proporcional ao fluxo – grandes variações de vazão: elemento primário instalado em série com a válvula de controle.	Linear
	• Sensor proporcional ao fluxo – grandes variações de vazão: elemento primário instalado em <i>bypass</i> (contorno) da válvula.	Linear
	• Sensor proporcional ao fluxo – pequenas variações de vazão, mas grandes variações de queda de pressão com o aumento da vazão: elemento primário em série com a válvula.	Igual porcentagem
	• Sensor proporcional ao fluxo – pequenas variações de vazão, mas grandes variações de queda de pressão com o aumento da vazão: elemento primário em <i>bypass</i> da válvula.	Igual porcentagem
	• Sensor proporcional ao quadrado do fluxo – grandes variações de vazão: elemento primário em série com a válvula de controle.	Linear
	• Sensor proporcional ao quadrado do fluxo – grandes variações de vazão: elemento primário em <i>bypass</i> da válvula.	Igual porcentagem
	• Sensor proporcional ao quadrado do fluxo – pequenas variações de vazão, porém grandes variações de queda de pressão com o aumento da vazão: elemento primário em série com a válvula.	Igual porcentagem
	• Sensor proporcional ao quadrado do fluxo – pequenas variações de vazão, porém grandes variações de queda de pressão com o aumento da vazão: elemento primário em <i>bypass</i> da válvula.	Igual porcentagem
	• Sensor proporcional ao quadrado do fluxo – pequenas variações de vazão, porém grandes variações de queda de pressão com o aumento da vazão: elemento primário em <i>bypass</i> da válvula.	Igual porcentagem

Outro fator relevante na seleção da válvula de controle é o corpo e internos. A escolha deste fator costuma ser relativamente simples, pois cada modelo tem um campo de aplicação bem definido. Para **fluidos limpos** — como água, gases de alta pressão e a maior parte dos produtos petroquímicos — as válvulas globo são, em geral, a opção preferida. Quando o fluido contém **sólidos em suspensão**, é pastoso, lamacento ou fibroso, as válvulas esfera ganham destaque, já que o percurso pleno facilita a passagem. Em linhas de **grande diâmetro** que transportam gases sob baixa pressão, as válvulas borboleta se mostram mais adequadas, oferecendo boa capacidade de controle e menor custo em comparação às válvulas globo ou esfera do mesmo diâmetro. A Tabela 9.11 compara os principais tipos de corpo de válvula, destacando suas vantagens e desvantagens; com base nesses dados é apresentado o fluxograma da Figura 9.17, que orienta a seleção da válvula de controle.

Tabela 9.11: Comparação entre os principais tipos de válvulas de controle^[9].

Válvula	Vantagens	Desvantagens
Globo de sede simples	- Alta rangeabilidade - Possibilidade de vedação total - Opção de obturador reversível - Muito empregada em diâmetros reduzidos (abaixo de 2 in)	- Como o obturador é não balanceado, são necessários atuadores mais robustos para superar as forças de operação. - Apresentar baixa recuperação de pressão
Globo de sede dupla	- Capacidade de vazão maior que a de válvulas de sede simples de mesmo diâmetro - Alta rangeabilidade - Obturador balanceado, exigindo menor esforço de manobra e atuadores menores - Disponível na versão com obturador reversível. - Indicada para diâmetros acima de 2 in.	- Vazamento relativamente alto, normalmente tolerado até 1% da vazão máxima. - Baixa recuperação de pressão. - Propensa à erosão em serviços com elevado diferencial de pressão.
Globo de três vias	- Adequadas para misturar fluidos ou dividir o fluxo. - Em algumas aplicações, podem substituir duas válvulas de duas vias. - Amplamente empregadas no controle de temperatura de trocadores de calor.	- Não são adequadas para controle de vazão plena. - As condições de escoamento precisam ser muito bem definidas.
Globo bipartida	- Excelente desempenho de controle - Vedação total - Estrutura simples, oferecida também em materiais especiais - Manutenção fácil, pois a desmontagem é rápida	Suporta apenas quedas de pressão moderadas devido ao guia localizado no topo
Globo angular	- Excelente característica de controle. - Elevada capacidade de vazão e alta rangeabilidade - Reduz problemas de erosão. - Adequada para instalações com espaço limitado devido à construção angular de 90°. - Permite o controle de fluidos com sólidos em suspensão e lamas.	Não disponível em diâmetros inferiores a 2 in
Tipo diafragma	- Alta capacidade de vazão e baixo custo. - Adequada para fluidos sujos - O diafragma isola os componentes internos do contato com o fluido de processo - Garante vedação estanque mesmo em baixas pressões - Compatível com fluidos corrosivos, graças à ampla variedade de materiais disponíveis para o diafragma e o revestimento do corpo	- Característica de controle limitada. - Rangeabilidade reduzida - Vida útil do diafragma relativamente curta - Baixa velocidade de resposta - Temperaturas de operação restritas pelas propriedades do diafragma
Borboleta	- Elevada capacidade de vazão - Baixo custo, sobretudo em grandes diâmetros - Ótima recuperação de pressão, resultando em baixa perda de carga - Adequada para fluidos sujos - Exige espaço mínimo para instalação - Disponível em grandes diâmetros	- Exige torque operacional elevado sob grandes quedas de pressão. - A vedação total depende de revestimento resiliente, limitando a temperatura máxima de operação. - Em algumas aplicações de controle, o ângulo de curso pode ficar restrito a 60°.
Esfera	- Grande capacidade de vazão - Ótima característica de controle - Alta rangeabilidade - Custo considerado razoável - Amplamente empregada no controle de lamas, fluidos viscosos e fibrosos	Desempenho insatisfatório sob altas quedas de pressão

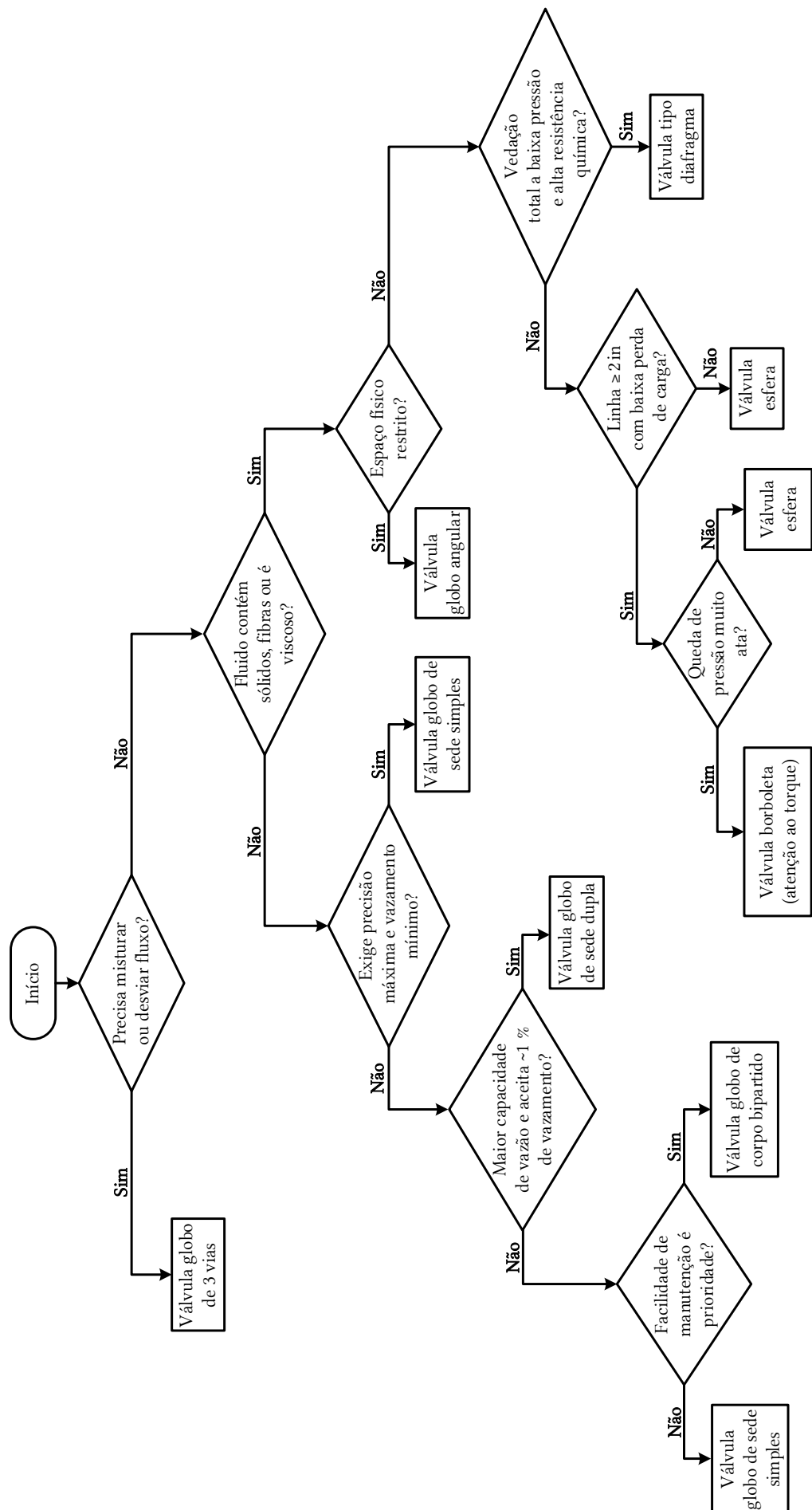


Figura 9.17: Fluxograma para a seleção da válvula de controle mais adequada, elaborado a partir dos dados da Tabela 9.11.

Capítulo 10

CLP – Controlador Lógico Programável

Fundamental na automação moderna, o Controlador Lógico Programável (CLP) revolucionou a indústria ao substituir relés por sistemas digitais robustos e flexíveis, vitais para a eficiência e segurança operacional. Este capítulo detalha a arquitetura de *hardware* desses dispositivos, examinando a Unidade Central de Processamento, as tecnologias de memória e os módulos de entrada e saída digitais e analógicos, além de explicar o ciclo de varredura (*scan*) que rege seu funcionamento lógico. São exploradas as cinco linguagens de programação padronizadas pela norma IEC 61131-3, diferenciando métodos gráficos, como *Ladder*, Blocos de Função e SFC, de textuais, como Lista de Instruções e Texto Estruturado. Ao final, o leitor será capaz de compreender a estrutura interna e os princípios operacionais dos CLPs, distinguindo suas diversas linguagens para aplicar a lógica de controle mais adequada a cada cenário industrial, garantindo precisão, estabilidade e confiabilidade no gerenciamento de processos complexos.

10.1 Introdução

A automação industrial vem desempenhando um papel crucial na eficiência, qualidade e segurança dos processos industriais modernos. Neste cenário, destaca-se o Controlador Lógico Programável (CLP), uma tecnologia robusta desenvolvida para substituir sistemas complexos e inflexíveis baseados em relés e circuitos eletromecânicos. O CLP proporciona um controle mais ágil, seguro e adaptável, permitindo maior precisão na execução das operações industriais.

Segundo a norma IEC 61131-1^[119], o CLP consiste em um sistema eletrônico de operação digital, projetado para uso em ambiente industrial, que utiliza uma memória programável para armazenamento interno de instruções orientadas ao usuário, a fim de implementar funções específicas tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e operações aritméticas, para controlar, por meio de entradas e saídas digitais ou analógicas, diferentes tipos de máquinas ou processos. Tanto o CLP quanto seus periféricos associados são projetados de forma que possam ser facilmente integrados em um sistema de controle industrial e utilizados de maneira simples em todas as funções pretendidas.

O Controlador Lógico Programável revolucionou os sistemas de comando e controle industriais desde sua criação no final dos anos 1960. Trata-se de um dispositivo de controle industrial microprocessado, inicialmente projetado para executar controle lógico de variáveis discretas, substituindo os grandes gabinetes repletos de relés que compunham os circuitos lógicos sequenciais da época. Atualmente, o CLP é amplamente utilizado em diversos tipos de controle. O primeiro equipamento surgiu na indústria automobilística norte-americana, especificamente na *Hydramatic Division* da General Motors, em 1968. Na época, havia uma grande dificuldade em alterar a lógica de controle dos painéis sempre que ocorria uma mudança nas linhas de montagem, resultando em altos custos financeiros e operacionais. A *Bedford Associates* desenvolveu para a GM o MODICON (*Modular Digital Controller*), dispositivo que permitia a execução de múltiplas operações diferentes e podia ser facilmente reprogramado^[9,69,109,119].

O CLP passou por uma evolução expressiva desde sua criação, revolucionando a automação industrial. Inicialmente grande, caro e limitado, os CLPs atuais são compactos, potentes e altamente conectados, capazes de integrar-se a redes e sistemas de informação para

otimizar processos produtivos e permitir tomadas de decisões inteligentes. A evolução histórica pode ser resumida por décadas e é apresentada na Tabela 10.1.

Tabela 10.1: Evolução histórica do CLP

Década	Acontecimento
1960	Surgimento dos primeiros CLPs como alternativa eficiente aos complexos relés eletromecânicos, trazendo flexibilidade na programação.
1970	Expansão significativa no uso de CLPs pela indústria automobilística, especialmente no controle das linhas de produção.
1980	Aumento substancial na capacidade de processamento e integração com redes industriais avançadas.
1990	Desenvolvimento de CLPs com interfaces mais intuitivas e adoção de protocolos padronizados de comunicação.
2000	Padronização de protocolos como EtherNet/IP e PROFINET, ampliando a interoperabilidade entre CLPs e sistemas diversos.
2010	Forte integração com sistemas SCADA, nuvem e Internet das Coisas (IoT), permitindo supervisão e controle remotos das operações industriais.
2020	Incorporação de inteligência artificial, análise avançada de dados em tempo real e segurança cibernética integrada aos CLPs, consolidando o avanço da Indústria 4.0.

A importância do CLP na instrumentação reside na sua capacidade de integrar e gerenciar diversos instrumentos e sensores utilizados para monitorar e controlar variáveis industriais, tais como pressão, vazão, nível, temperatura e outras grandezas de processo. Por meio de módulos específicos de entrada e saída analógicos ou digitais, o CLP recebe dados dos instrumentos, processa essas informações segundo uma lógica programada e comanda ações automáticas em válvulas, motores e outros atuadores. Dessa forma, os CLPs tornam-se elementos essenciais para garantir o controle preciso, seguro e eficiente de processos industriais, reduzindo falhas, melhorando a produtividade e facilitando manutenções e ajustes no sistema.

10.2 Estrutura e arquitetura

O controlador lógico programável apresenta uma estrutura similar à de um computador, sendo composto por uma Unidade Central de Processamento (UCP), interfaces de entrada e saída (E/S) e módulos de memória. Entretanto, o CLP se diferencia significativamente de um computador convencional pela qualidade superior de sua fonte de alimentação, que oferece alta estabilidade e eficiente filtragem, pelas interfaces de entrada e saída projetadas para resistir a ruídos industriais, e pelo invólucro especialmente desenvolvido para suportar ambientes industriais agressivos. A Figura 10.1 apresenta esquematicamente essa estrutura básica, destacando os principais componentes: UCP, módulos de memória, interfaces de E/S e o terminal de programação [\[9,69,109,119,120\]](#).

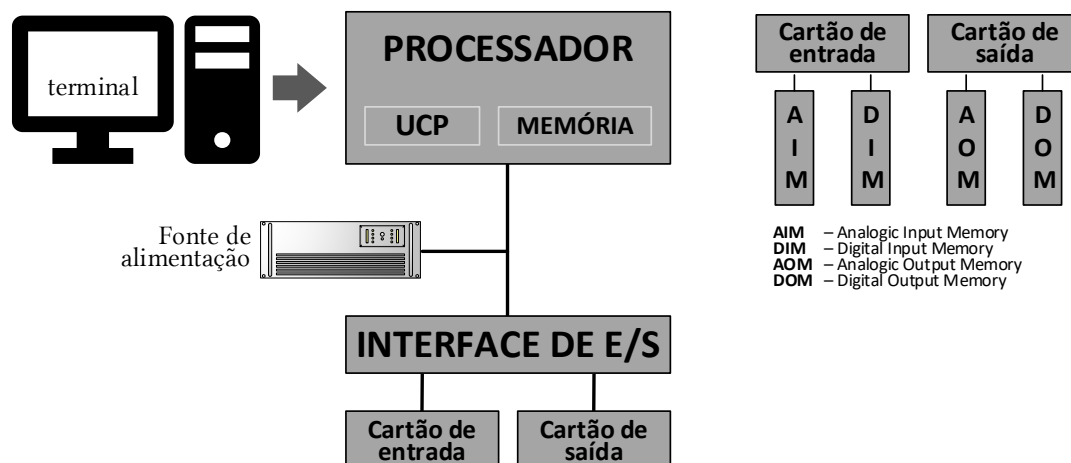


Figura 10.1: Representação da estrutura básica do controlador lógico programável.

10.2.1 Unidade central de processamento

A Unidade Central de Processamento (UCP) do Controlador Lógico Programável (CLP) é responsável por executar o programa armazenado em sua memória, coletando dados das entradas, processando-os conforme as instruções, e enviando comandos para as saídas. O CLP pode ter uma configuração compacta, com pontos de entradas e saídas integrados à UCP, ou modular, com módulos separados conectados à unidade central. A execução do programa pode ocorrer de diferentes formas^[109,120].

Processamento cíclico: método mais comum, no qual as instruções são executadas sequencialmente de forma repetitiva. O tempo gasto para completar uma varredura depende do tamanho do programa.

Processamento por interrupção: usado para situações críticas que exigem resposta imediata. O programa regular é interrompido temporariamente para executar uma rotina específica de emergência, retomando posteriormente o processamento normal.

Processamento comandado por tempo: executa tarefas a intervalos regulares pré-determinados, sendo especialmente útil em processos que requerem precisão temporal.

Processamento por evento: ativa rotinas específicas diante de eventos como retorno da energia, falha de bateria ou estouro do tempo limite de supervisão, parando o sistema em caso de falha e emitindo sinais de alerta ao operador.

10.2.2 Memória

O sistema de memória é essencial em um CLP, pois é onde são armazenadas todas as instruções e dados necessários à execução dos programas. A capacidade de memória é definida pelo número de palavras que pode armazenar, sendo estas palavras formadas sempre pelo mesmo número de bits. Existem diferentes tipos de memória, escolhidos de acordo com o tipo e forma de processamento das informações. A memória pode ser classificada em duas categorias principais: **memória de programa**, para armazenar instruções fixas e dados constantes; e **memória de dados**, para informações que podem variar durante a operação. Entre os tipos disponíveis destacam-se as memórias ROM (*Read Only Memory*), utilizadas para armazenar dados que não podem ser modificados durante o funcionamento normal, mas que mantêm as informações mesmo sem alimentação, e as memórias RAM (*Random Access Memory*), que permitem leitura e escrita durante a operação do sistema. Na Tabela 10.2 são apresentados os tipos de memórias utilizadas em CLP e suas características^[109,118,120].

Tabela 10.2: Características dos tipos de memórias utilizadas em controladores lógicos programáveis.

Tipo de Memória	Descrição	Características
RAM dinâmica	Memória de acesso aleatório	É uma memória volátil, gravável pelo usuário, com baixa velocidade de acesso, pequena ocupação de espaço físico e custo reduzido.
RAM	Memória de acesso aleatório	É uma memória volátil, gravável pelo usuário, com alta velocidade de acesso, maior ocupação de espaço físico e custo elevado.
ROM máscara	Memória somente de leitura	É uma memória não volátil, gravada permanentemente pelo fabricante e que não permite apagamento ou reprogramação após sua fabricação.
PROM	Memória programável somente de leitura	É uma memória não volátil, gravada uma única vez pelo usuário e que não permite apagamento ou reprogramação após a gravação inicial.
EPROM	Memória programável/apagável somente de leitura	É uma memória não volátil, gravável pelo usuário, cujo apagamento é realizado por exposição à luz ultravioleta.
EPROM EEPROM FLASH EPROM	Memória programável/apagável somente de leitura	É uma memória não volátil, gravável pelo usuário, que permite apagamento elétrico diretamente no circuito, sem necessidade de remoção do componente.

Notas: RAM - Random Access Memory; ROM - Read-Only Memory; PROM - Programmable Read-Only Memory; EPROM - Erasable and Programmable Read-Only-Memory; EEPROM - Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory.

10.2.3 Sistema de entradas e saídas E/S

A estrutura de E/S do CLP condiciona, isola e filtra os sinais trocados com os dispositivos de campo (botões, fim de curso, relés, sensores analógicos, termopares, indutivos, lâmpadas, displays, válvulas, contadoras etc.), protegendo a UCP contra ruídos elétricos típicos de ambientes industriais e garantindo a confiabilidade das informações. A alimentação das E/S pode ser única ou distribuída, integrada ao módulo ou em unidades externas. Os dispositivos de campo são geralmente selecionados e instalados pelo usuário, de modo que o tipo de E/S é definido pelos níveis de tensão/corrente exigidos. Os fabricantes fornecem os circuitos de E/S em módulos (4, 8, 16 ou mais canais) e a alimentação desses dispositivos costuma ser externa ao CLP^[69,109,120].

As entradas e saídas digitais podem apresentar diferentes tipos de acionamento e níveis de tensão, como transistores, triacs — dispositivos semicondutores utilizados para comutação de cargas em corrente alternada — ou contatos secos, que funcionam como relés sem fornecimento interno de energia (ex: 24 VCC, 110/220 VCA). Já as entradas e saídas analógicas operam com sinais contínuos de corrente ou tensão, como 4–20 mA ou 0–10 V, sendo possível, em determinadas aplicações, configurar a faixa de operação por meio de software. ^[69,109,120].

Módulos de entrada

Os módulos de entrada do CLP funcionam como interfaces entre os sensores de campo e a lógica de controle, sendo compostos por cartões eletrônicos capazes de receber sinais de diferentes tipos e quantidades, conforme a aplicação industrial. Esses sinais podem ser classificados em dois grupos principais: **elementos discretos**, que operam com apenas dois estados (ligado/desligado), e **elementos analógicos**, que variam dentro de uma faixa contínua de valores ^[69,109,120].

As **entradas digitais** podem operar com corrente contínua (24 VCC) ou alternada (110/220 VCA) e ser do tipo NPN (entrada ativada com potencial negativo) ou PNP (entrada ativada com potencial positivo), exigindo diferentes polaridades para sua ativação. Entradas de 24 VCC são recomendadas para distâncias de até 50 metros para evitar interferência por ruído. Exemplos: botão, chave de nível, pressostato, termostato etc.

As **entradas analógicas** permitem ao CLP receber sinais de sensores que medem variáveis contínuas, como tensão ou corrente. As faixas de operação mais comuns variam de 0 a 10 VCC ou de 4 a 20 mA. Um aspecto essencial dessas entradas é a resolução, expressa em bits: quanto maior a resolução, maior a precisão na conversão do sinal analógico para digital. Por exemplo, uma entrada de 12 bits permite maior sensibilidade que uma de 8 bits. Entradas em corrente são geralmente diretas, enquanto entradas em tensão podem requerer um resistor *shunt* (resistor de baixa resistência elétrica), dimensionado pela Lei de Ohm, para a conversão de corrente elétrica em uma tensão proporcional ao sinal. Exemplos: Sensores de pressão, sensores de vazão, sensores de nível, sensores de temperatura etc.

Módulos de saída

Os módulos de saída de um CLP realizam a interface entre o processador e os dispositivos atuadores, transmitindo os sinais resultantes do processamento lógico. Esses módulos, compostos por cartões eletrônicos, podem acionar **atuadores discretos** (com dois estados: ligado/desligado) ou **atuadores analógicos** (com variação contínua de valores)^[69,109,120].

Nas **saídas digitais**, é possível controlar dispositivos como relés, contadores, relés de estado sólido e solenóides. Elas podem ser implementadas como: 1) saídas a relé (contato seco), que suportam cargas CA e CC; 2) saídas a transistor, rápidas, porém limitadas a cargas em corrente contínua e; 3) saídas a triac, indicadas para cargas em corrente alternada, com alta durabilidade. Exemplos: válvula solenoide, alarme sonoro, contador, relé etc.

Já as **saídas analógicas**, em corrente ou tensão, são diretamente conectadas aos dispositivos finais e exigem compatibilidade de sinal: saídas em tensão devem alimentar dispositivos que leem tensão, enquanto saídas em corrente são mais versáteis, podendo

alimentar receptores de corrente ou tensão. Exemplos: válvulas de controle, inversor de frequência, potenciômetro etc.

10.3 Princípio de funcionamento

O funcionamento de um CLP baseia-se em um sistema microprocessado que executa continuamente ciclos de varredura (ou *scan*), nos quais lê entradas, processa o programa do usuário e atualiza as saídas. A Unidade Central de Processamento (UCP) opera em dois estados principais: programação (modo *off-line*, no qual o CLP não executa o controle e pode ser configurado ou reprogramado) e execução (modo *on-line*, em que o programa é executado continuamente, podendo, em alguns casos, ser modificado em tempo real). Há também o estado de erro, ativado em situações de falha.

Quando energizado no modo de execução, o CLP realiza uma rotina de inicialização que inclui limpeza de memória, testes da RAM e verificação da integridade do programa. Em seguida, **inicia-se** o ciclo de varredura: o CLP lê os sinais de entrada e os armazena na memória imagem, executa o programa com base nesses dados e, por fim, grava os resultados na memória imagem de saída, atualizando os módulos de saída. Esse ciclo se repete continuamente. O tempo total de cada varredura depende do tamanho do programa e da quantidade de E/S. O tempo de processamento é supervisionado por um circuito chamado *Watch Dog Timer* (mecanismo de proteção contra falhas de software ou travamentos), que interrompe a operação em caso de estouro de tempo, colocando o sistema em estado de erro (Figura 10.2)^[69,120,121].

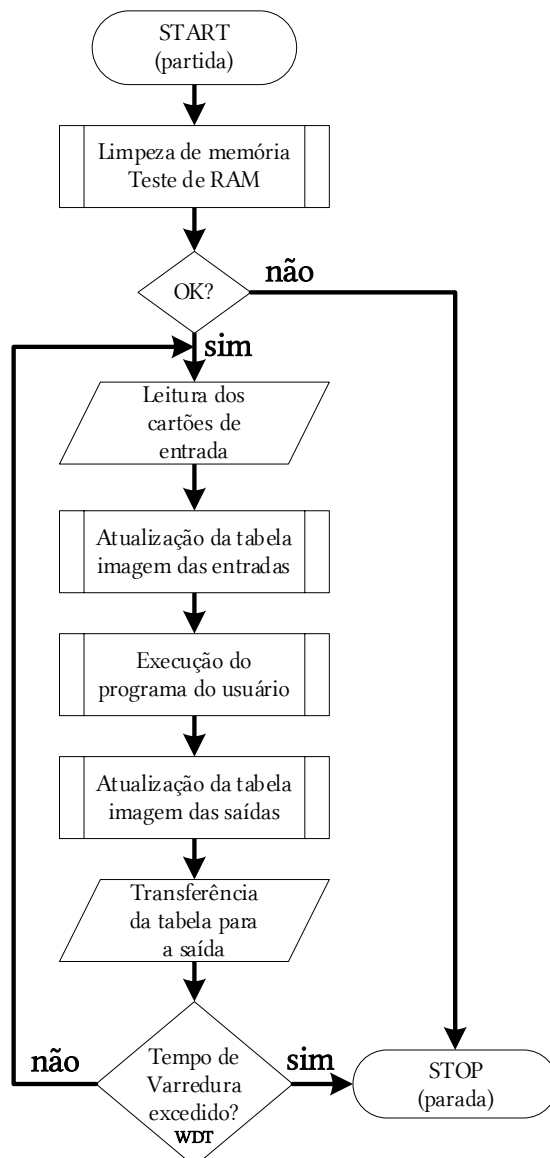


Figura 10.2: Fluxograma representativo do princípio de funcionamento do CLP

10.4 Linguagens de programação

A linguagem de programação dos CLPs representa o meio pelo qual o usuário insere instruções e informações de controle no dispositivo. Conforme definido pela norma IEC 61131^[118,123], um programa de CLP é um conjunto lógico composto por elementos e construções da linguagem de programação, necessários para o processamento dos sinais envolvidos no controle de máquinas ou processos industriais. Essas linguagens podem ser classificadas em linguagens gráficas e linguagens textuais, padronizadas pela IEC 61131, conforme apresentado na Tabela 10.3^[121].

Tabela 10.3: Linguagens de programação padronizadas pela IEC 61131

Categoria	Linguagem	Descrição
Linguagem Gráfica	Diagrama Ladder (LD – Ladder Diagram)	Representação gráfica com degraus lógicos que simulam a lógica de relés, amplamente usada em CLPs.
	Diagrama de Blocos de Função (FBD – Function Block Diagram)	Representa o fluxo do processo com blocos interconectados, aplicável a funções como lógica e contadores.
	Mapa de Função Sequencial (SFC – Sequential Function Chart)	Representa graficamente passos, transições e ações, ideal para processos complexos e paralelos.
Linguagem Textual	Lista de Instruções (IL – Instruction List)	Linguagem textual de baixo nível baseada em instruções mnemônicas.
	Texto Estruturado (ST – Structured Text)	Linguagem textual de alto nível, similar ao BASIC, C ou PASCAL, voltada a lógicas complexas.

Entre essas linguagens de programação, o **Diagrama Ladder** é a linguagem mais difundida na programação de CLPs. Ela reproduz a lógica a relé convencional, o que facilita sua compreensão por técnicos familiarizados com esquemas elétricos. É composta por representações de contatos e bobinas, além de blocos de instruções que simulam o comportamento lógico de sistemas de controle.

O **Diagrama de Blocos de Função** utiliza blocos visuais conectados para executar operações como lógica booleana, temporizações ou contagens. Sua estrutura lembra os diagramas utilizados em eletrônica para representar circuitos de forma simplificada, facilitando o entendimento funcional.

Já o **Mapa de Função Sequencial** é adequado para representar graficamente o fluxo de processos sequenciais e paralelos, sendo especialmente útil em aplicações que exigem controle de múltiplas máquinas ou etapas simultâneas.

Por fim, as linguagens textuais **Lista de Instruções** e **Texto Estruturado** oferecem maior flexibilidade para lógicas complexas. O Texto Estruturado, por exemplo, é empregado quando os requisitos de controle são difíceis de implementar em linguagens gráficas, utilizando estruturas condicionais e laços similares aos encontrados em linguagens de programação de alto nível.

10.4.1 Diagrama Ladder (*DL – Diagram Ladder*)

A linguagem *ladder* baseia-se na lógica de relés, utilizando contatos (ou chaves) e bobinas, o que a torna especialmente acessível para profissionais familiarizados com circuitos de comando elétrico. Sua estrutura é composta por diversos circuitos dispostos horizontalmente, chamados de “*rung*”, com bobinas posicionadas na extremidade direita e alimentados por duas barras verticais laterais — característica que justifica o nome *ladder* (escada)^[109,118,120,121,123].

Cada linha horizontal representa uma sentença lógica: os contatos funcionam como entradas, as bobinas como saídas e a associação entre os contatos define a lógica de controle. Em *ladder*, cada operando — termo que designa genericamente os contatos e bobinas — é vinculado a um endereço da memória do CLP, geralmente representado por um nome

simbólico escolhido pelo fabricante para facilitar a programação. O estado de cada operando é refletido por um bit na memória imagem: esse bit assume o valor 1 quando o operando está acionado e 0 quando desacionado.

Bobinas: são responsáveis por acionar o endereço associado; enquanto uma bobina de saída estiver energizada, os respectivos terminais no módulo de saída permanecerão conduzindo eletricidade. **Contatos:** são ativados conforme o estado do endereço que os identifica. Contatos associados a entradas se fecham se forem do tipo normalmente aberto (NA) e se abrem se forem normalmente fechados (NF), de acordo com o sinal recebido no módulo de entrada.

Por exemplo, os contatos de entrada utilizados para acionar bobinas devem ter o mesmo tipo do dispositivo externo que ativa o ponto correspondente no módulo de entrada. Por outro lado, o contato usado para desacionar ou desenergizar uma bobina deve ser do tipo oposto ao contato externo correspondente, conforme apresentado na Tabela 10.4.

Tabela 10.4: Relação das ações e os tipos de contatos

Ação	Se a chave externa for	O contato no <i>ladder</i> deve ser
Para ligar	NA	NA
	NF	NF
Para desligar	NA	NF
	NF	NA

É possível utilizar chaves externas de qualquer tipo, desde que o contato programado no *ladder* seja adequado à função. No entanto, por razões de segurança, recomenda-se evitar o uso de chave externa do tipo NF para ligar e do tipo NA para desligar.

A lógica *ladder*

Como mencionado anteriormente, a lógica *ladder* é semelhante à lógica de relés. Para que um relé seja energizado, é necessário haver continuidade elétrica, permitindo a passagem de corrente. Por exemplo, ao utilizar a chave C1 (NA) para energizar a bobina B1 (Figura 10.3A), o fechamento da chave estabelece essa continuidade entre a fonte de alimentação e os terminais da bobina, acionando-a. A representação equivalente desse circuito na linguagem *ladder* pode ser vista na Figura 10.3B. Ao analisar os módulos de entrada e saída de um CLP, observa-se que, ao ser fechado o dispositivo conectado à entrada digital E1 (NA), o contato correspondente (E1) será ativado, estabelecendo continuidade no circuito. Isso resultará na energização da bobina S1, o que, por sua vez, acionará o dispositivo conectado à saída digital S1.

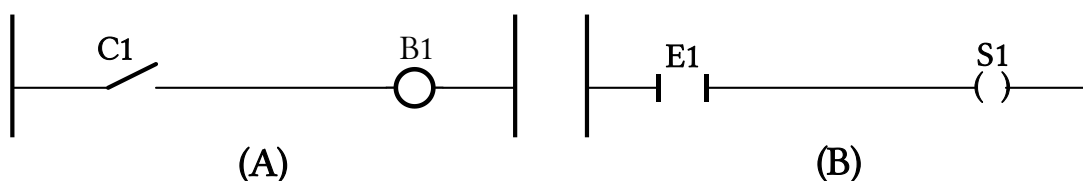


Figura 10.3: Programação de CLP para acionamento de uma bobina com contato NA: (A) lógica de relé e; (B) lógica *ladder*.

Também é possível utilizar um contato do tipo NF (normalmente fechado), que funciona como um inversor ou contato de negação. A lógica é semelhante à ilustrada na Figura 10.3, com a substituição do contato NA por um contato NF. Considerando os módulos de entrada e saída do CLP, quando o dispositivo conectado à entrada digital E1 (NF) for aberto, o contato E1 será desativado. Por se tratar de um contato NF, isso estabelecerá continuidade no circuito, acionando a bobina S1 e, conseqüentemente, ativando o dispositivo conectado à saída digital S1.

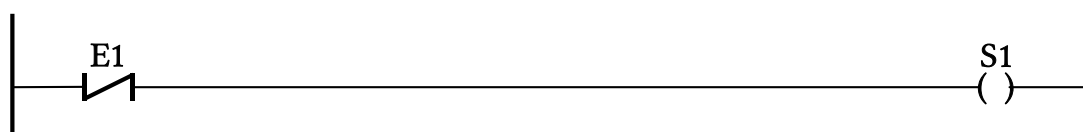


Figura 10.4: Programa *ladder* para acionamento de uma bobina com contato NF.

Na linguagem *ladder*, é possível combinar contatos para formar lógicas do tipo **E (AND)** e **OU (OR)** com relação à saída. Contatos dispostos em série realizam a lógica **E**, enquanto contatos em paralelo representam a lógica **OU**. A Figura 10.5A ilustra a lógica **E**, onde a saída S1 será ativada somente se E1 estiver acionado **E** E2 estiver desacionado **E** E3 estiver acionado. Já a lógica **OU** é mostrada na Figura 10.5B, sendo que S1 será acionada se E1 for acionado **OU** E2 estiver desacionado **OU** E3 for acionado. Também é possível combinar ambas as lógicas para formar uma condição mais elaborada (Figura 10.5C), na qual a saída será acionada quando E3 estiver acionado **E** E1 acionado **OU** E3 acionado **E** E2 desacionado.

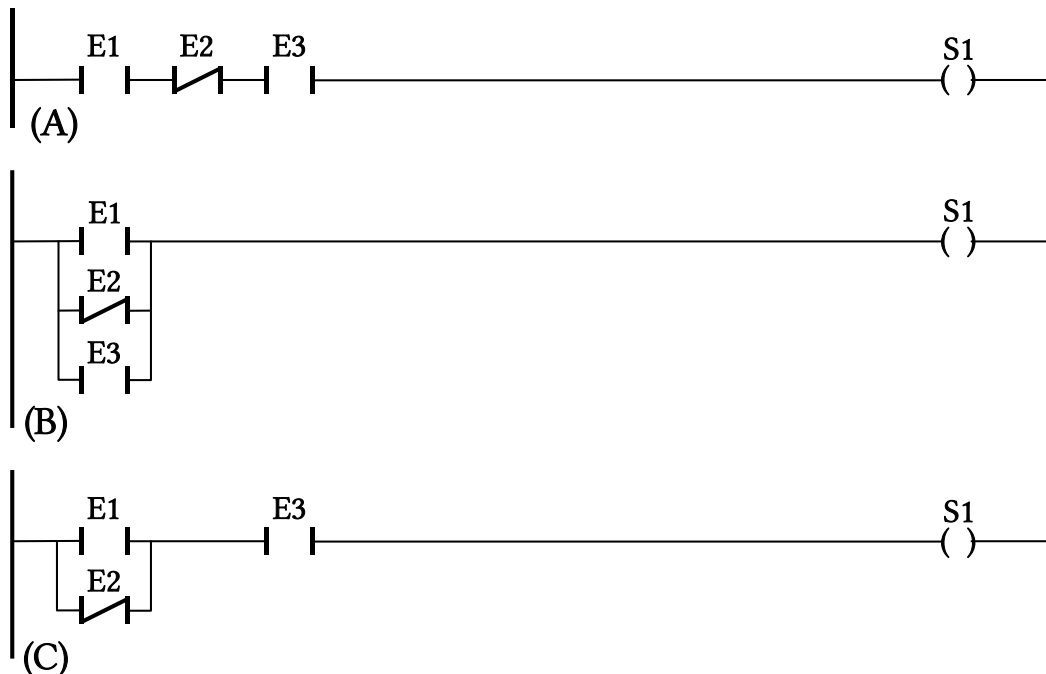


Figura 10.5: Programa *ladder* para acionamento de bobina: (A) lógica E (AND); (B) lógica OU (OR) e; (C) lógica mista.

A linguagem *ladder* dispõe de diversos blocos de função, nos quais instruções básicas são representadas por elementos funcionais padronizados. Embora a forma de apresentação desses blocos possa variar conforme o modelo do CLP utilizado, seu princípio de funcionamento permanece o mesmo. Esses blocos são utilizados para complementar ou aprimorar o controle do processo, permitindo a inserção de funções como temporizadores, contadores, operações aritméticas (soma, subtração, multiplicação, divisão), controle **PID**, conversões entre binário e decimal, extração de raiz quadrada, entre outras funcionalidades. A seguir serão apresentadas algumas instruções básicas comumente utilizadas.

A função **temporizador** mede o intervalo de tempo decorrido a partir de sua habilitação até atingir o tempo pré-configurado (PT). Ao final da contagem, a instrução ativa um bit específico na memória de dados, elevando-o ao nível lógico 1 e acionando o operando associado. Existem dois modos principais de operação: TON (temporização na energização) e TOFF (temporização na desenergização). Na Figura 10.6, é apresentada a aplicação da função TON. Quando a entrada E1 for ativada, o temporizador é habilitado e, após 10 segundos, a saída S1 será acionada. Caso E1 seja desativada, o temporizador é imediatamente desabilitado e S1 é desacionada. Em algumas implementações, a instrução pode dispor de duas entradas: uma para habilitação da contagem e outra para reset da saída.

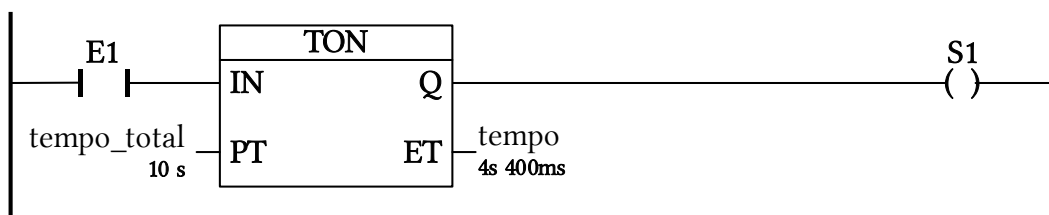


Figura 10.6: Função TON (temporização na energização) da linguagem *ladder*.

A função **contador** registra a quantidade de eventos ocorridos e armazena esse valor em um espaço de memória específico, podendo ser do tipo CTU (contador ascendente) ou CTD (contador descendente). Quando a contagem atinge o valor pré-determinado, a instrução ativa um bit indicando que a contagem foi concluída. Cada contador possui um endereço próprio na memória de dados, onde é armazenado o valor de comparação (*preset*). O contador normalmente utiliza três *bytes* de memória para seu funcionamento: um *byte* para o valor prefixado, um segundo *byte* para o valor atual da contagem, e um terceiro *byte* reservado aos bits de controle associados à operação do contador.

Na Figura 10.7 é apresentada a aplicação da função contador (CTU). A cada pulso recebido na entrada E1, o terminal CU é ativado, incrementando o valor da contagem atual (CV). Quando esse valor atingir o valor pré-definido (PV), a saída Q do contador é ativada, assumindo o valor lógico *TRUE*, o que resulta na energização da bobina S1. A entrada E2 está conectada ao terminal de *reset* (R) e tem a função de reiniciar o contador sempre que for acionada (*TRUE*), zerando o valor da contagem.

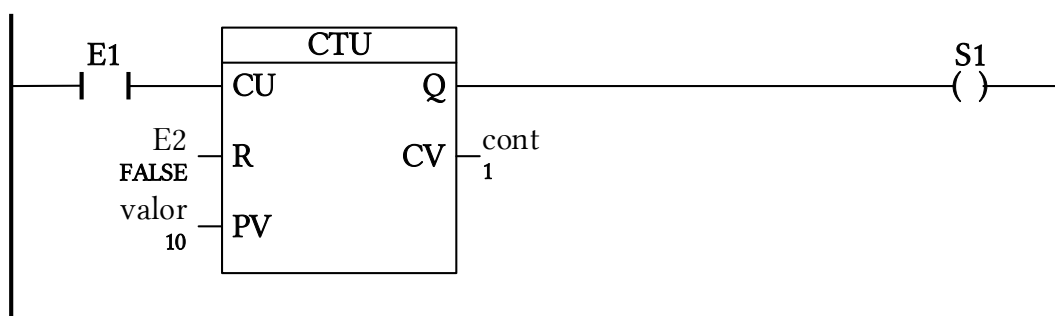


Figura 10.7: Função CTU (contagem ascendente) da linguagem *ladder*.

A função **mover** (MOVE) (Figura 10.8) permite transferir o conteúdo de um endereço de memória para outro, possibilitando a manipulação e o reaproveitamento das informações em diferentes trechos do programa. Essa instrução viabiliza a execução de múltiplas operações com o mesmo dado ao redirecioná-lo entre áreas distintas da memória.

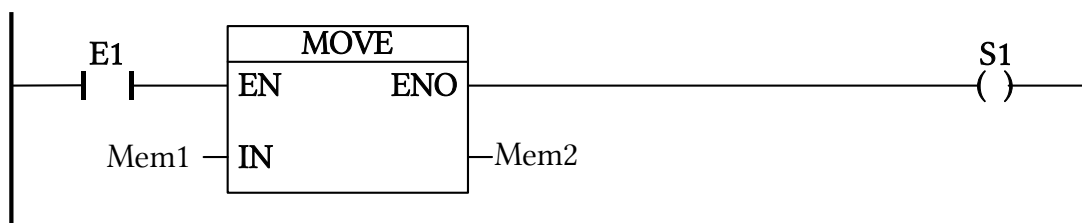


Figura 10.8: Função MOVE da linguagem *ladder*.

A função de **comparação** permite avaliar se o valor armazenado em um endereço de memória é diferente que (NE), igual a (EQ), maior que (GT), menor que (LT), maior ou igual que (GE), ou menor ou igual que (LE) ao valor de outro endereço. Isso possibilita que o programa tome decisões com base em um valor de referência. Como ilustrado na Figura 10.9, ao acionar a entrada E1, duas instruções de comparação são executadas: se o valor do sensor for superior ao valor de referência (REF1), a saída S1 será ativada; se for inferior ao valor da referência (REF2), a saída S2 será acionada. Essas comparações ocorrem somente enquanto a entrada E1 estiver ativada. Caso contrário, ambas as saídas, S1 e S2, permanecerão desativadas. A mesma lógica se aplica às comparações de igualdade, maior ou igual e menor ou igual.

Funções matemáticas como adição (ADD), subtração (SUB), multiplicação (MUL) e divisão (DIV) podem ser aplicadas na linguagem *ladder* de forma prática e direta. Como ilustrado na Figura 10.10, essas operações são executadas sempre que a entrada E1 é acionada. Nesse momento, a função matemática definida realiza o cálculo entre os dois valores de referência (REF1 e REF2), produzindo o resultado conforme a operação especificada.

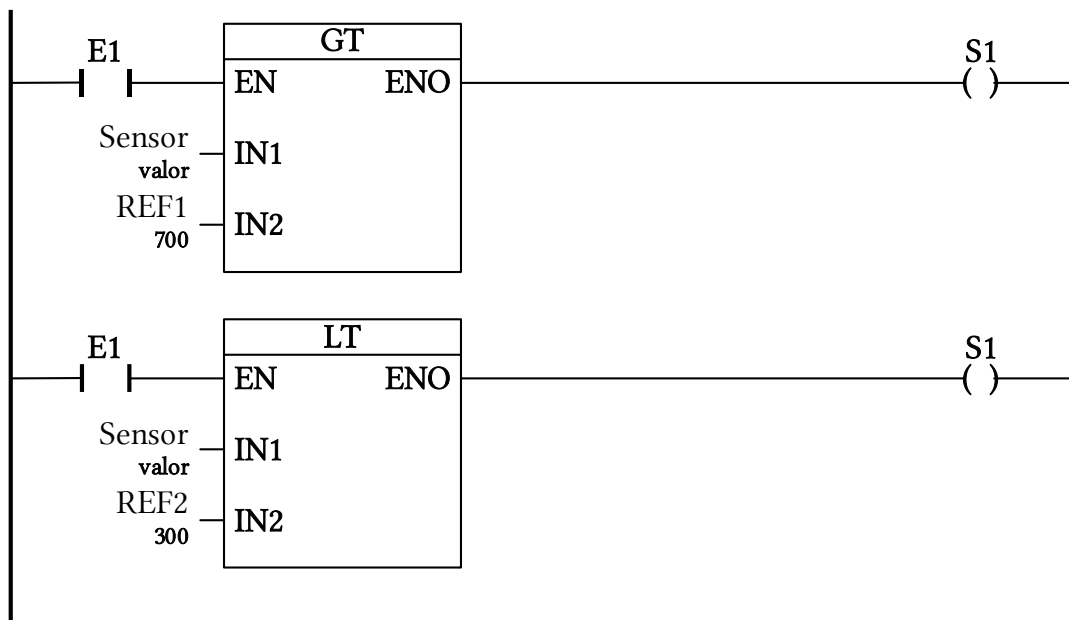


Figura 10.9: Funções de comparação.

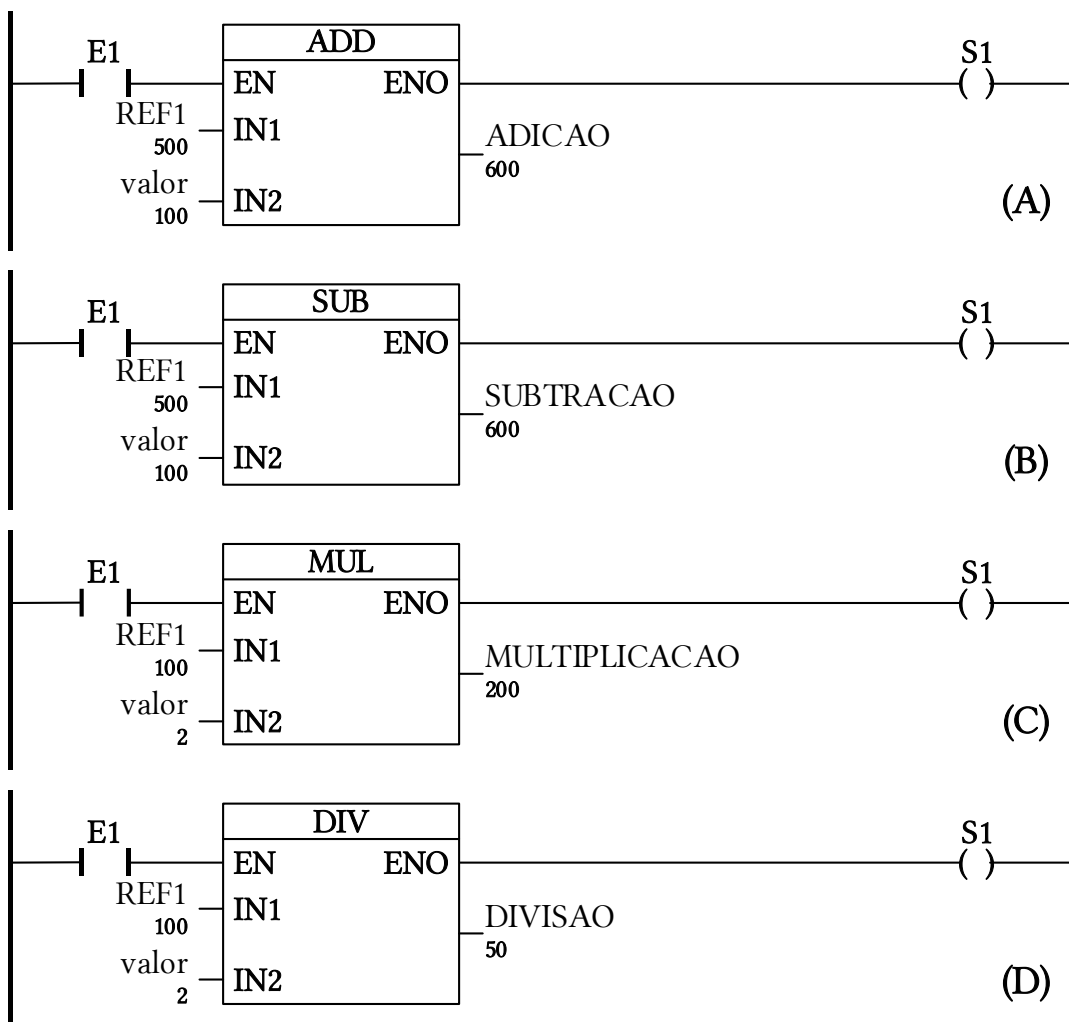


Figura 10.10: funções matemáticas; (A) Adição; (B) Subtração; (C) Multiplicação e; (D) Divisão.

EXEMPLO 10.1: Em um processo industrial, utiliza-se um tanque pulmão para o armazenamento de determinado líquido (Figura 10.11). Esse tanque é equipado com duas válvulas: uma de entrada (YV-101), normalmente aberta, e outra de saída (YV-102), normalmente fechada. O enchimento e o esvaziamento do tanque são realizados por duas

chaves: uma para nível alto (LSH-101) e outra para nível baixo (LSL-101).

- Quando a chave de nível alto (LSH-101) for acionada: A válvula de entrada (YV-101) deve ser fechada e a válvula de saída (YV-102) aberta. A válvula (YV-101) permanecerá fechada até que a chave de nível baixo (LSL-101) seja acionada.
- Quando a chave de nível baixo (LSL-101) for acionada: A válvula de saída (YV-102) deve ser fechada e a válvula de entrada (YV-101) reaberta. A válvula (YV-102) permanecerá fechada até que a chave de nível alto (LSH-101) seja novamente acionada.

Apresente o diagrama *ladder* que represente o enchimento e o esvaziamento do tanque.

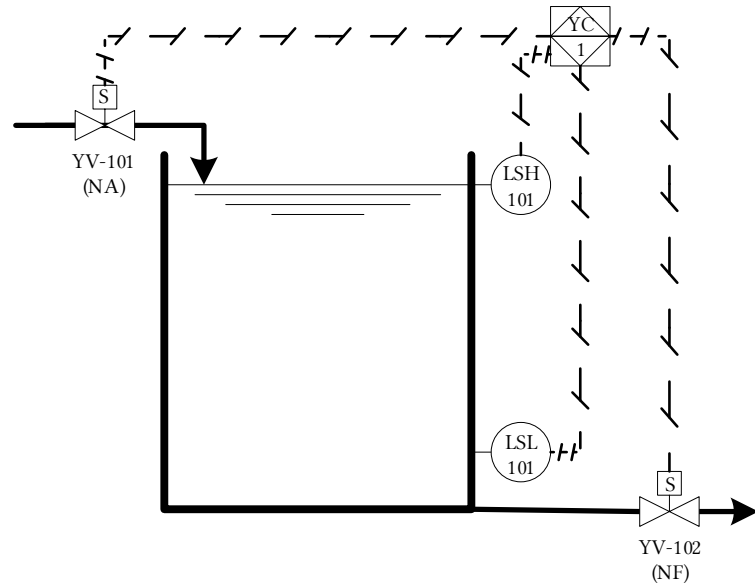


Figura 10.11: Tanque de armazenamento com sistema discreto de enchimento e esvaziamento.

Uma prática recomendada na programação de CLP's é elaborar previamente a tabela de endereçamento. A Tabela 10.5 apresenta os elementos utilizados no sistema juntamente com seus respectivos endereços, facilitando a organização e a implementação do programa.

Tabela 10.5 : Tabela de endereçamento para o desenvolvimento do diagrama *ladder*

Elemento	Endereço	Função
LSH	I0.1	Chave de nível alto (sensor superior)
LSL	I0.2	Chave de nível baixo (sensor inferior)
V1	Q0.1	Válvula de entrada (normalmente aberta)
V2	Q0.2	Válvula de saída (normalmente fechada)
B1	M0.1	Memória de controle (enchimento)
B2	M0.2	Memória de controle (escoamento)

Lógica:

Quando LSH (nível alto) for acionada:

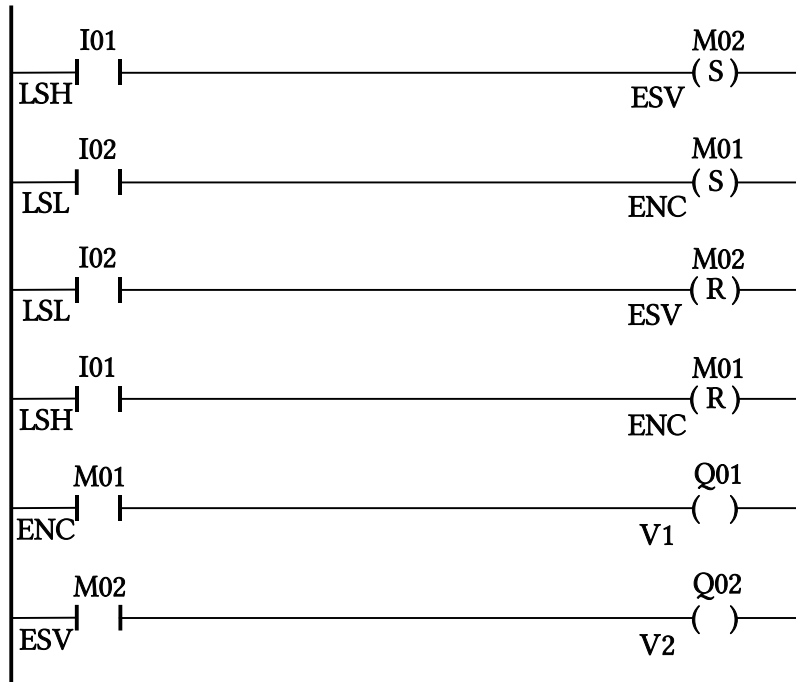
Seta o modo escoamento (M0.2), abrindo V2 e fechando V1.

V1 permanece fechada até LSL ser acionada.

Quando LSL (nível baixo) for acionada:

Seta o modo enchimento (M0.1), abrindo V1 e fechando V2.

V2 permanece fechada até LSH ser novamente acionada.



10.4.2 Diagrama de Blocos de Função (*FBD – Function Block Diagram*)

O Diagrama de Blocos de Função é uma linguagem gráfica utilizada para desenvolver procedimentos complexos por meio da interligação de funções preexistentes. Conforme apresentado na Figura 10.12, seus elementos básicos são representados por símbolos gráficos específicos. O FBD expressa funções a partir da relação entre variáveis de entrada e de saída, organizando essas funções como um conjunto de blocos elementares. As variáveis são conectadas aos blocos por linhas, permitindo que a saída de um bloco seja utilizada como entrada de outro [\[109,118,120,123\]](#).

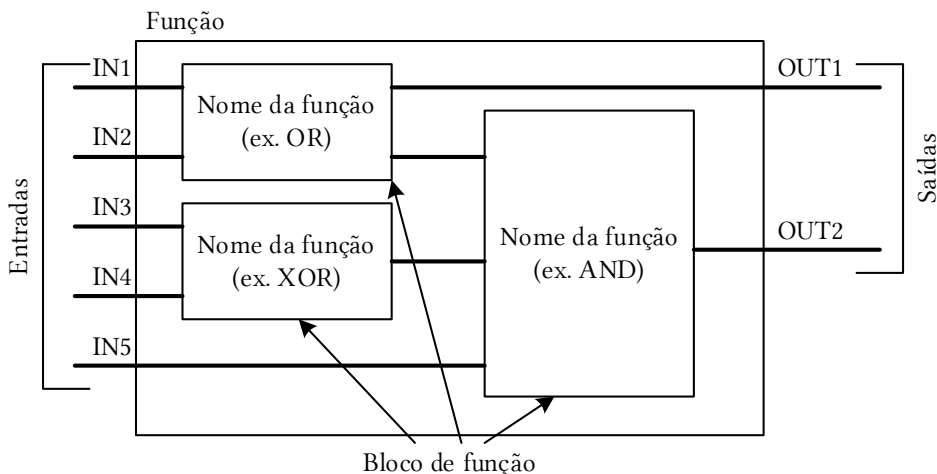
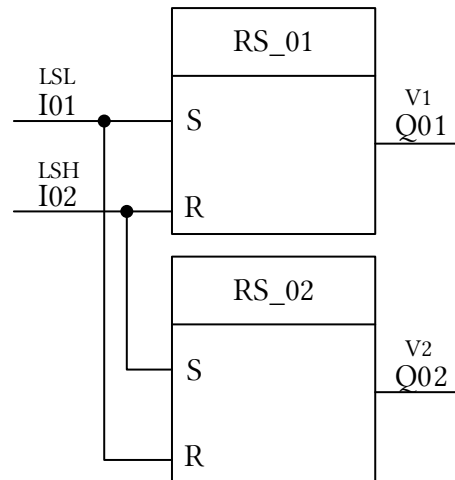


Figura 10.12 Componentes básicas da programação Diagrama de Blocos de Função

Cada bloco de função possui um número definido de pontos de conexão para entradas e saídas e é representado por um retângulo, com entradas situadas no lado esquerdo e saídas no lado direito. Cada bloco executa uma única função entre suas entradas e saídas, e o nome da função é indicado dentro do retângulo. As entradas e saídas devem ter tipos compatíveis com os exigidos pelo bloco. As variáveis de entrada em um programa FBD podem ser expressões constantes, variáveis internas, variáveis de entrada ou até mesmo variáveis de saída. Já as variáveis de saída devem ser ligadas aos pontos de saída dos blocos e podem ser variáveis internas, variáveis de saída ou o nome de um subprograma. Neste último caso, a saída representa o valor de retorno do subprograma ao programa chamador.

EXEMPLO 10.2: Para o problema abordado no Exemplo 10.1, apresente o diagrama de blocos de funções (FBD) que represente o enchimento e o esvaziamento do tanque.

Utilizando os mesmos endereçamentos apresentados na Tabela 10.5, temos:



Lógica:

Quando LSH (nível alto) for acionada:

V1 fecha (Reset de V1)

V2 abre (Set de V2)

Quando LSL (nível baixo) for acionada:

V1 abre (Set de V1)

V2 fecha (Reset de V2)

■

10.4.3 Gráficos de funções sequenciais (*SFC – Sequential Function Chart*)

Gráficos de Funções Sequenciais constituem uma linguagem gráfica utilizada para representar operações de natureza sequencial. O processo é descrito por um conjunto de etapas bem definidas, interligadas por transições. Cada sequência de etapas é denominada tarefa, e diversas tarefas podem compor o processo completo. A Figura 10.13 ilustra os elementos básicos da linguagem SFC, incluindo etapas (iniciais e intermediárias), transições e as conexões entre esses elementos^[109,118,120].

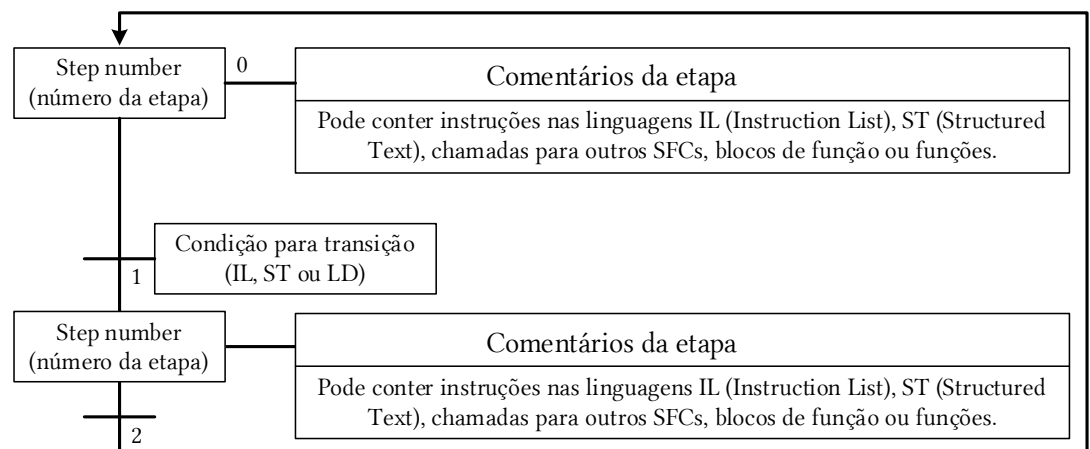


Figura 10.13 Componentes básicos da linguagem SFC.

A execução de um programa em SFC se inicia com a ativação do sistema. Em tempo de execução (*runtime*), a etapa ativa é destacada, sendo a etapa inicial automaticamente considerada como ponto de partida. Quando a condição de transição entre etapas é satisfeita,

a sequência avança para o próximo estado. As ações executadas em cada etapa podem assumir diversas formas, como **expressões booleanas, instruções nas linguagens ST ou IL, chamadas para outros SFCs, funções ou blocos funcionais**. Cada transição é associada a uma condição booleana, definida em linguagens como ST, IL ou lógica ladder (LD).

10.4.4 Lista de instrução (*IL – Instruction List*)

A Lista de Instruções é uma linguagem de programação de baixo nível, utilizada principalmente em aplicações de menor porte ou para otimização de trechos específicos de um sistema. Essa linguagem é empregada para descrever ações que ocorrem dentro dos passos e transições da linguagem SFC (Sequential Function Chart). As instruções em IL operam sobre o valor atual de um registrador e utilizam operadores que definem a ação a ser executada com base nesse valor e em um ou mais operandos. O resultado da operação é armazenado novamente no registrador^[109,120].

Um programa escrito em IL consiste em uma sequência de instruções, cada uma iniciando em uma nova linha. Cada linha deve conter obrigatoriamente um operador e, quando necessário, um ou mais operandos, separados por vírgulas (,). Opcionalmente, um rótulo seguido de dois-pontos (:) pode anteceder a instrução. Comentários, quando presentes, devem ser posicionados ao final da linha e delimitados por parênteses com asteriscos: (* ... *). Também é permitido incluir linhas em branco entre instruções, com ou sem comentários. Na Tabela 10.6 é apresentado o exemplo de linha de instrução e na Tabela 10.7 são apresentados alguns operadores utilizados na linguagem IL de acordo com IEC 61131-3.

Tabela 10.6 Exemplos de linhas de instrução

Rótulo	Operador	Operando	Comentários
Start:	LD	IN1	(* botão de pressão de partida *)
	AND	MD1	(* modo é manual *)
	ST	Q2	(* acionar motor *)

Tabela 10.7 Operadores comumente utilizados de acordo com IEC 61131-3^[123].

Operador	Operação	Diagrama Ladder
LD	Carregar operando no registrador de resultado	Inicia linha com contatos abertos
LDN	Carregar operando negativo no registrador	Inicia linha com contatos fechados
AND	E lógico (Boolean AND)	Série com contatos abertos
ANDN	E lógico com operando negativo	Série com contatos fechados
OR	OU lógico (Boolean OR)	Paralelo com contatos abertos
ORN	OU lógico com operando negativo	Paralelo com contatos fechados
ST	Armazena resultado no registrador	Saída

EXEMPLO 10.3: Para o problema abordado no Exemplo 10.1, apresente a programação utilizando lista de instruções que represente o enchimento e o esvaziamento do tanque.

Utilizando os mesmos endereçamentos apresentados na Tabela 10.5, temos:

```
(* Tanque Pulmão - Controle de Nível *)
(* Declaração de Variáveis *)

VAR
    LSH AT %IX0.1: BOOL; (* Chave de nível alto *)
    LSL AT %IX0.2: BOOL; (* Chave de nível baixo *)
    V1  AT %QX0.1: BOOL; (* Válvula de entrada (NA)) *)
    V2  AT %QX0.2: BOOL; (* Válvula de saída (NF) *)
END_VAR

(* Programa Principal *)

LD  LSH  (* Carrega o estado da chave de nível alto *)
S   V2   (* Se LSH=1, seta V2 (abre V2) *)
R   V1   (* Se LSH=1, reseta V1 (fecha V1) *)
LD  LSL  (* Carrega o estado da chave de nível baixo *)
S   V1   (* Se LSL=1, seta V1 (abre V1) *)
R   V2   (* Se LSL=1, reseta V2 (fecha V2) *)
```

Lógica:

Quando LSH é ativado (nível alto):

S V2: Abre a válvula de saída V2 (set)

R V1: Fecha a válvula de entrada V1 (reset)

Quando LSL é ativado (nível baixo):

S V1: Abre a válvula de entrada V1 (set)

R V2: Fecha a válvula de saída V2 (reset)

■

10.4.5 Texto Estruturado (*ST – Structured Text*)

Texto estruturado é uma linguagem de programação de alto nível, estruturada e fortemente inspirada na linguagem PASCAL, desenvolvida especificamente para aplicações em processos de automação. É particularmente útil para implementar procedimentos complexos que não podem ser facilmente representados por linguagens gráficas. ST é amplamente empregada para descrever ações associadas aos passos e transições da linguagem de programação SFC (Sequential Function Chart) [109,120].

Um programa em ST consiste em uma sequência de instruções separadas por ponto e vírgula (;), podendo incluir comentários iniciados por (*) e finalizados com (*). Os tipos principais de instruções incluem: atribuição de valores (variável := expressão), chamadas de subprogramas ou blocos de função, estruturas de seleção (IF, THEN, ELSE, CASE), laços de repetição (FOR, WHILE, REPEAT), comandos de controle de fluxo (RETURN, EXIT) e instruções especiais para integração com outras linguagens como SFC.

A linguagem não diferencia letras maiúsculas de minúsculas e permite o uso opcional de espaços e recuos para melhorar a legibilidade. As variáveis representadas diretamente são prefixadas por %, seguidas de um ou dois códigos que identificam o tipo e a localização da memória — por exemplo, %IX100 (entrada digital no bit 100), %ID200 (entrada digital na palavra 200), ou %QX100 (saída digital no bit 100). A primeira letra indica o tipo de memória (I: entrada, Q: saída, M: memória interna) e a segunda, a unidade de armazenamento (X: bit, B: byte, W: palavra de 16 bits, D: palavra dupla de 32 bits, L: palavra longa de 64 bits).

Na Tabela são apresentados alguns operadores utilizados na linguagem ST.

Tabela 10.8 Operadores utilizados em texto estruturado

Operador	Descrição
(...)	Expressão entre parênteses
Function(...)	Lista de parâmetros de uma função
**	Potência
-, NOT	Negação, NÃO Booleano
*, /, MOD	Multiplicação, divisão, módulo
+, -	Adição, subtração
<, >, <=, >=	Comparadores
=, <>	Igualdade, desigualdade
AND, &	E Booleano
XOR	XOR Booleano
OR	OU Booleano

EXEMPLO 10.4: Represente o enchimento e o esvaziamento do tanque do Exemplo 10.1 utilizando Texto Estruturado (ST – Structured Text).

Utilizando os mesmos endereçamentos apresentados na Tabela 10.5, temos:

```
PROGRAM TanquePulmao
VAR
    LSH AT %IX0.1: BOOL;    (* Chave de nível alto *)
    LSL AT %IX0.2: BOOL;    (* Chave de nível baixo *)
    V1  AT %QX0.1: BOOL;    (* Válvula de entrada (NA) *)
    V2  AT %QX0.2: BOOL;    (* Válvula de saída (NF) *)
```

```
END_VAR

(* Lógica de Controle *)
IF LSH THEN
    V1 := FALSE;    (* Fecha V1 (válvula de entrada) *)
    V2 := TRUE;     (* Abre V2 (válvula de saída) *)
ELSIF LSL THEN
    V1 := TRUE;     (* Abre V1 (válvula de entrada) *)
    V2 := FALSE;    (* Fecha V2 (válvula de saída) *)
END_IF;
END_PROGRAM
```

Lógica:

Se LSH = TRUE (nível alto detectado):

V1 := FALSE → Fecha a válvula de entrada.

V2 := TRUE → Abre a válvula de saída.

Se LSL = TRUE (nível baixo detectado):

V1 := TRUE → Reabre a válvula de entrada.

V2 := FALSE → Fecha a válvula de saída.

Referências

- [1] Oliveira, A.L.L. (1999). **Fundamentos de Controle de Processo**. SENAI-ES.
- [2] ISA. (2009). **ANSI/ISA-5.1-2009: Instrumentation Symbols and Identification**. International Society of Automation.
- [3] Dunn, W.C. (2005). **Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control**. McGraw-Hill.
- [4] Bennett, S. (1992). Industrial Instruments — A Brief History. **Measurement and Control**, 25(4), 111-114. <https://doi.org/10.1177/002029409202500404>.
- [5] Joerges, B.; Shinn, T. (2001). A Fresh Look at Instrumentation an Introduction. In: Joerges, B., Shinn, T. (eds) **Instrumentation Between Science, State and Industry**. **Sociology of the Sciences**, 22. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9032-2_1
- [6] Padmanabhan, T.R. (2000). **Industrial Instrumentation: Principles and Design**. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0451-3>.
- [7] Bhuyan, M. (2013). **Instrumentação Inteligente - Princípios e Aplicações**. LTC.
- [8] Jiang, Y.; Yin, S.; Dong, J.; Kaynak, O. (2021). A Review on Soft Sensors for Monitoring, Control, and Optimization of Industrial Processes, **IEEE Sensors Journal**, 21(11), 12868-12881. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3033153>.
- [9] Bega, E.A.; Delmée, G.J.; Cohn, P.E.; Bulgarelli, R.; Koch, R.; Finkel, V.S. (2011). **Instrumentação Industrial**. Editora Interciência.
- [10] Alexopoulos, K.; Makris, S.; Xanthakis, V.; Sipsas, K.; Chrysosolouris, G. (2016). A Concept for Context-Aware Computing in Manufacturing: The White Goods Case. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 29(8), 839-849. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130257>.
- [11] Xu, L.D.; Xu, E.L.; Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the Art and Future Trends. **International Journal of Production Research**, 56(8), 2941-2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>.
- [12] Kolberg, D.; Zühlke, D. (2015). Lean Automation Enabled by Industry 4.0 Technologies. **IFAC-PapersOnLine**, 48(3), 1870-1875. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.359>.
- [13] Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues. **Journal of Industrial Information Integration**, 6, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>.
- [14] Lu, Y. (2017). Cyber Physical System (CPS)-Based Industry 4.0: A Survey. **Journal of Industrial Integration and Management**, 2(3), 1-57. <https://doi.org/10.1142/S2424862217500142>.
- [15] Nof, S.Y. (2009). **Automation: What It Means to Us Around the World**. In: Springer Handbook of Automation. Springer Handbooks. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78831-7_3.
- [16] Lasi, H.; Fettke, P.; Kemper, H.G.; Feld, T.; Hoffmann, M. (2014). Industrie 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, 4, 239-242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>.
- [17] Xu, L. (2011). Enterprise Systems: State-of-the-Art and Future Trends. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 7(4), 630-640. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2167156>.
- [18] GTAI. (2014). **Industries 4.0: Smart Manufacturing for the Future**. GTAI - Germany Trade & Invest.
- [19] Nise, N.S. (2017). **Engenharia de Sistemas de Controle**. Rio de Janeiro: LTC.
- [20] Smith, C.A., Corripio, A. (2008). **Princípios e prática do controle automático de processo**. Rio de Janeiro: LTC.
- [21] Seborg, D.E.; Edgar, T.F.; Mellichamp, D.A. (2004). **Process Dynamics and Control**. John Wiley & Sons.
- [22] Ogata, K. (2010). **Engenharia de Controle Moderno**. Pearson.
- [23] Ogunnaike, B.A.; Ray, W.H. (1994). **Process Dynamics, Modeling, and Control**. Oxford University Press.
- [24] Liptak, B.G. (2003). **Instrument Engineers Handbook. Volume I - Process measurement and analysis**. CRC Press.
- [25] JCGM. (2012). **International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms**. JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology.
- [26] Brasil. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. (2012). **Portaria n.º 232, de 08 de maio de 2012**. Adotar, no Brasil, a 1ª edição luso-brasileira do Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012).
- [27] Carden, F.; Jedlicka, R.; Henry, R. (2002). **Telemetry Systems Engineering**. Artech House.
- [28] RCC. (2006). **Telemetry Applications Handbook**. Secretariat Range Commanders Council.
- [29] Balbinot, A.; Brusamarello, V.J. (2010). **Instrumentação e Fundamentos de Medidas: Volume 1**. LTC.
- [30] Aguirre, L.A. (2013). **Fundamentos de Instrumentação**. Pearson.
- [31] Carpenter, D.R. (2008). **Fundamentals of Instrumentation: Complete Series**. Integrity Institute of Technology.
- [32] Turton, R.; Baile, R.C.; Whiting, W.B.; Shaeiwitz, J.A. (2008). **Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes**. Pearson.

Referências

- [33] Mio, A.; Barbera, E.; Pavan, A.M.; Bertucco, A.; Fermeglia, M. (2024). Sustainability Analysis of Hydrogen Production Processes. **International Journal of Hydrogen Energy**, 54, 550-553. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.122>.
- [34] ASME. (1961). **ASA Y32.11: Graphical Symbols for Process Flow Diagrams**. American Society of Mechanical Engineers.
- [35] Austin, D.G. (1979). **Chemical Engineering Drawing Symbols**. George Godwin.
- [36] Fialho, A.B. (2002). **Instrumentação Industrial**. Érica.
- [37] Michalski, L.; Eckersdorf, K.; Kucharski, J.; McGhee, J. (2001). **Temperature Measurement**. John Wiley & Sons Ltd.
- [38] Fahrenheit, D.G. (1724). Experimenta et Observationes de Congelatione Aquae in Vacuo Factae. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, 33, 78–84. <https://doi.org/10.1098/rstl.1724.0016>.
- [39] Celsius, A. (1742). Observationer om Twänne Beständiga Grader på en Thermometer (observations on Two Persistent Degrees on a Thermometer). **Kungliga Svenska Vetenskaps Akademiens Handlingar (Ann R Swed Acad Sci)**, 4, 197–205.
- [40] Thomson, W. (1848). On an Absolute Thermometric Scale Founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, and Calculated From Regnault's Observations. **Cambridge Philosophical Society Proceedings: Mathematical and Physical Papers**, 100-106.
- [41] Rankine, W.J.M. (1859). **A Manual of the Steam Engine and Other Prime Movers**. C. Griffin.
- [42] McMillan, G.K.; Considine, D.M. (1999). **Process Industrial Instruments and Control Handbook**. McGraw-Hill.
- [43] Burgess, G.K. (1928). The International Temperature Scale. **Bureau of Standarts Journals of Research**, 1(4), 635-640.
- [44] Jones, E.B. (1974). **Intrument Technology: Measurement of Pressure, Level, Flow and Temperature**. Butterworth & Co Ltd.
- [45] Preston-Thomas, H. (1990). The International Temperature Scale of 1990 (ITS90). **Metrologia**, 27(1), 3-10. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/27/1/002>.
- [46] Stimson, H.F. (1961). International Practical Temperature Scale of 1948: Test Revision of 1960. **Journal of Research of Standards – A. Physical and Chemistry**, 65(3), 139-145. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.065A.017>.
- [47] Barber, C.R. (1969). The International Pratical Temperature Scale of 1968. **Metrologia**, 5(2), 35-44. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/5/2/001>
- [48] Omega. (2015). **Manual de Referência Técnica de Temperatura**. Omega Engineering INC.
- [49] Kuphaldt, T.R. (2009). **Lessons in Industrial Instrumentation**. Creative Commons.
- [50] Thomazini, D.; Albuquerque, P.U.B. (2007). **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**. Editora Érica.
- [51] Childs, P.R.N.; Greenwood, J.R.; Long, C.A. (2000). Review of Temperature Measurement. **Review of Scientific Instruments**, 71(8), 2959-2978. <https://doi.org/10.1063/1.1305516>.
- [52] Hagart-Alexander, G. (2003). **Temperature Measurement**. In: Intrumentation Reference Book. Elsevier Science.
- [53] Powell, R.L.; Hall, W.J.; Hyink, C.H.; Sparks, L.L.; Burns, G.W.; Scroger, M.G.; Plumb, H.H. (1974). **NBS Monograph 125: Thermocouple Reference Tables Based on the IPTS-68**. NBS Publications.
- [54] Burns, G.W.; Scroger, M.G.; Strouse, G.F.; Croarkin, M.C.; Guthrie, W.F. (1993). **NIST Monograph 175: Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90**. NIST Publications.
- [55] ASTM. (2011). **ASTM E230/E230M-2011: Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples**. ASTM International.
- [56] IEC. (1995). **IEC 584-1: Termocouples – Part 1: Reference Tables**. International Electrotechnical Commission.
- [57] IEC. (2013). **IEC-50584-1: Termocouples – Parti 1: EMF Specifications and Tolerances**. International Electrotechnical Commission.
- [58] Coulson, J.M.; Richardson, J.F. (1999). **Chemical Engineering – Volume 1: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer**. Butterworth-Heinemann.
- [59] Incropera, F.P.; Dewitt, D.P.; Bergman, T.L.; Lavine, A.S. (2007). **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. John Wiley & Sons, Inc.
- [60] Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. (2001). **Fundamentals of Physics**. Wiley.
- [61] Marquardt, N. (1999). Introduction to the Principles of Vacuum Physics. **CERN European Organization for Nuclear Research Reports**, 1-24.
- [62] Boyes, W. (2003). **Instrumentation Reference Book**. Butterworth Heinemann.
- [63] Balbinot, A.; Brusamarello, V.J. (2010). **Instrumentação e Fundamentos de Medidas: Volume 2**. LTC.
- [64] Fox, R.; McDonald, A.; Pritchard, P.; Mitchell, J. (2018). **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. LTC.
- [65] Young, H.D.; Freedman, R.A. (2008). **Física I: Mecânica**. Addison Wesley.

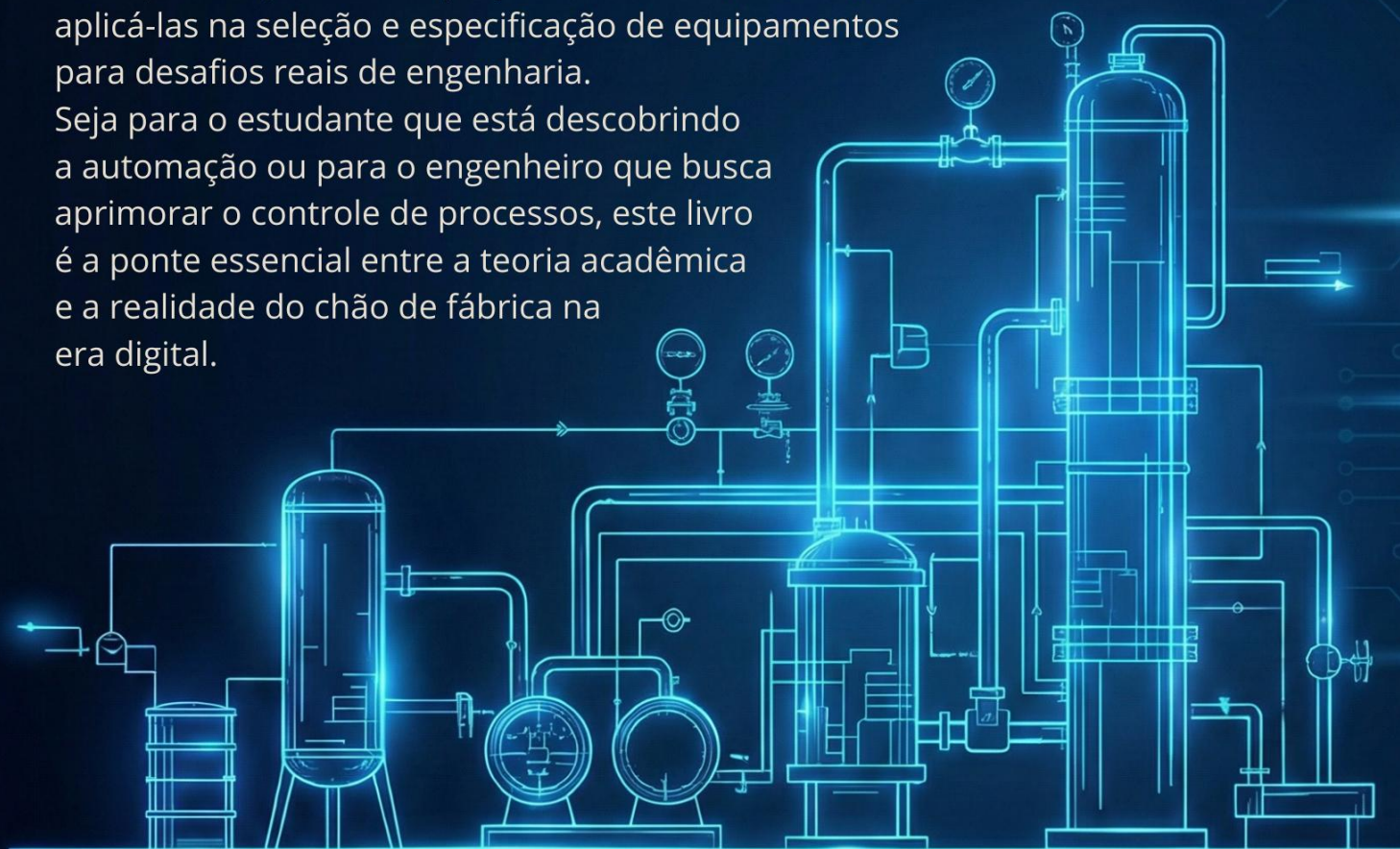
- [66] Von Beckerath, A.; Eberlein, A.; Julien, H.; Kersten, P.; Kreutzer, J. (2008). **WKA-Handbook: Pressure and Temperature Measurement U. S. Edition**. Cameron Reebals.
- [67] Figliola, R.S.; Beasley, D.E. (2019). **Theory and Design for Mechanical Measurements**. John Wiley & Sons.
- [68] Fraden, J. (2010). **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications**. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6466-3>
- [69] Bolton, W. (2004). **Instrumentation and Control Systems**. Elsevier.
- [70] Northrop, R.B. (2014). **Introduction to Instrumentation and Measurements**. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315275239>.
- [71] Terman, F.E. (1955). **Electronic and Radio Engineering**. McGraw-Hill.
- [72] Nye, J.F. (1985). **Physical Proprieties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices**. Clarendon Press.
- [73] Webster, J.G. (1999). **The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook**. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003040019>
- [74] Çengel, Y.A.; Cimbala, J.M. (2007). **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. McGraw-Hill.
- [75] Poter, M.C.; Wigert, D.C.; Ramadan, B.H. (2014). **Mecânica dos Fluidos**. Cengage Learning.
- [76] Bernoulli, D. (1738). **Hydrodynamica Sive de Viribus et Motibus Fluidorum Commentarii**. Johann Reinhold Dulsecker.
- [77] Ripka, P.; Típek, A. (2007). **Modern Sensors Handbook**. ISTE Ltd.
- [78] ISO. (2003). **ISO 5167-2:2003 Measurement of Fluid by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full – Part 2: Orifice plates**. International Organization for Standardization.
- [79] Reader-Harris, M. (2015). **Orifice Plates and Venturi Tubes**. Spriger.
- [80] ISO. (2008). **ISO 3966:2008 Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits – Velocity Area Method Using Pitot Static Tubes**. International Organization for Standardization.
- [81] ASME. (1985). **ASME MFC-3M-1985: Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle, and Venturi**. American Society of Mechanical Engineers.
- [82] ISO. (2003). **ISO 5167-4:2003 Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full – Part 4: Venturi Tubes**. International Organization for Standardization.
- [83] Baker, R.C. (2016). **Flow measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications**. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511471100>.
- [84] Munson, B.R.; Young, D.F.; Okiishi, T.H.; Huebsch, W.W. (2009). **Fundamentals of Fluid Mechanics**. John Wiley & Sons.
- [85] Frenzel, F.; Grothey, H.; Habersetzer, C.; Hiatt, M.; Hogrefe, W.; Kirchner, M.; Lütkepohl, G.; Marchewka, W.; Mecke, U.; Ohm, M.; Otto, F.; Rackebrandt, K.H.; Sievert, D.; Thöne, A.; Wegener, H.J.; Buhl, F.; Koch, C.; Deppe, L.; Horlebein, E.; Shüssler, A.; Pohl, U.; Jung, B.; Lawrence, H.; Lohregel, F.; Rascher, G.; Pagano, S.; Kaiser, A.; Mutongo, T. (2011). **Industrial Flow Measurement Basics and Practice**. ABB Automation Products GmbH.
- [86] Faraday, M. (1855). **Experimental Researches in Electricity**. Richard Taylor and William Francis.
- [87] Hall, J.E.; Hall, M.E. (2020). **Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology**. Elsevier.
- [88] Bekraoui, A.; Hadjadj, A. (2020). Thermal Flow Sensor Used for Thermal Mass Flowmeter. **Microelectronics Journal**, 103, 104871. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2020.104871>.
- [89] ISO. (1992). **ISO 9826-1992: Measurement of Liquid Flow in Open Channels – Parshall and SANIIRI Flumes**. International Organization for Standardization.
- [90] Gillum, D.R. (2009). **Industrial Pressure, Level and Density Measurement**. International Society of automation.
- [91] Andrew, W.G.; Williams, H.B. (1979). **Applied Instrumentation in the Process: A Survey**. Gulf Publishing Company.
- [92] Friend, D.G. (2001). **Speed of Sound as a Thermodynamic Property of Fluids**. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S1079-4042\(01\)80090-4](https://doi.org/10.1016/S1079-4042(01)80090-4).
- [93] Poiseuille, J.L.M. (1840). Recherches Experimentales sur le Mouvement des Liquides dans les Tubes de Très Petits Diametres; I. Influence de la Pression sur la Quantite de Liquide qui Traverse les Tubes de Très Petits Diametres. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, 11, 961-67.
- [94] Poiseuille, J. L. M. (1840). Recherches Experimentales sur le mouvement des Liquides dans les Tubes de Très Petits Diametres; II. Influence de la Longueur sur la Quantite de Liquide qui Traverse les Tubes de Très petits Diametres; III. Influence du Diametre sur la Quantite de Liquide qui Traverse les Tubes de Très Petits Diametres. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, 11, 1041-48.
- [95] ASTM. (2013). **ASTM D88-7:2013 Standard Test Method for Saybolt Viscosity**. ASTM International.
- [96] ASTM. (2021). **ASTM E102/E102M-03:2021 Standard Test Method for Saybolt Furol Viscosity of Bituminous Materials at High Temperatures**. ASTM International.
- [97] ASTM. (1966). **ASTM D2161-66:1966 Standard Method for Conversion of Kinematic Viscosity to Saybolt**

- Universal Viscosity or to Saybolt Furol Viscosity.** ASTM International.
- [98] Stokes, G.G. (1851) On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society, Part II**, 9, 8-106.
- [99] Barnes, H.A. (2000). **Handbook of Elementary Rheology.** The University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics.
- [100] Sørensen, S.P.L.; Linderstrøm-Lang, K.U. (1924). On the Determination and Value of in Electrometric Measurements of Hydrogen-Ion-Concentrations. **Comptes Rendus des Travaux du Laboratoire Carlsberg**, 15, 1-40.
- [101] Kilpatrick, M.; Kilpatrick, M.L. (1932). The Teaching of the Dissociation of Electrolytes. II The Definition of pH. **Journal of Chemical Education**, 9, 1010-1016.
- [102] Nernst, W. (1926). **Theoretische Chemie vom Standpunkte der Avogadroschen Regel und der Thermodynamik.** Ferdinand Enke.
- [103] Perry, R.H.; Green, D.W. (1999). **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** McGraw-Hill.
- [104] Himmelblau, D.M.; Riggs, J.B. (2014). **Engenharia Química: Princípios e Cálculos.** Editora LTC.
- [105] ISO. (2016). **ISO 7027-1:2016 Water Quality. Determination of Turbidity – Part 1: Quantitative Methods.** International Organization for Standardization.
- [106] ISO. (2019). **ISO 7027-2:2019 Water Quality. Determination of Turbidity – Part 2: Semi-Quantitative Methods for the Assessment of Transparency of Waters.** International Organization for Standardization.
- [107] EMERSON. (2023). **Control Valve Handbook.** Fisher Controls International LLC.
- [108] Baumann, H.D. (2023). **Control Valve Primer – A User's Guide.** International Society of Automation.
- [109] Liptak, B.G. (2006). **Instrument Engineers Handbook. Volume II - Process Control and Optimization.** CRC Press.
- [110] Battikha, N.E. (2007). **The condensed handbook of measurement and control.** ISA – International Society of Automation.
- [111] Ribeiro, M.A. (1999). **Válvulas de Controle e Segurança.** Tek.
- [112] ISA. (2005). **ANSI/ISA 75.05.01:2000 (R2005) Control Valve Terminology.** International Society of Automation.
- [113] ANSI. (2006). **ANSI/FCI 70-2:2006 Control Valve Seat Leakage.** American National Standard.
- [114] Skousen, P.L. (1997). **Valve Handbook.** McGraw-Hill.
- [115] Smith, P.; Zappe, R.W. (2004). **Valve Selection Handbook: Engineering Fundamentals for Selecting the Right Valve Design for Every Industrial Flow Application.** Elsevier.
- [116] Stojkov, B.T. (1997). **The Valve Primer.** Industrial Press Inc.
- [117] ISA. (2007). **ISA-75.01.01:2007 Flow Equations for Sizing Control Valves.** International Society of Automation.
- [118] IEC. (2003). **IEC 61131-1 Programmable controllers – Part 1: General information.** International Electrotechnical Commission.
- [119] Capeli, A. (2007). **Automação Industrial – Controle do Movimento e Processos Contínuos.** Editora Érica.
- [120] Bolton, W. (2006). **Programmable Logic Controllers.** Elsevier.
- [121] Petruzella, F.D. (2014). **Controladores Lógicos Programáveis.** McGraw Hill Education.
- [122] Hackworth, J.R.; Hackworth-Jr, F.D. (2003). **Programmable Logic Controllers: Programming Methods and Applications.** Pearson College Div.
- [123] IEC. (2003). **IEC 61131-3 Programmable controllers – Part 3: Programming languages.** International Electrotechnical Commission.

Em um cenário industrial onde a eficiência, a segurança e a qualidade dependem cada vez mais da precisão no controle de processos, o domínio da instrumentação torna-se uma competência indispensável. "Instrumentação Industrial na Engenharia de Processos: Do Analógico ao Digital" surge como um guia para estudantes e profissionais que buscam navegar com segurança desde os fundamentos físicos da medição até as tecnologias modernas de automação.

Com uma abordagem didática e tecnicamente rigorosa, o autor conduz o leitor através da anatomia dos instrumentos, detalhando o funcionamento de sensores de pressão, nível, vazão e temperatura, bem como o dimensionamento complexo de válvulas de controle e a lógica dos Controladores Lógicos Programáveis (CLP). A obra não apenas apresenta equações e normas (ISA, IEC), mas ensina a aplicá-las na seleção e especificação de equipamentos para desafios reais de engenharia.

Seja para o estudante que está descobrindo a automação ou para o engenheiro que busca aprimorar o controle de processos, este livro é a ponte essencial entre a teoria acadêmica e a realidade do chão de fábrica na era digital.



Doutor e Mestre em Engenharia Química pela UNICAMP e graduado pela UNIOESTE. Com experiência docente na UNICAMP, no Instituto Mauá de Tecnologia e atuação como pesquisador no LCAP/UNICAMP, também exerceu o cargo de Diretor Científico da ISA Campinas (2019-2022). Atualmente, é Professor Adjunto A no Centro Universitário da FEI e Editor-Chefe do Journal of Engineering and Exact Sciences. Especialista em Modelagem, Simulação e Controle de Processos, dedica-se à pesquisa envolvendo o uso de Inteligência Artificial (lógica fuzzy e redes neurais) aplicada à engenharia.

ii! SAL
Scientifica Academica Libri

