

Instrumentação Industrial

Egídio Alberto Bega

(organizador)

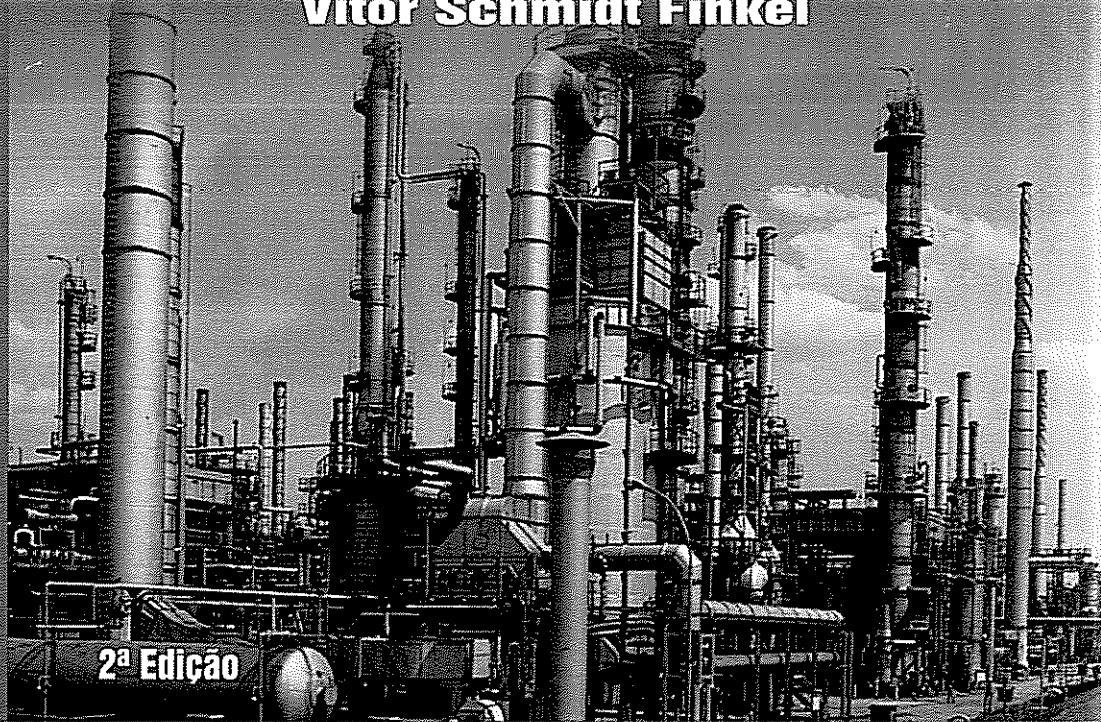
Gerard Jean Delmée

Pedro Estéfano Cohn

Roberval Bulgarelli

Ricardo Koch

Vitor Schmidt Finkel



EDITORIA INTERCIÊNCIA



Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

Instrumentação Industrial

Conteúdo da obra:

**Capítulo 1
INTRODUÇÃO**

**Capítulo 2
PRESSÃO**

**Capítulo 3
VAZÃO**

**Capítulo 4
NÍVEL**

**Capítulo 5
TEMPERATURA**

**Capítulo 6
ANALISADORES**

**Capítulo 7
TRANSMISSORES**

**Capítulo 8
ATMOSFERAS EXPLOSIVAS**

**Capítulo 9
VÁLVULAS DE CONTROLE**

**Capítulo 10
TEORIA DE CONTROLE**

**Capítulo 11
RECEPTORES**

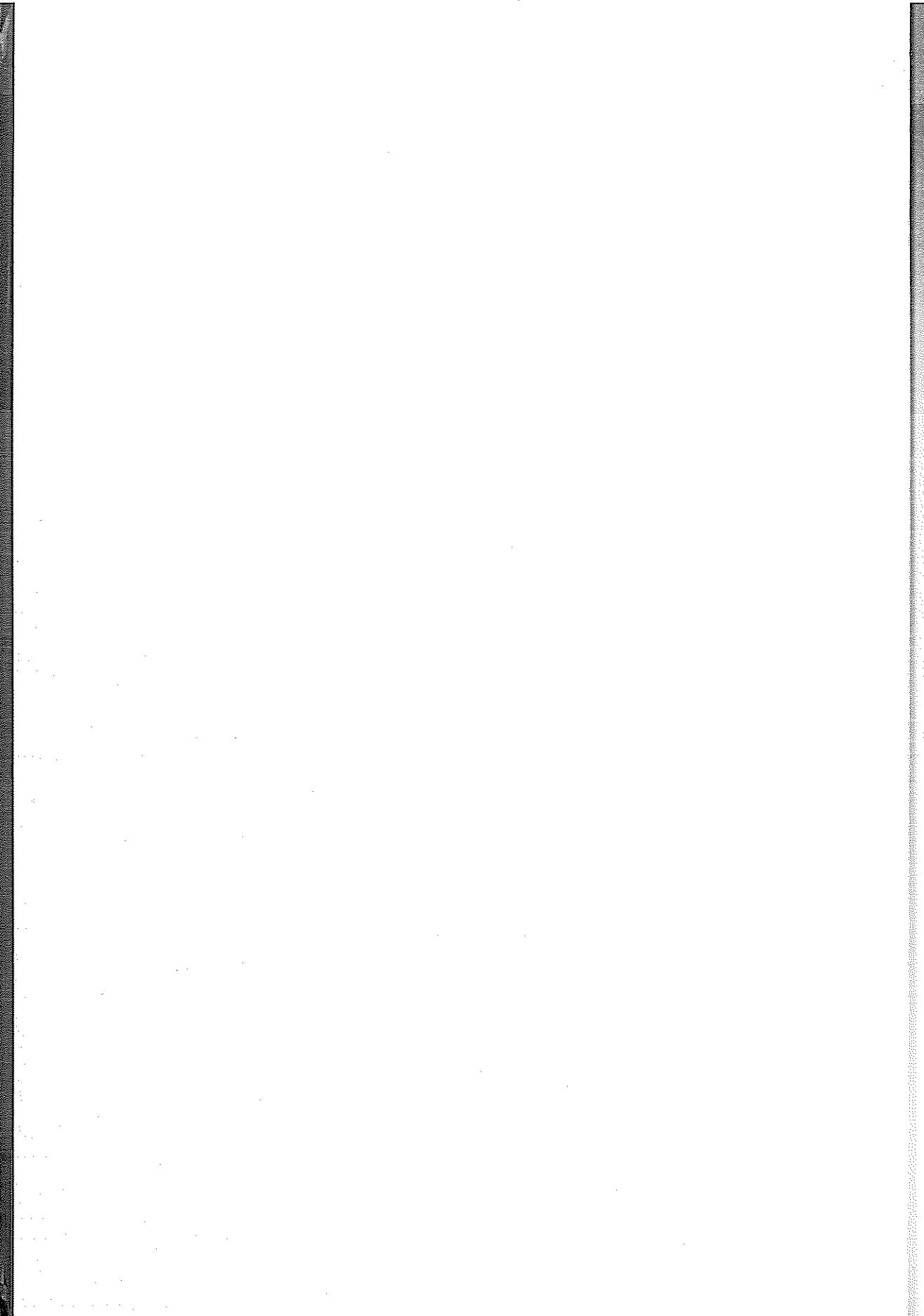
**Capítulo 12
CLP**

**Capítulo 13
SDCD E REDES DE
COMUNICAÇÃO**

**Capítulo 14
INTERTRAVAMENTO E
SISTEMAS DE SEGURANÇA**

Instrumentação Industrial

Egídio Alberto Bega
(organizador)
Gerard Jean Delmée
Pedro Estéfano Cohn
Roberval Bulgarelli
Ricardo Koch
Vitor Schmidt Finkel



Instrumentação Industrial

Egídio Alberto Bega

(organizador)

Gerard Jean Delmée

Pedro Estéfano Cohn

Roberval Bulgarelli

Ricardo Koch

Vitor Schmidt Finkel



EDITORIA INTERCIÊNCIA



Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

Rio de Janeiro - 2006

Copyright © by Egídio Alberto Bega, Gerard Jean Delmée, Pedro Estéfano Cohn, Roberval Bulgarelli, Ricardo Koch e Vitor Schmidt Finkel

Direitos Reservados em 2006 por Editora Interciência Ltda.

Diagramação: Vera Barros

Capa: Marceley Cunha

Produção Editorial: Jorge Gama

**CIP-Brasil. Catalogação-na-Fonte
Sindicato Nacional dos Editores de Livros- RJ**

147

2 ed

Instrumentação industrial / Egídio Alberto Bega (organizador) ... [et al.] - 2 ed. - Rio de Janeiro:
Interciência: IBP, 2006.

Inclui bibliografia
ISBN 85-7193-137-2

1. Instrumentos industriais 2. Controle de processos. 3. Automação industrial.

I. Bega, Egídio Alberto II. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

06-0064.

CDD 338.00284

CDU 65.011.56

É proibida a reprodução total ou parcial, por quaisquer meios,
sem autorização por escrito da editora.



Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

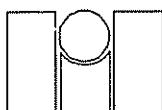
Av. Almirante Barroso, 52 - 26º andar - Centro - Rio de Janeiro - RJ

Tel : (21) 2112-9000

e-mail: ibp@ibp.org.br

www.ibp.org.br

www.editorainterciencia.com.br



Editora Interciência Ltda.

Rua Verna Magalhães, 66 – Engenho Novo – Rio de Janeiro - RJ - 20710-290

Tel.: (21) 2581-9378/2241-6916 - Fax: (21) 2501-4760

e-mail: vendas@editorainterciencia.com.br

PREFÁCIO

O livro Instrumentação Industrial começou a ser elaborado a cerca de 15 anos (em 1988), quando a Comissão de Instrumentação do IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás) decidiu convidar alguns dos Autores para preparar um Curso que fornecesse subsídios básicos e preparasse gerentes e profissionais em geral que estavam começando a trabalhar nas especialidades Instrumentação, Automação Industrial e/ou Controle de Processos. Naquele momento, foram definidos os tópicos a serem tratados no Curso e foram preparadas apostilas específicas para cada um destes tópicos, que constituem os Capítulos do Livro Instrumentação Industrial. Com o passar dos anos e de forma a incorporar o surgimento de novas tecnologias, o conteúdo do Curso sofreu alterações e o material didático foi revisado e ampliado.

Com o sucesso do Curso, onde já foram treinados mais de 1.000 profissionais e visando estruturar e melhorar a apresentação didática e o aspecto visual do material, a cerca de três anos (em 2000), os Instrutores do Curso, com apoio do IBP e da Editora Interciência, resolveram transformar o material em um Livro que passaria a servir de base para o Curso Básico de Instrumentação e poderá ser utilizado por uma ampla gama de profissionais que trabalham, utilizam ou tenham interesse na área de Instrumentação Industrial, uma vez que o material passará a ser distribuído em livrarias.

Visando facilitar a utilização e o entendimento do seu conteúdo, o Livro foi didaticamente dividido em Capítulos independentes, que tratam de cada uma das principais variáveis utilizadas em Instrumentação, Automação e/ou Controle de Processos Industriais. No Livro, o material foi organizado de forma que os Capítulos iniciais fornecessem subsídios para facilitar o entendimento dos Capítulos subsequentes e os Capítulos que exigem visão e entendimento mais amplo da especialidade ficassem na sua parte final. É nosso entendimento que os profissionais que já atuam em indústrias e/ou nas atividades de Instrumentação, Automação e/ou Controle de Processos Industriais poderão ler quaisquer dos Capítulos, sem a necessidade de consulta aos demais, enquanto os profissionais que estejam começando na atividade, deverão seguir a sequência dos Capítulos apresentados.

Quando da elaboração do Livro, entendeu-se também que os profissionais que forem atuar como especialistas nas áreas de Instrumentação, Automação e/ou Controle de Processos Industriais deveriam consultar materiais específicos adicionais sobre o assunto, por isto, a bibliografia para leitura adicional foi colocada ao final de cada Capítulo.

Esperamos que o material apresentado neste Livro possa atender aos objetivos definidos pelos Autores quando de sua elaboração, ou seja, facilitar o entendimento e servir como referência e informação básica para os profissionais que atuam em projeto, manutenção e/ou operação de sistemas industriais que utilizem Instrumentação, Automação e/ou Controle de Processos.

Os Autores

Jardim Frederico Diniz / Pará
34448777 / 92813519 / 10/2006

SUMÁRIO

Capítulo 1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONCEITOS BÁSICOS DE INSTRUMENTAÇÃO PARA CONTROLE DE PROCESSOS	1
1.1.1	Sistema em Malha Aberta	2
1.1.2	Sistema em Malha Fechada	3
1.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS DE INSTRUMENTOS	5
1.2.1	Classes de Instrumentos	5
1.2.2	Definições	6
1.3	IDENTIFICAÇÃO E SÍMBOLOS DE INSTRUMENTOS	8
1.3.1	Padronização ISA	8
1.3.2	Exemplos de Simbologia	14
1.4	REFERÊNCIAS	14
	ANEXOS – EXEMPLOS DE SIMBOLOGIA	15
Capítulo 2	PRESSÃO	21
2.1	INTRODUÇÃO	21
2.2	GENERALIDADES	21
2.2.1	Unidades de Pressão	21
2.2.2	Definições de Pressão	23
2.2.3	Pressões Estática, Dinâmica, Total e Diferencial	24
2.2.4	Teorema de Stevin	26
2.2.5	Princípio de Pascal	27
2.3	ELEMENTOS MECÂNICOS PARA MEDIDAÇĀO DE PRESSÃO	28
2.3.1	Elementos Mecânicos de Medição Direta de Pressão	28
2.3.2	Elementos Mecânicos Elásticos de Medição de Pressão	31
2.4	TRANSMISSORES DE PRESSÃO	39
2.4.1	Transmissores Pneumáticos de Pressão	40
2.4.2	Transmissores Eletrônicos de Pressão	41
2.5	CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE PRESSÃO	45
2.5.1	Comparação com Elemento Mecânico de Medição Direta de Pressão	45
2.5.2	Calibração Utilizando Teste de Peso Morto	46
2.5.3	Comparação com Manômetro Padrão	47
2.6	REFERÊNCIAS	48

Capítulo 3 VAZÃO	49
3.1 INTRODUÇÃO	49
3.2 CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS	51
3.2.1 Líquidos	53
3.2.2 Gases	57
3.2.3 Vapor d'Água	63
3.3 MEDIDORES DE PRIMOGÊNIOS	64
3.3.1 Teoria Resumida	64
3.3.2 Placas de Orifício Clássicas	72
3.3.3 Placas de Orifício Especiais	82
3.3.4 Bocais de Vazão	86
3.3.5 Venturis	88
3.3.6 Medidores Diferenciais de Inserção	90
3.3.7 Medidores Especiais por Diferença de Pressão	95
3.4 MEDIDORES LINEARES	97
3.4.1 Medidores de Área Variável	98
3.4.2 Medidores a Efeito Coriolis	100
3.4.3 Medidores Eletromagnéticos	105
3.4.4 Medidores Térmicos	108
3.4.5 Turbinas	109
3.4.6 Medidores Ultra-Sônicos	114
3.4.7 Medidores de Vórtices	117
3.5 MEDIDORES ESPECIAIS	119
3.5.1 Medidores de Força	119
3.5.2 Correlação	120
3.5.3 Laser	121
3.6 MEDIDORES VOLUMÉTRICOS	122
3.6.1 Diafragma	122
3.6.2 Disco de Nutação	123
3.6.3 Palhetas	124
3.6.4 Pistão Oscilante	125
3.6.5 Pistões Recíprocos	125
3.6.6 Rotor	126
3.6.7 Semi-Imerso	127
3.7 MEDIDA EM CANAIS ABERTOS	128
3.7.1 Vertedores	128
3.7.2 Calhas Parshall	131
3.8 AFERIÇÃO	132
3.8.1 Aferição de Medidores de Vazão de Líquidos	134
3.8.2 Aferição de Medidores de Vazão de Gases	138
3.8.3 Conclusão sobre a Aferição de Medidores de Vazão	140
3.9 REFERÊNCIAS	141

Capítulo 4 NÍVEL	143
4.1 INTRODUÇÃO	143
4.2 VISORES DE NÍVEL	144
4.2.1 Visores de Vidro Tubular	145
4.2.2 Visores de Vidro Plano	147
4.2.3 Recomendações para Instalação e Operação Eficiente de um Visor de Vidro	150
4.2.4 Visores de Vidro Bicolores	152
4.3 DISPOSITIVOS DO TIPO FLUTUADOR (OU BÓIA)	153
4.3.1 Flutuador versus Deslocador	153
4.3.2 O Flutuador	154
4.3.3 Medidores Flutuador-Haste	157
4.3.4 Medidores Flutuador-Cabo	158
4.4 DISPOSITIVOS DO TIPO DESLOCADOR	160
4.4.1 O Deslocador	160
4.4.2 Constituição do Transdutor Tipo Deslocador	162
4.4.3 O Instrumento <i>Displacer</i>	164
4.4.4 Instrumento Tipo Deslocador Utilizando Mola Balanceadora	167
4.4.5 Montagem de Instrumentos do Tipo Deslocador	169
4.4.6 Calibração de Instrumentos do Tipo Deslocador	171
4.5 DISPOSITIVOS DO TIPO PRESSÃO DIFERENCIAL	174
4.5.1 Princípio de Funcionamento	174
4.5.2 Instalação	174
4.6 DISPOSITIVOS DO TIPO ULTRA-SÔNICO	176
4.6.1 Aplicação	176
4.6.2 Princípios Físicos	176
4.6.3 Medidor Contínuo de Nível do Tipo Ultra-Sônico	179
4.6.4 Conclusões	180
4.7 DISPOSITIVOS DO TIPO RADAR	181
4.7.1 Princípio de Funcionamento	181
4.7.2 Tipos de Antenas	183
4.7.3 Aplicações	183
4.8 DISPOSITIVOS DO TIPO CAPACITIVO	185
4.8.1 Princípio de Funcionamento	187
4.8.2 Recomendações de Utilização	188
4.8.3 Dimensionamento de Sondas Capacitivas	190
4.8.4 Formas Construtivas	190
4.9 DISPOSITIVOS DO TIPO ELETROMECÂNICO	191
4.9.1 Princípio de Funcionamento	191
4.9.2 Medidores Semicontínuos ou Cíclicos	191
4.9.3 Medidores Contínuos ou de Compensação	192
4.9.4 Aplicação e Instalação	193

4.10	CHAVES DE NÍVEL	193
4.10.1	Chaves de Nível do Tipo Flutuador (ou Bóia)	193
4.10.2	Chaves de Nível Tipo "Tandem"	195
4.10.3	Chaves de Nível do Tipo Deslocador	196
4.10.4	Chaves de Nível do Tipo Pás Rotativas	200
4.10.5	Chaves de Nível do Tipo Ultra-Sônico	201
4.11	DISPOSITIVOS DO TIPO PESAGEM	202
4.11.1	Princípio de Funcionamento	202
4.11.2	Conceitos Básicos	203
4.11.3	Características de Instalação	204
4.11.4	Erros	204
4.11.5	Recomendações para Operação Eficiente	206
4.12	REFERÊNCIAS	206
Capítulo 5	TEMPERATURA.....	207
5.1	INTRODUÇÃO	207
5.1.1	Importância	207
5.1.2	Conceitos	207
5.1.3	Escalas Termométricas	208
5.1.4	Especificação do Sistema	209
5.2	INDICADORES DE TEMPERATURA	211
5.2.1	Indicadores Cromáticos	211
5.2.2	Indicadores Pirométricos	212
5.3	MEDIDORES TRADICIONAIS	212
5.3.1	Termômetros Bimetálicos	212
5.3.2	Termômetros de Haste de Vidro	214
5.3.3	Sistemas de Bulbo-Capilar	215
5.4	TERMÔMETROS DE RESISTÊNCIA	217
5.4.1	Bulbos de Resistência de Fio Metálico	217
5.4.2	Termistores	220
5.5	TERMOPARES	222
5.5.1	Princípios	222
5.5.2	Associação de Termopares	226
5.5.3	Tipos de Termopares	228
5.5.4	Limites de Erro	230
5.5.5	Construção e Proteção dos Termopares	231
5.5.6	A Junta de Referência	234
5.5.7	Fios e Cabos de Extensão e Compensação	235
5.5.8	Considerações sobre a Instalação	237
5.6	PIRÔMETROS DE RADIAÇÃO	237
5.6.1	Princípios	237
5.6.2	Pirômetros Ópticos	240
5.6.3	Pirômetros Infravermelhos	241

5.7	TERMOGRAFIA	242
5.8	SENSORES DIVERSOS	243
5.8.1	Sondas Pneumáticas	243
5.8.2	Sensores Fluídicos	244
5.8.3	Semicondutores	244
5.8.4	Ultra-Som	244
5.8.5	Reflectometria Acústica no Domínio do Tempo	245
5.8.6	Cristais de Quartzo	245
5.8.7	Cristais Líquidos	245
5.8.8	Ruído Térmico	245
5.8.9	Sensor de Sal Paramagnético	246
5.8.10	Espectroscopia	246
5.9	CALIBRAÇÃO E AJUSTE	246
5.10	TRANSMISSORES	247
Capítulo 6	ANALISADORES	249
6.1	INTRODUÇÃO	249
6.1.1	Conceitos	249
6.1.2	Aplicação	251
6.1.3	Particularidades	251
6.1.4	Montagem	252
6.2	CONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS	253
6.2.1	Importância	253
6.2.2	Implantação do Sistema de Condicionamento da Amostra	254
6.2.3	Captação da Amostra	255
6.2.4	Transporte da Amostra	258
6.2.5	Condicionamento da Pressão e da Temperatura	259
6.2.6	Secagem	259
6.2.7	Filtros	261
6.2.8	Outros Componentes	261
6.2.9	Os Padrões	261
6.2.10	Coleta e Descarte da Amostra	262
6.3	ANALISADORES DE GASES	262
6.3.1	Analisadores de Oxigênio	262
6.3.2	Analisadores por Absorção de Radiação	267
6.3.3	Analisadores por Condutividade Térmica	273
6.4	ANALISADORES DE LÍQUIDOS	275
6.4.1	Analisadores de pH	275
6.4.2	Analisadores Íon Seletivos	279
6.4.3	Analisadores de Potencial Redox	279
6.4.4	Analisadores por Condutividade Elétrica	281
6.4.5	Outros Analisadores no Tratamento de Água	287
6.5	CROMATÓGRAFOS	290
6.5.1	O Cromatógrafo a Gás	292
6.5.2	O Gás de Arraste	292
6.5.3	O Seletor de Amostras (<i>Stream Selector</i>)	293

6.5.4	Injeção da Amostra	293
6.5.5	As Colunas	294
6.5.6	Configuração das Colunas	294
6.5.7	O Forno – Programação de Temperatura	295
6.5.8	Detectores	295
6.5.9	Controlador – Interfaces	297
6.6	ESPECTÔMETROS DE MASSA	298
6.6.1	Introdução	298
6.6.2	Princípio de Operação	299
6.6.3	Aplicações	301
6.7	VALIDAÇÃO E DIVERGÊNCIAS COM O LABORATÓRIO	301
6.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	302
Capítulo 7	TRANSMISSORES	303
7.1	CONCEITOS	303
7.2	O TRANSMISSOR – DEFINIÇÃO	304
7.3	ALIMENTAÇÃO	304
7.3.1	Alimentação a Quatro Fios	304
7.3.2	Alimentação a dois Fios	304
7.3.3.	Alimentação a Três Fios	305
7.4	PROTEÇÃO	305
7.5	A INDICAÇÃO LOCAL	306
7.6	CONEXÃO AO SENSOR OU TRANSDUTOR	307
7.7	SINAIS DE SAÍDA	308
7.8	TRANSMISSORES E CONVERSORES	308
7.9	TRANSMISSORES INTELIGENTES	309
Capítulo 8	ATMOSFERAS EXPLOSIVAS	311
8.1	INTRODUÇÃO	311
8.2	OS COMPONENTES DO RISCO	312
8.2.1	O Triângulo do Fogo	312
8.2.2	Explosividade dos Materiais	313
8.3	A NORMALIZAÇÃO INTERNACIONAL – IEC	314
8.3.1	A Estrutura do IEC e Objetivos da Normalização Internacional Elétrica	314
8.3.2	A Normalização IEC	315
8.3.3	Os Objetivos dos Comitês Técnicos de Normalização da IEC e o TC-31	315
8.4	A NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA – ABNT	337
8.4.1	Objetivos e Estrutura da ABNT	317
8.4.2	O CB-03 da ABNT e o COBEI	317
8.4.3	O Subcomitê SC31 do COBEI – Equipamento e Instalações em Atmosferas Explosivas	318

8.5	PLANO DE CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS EM UMA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA	321
8.5.1	Objetivos do Plano de Classificação de Áreas	321
8.5.2	Elaboração dos Estudos de Classificação de Áreas	322
8.5.3	Princípios de Segurança na Classificação de Áreas	323
8.5.4	Objetivos da Classificação de Áreas	324
8.5.5	Equipe Multidisciplinar para os Serviços de Classificação de Áreas	325
8.5.6	Identificação das Fontes de Risco para a Classificação de Áreas	325
8.5.7	Tipos de Zonas e de Grupos de Áreas Classificadas	327
8.5.8	Documentação de Classificação de Áreas	330
8.5.9	Exemplos de Desenhos de Plantas e de Cortes de Classificação de Áreas	331
8.5.10	Resultados e Benefícios do Plano de Classificação de Áreas	332
8.6	TÉCNICAS E TIPOS DE PROTEÇÃO	333
8.6.1	Conceitos Gerais	333
8.6.2	Tipo de Proteção à Prova de Explosão (Ex "d")	335
8.6.3	Proteção por Pressurização (Ex "p")	339
8.6.4	Proteção por Segurança Intrínseca (Ex "i")	343
8.6.5	Proteção do tipo Segurança Aumentada (Ex "e")	350
8.6.6	Caixas de Areia para Passagem de Cabos em Fronteiras de Áreas Classificadas	351
8.7	A CERTIFICAÇÃO DE CONFORMIDADE PARA EQUIPAMENTOS "EX"	352
8.8	PROTEÇÃO PROVIDA PELO INVÓLUCRO CONTRA INGRESSO DE ÁGUA E POEIRA (ÍNDICES IP)	354
8.9	CRITÉRIOS DE PROJETO E DE ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA INSTALAÇÕES EM ÁREAS CLASSIFICADAS	356
8.10	SERVIÇOS DE INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO INSPEÇÃO E REPAROS DE INSTALAÇÕES EM ÁREAS CLASSIFICADAS	358
8.10.1	Instalação dos Equipamentos Elétricos e de Instrumentação em Atmosferas Explosivas	358
8.10.2	Inspeção das Instalações Elétricas e de Instrumentação em Atmosferas Explosivas	359
8.10.3	Operação dos Equipamentos Elétricos e de Instrumentação em Áreas Clasificadas	360
8.10.4	Serviços de Inspeção e Manutenção de Equipamentos Elétricos e de Instrumentação para Áreas Classificadas	360
8.10.5	Serviços de Reparos e Revisão em Equipamentos Elétricos e de Instrumentação para Áreas Classificadas	360
8.11	GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS DA IEC E TERMOS "EX"	361
8.12	FONTES DE REFERÊNCIA E BIBLIOGRAFIA SOBRE ATMOSFERAS EXPLOSIVAS	362
8.13	REFERÊNCIAS DAS FOTOS E FIGURAS UTILIZADAS PARA ILUSTRAÇÃO NESTE CAPÍTULO	363

Capítulo 9	VÁLVULAS DE CONTROLE	365
9.	INTRODUÇÃO	365
9.1.1	A Válvula na Malha de Controle	365
9.1.2	Componentes de uma Válvula de Controle	366
9.2	TIPOS DE VÁLVULAS DE CONTROLE	380
9.2.1	Válvulas Globo	380
9.2.2	Válvulas Esfera	385
9.2.3	Válvulas Borboleta	387
9.2.4	Válvulas Especiais	391
9.3	APLICAÇÃO DE VÁLVULAS DE CONTROLE	394
9.3.1	Queda de Pressão Através da Válvula	395
9.3.2	Características de uma Válvula de Controle	396
9.3.3	Rangeabilidade de uma Válvula de Controle	400
9.3.4	Cavitação	401
9.3.5	Escoamento Laminar	403
9.3.6	Escoamento em Duas Fases (Bifásico)	404
9.4	SELEÇÃO, DIMENSIONAMENTO E ESPECIFICAÇÃO DE VÁLVULAS DE CONTROLE: EXEMPLOS PRÁTICOS	404
9.4.1	Seleção	404
9.4.2	Dimensionamento	408
9.4.3	Especificação de Válvulas de Controle	412
9.4.4	Exemplos Práticos	414
9.5	ACESSÓRIOS DE VÁLVULAS DE CONTROLE	416
9.5.1	Posicionadores	416
9.5.2	Chaves Limite	417
9.5.3	Volantes	418
9.5.4	Válvulas Solenóide	418
9.5.5	Transmissores de Posição	418
9.6	VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO	419
9.6.1	Válvulas de Operação Direta	419
9.6.2	Válvulas Piloto Operadas	420
9.6.3	Seleção, Dimensionamento e Especificação de Válvulas Reguladoras de Pressão	421
9.7	RUÍDO EM VÁLVULAS DE CONTROLE	422
9.8	INTERLIGAÇÃO DE VÁLVULAS EM REDE	423
9.9	VÁLVULAS DE CONTROLE X VARIADORES DE VELOCIDADE	425
9.9.1	Introdução	425
9.9.2	Controle de Vazão com Válvula na Descarga	426
9.9.3	Controle de Vazão por Meio de Variadores de Velocidade	427
9.9.4	Estudos Efetuados com Relação à Utilização de Inversores de Freqüência	430
9.9.5	Conclusão da Análise Comparativa	431
9.10	REFERÊNCIAS	431
Capítulo 10	TEORIA DE CONTROLE	433
10.1	INTRODUÇÃO	433
10.2	OBJETIVOS DO CONTROLE DE PROCESSOS	434
10.3	PRINCIPAIS PROBLEMAS PARA O CONTROLE DE PROCESSOS	435

10.3.1	Atrasos do Processo	436
10.3.2	Atrasos na Medição	437
10.3.3	Atrasos na Transmissão	439
10.4	DEFINIÇÕES BÁSICAS: CONTROLE MANUAL; CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO (<i>feedback</i>), CONTROLE POR ANTECIPAÇÃO (<i>feedforward</i>), GANHO E ATRASO	440
10.4.1	Controle Manual Típico	440
10.4.2	Controle por Realimentação (<i>feedback</i>)	440
10.4.3	Controle por Antecipação (<i>feedforward</i>)	441
10.4.4	Ganho e Atraso	443
10.5	SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM: FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	444
10.5.1	Perturbação em Degrau	445
10.5.2	Perturbação Senoidal	445
10.6	RESPOSTA DE UM SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM A UMA PERTURBAÇÃO DEGRAU E SENOIDAL: CONSTANTE DE TEMPO, DEFASAGEM	448
10.6.1	Resposta a um Degrau	448
10.6.2	Resposta a uma Senóide	449
10.7	EXEMPLOS FÍSICOS DE SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM: RESISTÊNCIA, CAPACITÂNCIA	451
10.8	SISTEMAS DE ORDEM SUPERIOR: TEMPO MORTO, SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM EM SÉRIE	453
10.9	OS COMPONENTES DE UM SISTEMA DE CONTROLE	455
10.9.1	Sensor/Transmissor e Controlador	455
10.9.2	Elementos Finais de Controle	457
10.10	AÇÕES DE CONTROLE LIGA-DESLIGA (ON-OFF), AUTO-OPERADO, PROPORCIONAL, PROPORCIONAL-INTEGRAL, PROPORCIONAL-DERIVATIVA, PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVA	460
10.10.1	Controle Liga-Desliga (<i>On-Off</i>)	460
10.10.2	Controle Auto-Operado	461
10.10.3	Controle Proporcional	462
10.10.4	Controle Proporcional-Integral (PI)	466
10.10.5	Controle Proporcional-Derivativo (PD)	469
10.10.6	Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID)	471
10.11	ESTABILIDADE E SINTONIA DE CONTROLADORES – MALHA FECHADA: ZIEGLER E NICHOLS; HARRIOTT – MALHA ABERTA (CURVA DE REAÇÃO DO PROCESSO): ZIEGLER E NICHOLS; COHEN E COON	474
10.11.1	Estabilidade	474
10.11.2	Sintonia de Controladores	476
10.12	CONTROLE EM CASCATA, CONTROLE DE RAZÃO, CONTROLE SELETIVO, CONTROLE EM RANGE DIVIDIDO (<i>SPLIT RANGE</i>)	482
10.12.1	Controle em Cascata	482
10.12.2	Controle de Razão	485
10.12.3	Controle Seletivo	487
10.12.4	Controle em Faixa Dividida (<i>Split-range</i>)	490
10.13	REFERÊNCIAS	492

Capítulo 11 RECEPTORES	493
11.1 INTRODUÇÃO	493
11.2 TRANSDUTORES E CONVERSORES	494
11.2.1 Transdutores de Corrente para Pneumático	495
11.2.2 Conversores Pneumáticos para Corrente	496
11.2.3 Conversores de Tensão para Corrente	497
11.2.4 Conversores de Tensão para Pressão	498
11.2.5 Conversores de Corrente para Corrente	499
11.3 RELÉS DE COMPUTAÇÃO E RELÉS ELETRÔNICOS DE ALARME	499
11.3.1 Relés Pneumáticos de Multiplicação e Divisão	500
11.3.2 Relés Eletrônicos de Multiplicação e Divisão	501
11.3.3 Relés Pneumáticos de Soma e Subtração	501
11.3.4 Relés Eletrônicos de Soma e Subtração	502
11.3.5 Extratores de Raiz Quadrada Eletrônicos	503
11.3.6 Relé de Computação Seletor do Menor Sinal, Maior Sinal e Limitador de Sinal	503
11.3.7 Relés Pneumáticos e Eletrônicos de Alarme	504
11.4 INDICADORES ANALÓGICOS E INDICADORES DIGITAIS	505
11.5 CONTROLADORES	508
11.6 REGISTRADORES	509
11.6.1 Registradores Analógicos	509
11.6.2 Registradores Digitais	510
11.7 INTEGRADORES E TOTALIZADORES	511
11.8 FUNÇÕES DE ALARME E SINALIZAÇÃO	511
11.9 REFERÊNCIAS	513
Capítulo 12 CLP	515
12.1 INTRODUÇÃO	515
12.1.1 A Finalidade	515
12.1.2 A Origem	515
12.1.3 Primeira Aplicação	516
12.2 OS AVANÇOS TECNOLÓGICOS	517
12.2.1 Entre 1970 e 1974	517
12.2.2 De 1975 a 1980	517
12.3 APlicações ATUAIS	517
12.3.1 Melhorias de Desempenho	518
12.4 ARQUITETURAS REDUNDANTES	518
12.4.1 Redundância de UCP	519
12.4.2 Os Sistemas para "Missão Crítica"	519
12.5 O HARDWARE	520
12.5.1 Algumas Tendências do Hardware	520
12.6 LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO	521
12.6.1 A Origem da Linguagem Histograma de Contatos	521
12.6.2 As Outras Linguagens mais Expressivas	522

12.6.3	Traduzindo em Linguagens Diferentes	522
12.6.4	Os Blocos Funcionais	524
12.6.5	A Linguagem Estruturada GRAFCET ou SFC	525
12.7	O USO DE MICROCOMPUTADORES COMO CLPS	526
12.8	A UNIDADE CENTRAL DE PROCESSAMENTO (UCP) (ou do inglês CPU)	526
12.8.1	A Varredura	527
12.8.2	Os Dispositivos de Acesso Frontal nas UCPs	528
12.9	A MODULARIDADE	529
12.10	MEMÓRIAS	529
12.11	ENTRADAS E SAÍDAS	529
12.11.1	A Isolação das Entradas e Saídas	531
12.12	OS ENDEREÇOS	532
12.13	A PROGRAMAÇÃO	533
12.14	O CLP E AS COMUNICAÇÕES	534
12.14.1	A Comunicação Interna	534
12.14.2	A Comunicação Externa	534
12.15	ARQUITETURA DOS SISTEMAS DE CONTROLE COM CLPS	535
12.16	CONFIABILIDADE E DIAGNÓSTICOS	535
12.16.1	Técnicas de Diagnóstico	535
12.16.2	Temporizador Cão de Guarda (<i>Watch Dog Timer</i>)	536
12.16.3	Verificação de Paridade	536
12.16.4	Soma de Verificação	537
12.17	ALGUMAS LIMITAÇÕES DE APLICAÇÕES PARA CLPS	537
12.18	TENDÊNCIAS ATUAIS	538
Capítulo 13	SDCD E REDES DE COMUNICAÇÃO	539
13.1	INTRODUÇÃO	539
13.1.1	Finalidade e Definições	539
13.1.2	A Origem	540
13.1.3	Primórdios no Brasil	541
13.1.4	A Interface Via Tubos de Raios Catódicos e Teclados	541
13.2	A INTERFACE COM O PROCESSO	542
13.3	A CONFIGURAÇÃO	543
13.3.1	Configurando um SD CD	543
13.3.2	A Falta de Padronização entre os Fornecedores	544
13.4	AS TELAS DE OPERAÇÃO	545
13.4.1	Telas que Simulam um Painel de Operação Convencional	545
13.4.2	Outros Tipos de Telas de Operação	547
13.5	O CONTROLE PELO SD CD	551
13.5.1	Os Algoritmos de Controle	551
13.5.2	As Promessas do que um SD CD pode Fazer	551

13.6	AS ESTAÇÕES E VIAS DE DADOS DE UM SDCD	552
13.6.1	Funções e Dispositivos nas Redes de Comunicação	552
13.6.2	As Vias de Dados	553
13.7	A TENDÊNCIA DA EVOLUÇÃO ATUAL	554
13.7.1	A "Abertura" dos Sistemas	554
13.8	AS REDES INDUSTRIAIS DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE	554
13.8.1	A Interconectividade	554
13.8.2	Redes Industriais de Comunicação e de Controle	555
13.8.3	Classificação das Redes	555
13.8.4	Os Níveis Funcionais nas Redes	556
13.8.5	Redes LAN Industriais	556
13.8.6	Barramentos de Campo	557
13.9	O USO DE FIBRA ÓTICA EM REDES INDUSTRIAIS	561
13.9.1	O Uso de Fibra Ótica em Áreas Classificadas	562
13.9.2	Os tipos de Fibras Óticas para Aplicações Industriais	563
13.10	NOVAS DECISÕES	563
13.10.1	A "Classificação" dos Sistemas Modernos	563
13.10.2	Decisões na Configuração e Arquitetura	564
Capítulo 14	INTERTRAVAMENTO E SISTEMAS DE SEGURANÇA	565
14.1	INTRODUÇÃO	565
14.1.1	A Evolução dos Sistemas de Segurança do Processo Industrial	565
14.1.2	Os Modelos Modernos	566
14.1.3	Os Paradigmas estão sendo Revisados	567
14.1.4	Formas de Operação	569
14.1.5	Finalidades	569
14.1.6	Outros Elementos de Proteção	569
14.2	O CONCEITO DE RISCO	569
14.2.1	A Redução do Risco	570
14.2.2	Conceitos em Risco	570
14.3	DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE INTEGRIDADE DE SEGURANÇA (SIL)	571
14.3.1	A Identificação dos Riscos	572
14.3.2	Escolha do SIL	572
14.3.3	Verificação do SIL Atingido	573
14.4	AS NORMAS MODERNAS PARA OS SIS	574
14.5	TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS	575
14.5.1	Sistema de Segurança e Sistema de Controle	575
14.5.2	As arquiteturas mais Comuns	576
14.5.3	Missão Crítica	577
14.5.4	O Conceito de Probabilidade de Falha e o SIL	578
14.5.5	A Probabilidade de Falha sob Demanda (PFD)	579
14.6	O CICLO DE VIDA DO SIS	581

1

INTRODUÇÃO

ENGº EGÍDIO ALBERTO BEGA

1.1 CONCEITOS BÁSICOS DE INSTRUMENTAÇÃO PARA CONTROLE DE PROCESSOS

Os processos industriais são variados, englobam diversos tipos de produtos e exigem controle preciso dos produtos gerados. Usualmente, os maiores usuários de instrumentação são as indústrias que atuam nas áreas de petróleo, química, petroquímica, alimento, cerâmica, siderúrgica, celulose e papel, têxtil, geração de energia elétrica etc.

Em todos esses processos é indispensável se controlar e manter constantes as principais variáveis, tais como **pressão**, **nível**, **vazão**, **temperatura**, **pH**, **condutividade**, **velocidade**, **umidade** etc. Os instrumentos de medição e controle permitem manter e controlar estas variáveis em condições mais adequadas/precisas do que se elas fossem controladas manualmente por um operador.

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

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

Para ilustrar os diversos aspectos, utilizar-se-á, como processo típico, o **trocador de calor** mostrado na figura 1.1, que é utilizado para aquecer um fluido com vapor.

No caso da figura 1.1 o termo **processo** significa a operação de adição de energia calorífica ao fluido frio (fluido a ser aquecido).

No exemplo mostrado na figura 1.1, a temperatura do fluido na saída do trocador é influenciada por vários fatores, sendo que os principais são vazão e temperatura de entrada do fluido a ser aquecido, vazão e característica do vapor utilizado no aquecimento, capacidade calorífica dos fluidos, perda térmica do trocador para o ambiente etc.

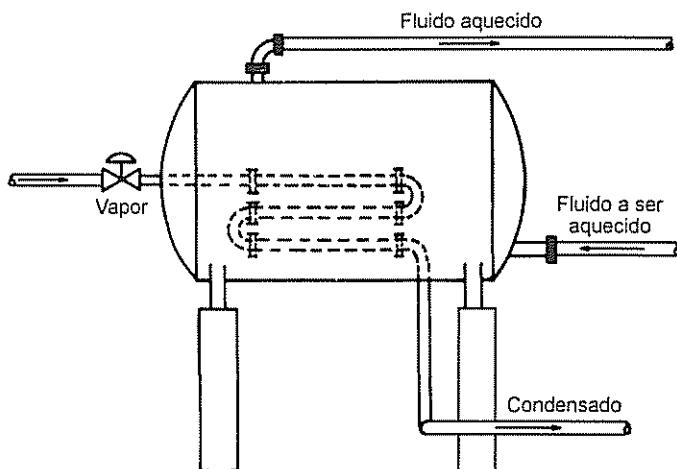


FIGURA 1.1 Processo típico de troca de calor.

1.1.1 Sistema em Malha Aberta

Sistema em malha aberta é aquele em que a informação sobre a variável controlada (no caso da figura 1.2, temperatura do fluido aquecido na saída do trocador) não é utilizada para ajustar quaisquer das variáveis de entrada, visando compensar as variações que ocorrem nas variáveis do processo e que influenciam na variável controlada.

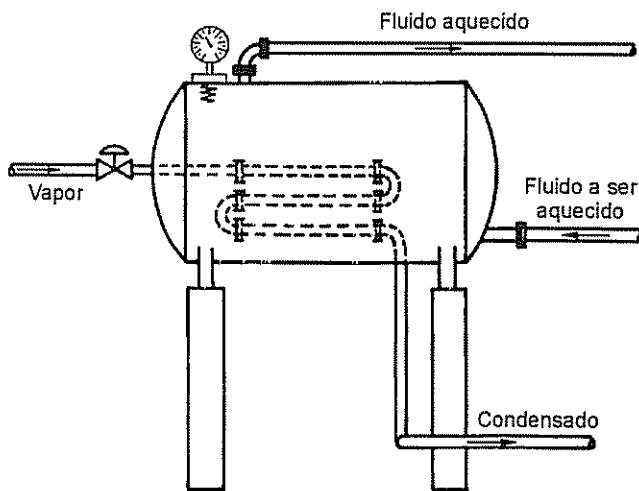


FIGURA 1.2 Processo típico de troca de calor em malha aberta.

O conceito de **malha aberta** é freqüentemente utilizado nas discussões dos sistemas de controle, para indicar que está se investigando a dinâmica do processo em uma condição não controlada, ou seja, investiga-se apenas a dinâmica do processo.

1.1.2 Sistema em Malha Fechada

No processo típico de troca de calor em análise, bem como nos demais casos de controle de processos, a função fundamental do sistema de controle em malha fechada, ou sistema de controle com realimentação, é manipular a **relação entrada/saída de energia ou material**, de maneira que a variável controlada do processo seja mantida dentro dos limites estabelecidos, ou seja, o **sistema de controle em malha fechada** regula a variável controlada (**temperatura do fluido aquecido na saída do trocador**), fazendo correções em outra variável do processo (**vazão do vapor adicionada ao trocador**), que é chamada de **variável manipulada**.

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

Conforme mostrado na figura 1.3, num processo utilizando controle manual o operador terá como função **medir** a temperatura do fluido aquecido (variável **controlada**) e **corrigir** a vazão do vapor adicionado ao trocador (variável **manipulada**), de forma a manter a temperatura da variável controlada no valor desejado (ponto de ajuste ou **set point**). Ou seja, o operador irá **medir** a temperatura do fluido aquecido através do tato; este sinal será **comparado** mentalmente com a temperatura desejada (ponto de ajuste ou **set point**), que está armazenada em seu cérebro, com base na diferença entre estes dois valores (**erro ou offset**), o operador fará a **computação** (definirá como e quanto irá atuar) e, em seguida, atuará na válvula de admissão de vapor fazendo a **correção**.

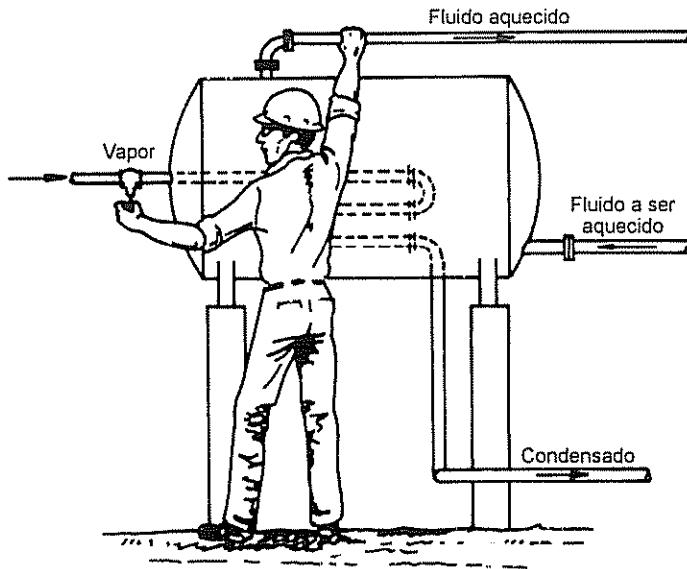


FIGURA 1.3 Processo típico de troca de calor utilizando controle manual.

Caso o processo típico de troca de calor seja controlado utilizando-se controle automático, as ações executadas pelo sistema de controle automático serão as mesmas que as executadas pelo operador quando fazendo controle manual (**medir, comparar, computar e corrigir**).

Na figura 1.4, a **medição** é feita pelo **transmissor de temperatura (TT)**; a **comparação** do valor medido pelo transmissor (TT) com o ponto de ajuste dado pelo operador (**set point**)

para obtenção do valor do erro (valor do erro = valor do ponto de ajuste – valor medido da variável controlada) e a computação (que irá considerar os ajustes e tipos de ações de controle utilizadas) são executadas pelo controlador de temperatura (TRC), enquanto a correção será efetivada pela válvula de controle (TV), com base no sinal recebido do TRC.

A forma de execução e o tempo gasto para efetivação das ações de controle dependem, basicamente, do sistema de controle utilizado e das características do processo controlado. Como as características do processo controlado (capacitâncias, resistências, tempo morto etc.) não podem ser alteradas, o que se faz é especificar o sistema de controle [transmissor, controlador (tipo e ajuste das ações de controle), válvula etc.] mais adequado às características do processo controlado, como forma de se otimizar o rendimento e facilitar a operação adequada do equipamento.

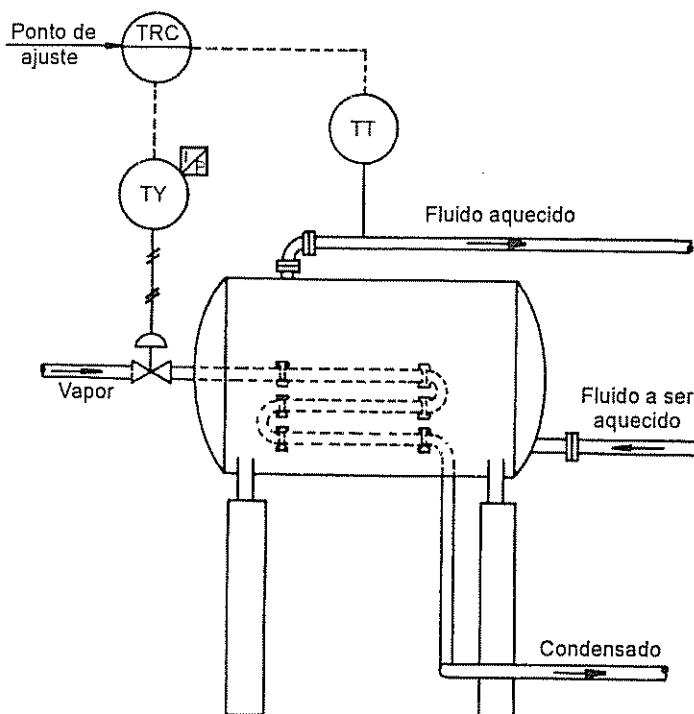


FIGURA 1.4 Processo típico de troca de calor utilizando controle automático.

Conforme será visto em itens posteriores, além dos sistemas de controle os processos industriais também utilizam os sistemas de segurança.

Basicamente, os sistemas de controle atuam/preponderam enquanto o processo controlado estiver operando dentro das condições normais para os quais ele foi projetado; complementarmente, os sistemas de segurança atuam/preponderam sempre que o processo controlado sair das condições normais de operação e se aproximar ou adentrar nas condições de operação consideradas anormais e que possam ocasionar dificuldades/riscos operacionais (ao equipamento ou ao processo), pessoais ou ambientais.

1.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE INSTRUMENTOS

1.2.1 Classes de Instrumentos

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

Os instrumentos podem ser classificados em:

INSTRUMENTOS CEGOS

- São instrumentos que não têm indicação visível do valor da variável medida. Os instrumentos de alarme, tais como pressostatos e termostatos (chaves de pressão e temperatura), que só possuem uma escala exterior com um índice de seleção para ajuste do ponto de atuação, são instrumentos cegos. Os transmissores de vazão, pressão, nível e temperatura sem indicação local também são instrumentos cegos.

INSTRUMENTOS INDICADORES

- São instrumentos que dispõem de indicador e escala graduada, na qual se pode ler o valor da variável medida/controlada.

INSTRUMENTOS REGISTRADORES

- São instrumentos que registram a variável medida/controlada com um traço contínuo ou através de pontos.

ELEMENTOS PRIMÁRIOS

- São elementos que estão em contato direto com a variável medida/controlada e que utilizam ou absorvem energia do próprio meio, para fornecer ao sistema de medição uma resposta em função da variação da variável medida/controlada.

TRANSMISSORES

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

CONVERSORES

- São instrumentos que recebem um sinal de entrada pneumático ou eletrônico, procedente de um outro instrumento, e convertem-no em um sinal de saída padrão, que pode ser de dois tipos, 4 a 20 mA ou 0,2 a 1,0 kgf/cm² (19,614 a 98,07 kPa).

CONTROLADORES

- São instrumentos que comparam o valor da variável medida/controlada com o valor desejado (*set point* ou ponto de ajuste) e exercem uma ação de correção na variável manipulada, função da diferença entre estes dois valores (erro ou *offset*) e de sua equação de controle (controladores P, P + I, P + I + D).

ELEMENTOS FINAIS DE CONTROLE

- São equipamentos que recebem o sinal de correção do controlador e, em função deste sinal modificam/atuam sobre a variável manipulada ou agente de controle (válvula de controle).

1.2.2 Definições

A área de instrumentação e controle de processos utiliza terminologia própria. Os termos utilizados, além de definirem as características dos sistemas de medição e controle, também definem as características estáticas e dinâmicas dos diversos instrumentos utilizados.

A terminologia utilizada foi padronizada com o objetivo de permitir que fabricantes, usuários, projetistas e organismos ou entidades que atuam no campo da instrumentação industrial utilizem uma mesma linguagem.

FAIXA DE MEDIDA (*RANGE*)

- Faixa ou conjunto de valores da variável medida/controlada que estão compreendidos dentro dos limites superior e inferior de capacidade de medição, transmissão ou controle do instrumento, vem expressa estabelecendo os seus valores extremos. Exemplo: a faixa de medida de um instrumento de temperatura é de 100 a 300 °C.

ALCANCE (*SPAN*)

- É a diferença algébrica entre os valores superior e inferior da faixa de medida (*range*) do instrumento. O instrumento do exemplo anterior tem um alcance (*span*) de 200 °C.

ERRO (*OFFSET*)

- No caso de controladores, erro (*offset*) é a diferença entre o valor do ponto de ajuste (*set point*) e o valor medido da variável controlada. De forma genérica, erro é a diferença entre o valor lido ou transmitido e o valor real da variável medida. Se o processo está em condições de **regime permanente**, existe o chamado **erro estático**. Em condições dinâmicas, o erro varia consideravelmente, pois os instrumentos têm características comuns aos sistemas físicos, absorvem energia do processo e esta transferência requer um certo tempo para ser transmitida. Este fato dá lugar a atrasos de leitura do instrumento. Sempre que as condições forem dinâmicas, existirá em maior ou menor grau o chamado erro dinâmico (diferença entre o valor instantâneo da variável medida e o valor indicado ou transmitido pelo instrumento), cujo valor depende do tipo de fluido medido/controlado, da sua velocidade, do elemento primário, dos meios de medição etc. O erro médio do instrumento é a **média aritmética dos erros em cada ponto da medida**, determinados para todos os valores crescentes e decrescentes da variável.

PONTO DE AJUSTE (*SET POINT*)

- É o ponto no qual o controlador é ajustado para controlar o processo.

PRECISÃO (*ACCURACY*)

- É a tolerância de medição ou de transmissão do instrumento. Define o limite dos erros cometidos quando o instrumento é utilizado em condições normais de serviço. A precisão pode ser expressa de várias maneiras:
 - a) em porcentagem do alcance (*span*);
 - b) em unidades da variável medida;
 - c) em porcentagem de leitura;
 - d) em porcentagem do valor máximo da faixa medida (*range*);
 - e) em porcentagem do comprimento da escala.
- Normalmente, a precisão varia em cada ponto da faixa de medida, embora os fabricantes a especifiquem em toda a faixa do instrumento, indicando seu valor em algumas regiões da escala.

SENSIBILIDADE (*SENSITIVITY*)

- Valor mínimo que a variável deve mudar para obter-se uma variação na indicação ou transmissão. Normalmente expressa em porcentagem do alcance (*span*).

REPETIBILIDADE (*REPEATABILITY*)

- É a capacidade de reprodução da indicação ou transmissão ao se medir, repetidamente, valores idênticos da variável medida, nas mesmas condições de operação e no mesmo sentido de variação. A repetibilidade é geralmente expressa em porcentagem do alcance (*span*).

HISTERESE (*HYSTERESIS*)

- Diferença máxima que se observa nos valores indicados pelo instrumento, para um mesmo valor qualquer da faixa de medida, quando a variável percorre toda a escala tanto no sentido crescente como no decrescente. A histerese geralmente é expressa em porcentagem do alcance (*span*).

ELEVAÇÃO DE ZERO

- É a quantidade com que o valor zero da variável supera o valor inferior da faixa de medida (*range*). Pode ser expresso em unidades da variável medida ou porcentagem do alcance (*span*).

SUPRESSÃO DE ZERO

- É a quantidade com que o valor inferior de faixa de medida (*range*) supera o valor zero da variável. Pode ser expresso em unidades da variável medida ou porcentagem do alcance (*span*).

1.3 IDENTIFICAÇÃO E SÍMBOLOS DE INSTRUMENTOS

As normas de instrumentação estabelecem símbolos gráficos e codificações para identificação alfa-numérica de instrumentos ou de funções programadas, que deverão ser utilizadas nos diagramas e malhas de controle de projetos de instrumentação.

O propósito dos símbolos gráficos e codificações estabelecidos pelas normas é estabelecer uma maneira uniforme de identificação dos instrumentos e sistemas de instrumentação, facilitar o entendimento dos diagramas e malhas de instrumentação e viabilizar a comunicação entre usuários, projetistas e fornecedores.

A simbologia/codificação mais utilizada mundialmente na área de instrumentação e controle de processos é a padronizada na norma S 5.1, da ISA (*The Instrumentation, Systems and Automation Society*, antigamente denominada *Instrument Society of America*). Existem outras normas que tratam do mesmo assunto, mas que não têm utilização tão ampla no Brasil e no mundo (ex.: RC-22, da SAMA – *Scientific Apparatus Makers Association*, JIS etc.).

Toda norma deve fornecer informações suficientes para que, ao se examinar um documento, se consiga entendê-lo com relativa facilidade. Não deverá ser pré-requisito para este entendimento o conhecimento detalhado de um especialista em instrumentação ou controle de processos.

1.3.1 Padronização ISA (*The Instrumentation, Systems and Automation Society*, Antigamente Denominada *Instrument Society of America*)

Neste livro adotar-se-á a simbologia/codificação padronizada pela ISA. Para facilitar o seu entendimento, mostra-se, a seguir, a essência da norma S 5.1 (*Instrumentation Symbols and Identification*), da *The Instrumentation, Systems and Automation Society* (ISA), conforme texto extraído do livro *Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras*, de Egídio Alberto Bega, editado pela ISA, em 1998.

Na parte inicial da norma ISA S 5.1, é apresentada a definição dos diversos termos utilizados usualmente em instrumentação e controle de processos.

A padronização ISA considera que cada instrumento ou função programada será identificado por um conjunto de letras (tabela 1.1) e um conjunto de algarismos. A primeira letra do conjunto de letras indica a variável medida/controlada e as letras subsequentes indicam a função que o instrumento desempenha na malha de controle. O primeiro conjunto de algarismos indica a área/fábrica e o segundo indica a malha à qual o instrumento ou a função programada pertence. Eventualmente, para completar a identificação, poderá ser acrescido um sufixo.

TABELA 1.1

Letras de Identificação de Instrumento ou Função Programada
 (de *Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras – Bega, E. A. – ISA*)

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

Notas para a tabela 1.1:

- a) Uma letra tipo **escolha do usuário** é utilizada para cobrir significados não listados e que serão utilizados de maneira repetitiva em um projeto particular. O significado da letra deve ser definido na legenda.
- b) A letra **A** cobre todos os tipos de analisadores. Recomenda-se que o tipo de análise realizado pelo instrumento seja definido fora do círculo de identificação.
- c) A função passiva **G** aplica-se a instrumentos ou dispositivos que fornecem uma indicação visual não calibrada, como os visores de vidro e monitores de TV.
- d) No caso de diagramas, se necessário, as funções associadas com o uso da letra subsequente **Y** são definidas fora do círculo de identificação.
- e) Os termos modificadores **alto**, **baixo**, **médio** ou **intermediário** correspondem a valores das variáveis medidas, não aos valores dos sinais correspondentes, a não ser que seja indicado de outra forma.
- f) Os termos **alto** e **baixo**, quando aplicados a posições de válvulas e outros dispositivos abre-fecha, são definidos como segue: **alto** denota que a válvula está na, ou se aproxima da, posição completamente aberta, e **baixo** mostra que ela está na, ou se aproxima da, posição totalmente fechada.
- g) O termo **registrator** aplica-se a qualquer forma de armazenamento permanente de informações que permite recuperação por quaisquer meios.
- h) A primeira letra **V** (vibração ou análise mecânica), desempenha o mesmo papel em monitoração de máquinas que a letra **A** desempenha em análise de maneira geral. Exceto para a variável vibração, espera-se que as demais variáveis de análise mecânica sejam definidas fora do círculo de identificação.

Em uma malha, a primeira letra de identificação funcional é selecionada de acordo com a variável medida ou controlada e não de acordo com a variável manipulada. Adicionalmente, a identificação funcional de um instrumento é feita de acordo com a função por ele executada e não de acordo com a sua construção.

A sequência de letras de identificação funcional de um instrumento ou função programada, começa com uma primeira letra selecionada de acordo com a tabela 1.1. As letras de funções passiva ou de informação devem seguir em qualquer ordem, as letras de funções ativa ou de saída seguem-nas também em qualquer ordem, com exceção da letra de função de saída **C (controle)**, que deve preceder a letra **V (válvula)**, quando ambas coexistirem. Se forem utilizadas letras modificadoras, estas deverão ser interpostas de forma que fiquem posicionadas seguindo imediatamente as letras que elas modificam.

A tabela 1.2 mostra um exemplo de instrumento identificado de acordo com a norma ISA S 5.1, onde:

- T – variável medida ou iniciadora: TEMPERATURA;
- R – função passiva ou de informação: REGISTRADOR;
- C – função ativa ou de saída: CONTROLADOR;
- 210 – área de atividade ou fábrica, onde o instrumento ou função programada atua;
- 02 – número seqüencial da malha;
- A – sufixo.

TABELA 1.2
Exemplo de Identificação de Instrumento (de *Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras – Bega, E. A. – ISA*)

T	R C	210	02	A
VARIÁVEL	FUNÇÃO	ÁREA DE ATIVIDADES	Nº SEQUENCIAL DA MALHA	SUFIXO
IDENTIFICAÇÃO FUNCIONAL		IDENTIFICAÇÃO DA MALHA		
IDENTIFICAÇÃO DO INSTRUMENTO				

A identificação da malha consiste da primeira letra e do número de sua identificação (no exemplo da tabela 1.2, a identificação da malha é T-21002). Cada instrumento dentro de uma mesma malha tem associado a ele um mesmo número de malha e a mesma primeira letra. Cada malha tem uma única identificação de malha. Um instrumento comum a duas ou mais malhas deve carregar a identificação da malha que for considerada predominante.

A numeração da malha pode ser feita de forma paralela ou serial. No caso da numeração paralela inicia-se uma seqüência numérica para cada nova letra, por exemplo, TIC-21000, FRC-21000, LIC-21000, AI21000 etc. No caso de numeração serial, utiliza-se uma seqüência simples de números para um projeto ou para grandes seções de um projeto, independentemente da primeira letra de identificação da malha; por exemplo, TIC-21000, FRC-21001, LIC-21002, AI-21003 etc. Uma seqüência de numeração pode começar com 1 ou qualquer outro número conveniente, tal como 01, 001, 301, 1401, 21001.

Usualmente, na indústria, utiliza-se a numeração paralela.

O número de letras funcionais agrupadas para um instrumento deve ser mantido em um valor mínimo, de acordo com o julgamento do usuário. O número total de letras dentro de um grupo não deve exceder a quatro.

Todas as letras da identificação funcional deverão ser letras maiúsculas.

Se uma dada malha tem mais de um instrumento com a mesma identificação funcional, um sufixo pode ser adicionado ao número da malha; por exemplo, FV-21002A, FV-21002B, FV-21002C etc., ou TE-21005-1, TE-21005-2 etc. Entretanto, pode ser mais conveniente ou lógico, em certos casos, designar um par de transmissores; por exemplo, como FT-21002 e FT-21003, ao invés de FT-21002A e FT-21002B.

A figura 1.5 mostra os símbolos gerais utilizados para representar instrumento ou função programada de acordo com a ISA S 5.1.

Localização Tipo \	Locação principal normalmente aces- sível ao operador	Montado no campo	Locação auxiliar normalmente aces- sível ao operador	Locação auxiliar normalmente não acessível ao operador
Instrumentos discretos				
Instrumentos compartilhados				
Computador de processo				
Controlador programável				

FIGURA 1.5 Símbolos gerais para instrumento ou função programada (de *Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras* - Bega, E. A. - ISA).

Notas para a figura 1.5:

- Satisfeitas as exigências gerais de desenho quanto à clareza e legibilidade, os símbolos de instrumento ou função programada podem ser desenhados seguindo qualquer orientação.
- De maneira similar, as linhas de sinal podem ser desenhadas em um diagrama entrando ou saindo da parte apropriada do símbolo, utilizando qualquer ângulo.
- Os blocos funcionais e os números de tag devem sempre ser desenhados seguindo a horizontal.
- Devem ser adicionadas setas direcionais às linhas de sinal, quando necessário, para esclarecer a direção do fluxo de informação. O uso criterioso destas setas, especialmente em desenhos complexos, freqüentemente facilitará o entendimento.

A padronização ISA também considera que, quando da elaboração de um diagrama de controle, a identificação do instrumento será escrita dentro do símbolo geral e que, em casos específicos, a sua função será detalhada pelo acréscimo de um símbolo de processamento de sinais ao seu símbolo geral.

A figura 1.6 mostra os símbolos e funções de processamento de sinais padronizados pela ISA.

Símbolo	Função	Símbolo	Função
Σ ou +	Soma	x	Multiplicação
Σ/N	Média	\div	Divisão
Δ ou -	Subtração	$\sqrt{}$	Extração de raiz quadrada
K ou P	Proporcional	$\sqrt[n]{}$	Extração de raiz
\int ou I	Integral	x^n	Exponenciação
d/dt ou D	Derivativo	f(x)	Função não-linear
>	Seletor de sinal alto	\nearrow	Limite superior
<	Seletor de sinal baixo	\nwarrow	Limite inferior
\pm	Polarização	$\nearrow \nwarrow$	Limitador de sinal
f(t)	Função tempo	$\%_x$	Conversão de sinal

FIGURA 1.6 Símbolos e funções de processamento de sinais (de *Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras - Bega, E. A. - ISA*).

A figura 1.7 mostra os símbolos utilizados para representar linhas para instrumento ou função programada, de acordo com a norma ISA em referência.

	Suprimento ou impulso		Sinal não definido
	Sinal pneumático		Sinal elétrico
	Sinal hidráulico		Tubo capilar
	Sinal eletromagnético ou sônico (transmissão guiada)		Sinal eletromagnético ou sônico (transmissão não guiada)
	Ligação configurada internamente ao sist. (ligação por software)		Ligação mecânica
	Sinal binário pneumático		Sinal binário elétrico

FIGURA 1.7 Símbolos de linhas para instrumento ou função programada (de *Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras - Bega, E. A. - ISA*).

1.3.2 Exemplos de Simbologia

Os exemplos de simbologia mostrados nas figuras a seguir, ilustram os símbolos utilizados para representar instrumentos em diagramas e desenhos. Nestes desenhos também são mostrados exemplos de identificação de instrumentos.

Não deve ser inferido que a escolha de qualquer dos esquemas apresentados constitui uma recomendação.

O tamanho dos círculos de identificação e dos diversos símbolos mostrados nos exemplos estão na dimensão recomendada, entretanto, as dimensões poderão variar de acordo com a necessidade.

As fontes de suprimento de eletricidade, ar comprimido e outras não são mostradas nos desenhos.

Na maioria das vezes, uma linha de sinal será suficiente para representar as interconexões entre dois instrumentos em fluxogramas, muito embora eles possam estar conectados fisicamente por mais de uma linha.

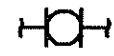
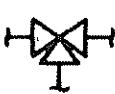
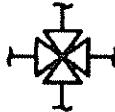
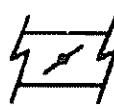
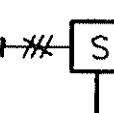
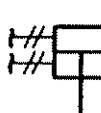
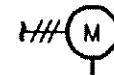
A seqüência na qual os instrumentos ou funções de uma malha são conectados, deve refletir o fluxo lógico funcional ou de informação.

O grau de detalhe a ser aplicado a cada documento fica a critério do usuário da norma.

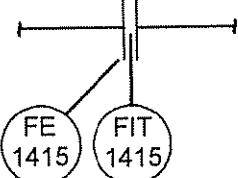
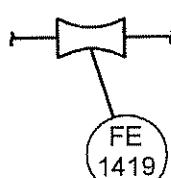
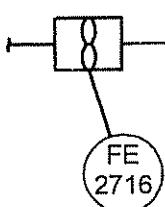
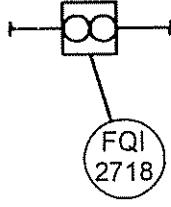
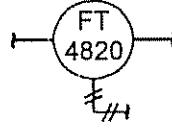
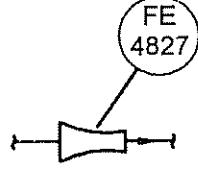
1.4 REFERÊNCIAS

1. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – NBR-8190 – Simbologia de Instrumentação.
2. Bega, E. A. – Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras – Editora Interciênciac.
3. *The Instrumentation, Systems and Automation Society (ISA)* – S5.1. *Instrumentation Symbols and Identification*

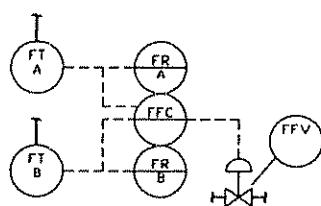
Anexos – Exemplos de Símbologia

			
Símbolo geral	Angular	Borboleta	Rotativa
			
"3 vias"	"4 vias"	Globo	Abafador ou damper
Com ou sem posicionador ou outro piloto	Preferida para diafragma montado com piloto. Nota: o conjunto é acionado por uma entrada (mostrada tipicamente como elétrica).		
Diafragma, retorno por mola ou atuador não especificado.		Solenóide	
			
Retorno por mola, simples ação	Dupla ação	Motor rotativo (mostrado de forma típica com sinal elétrico. Pode ser hidráulico ou pneumático).	
Cilindro sem posicionador ou outro piloto			

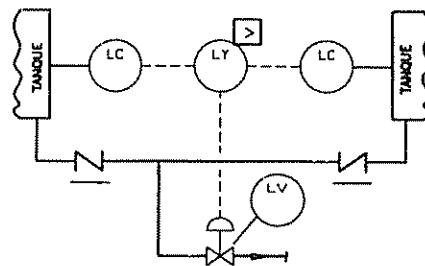
ANEXO 1.1 Símbolos de corpos de válvulas de controle, dampers e atuadores.

 <p>Símbolo geral para os elementos primários de vazão As palavras laminar, turbulento, etc. podem ser utilizadas.</p>	 <p>Placa de orifício com tomada no flange ou canto, conectadas a um transmissor indicador de pressão diferencial.</p>	 <p>Tubo Venturi</p>
 <p>Elemento primário de vazão tipo turbina.</p>	 <p>Indicador de vazão de área variável, tipo rotâmetro.</p>	 <p>Indicador, totalizador de vazão, tipo deslocamento positivo.</p>
 <p>Elemento primário de vazão com transmissor incorporado. (Vazão mássica, etc)</p>		 <p>Medidor de vazão tipo "bocal".</p>

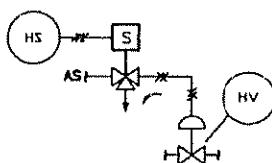
ANEXO 1.2 Símbolos de elementos primários de vazão.



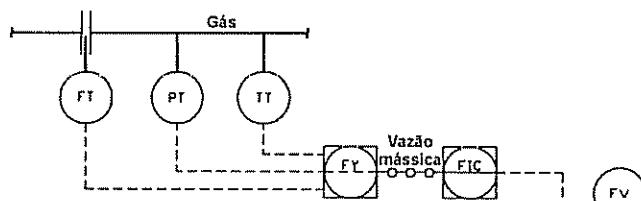
Controlador de razão de vazões com registrador de duas penas integrado.



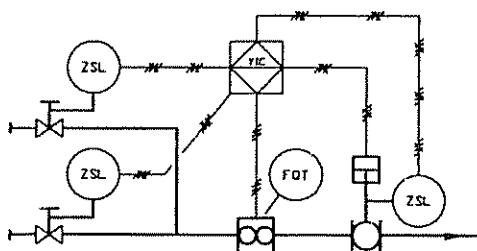
Válvula de saída de tanque para abrir conforme requerido pelo maior dos sinais dos controladores de nível.



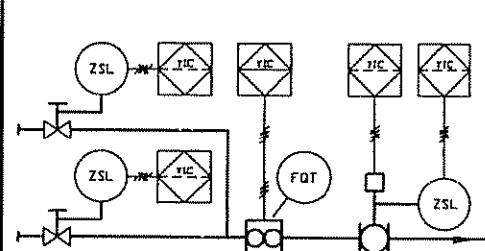
Válvula solenóide atuada por chave manual, pilotando válvula de controle.



Cálculo de vazão mássica executada por um relé computador de vazão FY-4111, com entradas lineares para pressão e temperatura e uma entrada não linear para vazão.



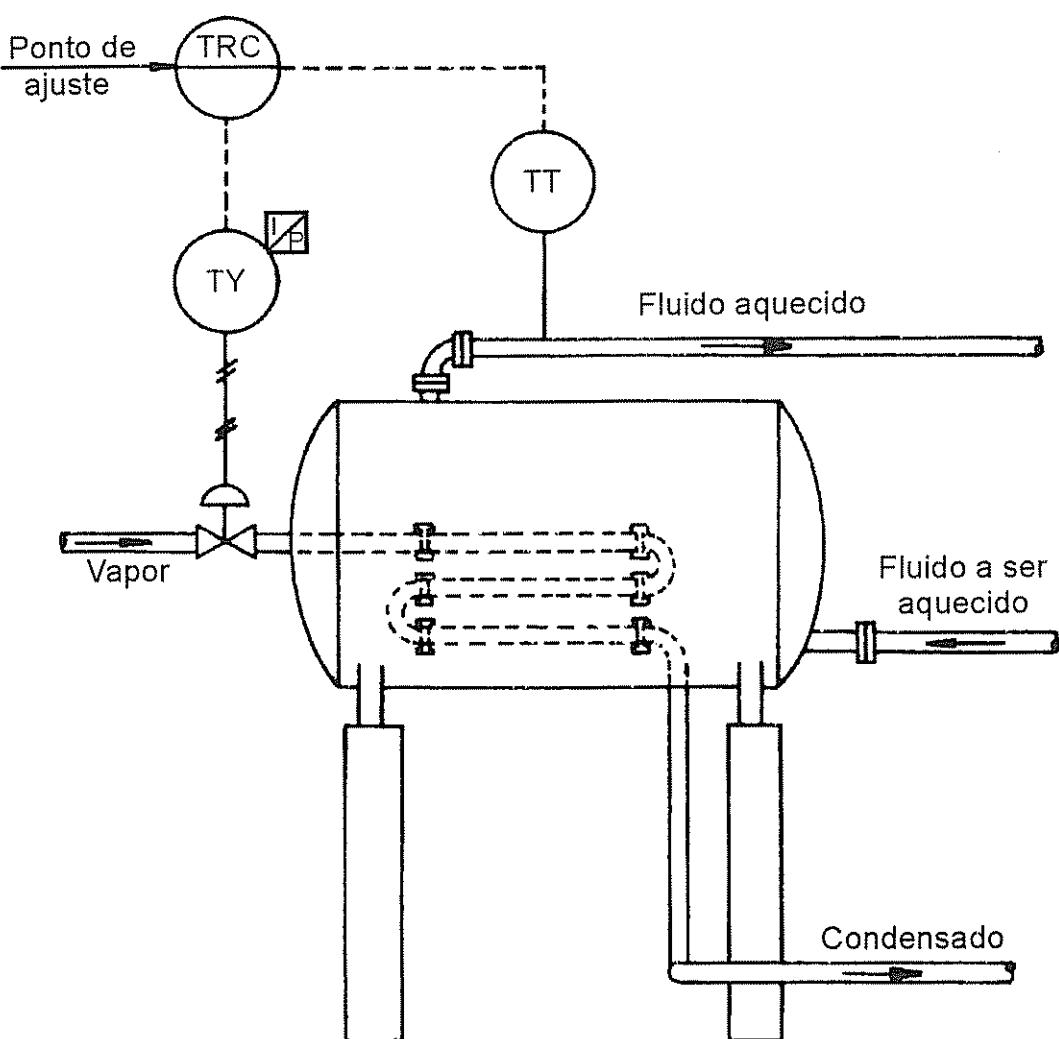
ALTERNATIVA 1
Esquema com controlador programável.



ALTERNATIVA 2
Esquema com controlador programável.
Permite a definição de quais sinais são acessíveis ao operador.

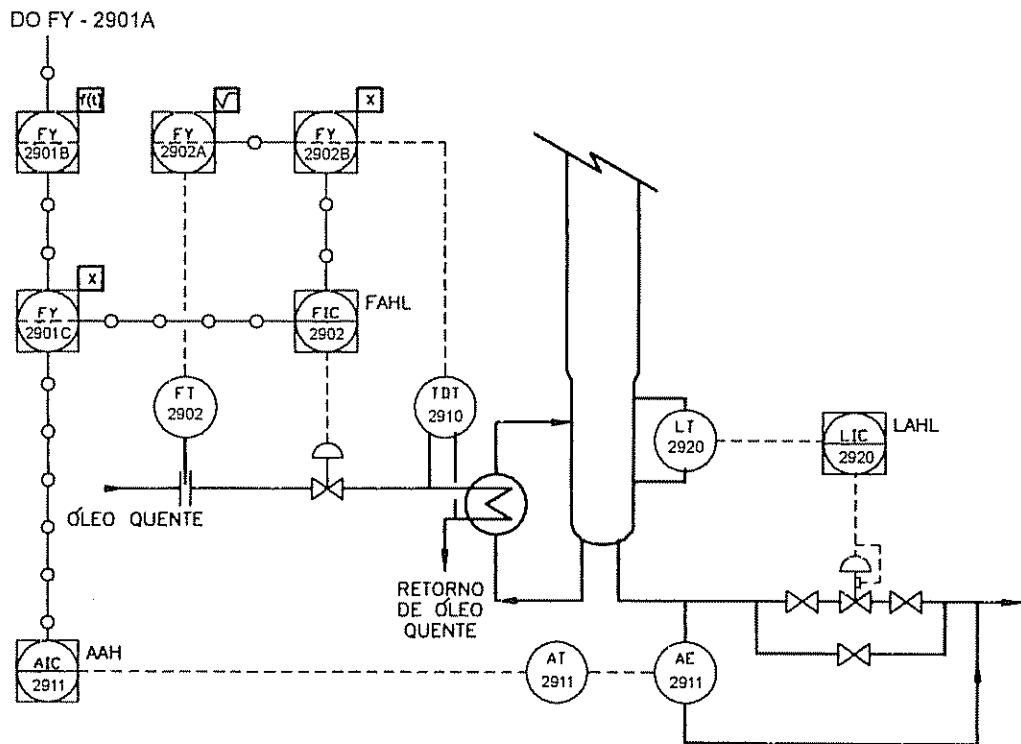
Sistema de medição de vazão tipo batelada, utilizando Controlador Lógico Programável - CLP.

ANEXO 1.3 Funções.



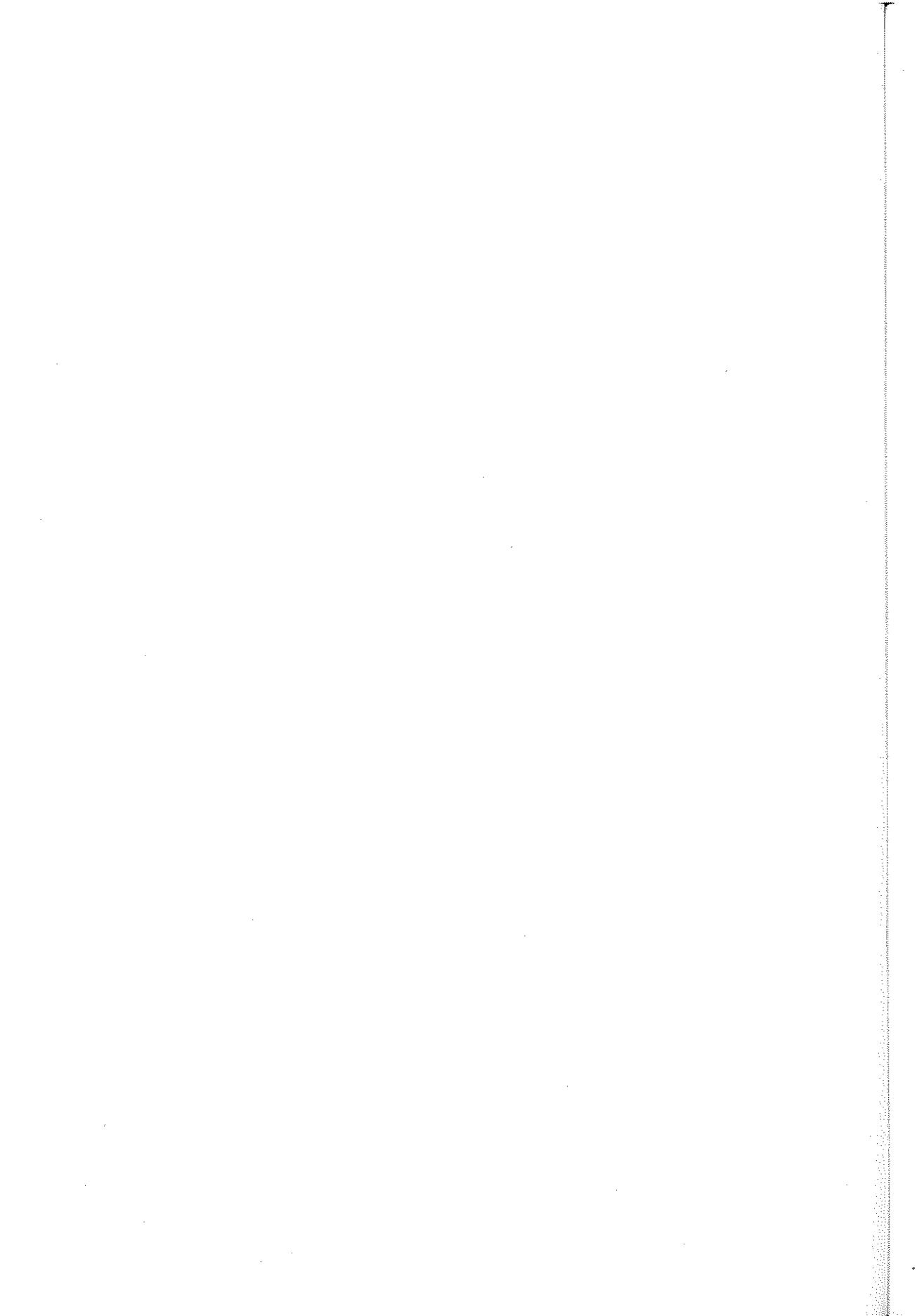
ANEXO 1.4 Simbologia típica para diagramas conceituais.

(Nota: Simbologia orientada para mostrar o funcionamento e a identificação abreviada, utilizada para desenvolver estratégias de controle sem vínculo com o tipo de *hardware*.)



ANEXO 1.5 Símbologia típica para diagrama detalhado.

(Nota: Símbologia detalhada e identificação completa, utilizada para descrever o sistema de controle quanto a tipos de sinal e hardware.)



2

PRESSÃO

ENGº Egídio ALBERTO BEGA

2.1 INTRODUÇÃO

Pressão pode ser definida como a ação de uma força contra uma força contrária. Ela tem a natureza de um empuxo distribuído uniformemente sobre uma superfície plana no interior de um recipiente fechado.

Pressão é definida como força por unidade de área:

$$\text{Pressão} (P) = \frac{\text{Força} (F)}{\text{Área} (A)}$$

Usualmente, exprime-se pressão em termos das unidades de força e área, ou mediante a altura de uma coluna de líquido em cuja base esteja sendo aplicada a mesma pressão.

2.2 GENERALIDADES

2.2.1 Unidades de Pressão

Desde 03 de maio de 1978, pelo decreto nº 81621, o sistema de unidades oficialmente adotado no Brasil é o Sistema Internacional de Unidades (SI).

As sete unidades de base deste sistema são:

Grandeza	Unidade	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Corrente elétrica	ampére	A
Temperatura termodinâmica	Kelvin	K
Quantidade de matéria	mol	mol
Intensidade luminosa	candela	cd

As duas unidades suplementares são:

Ângulo plano	radiano	Rad
Ângulo sólido	esterradiano	Sr

Todas as unidades deste sistema são deduzidas, direta ou indiretamente, a partir das unidades de base e suplementares. Assim, no Sistema Internacional de Unidades (SI) temos:

- **força** – expressa em Newton (símbolo N) e é definida como a força que comunica à massa de um quilograma a aceleração de um metro por segundo ($N = kg \cdot m/s^2$) na direção da força;
- **área** – expressa em metro quadrado (símbolo m^2) e é definida como a área de um quadrado cujo lado tem um metro de comprimento;
- **pressão** – expressa em Pascal (símbolo Pa) e é definida como a pressão exercida por uma força de um Newton, uniformemente distribuída sobre uma superfície plana de um metro quadrado de área, perpendicular à direção da força ($Pa = N/m^2$).

Os sistemas de unidades podem ser classificados em dois tipos:

1. Absolutos

Utilizam unidades de massa (M), comprimento (L) e tempo (T), ou seja, sistema MLT.

Nesse caso se enquadram o Sistema Internacional de Unidades (SI), o Sistema Métrico (MKS) e o Sistema Inglês (FPS).

2. Gravacionais ou Técnicos

Utilizam unidades de força (F), comprimento (L) e tempo (T), ou seja, sistema FLT.

Nesse caso se enquadram o sistema métrico industrial (MK*S) e o sistema inglês industrial (FP*S).

3. Sistemas Mistos (MFLT)

Utilizam unidades de massa (M), força (F), comprimento (L) e tempo (T).

A unidade de pressão usualmente utilizada no sistema métrico industrial é o kgf/cm^2 , enquanto no sistema inglês industrial se utiliza o psig (lbf/in^2).

São utilizadas diversas outras unidades para expressar medidas de pressão. As mais usuais são:

cm H ₂ O	centímetro de coluna de água a 4 °C;
mmHg ou Torr	milímetro de coluna de mercúrio a 0 °C;
pol. H ₂ O	polegada de coluna de água a 4 °C;
pol. Hg	polegada de coluna de mercúrio a 0 °C;
bar	corresponde aproximadamente à pressão da água do mar a 10 metros de profundidade;
atm	atmosfera normal, equivale à pressão exercida por uma coluna de 760 mmHg, com massa volumétrica de 13,5951 g/cm ³ .

TABELA 2.1
Fatores de Conversão de Unidades de Pressão

Unidades de pressão	Pa (N/m ²)	kgf/cm ²	psi	pol. H ₂ O	cm H ₂ O	pol. Hg	mm Hg (Torr)	atm	bar
Pa (N/m ²)	1	1,0197 x 10 ⁻⁵	1,45 x 10 ⁻⁴	4,0147 x 10 ⁻³	0,010197	2,953 x 10 ⁻⁴	7,501 x 10 ⁻³	9,8692 x 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁵
kgf/cm ²	9,8069 x 10 ³	1	14,22	393,7	1000	28,96	735,6	0,9678	0,98069
psi	6,8948 x 10 ³	0,07031	1	27,68	70,31	2,036	51,71	0,06805	0,06895
pol. H ₂ O	249,08	0,00254	0,03613	1	2,540	0,07355	1,868	0,00246	0,00249
cm H ₂ O	98,064	0,0010	0,01422	0,3937	1	0,02896	0,7356	9,678 x 10 ⁻⁴	9,8064 x 10 ⁻⁴
pol. Hg	3,3864 x 10 ³	0,03453	0,4912	13,5951	34,53	1	25,40	0,03342	0,03386
mm Hg (Torr)	133,32	0,00136	0,01934	0,5352	0,001359	0,03937	1	0,00132	1,3332 x 10 ⁻³
atm	1,0133 x 10 ⁵	1,033	14,69	406,79	1033	29,92	760,0	1	1,0133
bar	1 x 10 ⁵	1,0197	14,504	401,47	1019,7	29,53	750,06	0,98692	1

Na tabela 2.1 constam os fatores de conversão de unidades de pressão usualmente utilizados na indústria.

2.2.2 Definições de Pressão

Existem duas referências para a medição de pressão:

- **pressão absoluta** – embora o zero absoluto só exista em um vácuo perfeito, esta condição é bastante lógica e, por isso, é utilizada como referência para medição da chamada pressão absoluta;
- **pressão atmosférica** – a palavra atmosfera designa a camada gasosa que envolve o globo terrestre. Como esta camada tem a espessura de cerca de 50 km, a parte inferior da camada gasosa, que se encontra na superfície da Terra, suporta todas as camadas superiores e exerce, ao nível do solo, uma pressão correspondente ao peso total desta coluna gasosa. Ao nível do mar, em condições de intensidade normal de gravidade (aceleração de 9,80665 m/s²) e a 0 °C de temperatura, esta pressão equivale a 1 atm, ou 14,69 psia, ou 1,033 kgf/cm² abs., ou 760 mm de coluna de Hg abs., ou 29,92 pol de Hg abs. A dificuldade desta referência decorre do fato de que ela varia com a altitude e com as condições ambientais do local.

Quando se utiliza a pressão atmosférica como referência, as pressões medidas a partir dessa referência (acima desta referência) são chamadas pressões relativas, pressões manométricas (*gauge pressures*), pressões efetivas ou pressões positivas. As pressões abaixo dessa referência são chamadas vácuo ou pressões negativas. O vácuo é simplesmente uma redução da pressão atmosférica.

Das definições anteriores, conclui-se que:

$$\text{Pressão absoluta} = \text{Pressão relativa} + \text{Pressão atmosférica}.$$

Ao se escrever um valor de pressão, é importante se definir se a pressão é absoluta ou atmosférica (relativa ou manométrica).

Exemplos:

6 kgf/cm² abs.

4 psia

8 psig

9 psi

12 kgf/cm²

Nota: Na indústria, quando se omite a referência, fica implícito que a pressão é atmosférica (relativa ou manométrica).

2.2.3 Pressões Estática, Dinâmica, Total e Diferencial

Sempre que um fluido estiver circulando em um duto, devido a ação de um ventilador, exaustor, compressor, bomba etc., existirá pressão estática, pressão dinâmica ou cinética, pressão total e pressão diferencial.

2.2.3a Pressão Estática

É a sobrepressão ou depressão relativa criada pela atuação de um equipamento (ventilador, compressor, bomba ou exaustor) ou pela altura da coluna de um líquido.

Caso não haja circulação do fluido, a pressão será a mesma em todos os pontos do duto. Caso haja circulação, a pressão estática deverá ser medida, através de um orifício de pressão, com eixo perpendicular à corrente do fluido, de forma que a medição não seja influenciada pela componente dinâmica da circulação.

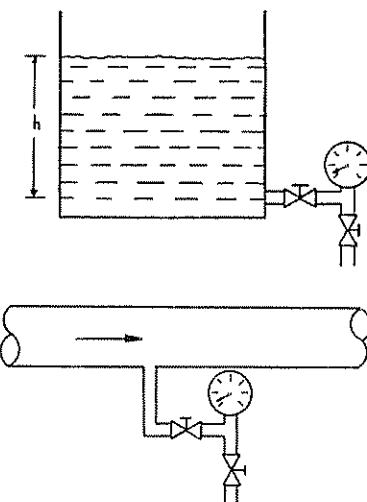


FIGURA 2.1 Pressão estática.

2.2.3b Pressão Dinâmica ou Cinética

É a pressão devida à velocidade de um fluido em movimento em um duto. Ela atua sobre a superfície de um orifício de pressão, colocado no sentido da corrente do fluido, aumentando a pressão estática de um valor proporcional ao quadrado da velocidade do fluido.

A resultante pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$P_d = \rho \cdot V^2 / 2 \quad (\text{N/m}^2)$$

ou

$$P_d = \gamma \cdot V^2 / 2 g \quad (\text{kgf/m}^2)$$

onde:

- Pd = pressão dinâmica;
- ρ = massa específica do fluido (kg/m^3);
- V = velocidade do fluido (m/s);
- γ = peso específico do fluido (kgf/m^3);
- g = aceleração da gravidade ($9,8\text{m/s}^2$).

2.2.3c Pressão Total

É a soma das pressões estática e dinâmica.

Conforme mostrado na figura 2.2, o tubo Pitot é um dos instrumentos que consegue medir as pressões estática, dinâmica e total.

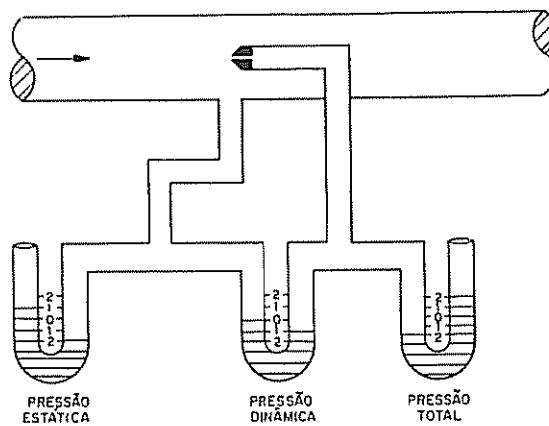


FIGURA 2.2 Pressões estática, dinâmica e total.

2.2.3d Pressão Diferencial

É a diferença de pressão medida em dois pontos de um duto ou equipamento, também chamado de ΔP (delta P).

A existência de um obstáculo à passagem do fluido (placa de orifício, filtro, válvula etc.), instalado em um duto, gera uma perda de carga. Esta perda de carga pode ser medida conectando-se um lado de um manômetro de tubo em "U" à montante e o outro lado à jusante do obstáculo, o valor indicado será uma medida da pressão diferencial.

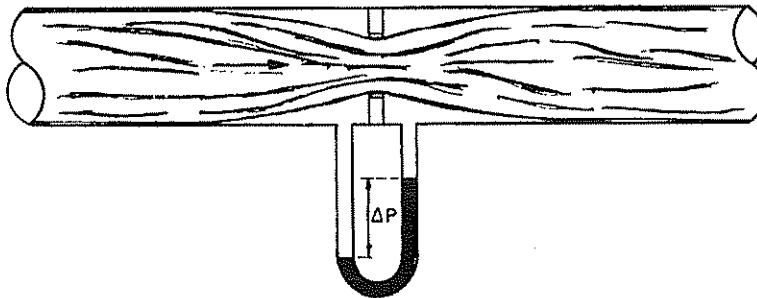


FIGURA 2.3 Pressão diferencial.

2.2.4 Teorema de Stevin

Teorema de Stevin: "A diferença de pressão entre dois pontos de um fluido em repouso é igual ao produto do peso específico do fluido (γ) pela diferença de altura entre dois pontos (h)", ou seja :

$$P = \gamma \cdot h$$

Assim, todos os pontos situados na posição h_1 , em um recipiente, estão submetidos a uma pressão igual; pontos situados na posição h_2 do mesmo recipiente estarão submetidos à pressão diferente daquela a que estão submetidos os pontos situados na posição h_1 . Têm-se, então, planos paralelos na superfície livre do líquido, onde todos os pontos situados no mesmo plano estão submetidos a uma mesma pressão.

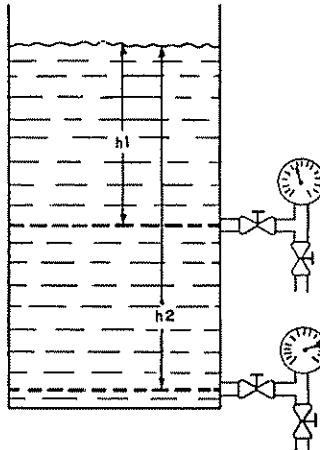


FIGURA 2.4 Aplicação do Teorema de Stevin.

2.2.5 Princípio de Pascal

Princípio de Pascal: "A pressão exercida em qualquer ponto por um líquido em forma estática, confinado, transmite-se integralmente em todas as direções e produz a mesma força em áreas iguais".

Esse princípio é a base da hidráulica. Na hidráulica utilizam-se fluidos incompressíveis; assim, a força mecânica desenvolvida em um fluido pode ser transmitida, multiplicada ou controlada.

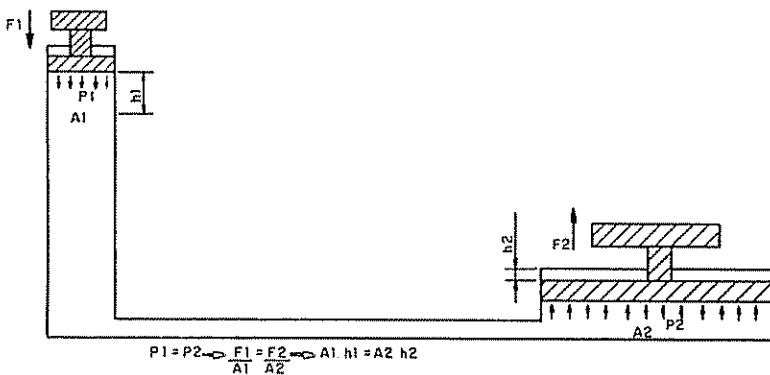


FIGURA 2.5 Aplicação do Princípio de Pascal.

As máquinas hidráulicas utilizadas para calibração de instrumentos, os servomecanismos, os controlos hidráulicos, as prensas hidráulicas etc., foram desenvolvidas utilizando o Princípio de Pascal.

2.3 ELEMENTOS MECÂNICOS PARA MEDAÇÃO DE PRESSÃO

Os elementos ou dispositivos mecânicos para medição de pressão se dividem em dois grupos básicos:

- Elementos Mecânicos de Medição Direta de Pressão.
- Elementos Mecânicos Elásticos de Medição de Pressão (deformação de sólidos)

2.3.1 Elementos Mecânicos de Medição Direta de Pressão

São dispositivos nos quais a pressão é medida, comparando-a com a pressão exercida por uma coluna de líquido com densidade e altura conhecidas (manômetro de tubo em "U", manômetro de tubo inclinado etc.).

Neste tipo de instrumento, o líquido a ser utilizado é escolhido considerando-se o seu peso específico (γ) e o valor da pressão a ser medida.

Normalmente, utilizam-se os seguintes líquidos nestes instrumentos:

água ($\gamma = 1 \text{ gf/cm}^3$);
 álcool ($\gamma = 0,8 \text{ gf/cm}^3$);
 mercúrio ($\gamma = 13,6 \text{ gf/cm}^3$).

2.3.1a Manômetro de Tubo em "U"

O manômetro de tubo em "U" é o mais simples e mais barato dos instrumentos de medição direta de baixas pressões. Como seu nome indica, ele é formado por um tubo de material transparente, dobrado em forma de "U", fixado sobre uma placa graduada a partir do seu ponto médio. O tubo é cheio, até seu ponto médio, com um líquido com peso específico conhecido (água, álcool, mercúrio etc.).

As leituras são feitas medindo-se a diferença de nível do líquido, nos dois braços do manômetro. Esta medição pode ser feita em mm de coluna d'água, mm de coluna de mercúrio, psi etc.

Para uma mesma pressão, a diferença de nível estabelecida entre os dois braços do manômetro de tubo em "U" será tanto maior quanto menor for o peso específico do líquido utilizado no manômetro.

No caso da figura 2.6, tem-se que :

$$P = h \cdot \gamma$$

onde:

h = diferença de nível entre os dois braços do tubo em U;

γ = peso específico do líquido utilizado;

P = pressão medida.

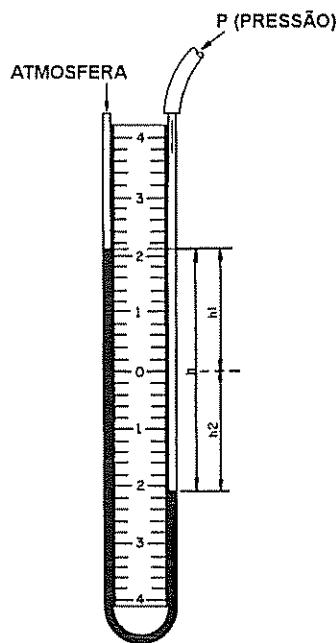


FIGURA 2.6 Manômetro de tubo em "U".

2.3.1b Manômetro de Tubo em "U" com Diâmetros Diferentes

O emprego de manômetros de tubo em "U" com diâmetros idênticos é muito simples, o problema é necessitar-se fazer a leitura da diferença entre os níveis para se obter o valor da pressão. No modelo apresentado neste item, para se obter o valor da pressão necessita-se somente de uma leitura.

Se utilizar-se dois tubos com diâmetros diferentes, para uma mesma pressão, a variação de nível do tubo que está em contato com o fluido diminui à medida que seu diâmetro aumenta.

Suponhamos, como exemplo, um tubo em "U", cujos diâmetros dos tubos sejam, respectivamente, D e d . Nesse caso, a equação de equilíbrio é dada pela seguinte fórmula:

$$P = h \cdot \gamma \cdot (1 + d^2/D^2)$$

Os instrumentos desse tipo, geralmente, possuem uma escala de leitura que leva em consideração o deslocamento do zero, ou seja, a escala já considera/corre o fator $(1 + d^2/D^2)$, possibilitando, assim, a leitura direta e precisa da pressão na escala existente no tubo de menor diâmetro (d). Estes instrumentos exigem a utilização de tubos rigorosamente calibrados.

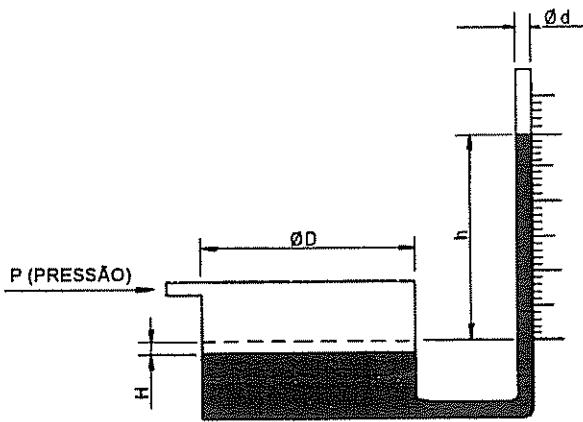


FIGURA 2.7 Manômetro de tubo em "U" com diâmetros diferentes (d e D).

2.3.1c Manômetro de Tubo Inclinado

O princípio de funcionamento deste tipo de manômetro é o mesmo que aquele de tubo em "U" com diâmetros diferentes (item 2.3.1b).

Nesse caso, o tubo de pequeno diâmetro (d) é inclinado com um certo ângulo α (figura 2.8), de maneira a obter-se um grande deslocamento do líquido no tubo inclinado, mesmo no caso de medição de pressões muito pequenas. Este instrumento permite medir pressões da ordem de 0,02 mm de coluna de H_2O . Nesse tipo de manômetro, é necessário se trabalhar com o instrumento perfeitamente nivelado e deve-se evitar que ele seja submetido a vibrações.

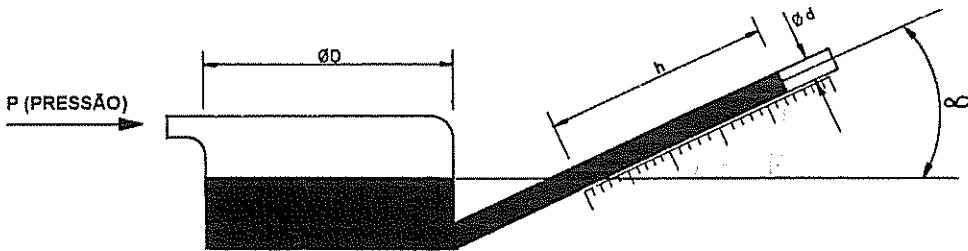


FIGURA 2.8 Manômetro de tubo inclinado.

A equação de equilíbrio do manômetro de tubo inclinado é dada pela fórmula:

$$P = h \cdot \gamma \cdot (1 + d^2/D^2) \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

Esta equação demonstra que, para uma pressão determinada, quanto menor for o ângulo α maior será o deslocamento do líquido no tubo inclinado, pois o valor de $\operatorname{sen} \alpha$ será tanto menor quanto menor for o ângulo α .

2.3.2 Elementos Mecânicos Elásticos de Medição de Pressão

São dispositivos (diafragma, fole, tubo bourdon, elemento espiral, elemento helicoidal etc.) que se deformam em função da pressão exercida sobre eles pelo fluido medido.

Estes dispositivos baseiam seu funcionamento na **Lei de Hooke**, cujo enunciado é o seguinte: "Dentro de um limite definido de elasticidade, a deformação provocada em um corpo sólido é proporcional ao esforço aplicado sobre ele".

Os três tipos básicos de elementos elásticos, utilizados como sensores em instrumentos medidores de pressão e que têm seu princípio de funcionamento baseado na Lei de Hooke, são: **diafragmas, foles, tubos Bourdon**.

A tabela 2.2 mostra as faixas de trabalho onde estes sensores são usualmente aplicados.

TABELA 2.2
Elementos Primários Elásticos e Faixas de Aplicação

Elemento	Aplicação	Atuação mínima	Atuação máxima
Diafragma	Pressão	0 a 5 mm H ₂ O	0 a 400 psi
	Vácuo Abrangendo faixa de vácuo e pressão	-5 a 0 mm H ₂ O 5 mm H ₂ O	-76 a 0 cm Hg
Fole	Pressão	0 a 130 mm H ₂ O	0 a 800 psi
	Vácuo Abrangendo faixa de vácuo e pressão	-130 a 0 mm H ₂ O 130 mm H ₂ O	-76 a 0 cm Hg
Bourdon	Pressão	0 a 12 psi	0 a 100.000 psi
	Vácuo Abrangendo faixa de vácuo e pressão	-76 a 0 cm Hg 12 psi	

2.3.2a Diafragmas

Nos medidores de pressão industriais utilizando elementos primários elásticos, são utilizados dois tipos básicos de diafragmas, **metálicos e não metálicos**.

Nos diafragmas metálicos, a pressão é medida com base na deflexão do próprio diafragma. No caso dos diafragmas não metálicos, eles geralmente são instalados em oposição a uma mola calibrada ou outro elemento elástico. Este tipo de diafragma é utilizado apenas com a função de conter a pressão/fluido do processo e transmitir a força resultante ao elemento primário elástico ou mola.

2.3.2.a1 Diafragmas Metálicos

O diafragma metálico é um dispositivo primário elástico, geralmente utilizado para medir pressões relativamente baixas. Este dispositivo geralmente consiste de um diafragma simples de lâmina de metal corrugado (figura 2.9) ou de uma ou mais cápsulas soldadas entre si, de forma que cada uma das cápsulas deflexione à medida que a pressão é aplicada (figura 2.10). A deflexão total será a soma da deflexão de todas as cápsulas. As cápsulas são compostas de duas lâminas em forma de concha, soldadas entre si.

A figura 2.9 mostra um medidor de pressão utilizando diafragma metálico simples.

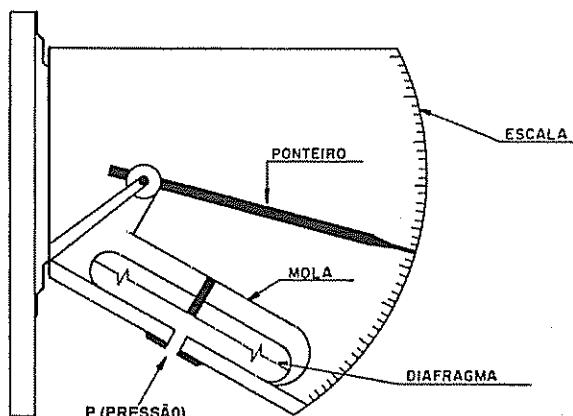


FIGURA 2.9 Medidor de pressão utilizando diafragma metálico simples.

A figura 2.10 mostra um medidor de pressão utilizando elemento de diafragma metálico composto de três cápsulas.

Existem diversos tipos de materiais que podem ser utilizados na confecção de diafragmas metálicos e os mais utilizados são latão, bronze-fosforoso, cobre-berílio, aço inoxidável, monel, hastelloy etc.

A deflexão de uma concha de diafragma metálico depende dos seguintes fatores:

- diâmetro da concha;
- espessura do metal utilizado;
- tipo de corrugações;
- número de corrugações;
- módulo de elasticidade do material utilizado;
- pressão aplicada.

Na confecção de um elemento de diafragma, os elementos acima são levados em conta, no sentido de se obter uma deflexão que tenha a relação mais linear possível com a pressão aplicada.

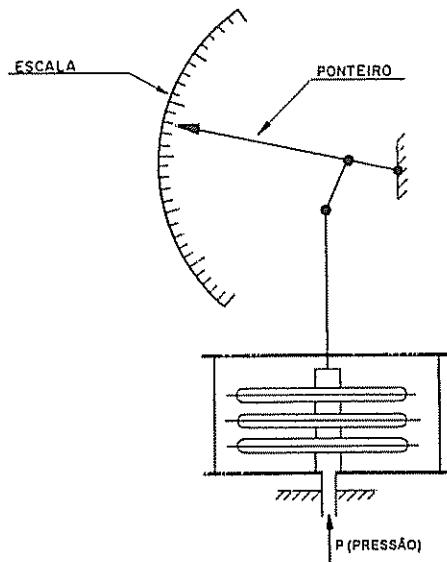


FIGURA 2.10 Medidor de pressão utilizando diafragma metálico (cápsulas).

A sensibilidade de um elemento de diafragma pode ser melhorada, aumentando-se o número de corrugações e diminuindo-se a sua altura, havendo, entretanto, um sacrifício da linearidade. A máxima sensibilidade para pequena deflexão é obtida utilizando-se um diafragma liso, sem corrugações.

2.3.2a2 Diafragmas não Metálicos

Os diafragmas não metálicos são conectados ao processo em que se quer medir/controlar a pressão e se movem atuando em oposição a uma mola calibrada ou algum outro elemento elástico.

A figura 2.11 mostra um medidor de pressão utilizando diafragma não metálico, que pode ser utilizado para medir pressão ou vácuo.

Os materiais não metálicos usualmente utilizados na confecção de diafragmas são teflon, neoprene, polietileno etc.

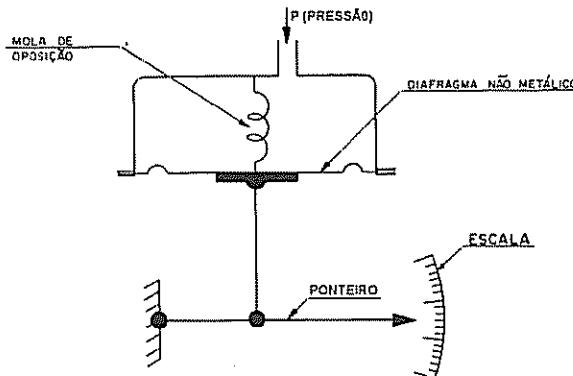


FIGURA 2.11 Medidor de pressão utilizando diafragma não metálico.

2.3.2b Foles

Os foles são elementos elásticos que sofrem expansão e retração quando submetidos a pressões, sendo o movimento resultante utilizado para indicar/medir/controlar pressão. Os foles, geralmente, são confeccionados através de estrangulamentos axiais sucessivos, aplicados a um tubo metálico de parede fina e sem costura (figura 2.12). Os materiais mais utilizados na confecção de foles são latão, bronze-fosforoso, cobre-berílio, monel e aço inoxidável. A escolha do material a ser utilizado é feita considerando-se a pressão a ser medida/controlada e as condições de corrosão a que o fole estará exposto.

Visando uma maior vida útil, geralmente utiliza-se uma mola em oposição ao fole e, com isso, utiliza-se apenas uma parte do deslocamento máximo do fole e evita-se sua deformação.

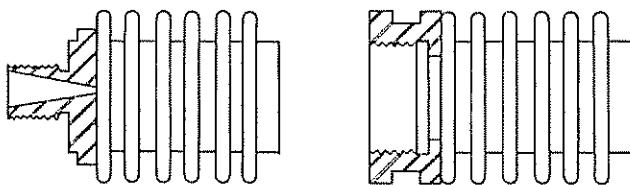


FIGURA 2.12 Tipos usuais de foles.

2.3.2c Tubos Bourdon

Os tubos Bourdon geralmente são compostos de um tubo com seção oval, disposto na forma de arco de circunferência, tendo uma de suas extremidades fechada e conectada ao dispositivo de indicação/transmissão ou controle do instrumento e a outra extremidade aberta e conectada ao processo cuja pressão será medida. Com a pressão agindo no interior do tubo Bourdon, ocorre um movimento em sua extremidade fechada; esse movimento é transmitido através de engrenagens a um ponteiro ou mecanismo que, por sua vez, irá indicar/transmitir a medida de pressão. Este dispositivo foi patenteado, em 1852, por E. Bourdon.

A figura 2.13 mostra um manômetro utilizando Bourdon tipo C.

A figura 2.14 mostra uma chave de pressão (pressostato) utilizando Bourdon tipo C.

Em função da natureza e da faixa de pressão a ser medida, o tubo Bourdon pode ser confeccionado com os materiais listados na tabela 2.3.

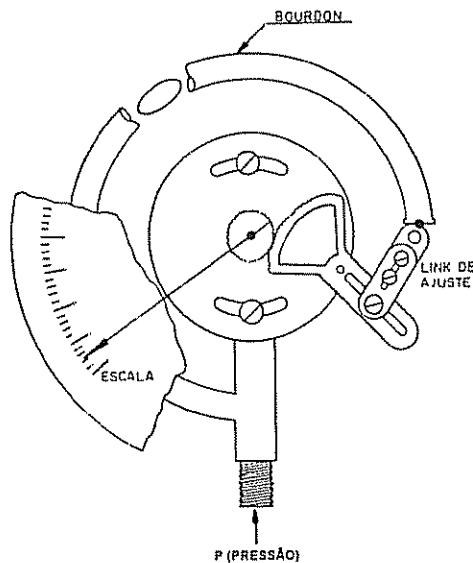


FIGURA 2.13 Manômetro utilizando Bourdon tipo C.

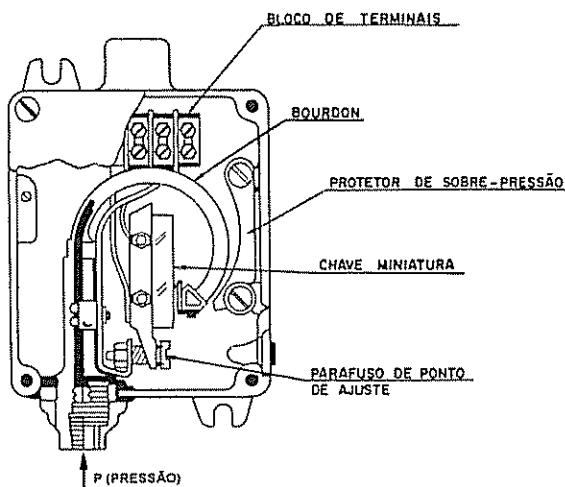


FIGURA 2.14 Chave de pressão (pressostato) utilizando Bourdon tipo C.

TABELA 2.3
Materiais e Aplicações de Tubo Bourdon

Ligas	Composição nominal	Aplicações e observações
Latão	Cu – 81% Zn – 18% Sn – 1%	Utilizado em pressões baixas (abaixo de 500 psi).
Latão "Cartridge"	Cu – 70% Zn – 30%	Utilizado em pressões baixas – tem baixa histerese.
Bronze fósforo	Cu – 95% Sn – 5% P – 0,035%	Utilizado em pressões baixas – tem boa resistência à corrosão e à fadiga
Bronze silício	Si – 1,5% Mn – 0,25% Cu – –	Utilizado em pressões baixas – apresenta dificuldades na soldagem devido à presença de óxidos na superfície.
Aço inox 304 AISI	Cr – 18% Ni – 9% C – 0,08% Fe – –	Utilizado em baixas e médias pressões – apresenta alta resistência à corrosão.
Aço inox 316 AISI	Cr – 17% Ni – 13% Mo – 3% C – 0,08% Fe – –	Utilizado em baixas e médias pressões – apresenta muito boa resistência à corrosão; indicado para aplicações em sulfatos e cloretos.
Cobre-berílio	Be – 1,8% Co – 0,25% Cr – – Ni – 0,3% Cu – –	Utilizado em pressões médias e altas, (acima de 500 psi) – apresenta baixa histerese e pouca fadiga.
Monel K	Ni – 63 a 67% Al – 2,0 a 4,0% Ti – 0,5% Cu – –	Utilizado em pressões médias e altas – apresenta alta resistência à fadiga e à corrosão.
Inconel X	Ni – 70% Cr – 15% Ti – 2,5% Al – 0,4% a 1,0%	Utilizado em pressões altas (acima de 1000 psi) – apresenta excelentes propriedades mecânicas e anti-corrosivas.
Ni-Span	Ni – 42% Cr – 5,5% Ti – 2,5% Mn – 0,4% C – 0,06% Si – 0,5% Al – 0,4%	Utilizado em pressões médias e altas – apresenta boa resistência e módulo de elasticidade constante

Conforme mostrado na figura 2.15, os tubos Bourdon podem ser fabricados nos seguintes tipos/formas: **C**, **espiral** e **helicoidal**.

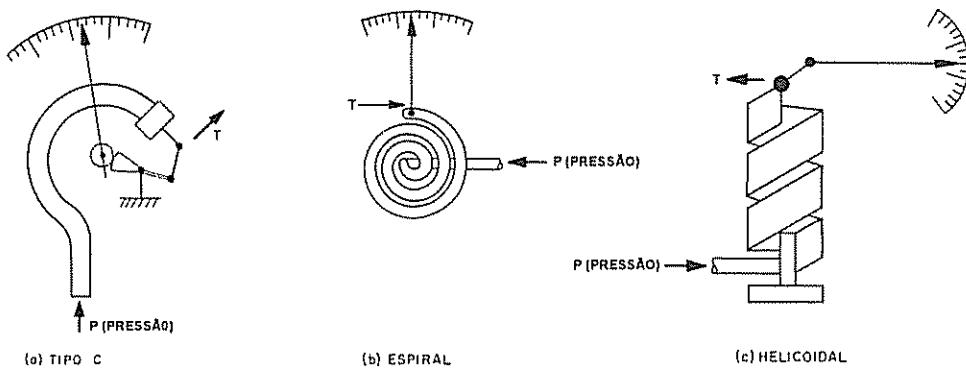


FIGURA 2.15 Tipos/formas de Bourdon.

Fatores de Erro em Medições Utilizando Tubo Bourdon

As variações na temperatura ambiente são responsáveis por alterações na deflexão do tubo Bourdon. A maioria dos materiais elásticos tem seu módulo de elasticidade diminuído com a temperatura.

O erro introduzido pela temperatura em um tubo Bourdon é dado por:

$$E = 0,02 \cdot T \cdot P/P_s$$

onde:

E = erro porcentual do Bourdon;

T = variação de temperatura sofrida pelo Bourdon;

P = pressão aplicada;

P_s = alcance de pressão do Bourdon.

Este erro pode ser compensado utilizando-se um bimetal, conforme mostrado na figura 2.16.

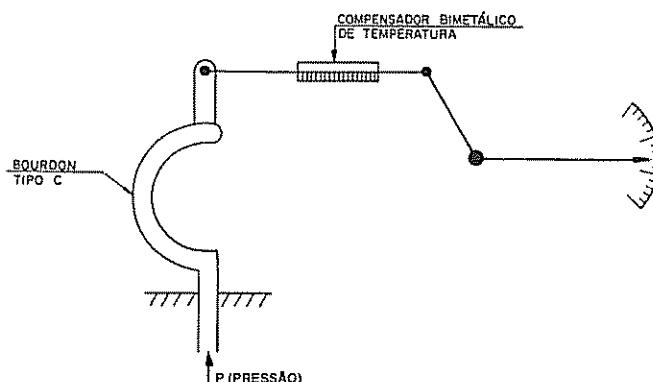


FIGURA 2.16 Compensação do erro causado por variações da temperatura ambiente em medições de pressão.

Quando utilizar-se manômetros com elemento primário elástico, visando assegurar-se uma maior vida útil ao instrumento, devem-se considerar os seguintes pontos:

- não ultrapassar 2/3 do valor máximo de medição do manômetro quando a pressão a medir for razoavelmente constante;
- não ultrapassar metade do valor máximo de medição do manômetro quando a pressão a medir for bastante variável;
- equipar o manômetro com válvula de bloqueio de três vias de boa qualidade;
- caso o manômetro seja submetido a golpes de ariete ou a variações bruscas de pressão de grande amplitude, instalar amortecedor de choques. Em alguns casos, utilizam-se manômetros com mecanismo imerso em óleo;
- não submeter o manômetro a temperatura superior àquela que permita o toque da mão sobre sua caixa. No caso de temperaturas excessivas, deve-se utilizar sifão ou serpentina de resfriamento, conforme mostrado na figura 2.17;
- proteger o manômetro contra calor radiante e gelo.

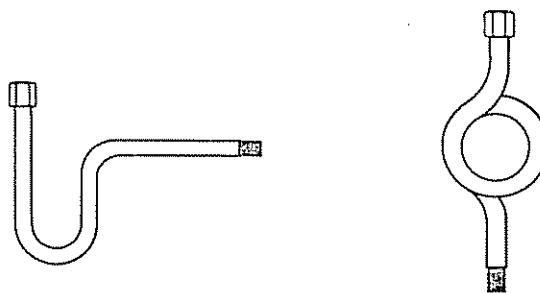


FIGURA 2.17 Acessórios para instrumentos de pressão - sifão/serpentina.

2.3.2d Utilização de Elementos Mecânicos Elásticos na Medição de Pressão de Fluidos Corrosivos e/ou Viscosos

Nos casos de medição de pressão efetuada em linhas de determinados fluidos de processo, torna-se necessário impedir o contato do fluido com o elemento de medição. Esta necessidade poderá ocorrer em virtude da natureza corrosiva do fluido, cuja corrosividade poderia afetar o elemento de medição ou, ainda, em virtude da alta viscosidade do fluido, que poderia levar ao seu endurecimento dentro do elemento de medição, falseando a medida indicada.

Para se eliminar este problema, são utilizados selos de proteção, os quais podem ser feitos com líquido de menor ou maior densidade que aquele cuja pressão se deseja medir, ou através da utilização de uma membrana/diafragma instalada entre o fluido do processo e o elemento de medição.

A figura 2.18 mostra a disposição do selo com líquido. No caso da figura 2.18a, o líquido de selagem é mais leve que o líquido do processo e, na figura 2.18b, o líquido de selagem é mais denso que o do processo.

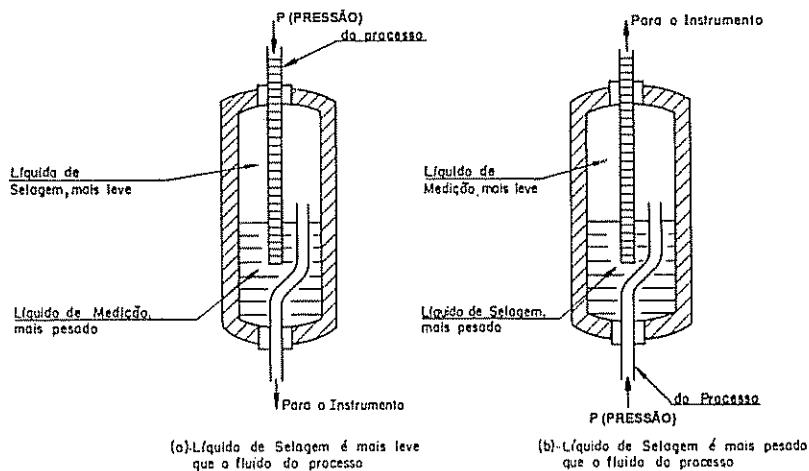


FIGURA 2.18 Acessórios para instrumentos de pressão - selos líquidos.

Os líquidos normalmente utilizados para selagem são:

- glicerina;
- mistura de glicerina e água;
- mistura de etileno-glicol e água;
- m-xileno;
- querosene.

A figura 2.19 mostra um sistema de selo do tipo diafragma flangeado.

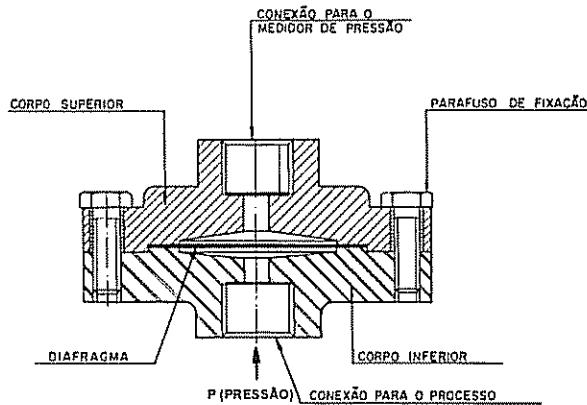


FIGURA 2.19 Acessórios para instrumentos de pressão - selo tipo diafragma flangeado.

2.4 TRANSMISSORES DE PRESSÃO

Basicamente, os instrumentos transmissores de pressão podem ser classificados em pneumáticos ou eletrônicos.

Os dois tipos de transmissores baseiam seu funcionamento no movimento/deformação que os elementos mecânicos elásticos (deformação de sólidos) sofrem quando submetidos a uma pressão/esforço. Este movimento/deformação, que é proporcional à pressão aplicada (lei de Hooke), é convertido através de um transdutor em um sinal pneumático ou eletrônico padronizado, que é enviado/transmitido para indicação e/ou controle à distância.

2.4.1 Transmissores Pneumáticos de Pressão

Os transmissores e os demais instrumentos pneumáticos utilizam como transdutores o sistema bocal-obturador ou bico-palhetas.

No caso dos transmissores pneumáticos de pressão, o sistema bocal-obturador converte o movimento/deformação do elemento mecânico elástico em um sinal pneumático.

O sistema bocal-obturador é composto de um tubo pneumático alimentado por uma pressão constante P_s , uma redução R' na entrada do suprimento de ar, uma redução R_v em forma de bocal na saída do ar e uma lâmina (obturador ou palheta) que pode obstruir o bocal ou bico e cuja posição depende da pressão exercida pelo processo sobre o elemento mecânico elástico de medição. A restrição R' tem um diâmetro aproximadamente quatro vezes menor que o da restrição R_v .

O ar de alimentação com pressão P_s padronizada em $1,4 \text{ kgf/cm}^2$, passa pela restrição R' e enche o reservatório V , escapando, a seguir, para a atmosfera através do bocal R_v . A quantidade de ar que sai pelo bocal R_v depende da posição do obturador, ou seja, depende da distância "x" existente entre o bocal e o obturador. Devido ao escape de ar, o volume V e o bocal ficam a uma pressão P_1 , intermediária entre P_s e a pressão atmosférica.

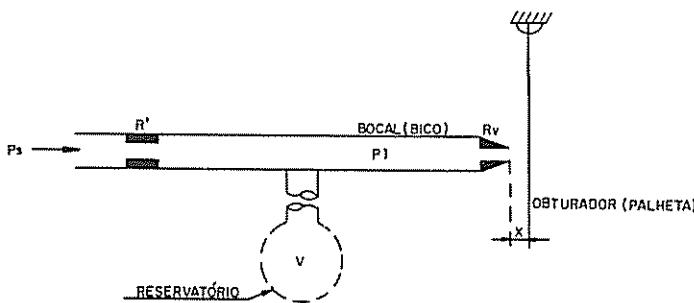


FIGURA 2.20 Transdutor tipo bocal-obturador (bico-palheta).

2.4.1a Transmissores Pneumáticos de Pressão Tipo Equilíbrio de Forças

O transmissor pneumático usualmente utilizado em aplicações industriais de medição de pressão, é o transmissor tipo equilíbrio de forças, com elemento primário mecânico elástico e transdutor tipo bocal-obturador ou bico-palheta (figura 2.21).

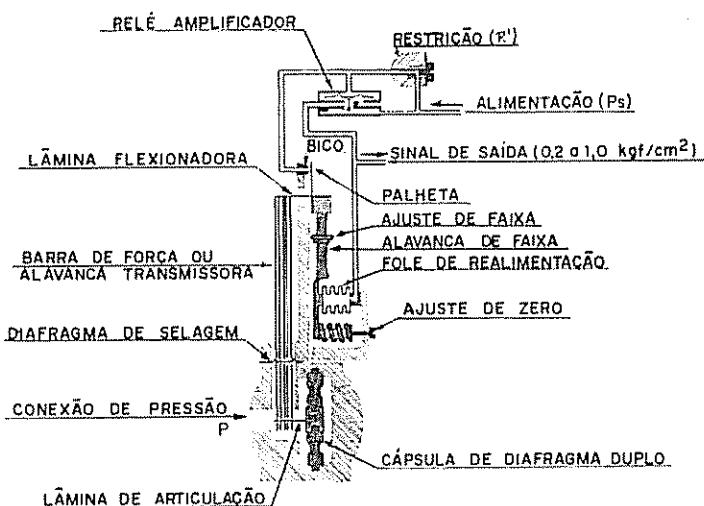


FIGURA 2.21 Transmissor pneumático de pressão tipo equilíbrio de forças.

Neste tipo de instrumento, a pressão do processo movimenta/deforma o elemento metálico elástico de medição (diafragma). Este movimento/deformação é transmitido à barra de força ou alavancas transmissoras por intermédio da lâmina de articulação. A alavancas transmissoras ou barra de força é acoplada ao diafragma de selagem que também funciona como seu ponto de apoio. Através do conjunto de lâminas flexionadoras, esta alavancas se une a uma outra alavancas denominada alavancas de faixa, cujo ponto de apoio é o ajuste de faixa. A alavancas de faixa é solidária ao obturador ou palhetas. Assim, qualquer movimento transmitido à barra de força ou alavancas transmissoras é sentido pelo instrumento através da variação do distanciamento entre bocal-obturador (bico-palheta), que, por sua vez, varia a pressão no relé amplificador pneumático, que, em consequência, varia as pressões de saída do instrumento e do seu fole de realimentação.

Qualquer variação ocorrida no sistema só cessará quando for encontrado o equilíbrio entre as resultantes das forças que atuam no fole de realimentação e na cápsula sensora de pressão (diafragma). Assim que estiver estabelecido este equilíbrio, estará determinado o valor do sinal de saída do transmissor (faixa de 0,2 a 1,0 kgf/cm²), assegurando-se, dessa forma, proporcionalidade entre o sinal de saída e a pressão do processo medida pelo transmissor naquele momento.

O sinal de saída do instrumento é transmitido para um receptor pneumático de faixa compatível, seja para fins de indicação, registro ou controle.

2.4.2 Transmissores Eletrônicos de Pressão

Os transmissores eletrônicos de pressão utilizam um elemento primário mecânico elástico, combinado com um transdutor elétrico, que gera um sinal elétrico padronizado, correspondente à pressão medida.

O elemento primário mecânico elástico que pode ser diafragma, tubo Bourdon, espiral, helicoidal, fole ou combinação destes elementos, é conectado ao processo e se movimenta/deforma/desloca em função da pressão do processo aplicada sobre ele. Este movimento é enviado ao transdutor elétrico do transmissor, através de um sistema adequado, que o converte em um sinal eletrônico padronizado de saída (4 a 20 mA).

Em função de seu princípio de funcionamento, os transmissores eletrônicos de pressão podem ser classificados nos seguintes tipos:

- equilíbrio de forças;
- resistivos;
- magnéticos;
- capacitivos;
- extensométricos;
- piezoelétricos.

Sendo mais usualmente utilizados em aplicações industriais de medição de pressão os tipos equilíbrio de forças, extensométricos e capacitivos.

2.4.2a Transmissores Eletrônicos de Pressão Tipo Equilíbrio de Forças

Este tipo de instrumento funciona de maneira análoga ao transmissor pneumático (item 2.4.1a). Neste caso, a pressão do processo, aplicada no elemento metálico elástico (fole), movimenta/deforma-o; este movimento é transmitido à barra de força ou alavanca transmissora por intermédio da lâmina de articulação. A barra de força ou alavanca transmissora é acoplada ao diafragma de selagem que também funciona como seu ponto de apoio (pivô).

Esta força é transmitida ao disco de rearme, através da alavanca de deflexão, aproximando o disco de rearme do detector. Esta aproximação gera um aumento da indutância, com um consequente aumento no consumo de corrente e um aumento no sinal de saída do detector. Paralelamente à aproximação do disco de rearme, acontece o afastamento da bobina de realimentação do imã permanente; ao mesmo tempo, o sinal de saída do detector é amplificado e retificado na unidade amplificadora, resultando no sinal de saída do transmissor (4 a 20 mA). Este sinal também é aplicado na bobina de realimentação, aumentando a força para equilíbrio do sistema.

Esta força age sobre o braço de rearme, em sentido contrário à variação do sinal anterior, afastando o disco de rearme do detector; deste modo, o sistema atinge um novo equilíbrio, com o sinal de saída do transmissor ficando proporcional ao valor da pressão medida naquele momento.

O sinal de saída do instrumento é transmitido para um receptor eletrônico de faixa compatível, seja para fins de indicação, registro ou controle.

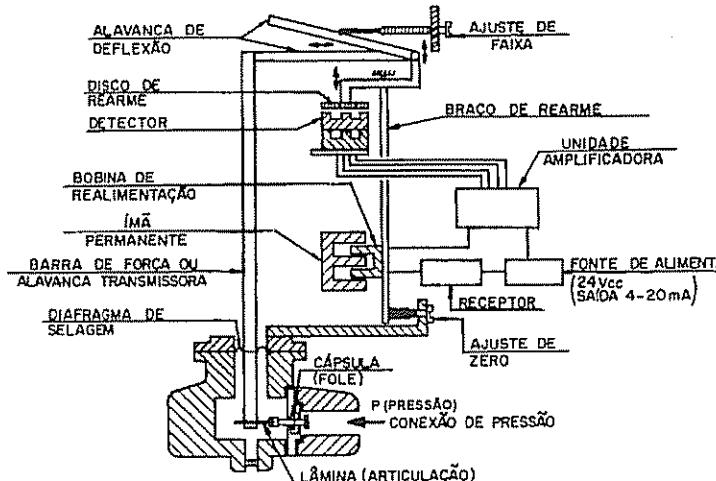


FIGURA 2.22 Transmissor eletrônico de pressão tipo equilíbrio de forças.

2.4.2b Transmissores Eletrônicos de Pressão Tipo Extensométrico (*Strain Gage*)

Este tipo de instrumento tem o funcionamento de seu transdutor baseado na variação de comprimento e diâmetro, e, portanto, na variação da resistência, que ocorre quando um fio de resistência sofre uma deformação elástica proveniente de uma tensão mecânica gerada por uma pressão.

Neste tipo de instrumento, a pressão do processo atua no elemento mecânico elástico (diafragma) que se movimenta/deforma e, em consequência, movimenta a alavanca onde estão instalados os sensores *strain gage*, esticando-os ou comprimindo-os de acordo com a pressão do processo e a disposição que o fabricante tenha adotado para sua instalação. Os sensores *strain gage* podem ser colados diretamente na superfície do elemento elástico cuja deformação deve ser medida, ou podem ser instalados entre um quadro fixo e uma armadura que se moverá em função das variações de pressão e atuará deformando os sensores. O *strain gage* colado, além de apresentar grande estabilidade, é mais preciso e tem boa repetibilidade, por isto, esta é a forma mais utilizada industrialmente.

Os *strain gage* (extensômetros) fazem parte de uma ponte de Wheatstone, na qual se aplica uma tensão, de forma que a pequena corrente que circula pelas resistências ocasiona uma queda de tensão e a ponte se equilibra para estas condições. Neste sistema, qualquer variação na pressão do processo moverá o diafragma metálico, que, por sua vez, variará a posição da alavanca e, em consequência, variará a resistência dos sensores *strain gage*, desequilibrando a ponte e fazendo variar o sinal de saída do instrumento (4 a 20 mA).

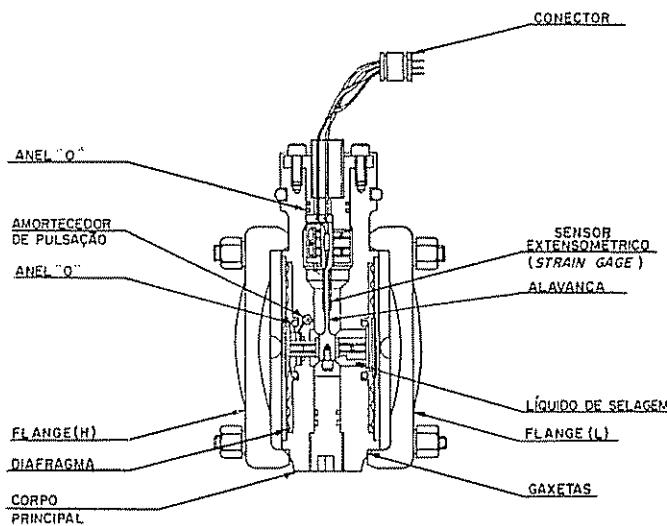


FIGURA 2.23 Transmissor eletrônico de pressão tipo extensométrico (*strain gage*).

Na ponte com dois braços ativos, o elemento sensor que funciona como medidor fica montado na parte deformada do dispositivo, enquanto o elemento utilizado para comparação fica montado na parte não deformada. Com este arranjo, obtém-se a compensação da expansão térmica dos suportes e da modificação da resistência dos elementos, em consequência da alteração de temperatura. Na ponte com quatro braços ativos, dois elementos sensores são montados de modo a serem tensionados pelo aumento de pressão e os outros dois são montados em compressão, ou sem qualquer tensão. Esta configuração aumenta a sensibilidade do transdutor e mantém a característica de compensação de temperatura.

Além do sistema baseado no sensor extensométrico do tipo fio resistivo, foi desenvolvido mais recentemente um outro sistema que utiliza semicondutores no elemento ativo do sensor extensométrico. Neste caso, a cápsula sensora é fabricada como um circuito integrado por difusão de boro num substrato de silício. Esta tecnologia permite uma mecanização na fabricação dos sensores dos transmissores de pressão do tipo extensométrico e sua produção em série, dando-lhes maior precisão e aumentando sua confiabilidade.

2.4.2c Transmissores Eletrônicos de Pressão Tipo Capacitivo

Este tipo de instrumento tem seu funcionamento baseado na variação de capacitorsia que se introduz em um capacitor quando se desloca uma de suas placas em consequência de aplicação de pressão.

Neste instrumento, a pressão de processo é transmitida através do movimento/deslocamento do elemento mecânico elástico (diafragma isolador), cujo interior é cheio de

óleo ou silicone, para o diafragma sensor localizado no centro da célula. A pressão atmosférica de referência é transmitida da mesma maneira pelo segundo diafragma isolador para o outro lado do diafragma sensor. O deslocamento do diafragma sensor (o movimento máximo é da ordem de 0,004 polegada) é proporcional ao diferencial de pressão aplicado sobre ele e que, por sua vez, variará em função da pressão aplicada nos diafragmas isoladores.

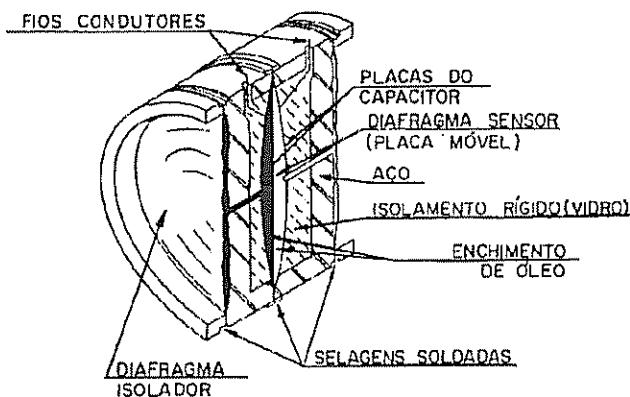


FIGURA 2 24 Transmissor eletrônico de pressão tipo capacitivo.

A posição do diafragma sensor (placa móvel) é detectada pelas placas do capacitor colocadas nos dois lados do diafragma sensor. O valor da capacitância diferencial existente entre o diafragma sensor e as placas do capacitor (aproximadamente 150 pF) é convertido eletronicamente, resultando no sinal de saída do transmissor (4 a 20 mAcc), que é transmitido para um receptor eletrônico para fins de indicação, registro e/ou controle.

2.5 CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE PRESSÃO

Os instrumentos de pressão utilizando elemento mecânico elástico de medição podem ser calibrados, fazendo-se comparação com elemento mecânico de medição direta de pressão, utilizando-se teste de peso morto ou fazendo-se comparação com manômetro padrão.

2.5.1 Comparação com Elemento Mecânico de Medição Direta de Pressão

Neste caso, o instrumento utilizando elemento mecânico elástico de pressão que se quer calibrar é conectado à tomada do elemento mecânico de medição direta de pressão (manômetro de tubo em "U" com diâmetros diferentes); a seguir, aplica-se a mesma pressão nos dois dispositivos e comparam-se as leituras obtidas em diferentes pontos das escalas

(geralmente 0, 25, 50, 75 e 100%) e fazem-se os ajustes necessários para que o instrumento utilizando elemento mecânico elástico de medição de pressão (manômetro ou transmisor), que está sendo calibrado, passe a operar corretamente.

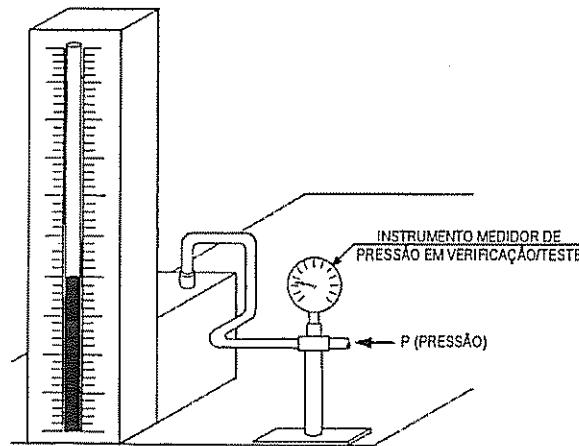


FIGURA 2.25 Calibração de instrumento medidor de pressão por comparação com elemento mecânico de medição direta de pressão.

2.5.2 Calibração Utilizando Teste de Peso Morto

O aparelho de teste de peso morto utiliza como seu princípio de funcionamento a Lei de Pascal, cujo enunciado afirma que “uma pressão exercida em qualquer ponto de um líquido confinado é transmitida, sem perda, em todas as direções”.

Como pressão é definida como força por unidade de área, no teste de peso morto se aplica uma força por meio de um peso em uma área conhecida cuja pressão resultante pode ser medida por um medidor de pressão, exatamente de acordo com a Lei de Pascal.

Um corte esquemático do teste de peso morto é mostrado na figura 2.26.

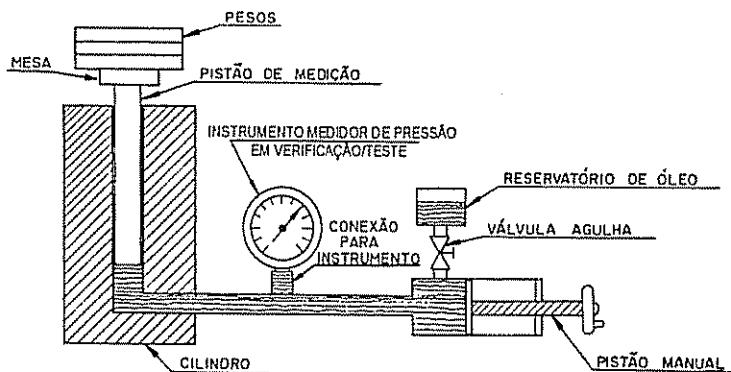


FIGURA 2.26 Calibração de instrumento medidor de pressão utilizando teste de peso morto.

O teste de peso morto tem uma válvula agulha na base do reservatório de óleo que permite que o óleo seja mantido preso dentro do aparelho. Tem, também, um sistema de conexão para o instrumento medidor de pressão a ser verificado/testado. No centro do aparelho existe um pistão de medição que é simplesmente um cilindro de metal temperado e polido. Acoplado a este pistão, existe uma mesa circular ou plataforma, onde são adicionados os pesos. Um segundo pistão, operado manualmente, completa o aparelho teste de peso morto.

O manômetro ou instrumento medidor de pressão a ser testado, é montado no teste de peso morto através de um adaptador adequado, ou seja, as luvas devem ser suficientemente fortes para suportar a máxima pressão a ser aplicada

A máquina de peso morto deverá conter óleo suficiente para encher o reservatório. O óleo é enviado do reservatório ao sistema de teste abrindo-se a válvula agulha e movendo-se o pistão manual para fora. A válvula agulha do reservatório pode, então, ser fechada, bloqueando o óleo no sistema de teste. O pistão manual é então girado, criando pressão no óleo, e esta pressão é transmitida à todas as partes do teste de peso morto. Como o óleo é praticamente incompressível, se o teste estiver cheio de óleo, bastará algumas voltas no pistão manual para se produzir grande pressão.

Quando a pressão gerada pelo pistão manual for suficiente, ocorrerá o levantamento do pistão de medição e dos pesos colocados sobre sua mesa/plataforma; neste momento, verifica-se a pressão indicada pelo instrumento medidor de pressão em calibração/teste e fazem-se os ajustes necessários para que este instrumento passe a operar corretamente.

O pistão de medição não é muito grande, mas tem um peso definido. O peso e a área efetiva do pistão de medição determinam a menor pressão que se pode medir com o teste de peso morto.

É necessário reduzir-se ao mínimo o atrito estático que ocorre no pistão de medição. Como o atrito de deslizamento é menor que o atrito estático, ao se fazer a calibração/teste deve-se estar seguro de que o pistão de medição esteja levantado de sua mesa e girando, o que diminuirá bastante o atrito estático.

Adicionando-se pesos na plataforma ou mesa do pistão de medição, pode-se produzir qualquer pressão dentro do *range* do aparelho teste de peso morto. Os pesos são cuidadosa e individualmente ajustados entre si e ao aparelho de teste no qual são utilizados.

Uma das grandes vantagens deste instrumento é a sua precisão.

2.5.3 Comparação com Manômetro Padrão

Este tipo de sistema de teste é semelhante ao anterior. A diferença é que, neste caso, se substitui o pistão de medição existente na figura 2.26 por uma conexão ao qual será conectado um manômetro padrão. A seguir, gira-se o pistão manual, criando pressão no óleo existente dentro do sistema de teste, pressurizando o instrumento medidor de pressão e o manômetro padrão, compararam-se os valores indicados pelo instrumento medidor de pressão que está

sendo calibrado/testado com os indicados no manômetro padrão (geralmente 0, 25, 50, 75 e 100%) e executam-se os ajustes necessários no instrumento medidor de pressão em calibração, de forma que ele passe a operar corretamente (figura 2.27).

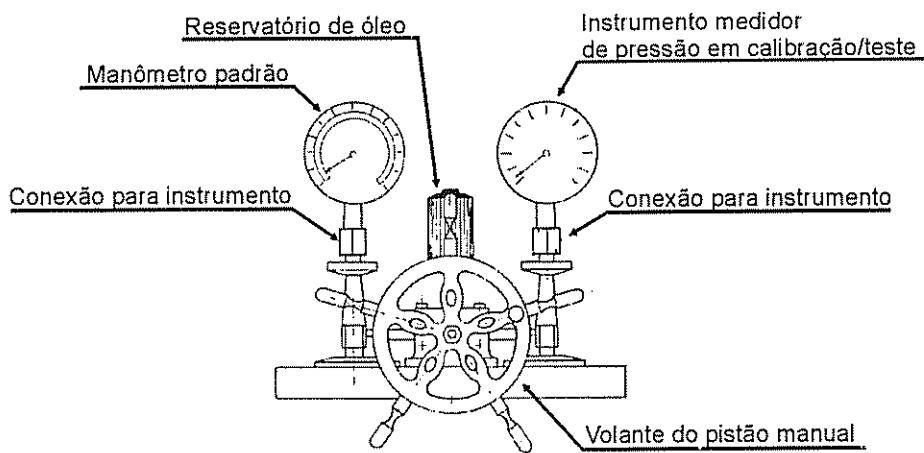


FIGURA 2.27 Calibração de instrumento medidor de pressão utilizando comparação com manômetro padrão.

2.6 REFERÊNCIAS

- 1 American Petroleum Institute (API) – RP 551 – Process measurement Instrumentation – Section 4 – Pressure.
- 2 American Petroleum Institute (API) – RP 550 – Manual on installation of refinery instruments and control systems.
- 3 ANDREW W. G. Applied instrumentation in the process industries. Gulf Publishing Company.
- 4 CONSIDINE, D. M. Process instruments and controls handbook. McGraw-Hill Book Company.
- 5 GILLUM, D. R. Industrial pressure, level and density measurement – ISA (The Instrumentation, Systems and Automation Society).
- 6 LIPTÁK, B. G. Instrument engineers's handbook – Chilton.
- 7 PERRY, R. J ; CHILTON, C. H. Chemical engineer's handbook –McGraw-Hill Book Company.

3

VAZÃO

ENGº GERARD DELMÉE

3.1 INTRODUÇÃO

Entre as variáveis mais freqüentemente medidas, a vazão é a que requer os recursos tecnológicos mais diversos para a realização de medidores e transmissores. A medição de vazão encontra importantes aplicações no transporte de fluidos (oleodutos, gasodutos), nos serviços públicos (abastecimento, saneamento) e na indústria em geral, para controle de relação, bateladas, balanços de massas, contribuindo para a qualidade e a otimização de controles de processos. Em outra faixa de aplicações, os medidores domésticos (hidrômetro, medidor de gás) e os medidores de combustíveis (bombas de gasolina) fazem parte do cotidiano do consumidor.

A vazão é definida como a quantidade de fluido que passa pela seção reta de um duto, por unidade de tempo. O fluido pode ser líquido, gás ou vapor. A maioria dos instrumentos de vazão é prevista para a medição de fluidos homogêneos, numa única fase, porém existem instrumentos para medir vazão de fluidos em fases múltiplas, sob forma de suspensões coloidais, de pastas ou de geléias. Geralmente, a medição é feita aproveitando o efeito de uma interação entre o fluido e o medidor. Assim, as propriedades dos fluidos precisam ser conhecidas em detalhes; uma parte do capítulo sobre vazão será dedicada a este assunto.

A quantidade do fluido pode ser medida em volume (vazão volêmica) ou em massa (vazão mássica). Quando se trata de vazão volêmica, especialmente nos casos de fluidos compressíveis, ainda é necessário especificar se o volume é referido às condições de temperatura e pressão de operação, ou se é convertido às condições de referência. Procura-se utilizar unidades que esclareçam os atributos da vazão.

- A **vazão mássica** é medida em kg/h, ou outra unidade que seja massa dividida por tempo.
- A **vazão volêmica** é medida em m³/h, ou outra unidade que seja volume dividido por tempo:

- se for às **condições de operação**, geralmente não se usa atributo na unidade. Na literatura americana, usa-se o prefixo "a" (ex.: $acuft/min$) para abreviar *actual*, que significa real;
- se for às **condições de referência** pode ser usado o prefixo N (ex.: Nm^3/h), e deve ser entendido o N como "normal". É recomendável especificar as condições de referência, como, por exemplo, Nm^3/min a $0\text{ }^\circ\text{C}$ e 760 mmHg . As condições de referência, também chamadas condições de base ou de contrato, geralmente utilizadas para vazões de gases, são as seguintes:

Tb em $^\circ\text{C}$	Tb em $^\circ\text{F}$
$0\text{ }^\circ\text{C}$ e 760 mmHg (o clássico CNTP)	$60\text{ }^\circ\text{F}$ e $30\text{ }^\circ\text{Hg}$ = $15,55\text{ }^\circ\text{C}$ e 762 mmHg
$15\text{ }^\circ\text{C}$ e 760 mmHg	$70\text{ }^\circ\text{F}$ e $30\text{ }^\circ\text{Hg}$ = $21,11\text{ }^\circ\text{C}$ e 762 mmHg
$20\text{ }^\circ\text{C}$ e 760 mmHg	$68\text{ }^\circ\text{F}$ e $14,696\text{ psia}$ = $20,00\text{ }^\circ\text{C}$ e 760 mmHg

Pb é a pressão de base ou de referência; Tb é a temperatura de base ou de referência; nota-se que $760\text{ mmHg} = 1$ atmosfera física ao nível do mar = $101\,325\text{ Pa}$.

A classificação dos medidores de vazão pode ser feita de várias maneiras. A tabela 3.1 separa os medidores pelos princípios de medição, em 4 grupos. O grupo que corresponde aos medidores de primogênios é o mais antigo e o mais usado na indústria.

A seqüência de listagem não corresponde a qualquer critério de ordem de qualidade, de precisão ou de maior quantidade de aplicações.

TABELA 3.1
Classificação de Princípios de Medição de Vazão

Medidores de Vazão							
Geradores de Δp		Medidores lineares		Volumétricos		Em canais abertos	
Placa	T	Área variável	A	Diaphragma	G	Calhas	L
Bocal	I	Coriolis	A	Disco de nutação	L	Vertedores	L
Venturi	T	Eletromagnético	LC	Palhetas	L		
Inserção		Térmico	A	Pistão oscilante	L		
– Pitot	T	Turbina	T	Pistões recíprocos	L		
– Pitot de média	T	Ultra-sônico	I	Rotor			
		Vórtice	I	– Lóbulo	G		
Especiais				– Engrenagem	L		
– Centrífugos	A	Medidores especiais		– Semi-imerso	G		
– Laminares	G	Força	A				
		Correlação	E				
		Laser	G				

Os princípios de medição da tabela são compatíveis com:

- T para líquidos, gases e vapor;
- G para medição de gases, exclusivamente;
- L para medição de líquidos, exclusivamente;
- LC para medição de líquidos condutores de eletricidade, exclusivamente;
- A indica que não é usado para vapores, salvo exceção;
- E líquidos com sólidos em suspensão.

A cada princípio de funcionamento correspondem características que limitam as aplicações a faixas de diâmetros, de pressões, de temperaturas, de viscosidades e de teores de impureza. A escolha entre os possíveis medidores para uma determinada aplicação poderá também considerar a perda de carga que o medidor irá introduzir na tubulação, os trechos retos disponíveis, os custos de implantação (incluindo os acessórios necessários) e os custos de manutenção.

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS

O conhecimento das principais características dos fluidos é indispensável para abordar todo estudo sobre medidores de vazão, seja para entender seu princípio de funcionamento, seja para justificar os limites de suas aplicações. Associadas à medição da vazão, outras variáveis, chamadas "variáveis de influência", provocam desvios de leitura na maioria dos medidores. A pressão e a temperatura são as principais responsáveis pelas alterações nas características dos fluidos. Uma vez conhecidas e quantificadas as alterações provocadas pela pressão e pela temperatura nas propriedades dos fluidos que interagem com o medidor de vazão, os efeitos podem ser corrigidos e os erros eliminados. A maioria dos medidores de vazão que utilizam tecnologias de microprocessadores tem o computador de vazão como complemento necessário para corrigir os efeitos das "variáveis de influência".

Os estados possíveis de um fluido são o estado líquido, o estado vapor e o estado gasoso. Os líquidos são pouco compressíveis, em geral, porém os derivados do petróleo apresentam uma compressibilidade que deve ser levada em conta. Vapores e gases, ao contrário, são compressíveis, o que significa que um determinado volume poderá conter uma massa maior ou menor de gás, dependendo de suas condições de pressão e de temperatura. A densidade absoluta, ou massa específica, é a massa contida no volume de 1 m³ de fluido. No sistema SI, é expressa em kg/m³.

Quando o termo "vapor" é usado isoladamente, entendemos que se trata de vapor d'água, porém, os fluidos, dependendo das suas condições de pressão e de temperatura, podem estar numa das três fases. Vapores, outros que o vapor d'água, são explicitados com o nome do produto em questão, como o "vapor de GLP" (gás liquefeito de petróleo), por exemplo.

Usualmente, os vapores que não são d'água são tratados na literatura como gases. Rigorosamente, a distinção das fases deveria ser de acordo com as regiões da figura 3.1.

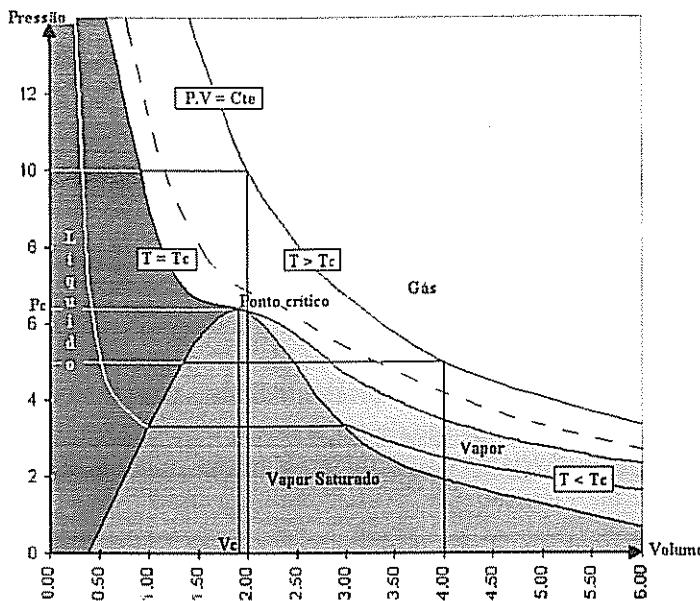


FIGURA 3.1 Estados de um fluido.

A figura 3.1 mostra como varia a pressão de um fluido, em função do volume, para várias temperaturas. Cada curva é para uma única temperatura (isoterma). A temperatura crítica de um fluido T_c é aquela acima da qual um gás não pode ser liquefeito por simples compressão.

A curva $T > T_c$ mostra que, quando a temperatura T do produto é muito superior à sua temperatura crítica T_c , o produto está em fase gasosa e a pressão é aproximadamente uma função inversa do volume. Para os gases considerados perfeitos, temos, para cada temperatura, $P = nRT/V$.

Quando a temperatura T do produto é inferior à sua temperatura crítica, a curva ($T < T_c$) tem um aspecto diferente: enquanto a pressão é baixa, a diminuição do volume corresponde a um aumento de pressão (trata-se da fase vapor ou vapor superaquecido), porém, quando se reduz o volume abaixo de determinado valor, as diminuições de volume adicionais não provocam mais aumentos de pressão; o vapor está saturado e há formação de condensado. Prosseguindo a compressão até que todo o produto esteja condensado, ocorre uma nova mudança: o produto passa para a fase líquida. Uma diminuição adicional de volume irá corresponder a um aumento considerável da pressão, tendo em vista que os líquidos são pouco compressíveis.

A cada temperatura corresponde uma curva. O conjunto dos pontos de mudança de fase, nas curvas de temperaturas $T < T_c$, determina uma faixa cuja largura diminui à medida que as temperaturas aumentam. Dentro desta faixa, o estado corresponde ao vapor saturado. O ponto crítico situa-se no topo desta faixa. Ao ponto crítico correspondem a pressão crítica P_c e o volume crítico V_c .

A curva tracejada na região da fase gasosa mostra um gás real em que a pressão não varia exatamente como o inverso do volume. O fator de compressibilidade Z (ver seção 3.2.2.1) é considerado, nesse caso, e $PV = ZnRT$.

3.2.1 Líquidos

A densidade e a viscosidade dos líquidos são propriedades importantes dos líquidos, considerando que elas interagem com os medidores de vazão. No caso de misturas, a especificação da composição poderá ser importante, também. Em não sendo líquidos limpos, o teor de impurezas deverá ser conhecido. A condutividade é uma característica que interage com medidores eletromagnéticos e será tratada na seção correspondente.

3.2.1.1 Densidade dos líquidos

A *densidade absoluta* ρ ou *massa específica* dos líquidos é medida em massa por unidade de volume, por exemplo, kg/m^3 , no sistema SI (*lb/cuft*, na literatura americana). Usa-se, freqüentemente, a *densidade relativa* δ (*specific gravity*, na literatura americana), em alternativa à massa específica ρ do líquido à pressão p e temperatura t de operação.

$$\delta_{(p,t)} = \frac{\rho_{(p,t)} \text{ do líquido}}{\rho_{t \text{ ref}} \text{ da água}} \text{ (adimensional).}$$

Na literatura americana, onde existem muitas referências para produtos de petróleo, o valor de ρ da água é 999,08 kg/m^3 , referido a 60 °F (15,56 °C). Assim, a partir dessas referências, a massa específica de um líquido pode ser calculada conhecendo sua densidade relativa:

$$\rho(p, t) \text{ do líquido, em } \text{kg/m}^3 = \delta \cdot 999,08$$

A temperatura afeta o volume de todos os líquidos, provocando alteração na densidade. Um aumento de temperatura aumenta o volume e diminui a densidade, em consequência. Como mostra a figura 3.1, os líquidos podem ser compressíveis, dependendo de sua pressão e temperatura. Quanto mais abaixo da sua temperatura crítica, menos compressível o líquido. Isto corresponderia a trechos quase verticais das curvas isotermas da figura 3.1.

Em muitos cálculos de vazão, os valores exatos da densidade do líquido, às condições de operação e às condições de referência, devem ser conhecidos com precisão. Neste caso, a literatura especializada sobre o assunto deve ser consultada. Numerosos estudos foram realizados no intuito de estabelecer uma correlação entre a densidade de líquidos e suas outras propriedades, como temperatura e pressão críticas. Para aplicar as fórmulas empíricas que foram desenvolvidas para determinar a densidade dos líquidos, os seguintes parâmetros são utilizados:

$$\text{Temperatura reduzida} = \frac{\text{Temperatura abs. do líquido}}{\text{Temperatura crítica}} \quad \text{ou} \quad T_r = \frac{T_f}{T_c}$$

$$\text{Pressão reduzida} = \frac{\text{Pressão abs. do líquido}}{\text{Pressão crítica}} \quad \text{ou} \quad P_r = \frac{P_f}{P_c}$$

Para misturas de líquidos puros, usa-se a noção de temperatura, de pressão, de compressibilidade e de massa molar "pseudo-reduzidas", que são temperatura, pressão e a compressibilidade divididas pela média ponderada dos respectivos valores críticos dos componentes da mistura, tendo como base a fração molar y_i de cada componente.

$$T_{pc} = \sum y_i T_{ci} = y_1 T_{c1} + y_2 T_{c2} + y_3 T_{c3} + \text{etc.}$$

$$P_{pc} = \sum y_i P_{ci} = y_1 P_{c1} + y_2 P_{c2} + y_3 P_{c3} + \text{etc.}$$

$$Z_{pc} = \sum y_i Z_{ci} = y_1 Z_{c1} + y_2 Z_{c2} + y_3 Z_{c3} + \text{etc.}$$

A massa molar média é a média ponderada das massas molares dos componentes:

$$Mm_{mix} = \sum y_i Mm_i = y_1 Mm_1 + y_2 Mm_2 + y_3 Mm_3 + \text{etc.}$$

TABELA 3.2
Propriedades Físicas de Líquidos (Usar Somente na Equação de Racket)

Líquido	Temperatura crítica, K	Pressão crítica, bar abs.	Z_{RA}
Metano	190,58	46,0	0,2892
Etano	305,42	48,8	0,2808
Propano	369,82	42,5	0,2766
iso-butano	408,14	36,5	0,2754
n-butano	425,18	38,0	0,2730
n-pentano	469,65	33,7	0,2684
Etileno	282,36	50,4	0,2815
Propileno	364,76	46,0	0,2779
Acetileno	308,32	61,4	0,2709
Benzeno	562,16	48,9	0,2698
Metanol	513,15	80,9	0,2334
Etanol	516,16	61,4	0,2502
Fenol	694,20	61,3	0,2780

A equação de Racket modificada pode ser usada para estimar os volumes específicos dos líquidos, à pressão de saturação, em cm^3/mol :

$$V_s = \frac{R \cdot T_c}{P_c} \cdot Z_{RA}^{[1 + (1 - Tr)^{2/7}]} \quad [3.1]$$

Para determinar a massa específica, em g/cm³, dividir Mm em g/mol por Vs em (cm³/mol).

Observa-se que 1 g/cm³ = 1 kg/dm³ = 1000 kg/m³.

Para avaliar o efeito da compressibilidade, aplica-se a equação de Lu:

$$F_p = 1 + Z_L \cdot P_r$$

$$Z_L = 0,269 T_r - 0,5163 T_r^2 + 0,3521 T_r^3 - 0,0461 \quad [3.2]$$

EXEMPLO:

Calcular a massa específica do iso-butano C₄H₁₀ (Mm = 58,1243) a 310,93K e 137,9 bar a.

Na tabela 3.2, temos:

$$T_c = 408,14 \text{ K} \quad P_c = 36,5 \text{ bar a} \quad Z_{RA} = 0,2754$$

$$T_r = T_f/T_c = 310,93/408,14 = 0,762$$

Usando R, a constante dos gases = 83,144, compatível com as unidades [bar · cm³/mol · K], temos:

$$V_s = \frac{83,144 \cdot 408,14}{36,5} \cdot 0,2754 [1 + (1 - 0,762)^{0,2857}] = 108,81 \text{ cm}^3 / \text{mol}$$

A massa específica saturada é 58,1243/108,81 = 0,534 kg/dm³ = 534,18 kg/m³.

A compressibilidade é calculada com a equação de Lu:

$$P_r = P_f/P_c = 137,9/36,5 = 3,778$$

$$Z_L = 0,269 \cdot (0,762) - 0,5163 \cdot (0,762)^2 + 0,3521 \cdot (0,762)^3 - 0,0461 = 0,01468$$

$$F_p = 1 + (0,01468 \cdot 3,778) = 1,05548$$

A massa específica do iso butano a 310 K e 137,93 K é

$$534,18 \cdot 1,05548 = 563,81 \text{ kg/m}^3$$

Para correções de densidade em medições de vazão, é possível usar uma equação simplificada que leva em conta somente o efeito da temperatura, admitindo que as variações de pressão terão efeitos desprezíveis, na faixa de operação.

$$\rho = A + B \cdot t + C \cdot t^2 \quad [3.3]$$

Para encontrar os termos A, B e C, são necessários três valores de t: o mínimo, o médio e o máximo correspondente à faixa de temperatura considerada.

EXEMPLO:

Água à pressão de 70 bar e temperatura entre 120 °C e 200 °C, média 160 °C:
 temperatura mínima 120 °C $\rho_{sat} = 949,83 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{70\text{bar}} = 946,13 \text{ kg/m}^3$;
 temperatura média 160 °C $\rho_{sat} = 907,25 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{70\text{bar}} = 911,06 \text{ kg/m}^3$;
 temperatura máxima 200 °C $\rho_{sat} = 864,68 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{70\text{bar}} = 868,66 \text{ kg/m}^3$,

Usando o recurso de cálculo numérico disponível em planilhas eletrônicas, encontra-se:

$$A = 1007,36, B = -0,23538 \text{ e } C = -0,002291,$$

valores válidos somente para a faixa considerada.

3.2.1.2 Viscosidade dos líquidos

A viscosidade pode ser definida como sendo a resistência que o fluido oferece ao deslocamento de suas partículas.

A *viscosidade absoluta* (ou viscosidade *dinâmica*) é definida na equação de Newton, aplicada a um dispositivo experimental em que o fluido estaria preenchendo um espaço entre 2 placas, uma fixa e outra, de superfície S, sendo deslocada em relação à placa fixa a uma velocidade V, aplicando à placa móvel uma força F.

$$\mu = \frac{F \cdot e}{S \cdot V}$$

A viscosidade absoluta m tem como unidade o Pa.s (*poiseuille*), no sistema SI. Esta unidade é raramente empregada na indústria, sendo-lhe preferida o cP (centipoise):

$$1 \text{ Pa.s} = 1000 \text{ cP}$$

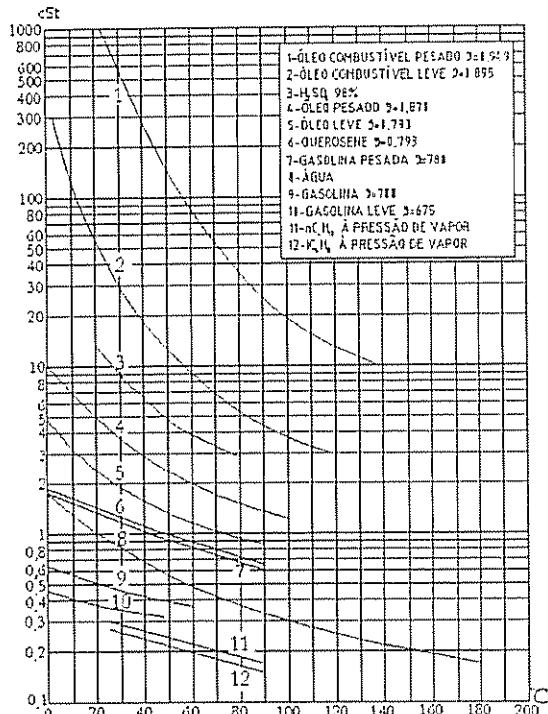


FIGURA 3.2 Gráfico de viscosidade de líquidos, em função da temperatura.

Outra expressão da viscosidade muito usada para líquidos é a *viscosidade cinemática* v (a letra grega v, leia-se ni). É a relação entre a viscosidade absoluta do fluido μ e sua massa específica ρ , à mesma temperatura. (A viscosidade dos líquidos é pouco alterada pela pressão.)

$$v = \mu / \rho$$

A viscosidade cinemática ν tem como unidade o m^2/s , no sistema SI. A unidade usualmente empregada na indústria é o centistokes cSt.

$$1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Para se ter a viscosidade absoluta μ em cP a partir da viscosidade cinemática ν em cSt, multiplicar ν por $\rho \cdot 10^{-3}$, sendo ρ em kg/m^3 .

A tabela 3.3 fornece dados da viscosidade da água, mostrando que é muito pouco sensível ao efeito da pressão.

TABELA 3.3
Viscosidade Cinemática da Água (em cSt) em Função da Temperatura e da Pressão

Temperatura (°C)	Pressão (bar abs)					
	1	20	50	100	300	500
0	1,79	1,78	1,77	1,76	1,70	1,64
50	0,557	0,556	0,555	0,555	0,552	0,548
100		0,295	0,296	0,296	0,297	0,299
150		0,204	0,205	0,205	0,207	0,210
200		0,157	0,158	0,159	0,162	0,165
250			0,136	0,137	0,139	0,141
300				0,125	0,125	0,127
350					0,121	0,122

3.2.2 Gases

As principais características dos gases, diretamente relacionadas com a medição da vazão, são a densidade, a viscosidade e o coeficiente isentrópico $k = Cp/Cv$. No caso de misturas, a composição é importante, também. A umidade dos gases é um caso tratado à parte. Em não sendo gases limpos, o teor de impurezas deverá ser conhecido.

3.2.2.1 Densidade dos gases

A *densidade absoluta* ρ ou *massa específica* dos gases é medida em massa por unidade de volume, por exemplo, kg/m^3 , no sistema SI (*lb/cuft*, na literatura americana). Usa-se, freqüentemente, a *densidade relativa* δ (*specific gravity*, na literatura americana). Diferentemente da densidade dos líquidos, a densidade relativa dos gases tem várias definições, dependendo do atributo:

- *densidade relativa real*: é a relação entre a massa específica do gás e a do ar, nas mesmas condições de pressão e de temperatura.
- *densidade relativa ideal*: é a relação entre a massa molar do gás e a do ar.

$$\delta = \frac{\text{Mm gás}}{\text{Mm ar}} = \frac{\text{Mm gás}}{28,9625}$$

Nas seções seguintes, a densidade relativa dos gases, sem atributo, será sempre a *ideal*, como definida acima.

A massa específica de um gás ρ , a determinadas condições de pressão P e de temperatura T , pode ser calculada de acordo com a seguinte equação geral dos gases:

$$\rho = \frac{Mm \cdot P}{R \cdot T \cdot Z} \quad [3.4]$$

onde:

ρ = a massa específica do gás, em kg/m^3 ;

Mm = a massa molar do gás, em kg/mol ;

P = a pressão do gás, em bar absolutos;

R = a constante dos gases = $83,143 \cdot 10^{-6} \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{mol.K}$;

T = a temperatura absoluta do gás, em K;

Z = o fator de compressibilidade.

Os valores de Z dependem da pressão e da temperatura de cada gás. Muitos estudos foram realizados para estabelecer a correlação entre os valores de Z e outras propriedades físicas dos gases, como a pressão e a temperatura críticas e a massa molar. Existem livros especializados que fornecem valores precisos do fator de compressibilidade de gases puros. Abaixo, um exemplo da tabela dos fatores Z do ar para várias temperaturas e pressões.

TABELA 3.4
Valores de Z para o Ar

Pressão kg/cm^2 abs.	Temperatura, °C							
	-50	0	20	50	100	150	200	250
0,1	0,99984	0,99994	0,99996	0,99999	1,00001	1,00002	1,00003	1,0003
0,4	0,99938	0,99977	0,99985	0,99995	1,00004	1,00010	1,00013	1,00014
1	0,99845	0,99941	0,99963	0,99987	1,00011	1,00024	1,00031	1,00035
4	0,99379	0,99763	0,99651	0,99948	1,00045	1,00099	1,00127	1,00142
10	0,98465	0,99430	0,98888	0,99888	1,00125	1,00253	1,00324	1,00362
40	0,94190	0,98037	0,9859	0,9978	1,00659	1,01125	1,01374	1,01502
70	0,90770	0,97210	0,9882	1,0003	1,0143	1,0215	1,0254	1,0272
100	0,88750	0,97050	0,9882	1,0065	1,0242	1,0333	1,0379	1,0400

- Para os gases industriais, em geral, utilizam-se as curvas de Nelson e Obert, que definem o fator Z em função da pressão reduzida e da temperatura reduzida.
- Para gases petroquímicos, entre várias, a equação de Benedict-Webb-Rubin (BWR), calculável numericamente, fornece resultados muito satisfatórios.
- Para o caso específico do gás natural, as equações foram aperfeiçoadas ao longo de décadas de estudos, e fazem parte do relatório nº 8, da *American Gas Association* [ref. 2.4].

TABELA 3.5
Propriedades Físicas de Gases

Gás	Fórmula	Massa molar, 10 ⁻³ kg/mol	ρ_0 a 0 °C e 1 atm kg/m ³	Temperatura crítica, T_c , em K	Pressão crítica, P_c , em bar a
Ar	—	28,9625	1,29305	132,4	37,71
Argônio	Ar	38,948		151,16	48,64
Acetileno	C ₂ H ₂	26,0382	1,0989	309,5	62,40
Amônia	NH ₃	17,0306	0,724	406,2	114,25
Benzeno	C ₆ H ₆	78,11		561,6	48,33
n-butano	C ₄ H ₁₀	58,1243	2,5317	425,2	37,97
Iso-butano	C ₄ H ₁₀	58,1243	2,5290	408,1	36,48
Dióxido de carbono	CO ₂	44,00995	1,9770	304,3	73,98
Monóxido de carbono	CO	28,01055	1,2505	134,3	35,16
Étano	C ₂ H ₆	30,0701	1,2794	305,4	48,84
Étileno	C ₂ H	28,0542	1,2528	283,1	51,17
Etil-álcool	C ₂ H ₅ OH	46,07		516,3	63,93
Hélio	He	4,0026	0,1785	373,56	90,07
Hidrogênio	H ₂	2,0159	0,089886	33,28	12,96
Metil-álcool	CH ₃ OH	32,04		513,2	79,74
Gás sulfúrico	H ₂ S	34,0799	1,4497	373,6	90,05
Metano	CH ₄	16,0430		190,7	46,41
n-octano	C ₈ H ₁₈	114,23		569,2	24,92
Nitrogênio	N ₂	28,0134	1,25047	125,06	33,92
Oxigênio	O ₂	31,9988	1,42901	154,39	50,33
Propano	C ₃ H ₈	44,0972	1,8911	370,0	42,57
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,07		430,3	78,73
Vapor d'água seco	H ₂ O				221,2

EXEMPLO:

Calcular a massa específica do ar seco:

- 1) a 0 °C e 1 atm; e
- 2) a 150 °C e 100 kg/cm² abs.

- Na tabela 3.4, encontramos:

no caso 1, Z = 0,99941; e, no caso 2, Z = 1,0333.

- Convertendo as unidades, temos:

1 atm = 1,01325 bar, e 100 kg/cm² = 98,0665 bar.

0 °C = 273,15K , e 100 °C = 373,15K.

- Na tabela 3.5, a massa molar do ar é $28,9625 \cdot 10^{-3}$ kg/mol, ou 0,0289625 kg/mol.

Aplicando a equação geral dos gases, acima, temos:

$$1) \rho_{(0C, 1\text{ atm})} = 0,0289625 \cdot 1,01325 / (83,143 \cdot 10^{-6} \cdot 273,15 \cdot 0,99941) = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$2) \rho_{(100C, 100\text{kg/cm}^2)} = 0,0289625 \cdot 101,325 / (83,143 \cdot 10^{-6} \cdot 373,15 \cdot 1,0333) = 91,54 \text{ kg/m}^3$$

3.2.2.1.1 Densidade dos gases úmidos

A densidade dos gases úmidos é calculada levando-se em conta o valor da umidade relativa, cada gás participando com sua pressão parcial, de acordo com a lei de Dalton. A pressão de saturação do vapor d'água saturada é uma função única da temperatura, conforme tabela 3.6.

A pressão parcial do vapor d'água é: $P_v = P_s \cdot (\%_{\text{umi}}/100)$, onde P_s é a pressão de saturação do vapor d'água à temperatura considerada, e $\%_{\text{umi}}$ é a porcentagem de umidade relativa do gás úmido.

A equação a ser utilizada, no caso, é:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{úmido}} &= \frac{Mm \cdot (P - P_v)}{R \cdot T \cdot Z} + \frac{Mm_{(\text{água})} \cdot P_v}{R \cdot T} = \\ &= \frac{1}{R \cdot T} \cdot [Mm \cdot (P - P_v) + Z + Mm_{(\text{água})} \cdot P_v] \end{aligned} \quad [3.5]$$

EXEMPLO:

Calcular a massa específica do ar, com umidade relativa de 95% à temperatura de 40 °C (= 313,15K) e pressão de 1 bar absoluto.

Na tabela 3.4, o valor de Z do ar a 40 °C é 0,99987.

Na tabela 3.5, a massa molar do ar é $28,9625 \cdot 10^{-3}$ kg/mol e a da água $18,0153 \cdot 10^{-3}$ kg/mol.

Na tabela 3.6, P_s a 40 °C é 0,07331 bar → $P_v = 0,07331 \times 95/100 = 0,0696$ bar.

$$\rho = [1/(83,143 \cdot 10^{-6} \cdot 313,15)] \cdot [28,9625 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,06964)/0,99987 + 18,0153 \cdot 10^{-3} \cdot 0,06964].$$

$$\rho = 1,0363 \text{ kg/m}^3$$

TABELA 3.6
Pressão de Vapor da Água, em Função da Temperatura

t °C	Bar						
1	0,0066	26	0,0333	51	0,1289	76	0,4011
2	0,0071	27	0,0353	52	0,1354	77	0,4182
3	0,0076	28	0,0375	53	0,1422	78	0,4357
4	0,0081	29	0,0397	54	0,1493	79	0,4539
5	0,0087	30	0,0421	55	0,1566	80	0,4729
6	0,0093	31	0,0445	56	0,1644	81	0,4924
7	0,0100	32	0,0472	57	0,1726	82	0,5126
8	0,0107	33	0,0499	58	0,1806	83	0,5335
9	0,0115	34	0,0528	59	0,1894	84	0,5551
10	0,0123	35	0,0558	60	0,1994	85	0,5774
11	0,0130	36	0,0589	61	0,2078	86	0,6005
12	0,0139	37	0,0623	62	0,2176	87	0,6243
13	0,0149	38	0,0657	63	0,2277	88	0,6489
14	0,0159	39	0,0694	64	0,2383	89	0,6743
15	0,0170	40	0,0733	65	0,2493	90	0,7006
16	0,0180	41	0,0772	66	0,2607	92	0,7556
17	0,0192	42	0,0814	67	0,2716	94	0,8142
18	0,0205	43	0,0858	68	0,2848	96	0,8766
19	0,0218	44	0,0904	69	0,2975	98	0,9430
20	0,0231	45	0,0952	70	0,3108	100	1,0134
21	0,0246	46	0,1002	71	0,3245	102	1,0881
22	0,0262	47	0,1054	72	0,3388	104	1,1673
23	0,0279	48	0,1109	73	0,3535	106	1,2512
24	0,0296	49	0,1167	74	0,3688	108	1,3400
25	0,0314	50	0,1227	75	0,3847	110	1,4340

3.2.2.2 Viscosidade dos gases

A viscosidade absoluta dos gases puros, μ_1 , a uma temperatura t (°C), poderá ser avaliada usando-se a fórmula de Sutherland, conhecendo a viscosidade absoluta μ_0 a 0 °C, e o número de Sutherland C_n , na tabela 3.7:

$$\mu_1 = \mu_0 \cdot (273 + t/273)^{1.5} \cdot [(273 + C_n)/(273 + C_n + t)] \quad [3.6]$$

TABELA 3.7
Números de Sutherland e Limites de Aplicação

Gás	Fórmula	μ_0^*	C_n	Limites de utilização ($^{\circ}\text{C}$)
Ar	–	173	125	15 a 800
Acetileno	C_2H_2	93	148	0 a 100
Amoníaco	NH_3	83,1	503	20 a 300
Argônio	Ar	209	79	0 a 100
Benzeno	C_6H_6	67,7	448	130 a 315
Cloro	Cl_2	123	350	20 a 500
Dióxido de carbono	CO_2	138	254	20 a 280
Etano	C_2H_6	86,1	252	25 a 300
Etileno	C_2H_4	83,9	225	20 a 300
Hidrogênio	H_2	84,8	138	20 a 825
Monóxido de carbono	CO	166	101	20 a 280
Metano	CH_4	100	164	20 a 500
Nitrogênio	N_2	166	105	20 a 825
Oxigênio	O_2	192	125	15 a 830
Propano	C_3H_8	75	290	20 a 300

* 1 micropoise $\text{mP} = 10^{-4}$ cP.

A viscosidade de uma mistura gasosa pode ser calculada a partir da fórmula de Herring-Zipperer:

$$\mu_{1\text{mix}} = \frac{n_1 \mu_1 (M_1 \cdot T_{c1})^{0.5} + n_2 \mu_2 (M_2 \cdot T_{c2})^{0.5} + \dots + n_n \mu_n (M_n \cdot T_{cn})^{0.5}}{n_1 (M_1 \cdot T_{c1})^{0.5} + n_2 (M_2 \cdot T_{c2})^{0.5} + \dots + n_n (M_n \cdot T_{cn})^{0.5}} \quad [3.7]$$

onde:

- $\mu_{1\text{mix}}$ = viscosidade da mistura, na temperatura considerada (μP);
 μ_i = viscosidade de cada componente, na temperatura considerada (μP);

M_1, M_2, M_n = peso molecular de cada componente ($\text{H}_2 = 2$);

T_{c1}, T_{c2}, T_{cn} = temperatura crítica de cada componente (K).

O efeito da pressão sobre a viscosidade dos gases é objeto de equações empíricas, como no método de Reichenberg que consta na Ref. [5.2] ou por meio de gráficos, em função de Pr e de Tr , na ref. [5.1].

3.2.2.3 Coeficiente $k = \text{Cp}/\text{Cv}$

O coeficiente k , representando a relação dos calores específicos Cp/Cv (calor específico à pressão constante/calor específico a volume constante) é uma propriedade

que deve ser conhecida no caso de medição de gases por meio de elementos primários geradores de pressão diferencial.

A tabela 3.8 fornece os valores de k para vários gases puros. O valor de k não necessita ser determinado com precisão melhor que 2%, já que sua influência sobre os resultados é relativamente pequena. Geralmente, não se leva em conta o efeito das variações da pressão e da temperatura sobre o valor de k. Para cálculos precisos, e para misturas de gases, a ref [5.2] fornece informações sobre mais de 40 gases diferentes.

TABELA 3.8
Valores de $k = Cp / Cv$ de Gases Puros, para Diferentes Pressões e Temperaturas

Gás	k 20 °C 1 bar	k 20 °C 10 bar	k 20 °C 70 bar	k 50 °C 1 bar	k 100 °C 1 bar	k 150 °C 1 bar
Ar	1,402	1,419	1,533	1,401	1,398	1,394
Monóxido de carbono	1,402	1,421	1,565	1,401	1,398	1,395
Dióxido de carbono	1,297	1,362	—	1,283	1,263	1,248
Nitrogênio	1,401	1,418	1,530	1,401	1,399	1,397
Oxigênio	1,397	1,416	1,549	1,394	1,387	1,379
Hidrogênio	1,406	1,407	—	1,402	1,399	1,397

3.2.3 Vapor d'Água

As principais propriedades físicas do vapor d'água que interagem com os medidores de vazão são a densidade, a viscosidade e o coeficiente de expansão isentrópica $k = Cp/Cv$. O vapor d'água pode ser superaquecido ou saturado. Quando o vapor está saturado, a cada temperatura corresponde uma única pressão, densidade, viscosidade e um único valor de k. Quando está superaquecido, a densidade, a viscosidade e o valor de k dependerão do grau de superaquecimento do vapor em relação à temperatura de saturação para a pressão considerada.

Existem tabelas e gráficos de densidade e de viscosidade do vapor d'água, porém, as equações empíricas destinadas a calcular esses valores têm a vantagem da compatibilidade com os computadores.

Entre as várias equações que determinam as propriedades do vapor d'água, temos:

Massa Específica ρ_f do Vapor

$$\begin{aligned} \rho_f = & 1/[4,555 \cdot (T/P) + 1,89 - x + (1,890 - x)^2 \cdot [(82,5/T) - (162460/T^2)] \cdot (P/T) + \\ & + (1,89 - x)^4 \cdot (0,218 - 126970/T^2) \cdot (P/T)^3 - \\ & - [(1,89 - x)^{13} \cdot (3,635 \cdot 10^{-4} - 6,768 \cdot 10^{64}/T^{24}) \cdot (P/T)^{12}]] \end{aligned}$$

onde:

onde:

$$x = 2642/T \cdot \exp(186300/T^2);$$

T = a temperatura absoluta do vapor d'água, em K;

P = a pressão absoluta, em atm = P em bar a * 0,986923.

Viscosidade mf (cP) do Vapor

$$\mu_f = 0,0001 \cdot V_x$$

$$V_a = 0,407 \cdot T + 80,4;$$

$$\text{Se } t > 350^\circ\text{C: } V_b = [\rho_f \cdot (1,021 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_f + 6,765 \cdot 10^{-4}) + 0,353]; V_x = V_a + V_b$$

$$\text{Se } t \leq 350^\circ\text{C: } V_b = 1,858 - 0,0059 \cdot T; V_x = V_a - (\rho_f \cdot V_b)$$

Coeficiente k = Cp/Cv do Vapor

$$k = [k_x - (0,0753 \cdot T_r)] + 1,3655$$

$$k_1 = T_r \cdot (-0,1208 \cdot T_r + 0,36401); \quad k_2 = k_1 - 0,25444$$

$$k_3 = T_r \cdot (1,52574 \cdot T_r - 2,24953) + 1; \quad k_x = P_r \cdot (k_2/k_3)$$

onde:

$$P_r = \text{pressão reduzida} = P_{(\text{bara})}/221,2;$$

$$T_r = \text{temperatura reduzida} = T_{(\text{K})}/647,3.$$

3.3 MEDIDORES DE PRIMOGÊNIOS

A medição de vazão por elementos primários deprimogênicos, em particular por placas de orifícios, apesar de ser a mais antiga, ainda é a mais utilizada em todo o mundo, por dar origem a medidores extremamente versáteis, que podem ser aplicados na maioria das aplicações industriais. O elemento primário é o primeiro elo de uma malha de medição, diretamente em contato com o fluido. A malha completa é geralmente complementada por um transmissor de pressão diferencial e um instrumento receptor: seja um indicador, um registrador, a entrada analógica de um sistema digital ou outra interface permitindo a leitura da vazão.

3.3.1 Teoria Resumida

A teoria da medição de vazão por pressão diferencial é fundamentada em leis físicas conhecidas. As equações teóricas devem ser complementadas por coeficientes práticos, para que a vazão possa ser medida com precisão. A teoria considera a equação da continuidade e a equação de Bernoulli.

3.3.1.1 Equação da continuidade

A equação da continuidade aplica-se diretamente a líquidos incompressíveis que fluem em tubulação completamente preenchida, cuja seção varia de S_1 para S_2 . Num determinado instante, ao longo da tubulação a vazão volúmica Q_v é igual ao produto da velocidade V pela seção S :

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 = Q_v \quad [3.8]$$

3.3.1.2 Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli foi desenvolvida para estabelecer a relação entre as velocidades e as pressões num filete líquido, cujo diâmetro (muito pequeno, por hipótese) varia num certo trecho, passando da seção 1 à seção 2.

Sendo demonstrável teoricamente, a equação apresenta-se geralmente da seguinte forma simplificada, para um trecho horizontal:

$$(V_1)^2/2 + (p_1/\rho) = (V_2)^2/2 + (p_2/\rho) \quad [3.9]$$

onde:

V é a velocidade;

p é a pressão (o subscrito 1 refere-se à seção 1 do filete);

ρ é a massa específica do fluido (o subscrito 2 refere-se à seção 2 do filete).

Rearranjando a equação acima para uso direto em cálculos de elementos deprimogênicos, e empregando os símbolos β e E , que são usados internacionalmente, temos:

$$V_1 = E\beta^2 \cdot \sqrt{(2/\rho) \cdot (p_1 - p_2)} \quad [3.10]$$

onde:

$$\beta = d / D;$$

$$E = 1 / \sqrt{1 - \beta^4};$$

d = diâmetro correspondente à seção 1;

D = diâmetro correspondente à seção 2.

Esta é a equação teórica fundamental, que gera as demais em medição de vazão. Passar da equação teórica à prática, significa não limitar-se à seção de um filete líquido e generalizar a equação para a velocidade média da seção, cujo perfil de velocidades é uma função do número de Reynolds.

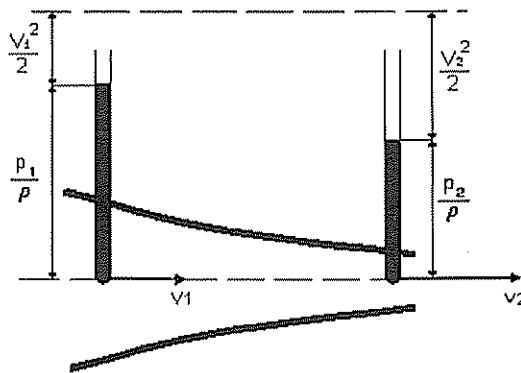


FIGURA 3.3 Variações da coluna de líquido em função da velocidade

A equação de Bernoulli é extremamente útil, pois mostra claramente que a velocidade V_1 pode ser determinada, conhecendo os seguintes dados:

- as dimensões geométricas do filete (por extensão, do elemento primário d e D);
- a pressão diferencial (V_1 é diretamente proporcional à $\sqrt{P_1 - P_2}$, ou seja à $\sqrt{\Delta p}$);
- massa específica, também chamada densidade (V_1 é inversamente proporcional à $\sqrt{\rho}$).

3.3.1.3 Coeficiente de descarga de placas de orifício

A fim de permitir o uso prático da equação de Bernoulli, é necessário introduzir o coeficiente de descarga C:

$$C = \frac{\text{vazão real}}{\text{vazão teórica}}$$

Para estabelecer o coeficiente C, a vazão teórica é calculada a partir de medidas precisas das dimensões do elemento, da massa específica do fluido e da pressão diferencial. A vazão real é medida pelo tempo necessário para preencher um volume determinado ou para completar um peso definido de líquido. Esses levantamentos são realizados em centros de pesquisas e universidades de diversos países, e os valores de C são "consolidados" em comitês internacionais de normalização.

Os coeficientes de descarga dos elementos deprimogênicos são função do tipo de elemento primário TEP (placa, bocal, Venturi...), da posição das tomadas PosT (flange taps, radius taps...), do diâmetro da linha D, do valor de β e do número de Reynolds R_D .

Usando a equação $Q_{\text{real}} = C \cdot Q_{\text{teórica}}$, e combinando a equação de Bernoulli com a da continuidade, temos:

$$Q_v = CE\beta^2 \cdot S_1 \cdot \sqrt{[2 \cdot (p_1 - p_2) / \rho]} \quad [3.11]$$

Substituindo S_1 por $\pi D^2/4$, e considerando que $\pi/4\sqrt{2} = 1,1107$, temos:

$$Q_v = 1,1107 \cdot CE\beta^2 \cdot D_2 \cdot \sqrt{(p_1 - p_2) / \rho} \quad [3.12]$$

com:

Q em m^3/s ;

p_1 e p_2 em Pa;

D em m;

ρ em kg/m^3 .

O produto $CE\beta^2$ pode ser tratado em conjunto, sendo o produto $E\beta^2$ representativo das dimensões geométricas, e C uma característica de cada elemento primário.

3.3.1.4 Número de Reynolds

Osborne Reynolds (1842-1912) desenvolveu um "identificador de regime" de escoamento, baseado em parâmetros cujas unidades, uma vez efetuada a operação, resultam em valor adimensional.

$$Re = V \cdot D/v \quad [3.13]$$

onde:

V = velocidade (m/s);

D = diâmetro (m);

v = viscosidade (m^2/s).

Quando o número de Reynolds se refere à seção onde o diâmetro é D , costuma-se escrever R_D .

Exceptionalmente, nas referências sobre a medição de vazão, o número de Reynolds é referido ao diâmetro d . Neste caso, escreve-se R_d .

O número de Reynolds é válido para líquidos, gases e vapor, e permite definir as seguintes faixas de escoamentos:

abaixo de $R_D = 2\,000$: regime laminar;

entre $R_D = 2\,000$ e $R_D = 4\,000$: regime transitório;

acima de $R_D = 4\,000$: regime turbulento.

3.3.1.5 Equação para fluidos reais

A equação de Bernoulli foi desenvolvida para fluidos incompressíveis e, em decorrência, consta nela somente uma única massa específica de operação, sem os índices 1 ou 2.

Com fluidos compressíveis, a massa específica é alterada pela mudança de pressão, quando o fluido passa pelo elemento primário. É, então, necessário introduzir um fator ε , para corrigir este efeito.

As equações que permitem calcular o valor de ε , em função de $\Delta p/P$, e de k , têm uma estrutura comum, e parâmetros que dependem do tipo de elemento primário.

A equação generalizada para fluidos compressíveis inclui o parâmetro ε :

$$Q_v = 1,1107 \cdot CE\beta^2 \cdot D^2 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{(p_1 - p_2)/\rho} \quad [3.14]$$

E, ainda, considerando que a vazão mássica Q_m (kg/s) = Q_v (m^3/s) $\cdot r$ (kg/m^3), e substituindo $p_1 - p_2$ por Δp , temos:

$$Q_m = 1,1107 \cdot CE\beta^2 \cdot D^2 \cdot \varepsilon \sqrt{\Delta p \cdot \rho} \quad [3.15]$$

O fator ε é chamado fator de expansão isentrópica; ε pode ser representado por uma equação simples, nos casos de placas de orifício com tomadas *Flange taps*, *Corner taps* ou *Radius taps*:

$$\varepsilon = 1 - [(0.41 + 0.35\beta^4) \cdot (\Delta p/P)/k] \quad [3.16]$$

com Δp e P (pressão absoluta) na mesma unidade e $k = Cp/Cv$ (expoente isentrópico).

3.3.1.6 Cálculo típico de placa de orifício

De acordo com as práticas estabelecidas, os elementos primários geradores de pressão diferencial são calculados individualmente, para cada aplicação. O cálculo pode ser feito em três sentidos, dependendo das necessidades:

- calcular as dimensões do elemento primário (valor de β), para a fabricação, conhecendo o diâmetro da tubulação, o Δp a ser gerado, a vazão (normal e de F.E.) e os dados do fluido;
- calcular a vazão, caso o medidor esteja instalado, conhecendo o diâmetro da tubulação, o valor de β , o Δp gerado e os dados do fluido;
- calcular o Δp a ser gerado, caso se deseje especificar o transmissor, por exemplo, conhecendo o diâmetro da tubulação, o valor de β , a vazão (normal e de F.E.) e os dados do fluido.

Os dados de vazão normal e de fim de escala (F.E.) são necessários para os cálculos precisos, para poder avaliar adequadamente o coeficiente de descarga que varia com o número de Reynolds, que, por sua vez, é função direta da vazão.

O cálculo preciso do resultado deverá ser feito de forma iterativa, nos dois primeiros sentidos, pois a incógnita não pode ser isolada, devido aos fatores que determinam o coeficiente de descarga:

- no 1º sentido, o valor de C depende do valor de β , que é a incógnita;
- no 2º sentido, o valor de C depende do nº de Reynolds, que depende da vazão, que é a incógnita.

No 3º sentido, o cálculo poderá ser iterativo, no caso de fluido compressível, devido ao coeficiente de expansão ε , que depende de Δp , que é a incógnita

O exemplo abaixo é típico, sendo a metodologia aplicável a qualquer tipo de placa de orifício, de bocal de vazão ou tubo de Venturi.

Calcular o valor de β de uma placa de orifício concêntrica a ser fabricada em aço inoxidável 316, com tomadas *Flange taps*, sendo o fluido o ar seco, a 8,6 bar absolutos, e 45 °C, a faixa de vazões em Nm^3/h (0 °C e 1 atm) 800/1000 (nor./F.E.), a tubulação em aço carbono de diâmetro interno exato de 77,93 mm (3"sch 40), e considerando que a pressão diferencial de fim de escala será 25 kPa.

Em se tratando de um fluido compressível, a equação a ser aplicada é a equação 3.14:

$$Q_v = 1,1107 \cdot CE\beta^2 \cdot D_2 \cdot \sqrt{(p_1 - p_2)/\rho}$$

ou, isolando o produto $CE\beta^2 \cdot \varepsilon$, adotando a notação $\Delta p = p_1 - p_2$ e frisando que os valores a serem considerados são os de operação, temos:

$$CE\beta^2 \cdot \varepsilon = Q_{vf} \cdot \sqrt{\rho_f / [1,1107 \cdot D_f^2 \cdot \sqrt{\Delta p}]} \quad [3.17]$$

Cálculo de ρ :

O valor de ρ deve ser calculado em kg/m^3 , às condições de operação.

Os valores exatos de Z para as condições de referência e de operação são: 0,9994 e 0,999, respectivamente e, aplicando a equação [3.5], temos $\rho_{ref} = 1,293$ e $\rho_f = 9,4255 \text{ kg/m}^3$.

Cálculo de Q_v :

Os valores de Q_v devem ser calculados para a vazão normal Q_{vinor} e a de fim de escala Q_{vite} , em m^3/s , às condições de operação:

Aplicando a equação $Q_{ref, pcf} = Q_f \cdot \rho_f$, temos:

$$Q_{vite} = (1000/3600) \cdot 1,293/9,4255 = 0,038106 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$Q_{vinor} = (800/3600) \cdot 1,293/9,4255 = 0,030485 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Cálculo de D, em metros, à temperatura de operação, considerando que o fator de dilatação linear do aço carbono é $12 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$:

$$D = 77,93 \cdot [1 + 0,000012 \cdot (45 - 20)] = 77,953 \text{ mm} = 0,077953 \text{ m}$$

Podemos, agora, calcular o valor de $CE\beta^2 \cdot \varepsilon$:

$$CE\beta^2 \cdot \varepsilon = 0,038106 \cdot \sqrt{9,4255} / [1,1107 \cdot 0,077953^2 \cdot \sqrt{25000}] = 0,10962$$

Para calcular o valor de ϵ , calcula-se um valor preliminar de β (β^*), estimando $C = 0,61$, $\epsilon = 1$:

$$\beta^* = \{(E\beta^2)^2/[1 + (E\beta^2)^2]^{0.25} \Rightarrow [0,1797^2/[1 + (0,1797)^2]^{0.25} = 0,421.$$

Cálculo de ϵ , para a vazão normal

O cálculo de ϵ para a vazão normal deve ser feito considerando o Δp_{NOR} . Estima-se o Δp_{NOR} considerando a relação quadrática entre a pressão diferencial e a vazão:

$$\Delta p_{NOR} = (Q_{VNOR}/Q_{FE})^2 = 16 \text{ kPa.}$$

Para calcular a relação $\Delta p_{NOR}/P$, a pressão P deverá ser nas mesmas unidades que Δp_{NOR} : 860kPa:

$$\begin{aligned} \epsilon = 1 - [(0,41 + 0,35\beta^4) \cdot (\Delta p_{NOR}/P)/k] &= 1 - [(0,41 + 0,35 \cdot 0,421^4) \cdot \\ &\cdot (16/860)/1,41] = 0,994. \end{aligned}$$

Para concluir o cálculo, é necessário calcular o valor do número de Reynolds correspondente à vazão normal, para aplicar a equação empírica do coeficiente de descarga.

Cálculo do número de Reynolds ($R_D = V_f \cdot D_f / v_f$ correspondente à vazão normal)

A velocidade é a vazão dividida pela seção:

$$V_f = 0,030485 / (\pi \cdot 0,077953^2 / 4) = 6,3871 \text{ m/s.}$$

A viscosidade v_f deve ser expressa em m^2/s :

$$= 0,019 \cdot 9,4255 \cdot 10^{-6} = 0,179 \cdot 10^{-6};$$

$$R_{DNOR} = 6,3871 \cdot 0,077953 / 0,179 \cdot 10^{-6} = 0,2469 \cdot 10^6$$

Segundo a norma ISO 5167, de 1998, a equação empírica, elaborada por Reader-Harris/Gallagher, para calcular o valor de C para uma placa de orifício concêntrica, com tomadas *Flange taps*, é a seguinte:

Para $D > 71,12$ mm, como é o caso:

$$\begin{aligned} C = 0,5961 + 0,0261 \beta^2 - 0,216 \beta^3 + 0,000521 (10^6 \beta / R_D)^{0.7} \\ + (0,0188 + 0,0063 A) \beta^{3.5} (106/R_D)^{0.3} \\ + (0,043 + 0,08 e^{-10 L_1} - 0,123 e^{-7 L_1}) (1 - 0,11A) [\beta^4/(1 - \beta^4)] \\ - 0,031 (M'_2 - 0,8 M'^{-1}_2) \beta^{1.3} \end{aligned}$$

onde:

$$A = ((19000 \beta) / R_D)^{0.8} = ((19 \beta) / 2,469)^{0.8}$$

$$L_1 = 25,4/D = 25,4 / 77,953 = 0,32584$$

$$M'_2 = 2 L_1 / (1 - \beta)$$

$$C E \beta^2 = C \beta^2 / (1 - \beta^4)^{0.5}$$

Aplica-se um método iterativo que faça convergir os valores de β , de tal forma que $CE\beta^2$ seja igual a 0,10962, o valor calculado acima, na função $CE\beta^2 = \Phi(\beta)$ acima descrita.

No caso, encontramos o valor exato $\beta = 0,42456$.

Cálculo de $d_{(20)}$, diâmetro do orifício à temperatura de usinagem:

Calcula-se, inicialmente, o diâmetro do orifício à temperatura de operação:

$$d_t = D_f + 0,42456 = 33,096 \text{ mm}$$

O diâmetro d a 20 °C é calculado considerando que o coeficiente de dilatação linear do aço inoxidável 316 é $17,5 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

$$d = 33,096 / [1 + 0,0000175 \cdot (45 - 20)] = 33,08 \text{ mm.}$$

Avaliações de Aplicabilidade

É necessário verificar se o elemento primário calculado é adequado para a aplicação. A cada tipo de elemento deprimogênio correspondem limitações:

- limites de β ;
- limites de ε ;
- limites superior e inferior dos diâmetros d e D;
- limites de número de Reynolds;
- limites de rugosidade da tubulação;
- limites de trecho reto necessário.

3.3.1.7 Incerteza sobre os coeficientes de descarga

A incerteza dos elementos deprimogênicos pode ser avaliada na seguinte equação, que consta nas normas ISO 5167 e ISO 5168.

$$iQ_m = \pm \sqrt{(iC)^2 + \left[\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right]^2 (iD)^2 + \left[\frac{2}{1-\beta^4} \right]^2 (id)^2 + 1/4(i\Delta p)^2 + 1/4(ip)\%} \quad [3.18]$$

onde:

iQ_m é a incerteza sobre a vazão mássica;

iC é a incerteza sobre o coeficiente de descarga;

iD é a incerteza sobre o diâmetro D;

id é a incerteza sobre o diâmetro d;

$i\varepsilon$ é a incerteza sobre o fator isentrópico;

$i\Delta p$ sobre a pressão diferencial;

ip é a incerteza sobre a massa específica.

3.3.2 Placas de Orifício Clássicas

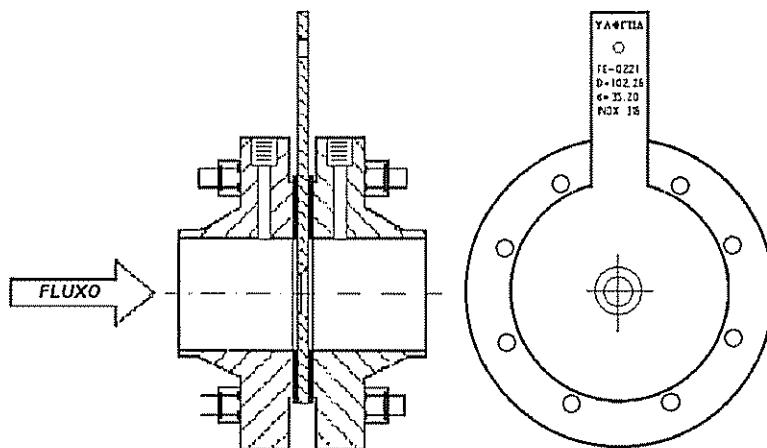


FIGURA 3.4 Placa de orifício montada entre flanges com tomada.

As placas de orifício clássicas são concêntricas, de parede fina e aresta viva e são fabricadas a partir de chapa de aço inoxidável ou de material compatível com o fluido a ser medido. Suas dimensões são completamente definidas em normas nacionais e internacionais. A norma brasileira é a NBR ISO 5167. As normas internacionais mais utilizadas são a ISO 5167, ref. [4.1] e a AGA 3, ref. [2.2].

3.3.2.1 Tomadas

As tomadas de pressão são geralmente do tipo *Flange taps* (centros a 1" a montante e a jusante das faces da placa). Para tubulações acima de 100 mm (4"), as tomadas *Radius taps* (centros a $\frac{1}{2}$ D a montante e $\frac{1}{2}$ D a jusante da placa) podem ser usadas, por resultar em diminuição de custo de instalação. As tomadas *Corner taps* (centros nos cantos) são preferidas na Europa. O tipo de tomadas *Pipe taps* (2 $\frac{1}{2}$ D a montante e 8D a jusante) é mais adequado para cálculo de orifícios de restrição, embora possa ser aplicado para medição de vazão, também.

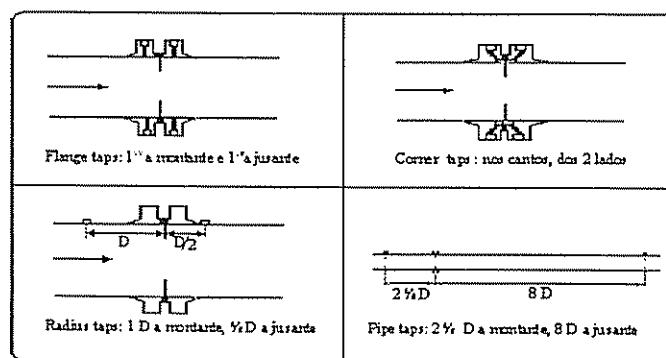


FIGURA 3.5 Posição das tomadas em placas de orifício clássicas.

3.3.2.2 Detalhes construtivos

A parte cilíndrica e do orifício deve ter espessura compreendida entre $D/200$ e $D/50$. Quando, por motivo de robustez, a espessura E da placa é maior que a parte cilíndrica e do orifício, um chanfro a 45° é efetuado na face jusante da placa. Entretanto, a espessura da placa deve ser menor que $D/20$, para tubos superiores a 3", e poderá ser de 3 mm, no caso de tubulações de 2".

A aresta deve ser "viva", isto é, nenhum raio de luz deve ser refletido, numa observação à vista desarmada.

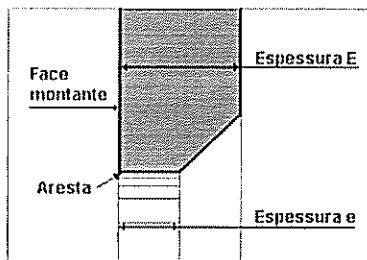


FIGURA 3.6 Perfil de placa de orifício clássica.

As placas de orifício têm uma enorme flexibilidade de aplicação, já que é possível calculá-las com extensos limites de β e de pressões diferenciais. O aço inoxidável é o material mais usual para a fabricação das placas clássicas. São empregados, também, o Hastelloy, para fluidos corrosivos, o Monel, para oxigênio, ou, ainda, o titânio, o tântalo e, em certos casos, o teflon.

3.3.2.3 Coeficientes de descarga

As normas ISO 5167 e AGA3/ANSI/API 2530 adotaram a equação empírica de Reader-Harris/Gallaghan (RG), para representar o coeficiente de descarga C. Os trabalhos de Buckingham, nos Estados Unidos, e de Stoltz, na França, foram fundamentais para o desenvolvimento dessas equações. Para os orifícios com tomadas a $2 \frac{1}{2} D$ e $8 D$ (*Pipe taps*), a equação de Buckingham ainda é empregada pela AGA 3 e seguida em toda literatura sobre o assunto. Existem pequenas diferenças de valores de parâmetros nas revisões de 1998 da norma ISO 5167 com a AGA 3 relativamente à equação de RG. Essas diferenças são ligadas a considerações sobre limites de β , incertezas e dados laboratoriais considerados para os cálculos estatísticos que geraram os parâmetros.

A equação de RG, aplicável às tomadas *Flange taps*, *Radius taps* e *Corner taps*, na norma ISO 5167, de 1998, é a seguinte:

- para $D > 71,12 \text{ mm}$:

$$\begin{aligned} C = & 0,5961 + 0,0261 \beta^2 - 0,216 \beta^8 + 0,000521 (10^6 \beta/R_D)^{0,7} \\ & + (0,0188 + 0,0063 A) \beta^{3,5} (10^6/R_D)^{0,3} \\ & + (0,043 + 0,08 e^{-10 L_1} - 0,123 e^{-7 L_1}) (1 - 0,11A) [\beta^4/(1 - \beta^4)] \\ & - 0,031 (M'_2 - 0,8 M'^{1,1}_2) \beta^{1,3}. \end{aligned}$$
 - Para $50 > D > 71,12 \text{ mm}$, acrescentar o termo:
 $+ 0,11 (0,75 - \beta) [2,8 - (D/25,4)]$, com D em mm
 onde:
 $A = ((19000 \beta)/R_D)_{0,8},$
 $M'_2 = 2 L'_2/(1 - \beta).$
 - Para as tomadas *corner taps*:
 $L_1 = L'_2 = 0.$
 - Para as tomadas *flange taps*:
 $L_1 = L'_2 = 25,4/D$ (com D em mm).
 - Para as tomadas *radius taps*:
 $L_1 = 1, \quad L'_2 = 0,47.$
- [3.19]

A equação empírica de Buckingham para as tomadas *Pipe taps*, na norma AGA 3, considerando os parâmetros convertidos para D em mm, é a seguinte:

O produto CE é considerado, ao invés de C :

$$\begin{aligned} CE = & C'E [1 + (B_1 \beta/R_D)] \\ C'E = & [0,5925 + (0,4623/D) + [0,440 - (1,524/D)] \\ & + [0,935 + (5,715/D)] \beta^5 + 1,35 \beta^{14} + (7,207/D^{0,5}) \\ & (0,25 - \beta)^{5/2}] / (1 + 0,000015 A). \\ A = & 905 - 5000b + 9000\beta^2 - 4200\beta^3 + (22\,225/D), \\ \text{e } B_1 = & 0,03937 D \beta A. \end{aligned}$$

[3.20]

NOTAS:

- D deve ser expresso em mm.
- Os termos imaginários da equação devem ser tornados iguais a zero.

3.3.2.4 Fator de expansão isentrópica

O fator de expansão isentrópica e , aplicado para gases e vapores, é representado por uma equação empírica.

- Caso a pressão do gás seja a da tomada a montante, a equação é a equação 3.16:

$$\varepsilon = 1 - [(0,41 + 0,35\beta^4) \cdot (\Delta p/P)/k]$$
 com Δp e $P(\text{abs.})$ nas mesmas unidades e k coeficiente isentrópico.
- Caso a pressão do gás seja a da tomada a jusante, a densidade do gás deve ser calculada considerando a pressão P_2 e a equação é a seguinte:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 [1 + \Delta p/P_2]^{0.5} \quad [3.21]$$

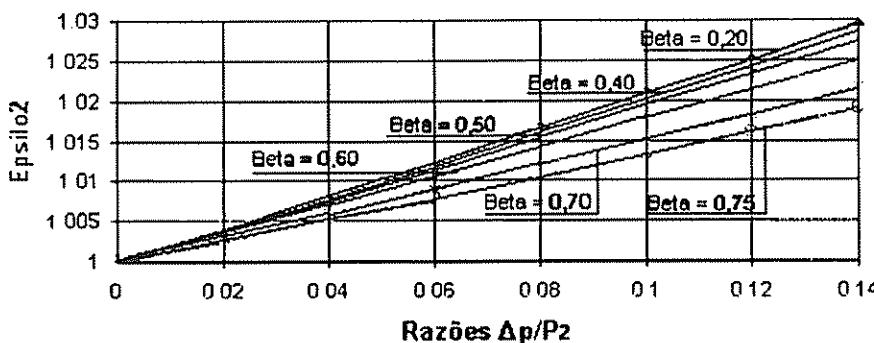


FIGURA 3.7 Gráfico de ε_2 , em função de $P_2/\Delta p$.

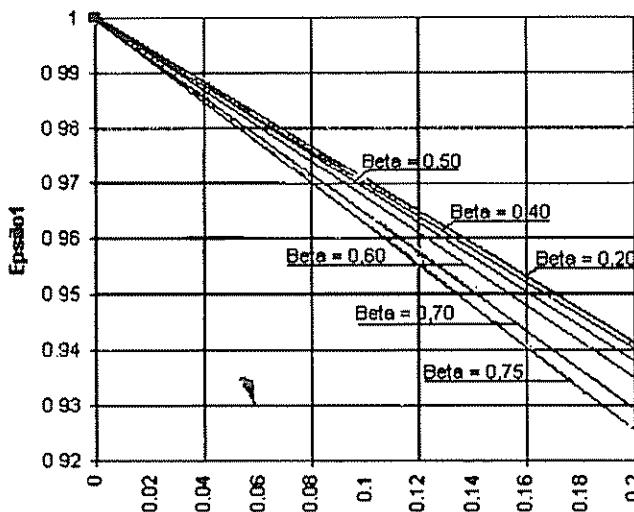


FIGURA 3.8 Gráfico de ε_1 , em função de $P_1/\Delta p$.

3.3.2.5 Limites de aplicações

Todos os fluidos homogêneos, e numa única fase, podem ser medidos por placas de orifício clássicas, desde que sejam respeitados os limites estabelecidos pelas normas.

Limites	ISO 5167	AGA 3/ANSI/API 2530
• valor de β	0,1 a 0,75	0,02 a 0,75
• valor de $\Delta p/P$ para calcular ϵ	0,75	0,75
• diâmetro inferior de d	12,5 mm	11,4 mm
• diâmetro D	$50 \text{ mm} > D > 1000 \text{ mm}$	$43 \text{ mm} > D > 730 \text{ mm}$
• número de Reynolds	4 000 ou $16\,000 \beta^2$, o maior	4 000
• rugosidade da tubulação	Função de D, aprox. 6 μm	8 μm para $\beta < 0,6$; 6 μm acima
• trecho reto necessário	Ver seção seguinte	Ver seção seguinte

3.3.2.6 Instalação

As placas de orifício clássicas podem ser instaladas em tubulações de seção circular horizontais, verticais ou inclinadas. Para líquidos, a instalação vertical deve ser com o fluxo ascendente. As incertezas de medição são estabelecidas pelas normas, desde que as condições de rugosidade, de perpendicularidade, de circularidade, de concentricidade, de trecho reto e de detalhes de tomadas sejam respeitadas. Assim, para medições precisas, o elemento primário é constituído por um trecho calibrado (*meter run*), não mais somente pela placa de orifício.

O desenho a seguir mostra um trecho calibrado parcialmente cortado, com o tubo a montante alargado ou brunido, de forma a apresentar uma rugosidade requerida pela norma, num comprimento mínimo de 10D.

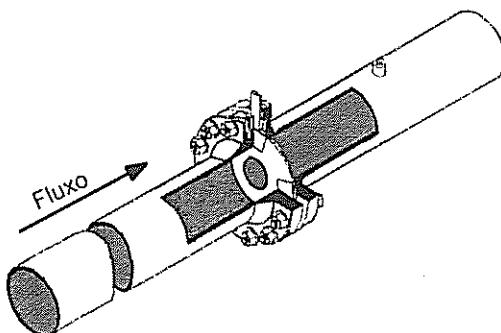


FIGURA 3.9 Trecho calibrado com tomadas *Flange taps*. A tomada no tubo, a jusante, é prevista para colocar um poço de termoresistência.

Os trechos retos, antes e depois da placa de orifício clássica, foram revisados nas últimas edições das normas, aumentando os requisitos, de forma a reduzir a incerteza dos coeficientes de descarga:

TABELA 3.9
Trechos Retos Necessários para Placa de Orifício Clássica

β	Trecho reto a montante										A jusante	
	AA		BB		CC		DD		EE		TT	
	N	R	N	R	N	R	N	R	N	R	N	R
0,20	6	6	10	10	19	19	16	8	12	6	4	2
0,40	18	9	10	10	44	19	16	8	12	6	6	3
0,50	30	16	30	10	44	19	18	9	12	6	6	3
0,60	44	30	44	30	44	19	22	11	14	7	7	3,5
0,67	44	30	44	30	44	30	27	14	18	8	7	3,5
0,75	44	35	44	30	44	30	38	19	24	12	8	4

- Os valores das colunas N são necessários para manter a incerteza sobre C dentro dos limites da norma.
- Quando são utilizados os valores das colunas R, acrescentar 0,5% à incerteza sobre C.
- As colunas de AA a EE são algumas das configurações de tubulação consideradas na norma ISO 5167.
 - AA: uma curva a 90°, ou duas curvas no mesmo plano, distantes de 30D, no mínimo.
 - BB: duas curvas no mesmo plano, distantes de até 10D.
 - CC: duas curvas em planos perpendiculares, com $15D \geq S \geq 5D$.
 - DD: expansão de 0,5D a D com comprimento de D a 2D.
 - EE: válvula de esfera, com passagem plena.
 - TT: para todas as configurações, de AA a EE.

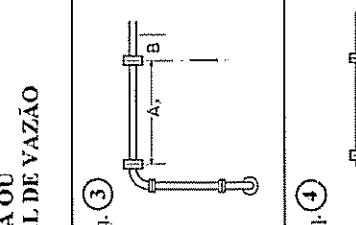
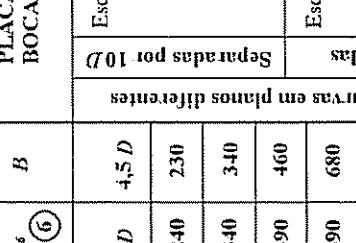
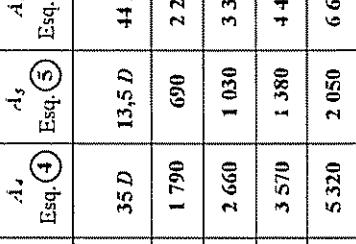
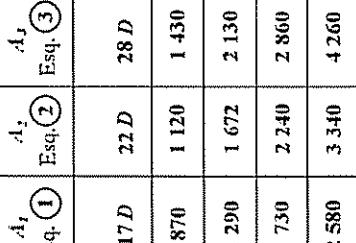
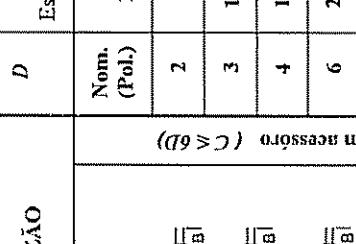
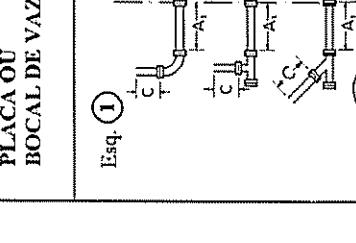
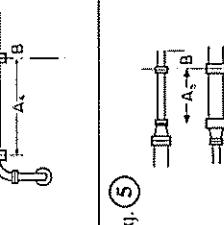
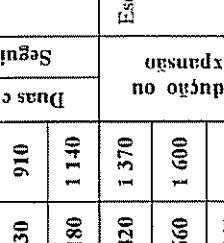
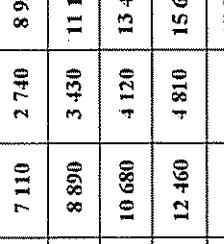
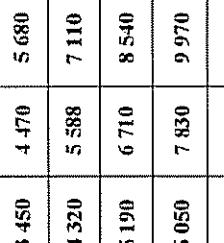
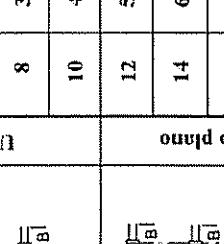
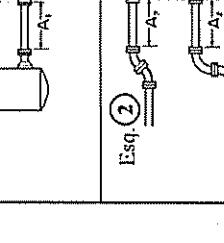
3.3.2.6.1 Condicionadores de fluxo

Os trechos retos podem ser reduzido por meio de condicionadores de fluxo, que são dispositivos colocados a montante do elemento primário, com finalidade de normalizar o perfil de velocidades e evitar a rotação da veia fluida.

Os condicionadores de fluxo do tipo feixe tubular são os que foram mais estudados, na última revisão da Norma ISO 5167. Seu desempenho é bom, no sentido de evitar a rotação da veia fluida, porém, outros tipos de condicionadores de fluxo, como o Zanker ou o Mitsubishi, são mais eficientes para normalizar também o perfil de velocidades. Outros condicionadores (NEL, K-Lab, Gallagher) estão sendo estudados. O condicionador tipo "Etoile" tem referências na norma ISO 5167, de 1991.

TABELA 3.10

Distâncias a Serem Previstas no Projeto de uma Tubulação com um Medidor de Vazão por Placa de Ofício. As Distâncias Indicadas podem ser Revistas, quando o Valor de Beta for Definido

DISTÂNCIAS MÍNIMAS A MONTANTE E A JUSANTE DE PLACAS E BOCAIS ($\beta = 0,75$) (em mm)									
PLACA OU BOCAL DE VAZÃO	<i>D</i>	<i>A_t</i> Esq. ①	<i>A_s</i> Esq. ②	<i>A_j</i> Esq. ③	<i>A_{t'}</i> Esq. ④	<i>A_{s'}</i> Esq. ⑤	<i>A_g</i> Esq. ⑥	PLACA OU BOCAL DE VAZÃO	
								Separdas por 10D Esq. ③	Seguidas Esq. ④
 Esq. ①	Nom. (Poli.)	17 <i>D</i>	22 <i>D</i>	28 <i>D</i>	35 <i>D</i>	13,5 <i>D</i>	44 <i>D</i>	4,5 <i>D</i>	
		(lm acessório ($C \leq 6D$))							
 Esq. ②	2	870	1 120	1 430	1 790	690	2 240	230	
 Esq. ③	3	1 290	1 672	2 130	2 660	1 030	3 340	340	
 Esq. ④	4	1 730	2 240	2 860	3 570	1 380	4 490	460	
 Esq. ⑤	6	2 580	3 340	4 260	5 320	2 050	6 690	680	
 Esq. ⑥	8	3 450	4 470	5 680	7 110	2 740	8 930	910	
 Esq. ⑦	10	4 320	5 588	7 110	8 890	3 430	11 180	1 140	
 Esq. ⑧	12	5 190	6 710	8 540	10 680	4 120	13 420	1 370	
 Esq. ⑨	14	6 050	7 830	9 970	12 460	4 810	15 660	1 600	
 Esq. ⑩	16	6 900	8 930	11 370	14 210	5 480	17 860	1 830	
 Esq. ⑪	18	7 770	10 050	12 800	16 000	6 170	20 110	2 060	
 Esq. ⑫	20	8 640	11 180	14 220	17 780	6 860	22 354	2 290	
 Esq. ⑬	24	10 370	13 420	17 080	21 350	8 240	26 840	2 750	
 Esq. ⑭	30	12 950	16 760	21 340	26 670	11 640	33 530	3 430	

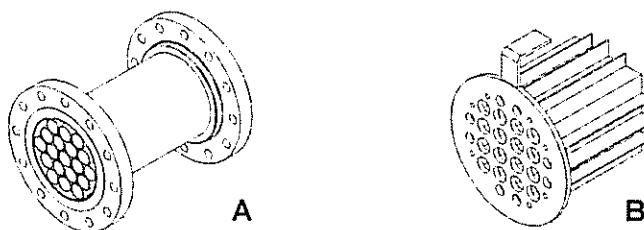


FIGURA 3.10 Condicionadores de fluxo: (A) feixe tubular em carretil e (B) Zanker.

3.3.2.6.2 Orientação das tomadas

A orientação das tomadas é importante para o funcionamento correto das placas de orifício. A tabela 3.11 mostra a posição recomendada das tomadas para os casos mais usuais de instalação.

TABELA 3.11
Orientação das Tomadas

Fluido	Orientação das tomadas		Observações
	Transmissor abaixo do elemento primário	Transmissor acima do elemento primário	
Líquidos limpos	<ul style="list-style-type: none"> Horizontal • 45° abaixo da horizontal 	45° acima da horizontal	1) Para líquidos isentos de bolhas ou vapores. 2) Para líquidos com bolhas e vapores. 3) Prever potes de gases no ponto alto de cada linha de impulso. 4) Prever purga líquida em cada linha de impulso. 5) Prever traço de vapor e isolamento térmico nas linhas de impulso e no transmissor.
Líquidos incrustantes	Horizontal	Evitar	
Líquidos pastosos à temperatura ambiente ou que precipitam	<ul style="list-style-type: none"> Horizontal • 45° abaixo da horizontal 		
Gases limpos e secos	<ul style="list-style-type: none"> • Horizontal • 45° abaixo da horizontal • Vertical 		
Gases limpos e úmidos	Vertical	<ul style="list-style-type: none"> • Vertical • A 45° acima da horizontal 	6) Prever potes de condensação num ponto baixo de cada linha de impulso, entre o elemento e o transmissor 7) Prever purga de gás. 8) Prever potes de selagem, ao nível das tomadas 9) Prever potes de selagem, nos pontos altos de cada linha, no mesmo nível.
Gases que contêm sólidos		Vertical	
Vapor e gás condensável	<ul style="list-style-type: none"> • Horizontal • 45° acima da horizontal 	Vertical	10) Prever isolamento térmico entre as tomadas e o ponto alto, em cada linha de impulso. 11) Prever inclinação das linhas entre o ponto alto e o transmissor.
Vapor: temperatura > a 450 °C	Horizontal	Evitar	

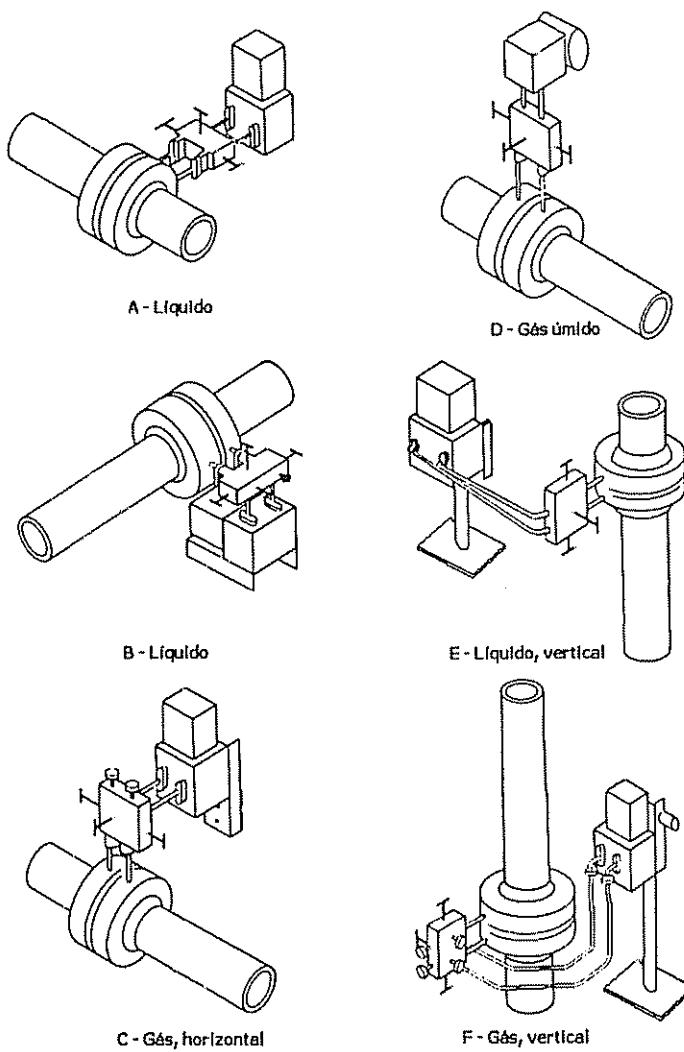


FIGURA 3.11 Esquemas típicos de instalação com o transmissor montado próximo à placa de orifício, cada vez mais empregado, visto que os transmissores requerem pouca manutenção e podem ser parametrizados à distância.

3.3.2.7 Incertezas sobre os coeficientes de descarga

As incertezas sobre o coeficiente de descarga vêm sendo estudadas ao longo dos anos, passando de mais de $\pm 1\%$ a $\pm 0,5\%$ nos últimos anos. A norma ISO 5167 atribui aos coeficientes de descarga as seguintes incertezas, desde que β , D e R_D sejam assumidos e conhecidos sem erro:

- $(0,7 - \beta)\%$ para $0,1 \leq \beta < 0,2$;
- $0,5\%$ para $0,2 \leq \beta \leq 0,6$;
- $(1,667 \beta - 0,5)\%$ para $0,6 < \beta \leq 0,75$.

A incerteza sobre o fator de expansão isentrópica é a seguinte, desde que β , $\Delta p/P$ e k sejam assumidos conhecidos sem erro:

- $4 \Delta p/P\%$ se for empregada a equação 3.16;
- $3 \Delta p/P\%$ se for empregada a equação da última revisão (2000) da norma para o cálculo de ε_1 :

$$\varepsilon_1 = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) [1 - (P_2/P_1) 1/k] \quad [3.22]$$

NOTAS:

- para aplicar as equações [3.16] ou [3.22], a relação P_2/P_1 deve ser inferior a 0,75;
- para $P_2/P_1 > 0,98$, as equações [3.16] e [3.22] fornecem resultados aproximadamente iguais.

3.3.2.8 Precisão da medição e extensão da faixa (rangeabilidade)

A faixa de medição ou rangeabilidade (de *rangeability*, em inglês) das placas de orifício é a relação entre o maior valor e o menor valor lidos na escala com a precisão. A rangeabilidade das placas de orifício é limitada pelo menor valor por duas razões:

- pelos limites inferiores dos números de Reynolds;
- pela dificuldade de medir baixos valores de pressão diferencial.

Muitos esforços foram feitos pelos grupos de trabalho que elaboraram as normas sobre placas de orifício clássicas, pelos fabricantes de transmissores de pressão diferencial e pelos idealizadores de computadores de vazão, para aumentar a precisão das malhas de medição.

- Com a apuração de dados mais cuidadosamente selecionados e lançando mão de recursos de cálculos numéricos mais poderosos, os grupos de trabalho das Normas ISO 5167 e AGA 3 produziram equações e diminuíram as incertezas que permitem calcular vazões correspondentes a números de Reynolds de 4 000, com enorme ganho de rangeabilidade.
- Os fabricantes de transmissores de pressão diferencial oferecem instrumentos com precisão de 0,1% (ou melhor) em relação à faixa calibrada.
- Os idealizadores de computadores de vazão elaboraram softwares capazes de calcular a vazão, levando em conta os valores do coeficiente de descarga e do fator de expansão isentrópica do momento, além de calcular constantemente o valor da massa específica do fluido medido.

Para contornar um problema inerente ao princípio de medição, que é a queda quadrática da pressão diferencial correspondente à diminuição linear da vazão, é possível utilizar transmissores em *split range*, ou seja, um transmissor para a faixa alta de pressão diferencial é utilizado entre 100% e 9% do Δp (correspondentes, respectivamente, a 100% e 30% da vazão) e outro de 9% de Δp_{FE} para baixo. Desta forma, cada transmissor é cali-

brado para uma faixa em que sua precisão em relação ao valor medido é melhor que 1%, implicando numa participação inferior a 0,5% na incerteza da medição.

O transmissor de menor faixa deverá poder suportar pressões diferenciais mais altas, o que é uma qualidade encontrada nos transmissores modernos.

3.3.3 Placas de Orifício Especiais

Em muitos casos de medição de vazão, as placas de orifício clássicas não podem ser aplicadas, seja por questão de diâmetro, de viscosidade, de impurezas ou de falta de trecho reto, e temos, então, que lançar mão de placas de orifício especiais. Para cada caso, foi encontrada uma solução.

3.3.3.1 Placas de orifício para pequenos diâmetros

As placas de orifício clássicas não podem ser utilizadas para tubulações de diâmetro $D \leq 50$ mm, de acordo com a Norma ISO 5167. Entretanto, o relatório técnico ISO/TR 15377, ref. [4.6] (baseado na norma inglesa BS 1042), permite aplicar a equação [3.19] relativa a placas com tomadas tipo *corner taps* para diâmetros tais que $25 \text{ mm} \leq D \leq 50 \text{ mm}$, desde que sejam respeitados os seguintes limites:

- $0,4 \leq \beta \leq 0,7$;
- $0,1 \leq CE\beta^2 \leq 0,35$.

A incerteza sobre C é 0,6% para $0,4 \leq \beta \leq 0,6$ e $\beta\%$ para $0,6 < \beta \leq 0,7$.

Para os casos em que a tubulação é menor que 25 mm, existem trabalhos e referências confiáveis que permitem aplicar placas de orifício a tubos de até 12 mm:

- ASME 1971, ref [5.1];
- trabalhos publicados por fabricantes de instrumentos mundialmente conhecidos.

A incerteza associada aos coeficientes de descarga é da ordem de 2%.

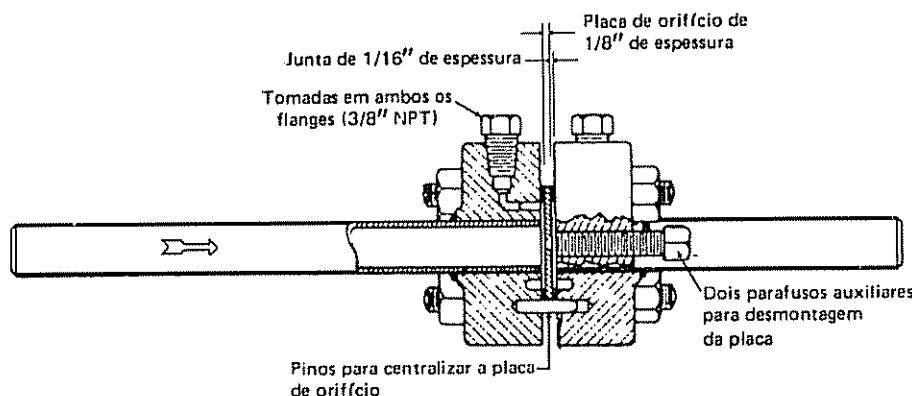


FIGURA 3.12 Trecho de medição polido, de acordo com a ASME.

3.3.3.2 Elementos primários para baixos números de Reynolds

Quando o número de Reynolds calculado é inferior aos limites citados em 3.3.2.5, geralmente devido a uma viscosidade elevada, as placas de canto arredondado em $\frac{1}{4}$ de círculo (ou *quadrant edge*), e as de entrada côncica podem ser usadas. Ambos os perfis são citados no relatório técnico ISO/TR 15377, ref. [4.6].

Para as placas de orifício com perfil em $\frac{1}{4}$ de círculo, temos os seguintes parâmetros:

- coeficiente de descarga: $C = 0,73823 + 0,3309\beta - 1,1615\beta^2 + 1,5084\beta^3$;
- limites de β $0,24 \leq \beta \leq 0,6$;
- incerteza sobre C 2% para $b > 0,316$ e 2,5% para $\beta \leq 0,316$;
- limite de d e D d deve ser ≥ 15 mm e $D \leq 500$ mm;
- limite de R_D $1000\beta + 9,4 [10^6 (\beta - 0,24)^8] \leq R_D \leq 10^5\beta$.

Para as placas de entrada côncica, os parâmetros são os seguintes:

- coeficiente de descarga: $C = 0,734$;
- limites de β $0,1 \leq \beta \leq 0,316$;
- incerteza sobre C 2%;
- limite de D e d d deve ser ≥ 6 mm e $D \leq 500$ mm;
- limite de R_D $80 \leq R_D \leq 2 \cdot 10^5\beta$.

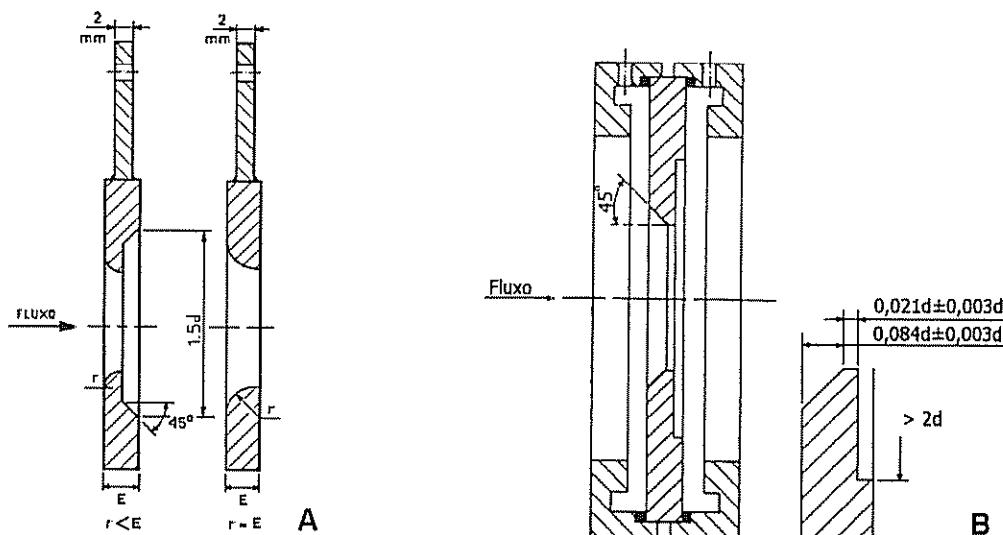


FIGURA 3.13 Placas de orifício para baixos números de Reynolds:
(A) quadrante; (B) entrada côncica.

3.3.3.2.1 Medidor tipo cunha

Para medição de fluidos viscosos, como óleos combustíveis, que precisam ser aquecidos para serem bombeados, o medidor tipo cunha é uma solução econômica e confiável.

Uma cunha segmental deixa uma abertura H na parte inferior (ou lateral) do tubo de medição, provocando uma pressão diferencial entre montante e jusante desta restrição local. As tomadas de pressão podem ser simples ou para selos diafragma. Este último caso deve ser usado quando o fluido medido é aquecido para sua viscosidade diminuir, permitindo seu transporte por bombeamento. Um congelamento do fluido ocorreria em linhas de impulso normais, já que o fluido não circula entre o elemento primário e o transmissor. Com selos diafragma, montados de forma a ter o mínimo de espaço sem circulação, as pressões são comunicadas ao transmissor via capilares preenchidos com óleo silicone ou outro, que tenha propriedades adequadas para não alterar a pressão a ser medida.

Os medidores tipo cunha dispõem de várias relações H/D para escolher a melhor faixa de pressão diferencial considerando o diâmetro e a vazão a ser medida. Quando selos diafragma são usados, pressões diferenciais da ordem de 5000 mmH₂O são preferidas, mais fáceis de serem medidas por transmissores de selo remoto.

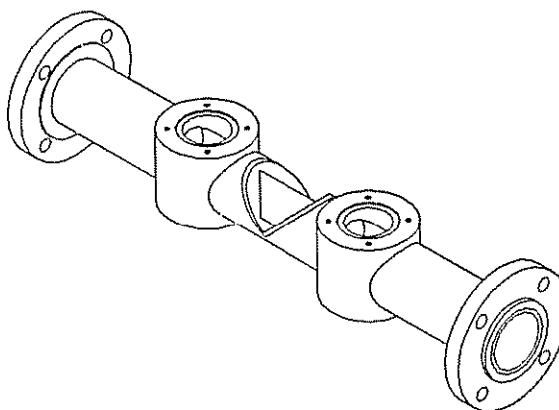


FIGURA 3 14 Medidor de vazão tipo cunha, para líquidos viscosos.

3.3.3.3 Placas de orifício para fluidos carregados

As placas excêntricas e as segmentais são usadas quando existem impurezas no fluido que poderiam ser represadas a montante pela parte inferior da placa. A placa excêntrica é preferida para os casos de presença de condensados em medições de gases sujos. A segmental, mais imprecisa, pode ser aplicada para líquidos carregados de sólidos, como adutoras, por exemplo. Os parâmetros correspondentes às placas de orifício para fluidos carregados são os seguintes:

Placas de orifício excêntricas

- Coeficiente de descarga para tomadas *flange taps* a 180° do orifício:
 $C = C' + (B/R_D)^{0.75}$;
 - $C' = 0,5949 + 0,4078 \beta^{2,1} + 0,0547 \beta^8 + [0,0955 (\beta^4/1 - b4)] - 0,5608 \beta^3$;
 - $B = -139,7 + 1328,8 \beta - 4228,2 \beta^2 + 5691,9 \beta^3 - 2710,4 \beta^4$.
 - Limites de β $0,3 \leq \beta \leq 0,8$.
 - Incerteza sobre C 2% para $D = 100$ mm.
ou 1,5% para $D > 100$ mm.
 - Limite de D $D \geq 100$ mm.
 - Limite de R_D $R_D > 10\,000$.

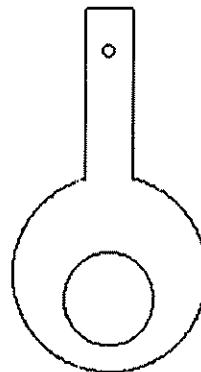


FIGURA 3.15 Placa de orifício excentrica.

Placas de orifício segmentais

- Coeficiente de descarga para tomadas *Flange taps* a 180° do orifício:
 $C = 0,6037 + 0,1598 \beta^{2,1} - 0,2918 \beta^8 + [0,0244 (\beta^4/1 - \beta^4)] - 0,0790 \beta^3.$
 - Limites de β $0,3 \leq \beta \leq 0,84.$
 - Incerteza $2\%.$
 - Limite de D $D \geq 100 \text{ mm.}$
 - Limite de RD $R_D \geq 10\,000.$

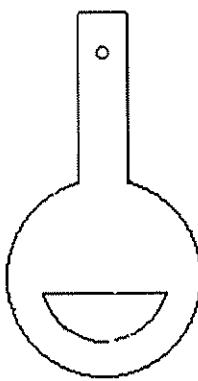


FIGURA 3.16 Placa de orifício segmental.

3.3.3.4 Placas de orifício para trechos retos limitados

Uma dificuldade encontrada mais freqüentemente nas indústrias siderúrgicas é a falta de trecho reto para instalar placas de orifícios clássicas. Para contornar este problema, foram desenvolvidas as placas de orifício anulares. As placas **anulares** podem ser realizadas de várias maneiras, uma delas é a da figura 3.17.

Os parâmetros relativos a placas anulares dependem da realização construtiva de cada fornecedor, especialmente da forma de fixação do disco em relação ao tubo ou ao cartel de medição.

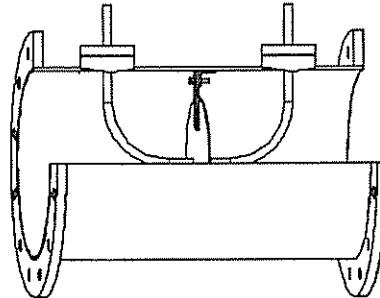


FIGURA 3.17 Placa de orifício anular.

3.3.4 Bocais de Vazão

No caso de medição de vazão de vapor, em que a velocidade atinge 30 m/s ou mais, poderá ser preferível usar um bocal de vazão. O bocal de vazão provoca uma pressão diferencial menor que uma placa de orifício, nas mesmas condições (vazão, pressão, temperatura) e, em consequência, menos perda de carga. Por outro lado, a forma aerodinâmica do perfil de entrada do fluido não é tão sujeita a desgaste prematuro quanto o canto vivo de uma placa de orifício, quando a velocidade do fluxo é elevada.

Os bocais de vazão podem ser fabricados de acordo com a norma ISO 5167, no formato ASME ou ISA 1932. O tipo de tomadas é determinado pelo formato escolhido, *corner taps*, para o formato ISA, e *radius taps*, para o ASME.

Os materiais são geralmente Inox 304 ou 316, mas não há restrições a outros materiais que possam ser usinados ou soldados.

Para o formato ASME, com tomadas *radius taps*, os parâmetros são os seguintes:

- Coeficiente de descarga: $C = 0,9965 - 0,00653\beta^{0,5} (10^6/R_D)^{0,5}$;
- limites de β : $0,2 \leq \beta \leq 0,8$;
- incerteza sobre C: 2%;
- limite de D: $50 \text{ mm} \leq D \leq 630 \text{ mm}$;
- limite de R_D : $10^4 \leq R_D \leq 10^7$,

Para o formato ISA, com tomadas *corner taps*, os parâmetros são os seguintes:

- coeficiente de descarga: $C = 0,9900 - 0,2262\beta^{4,1} - (0,00175\beta^2 - 0,0033\beta^{4,15})(10^6/R_D)^{1,15}$;
- limites de β : $0,3 \leq \beta \leq 0,8$;
- incerteza sobre C: 0,8% para $\beta \leq 0,6$ ou $(2b - 0,4)\%$ para $\beta > 0,6$;
- limite de D: $50 \text{ mm} \leq D \leq 500 \text{ mm}$;
- limite de R_D : $7 \cdot 10^4 \leq R_D \leq 10^7$ para $\beta < 0,44$ ou $2 \cdot 10^4 \leq R_D \leq 10^7$ para $\beta \geq 0,44$.

Fator de expansão isentrópica:

$$\varepsilon_1 = \left[\left[(k\tau^{2/k})/(k-1) \right] \left[(1-\beta^4)/(1-\beta^4\tau^{2/k}) \right] \left[(1-\tau^{(k-1)/k})/(1-\tau) \right] \right]^{1/2} \quad [3.23]$$

onde:

τ = relação P_2/P_1 das pressões absolutas a jusante (P_2) e a montante (P_1);

k = coeficiente $k = C_p/C_v$.

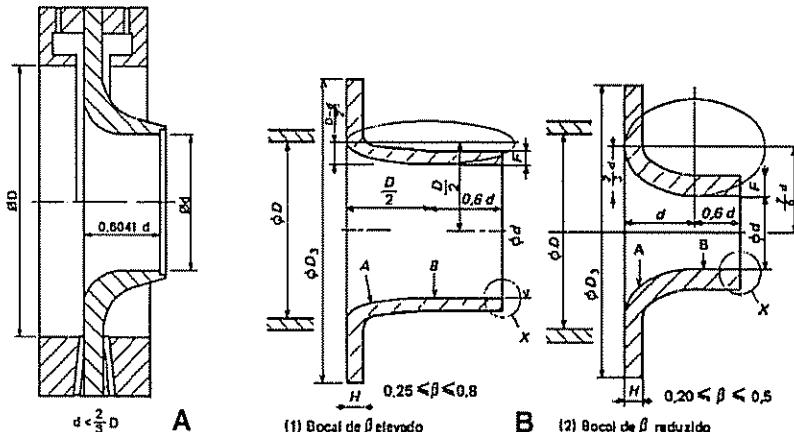


FIGURA 3.18 Bocais de vazão: (A) ISA; (B) ASME, *Long radius*.

3.3.5 Venturis

Os tubos de Venturi são especialmente recomendados quando se requer um elemento primário tratado na norma ISO 5167 e que provoque pouca perda de carga, com uma pressão diferencial apreciável.

A forma dos tubos de Venturi clássicos é simples:

- uma parte cilíndrica, onde ficam as tomadas de alta pressão;
- o cone convergente, com ângulo de 21°;
- a garganta, cilíndrica, com comprimento igual ao diâmetro, e as tomadas de baixa pressão;
- o cone divergente, com ângulo de 7° a 15°.

Na maioria das realizações, as tomadas de alta e as de baixa possuem anéis "piezométricos", para obter uma pressão média em cada plano. Os tubos de Venturi clássicos podem ser realizados de três maneiras, de acordo com a Norma ISO 5167:

- fundidos;
- usinados;
- calandrados e soldados.

Geralmente, são preferidos os usinados para pequenos diâmetros, de 2" a 8", e os calandrados e soldados para os maiores. Os materiais de fabricação são os mais variados, desde aço carbono, inox, bronze, Hastelloy, Monel ou PVC ou fibra de vidro, entre outros.

Tubos de Venturi de seção retangular, com contração em um ou dois planos podem ser realizados, baseados na ref. [5.9], para aplicação em dutos de ar de combustão de caldeiras ou de fornos industriais, ou outra em que o trecho reto é relativamente curto. Para os tubos de Venturi, os parâmetros são os seguintes:

Coeficiente de descarga

- Fundido $C = 0,984$
- Usinado $C = 0,995$
- Calandrado $C = 0,985$

Valor de β

- Fundido $0,3 \leq \beta \leq 0,75$
- Usinado $0,4 \leq \beta \leq 0,75$
- Calandrado $0,4 \leq \beta \leq 0,7$

Incerteza sobre C

- Fundido 0,7%
- Usinado 1%
- Calandrado 1,5%

Limite de D

- Fundido $100 \text{ mm} \leq D \leq 800 \text{ mm}$
- Usinado $50 \text{ mm} \leq D \leq 250 \text{ mm}$
- Calandrado $200 \text{ mm} \leq D \leq 1.200 \text{ mm}$

Limite de R_D

- Fundido $2 \cdot 10^5 \leq R_D \leq 2 \cdot 10^6$
- Usinado $2 \cdot 10^5 \leq R_D \leq 1 \cdot 10^6$
- Calandrado $2 \cdot 10^5 \leq R_D \leq 2 \cdot 10^6$

Fator de expansão isentrópica ε_1

Para calcular o coeficiente de expansão isentrópica dos tubos de Venturi, usa-se a mesma equação dos bocais de vazão.

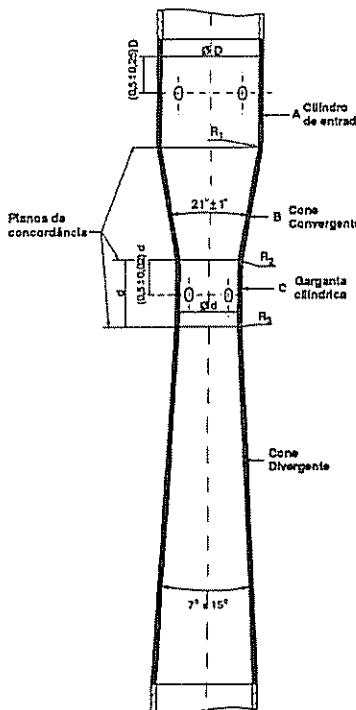


FIGURA 3.19 Tubo de Venturi clássico.

No caso de medição de vazão de ar de combustão de caldeiras ou de fornos industriais, o Venturi *Special Intake* é uma solução de baixo custo que não requer trecho reto a montante: o ar entra diretamente no cone convergente. Este pode ser aberto diretamente ao ar livre ou colocado na saída da caixa do filtro-silenciador. No primeiro caso, a alta pressão do transmissor é aberta à pressão atmosférica; no segundo, a alta pressão é tomada na caixa do filtro-silenciador.

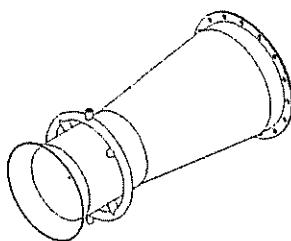


FIGURA 3.20 Venturi *Special Intake*.

No caso de dutos retangulares o aerofólio é uma solução adequada, porém de custo maior que o Venturi retangular, quando o trecho reto for mais reduzido.

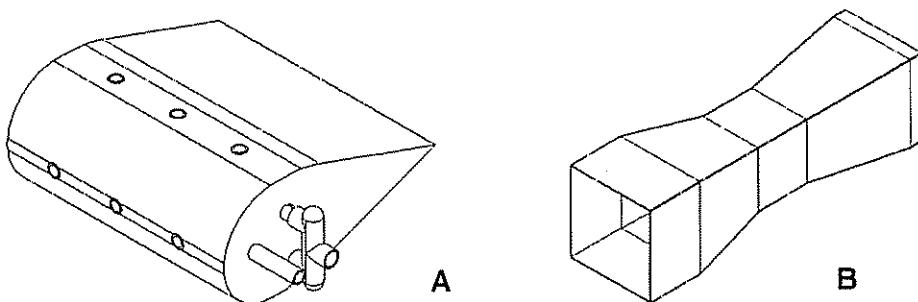


FIGURA 3.21 Elementos primários para dutos retangulares:
(A) aerofólio; (B) Venturi retangular.

3.3.6 Medidores Diferenciais de Inserção

Os medidores diferenciais de inserção são empregados cada vez mais freqüentemente na indústria, devido à sua facilidade de instalação. Derivados do tubo de Pitot original, que era utilizado para levantamentos de perfis de velocidade, principalmente em laboratórios, os sensores modernos surgiram nos anos 70. O Annubar, da Dietrich e o Verabar, da Veris, ambas empresas americanas, são atualmente os medidores diferenciais de inserção mais conhecidos.

3.3.6.1 Tubo de Pitot

O tubo de Pitot, original, foi concebido inicialmente para medir velocidades de rios. Aperfeiçoado por Prandtl, passou a ser aplicável a tubulações, porém, continua sendo conhecido como tubo de Pitot. Mais tarde, o Pitot industrial, de forma reta, foi desenvolvido para permitir sua inserção e remoção em carga. Até então, o Pitot fornecia somente a velocidade local, no ponto de medição. Para se concluir a vazão, era preciso fazer um levantamento ao longo de um diâmetro e calcular a velocidade média, mediante fatores de ponderação.

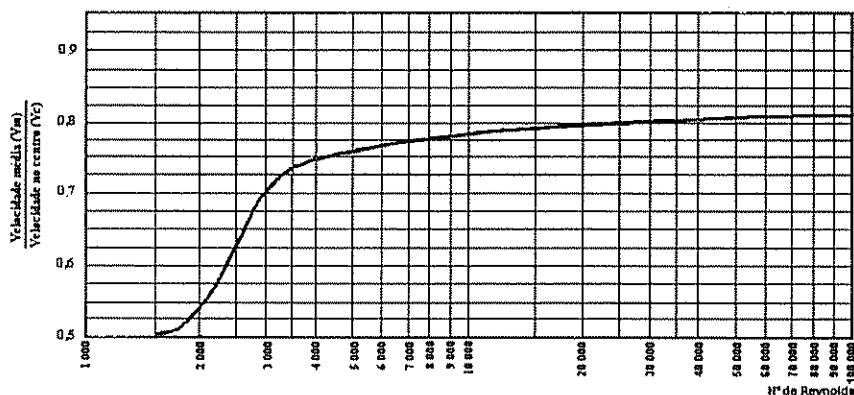


FIGURA 3.22 Relação V_m/V_c em função do número de Reynolds.

A figura 3.22 mostra que a relação velocidade média/velocidade no centro varia de acordo com o número de Reynolds. O valor de V_m/V_c passa de 0,5 quando o escoamento é laminar, para R_D abaixo de 2 000, a valores em torno de 0,8, quando o escoamento é turbulento.

Estudos de grande interesse foram desenvolvidos no sentido de definir, através de equações empíricas, o perfil de velocidades e a velocidade média conhecendo a velocidade no centro, ou de deduzir a velocidade média a partir da média das velocidades ao longo de um diâmetro, em função do número de Reynolds. Observa-se que a média das velocidades, calculada a partir de levantamento das velocidades tomadas a intervalos uniformes ao longo de um diâmetro, é diferente da velocidade média ($V_m = \text{Vazão}/\text{Área}$), já que as velocidades próximas ao centro afetam áreas menores que as afetadas por velocidades próximas às paredes da tubulação, como mostra a figura abaixo.



FIGURA 3.23 Perfis de velocidade de escoamento laminar e turbulento.

Quando o tubo de Pitot é utilizado para fazer uma medição de vazão por varredura ao longo de um diâmetro, os pontos de tomada de velocidades são definidos de acordo com a distribuição estatística de Chebyshev, ou dos centróides de áreas iguais, conforme tabela 3.12, onde r é a distância do ponto ao centro, dividida pelo raio da tubulação. Este método permite que a velocidade média seja calculada fazendo simplesmente a média aritmética das velocidades assim levantadas.

Estudos detalhados sobre a comparação dos dois métodos mostram que os resultados práticos sobre o cálculo da vazão são equivalentes.

A equação geral dos tubos de Pitot clássicos (Prandtl) é:

$$V_{(m/s)} = \sqrt{2 \Delta P_{(Pa)} / \rho_{kg/m^3}}$$

A incerteza de um tubo de Pitot clássico fabricado, de acordo com a ref. [1.5] é 1,5%. A de um tubo de Pitot industrial não aferido é de 3%, aferido 1,5%.

TABELA 3.12

Localização dos Pontos de Medição de Velocidades, em Tubos em Função do Raio r

Quantidade de pontos, no raio	Métodos	
	Centróides de áreas iguais $r =$	Chebyshef $r =$
$n = 2$	0,500	0,4597
	0,866	0,8881
$n = 3$	0,4082	0,3827
	0,7071	0,7071
	0,9129	0,9239
$n = 4$	0,3536	0,3203
	0,6124	0,6383
	0,7906	0,7699
	0,9354	0,9473
$n = 5$	0,3162	0,2891
	0,5477	0,5592
	0,7071	0,7071
	0,8367	0,8290
	0,9487	0,9572

EXEMPLO:

Medição de vazão de ar (pressão absoluta = 1,130 bar e temperatura = 28 °C) por meio de um tubo de Pitot clássico, fazendo uma varredura com o método dos centróides de áreas iguais, com $n = 3$, numa tubulação de 800 mm de diâmetro. As pressões diferenciais medidas foram as seguintes:

$$\rho_0 \text{ do ar a } 0^\circ\text{C e } 1 \text{ atm} = 1,293 \text{ kg/Nm}^3$$

$$\rho_1 \text{ do ar a } 28^\circ\text{C e } 1,130 \text{ bar} = 1,293 \cdot 1,130 \cdot 273,15 / (1,01325 \cdot 301,15) = \\ = 1,308 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Vazão "atual": } Q = (\pi \cdot 0,8^2 / 4) \cdot 10,71 = 5,383 \text{ m}^3/\text{s} \text{ ou } 19\,380 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Vazão em Nm}^3/\text{h: } QN = 1,308 / 1,273 = 19,913 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Pressão diferencial, medida com Pitot, em Pa	Velocidade calculada com a equação $V = (2\Delta p/\rho_1)^{0,5}$, em m/s
48	8,57
74	10,63
95	12,05
98	12,24
77	10,85
52	9,92
Velocidade média = $\Sigma V / 6$	
	10,71

Para os tubos de Pitot industriais, a equação inclui um fator de adaptação K:

$$V_{(m/s)} = K \sqrt{2 \Delta p_{(Pa)} / \rho_{(kg/m^3)}}$$

no caso da realização do Pitot industrial da figura 3.24, $K = 0,825$.

Existem outras formas de Pitot inseríveis por uma abertura lateral reduzida, entre os quais um instrumento com pontas de medição reversíveis, ref. [5.1], empregado em "pitotmetria" por serviços públicos de distribuição de água.

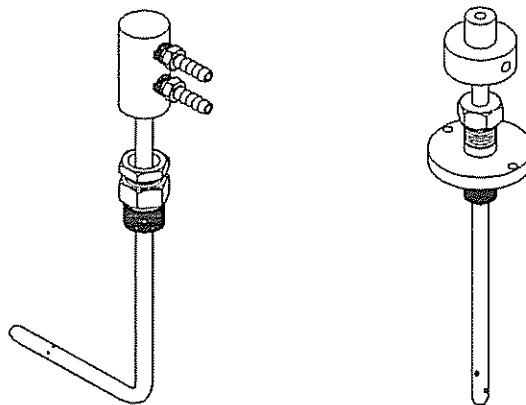


FIGURA 3.24 Tubos de Pitot clássico e industrial.

3.3.6.2 Tubo de Pitot de média

No fim dos anos 70, o Pitot de média (também chamado Pitot de múltiplas velocidades ou Pitot multifuros) foi pesquisado e desenvolvido com sucesso. A finalidade do Pitot de média é tomar, ao mesmo tempo, as pressões dinâmicas relativas a 4, 6 ou 8 velocidades ao longo de um diâmetro da tubulação e fazer sua média. Para tanto, os furos de medição são distribuídos segundo a teoria estatística de Chebishev. Da velocidade média (V), a vazão (Q) é calculada pela equação:

$$Q \text{ (m}^3/\text{s)} = S \text{ (m}^2\text{)} \cdot V(\text{m/s}),$$

sendo S a seção da linha de processo.

A equação geral dos tubos de Pitot industrial é a mesma que para os clássicos, afetada de um fator K que depende da realização do instrumento, especialmente do perfil da haste de medição.

O primeiro perfil desenvolvido foi o cilíndrico, que revelou apresentar não-linearidades em relação ao número de Reynolds, com influência nos furos de baixa pressão. A zona de baixa pressão criada pela haste do Pitot depende do ponto de "descolamento" do tubo das linhas de escoamento.

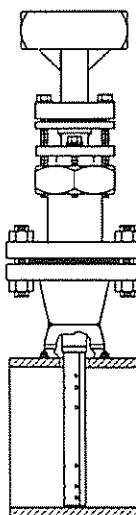


FIGURA 3.25 Pitot de média flangeado.

Várias soluções foram encontradas, para resolver esse problema:

- a mais simples foi separar a tomada de baixa pressão e colocá-la na parede do tubo, para que não fique sujeita à zona de depressão;
- a outra foi pesquisar um perfil que definisse adequadamente o ponto de "descolamento" das linhas de escoamento;
- a solução mais recente foi pesquisar um perfil que deslocasse o ponto de descolamento para a jusante das tomadas de baixa pressão, sem preocupar-se com o ponto exato de descolamento.

Existem diversas realizações, para compatibilizá-los com as aplicações e as linhas de processo:

- fixação com conexão provida de anilha, ou flangeados;
- inseríveis em carga, com vários tipos de macacos;
- com cabeçote provido de molas para apoio da haste na parede oposta;
- com as tomadas perpendiculares ao eixo da tubulação, para linhas verticais.

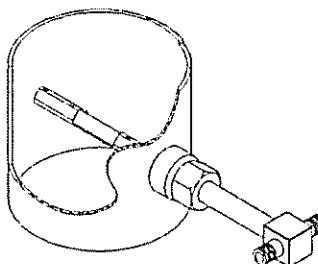


Figura 3.26 Pitot de média para tubo vertical.

Os Pitot de média são geralmente disponíveis para diâmetros entre 2" e 72", porém, são realizados sob encomenda para diâmetros de vários metros. Os custos de instalação reduzidos compensam largamente seu preço mais elevado, quando comparado à placa de orifício.

Desde que instalado numa tubulação de diâmetro perfeitamente conhecido, a precisão anunciada pelos fabricantes é 0,5%, em relação à pressão diferencial gerada.

3.3.7 Medidores Especiais por Diferença de Pressão

Certos medidores utilizam como princípio de funcionamento leis da física que resultam em geração de pressão diferencial. Entretanto, diferentemente dos medidores desta seção 3.3, esses não são relacionados com o teorema de Bernoulli.

3.3.7.1 Medidores centrífugos

Os medidores centrífugos aproveitam a diferença de pressão criada pela mudança de direção do fluido numa curva. São utilizados para avaliar a vazão quando não há necessidade de precisão como forma pouco dispendiosa de medidor. A equação desses medidores é a seguinte:

$$Q_m = 1,1107 \sqrt{r/2D \cdot D^2 \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho \cdot Fr}} \quad [3.24]$$

onde:

Q_m = a vazão mássica, em kg/s;

r = o raio médio da curva, em m;

D = o diâmetro da tubulação e da curva, em m, à temperatura de operação;

Δp = a pressão diferencial, em Pa;

ρ = a massa específica do fluido, em kg/m³;

Fr = o fator de correção do número de Reynolds, de acordo com a tabela a seguir:

R/D	D/k	RD							
		50 000	75 000	100 000	200 000	300 000	500 000	10^6	$>5 * 10^6$
1,0	>1000	0,968	0,995	1,010	1,040	1,057	1,075	1,095	1,110
	500	0,955	0,995	<i>1,015</i>	<i>1,045</i>	<i>1,060</i>	<i>1,075</i>	<i>1,090</i>	<i>1,105</i>
	50-100	0,940	0,995	1,019	1,051	1,062	1,075	1,085	1,095
1,5	>1000	0,936	0,975	0,989	1,005	1,013	1,022	1,028	1,030
	500	0,928	0,970	0,987	<i>1,007</i>	<i>1,017</i>	<i>1,028</i>	<i>1,036</i>	<i>1,040</i>
	50-100	0,919	0,965	0,985	1,009	1,021	1,035	1,045	1,050
4,0	>1000	0,923	0,975	0,998	1,030	1,048	1,067	1,083	1,095
	500	0,852	0,890	0,920	<i>0,954</i>	<i>0,971</i>	<i>0,991</i>	<i>1,009</i>	<i>1,027</i>
	50-100	0,780	0,820	0,841	0,877	0,894	0,915	0,935	0,960

Valores em itálico interpolados ou extrapolados.

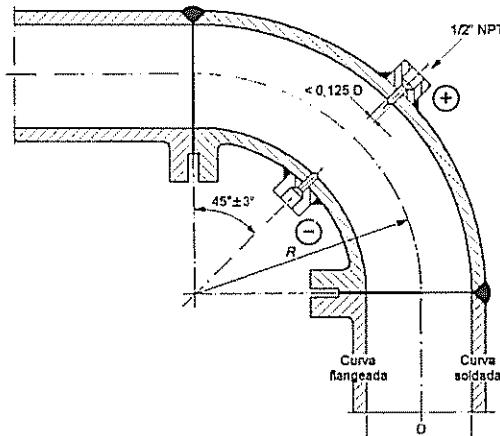


FIGURA 3.27 Medidor centrífugo em curva a 90° comercial, com as tomadas de pressão alta (+) e baixa (-).

EXEMPLO:

Calcular a vazão de água a uma temperatura de 80 °C, numa curva a 90°, considerando que a pressão diferencial medida é 4800 Pa e que o diâmetro do tubo e da curva é 203 mm (8"sch 40), D/k = 1000.

- A densidade da água a 80°C é $\rho = 972 \text{ kg/m}^3$. A viscosidade ν é $0,365 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.
- De acordo com as tabelas de acessórios de tubulação, o raio de uma curva de raio curto de 8", é 203 mm, de forma que, $r/2D = 0,5$.

Cálculo de D_(80 °C)

$$D_{(80\text{ }^{\circ}\text{C})} = 0,203 \left(1 + 60 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \right) = 0,20314 \text{ m.}$$

Cálculo preliminar da vazão, considerando $Fr = 1,000$

$$Q_m = 1,1107 \cdot 0,707 \cdot 0,041268 \cdot 69,28 \cdot 31,177 = 69,995 \text{ kg/s}$$

Cálculo do número de Reynolds

$$\text{Velocidade} = Q_{(\text{m}^3/\text{s})}/S_{(\text{m}^2)} = [69,995/972]/[0,20314^2 \pi/4] = 2,223 \text{ m/s}$$

$$R_D = V \cdot D/v = 2,223 \cdot 0,20314/(0,365 \cdot 10^{-6}) = 1\,237\,000.$$

O valor de Fr é aproximadamente 1,091.

O valor mais aproximado de Q_m é $69,995 \cdot 1,091 = 76,36 \text{ kg/s}$ ou $27\,500 \text{ kg/h}$.

3.3.7.2 Medidores capilares

Os medidores capilares geram uma pressão diferencial Δp , de acordo com a lei de Poiseuille, em função da vazão Q , da 4^{a} potência do diâmetro D do(s) capilar(es) onde circula, do seu comprimento L e da viscosidade μ , de acordo com a seguinte equação:

$$\Delta p_{(\text{Pa})} = Q_{(\text{kg/s})} \cdot \mu_{(\text{Pa s})} \cdot L_{(\text{m})} / (D^4_{(\text{m})} \cdot \rho_{(\text{kg/m}^3)}) \quad [3.25]$$

ou

$$Q_{(\text{kg/s})} = \Delta p_{(\text{Pa})} \cdot D^4_{(\text{m})} \cdot \rho_{(\text{kg/m}^3)} / (\mu_{(\text{Pa s})} \cdot L_{(\text{m})}) \quad [3.26]$$

Geralmente, procura-se uma perda de carga reduzida realizando o elemento primário com um feixe de capilares que não tenha tendência a entupir, e, caso ocorra um entupimento, facilidades para a limpeza.

Para medir a pressão diferencial produzida por medidores capilares, são necessários transmissores ou transdutores extremamente sensíveis, com escalas de poucos Pa.

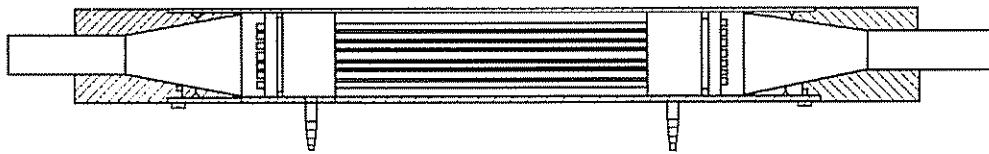


FIGURA 3.28 Medidor capilar da *Furness Controls*.

3.4 MEDIDORES LINEARES

São considerados lineares os medidores de vazão que produzem um sinal de saída diretamente proporcional à vazão, com fator de proporcionalidade constante ou aproximadamente constante na faixa de medição. Desta forma, eles se distinguem dos medidores deprimogênicos, cuja saída é quadrática em função da vazão.

Diferentemente dos medidores deprimogênicos clássicos, cujos elementos primários podem ser fabricados sob encomenda para aplicações determinadas, a partir de materiais e de elementos de tubulação comerciais, esses medidores são necessariamente fornecidos por empresas especializadas de instrumentação, fabricados em série, para serem economicamente viáveis.

O elemento primário, que está interagindo com o fluxo e o transmissor, formam geralmente um conjunto a ser adquirido de um único fornecedor. O instrumento é escolhido num catálogo na faixa mais adequada para a aplicação, entre as propostas pelos fornecedores, não sendo sempre possível aproveitar integralmente a rangeabilidade anunciada.

As normas relacionadas aos medidores lineares são orientadas a definir a terminologia, o uso e a interpretação dos resultados, às vezes os tamanhos, as condições de instalação, as faixas de vazão e a precisão mínima exigível, raramente lidam com assuntos ligados à fabricação, nunca com detalhes construtivos.

A precisão, anunciada pelo fabricante, pode ser referida ao fim da escala ou ao valor da vazão lida. Os medidores que apresentam uma rangeabilidade extensa têm sua precisão especificada de forma combinada: em relação ao valor lido, até 10 ou 20% da escala, e, em relação ao fim da escala, na faixa baixa.

3.4.1 Medidores de Área Variável

Os medidores de área variável oferecem uma área de passagem que é uma função da vazão. A variação da área resulta do deslocamento de um "flutuador" num tubo cônico ou de um obturador em forma de pistão, que descobre janelas de passagem no cilindro que faz parte do corpo do medidor.

O mais conhecido dos medidores de vazão de área variável é o rotâmetro.

O princípio de funcionamento do rotâmetro é extremamente simples: o fluido, líquido, gás ou excepcionalmente vapor, entra pela parte inferior do tubo cônico no sentido vertical ascendente. Ao encontrar o flutuador, uma força é produzida para cima e o flutuador é suspenso até descobrir uma área anular suficiente para a passagem do fluido. O flutuador assume uma posição de equilíbrio quando as forças para as quais é submetido para cima e para baixo são iguais.

- **Forças para cima:**

$$F_c = F_a \text{ (empuxo de Arquimedes)} + F_{pd} \text{ (pressão diferencial} \times \text{área}).$$

- **Força para baixo:**

$$F_b = \text{peso do flutuador}.$$

Nos rotâmetros convencionais, a vazão é lida diretamente da posição de uma referência marcada no flutuador, frente a uma escala gravada no tubo cônico transparente, feito de vidro ou de matéria plástica.

Existem medidores de área variável com tubo cônico metálico que são usados quando o fluido não é transparente ou é incompatível com o vidro, devido à pressão ou à temperatura. Neste caso, a indicação ou a transmissão é feita através de um acoplamento magnético.

Os rotâmetros são um dos raros instrumentos medidores de vazão que dispensam a necessidade de trecho reto para seu funcionamento.

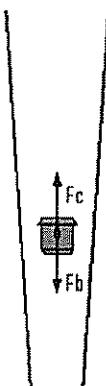


FIGURA 3.29 Princípio do rotâmetro.

Atualmente, os rotâmetros são principalmente usados para leituras locais ou em laboratórios. Raras são as aplicações em que os medidores de área variável modernos são usados como elementos primários, em conjunto com transmissores. Existem rotâmetros de precisão que podem ser usados para aferir outros medidores.

Rotâmetros podem ser encontrados em diâmetros variando de 2 a 300 mm. A precisão pode ser muito boa, 0,5% do valor lido, no caso de medidores "padrões", a 10% do fim de escala, para indicadores industriais.

Os rotâmetros são instrumentos manufaturados em série, para faixas de medição determinadas por cada fabricante. As capacidades dos rotâmetros são tabeladas considerando que o fluido é água, no caso de líquidos, ou ar (20°C e 1 atm,) no caso de gás.

Para vazões Q_i , de líquidos com massa específica ρ ou outros que a água de massa específica ρ_a , aplica-se uma equação de equivalência à água, Q_a , para selecionar o rotâmetro de capacidade apropriada.

$$Q_a = Q_i \cdot \rho \cdot \sqrt{(\rho_f - \rho_a) / \rho_a} \cdot \left\{ 1 / \sqrt{(\rho_f - \rho) \cdot \rho_l} \right\} \quad [3.27]$$

Para vazões atuais Q_i , de fluidos compressíveis com massa específica de operação ρ_l , outros que o ar a 20°C e 1 atm, aplica-se uma equação de equivalência ao ar Q_L a 20°C e 1 atm, para selecionar o rotâmetro de capacidade apropriada.

$$Q_{L(ar)} = Q_i \cdot \rho_1 \cdot \sqrt{[(\rho_f / \rho_{L(ar)}) - 1] / (\rho_f / \rho_1)} \quad [3.28]$$

De acordo com o material do flutuador, os valores de ρ_f e de $\sqrt{(\rho_f / \rho_{L(ar)}) - 1}$ estão na tabela a seguir.

Os rotâmetros foram muito pesquisados até surgirem medidores lineares mais compatíveis com sinais de transmissão. Para medições precisas, foram desenvolvidas curvas de influência da viscosidade, baseadas em critério de escoamento semelhante ao número de Reynolds.

Material	Densidade kg/dm ³	$\sqrt{(\rho_f / \rho_{L(ar)}) - 1}$
Aço inox	8,020	82,08
Alumínio	2,700	47,02
Monel	8,840	86,17
Níquel	8,910	86,51
Titânio	4,500	61,48

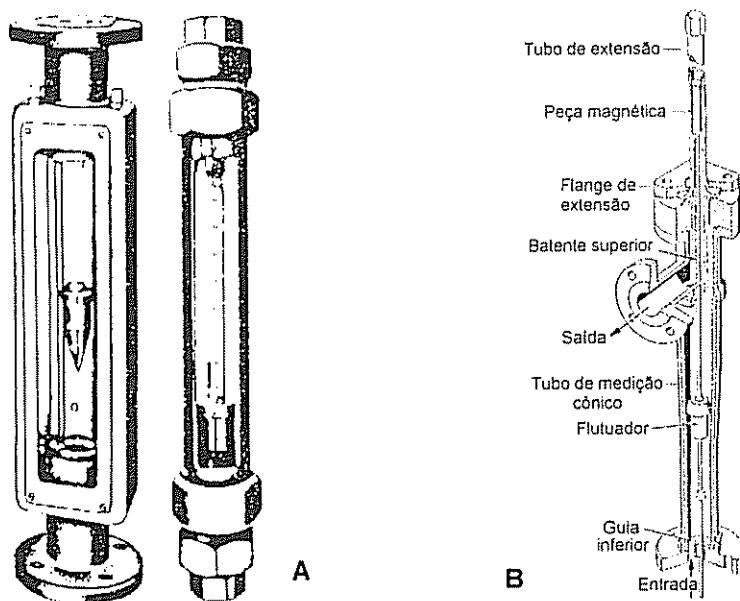


FIGURA 3.30 Rotâmetros: (A) convencional, de vidro, para fluidos transparentes; (B) com tubo metálico e acoplamento magnético.

3.4.2 Medidores a Efeito Coriolis

Gaspard Coriolis, engenheiro e matemático francês estabeleceu, no início do século XIX, que uma massa m deslocando-se com uma velocidade relativa \vec{v}_r em relação a um sistema, por sua vez em movimento de rotação $\vec{\Omega}$, é submetida a uma força \vec{f}_c de acordo com a seguinte equação:

$$\vec{f}_c = 2m \cdot \vec{\Omega} \wedge \vec{v} \quad [3.29]$$

O símbolo \wedge é para produto vetorial

À força \vec{f}_c , deu-se o nome de força de Coriolis. Para melhor entender a força de Coriolis, imaginemos um sistema constituído por um disco em rotação com velocidade

angular constante e 2 lançadores de bolas, um no centro e outro na borda externa do disco, girando junto com o disco, formando um "sistema de referência". Quando a bola é lançada do centro em direção ao lançador da borda externa, se a direção inicial da bola for visando o ponto instantâneo em que estava no momento do lançamento, a bola não atingirá o objetivo. A trajetória da bola, em relação ao disco, será uma curva, chegando atrás do objetivo inicialmente visado. Em relação ao sistema de referência, é como se uma força tivesse desviado a bola do seu objetivo.

Para não desviar do objetivo, a bola deveria ter adquirido uma velocidade tangencial, à medida que se afastasse do centro. A cada Δr de afastamento do centro, se a bola adquirisse um acréscimo de velocidade tangencial $\Delta r \cdot \Omega$, atingiria o alvo.

Em sentido contrário, se o lançador da borda do disco atirar a bola em direção ao do centro, a bola seguirá uma curva, devido à velocidade tangencial que tinha no momento do lançamento, não atingindo o objetivo, como precedentemente. Novamente, tendo como referência o disco, é como se uma força desvisasse a bola do objetivo.

Se fosse colocado um tubo para guiar a bola entre os dois lançadores, a bola atingiria necessariamente o objetivo, tendo, para tanto, que apoiar-se na parede do tubo com a força necessária para incrementar sua velocidade tangencial, afastando-se do centro, ou decrementá-la em sentido contrário. Esta é a força de Coriolis.

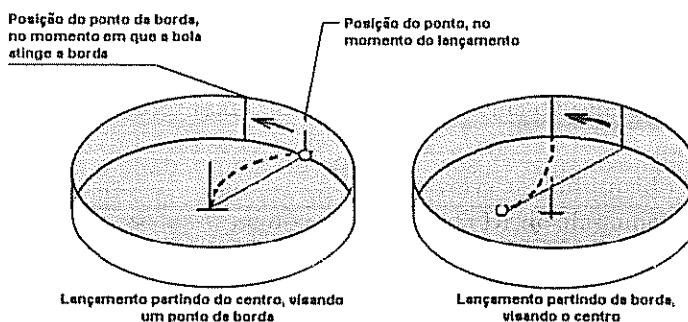


FIGURA 3.31 Ilustração do efeito Coriolis.

O princípio pode ser aplicado a um medidor formado por um tubo em forma de U, animado de um movimento oscilatório, percorrido por um fluido a uma vazão constante. Num elemento de tempo muito curto, o tubo pode ser considerado em movimento de rotação. Considera-se um elemento de fluxo de massa numa das partes retas do U. Quando este elemento se afasta do centro de rotação, na parte inicial do seu percurso no tubo, a força de Coriolis se dá em direção contrária ao do movimento angular. O elemento de fluido acaba por adquirir a velocidade angular imposta pela oscilação do tubo, e percorre a curva do U com esta velocidade. Quando inicia o segundo ramo do U esta velocidade angular produz uma força em sentido contrário à primeira. Em se tratando de um escoamento contínuo, a cada elemento de fluido que se desloca na primeira parte do U corresponde simetricamente, um outro, que se desloca na outra. Assim sendo, as forças atuam de forma a criar em conjugado que acaba provocando uma torção no tubo em U.

Num medidor, a vazão mássica Q_m corresponde à velocidade v_r do fluido no tubo em forma de U. Este tubo é posto a oscilar em torno de um eixo OO' perpendicular aos ramos do U; sua velocidade angular instantânea é Ω .

Sendo:

ρ a massa específica do fluido;

L o comprimento de um ramo do U;

A a área da seção do tubo em U;

d o afastamento dos ramos do U.

Estabelecem-se, facilmente, as seguintes expressões:

$$\text{vazão mássica} \quad Q_m = \rho \cdot A \cdot v_r$$

$$\text{massa num ramo do U} \quad m = \rho \cdot A \cdot L$$

$$\text{força de Coriolis num ramo} \quad f_c = 2\rho \cdot A \cdot L \cdot \Omega_r = 2Q_m \cdot L \cdot \Omega$$

$$\text{conjugado de torção} \quad \Gamma_c = 2Q_m \cdot \Omega \cdot L \cdot d \quad [3.30]$$

O conjugado de torção Γ_c é devido ao efeito das forças de Coriolis, que agem sobre o fluido nos dois ramos do U com velocidades v_r e $-v_r$.

Devido ao conjugado Γ_c , os dois ramos do U sofrem uma torção de ângulo θ , equilibrada por uma força de reação elástica $\Gamma_e = k \theta$; sendo k uma constante, deduz-se que, no equilíbrio, temos:

$$\theta = 2Q_m \cdot \Omega \cdot L \cdot d / k, \quad \text{ou seja} \quad Q_m = k\theta / (2\Omega \cdot L \cdot d) \quad [3.31]$$

À velocidade angular Ω , sendo função do tempo, dá-se o mesmo para o ângulo θ ; este é medido por sensores de proximidade de precisão cujos sinais, depois de condicionamento, permitem obter uma tensão proporcional à vazão mássica Q .

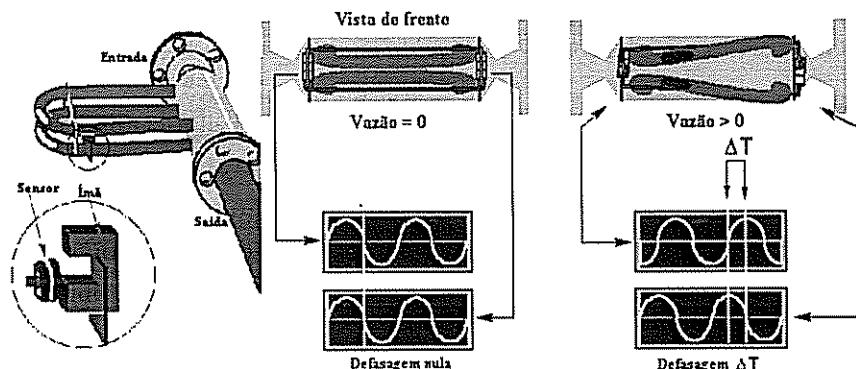


FIGURA 3.32 Princípio de funcionamento do medidor a efeito Coriolis da Micro-Motion.

As limitações são o tamanho máximo, que é limitado à tubulações de 6", o custo elevado, os limites de pressão e temperatura e, eventualmente, à alta perda de carga.

Os medidores a efeito Coriolis a tubos vibrantes foram desenvolvidos inicialmente para medir vazões de líquidos. Medir vazões de gases foi impossível por muito tempo. Os gases possuem uma densidade muito mais baixa que os líquidos, e a massa contida nos tubos de medição representa uma parcela pequena da massa dos próprios tubos. Uma mudança de densidade no gás altera muito pouco a massa vibrante, e o efeito de Coriolis é quase imperceptível. Entretanto, a tecnologia moderna permite medir a vazão mássica dos gases, com precisão de 0,5%, tendo algumas restrições.

As realizações são feitas, geralmente, com dois tubos retos ou curvos que oscillam em oposição de fase, para evitar a transferência de vibrações à linha de processo. Os instrumentos que utilizam tubos curvos soldados a um único cabeçote, podem permitir que o fluido seja distribuído em paralelo ou reconduzido em série pelos dois tubos. Esta alternativa é utilizada quando existe possibilidade de incrustação e que se quer garantir que a mesma vazão passe pelos dois tubos, com sacrifício da perda de carga.

Dos medidores de vazão atualmente fabricados, os medidores a efeito Coriolis são os únicos a atingir a barreira de precisão de 0,1%, excluindo os instrumentos de laboratório. A precisão é geralmente definida em relação ao valor medido, e não o fim de escala, com uma rangeabilidade limitada. Geralmente, uma parcela da precisão é devida ao desvio de zero, aumentando a imprecisão à medida que o valor é mais próximo de zero.

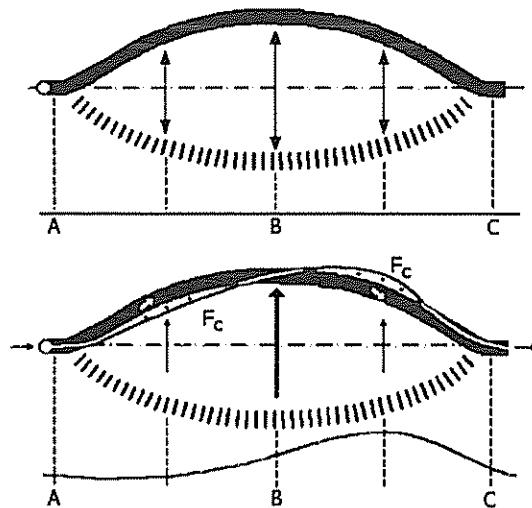


FIGURA 3.33 Representação esquemática do movimento num medidor a efeito Coriolis de tubo reto.

Problemas de instalação afetam mais certos instrumentos, especialmente no que se refere às tensões da tubulação sobre os tubos de medição. Alguns instrumentos possuem uma camisa de segurança, para a eventualidade do tubo de medição estourar, se for submetido a uma abrasão, diminuindo sua espessura, com o passar do tempo. Esta camisa pode também ter outras funções: certos fabricantes a preenchem com um gás neutro

(argônio) ou fazem o vácuo, a fim de evitar que uma condensação possa se produzir no tubo de medição, provocando erros nos resultados. As camisas podem também servir para aquecer o ambiente local em torno do tubo, evitando, assim, gradientes de temperatura que possam gerar erros.

Existem medidores capazes de medir a vazão com pressão até 600 bar e temperatura até 350 °C. Para outros efeitos, recursos de compensação eletrônica foram encontrados e são satisfatórios, na maioria das instalações.

Alguns problemas de realização resultam deste princípio, em particular no que se refere a fluidos de baixa densidade de operação: se a massa do tubo for muito mais elevada que a do fluido contido, a precisão da densidade será afetada. Por outro lado, a elasticidade do tubo deve ser constante, não influenciada por tensões mecânicas provocadas pela linha de processo. Por outro lado, se uma eventual incrustação do fluido no tubo ocorrer, a massa fixa aumentará e a variável diminuirá, provocando resultados errados.

Certos medidores vibram à freqüência constante, e não medem a densidade do fluido, entretanto, outros podem aproveitar as oscilações para medir a densidade do fluido.

O conhecimento da densidade pode ser útil se, além da vazão mássica, for desejada a informação da vazão volúmica, ou se for necessária uma medida de concentração, de porcentagem de sólidos, de Brix ou simplesmente para saber esta propriedade.

No caso da vazão volúmica, pode ser calculada dividindo a vazão mássica pela densidade.

Para medir a densidade, o sistema oscilante opera como um sistema mola-massa. A freqüência de ressonância de um sistema mola-massa é determinada pela elasticidade da mola e a massa em questão. Esta relação é representada pela equação:

$$f = 1/(2\pi) \cdot \sqrt{(K/m)} \quad [3.32]$$

onde f é a freqüência natural (de ressonância), K uma constante representando a rigidez (elasticidade) do tubo, e m é a massa do sistema, isto é, do tubo e do fluido contido nele. Se a massa do fluido mudar, a freqüência de ressonância será outra, e a freqüência de excitação do medidor será automaticamente reajustada para esta nova freqüência, via reimplementação na eletrônica do *driver*.

Quanto maior a densidade do fluido, menor será a freqüência de ressonância, numa relação quadrática.

Uma outra forma de realização de medidor a efeito Coriolis, prevista inicialmente para medir a vazão de gases em baixa pressão relativa, consiste em provocar deformações no modo radial, como se vê na figura 3.34. Neste princípio, o tubo de medição é provido de dois excitadores, que deformam o tubo, provocando-lhe ovalizações a uma freqüência de vários kHz. Diferentemente dos medidores a efeito Coriolis tradicionais, o eixo do tubo de medição não se desloca; o tubo é deformado no formato da seção. Quando não há vazão, o tubo não é sujeito a outra deformação, senão àquela devida à excita-

ção: os dois pares de sensores de deformação, situados simetricamente ao excitador, a montante e a jusante, geram sinais exatamente em fase. Quando há vazão, a força de Coriolis se traduz por uma deformação complementar, e as tensões geradas pelos pares de sensores não estão mais em fase. Esta defasagem é proporcional à vazão mássica do gás que passa no tubo de medição.

A precisão é da ordem de 0,5%, com rangeabilidade de 60:1. A perda de carga é desprezível.

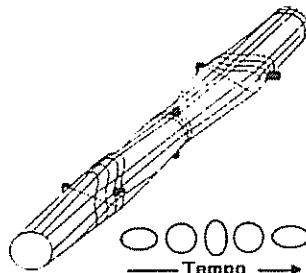


FIGURA 3.34 Princípio de funcionamento do medidor a efeito Coriolis a deformações radiais.

O efeito Coriolis foi também aproveitado de maneira completamente diferente para medir a vazão de sólidos secos, em pó ou material britado, como cimento ou aditivos sólidos numa aciaria, por exemplo. O princípio de funcionamento é o seguinte: o material é alimentado verticalmente, por gravidade, e cai numa roda provida de palhetas que o projetam radialmente, pela força centrífuga. O material é, então, redirecionado para baixo pela parede do medidor e cai em direção à saída por gravidade. Como resultado da força de Coriolis produzida pela massa das partículas nas palhetas, é criado um conjugado, cujo valor é diretamente proporcional à vazão mássica do material que passa pelo medidor. A precisão é da ordem de 0,5%, após calibração.

As normas sobre medidores a efeito Coriolis (ANSI/ASME MFC-11-M e ISO/DIS 10790) dão as bases para o uso do medidor a efeito Coriolis em transferência de custódia.

3.4.3 Medidores Eletromagnéticos

Os medidores magnéticos são baseados na lei de Faraday, que enuncia que, quando um condutor móvel se desloca num campo magnético, aparece nas suas extremidades uma força eletromotriz proporcional à intensidade do campo magnético, ao seu comprimento e à velocidade de deslocamento.

O princípio básico dos medidores eletromagnéticos é mostrado na figura 3.35. O fluido tem suas linhas de velocidade perpendiculares ao campo magnético. De acordo com a lei de Faraday, o movimento do fluido atravessando o campo magnético de intensi-

dade B , com a velocidade V , produz uma *fem*, que pode ser medida pelos eletrodos distantes de D , em contato com o fluido. A *fem* é relacionada à vazão da seguinte forma:

$$e_{(\text{volt})} = B_{(\text{weber/m}^2)} \cdot D_{(\text{m})} \cdot V_{(\text{m/s})}$$

Sendo a vazão volúmica relacionada à velocidade pela equação $Q = (\pi D^2/4) \cdot V$, temos:

$$Q_{(\text{m}^3/\text{s})} = e_{(\text{volt})} \cdot (\pi/4) \cdot D_{(\text{m})} \cdot B_{(\text{weber/m}^2)} \quad [3.33]$$

O princípio de funcionamento implica que o fluido deva ser condutor de electricidade, o que reduz as aplicações deste tipo de medidor aos líquidos que tenham alguma condutibilidade. Os derivados do petróleo são excluídos das possíveis aplicações.

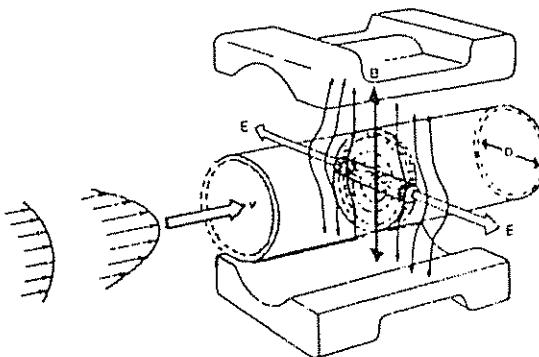


FIGURA 3.35 Representação esquemática de um medidor eletromagnético.

O campo magnético pode ser gerado por imã permanente, ou por bobinas excitadas por corrente alternada. Os imãs permanentes são aplicados em raros casos especiais, como o de medir a vazão de vasos sanguíneos, na medicina. São preferidas as bobinas para gerar o campo magnético, por não criarem o efeito de polarização e a formação de sais isolantes depositados nos eletrodos, interrompendo o circuito de medição. Inicialmente, as bobinas com corrente alternada foram energizadas pela tensão da rede elétrica, porém o consumo de eletricidade era elevado. Prefere-se, modernamente, a geração de corrente contínua pulsante, em baixa freqüência, que tem a vantagem de consumo muito baixo e de ser distinta da freqüência da rede, facilitando a filtragem do sinal elétrico.

A *fem* gerada é da ordem de microvolts, necessitando um condicionamento de sinal apropriado para medir o sinal num ambiente industrial, com ruídos eletromagnéticos de várias ordens de grandeza, superiores em amplitude. O bom aterrramento é um dos requisitos essenciais para o funcionamento desses medidores; quando são instalados em tubulações de material isolante (PVC), anéis de aterrramento são indispensáveis.

Os medidores eletromagnéticos são muito empregados nas indústrias químicas, de papel e celulose e para medir a vazão de água e de esgotos. Sua aplicação à medição de ácidos e outros produtos químicos corrosivos exige que as "partes molhadas" possam ser escolhidas entre materiais apropriados, como os da tabela seguinte.

TABELA 3.13
Principais Materiais Empregados na Fabricação de Medidores Eletromagnéticos

Materiais dos eletrodos		
Material	Resistência à corrosão	Resistência à abrasão
Inox 316	Boa	Média
Hastelloy	Bosa	Média
Platina	Excelente	Pobre
Tántalo	Boa	Média
Titânio	Boa	Boa
Monel	Boa	Média
Carpenter 20	Boa	Excelente

Material do Revestimento Isolante					
Revestimento	Resistência à abrasão		Resistência à corrosão	Temperatura máxima (°C)	Aplicações
	Média	Severa			
Teflon	Boa	Pobre	Excelente	300	Ácidos, bases. Xaropes, licores. Bebidas Não recomendado para ClH e FH.
Poliuretano	Excelente	Excelente	Média	150	Lamas, efluentes.
Neopreno	Excelente	Boa	Média	170	Água natural Água tratada Água quente e fria.
Vidro	Excelente	Pobre	Excelente	-	Ácidos, bases. Produtos alimentícios.
Fibra de vidro	Média	Pobre	Excelente, em geral	250	Massa de papel, ClH. Efluentes.
Cerâmica	Excelente	Excelente	Excelente	250 Variações de temperatura devem ser lentas.	Maioria dos produtos Produtos abrasivos.

Os desenvolvimentos modernos de medidores eletromagnéticos visam à diminuição de consumo, a aplicação a fluidos menos condutores de eletricidade e à maior estabilidade do zero.

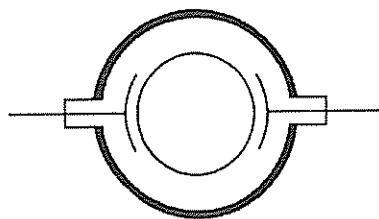


FIGURA 3.36 Representação esquemática de um medidor com acoplamento capacitivo.

3.4.4 Medidores Térmicos

A maior parte dos medidores a efeito térmico é baseada no desequilíbrio térmico criado pela vazão do fluido a ser medido. Estes medidores são geralmente projetados para medir vazões de gás, porém, encontram-se medidores térmicos para vazão de líquidos.

O instrumento pode ser realizado de várias formas:

- com uma resistência de aquecimento e dois pontos de temperatura, de cada lado;
- ou com duas resistências de aquecimento espaçadas e dois pontos de temperatura entre elas;
- ou com dois enrolamentos servindo de resistência de aquecimento e de sensor de temperatura.

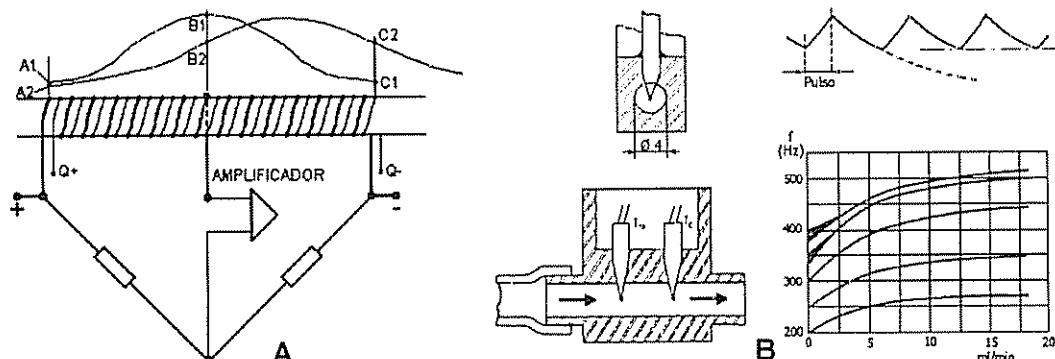


FIGURA 3.37 Tipos de medidores térmicos: A) estilo clássico; B) realização em que o termistor a montante transfere o calor ao da jusante. O limite superior da temperatura é estabelecido no termistor a jusante. A freqüência dos pulsos é, então, uma função da pequena vazão mássica.

No medidor representado na figura 3.37, existe um perfil de temperatura ao longo do tubo de medição. Este deforma-se quando passa o fluido a ser medido, provocando um Δt entre os dois sensores de temperatura. Numa faixa que, definida pelo fabricante do medidor, a diferença de temperatura é aproximadamente proporcional à vazão mássica, com ótima repetitividade.

A equação que relaciona a diferença de temperatura com a vazão é a seguinte:

$$\Delta t = C \cdot r \cdot C_p \cdot Q_v \quad [3.34]$$

onde:

C = constante do instrumento;

ρ = massa específica do gás;

C_p = calor específico à pressão constante;

Q_v = vazão volêmica.

Considerando que a vazão mássica é $Q_m = Q_v \cdot \rho$, o instrumento é um medidor mássico.

O sinal de saída do instrumento é proporcional à vazão mássica e ao produto $\rho_0 \cdot C_p$. Os instrumentos têm suas escalas previstas para medir o ar atmosférico. Para outros gases, a escala do instrumento deve ser multiplicada pelo valor da tabela 3.14.

TABELA 3.14

Fatores de Multiplicação a Serem Aplicados a Gases, no Caso de Medidores Térmicos

Gás	Fórmula	Fator	Gás	Fórmula	Fator	Gás	Fórmula	Fator
Acetileno	C_2H_2	0,67	Flúor	F_2	0,93	Acetileno	C_2H_2	0,67
Água	H_2O	0,80	Freón 11	CCl_3F	0,36	Butano	C_4H_{10}	0,30
Amoníaco	NH_3	0,77	Freón 12	CCl_2F	0,36	Etano	C_2H_6	0,56
Argônio	Ar	1,43	Freón 13	$CClF_3$	0,42	Etileno	C_2H_4	0,69
Cloro	Cl_2	0,85	Freón 14	CF_4	0,48	Isobutano	C_4H_{10}	0,31
Dióxido de carb	CO_2	0,73	Freón 22	$CHClF_2$	0,43	Metano	CH_4	0,69
Hidrogênio	H_2	1,03	Freón 114	$CClF_2$	0,22	Óxido de etileno	C_2H_4O	0,60
Hélio	He	1,43	Dióxido de enx.	SO_2	0,70	Pentano	C_5H_{12}	0,22
Monóx de carb	CO	1,00	Hexafl de enx	SF_6	0,28	Propano	C_3H_8	0,32
Néon	Ne	1,38	Hexafl de tung	WF_6	0,23	AR		
Nitrogênio	N_2	1,02	Hexafl de urânio	UF_6	0,23	ATMOSFÉRICO		
Oxigênio	O_2	0,97	Óxido nitroso	NO	1,00	—		1,00

Para gases que não constam da tabela 3.14, o instrumento deverá ser aferido. Estes instrumentos apresentam a vantagem de ser praticamente independentes da temperatura e da pressão.

Uma realização adotada por fabricantes de vários países consiste em colocar o tubo de medição em paralelo com um tubo maior, provido internamente de um dispositivo, criando uma perda de carga.

3.4.5 Turbinas

Os medidores tipo turbinas são utilizados para medição de líquidos e gases. A teoria das turbinas é simples: o rotor, provido de palhetas formando com as linhas de

escoamento, é posto a girar quando há vazão, justamente porque a velocidade do fluxo incidindo nas palhetas provoca a rotação. Um sistema mecânico ou eletrônico detecta a rotação da turbina. Quando o sistema é eletrônico, a rotação do rotor provoca pulsos.

No caso de detecção eletrônica, existem dois sistemas principais de medição de rotação: o sistema magnético e o de radiofrequência. No sistema magnético, um sensor de proximidade é sensível à passagem das pás da turbina. O sensor é composto de um imã permanente e de uma bobina. O fluxo magnético varia cada vez que uma pá da turbina modifica a distribuição das linhas magnéticas, pela sua passagem no campo do imã. A bobina gera, desta forma, uma seqüência de pulsos cuja freqüência é diretamente proporcional à rotação da turbina e, consequentemente, à vazão volumétrica.

Ambos os tipos de sensores eletrônicos são intrinsecamente compatíveis com a leitura digital do volume totalizado. Quando são usados instrumentos digitais, com correção de linearidade, a precisão alcançada pode ser de 0,15% do valor instantâneo da vazão, com rangeabilidade de 75:1.

A realização das turbinas exige cuidados especiais, para assegurar que a rotação não seja freada por atritos ou forças de arraste, e represente a velocidade, independentemente das características do fluido ou das limitações mecânicas. Não existe realização perfeita, que seja independente do fluido e das limitações mecânicas, que permita que sejam dispensados os ensaios dinâmicos das turbinas. É determinado experimentalmente um fator K, em volume por pulso, para cada turbina.

3.4.5.1 Turbinas para líquidos

As turbinas para líquidos são usadas para medições precisas, inclusive para transações comerciais. O desenho dos rotores é feito de forma que fator o K seja o mais independente possível das variáveis de influência. Numa turbina ideal, este valor K seria uma constante independente da viscosidade do fluido medido. Observa-se, entretanto, que à medida que a viscosidade aumenta, o fator K deixa de ser uma constante e passa a ser uma função da viscosidade e da freqüência de saída da turbina. Com a viscosidade abaixo de 2 cSt, o coeficiente K é aproximadamente constante, dentro de $\pm 0,5\%$ para freqüências de saída acima de 50 Hz. A figura 3.38 mostra tipicamente a influência da viscosidade no valor de K para viscosidades de 2,5 e 14 cSt.

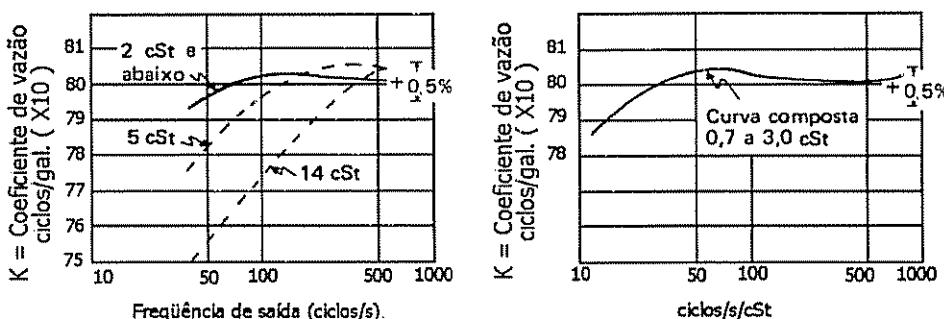


FIGURA 3.38 Influência da viscosidade em turbinas para líquidos, num tipo de rotor definido.

Graças à sua boa precisão, as turbinas são freqüentemente usadas na indústria para totalização de volume, visando apuração de custo ou faturamento de produto. Nestes casos, uma recalibração periódica é necessária e o problema passa a ser o de se dispor de um sistema de teste de precisão apreciável superior ao da turbina. Ver seção 3.8.

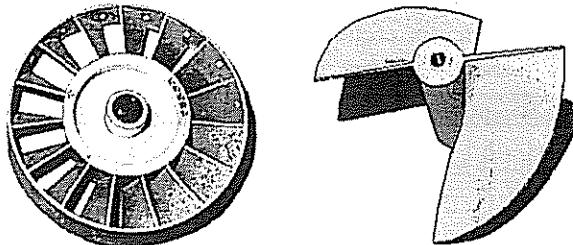


FIGURA 3.39 Tipos de rotores de turbinas para líquidos. O rotor com duas pás helicoidais é pouco sensível às variações de viscosidade do fluido.

As turbinas são geralmente apresentadas flangeadas, para serem montadas num trecho de tubulação de comprimento reto adequado. Elas podem ser realizadas para condições de serviço adversas: pressões até 200 bar e temperaturas compreendidas entre -250 °C e +250 °C. As dimensões das turbinas são compatíveis com linhas de ¼" a 30", e a faixa de medição se situa entre 0,2 l/h e 10.000 m³/h.

A precisão na medição de vazão conseguida com turbinas é uma das mais elevadas encontradas em elementos primários: 0,25% do valor instantâneo. A rangeabilidade comum é 20:1 e pode atingir 150:1 para aplicações especiais.

3.4.5.1.1 Instalação das turbinas para líquidos

As turbinas são geralmente instaladas em trechos retos horizontais (figura 3.40).

O sentido do fluxo é claramente indicado no corpo da turbina, para evitar qualquer equívoco. Nas instalações ao ar livre das turbinas com saídas eletrônica, certos fabricantes recomendam que a caixa do pré-amplificador, ligada ao corpo da turbina, seja colocada por baixo, sendo assim melhor protegida das intempéries.

É geralmente necessária a colocação de um filtro a montante de turbina, para evitar que partículas sólidas possam emperrar o movimento da parte móvel. Neste caso, recomenda-se respeitar as seguintes dimensões da tela do filtro, em relação ao diâmetro da turbina:

Ø da turbina	Ø dos fios	Fios/cm	Abertura
12 mm	0,086 mm	47,43	0,125 mm
20~25 mm	0,22 mm	17,5	0,35 mm
40 mm a mais	0,48 mm	6,75	1,0 mm

Freqüentemente, é necessário um separador de gás antes da turbina, para evitar erros de medição provocados pela passagem de bolhas de ar ou de vapores veiculados.

Um trecho reto de 15 diâmetros entre o último acessório e a entrada da turbina deve, preferivelmente, ser respeitado. Em casos de medição de líquidos a uma pressão pouco superior à pressão de vapor à temperatura de serviço, um cuidado especial deverá ser tomado em relação à possibilidade de cavitação. Com efeito, devido à forma construtiva das turbinas, a pressão do fluido atinge um valor inferior à pressão de vapor do líquido, haverá cavitação, com conhecidos efeitos destrutivos. Recomenda-se manter uma pressão superior em 0,7 bar à pressão de vapor do líquido, à temperatura de operação.

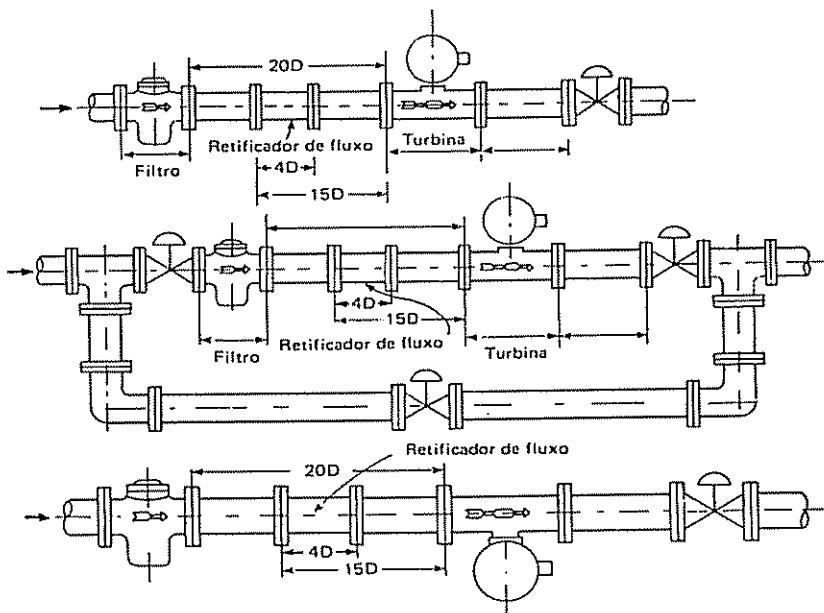


FIGURA 3.40 Instalações típicas de turbinas para líquidos.

3.4.5.2 Turbinas para gases

As normas internacionais que tratam de turbinas são AGA 7, API 2534 e ISO 2715. No Brasil, a Portaria nº 114, de 16/10/97, trata de turbinas para medição de gás, baseada no projeto de norma ABNT 9951.

A Norma ISO 9951 e a Portaria 114, do INMETRO, classificam os medidores, orientam a construção, estabelecem os erros admissíveis, as especificações para aprovação de modelo, fornecem subsídios para verificações e caracterizam as condições de uso.

As condições de base são 20 °C e 101 325 Pa (= 1 atm. ao nível do mar = 1,0332 kg/cm² abs). Os erros máximos admissíveis são:

Verificação inicial	Em serviço
± 2% para Q < Q _{min} .	± 3% para Q < Q _{min} .
± 1% para Q > Q _{min} .	± 1,5% para Q > Q _{min} .

As faixas de medição são: 1:10, 1:20, 1:30, 1:50, cada qual com sua Q_{min}.

As turbinas têm sua rotação definida pelo fluido, nas condições (pressão, temperatura, viscosidade) em que se encontra. São as condições atuais (reais), utilizando a terminologia americana (ou são chamadas condições de operação ou de fluxo). Quando é necessário passar as condições reais para condições de leitura, no caso de gases, aplica-se a seguinte equação:

$$Q_{ref} = Q_{Flx} \cdot (P_{Flx}/P_{ref}) \cdot (T_{ref}/T_{Flx}) \cdot (Z_{ref}/Z_{Flx}) \quad [3.35]$$

Assim, a medição é independente da massa molar do gás em questão, entretanto, se um dispositivo eletrônico medir a massa específica do gás às condições de operação ρ_{Flx} , a equação seguinte é aplicável:

$$Q_{ref} = Q_{Flx} \cdot (\rho_{Flx}/\rho_{ref}) \quad [3.36]$$

Com a massa molar constando no numerador e no denominador, as duas equações são independentes dessa propriedade.

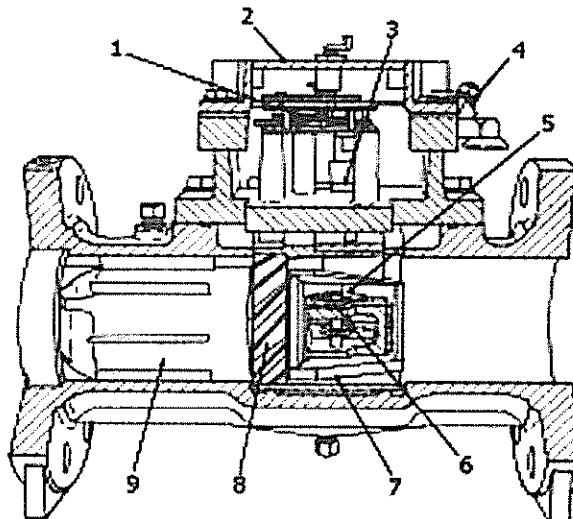


FIGURA 3.41 Turbina para gases, com totalizador mecânico.

3.4.5.3 Instalação das turbinas para gases

As turbinas para gases podem ser instaladas de várias formas, a maioria delas consideradas nas seções da AGA 7. Em geral, deve-se prever um retificador de fluxo a montante da turbina. Entretanto, muitos fabricantes já incluem este acessório no corpo da própria turbina, o que permite dispensar outro na linha.

Certas turbinas podem ser instaladas sem nenhum trecho reto a montante, entre duas curvas. O manual do fabricante deverá sempre ser seguido com relação às recomendações de instalação.

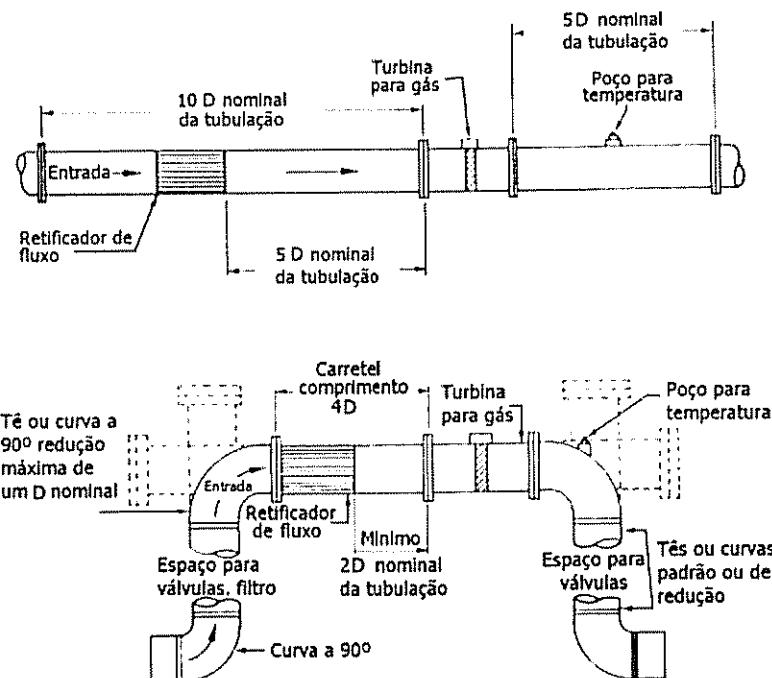


FIGURA 3.42 Esquemas típicos de instalação de turbinas para gases.

3.4.6 Medidores Ultra-Sônicos

Medidores de vazão baseados na tecnologia de ultra-som foram desenvolvidos na segunda metade do século XX, para fins industriais. O uso do ultra-som é relativamente antigo para inspeção não destrutiva, limpeza e algumas outras aplicações. Para a medição de vazão, o ultra-som vem sendo aplicado desde os anos 60. Com um início dificultado por uma publicidade abusiva de fabricantes inexperientes, a comercialização de bons medidores ultra-sônicos firmou-se 20 anos depois.

O ultra-som tem umas características interessantes utilizadas para a medição de vazão: o feixe ultra-sônico pode ser dirigido como um feixe de luz. Existem acessórios equivalentes a lentes e espelhos planos ou parabólicos. Como o feixe de luz, o feixe ultra-sônico tem índice de refração, bem como ângulo de reflexão total. Melhor que o feixe de luz, o ultra-som propaga-se em meios sólidos, líquidos e gasosos. Entretanto, é amortecido por meios macios, como líquidos muito viscosos e elastômeros, entre outros. Graças às características que permitem a focalização e a penetração, os instrumentos ultra-sônicos podem medir a vazão de forma não-intrusiva.

Os ultra-sons são produzidos por quartzo piezo-elétricos, na faixa de dezenas e centenas de quilociclos. Na medição de vazão, utilizam-se transdutores reversíveis, que transformam uma freqüência elétrica em vibração mecânica na mesma freqüência e vice-versa.

Entre as várias técnicas de medição de vazão por meio de ultra-som, duas têm aplicações difundidas na instrumentação industrial:

- o efeito Doppler;
- o tempo de trânsito.

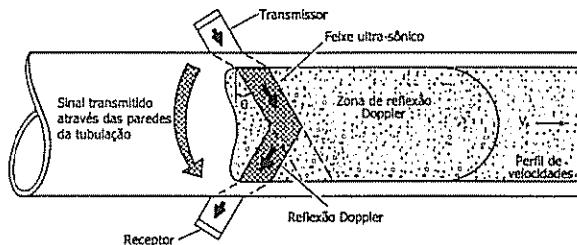


FIGURA 3.43 Medidor de vazão ultra-sônico a efeito Doppler.

O efeito Doppler, mostrado na figura 3.43, pressupõe a presença de partículas ou de bolhas sobre as quais o feixe ultra-sônico irá refletir-se. O feixe é orientado segundo uma direção formando um ângulo com o eixo da tubulação, com certa freqüência. Ao encontrar as partículas que se deslocam à mesma velocidade que o fluxo, o feixe é refletido, com outra freqüência: mais elevada, se a direção do feixe for em sentido contrário ao das partículas, mais baixa, no caso contrário. Este fenômeno é conhecido como efeito Doppler. A eletrônica associada ao medidor recebe o sinal das duas freqüências que produzem um "batimento", outro fenômeno ondulatório, tendo como freqüência a diferença da incidente e da refletida. A vazão é calculada a partir desta freqüência de batimentos. O princípio da medição por efeito Doppler é preferido quando se trata de fluidos com concentração elevada de impurezas, porém a precisão dos medidores baseados nesta técnica não é confiável, já que o feixe refletido dependerá de onde houver a concentração suficiente para a reflexão, perto do centro, onde a velocidade é mais elevada, ou perto das paredes da tubulação, onde a velocidade é menor.

Na técnica do tempo de trânsito, analisa-se a diferença de tempo de percurso de um feixe inclinado em relação às linhas de velocidade do fluxo, baseado no fato de que a componente de velocidade do fluxo, paralela à direção do feixe, irá se somar ou se subtrair da velocidade do som, com uma diferença de tempo de trânsito na ida e na volta do feixe.

A medição por tempo de trânsito é mais aconselhada, por sua maior precisão, quando o fluido não é uniformemente sujo ou quando é limpo. Medições de esgotos, em que as sujeiras, embora em grande quantidade, não são uniformes, podem ser realizadas por tempo de trânsito.

Na medição por tempo de trânsito, demonstra-se que, sendo T_{AB} o tempo levado pelo ultra-som para percorrer a distância de A para B; T_{BA} , o tempo em sentido contrário; L a distância entre os dois transdutores e d a distância entre as seções retas passando

pelos dois transdutores, a velocidade V (média das velocidades integradas linearmente ao longo do percurso do feixe) é a seguinte:

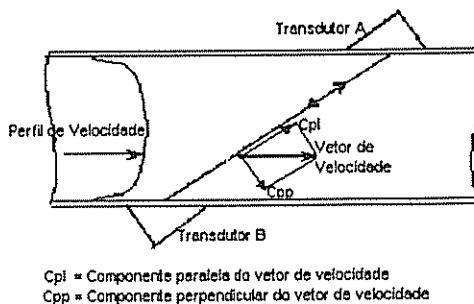


FIGURA 3.44 Medidor de vazão ultra-sônico por tempo de trânsito.

$$V = \frac{L^2}{2d} \left(\frac{1}{T_{AB}} - \frac{1}{T_{BA}} \right) \quad [3.37]$$

É possível medir a vazão por ultra-som de forma não intrusiva, amarrando os transdutores na tubulação por meio de cinta apropriada. É uma característica única entre os medidores de vazão industriais.

A medição por efeito Doppler é preferida quando se trata de fluidos com concentração elevada de impurezas, enquanto que a medição por tempo de trânsito é mais aconselhada por sua maior precisão, quando o fluido não é uniformemente sujo ou quando é limpo. Medições de esgotos, em que as sujeiras, embora em grande quantidade, não são uniformes, podem ser realizadas por tempo de trânsito.

A medição de vazão por ultra-som é feita de forma não intrusiva, prendendo firmemente os transdutores na tubulação por meio de cinta apropriada, e assegurando a transmissão do ultra-som por meio de gel apropriado. É uma característica única entre os medidores de vazão industriais.

Com os recentes desenvolvimentos, é possível medir vazões de gases ou de líquidos com precisão, chegando a 0,15% do valor medido, em certos casos, com rangeabilidade maior que 10:1.

Vários fabricantes dispõem de medidores intrusivos e não intrusivos, mono ou multicordas, para medição dos mais variados fluidos, desde tubulações de $\frac{1}{2}$ polegada até rios com mais de 100 m de largura.

As medições não intrusivas podem ser feitas usando uma maleta autônoma, que incorpora um computador de vazão capaz de orientar a instalação dos transdutores, e fornecer relatório da medição.

No caso de instalações permanentes, os medidores são disponíveis montados num carretel, com os transdutores removíveis em carga.

Os progressos recentes da tecnologia são ligados ao *software*, à realização mecânica e à publicação e normas específicas:

- ao *software* de análise dos resultados primários, transformando a média das velocidades, que resulta da integração das várias velocidades, formando um "perfil" conhecido, em velocidade média. Muitos estudos foram feitos neste sentido e, hoje, todos os medidores são microprocessados e usam uma equação empírica, que faz esta conversão em função do número de Reynolds;
- realizações mecânicas aprimoradas incluem medidores multicordas e feixes de percursos em várias direções, por reflexão nas paredes internas do medidor. Existe um produto recentemente desenvolvido que usa um tubo de medição de seção retangular, em cujas paredes o feixe é refletido várias vezes e acaba recebendo a influência de um conjunto de velocidades, representando diretamente a velocidade média do escoamento;
- a norma sobre a medição de vazão ultra-sônica está sendo aprimorada e pode chegar a ser tão determinística quanto as normas sobre placas de orifício e, como estas, dispensar testes dinâmicos dos medidores.

Os medidores portáteis são muito usados para levantamentos em campo. As aplicações com medidores fixos são comuns na Europa, em redes de serviços públicos, para medir vazão de água e esgotos. Existem aplicações em redes de oleodutos, de gás natural para a produção e transporte. É possível medir gases à pressão atmosférica. A medição mássica por ultra-som já se revelou muito precisa.

3.4.7 Medidores de Vórtices

O princípio de funcionamento dos medidores de vazão tipo vórtex é baseado na observação de um fenômeno físico que ocorre quando uma corrente fluida encontra um obstáculo de perfil não aerodinâmico: a partir de determinada velocidade, uma esteira é formada a jusante do objeto, pelo aparecimento de vórtices que são gerados alternadamente de cada lado do obstáculo. A freqüência deste fenômeno oscilatório depende do tamanho e do formato do objeto, bem como da velocidade da veia fluida. O fenômeno foi estudado inicialmente por Leonardo da Vinci, no século XVI e, posteriormente, por Von Kármán, em 1912. Os estudos modernos destinavam-se principalmente à prevenção de acidentes como destruição de chaminés ou de pontes. Somente na segunda metade do século XX é que o fenômeno começou a ser aplicado à medição de vazão.

Observou-se que, enquanto a velocidade da corrente for baixa, as linhas fluidas acompanharão o objeto, não havendo nenhum vórtice. Quando a velocidade aumentar,

as linhas não poderão acompanhar a forma do obstáculo, separando-se do seu contorno. Esta separação provocará o aparecimento de velocidades locais elevadas, com zonas de baixas pressões, e a ruptura da camada limite, resultando em formação de turbilhões ou vórtices.

Os medidores de vazão tipo vórtex (*vortex*, em inglês) apresentam um anteparo colocado perpendicularmente ao eixo, podendo atravessar completamente o tubo de medição, segundo um diâmetro, ou apresentando um obstáculo local, no caso dos medidores de inserção.

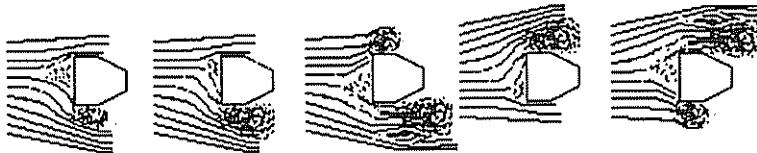


FIGURA 3.45 Formação dos vórtices.

O número de Strouhal, S , uma constante usada para fenômenos oscilatórios, aplica-se também à freqüência f de sucessão dos vórtices, ocorrendo num medidor com uma dimensão D do anteparo e a velocidade V do fluido:

$$S = \frac{f \cdot D}{V} \quad [3.38]$$

O número de Strouhal é adimensional, já que a dimensão de f é T^{-1} ; a de D é L ; e a de V é LT^{-1} .

O interesse da relação é mostrar que, para um determinado medidor, a freqüência é proporcional à velocidade e, por conseguinte, à vazão. De fato, a partir de um número de Reynolds mínimo, definido pelo fabricante para cada modelo de medidor, existe um fator K de proporcionalidade entre a freqüência e a vazão atual (real). Este fator, em quantidade de pulsos por unidade de volume, é geralmente gravado no medidor como fator de calibração.

Para transformar a vazão atual em vazão às condições de referência, o procedimento é o mesmo que para uma turbina.

As técnicas empregadas para detectar a freqüência dos pulsos gerada nos medidores, evoluíram muito nas últimas décadas. Os primeiros medidores utilizavam as variações de temperatura de dois sensores térmicos (termistores) colocados na face montante da barra geradora dos vórtices. Os sensores eram montados, eletronicamente, em ramos opostos de uma ponte de Wheatstone, e a corrente de excitação da ponte mantinha os sensores a uma temperatura mais elevada que a do fluido. Havia, então, uma troca de calor com o fluido, que dependia da velocidade de passagem das linhas fluidas frente a

cada sensor. À formação dos vórtices, gerando variações de velocidade frente aos sensores, havia então um desequilíbrio cíclico da ponte, na mesma frequência dos vórtices.

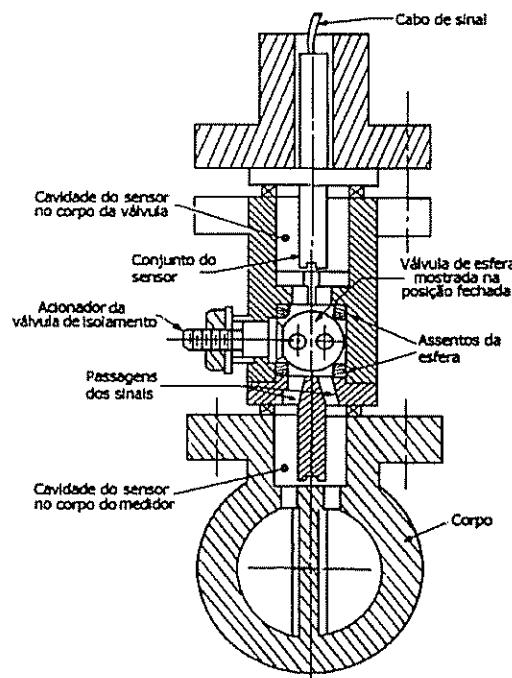


FIGURA 3.46 Medidor de vazão tipo "Vortex", da Foxboro.

Existiram também sensores de deslocamento, com uma pequena esfera que se movimentava devido às diferenças de pressão cíclicas criadas pelos vórtices.

Depois destes primeiros conjuntos de formatos de barras geradoras de vórtices e de sensores, vários outros foram desenvolvidos, cada qual com bons resultados para certas faixas de aplicações (temperatura e pressão), determinando características de repetibilidade, de linearidade e de faixas de números de Reynolds. Sensores por sensores extensométricos, piezo-elétricos, por células de pressão diferencial e por ultra-som, são utilizados pelos medidores modernos.

3.5 MEDIDORES ESPECIAIS

Enquadram-se nesta categoria de medidores de vazão, os medidores que formam o conjunto elemento primário e transmissor que são utilizados em casos especiais.

3.5.1 Medidores de Força

Os medidores de força apresentam um disco como obstáculo parcial para o deslocamento do fluido.

Quando o fluido passa pela área anular reduzida entre o disco e o corpo do medidor, o disco é submetido à força produzida pela pressão diferencial sobre sua área. O disco é suportado por um braço que, passando por uma vedação apropriada, transmite a força a um sensor pneumático ou eletrônico.

A força criada pela pressão diferencial sobre a área do disco é representada pela equação: $F = S \cdot \Delta p$ e, como a pressão diferencial Δp é proporcional ao quadrado da vazão Q , temos $F = S \cdot Q^2/K$.

$$\text{Temos, então, } Q = (K \cdot F/S)^{0.5} \quad [3.39]$$

Levantamentos em laboratórios mostram que o coeficiente K é praticamente constante, quando o escoamento se dá com número de Reynolds superior a 10 000.

Os medidores de força são empregados para medir líquidos ou gases que contêm impurezas, e têm uma aplicação interessante para óleos combustíveis para fornos e caldeiras industriais.

Devido a esta aplicação, os diâmetros em que são realizados esses medidores situam-se preferencialmente na faixa de $\frac{1}{4}$ " a 2".

A precisão é da ordem de 2% não calibrado e de 1% calibrado. A repetibilidade é da ordem de 0,5%.

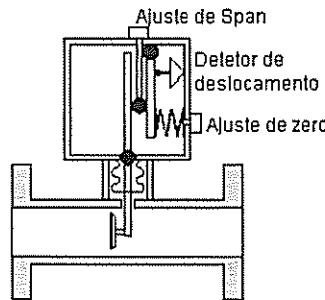


FIGURA 3.47 Princípio de um medidor de força tipo "Target".

3.5.2 Correlação

No medidor de correlação, dois emissores/receptores de sinais que podem ser ópticos ou ultra-sônicos, determinam uma imagem do formato das posições locais das partículas ou da consistência da veia fluida. Um sistema eletrônico, provido de uma função de correlação, determina o desvio de tempo necessário para que as imagens tomadas nos dois sensores tenham o máximo de semelhança. Como a distância entre os dois sensores é conhecida, a velocidade e a vazão são consequências imediatas.

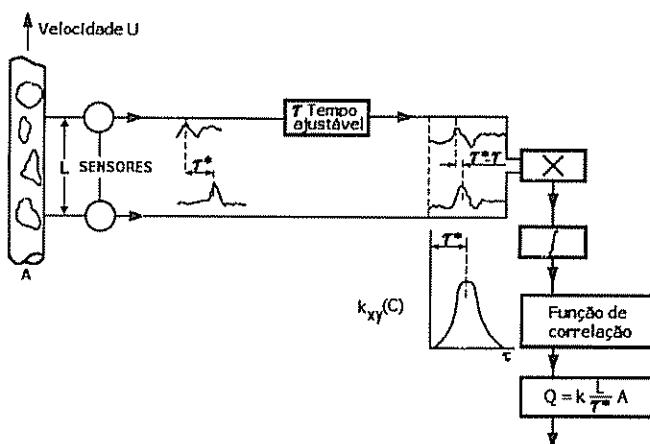


FIGURA 3.48 Esquema típico de um medidor de correlação.

3.5.3 Laser

No medidor a *laser* da figura 3.49, dois feixes oriundos de uma mesma fonte, com comprimento de onda λ , são focalizados de forma a se cruzarem com o ângulo θ , formando um volume luminoso listrado por franjas de interferência. O espaço interfranjas é:

$$i = \lambda / (2n \operatorname{sen} \theta/2),$$

sendo n o índice do meio, aproximadamente igual a 1 no ar:

$$i = \theta/q$$

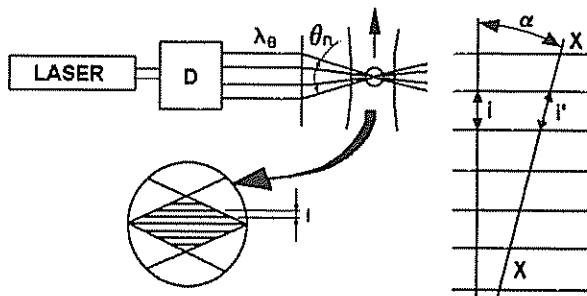


FIGURA 3.49 Medidor a laser.

Uma partícula, pertencente à veia fluida, atravessando o volume luminoso, será iluminada sucessivamente ao passar pelas franjas. Sendo conhecida a distância i e identificando a freqüência com que as variações de luminosidade são emitidas, a velocidade pode ser calculada. As partículas formando com as franjas um ângulo diferente de 90° podem também ser identificadas pelo sistema. Assim, o medidor pode identificar não somente a velocidade de uma partícula, como também sua direção.

3.6 MEDIDORES VOLUMÉTRICOS

Os medidores volumétricos, também chamados medidores de deslocamento positivo, são essencialmente destinados à medição de volumes, em litros ou m^3 , ao invés de vazão, em l/min ou m^3/h . A vazão pode ser calculada, por meio de acessórios mecânicos ou eletrônicos, de forma contínua, derivando matematicamente o volume no tempo.

Existem diferentes tipos de realização construtiva de medidores volumétricos, dependendo do fluido a ser medido, se líquido ou gás, se muito ou pouco viscoso, se muito preciso ou não etc., mas o princípio geral de funcionamento consiste em forçar o líquido a ser medido a passar por câmaras de volume perfeitamente determinado. É possível caracterizar três fases, que ocorrem de forma contínua durante a medição:

- 1) a fase de admissão em que o fluido passa por uma abertura e preenche a câmara de medição;
- 2) a fase de isolamento da câmara de medição;
- 3) a fase de escape, na qual o fluido sai da câmara de medição para a saída.

Os fabricantes procuram minimizar as possibilidades de fugas do fluido através das folgas mecânicas indispensáveis para que os movimentos das peças móveis se façam com pouco atrito.

3.6.1 Diafragma

Os medidores com diafragmas (ou foles) destinam-se, principalmente, à medição de gás para consumo doméstico. Devido à esta finalidade, o custo de fabricação é necessariamente baixo, o que é conseguido com lotes de fabricação muito elevados. Estes medidores são adquiridos em lotes de centenas de milhares de unidades.

O medidor de diafragma é constituído por um conjunto de câmaras de medição de volume variável (durante a aspiração e o escape), ligadas mecanicamente a um conjunto de válvulas de distribuição. As válvulas são deslizantes e controlam a direção do gás para encher e esvaziar as câmaras de partições flexíveis. As válvulas deslocam-se de modo a fazer penetrar o gás nas câmaras, que são submetidas à pressão diferencial entre a entrada e a saída do medidor. A câmara que admite o gás se deforma em consequência e provoca um movimento de rotação no distribuidor, que desloca as válvulas de forma a dirigir o gás para a próxima câmara e, assim, sucessivamente. O enchimento de uma câmara corresponde ao esvaziamento da câmara vizinha. No fim de um ciclo, um volume determinado de gás passou da entrada para a saída.

A precisão desses aparelhos é da ordem de 0,5% entre a vazão nominal e 5% desta. Eles são previstos para gases limpos e secos. A capacidade mais comum desses medidores é de $5\ m^3/h$.

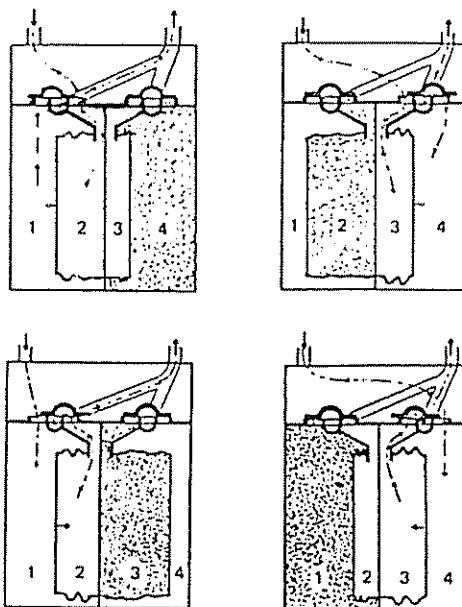


FIGURA 3.50 Representação esquemática das quatro fases do funcionamento de um medidor volumétrico a diafragma.

3.6.2 Disco de Nutação

O movimento de nutação é aquele bem conhecido movimento que adquire um disco ou uma moeda quando, depois de caírem de certa altura, já estão no chão, mas não completamente parados. O movimento oscilatório faz com que, de forma contínua, todos os pontos da periferia do disco estejam, sucessivamente, em contato com o chão.

No medidor de disco de nutação, a peça móvel é um disco com um rasgo radial que tem no seu centro uma esfera e um pino axial. Esse conjunto móvel é convenientemente alojado dentro do corpo do medidor, de forma que uma placa divisória se ajuste ao rasgo, que o disco apóie por cima e por baixo em superfícies cônicas do corpo e que a esfera seja suportada pelo seu mancal. O conjunto móvel divide a parte interna do medidor em quatro volumes, salvo para duas posições definidas do disco, sendo duas do lado da entrada e duas do lado da saída do líquido.

Quando o líquido entra no medidor, a pressão diferencial entre a entrada e a saída faz o disco adquirir o movimento de nutação. O pino solidário da esfera descreve um movimento cônico e sua extremidade é acoplada ao sistema de totalização. A cada rotação completa do pino, o volume que passa pelo medidor é exatamente igual ao volume interno útil da câmara de medição.

A precisão desses instrumentos, usados para tubulações de pequenos diâmetros comerciais, é de $\pm 1\%$ a $\pm 2\%$. Sua capacidade máxima é da ordem de 10 l/s. A continuidade de funcionamento não é afetada por impurezas, em quantidade moderada, no líquido medido. Devido à simplicidade de sua construção, este medidor tem um custo de produção baixo.

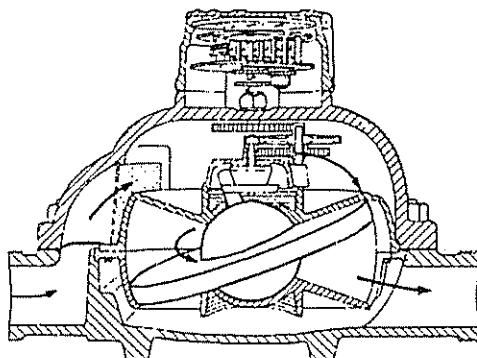


FIGURA 3.51 Medidor a disco de nutação.

3.6.3 Palhetas

Os medidores de palhetas rotativas e deslizantes podem ser realizados de forma simples ou mais elaborada. Na versão mais simples, eles assemelham-se a uma bomba hidráulica, com um rotor excêntrico, provido de palhetas pressionadas por molas contra a parte interna cilíndrica interna do corpo do medidor. As palhetas são submetidas à pressão diferencial do fluido a ser medido, entre a entrada e a saída do medidor, o que provoca sua rotação. Nesta realização simples, as câmaras de medição não apresentam um volume constante ao longo do seu percurso, o que torna sua precisão apenas modesta.

Numa realização mais elaborada, o volume das câmaras de medição é constante, aumentando consideravelmente a precisão, em prejuízo da simplicidade. Neste sistema, o rotor é concêntrico ao cilindro do corpo de medição. As câmaras de medição são isoladas pelas palhetas ou têm sua posição condicionada pelo came em que se apóiam por meio dos roletes. Estes medidores são largamente empregados na indústria do petróleo, para medir os produtos para transações comerciais.

Os diâmetros usuais destes medidores variam entre DN25 e DN500. Existe a disponibilidade de variedade de materiais de fabricação para pressões de dezenas de bar e temperaturas, chegando a 200 °C. A precisão oferecida pelos fabricantes atinge 0,05%, graças aos cuidados de realização, como compensação do efeito da pressão sobre o volume da câmara, com aplicação da pressão na parede externa, e compensadores de temperatura mecânicos ou eletrônicos.

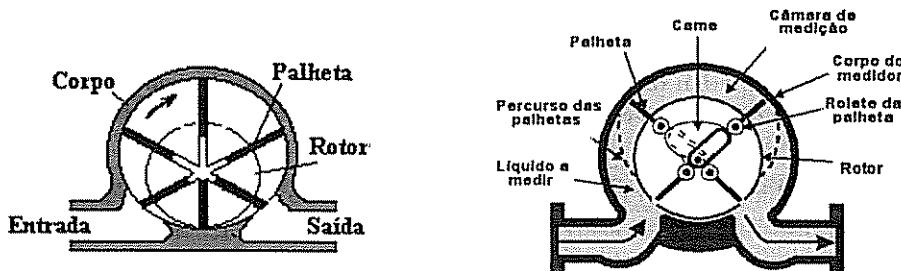


FIGURA 3.52 Medidor de palhetas.

3.6.4 Pistão Oscilante

A parte móvel deste tipo de medidor consiste em um cilindro com rasgo que oscila em torno de um cilindro central fixo, e ao longo de uma placa divisória da parte fixa do medidor, separando a entrada da saída. A figura 3.53 mostra o seu princípio de funcionamento. O centro do pistão oscilante é montado num pino excêntrico à parte cilíndrica do corpo do medidor. A pressão diferencial do fluido entre a entrada e a saída faz o pistão se movimentar com movimento circular para seu centro e oscilante relativamente à parte rasgada. Este medidor pode ser usado com líquidos limpos viscosos ou corrosivos com uma precisão da ordem de $\pm 1\%$. Sua aplicação é geralmente limitada a tubos de DN50.

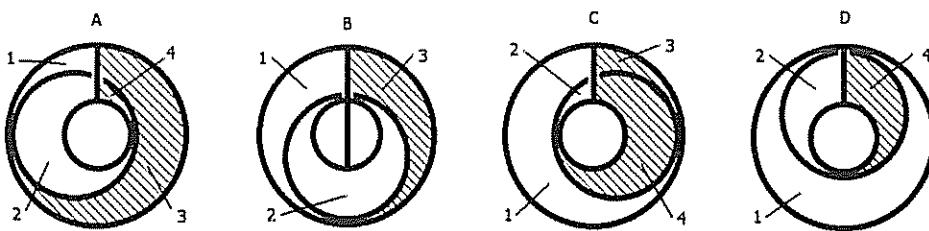


FIGURA 3.53 Medidor de pistão oscilante.

3.6.5 Pistões Recíprocos

Os medidores de pistões recíprocos têm alguma semelhança com os motores a explosão. Na realização representada na figura 3.54, o corpo do medidor possui quatro cilindros com quatro canais de comunicação (P1 a P4), que interligam a câmara superior com um orifício da lateral do pistão seguinte, no sentido horário. Os pistões possuem um rebaixo na parte intermediária do seu comprimento, que permite pôr em comunicação os canais P com as saídas E1 a E4, na parte inferior do curso do pistão. Este canal também permite a comunicação com a parte central do medidor. Os quatro pistões movimentam um virabrequim ao qual são ligados por uma biela. O movimento dos pistões é provocado pela pressão diferencial entre a entrada e a saída do medidor. O líquido entra no medidor pelo centro, por baixo dos pistões. Na fase representada na figura, a posição dos pistões corresponde à admissão do líquido no pistão inferior e no escape do líquido no pistão superior. Todos os orifícios E1 a E4 comunicam-se com a saída do medidor. O movimento provocado pelos dois pistões verticais provoca a rotação do virabrequim e movimenta os dois outros pistões. No $\frac{1}{4}$ de volta seguinte, as funções dos pistões sofrerá uma permutação circular, fazendo com que o virabrequim e o conjunto continuem seu movimento. A cada volta completa do medidor, as quatro câmaras de medição são enchidas e esvaziadas.

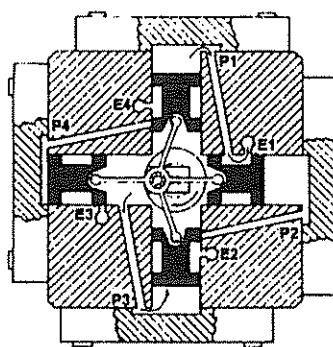


FIGURA 3.54 Medidor de pistões recíprocos.

3.6.6 Rotor

Os medidores com rotores podem ser realizados com engrenagens ou com lóbulos. A preocupação dos fabricantes é compatibilizar o máximo caminho de fuga com o mínimo de atritos, o que aumentaria a necessidade de pressão diferencial para fazer rodar o medidor, e que aumentaria as fugas de produto durante a medição.

3.6.6.1 Lóbulos

Os medidores de lóbulos são geralmente usados para medição de gases. Além da parte do corpo que constitui o volume de medição, o medidor possui necessariamente um compartimento com duas engrenagens que fazem rodar os lóbulos, mantendo sempre uma parte dos seus perfis com um espaço mínimo. A pressão diferencial entre a montante e a jusante aplicada aos lóbulos os faz girar.

A precisão desses medidores é da ordem de 0,2%. Os diâmetros variam entre DN50 (2") e DN600(24"). Atualmente, existem medidores de lóbulos com servo-comando da rotação que fazem rodar os lóbulos assim que uma pressão diferencial muito pequena aparece entre a montante e a jusante, minimizando, assim, as fugas e aumentando a precisão, que passa a ser da ordem de 0,02%.

3.6.6.2 Engrenagem

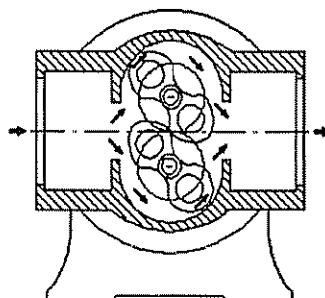


FIGURA 3.55 Medidor de lóbulos.

Existem vários tipos de medidores de engrenagens em que os espaços entre os dentes dos mesmos são aproveitados no volume de medição. Entretanto, o medidor de rodas ovais, da figura 3.56, mantém as rodas engatadas e determina volumes de medição da mesma forma que o medidor de lóbulos. Medidores de rodas ovais são muito usados para medição de óleo combustível em fornos e caldeiras industriais.

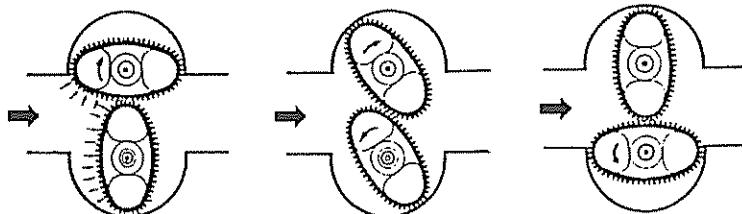


FIGURA 3.56 Medidor de rodas ovais.

Um dos modelos é representado na figura 3.57.

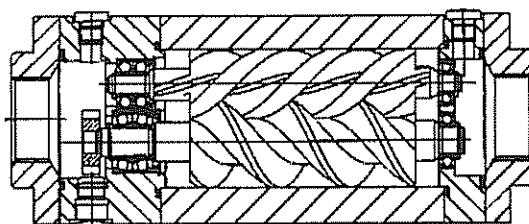


FIGURA 3.57 Medidor de engrenagens.

3.6.7 Semi-Imerso

Os medidores de campânula semi-imersa têm como peça principal um rotor horizontal, parcialmente imerso na água formando quatro câmaras de medição. O rotor é posto a girar pela diferença de pressão entre a montante e a jusante. O gás penetra pelo centro, numa câmara formada por uma divisória do rotor e da água. Com a entrada do gás, o volume confinado aumenta, fazendo o rotor girar lentamente; a extremidade esquerda da divisória D_2 , na figura 3.58 sai da água e o gás é liberado para a saída.

A continuidade do movimento é assegurada pelo fato de que, pouco antes de o passo anterior acontecer, o gás começou a encher o próximo volume, iniciando um novo ciclo.

Esses medidores são empregados em laboratórios e são disponíveis para diâmetros raramente superiores a DN50 (2"). A saída é geralmente feita à pressão atmosférica, quando o gás assim permite. A precisão desses medidores é da ordem de 0,1%.

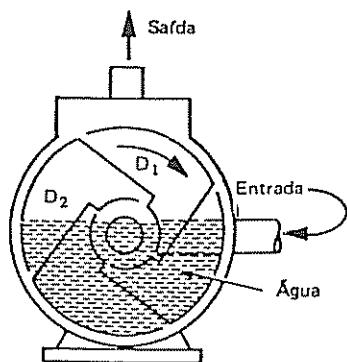


FIGURA 3.58 Medidor de campânula semi-imersa.

3.7 MEDAÇÃO EM CANAIS ABERTOS

Ao contrário dos outros medidores de vazão mencionados neste capítulo, em que é necessário que o fluido preencha completamente a tubulação para se ter uma boa medição, os medidores em canais abertos destinam-se a medir líquidos que escoam por gravidade e apresentam uma superfície livre.

Ao invés de medir uma diferença de pressão, como é o caso com os medidores deprimogênicos, mede-se o nível antes e depois do elemento primário, que também provoca uma variação de velocidade de escoamento localizada.

3.7.1 Vertedores

Na forma mais simples do vertedor, com entalhe retangular, uma placa vertical é interposta no fluxo de água obrigando o seu nível a subir a montante até verter a jusante pela abertura de base horizontal e laterais verticais. A terminologia específica adotada para esta técnica de medição é a seguinte:

Entalhe	A abertura.
Crista	A base horizontal do entalhe.
Largura da crista (L_c)	A largura horizontal da crista; num entalhe triangular, $L_c = 0$.
Altura h	A diferença de nível entre a crista e a superfície do líquido a montante, antes da sua curvatura.
Lençol	A veia líquida que passa por cima da crista (ou do fundo do entalhe, no caso de vertedores triangulares).
Aeração/ submersão	Quando o lençol cai a jusante do vertedor afastado de sua face jusante, a vazão é dita aerada. Quando a superfície do líquido a jusante do vertedor não é suficientemente abaixa da crista para permitir a aeração, a vazão é dita submersa. Referindo-se à figura 3.60, pode ser visto que a espessura z da veia acima da crista é inferior à altura h_c . Quando a vazão é aerada, a superfície inferior do lençol sobe levemente acima do nível da crista, como representado pela altura z_1 . Para baixas vazões, não existe escoamento aerado em calhas retangulares, independentemente do nível da água a jusante.

(continua)

(continuação)

Vertedor com contração	Quando a largura do canal de aproximação L_c' é maior que a largura da crista L_c , o lençol sofrerá contração lateral. Neste caso, o vertedor é chamado "vertedor com contração". A diferença $L_v - L_c$ deve ser, no mínimo, de quatro vezes a altura máxima h_c prevista.
Vertedor de largura plena	Fala-se de um vertedor no qual a largura da crista L_c é igual à largura do canal de aproximação.

A medição do nível no vertedor é feita por meio de transmissor de nível de qualquer tipo (por bóia, capacitivo, resistivo, com pressão diferencial, ultra-sônico etc.) provido de eletrônica para calcular a equação da vazão e integrar seu valor ao longo do tempo. A equação é a seguinte:

$$Q = 2/3 C' L_c' \sqrt{2g (h_c')^3} \quad [3.40]$$

onde:

Q = a vazão em m^3/s , desde que $g = 9,807 \text{ m/s}^2$ e que larguras e níveis sejam em metros;

C' = uma função de L_v/L_c e de h/P ;

$L_c' = L_c + b$ (em metros, na equação);

$h_c' = h_c + 0,009 \text{ m}$.

Os valores de b e de C' podem ser vistos na figura 3.62A e B.

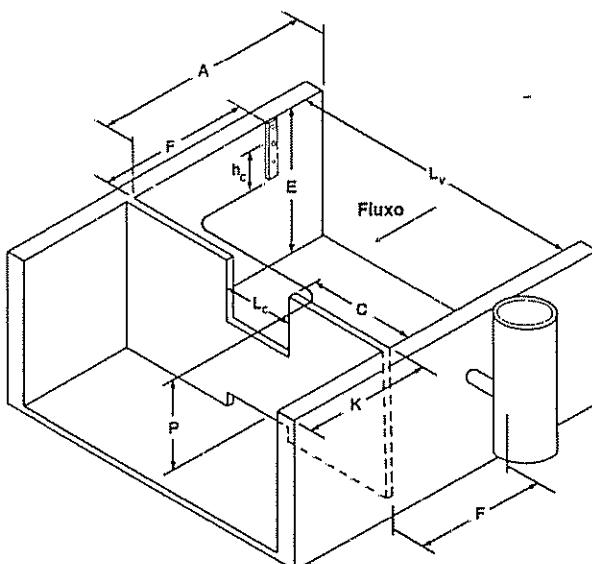


FIGURA 3.59 Vertedor retangular: dimensões gerais.

Limites aproximados de descarga	hI	L1	A	K	L1	E(*)	C	P	F
	Altura máxima	Largura da crista	Compr. a montante	Compr. ajusante	Largura da caixa	Profund. da caixa	Dist. do fim da crista lateral da caixa	Dist. da crista ao fundo da caixa	Distr. para o medidor de nível
m^3/h	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10 a 300	305	305	1830	610	1220	914	457	457	219
20 a 610	381	457	2135	914	1525	990	533	457	372
25 a 810	381	610	2440	1220	1830	1065	610	533	1525
35 a 1700	457	914	2745	1525	2135	1220	610	610	1680
50 a 2350	457	1220	3050	1830	2745	1220	762	610	1830
75 a 3600	457	1830	3660	1830	3505	1370	838	762	1830
100 a 5000	457	2440	4875	2440	4265	1450	914	838	2440
100 a 6100	457	3050	6100	2440	5180	1525	1070	914	2440

VERDEDOR RETANGULAR A 90°									
10 a 250	305	-	1830	610	1525	914	-	457	1220
10 a 440	381	-	1980	914	1980	990	-	457	1525

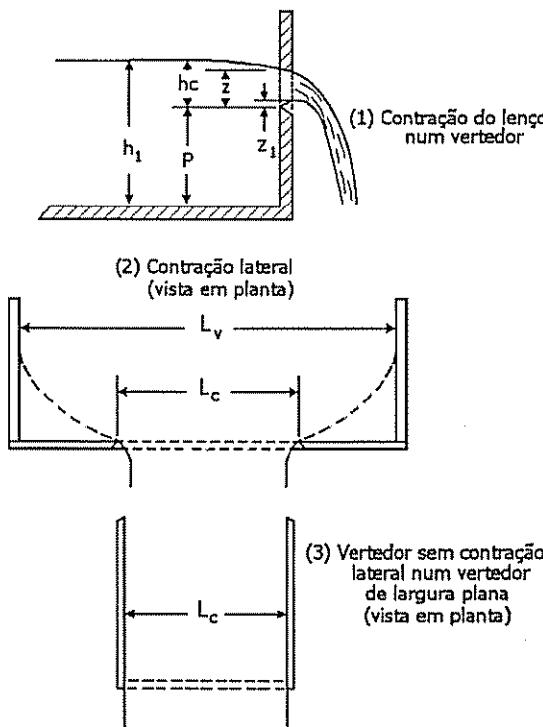


FIGURA 3.60 Vertedor retangular.

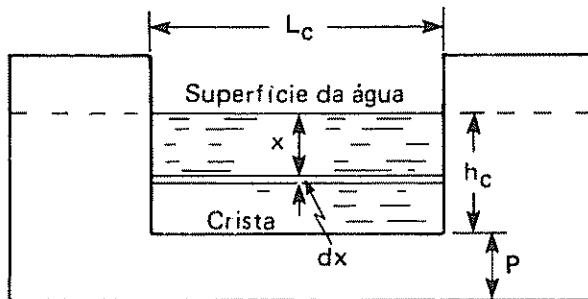
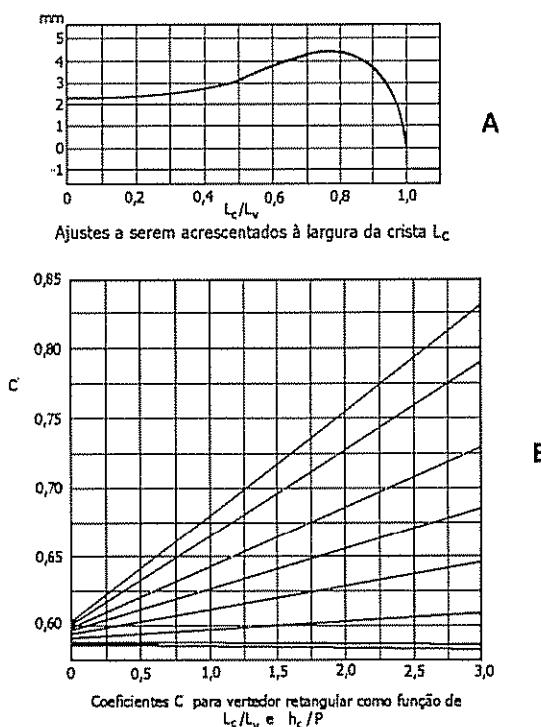


FIGURA 3.61 Seção de um vertedor com abertura retangular.

FIGURA 3.62 Valores de b e C' para vertedores retangulares.

3.7.2 Calhas Parshall

Nas calhas, o escoamento da água sofre uma contração, produzida pelas paredes laterais ou pela elevação do fundo do canal, ou ambos. Uma característica comum destas calhas é a formação de uma onda de refluxo próximo à sua saída. A perda de carga provocada pela calha de medição chega a ser a quarta parte da que seria observada num vertedor de mesma capacidade.

A calha Parshall foi desenvolvida nos Estados Unidos para medir a água de irrigação, na agricultura. A calha tem uma semelhança com um Venturi, com uma parte con-

vergente, uma garganta e uma parte de saída, divergente. As dimensões das calhas Parshall são definidas em tabela, como a da figura 3.63.

No projeto original, existem dois poços laterais para a medição dos níveis h_c , a montante a h_s , na garganta, porém, não será necessário medir o nível h_s , quando existir uma inclinação do terreno tal que h_s não possa ser mais que 60% de h_c . Caso contrário, haverá submersão ou afogamento e a vazão calculada a partir de h_c deverá ser corrigida por fatores apropriados.

A medição do(s) nível(is) poderá ser feita por qualquer método. Existem transmissores ultra-sônicos, providos de eletrônica capaz de resolver as equações, que calculam a vazão em função da montante:

$$\text{Calha de } 3'' (= 0,076 \text{ m}) \quad Q = 635,8 L_c \cdot h_c^{1,547} \quad [3.41]$$

$$\text{Calha de } 6'' (= 0,152 \text{ m}) \quad Q = 1\ 372,4 L_c \cdot h_c^{1,58} \quad [3.42]$$

$$\text{Calha de } 9'' (= 0,229 \text{ m}) \quad Q = 2\ 045,2 L_c \cdot h_c^{1,53} = 3,07 h_c^{1,53} \quad [3.43]$$

$$\text{Calhas de } 1'\text{ a } 5' (= 0,305 \text{ a } 1,524 \text{ m}) \quad Q = 8\ 160 L_c \cdot h_c^{1,57} \quad [3.44]$$

Nas equações acima, L_c e h_c são em metros e Q em m^3/h .

3.8 AFERIÇÃO

Observa-se, inicialmente, que os medidores de vazão utilizados na indústria não são necessariamente aferidos diretamente.

Trata-se aqui dos medidores deprimogêniros normalizados, listados a seguir:

- placas de orifício, com tomadas *flange taps*, *radius taps* e *corner taps*, com diâmetros compreendidos entre 25 e 1.000 mm, e para números de Reynolds superiores a $16\ 000 b^2$ ou 4 000;
- bocais de vazão, estilo ISA 1932 ou *long radius* para diâmetros compreendidos entre 50 mm e 500 mm (630 mm para *long radius*), número de Reynolds superior a 10^4 , 2.10^4 ou 7.10^4 , conforme estilo e valor de b ;
- tubos de Venturi clássicos em três estilos, para diâmetros compreendidos entre 100 mm e 800 mm, 50 mm e 250 mm ou 200 mm a 1.200 mm, conforme o estilo, e número de Reynolds elevado, superior a 2.10^5 ;
- venturis-bocais, para diâmetros compreendidos entre 65 mm e 500 mm, e número de Reynolds superiores a $1,5 \cdot 10^5$.

Nestes casos, não haverá necessidade de aferição de vazão, considerando que a norma estipula uma incerteza na medição (geralmente inferior a 1%) desde que sejam perfeitamente conhecidas as dimensões geométricas do elemento primário, a pressão diferencial e as grandezas de influências. O problema é, então, transferido para a aferição dos medidores de pressão diferencial e das grandezas de influências, além de se necessitar de levantamento dimensional do elemento primário, para conferência da sua adequação às tolerâncias mecânicas previstas na norma.

Lc mm	A mm	Z mm	B mm	C mm	D mm	E mm	F mm	G mm	K mm	N mm	R mm	M mm	P mm	X mm	Y mm	Capacidade m³/h	Máx. m³/h
76	467	310	457	178	259	610	152	305	25	57	406	305	768	25	38	3	190
152	621	414	610	394	397	610	305	610	76	114	406	305	902	51	76	5	400
229	879	587	864	381	575	762	305	457	76	114	406	305	1080	51	76	9	900
305	1372	914	1343	610	845	914	610	914	76	228	508	381	1492	51	76	10	1650
457	1448	965	1419	762	1026	914	610	914	76	228	508	381	1676	51	76	15	2500
610	1524	1016	1495	914	1207	914	610	914	76	228	508	381	1854	51	76	40	3400
914	1676	1118	1645	1219	1572	914	610	914	76	228	508	381	2223	51	76	60	5100
1219	1829	1219	1794	1524	1937	914	610	914	76	228	508	457	2711	51	76	130	6900
1524	1981	1321	1943	1829	2302	914	610	914	76	228	508	457	3080	51	76	160	8700

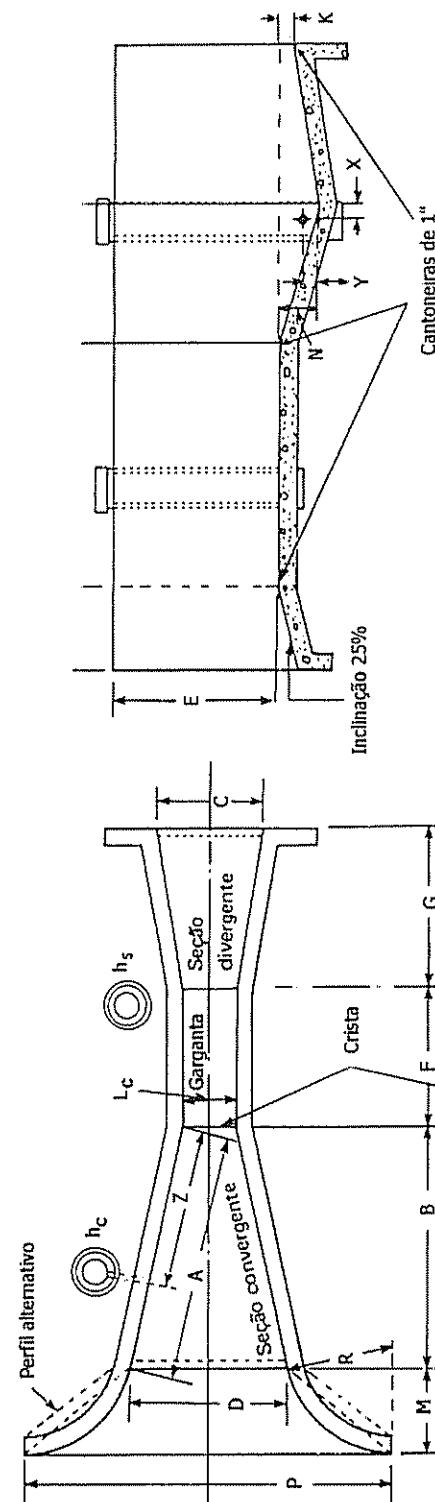


FIGURA 3.63 Dimensões gerais de calhas Parshall.

NOTA:

- a) O termo "incerteza" é atribuído de uma medição e, convencionalmente, significa que existe a probabilidade de 95% do valor real estar compreendido na faixa da incerteza considerada.
- b) O termo "precisão" é atribuído de um instrumento de medição e informa, de fato, sua imprecisão. A precisão de um instrumento pode ser expressa em porcentagem dos fundos de escala, ou em porcentagem sobre o valor lido, ou, ainda, reunindo os dois conceitos aritmeticamente ou logicamente.

3.8.1 Aferição de Medidores de Vazão de Líquidos

Medidores de vazão de líquidos que não estejam incluídos na lista anterior ou que estejam fora dos limites previstos pelas normas, devem ser aferidos para que se possa relacionar o sinal de saída com a vazão que passa pelo instrumento. Os sistemas de aferição podem ser instalados fixos ou móveis. Em ambos os casos, a aferição pode ser feita em comparação a um instrumento aferido que serve de referência: o *master*, ou de forma absoluta, utilizando medição de volume ou de massa e de tempo.

3.8.1.1 Aferição comparativa (líquido)

A aferição em comparação a um *master* é muito simples, em princípio, e consiste em fazer passar a vazão numa tubulação onde o instrumento a ser aferido e o *master* estão montados em série, com os cuidados necessários para que não haja interferência ou perturbação de um no outro. Nada obriga a que o medidor sendo aferido e o *master* sejam do mesmo tipo. Como exemplo, um medidor tipo vórtex pode ser aferido utilizando um medidor e a turbina servindo de *master*. Os cuidados a serem tomados são derivados do bom senso: a precisão do *master* tem que ser compatível com a precisão do medidor aferido, e levada em conta na determinação da incerteza nas medições; os efeitos indiretos das variáveis de influência têm que ser compensados; são necessários vários levantamentos da curva de precisão *versus* vazão para que uma média estatística razoável seja apurada, entre outras.

3.8.1.2 Aferição absoluta (instalação fixa)

No caso da aferição absoluta, trata-se de medir o tempo que leva determinado volume de líquido, ou sua massa, para passar pelo medidor sendo aferido.

Nas instalações fixas, as realizações recomendadas consistem em conjunto de bombas, reservatório de altura hidrostática determinada, tubulações de diâmetros compatíveis com os medidores sendo aferidos e reservatórios de volume conhecidos ou montados em balanças eletrônicas, para se determinar o peso do líquido. A norma internacional ISO 4185, de 1980, e a correspondente Afnor X 10-138 (figuras 3.64 e 3.65) são extremamente detalhadas em relação às recomendações dos métodos por pesagem. Faz-se dis-

tinção entre pesagem estática, que leva em conta o acréscimo de peso entre as manobras de uma válvula de desvio, e a pesagem dinâmica, que dispensa a válvula de desvio e que leva em conta o acréscimo de peso no reservatório durante o enchimento.

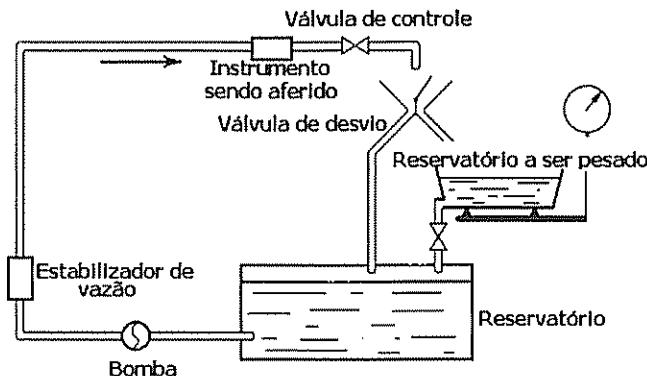


FIGURA 3.64 Esquema típico de uma instalação de aferição por pesagem (método estático, alimentação direta).

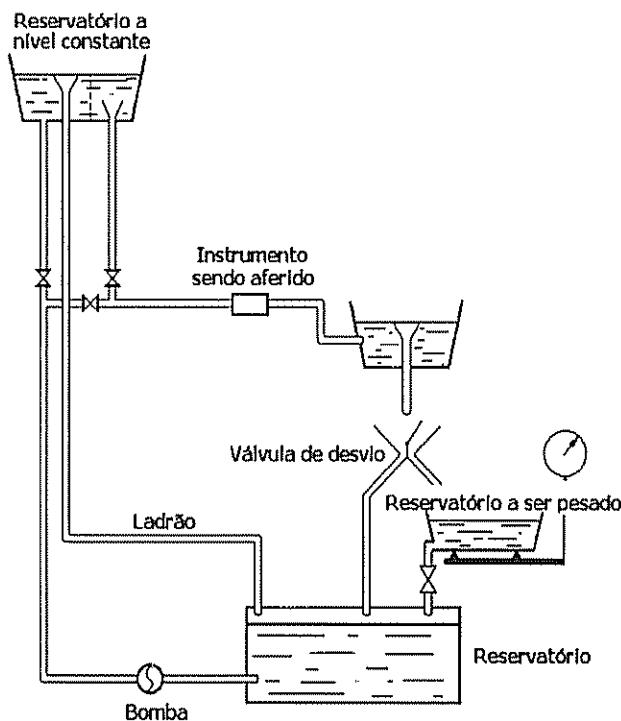


FIGURA 3.65 Esquema típico de uma instalação de medida de vazão por pesagem utilizada para um medidor em aferição (método estático, alimentação por reservatório a nível constante).

Para estabilizar a pressão durante a medição, o dispositivo mais confiável é um reservatório de altura determinada. Outros métodos de estabilização de vazão podem ser

utilizados. Existe a recomendação de assegurar-se que a tubulação seja completamente preenchida pelo líquido e não contenha nem ar nem vapor (do líquido). Com este método, a incerteza da medição pode ser inferior a 0,02%.

Para atingir tal quantidade de medição, a norma recomenda, inclusive, a correção do efeito aerostático, para compensar o fato de que o empuxo exercido pela atmosfera na massa do líquido é diferente daquele exercido sobre a mesma massa representada pelo volume, aproximadamente oito vezes menor dos pesos padrões, quando da aferição da balança.

A norma em questão ainda faz recomendações sobre a válvula de desvio, dando alguns detalhes que facilitam seu dimensionamento, e os cuidados a serem tomados na sincronização entre o basculamento da válvula e o acionamento do cronômetro.

3.8.1.3 Aferição com *provers*

Uma outra forma de aferir instrumentos de medição de vazão de líquidos consiste em utilizar provadores ou *provers*. A Norma API 2531, *Manual of Petroleum Measurement Standard*, descreve no seu capítulo 4, seção 2, os *provers* recomendados. *Provers* são geralmente utilizados para aferir medidores volumétricos ou medidores por turbina. Eles podem ser fixos ou instalados em caminhão.

Na versão mais clássica, o *prover* pode ser unidirecional ou bidirecional e consiste de um tubo comprido, com curva longa de 180 graus e um sistema de válvula para direcionar a esfera que irá percorrer o tubo durante a aferição. As figuras 3.66 e 3.67 mostram que a medição consiste em medir o número de pulsos que emite o medidor em teste, enquanto a esfera passa entre o detector de passagem inicial e o final. O volume entre os detectores de passagem é conhecido com precisão de 0,01%, desde que sejam aplicados os fatores de correção de pressão e temperatura, que alteram suas dimensões. Um sistema eletrônico acopla os detectores de passagem à contagem dos pulsos do medidor aferido, e a finalidade é determinar o fator K do medidor, isto é, o volume representado por pulso com incerteza inferior a 0,1%. Naturalmente, se o tempo medido for medido também a vazão pode ser deduzida.

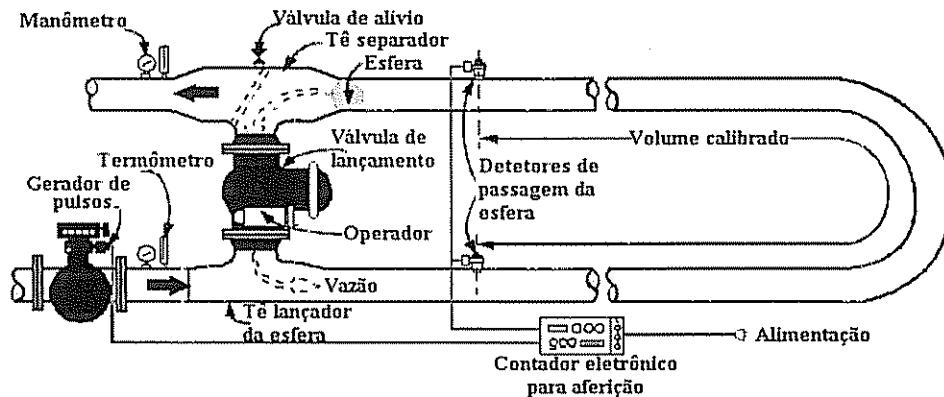


FIGURA 3.66 Prover unidirecional.

A norma citada é exatamente didática e chega a citar 11 vantagens de utilização dos *provers*. Entre elas, a maior vantagem é permitir que o instrumento seja testado nas suas reais condições de uso, utilizando o líquido normalmente medido, com pressão e temperatura de operação. Esta norma previa que, entre os dois detectores de passagem, um mínimo de 10 mil pulsos deviam ser gerados pelo medidor, ocasionando muitas dificuldades para certos fabricantes de turbina que, embora fabricando produtos de qualidade, não prevêem mais de um pulso por rotação do rotor da turbina.

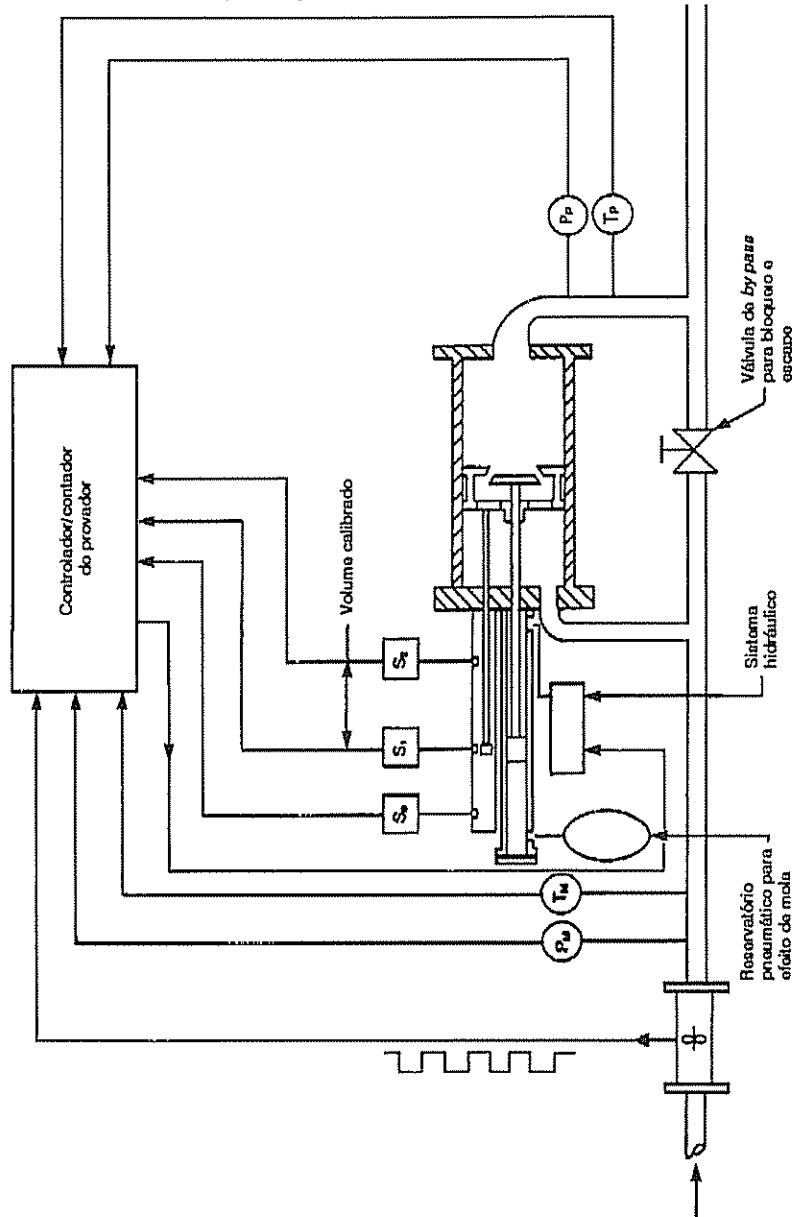


FIGURA 3.67 Esquema típico de um provador de pequeno volume.

Por muito tempo não era permitido a interpolação entre dois pulsos. Na edição de julho de 1988, a API de mesmo título dedica a seção 3 a *provers* de pequeno volume, que não permite a acumulação de 10 mil pulsos, e na seção 6 dedica uma série de recomendações relativas à interpolação de pulsos. Os *provers* de pequenos volumes – ref. [3.3] – são lineares e consistem dos seguintes elementos:

- a) um cilindro de precisão;
- b) um pistão móvel, cilíndrico ou esferoidal;
- c) um meio de posicionar e largar o pistão à montante da seção calibrada;
- d) detectores de posição do pistão;
- e) um conjunto de válvulas que permita a vazão do fluido, enquanto o pistão está percorrendo a seção de medição;
- f) instrumento de medição de pressão;
- g) instrumentos de medição de temperatura;
- h) instrumentação com contagem de tempo, de pulsos e capacidades de interpolação de pulsos.

Este tipo de *prover* é mais barato que o clássico anterior e geralmente compatível com a precisão que se requer de uma medição de vazão, inclusive as medições destinadas à "transferência de custódia".

A automação acrescentada aos *provers* dispensa grande parte do trabalho do operador e executa o cálculo do fator K, levando-o em conta na medição de vazão.

3.8.2 Aferição de Medidores de Vazão de Gases

A aferição de medidores de vazão de gases é, via de regra, mais difícil que a de medidores de vazão de líquidos, devido à comprehensibilidade e à considerações termodinâmicas.

Da mesma forma que para os líquidos, é possível fazer a aferição comparativa ou absoluta.

3.8.2.1 Aferição comparativa (gases)

O medidor a ser aferido é colocado em série com um medidor *master* de característica conhecida. Os cuidados a serem tomados são relativos ao fato de que as condições de escoamento do gás serão provavelmente diferentes nos dois instrumentos, cada qual devendo ser corrigido adequadamente. O caso é mais complexo quando o instrumento a ser medido é um protótipo, do qual não se conhecem as influências de parâmetros importantes, como:

- influência do número de Reynolds;
- influência da expansão do gás, ao passar pelo instrumento;
- influência da temperatura e/ou da pressão sobre o instrumento.

A aferição de um instrumento e o levantamento de suas curvas de influência podem ser trabalho de horas ou de semanas, dependendo do caso.

3.8.2.1.1 Aferição com bocais sônicos

Uma forma interessante de aferir medidores de vazão de gases é a aferição por bocais sônicos. Sua principal vantagem é a de permitir que o instrumento a ser aferido o seja nas condições de operação: com o mesmo gás, às mesmas pressão e temperatura. A principal desvantagem é que é necessário que uma perda de carga não desprezível seja disponível, o que não é sempre o caso.

Os bocais sônicos vêm sendo aplicados há muito tempo como padrão secundário para medidores de vazão de fluidos compressíveis. Como característica única, a vazão mássica que passa por um bocal sônico, desde que submetido à pressão diferencial adequada, é constante para um determinado gás, quando sua pressão a montante e a temperatura não variam. A equação que relaciona a vazão mássica Q_m com a massa molar do gás M_m , a pressão absoluta P , a temperatura absoluta T e a área do bocal A^* e os coeficientes C (coeficiente de descarga) e C^* (coeficiente de vazão crítica) é a seguinte:

$$Q_m = \frac{A^* C C^* P}{[(R/M_m) T]^{1/2}} \quad [3.45]$$

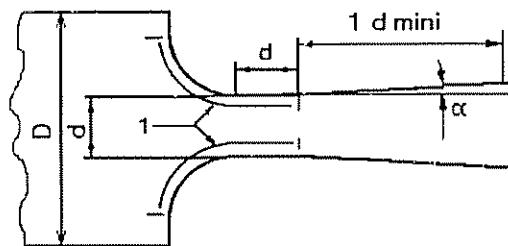


FIGURA 3.68 Bocal sônico.

Os valores de C^* encontram-se em literatura especializada, ref. [4.4].

3.8.2.2 Aferição absoluta (gasômetros)

A aferição de medidores de gases em baixa pressão pode ser feita por gasômetro. Gasômetros são reservatórios de gases com pressão ligeiramente superior à pressão atmosférica. Gasômetros destinados à aferição de vazão são dotados de selo com água e de sistema de compensação do empuxo de Arquimedes da imersão do pistão no selo d'água. Esta compensação é feita por um contrapeso atuando num *came* ligado à polia do sistema de sustentação do pistão.

Para pequenas vazões de gases, existem microgasômetros de precisão, de diversas capacidades, variando de litros a dezenas de litros. Determinadas realizações utilizam como selo entre cilindro e pistão um anel de mercúrio, que permanece numa ranhura pela sua tensão superficial. A detecção de passagem do pistão é feita opticamente e as correções são microprocessadas. É possível aferir medidores de vazão de gases com faixas de medição da ordem de gramas por hora.

Existe um outro tipo de aferição absoluta, com método gravimétrico, ainda não normalizado.

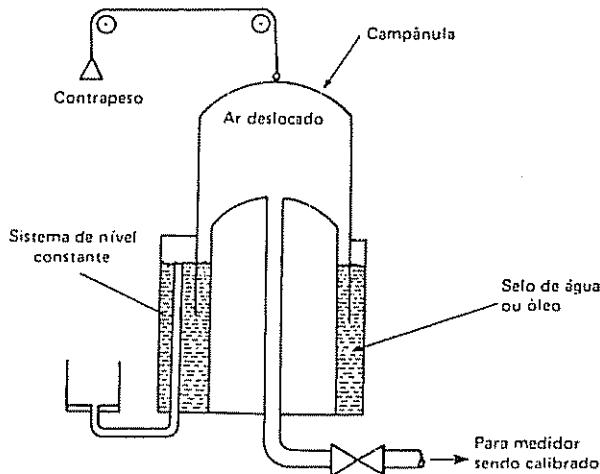


FIGURA 3.69 Gasômetro para aferição.

3.8.3 Conclusão sobre a Aferição de Medidores de Vazão

Para aferir medidores de vazão é necessário dispor de equipamento sofisticado. A aferição por comparação é a mais simples, porém, pressupõe que o *master* seja rastreado a um sistema de aferição absoluto. Geralmente, os fabricantes dispõem de recursos de aferição e devem cuidar de estarem rastreados ao Inmetro ou outro órgão de certificação internacional.

Aferir significa, rigorosamente, conferir com padrão. No caso da vazão, os padrões são indiretos: volume ou massa e tempo. No Brasil, estes padrões são rastreáveis ao Inmetro. Quanto às medições resultantes do sistema de aferição, as incertezas próprias dependerão do cuidado e de minúcias do projeto e da operação. Em princípio, desde que se verifique uma variação de volume e o tempo correspondente, poderá ser feita uma aferição ou uma verificação de um ponto de funcionamento. A rotina pode, inclusive, utilizar variações de nível de tanque, desde que o medidor de nível seja muito confiável e preciso. É o caso do medidor de nível por radar, que detecta variações de 1 mm. Existem outras formas de aferição de medidores de vazão, como métodos utilizando traçadores.

3.9 REFERÊNCIAS

[1] AFNOR (*Association Française de Normalisation*)

- [1.1] N.F. X 10-101 (9-49) Mesure des Débits Instantanés des Fluides.
- [1.2] N.F. X 10-102 (9-71) Mesure de Débit de Fluides au Moyen de Diaphragmes, Tuyères e tubes de Venturi.
- [1.3] N.F. X 10-104 (10-70) (idem acima), Guides d'Emploi Pratique.
- [1.4] N.F. X 10-105 (03-75) Mesure du Débit d'un Ecoulement Pulsatoire de Fluides dans une Conduite au Moyen de Diaphragmes, Tuyères ou Tubes de Venturi.
- [1.5] N.F. X 10-112 (9-77) Mesure du Débit des Fluides dans les Conduites Fermées (Pitot).

[2] A.G.A. (*American Gas Association*)

- [2.1] A.G.A. Flow Constants.
- [2.2] Gas Measurement Committee. Report nº 3 (1991/2000).
- [2.3] Measurement of Fuel Gas by Turbine Meters. Report nº 7.
- [2.4] Compressibility and Supercompressibility for Natural Gas and other Hydrocarbon gases. Report nº 8 (1998).
- [2.5] Measurement of gas by Multipath Ultrasonic Meters. Report nº 9.

[3] A.P.I./ANSI/ASME

- [3.1] Manual on Installation of Refinery Instruments and Control Systems.
- [3.2] A.P.I. Standard 2531, (1963) A.N.S.I., for Mechanical Displacement Meter Provers.
- [3.3] Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 4 – Proving Systems.
- [3.4] Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 14 – Natural gas fluid measurement.
- [3.5] ANSI/API MPMS 12.2F, Instructions for Calculating Liquid Petroleum Quantities Measured by turbine or Displacement Meters.
- [3.6] ANSI/ASME MFC-YY, Measurement of Liquid Flow in Closed conduits Using Transit Time Ultrasonic Flowmeters.
- [3.7] ASME/ANSI MFC-4M, Measurement of gas Flow by Turbine Meters.

[4] I.S.O. (*International Standardization Organization*)

- [4.1] I.S.O./CD 5167-1 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full.
- [4.2] I.S.O. 5168 Measurement of fluid flow – Estimation of uncertainty of a flow-rate measurement.
- [4.3] I.S.O. 2715 Hydrocarbures liquides – Mesurage volumétrique au moyen de compteurs à turbine.
- [4.4] I.S.O. 9300 Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.

- [4.5] I.S.O. 9951 Measurement of gas flow in closed conduits – Turbine meters.
- [4.6] I.S.O./TR 15377 Measurement of fluid flow by means of pressure-differential devices Guidelines for specification of nozzles and orifice plates beyond the scope of I.S.O. 5167-1 (1988).

[5] LIVROS DIVERSOS

- [5.1] Fluid Meters, Their Theory and Application A.S.M.E. (1971).
- [5.2] The Properties of Gases & Liquids – Reid, Prausnitz e Poling - McGraw-Hill (1988).
- [5.3] Mesure des Débits et des Vitesses des Fluides – J. Lefebvre – Masson (1986).
- [5.4] Flow Measurement Engineering Handbook – R. W. Miller – McGraw-Hill (1989).
- [5.5] Industrial Flow Measurement David W. Spitzer – ISA (1990).
- [5.6] Chemical Engineer's Handbook, Perry.
- [5.7] Instrument Engineer's Handbook, Béla G. Lipták, Chilton Book Company (1970).
- [5.8] Principles and Practices of Flow Meter Engineering, L.K. Spink, The Foxboro Company, Foxboro, Massachusetts, USA.
- [5.9] Shell Meter Engineering Handbook, Royal Dutch/Shell Group, Weltman Publishing Company, Delft.

4

NÍVEL

ENGº EGÍDIO ALBERTO BEGA

4.1 INTRODUÇÃO

Nível é uma das variáveis mais comum e mais amplamente utilizada em aplicações industriais.

A medição de nível é definida como a determinação da posição de uma interface entre dois meios. Usualmente, um destes meios é líquido, mas eles podem ser sólidos ou a combinação de um sólido e um líquido. A interface pode ser entre um líquido e um gás ou vapor, dois líquidos, ou entre um sólido e um gás.

Existe uma grande variedade de sistemas de medição de nível, cada um com suas vantagens e limitações. A seleção do sistema de medição a ser utilizado deverá considerar as características específicas da aplicação, o tipo de produto cujo nível se quer medir, a precisão desejada, custos e demais restrições existentes.

Em função da evolução tecnológica, do aumento dos custos das matérias-primas e materiais intermediários e das novas exigências de precisão nas medições realizadas, nos últimos anos foram desenvolvidos diversos tipos de instrumentos de medição de nível, com precisão chegando a $\pm 0,5$ mm.

Os instrumentos de medição de nível podem ser classificados, pela forma como medem o nível, em instrumentos de medida direta e inferencial.

Os instrumentos de medida direta medem diretamente a distância entre o nível do produto que se quer medir e um referencial previamente definido. A medida direta desta distância pode ser feita, pela observação visual direta (LG's), através de comparação com uma escala graduada (trenas), ou pela determinação da posição de um detector, como um flutuador, sobre a superfície do produto que se quer medir, ou pela reflexão de ondas ultra-sônicas ou eletromagnéticas (radar) pela superfície do produto.

Os instrumentos de medida inferencial determinam a posição da superfície livre do produto cujo nível se quer medir, através da medida de outra grandeza física a ela relacionada. Nesta classe, incluem-se os instrumentos que medem o nível através da medida da pressão da coluna hidrostática desenvolvida por um líquido ou, ainda, os que medem através da variação de peso do equipamento que contém o produto cujo nível se quer medir.

A classificação dos instrumentos de medição de nível pela forma com que medem o nível, não deixa lugar específico para as chaves de nível, que podem funcionar de forma direta ou inferencial. Estas chaves, por terem a particularidade operacional de operarem somente em níveis fixos previamente determinados, serão analisadas separadamente. Os visores de nível também compõem uma classe singular de instrumentos que, embora possa ser enquadrada entre os instrumentos de medida direta, pelas suas particularidades, serão analisados como classe separada.

Os instrumentos de medição de nível também podem ser classificados pela função que o instrumento desempenha na malha, o que, em nosso caso, nos levaria a classificá-los como **indicadores, transmissores, controladores e chaves de nível**.

Na apresentação deste capítulo, teremos, subjacente ao seu desenvolvimento, as seguintes classes para os instrumentos de medição de nível: **visores, instrumentos de medição contínua e chaves de nível**.

Na tabela 4.1 estão mostradas, resumidamente, de forma prática e condensada, as aplicações aos quais melhor se adequam os instrumentos de medição de nível tratados neste capítulo.

TABELA 4.1
Seleção de Instrumentos de Nível

Item	Tipo de instrumento	Chave de nível					Medição contínua									
		Medição em ponto fixo					Indicação					Transmissor/controlador				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
4.3	Flutuador	E	-	R	R	-	B	-	R	R	-	B	-	R	R	-
4.4	Deslocador	E	-	B	-	-	-	-	-	-	-	E	-	B	-	-
4.5	Pressão diferencial	E	R	R	-	-	E	R	R	-	-	E	R	R	-	-
4.6	Ultra-sônico	B	R	-	B	B	-	-	-	-	-	B	R	-	R	B
4.7	Radar	E	B	-	B	R	-	-	-	-	-	E	B	-	B	R
4.8	Capacitivo	B	B	R	-	B	R	R	R	-	R	B	B	R	-	B
4.9	Eletromecânico	E	R	R	B	B	R	R	-	R	R	B	R	-	B	B
4.10	Pás rotativas	-	-	-	-	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.11	Pesagem	-	-	-	R	B	-	-	-	R	B	-	-	-	R	B

1 – Líquidos limpos. 2 – Líquidos com espuma 3 – Interface. 4 – Polpas 5 – Sólidos.

E – Excelente (sem restrições de uso) B – Bom (com restrições de uso) R – Regular (poucas aplicações).

4.2 VISORES DE NÍVEL

Os visores de nível se destinam exclusivamente à monitoração do nível de líquidos ou da interface entre dois líquidos imiscíveis em vasos, colunas, reatores, tanques etc., submetidos ou não à pressão.

Devido ao seu baixo custo, quando comparados com outros tipos de instrumentos, os visores são aplicados na quase totalidade dos casos de monitoração local de nível, não sendo empregados somente nos casos onde a pressão e/ou temperatura sejam excessivas e impeçam a sua utilização.

Devido às suas características construtivas os visores de nível são de fácil manutenção, sendo construídos de maneira a oferecer segurança na operação.

Para atender as mais variadas aplicações em diversos processos, existem os visores do tipo tubular, os visores de vidro plano e os visores especiais. Esses visores serão analisados nos itens subsequentes.

4.2.1 Visores de Vidro Tubular

4.2.1.1 Descrição

Os visores de vidro tubular normalmente são fabricados com tubos de vidro reto, utilizando paredes com espessura adequada a cada aplicação. Estes tubos de vidro são fixados entre duas válvulas de bloqueio de desenho especial, através de união e juntas de vedação apropriadas a cada especificação de projeto (figura 4.1).

O comprimento, o diâmetro e a espessura do tubo de vidro irão depender das condições de pressão e temperatura a que estará submetido o visor. Deve-se ressaltar que este tipo de visor não suporta altas pressões, nem altas temperaturas.

Para proteção do tubo de vidro contra eventuais choques externos, são fornecidas, montadas no visor, hastes protetoras metálicas colocadas em torno do tubo de vidro (figura 4.1) ou com tubos ou chapas plásticas envolvendo o tubo de vidro.

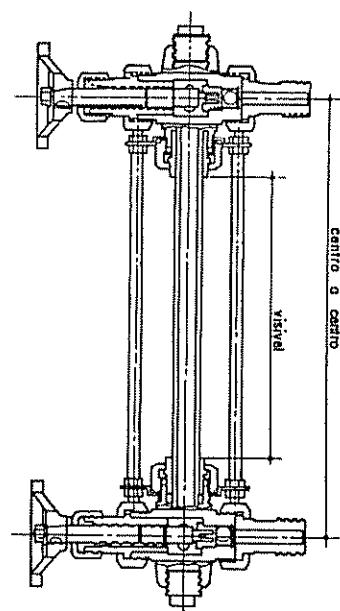


FIGURA 4.1 Visor de vidro tubular.

4.2.1.2 Características físicas nominais

Os tubos de vidro têm seus diâmetros normalizados. Para cada dimensão normalizada são relacionados os respectivos valores de pressão e temperatura máxima permitíveis.

Devido às suas características construtivas, os visores de vidro tubular não suportam altas pressões e temperaturas, bem como apresentam alta probabilidade de quebra do vidro por choque externo.

4.2.1.3 Recomendações para seleção

Devido às limitações quanto a resistência e segurança, os visores de vidro tubular são recomendados para uso em processos que não apresentem pressões superiores a 2,0 bar e em temperaturas que não excedam em muito os 100 °C.

Não se recomenda o uso do visor de vidro tubular com líquidos tóxicos, inflamáveis ou corrosivos, visto que a fragilidade deste tipo de visor aumenta a probabilidade de perda de produto contido no equipamento.

O comprimento do tubo de vidro não deverá exceder os 750 mm. Caso seja necessário cobrir faixas de variação de nível maiores, recomenda-se utilizar dois ou mais visores com sobreposição das faixas visíveis (figura 4.2), a não ser que o fluido seja inofensivo, trabalhe com baixa pressão e baixa temperatura e não coloque em perigo outros equipamentos instalados nas proximidades.

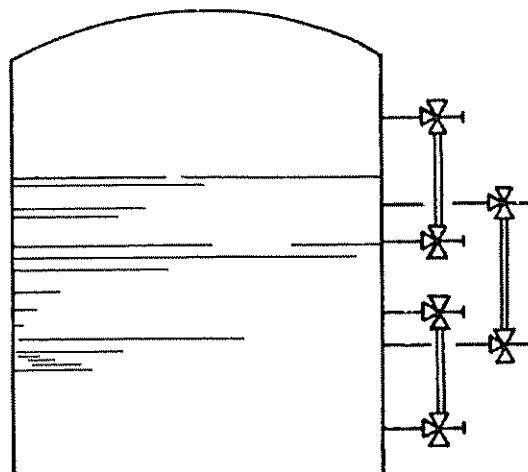


FIGURA 4.2 Esquema de visor com sobreposição das faixas visíveis.

Recomendações para instalação e operação eficiente, vide item 4.2.3.

4.2.2 Visores de Vidro Plano

Os visores de vidro plano substituíram, ao longo dos anos, a quase totalidade dos visores de vidro tubular. Esse fato decorre da inerente falta de segurança apresentada pelos visores de vidro tubular em aplicações com pressões e/ou temperaturas elevadas. Atualmente, os visores planos representam cerca de 90% das aplicações de visores de nível em plantas industriais.

4.2.2.1 Descrição

Os visores de vidro plano têm o aspecto mostrado na figura 4.3. São compostos de um ou vários módulos, onde se fixam barras planas de vidro. Estes módulos são conhecidos como seções dos visores.

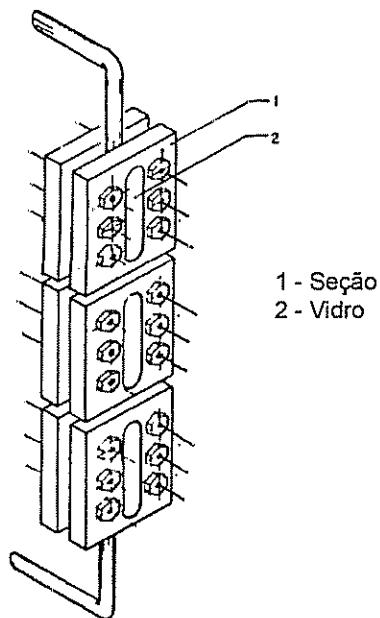


FIGURA 4.3 Visor de vidro plano com três seções.

Apesar da diversidade de modelos e fabricantes, cada seção apresenta uma altura variando de 100 a 350 mm e, dependendo da altura do nível a ser medido, os visores podem ser compostos de várias seções (visor multisseção). Contudo, recomenda-se que cada visor tenha, no máximo, quatro seções. Ultrapassado esse limite, o peso da unidade torna-se excessivo e o visor pode deixar de ser auto-sustentável, necessitando de suportes adicionais. Caso sejam previstas variações amplas na temperatura do fluido, o visor deverá ser provido com *loops* de expansão, para possibilitar a dilatação ou contração resultantes. Quando a altura do nível a ser medido exigir um número de seções que ultrapasse o limite sugerido (quatro seções), deverão ser instalados visores adicionais sobrepostos, como mostra a figura 4.2.

A principal desvantagem dos visores multissecções, são as regiões de não visibilidade entre seções adjacentes, que medem tipicamente 38 mm.

A especificação dos materiais das diversas partes do visor de vidro plano depende da aplicação (temperatura, pressão, tipo de fluido etc.), mas, de modo geral, pode-se dizer que os materiais usualmente utilizados são os seguintes (vide figura 4.4):

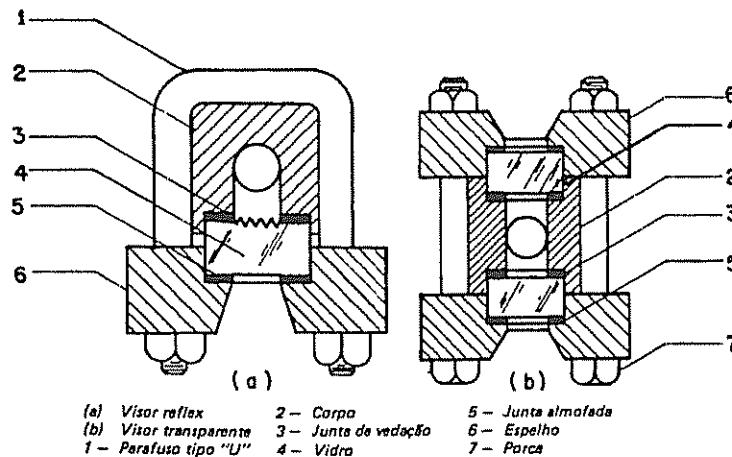


FIGURA 4.4 Corte dos visores de vidro plano tipo *reflex* e *transparente*.

- **Vidro (4)**

É de borossilicato temperado, capaz de suportar choques térmicos e mecânicos. Devido à sua própria natureza, não deverá receber qualquer esforço que resulte em flexão.

- **Corpo do Visor (2)**

A câmara por onde passa o fluido geralmente é fabricada em aço carbono usinado. Para aplicações com fluidos corrosivos ou alta pressão deverá ser utilizado aço inoxidável (AISI 304 ou 316).

- **Espelho (6)**

A tampa frontal, que deve suportar altas tensões, usualmente é fabricada em ferro nodular ou aço carbono/inoxidável (para pressões médias e elevadas).

- **Parafusos e Porcas (1 e 7)**

Os parafusos de fixação e porcas são, normalmente, em aço ASTM-A-193 Gr. B7 e A-194 Gr. 2H, respectivamente.

- **Juntas (3 e 5)**

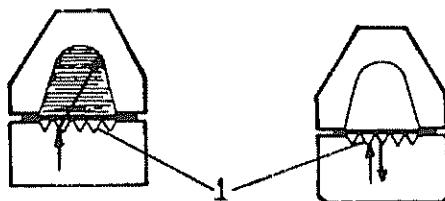
As juntas de vedação são em papelão hidráulico e as juntas almofadas são de amianto (grafitado).

4.2.2.2 Tipos

Os visores de vidro plano podem ser classificados em dois tipos: *reflex* (refletivos) ou transparentes.

4.2.2.2a Visor de vidro plano tipo *reflex* (figura 4.4a)

O vidro do visor plano *reflex* é liso na face externa e possui ranhuras prismáticas normais, no sentido longitudinal do visor, na face que tem contato com o líquido, cujo nível se quer medir. Seu funcionamento baseia-se na lei ótica da reflexão total da luz (figura 4.5). Os raios de luz normais à face do visor atingem a superfície do prisma com um ângulo de 45° , sofrendo reflexão total, no caso da região do visor onde não existe líquido, pois o ângulo crítico é ultrapassado (para a superfície vidro-ar o ângulo crítico é de 42°). Nesta mesma condição, no caso da região do visor onde existe líquido, não ocorre a reflexão total, pois o ângulo crítico não é ultrapassado (para a superfície vidro-água é de 62°), consequentemente, é possível se ver a superfície interna da câmara do visor, que, para dar maior contraste/visibilidade, geralmente é pintada na cor preta.



1 – Ranhuras prismáticas

FIGURA 4.5 Princípio de operação dos visores de vidro plano tipo *reflex*.

4.2.2.2b Utilização dos visores planos *reflex*

Os visores *reflex* não devem ser utilizados nas seguintes aplicações:

- fluidos corrosivos ao vidro – nesse caso inclui-se também o vapor d'água saturado a pressões superiores a 30 bar. Tais aplicações requerem que a superfície interna do vidro seja protegida contra ataque do agente corrosivo (geralmente mica), prejudicando a ação/funcionamento das ranhuras prismáticas;
- fluidos viscosos, pois o agarramento do fluido sobre o vidro torna sem efeito a ação das ranhuras prismáticas;
- iluminação insuficiente no local de instalação;
- detecção da interface de dois líquidos não miscíveis, uma vez que o visor ficaria escurecido, por igual, na região onde qualquer dos dois líquidos não miscíveis estivesse presente.

A principal vantagem do visor *reflex* sobre o visor transparente decorre da necessidade de somente um vidro. Assim, os visores *reflex* suportam pressões mais elevadas, possuem menor número de juntas e são mais baratos que os visores transparentes.

4.2.2.2c Visor de vidro plano tipo transparente (figura 4.4b)

Utiliza dois vidros transparentes. Um dos vidros localiza-se na parte posterior do visor e outro na parte anterior. Os dois vidros permitem a transparência do visor à luz. O raio luminoso entrará por um dos vidros e será absorvido, parcial ou totalmente, pelo fluido no interior do visor. A parte com vapor ou ar absorverá menos luz que a parte com líquido, proporcionando, assim, um contraste ao observador. Para melhorar a visibilidade, pode-se dotar o visor com lâmpadas iluminadoras, localizadas na parte posterior do visor.

4.2.2.2d Utilização dos visores planos transparentes

Os visores transparentes podem ser utilizados em aplicações com fluidos coloridos, viscosos ou corrosivos ao vidro. Também são aplicáveis à supervisão da interface entre dois líquidos de cores diferentes. São utilizados, ainda, quando o fluido no interior do visor for corrosivo ao vidro (como, por exemplo, a água de caldeira a pressões superiores a 30 bar); neste caso, faz-se necessário a instalação de um material transparente protetor (geralmente mica ou Kel-F) entre o vidro e a junta de vedação. A seleção desse material deverá ser criteriosa para não prejudicar a visibilidade do visor (por exemplo, alguns plásticos tornam-se translúcidos com a ação da luz solar e devem ser evitados).

4.2.3 Recomendações para Instalação e Operação Eficiente de um Visor de Vidro

Geralmente a instalação de um visor de vidro requer os seguintes acessórios adicionais (figura 4.6):

- válvulas de isolamento das tomadas (válvulas 1 e 2, figura 4.6);
- válvulas de bloqueio junto ao visor. Normalmente, são válvulas de três vias (válvulas 3 e 4, na figura 4.6), que permitem conectar o visor na tubulação das tomadas, bem como conectar as saídas de dreno ou respiro;
- válvula de dreno (válvula 5, na figura 4.6) instalada na extremidade inferior do visor. Eventualmente, poderá ser instalada também uma válvula para respiro em lugar do plugue 6 mostrado na figura 4.6.

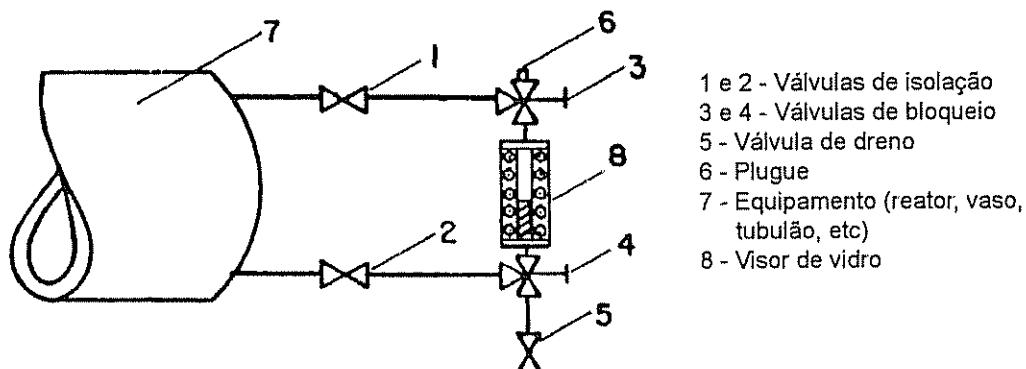


FIGURA 4.6 Instalação típica de um visor de vidro.

A especificação da classe de pressão, material e outras características das válvulas, tubos e do próprio visor de vidro devem seguir a especificação do equipamento onde o visor de vidro será instalado. Várias opções para instalação de instrumentos de nível podem ser utilizadas. O API-RP 551 – *Process Measurement Instrumentation – Section 3 – Level*, mostra várias alternativas para instalação de visores, bem como recomendações quanto à dimensão e tipos de válvulas, conexões e tubulações a serem utilizadas.

Por segurança, as válvulas de bloqueio do visor devem ser dotadas de uma esfera de retenção (figura 4.7), que previne a descarga de fluido para a atmosfera se, porventura, ocorrer a quebra do vidro ou vazamento excessivo no visor.

Quando se desejar maximizar a visibilidade do nível no visor de vidro, as válvulas de bloqueio deverão ser instaladas lateralmente. Opcionalmente, para facilitar o posicionamento do visor em relação ao observador, poderão ser utilizadas válvulas offset, que permitem a comunicação sem obstruções entre a conexão ao visor e a saída de dreno ou respiro, já que a haste dessa válvula é deslocada lateralmente em relação ao canal de comunicação visor-dreno-respiro (figura 4.7).

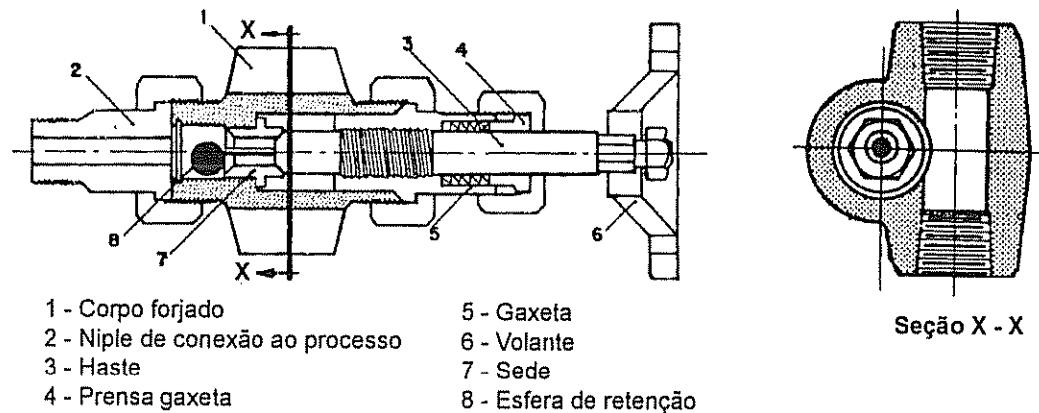


FIGURA 4.7 Válvula de bloqueio tipo offset com esfera de retenção.

Quando instalados em vasos onde também se encontram instrumentos de medição contínua de nível, recomenda-se que os visores de vidro cubram uma faixa maior que a destes, de forma a facilitar a calibração ou a verificação do funcionamento dos transmissores.

Os visores de vidro devem ser locados em posição que permita uma boa visibilidade ao operador e seja de fácil acesso para manutenção do vidro, das válvulas e juntas.

Os vidros devem ser mantidos sempre limpos e as condições das juntas de vedação e das válvulas de bloqueio devem ser sempre verificadas.

Na fase de montagem do visor de vidro plano, é importante observar o torque a ser aplicado aos parafusos do visor, recomendado pelo fabricante. Se utilizar-se valor de torque abaixo do recomendado, para uma determinada pressão de operação, poderá resultar em carga insuficiente na junta de vedação e consequente vazamento. Aplicação de torque excessivo, como foi dito anteriormente, poderá danificar as juntas de vedação,

proteção, mica e a própria superfície de assentamento no corpo do visor, resultando também em vazamentos. O torque aplicado deve ser distribuído uniformemente a todos os parafusos da tampa.

A figura 4.8 sugere uma seqüência de aperto dos parafusos. Devido às características das juntas de vedação metálica, poderá ocorrer vazamento após algum tempo de operação; se isto ocorrer, o visor deverá ser isolado e providenciado reaperto dos parafusos. Alguns fabricantes colocam entre a junta de vedação e a tampa, ou nos parafusos, anéis de pressão para prevenir essa ocorrência de vazamento.

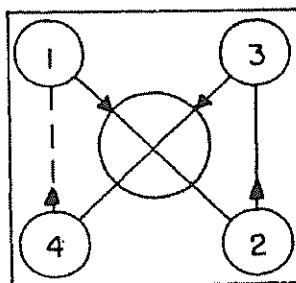


FIGURA 4.8 Seqüência de aperto dos parafusos do visor de vidro plano.

4.2.4 Visores de Vidro Bicolores

Os visores de vidro bicolores objetivam melhorar a visibilidade utilizando a diferença no índice de refração da luz na água e no vapor. O índice de refração no vapor é muito pequeno, consequentemente a luz percorre uma linha reta ao atravessá-lo. A figura 4.9 mostra o princípio de funcionamento desses visores.

Lâmpadas emitem luz que passam através de filtros coloridos (verde e vermelho). O trajeto percorrido pelos raios de luz até atingirem o observador dependem do índice de refração das interfaces vidro-mica-vapor ou vidro-mica-água. Quando a luz atravessa as seções com água, os raios verdes posicionam-se na linha de visão do operador, enquanto que os raios de cor vermelha são redirecionados (pela refração) e não atingem o operador. Para as seções com vapor, a situação é inversa e o operador vê somente a luz vermelha.

Este efeito é mais pronunciado em baixas temperaturas devido a ampla diferença de densidade e, por conseguinte, do índice de refração, entre o vapor e a água. Em temperaturas elevadas, o grau de separação da luz torna-se menos delineado e são necessários ajustes para melhorar a visibilidade.

O campo visual do visor pode ser transmitido a distância, através da combinação de espelhos ou pela utilização de fibra ótica ou câmeras de TV.

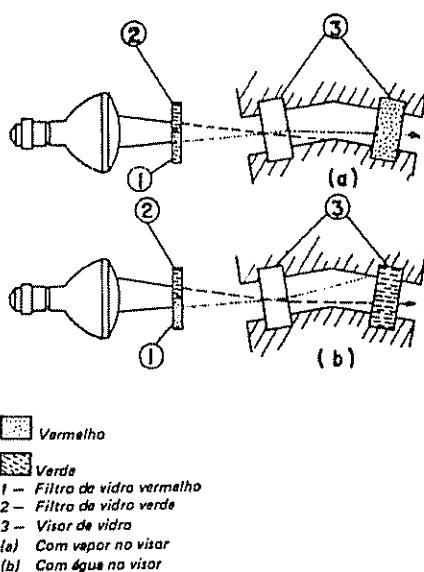


FIGURA 4.9 Funcionamento dos visores de vidro bicolores.

4.3 DISPOSITIVOS DO TIPO FLUTUADOR (OU BÓIA)

4.3.1 Flutuador *versus* Deslocador

Existem dois tipos de sensores de nível cuja operação é baseada no **Princípio do Empuxo**. Estes sensores são conhecidos como **flutuador** e **deslocador**.

O princípio do empuxo é formulado a partir do conceito de **volume de líquido deslocado por um corpo imerso**. Quando um corpo sólido é mergulhado sobre um líquido, parte de seu volume fica submerso (se o corpo afundar, 100% de seu volume ficará submerso); esta parte, ao submergir, desaloja ou **desloca** um igual volume de líquido. O líquido deslocado reage à imersão do corpo, desenvolvendo, sobre ele, para cima, uma **força** denominada **empuxo**, cujo valor é igual ao peso do líquido deslocado. Naturalmente, quanto maior a densidade do líquido, maior o empuxo. Entretanto, o Princípio do Empuxo não se restringe aos líquidos, valendo para qualquer **fluido**. Apesar disso, na prática, as densidades dos gases e vapores são muito menores do que as densidades dos líquidos. Assim, a contribuição do gás ou vapor para o cálculo do empuxo normalmente não é considerada.

A condição de flutuação resulta da comparação do peso do corpo com o **máximo empuxo que pode ser desenvolvido sobre ele** (numa situação hipotética, em que o corpo estivesse totalmente submerso): se o peso do corpo for maior que o empuxo, o corpo efetivamente submergirá; se for menor, flutuará. Este critério pode ser aplicado para se caracterizar (e diferenciar) **flutuador** e **deslocador**.

Com base neste critério, pode-se afirmar que o **corpo do flutuador deve possuir peso menor que o peso da quantidade de líquido que seu volume pode deslocar**,

enquanto o corpo do deslocador deve possuir peso maior que o peso da quantidade de líquido que seu volume pode deslocar. Para o flutuador, este critério refere-se ao líquido menos denso em que deverá operar o sensor; para o deslocador, deve ser considerado o líquido mais denso. Torna-se evidente, então, que se o deslocador operar com um líquido de densidade maior do que aquela para a qual foi especificado, poderá se comportar como um flutuador. Evidentemente, este modo de operação deverá ser evitado, pois irá mascarar completamente a resposta do instrumento quando sujeito a variações de nível.

Pelo exposto anteriormente, fica evidente que o deslocador não pode responder às variações de nível sem o auxílio de um mecanismo de sustentação, isto porque se o deslocador for abandonado sobre a superfície líquida, ele afundará, conforme estabelece a condição de flutuação. Por isto, o deslocador opera sempre em conjunto com uma mola, linear ou torsional, que promove sua sustentação não-rígida.

O funcionamento do conjunto mola/deslocador pode ser melhor compreendido se tomarmos como referência o deslocador e considerarmos o nível variável, conforme ocorre na prática. Embora este ponto de vista seja o oposto daquele utilizado na conceituação do empuxo, a relação entre o deslocador e o volume deslocado, permanece válida. Quando o nível está muito baixo, o deslocador está "seco", de forma que a mola se encontra distendida ao máximo, suportando seu peso total. Quando o nível sobe, o deslocador vai imergindo e deslocando o líquido progressivamente, o resultado é um aumento contínuo do empuxo, que proporciona um correspondente alívio na tensão da mola; a redução da tensão da mola é convertida em sinal de saída do instrumento.

Da descrição anterior, conclui-se que a quantidade de líquido deslocado pelo deslocador varia com o nível, o que confere ao dispositivo a denominação deslocador variável, origem do nome deslocador atribuído ao sensor. Por extensão, o nome operacional do flutuador seria "deslocador constante", já que a quantidade de líquido por ele deslocado, que é igual ao volume submerso, é constante e independente do valor do nível.

4.3.2 O Flutuador

Neste item apresenta-se o princípio de operação e as recomendações teórico-práticas para a seleção dos dispositivos que utilizam flutuadores para indicação, transmissão e controle do nível de líquidos em tanques e vasos de pressão. O emprego de flutuadores em chaves de nível é tratado no item 4.10.1 deste capítulo.

No âmbito deste item, o termo flutuador designará qualquer elemento que acompanhe a altura (nível) do líquido (ver introdução do item 4.3 deste capítulo), independente da sua formação geométrica (esférica, cilíndrica etc.) e do material utilizado (aço, latão etc.). Deve-se ressaltar o fato de que os flutuadores esféricos, em aço inoxidável, são os mais utilizados, por ser o aço inoxidável um material não absorvente, o que elimina variações de flutuabilidade, por possuir boa resistência mecânica e à corrosão e também pelo formato esférico fornecer a máxima força de flutuação para o peso utilizado.

Na figura 4.10 está mostrado o sistema de forças aplicado sobre o flutuador. Neste caso, o sistema de forças é dado por:

$$FR = P - E \quad [4.1]$$

onde:

FR = força resultante;

P = peso;

E = empuxo sofrido pelo flutuador.

$$E = \gamma_1 \cdot V_1 + \gamma_2 \cdot V_2 \quad [4.2]$$

$$P = \gamma_F \cdot V_F \quad [4.3]$$

$$VF = V_1 + V_2 \quad [4.4]$$

$$V1 = V_F - V_2 \quad [4.5]$$

Substituindo-se [4.3] e [4.2] em [4.1], tem-se:

$$FR = \gamma_F \cdot V_F - \gamma_1 \cdot V_1 - \gamma_2 \cdot V_2 \quad [4.6]$$

Substituindo-se [4.5] em [4.6], tem-se:

$$FR = \gamma_F \cdot V_F - \gamma_1 \cdot V_F + \gamma_1 \cdot V_2 - \gamma_2 \cdot V_2 \quad [4.7]$$

$$FR = V_F \cdot (\gamma_F - \gamma_1) - V_2 \cdot (\gamma_2 - \gamma_1) \quad [4.8]$$

Como na condição de equilíbrio $FR = 0$, fazendo-se $FR = 0$ e rearranjando-se [4.8], tem-se:

$$V_2 = V_F \cdot \frac{(\gamma_F - \gamma_1)}{(\gamma_2 - \gamma_1)} \quad [4.9]$$

Com a variação do nível é alterado o volume V_2 , ficando o flutuador sujeito a uma resultante que o desloca a uma nova posição de equilíbrio.

Derivando [4.8] no tempo, em relação a V_2 , tem-se:

$$\frac{dFR}{dt} = -(\gamma_2 - \gamma_1) \cdot \frac{dV_2}{dt} \quad [4.10]$$

onde $dV_2 = A \cdot dh$, substituindo-se em [4.10], tem-se:

$$\frac{dFR}{dt} = -(\gamma_2 - \gamma_1) \cdot A \cdot \frac{dh}{dt}$$

onde dh = velocidade de variação do nível.

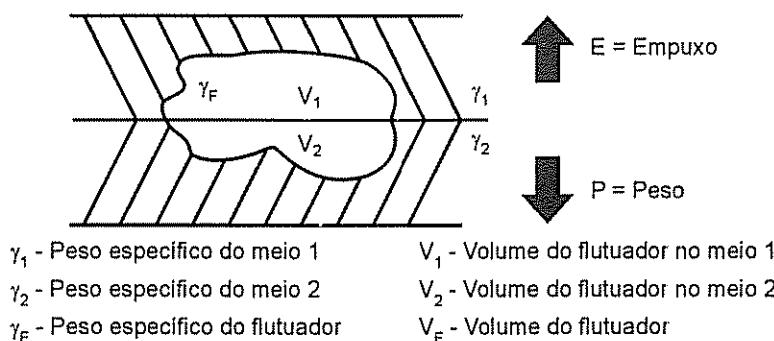


FIGURA 4.10 Sistema de forças aplicado sobre o flutuador.

Para que não haja atraso na medição ou no controle do nível, a força resultante (FR) deve ser suficiente para vencer os atritos do sistema e restaurar, com rapidez, o flutuador à sua nova posição de equilíbrio. Como as forças de atrito variam de medidor para medidor, os fabricantes tabelam os volumes dos flutuadores em função da diferença dos pesos específicos dos meios 1 e 2 e recomendam que a interface entre os dois meios (líquido e gás ou vapor) fique na linha de centro do flutuador (máxima área seccional – "A", nos flutuadores esféricos, figura 4.11), de modo a maximizar a sensibilidade do flutuador às variações do nível, em ambas as direções.

Com base nestas recomendações, pode-se escrever que:

$$V_2 = V_1 = \frac{V_F}{2}, \text{ substituindo em [4.9], tem-se:}$$

$$\frac{1}{2} V_F = V_F \cdot \frac{(\gamma_F - \gamma_1)}{(\gamma_2 - \gamma_1)}, \text{ rearranjando-se esta equação, tem-se:}$$

$$\gamma_F = \frac{1}{2} (\gamma_2 + \gamma_1).$$

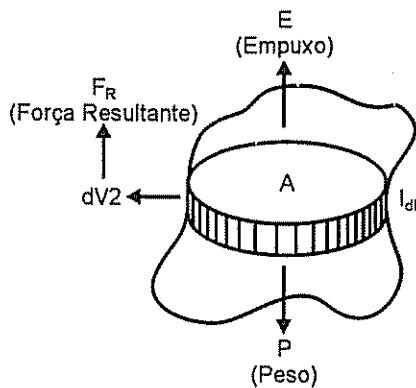


FIGURA 4.11 Sistema de forças aplicado sobre um flutuador esférico.

Analizando-se os dispositivos do tipo flutuador, fornecidos por diferentes fabricantes, conclui-se:

- o volume do flutuador é padronizado pelos fabricantes em função das densidades ($\gamma_2 + \gamma_1$);
- o flutuador é lastreado de modo que a sua densidade fique igual à densidade média $\frac{(\gamma_2 + \gamma_1)}{2}$ entre os dois meios, em cuja interface o nível está sendo medido.

Os medidores de nível que utilizam flutuadores como elemento sensor podem ser classificados em dois grupos básicos, em função do princípio que utilizam para determinar a posição do flutuador:

- medidores flutuador-haste;
- medidores flutuador-cabo.

4.3.3 Medidores Flutuador-Haste

Estes medidores se caracterizam pelo conjunto flutuador e haste (figura 4.12) que, ao acompanharem o nível do líquido, transmitem um movimento giratório a um grupo de engrenagens que, por sua vez, fazem girar um eixo acoplado, mecânica ou magneticamente a um ponteiro, em um mostrador calibrado em altura ou porcentagem do nível máximo do tanque.

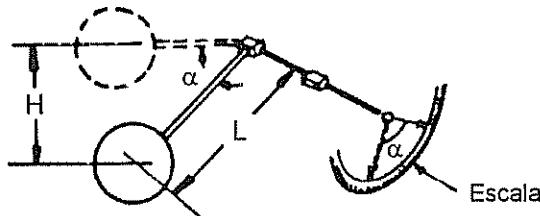


FIGURA 4.12 Medidor flutuador-haste.

O deslocamento efetivo (H) do flutuador e o comprimento (L) da haste são limitados por considerações práticas de instalação e operação, sendo que o ângulo α deve ser limitado a $\pm 30^\circ$ em relação à horizontal, para que o medidor forneça resposta rápida às variações do nível e adequada precisão na medida.

Neste tipo de medidor, o máximo deslocamento do flutuador é dado por:

$$\frac{H}{2} = L \cdot \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} \quad \text{ou} \quad H = 2 \cdot L \cdot \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}$$

para $\alpha = 60^\circ$, tem-se:

$$H_{\max} = L$$

Neste tipo de medidor, mecanicamente, a variação máxima do nível a ser medido está limitada ao comprimento da haste (L), conforme mostrado na figura 4.12.

4.3.4 Medidores Flutuador-Cabo

Estes medidores têm como princípio básico de funcionamento o deslocamento linear de um cabo, que tem uma das extremidades fixada ao flutuador e a outra fixada a um dispositivo de indicação. O tipo de cabo (fio, fita perfurada, corrente etc.) e o dispositivo de indicação variam de fabricante para fabricante, sendo os mais utilizados:

- régua externa graduada;
- mostrador mecânico.

4.3.4.1 Régua externa graduada

Na figura 4.13 uma das extremidades do cabo é fixada ao flutuador (tanques de teto fixo) ou ao teto do tanque (tanques de teto flutuante) e a outra extremidade é fixada em um cursor que desliza sobre uma régua, graduada na unidade de comprimento desejada (centímetros, metros etc.) e que permite a leitura local do nível. Os contatos para alarme remoto de nível alto ou baixo, podem ser fornecidos por chaves fim de curso instaladas na régua e acionadas pela passagem do cursor. O cabo desliza, por dentro de tubos, sobre roldanas, e é mantido sob tensão constante pelo peso do cursor. O flutuador é guiado por cabos-guia, que evitam medições incorretas devido ao deslocamento horizontal do flutuador, causado por turbulência no líquido. Os cabos-guia são presos no fundo do tanque e são tensionados por molas instaladas no topo do tanque. Em tanques de teto flutuante, o flutuador é instalado dentro de um tubo acalmodor, que tem como objetivo amortecer a turbulência do líquido.

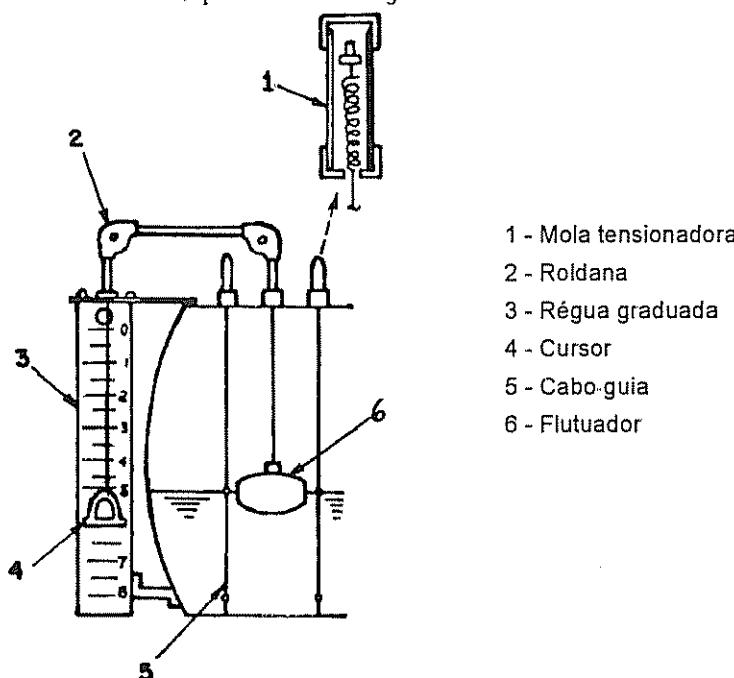


FIGURA 4.13 Medidor flutuador-cabo com régua externa graduada.

Este medidor é utilizado em aplicações simples na indústria, por ser um sistema mecânico de baixo custo, bom para indicação local do nível de tanques que armazenam líquidos limpos e não voláteis. Líquidos viscosos ou com impurezas tendem a alterar o peso do flutuador e empurrar o seu movimento.

4.3.4.2 Mostrador mecânico

As dificuldades de locação e de leitura causadas pelo comprimento da régua graduada podem ser sanadas com a utilização de mostradores mecânicos (figura 4.14). Nestes medidores, uma das extremidades do cabo é presa ao flutuador e a outra é presa a uma mola plana, de aço inoxidável, que o mantém tensionado. Normalmente, neste tipo de aplicação em lugar do cabo utiliza-se uma fita perfurada, que atua sobre uma engrenagem, acionando um mecanismo de indicação, que pode ser tanto um ponteiro como um contador mecânico.

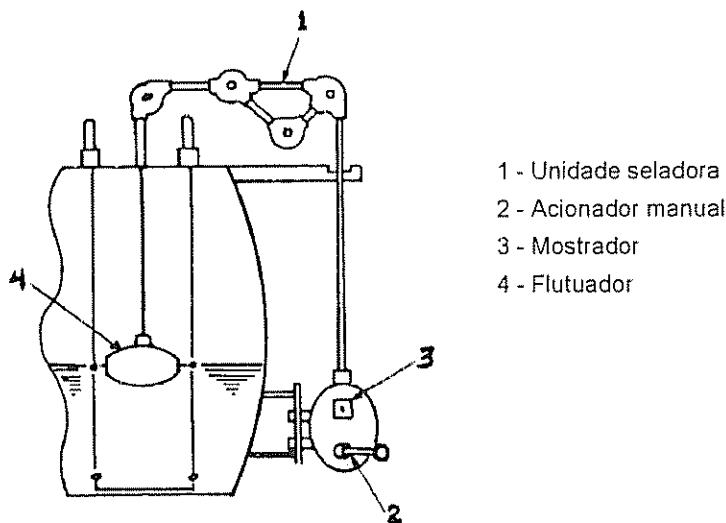


FIGURA 4.14 Medidor flutuador-cabo com mostrador mecânico

Como item opcional, o mostrador pode ser fornecido com uma alavanca para acionamento manual do flutuador (figura 4.14), o que se faz necessário durante as atividades de limpeza do flutuador e dos cabos-guia, ou ajuste dos pontos de alarme.

A figura 4.14 apresenta o mostrador instalado no piso do tanque por facilidade de operação e de manutenção e uma unidade seladora instalada no tubo de proteção do cabo. A unidade seladora pode ser utilizada em todos os medidores flutuador-cabo e tem como objetivo evitar vazamentos de gases ou vapores através do tubo protetor do cabo, o que é recomendado quando o fluido armazenado é tóxico, inflamável ou corrosivo.

4.4 DISPOSITIVOS DO TIPO DESLOCADOR

4.4.1 O Deslocador

O deslocador, comumente utilizado como sensor de transmissores de nível tem a forma de um cilindro oco, fabricado de materiais como aço inox 304 ou 316, monel, hastelloy, teflon sólido etc. A escolha do material do deslocador é determinada, principalmente, pela temperatura e corrosividade do fluido cujo nível se deseja medir. Se necessário, são depositados contrapesos granulados no interior do cilindro, a fim de ajustar o peso do deslocador.

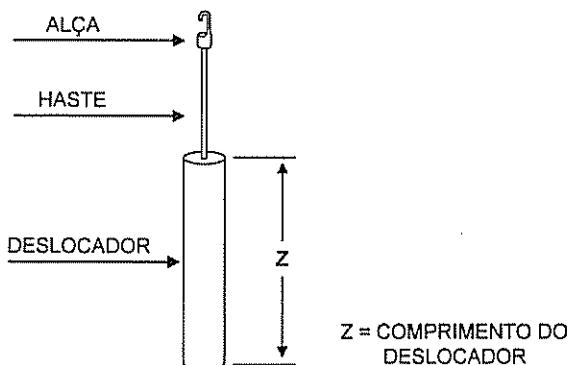


FIGURA 4.15 Deslocador típico.

Para se calcular o esforço ao qual estará submetido o elemento de sustentação, basta se subtrair do peso real do deslocador o empuxo aplicado sobre ele, resultando no **peso aparente do deslocador**. Como o empuxo sobre o deslocador aumenta com o percentual de imersão, o peso aparente do deslocador se reduz à medida que o nível aumenta. Nas figuras 4.15 e 4.17, estão representados deslocadores típicos. Dependendo das características dinâmicas do processo, propriedades físicas do líquido e facilidade de manutenção desejada, o deslocador pode trabalhar inserido diretamente no interior do equipamento (figura 4.24), ou inserido em um compartimento denominado **câmera** (figuras 4.22 e 4.23). Na realidade, a câmera é constituída de duas partes, conforme mostrado na figura 4.20. A **câmara inferior** abriga o deslocador e, nas configurações **LL** e **LB** (figura 4.16), apresenta duas conexões flangeadas ou rosadas para sua fixação no equipamento. A **câmara superior** encerra o braço de torque e, nos casos em que as duas conexões estão localizadas na câmara inferior, permite a remoção do deslocador sem que seja necessário desmontá-la do equipamento. Além disso, desacoplando-se os flanges de interface entre as duas câmaras, pode-se girar as câmaras superior e inferior, de modo a reorientar as conexões em relação ao conversor.

Quando o deslocador é especificado para ser fornecido com câmera, devem ser previstas duas conexões laterais no equipamento principal, as quais serão interligadas às correspondentes conexões da câmera, através das **tomadas de equalização** (figura 4.22). Cria-se, assim, um sistema de vasos comunicantes que garante, sob condições de estabilidade no líquido, igualdade entre os níveis no equipamento e na câmera do instrumento.

As quatro configurações mostradas na figura 4.16 são normalmente oferecidas pelos fabricantes, onde **T** significa topo, **B** base e **L** lado. A distância **D** é preestabelecida pelo fabricante para cada comprimento do deslocador, fato que deve ser considerado quando forem definidas as posições das tomadas de equalização do equipamento.

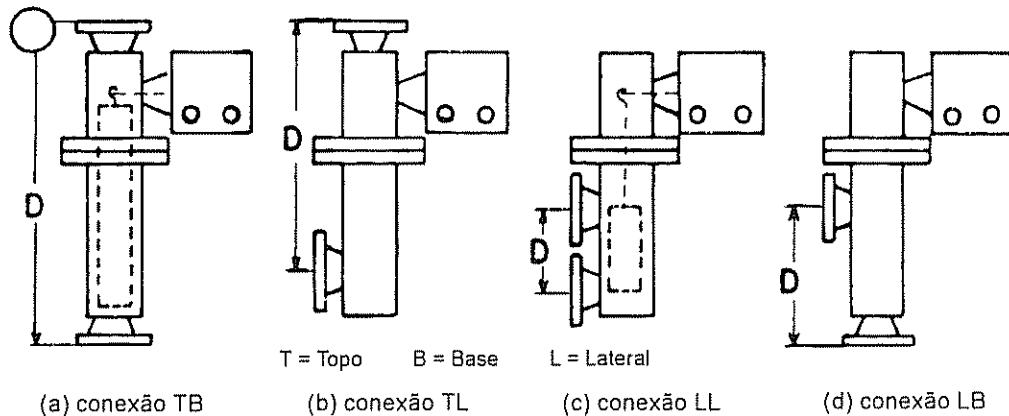


FIGURA 4.16 Configurações de instrumento do tipo deslocador

Além de padronização no comprimento, alguns fabricantes adotam um **volume de referência** (figura 4.17) para seus deslocadores. Isso porque, fixadas a elasticidade do elemento de sustentação e a densidade do líquido de processo, o alcance do **sinal de entrada do conversor** é determinado pelo volume do deslocador. O deslocador, que constitui parte integral do transmissor, pode ter quaisquer dos comprimentos padrões entre 0,35 e 3,00 metros. Apesar disso, a rotação total do eixo de transmissão (figura 4.19) é aproximadamente a mesma quando o nível excursiona do mínimo ao máximo, em qualquer uma destas faixas de medição.

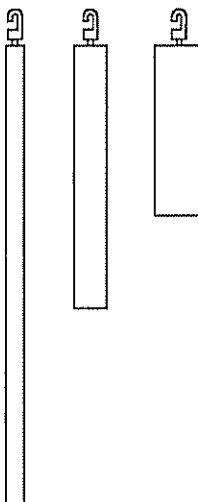


FIGURA 4.17 Deslocadores típicos com volume de referência constante

Conforme destacado no item 4.3.1 deste capítulo, no que diz respeito ao sensor, os instrumentos de nível baseado no efeito do empuxo são classificados em flutuadores e deslocadores. Foi visto, também, que os flutuadores são essencialmente dispositivos deslocadores de volume constante, o que significa, em outras palavras, que, se uma variação de nível Δy provocar um desvio Δx na posição do flutuador, forçosamente se verificará a igualdade $\Delta x = \Delta y$. Esta característica do flutuador restringe seu emprego em transmissão e controle a pequenas faixas de medição de nível, pois os mecanismos tradicionais de detecção utilizados em conversores não respondem a sinais de entrada com amplitude superior a poucos centímetros. Certas construções de dispositivos do tipo flutuador empregam redutores de amplitude, porém este recurso vem sempre acompanhado de uma significativa redução na precisão do instrumento.

A inconveniência do deslocamento de volume constante não existe no instrumento deslocador. Utilizando-se elementos de sustentação com elevada rigidez elástica ou conversores do tipo equilíbrio de forças, é possível obter-se uma reduzida sensibilidade $S = \Delta x / \Delta y$ nas construções com este sensor. Esta é a principal razão do sucesso dos transmissores do tipo deslocador, na medição de nível com faixas que vão de 0,35 até 3,00 metros.

4.4.2 Constituição do Transdutor Tipo Deslocador

Existem vários modelos de diferentes fabricantes para o transmissor de nível com deslocador. Entretanto, abstraindo-se as diferenças construtivas e de performance, verifica-se que todos eles são constituídos pelos mesmos **componentes básicos**. Além disso, a forma com que são dispostos esses componentes na trajetória em que se propaga a informação, desde o sensor até a saída do instrumento, é basicamente a mesma nos diversos modelos. À esta arquitetura de interconexão dos componentes básicos denominaremos **estrutura funcional básica**. O reconhecimento da existência de uma estrutura funcional e de um conjunto de componentes básicos comuns a todos os modelos, conduz a uma conceituação mais ampla a respeito das propriedades gerais do instrumento deslocador. Conseqüentemente, vão se tornando aparentes os recursos e as limitações de cada instrumento com relação aos demais, à medida que se trava conhecimento com os detalhes específicos do modelo.

O vocabulário básico necessário para se iniciar a análise dos dispositivos do tipo deslocador, dentro deste enfoque geral, consiste de três termos. Os dois primeiros, **componentes básicos** e **estrutura funcional básica**, já foram definidos antes; o terceiro é justificado pela necessidade do emprego de um termo que denote o aspecto de *design* do instrumento. Em outras palavras, observa-se que diferentes modelos de diferentes fabricantes possuem seus componentes básicos construídos dentro da mesma concepção. Neste caso, diremos que tais modelos caracterizam uma determinada **construção**. Portanto, a palavra construção, no sentido aqui utilizado, estabelece a conexão dos termos componentes e estrutura funcional à realidade dos instrumentos existentes. Assim, ao invés de apresentarmos todos os modelos do transmissor deslocador, nos concentraremos nas construções com que os mesmos se identificam, tornando menos repetitivo e mais interessante o texto.

A figura 4.18 mostra a estrutura funcional e os cinco componentes básicos do transmissor deslocador. Apesar de termos insistido na existência de uma única estrutura funcional, na prática a posição de um dos componentes não é a mesma em todas as construções, conforme sugerem as partes pontilhadas do esquema. O deslocador é o componente sobre o qual age o nível, que representa a variável primária de medição. Portanto, o deslocador desempenha a função de sensor, convertendo as variações de nível em variações de empuxo. Este componente é o elemento comum em todos os transmissores tipo deslocador, constituindo-se, inclusive, no único dos cinco componentes que, construtivamente, revela-se idêntico em todas as construções do instrumento. Uma vez que o deslocador é "mais pesado" que o líquido cujo nível é o objeto da medição, sua sustentação deve ser garantida por um outro componente. Este segundo componente é o elemento de sustentação, que provê uma suspensão elástica do deslocador, permitindo a movimentação deste sensor em resposta às variações de nível. A figura 4.18 mostra duas possibilidades quanto à localização do elemento de sustentação relativamente aos demais blocos e cabe ressaltar que cada construção possui apenas um elemento de sustentação.

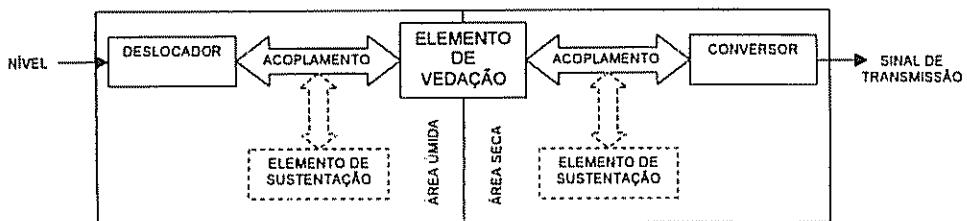


FIGURA 4.18 Componentes e estrutura funcional do transmissor deslocador.

Além de mostrar a interligação dos componentes internos, a figura 4.18 deixa transparecer a característica global do transmissor do tipo deslocador: um instrumento que recebe uma entrada através da variável nível e fornece uma saída denominada **sinal de transmissão**. Conforme já citado, o nível é convertido em empuxo através da ação do bloco de entrada na estrutura da figura 4.18, ou seja, através da ação do deslocador. Este, por meio dos demais componentes do instrumento, comunica-se com o bloco de saída, o **conversor**. Este terceiro componente do transmissor tem a função de converter a informação de nível oriunda do deslocador em um meio de transmissão adequado, como o ar pressurizado na versão pneumática, ou a corrente elétrica na versão eletrônica. A comunicação entre o deslocador e o conversor é realizada através do quarto componente aqui apresentado, o **acoplamento**, cuja função de interligação é bastante realçada na figura 4.18. Naturalmente, a fim de garantir uma perfeita transmissão da informação proveniente do deslocador, deve ser prevista uma via de acesso ao conversor, no interior da qual o acoplamento possa se movimentar livremente. Neste caso, se nenhuma precaução adicional fosse tomada, certamente os vapores quentes corrosivos, ou mesmo o líquido do interior do equipamento principal, penetrariam no compartimento do conversor. Esta situação deve ser evitada, pois o conversor, de constituição interna frágil, não resistiria a este ambiente agressivo. É previsto, então, um quinto componente, denominado **elemento de vedação**, que, instalado dentro da via de acesso mencionada, **bloqueia a passagem** de

qualquer fluido que possa penetrar no compartimento do conversor. Desta forma, criam-se dois ambientes no interior do instrumento, a área úmida, da qual fazem parte os componentes e acessórios que trabalham diretamente em contato com o processo (*wet parts*), e a área seca, onde se localiza o conversor, e, dependendo da construção, o elemento de sustentação (figura 4.18). Apesar de estabelecer uma isolação mecânica entre a área úmida e a área seca, o elemento de vedação permite que o acoplamento transponha esta barreira sem cercear-lhe o movimento. Em contraste com o deslocador, construtivamente idêntico nos diversos modelos do transmissor, o elemento da vedação apresenta-se significativamente diferente de construção para construção.

O conversor é o único dentre os cinco componentes citados que é constituído por outros componentes, denominados componentes internos. O conversor, não importa se pneumático ou eletrônico, é constituído basicamente por dois componentes, um desses componentes é o **detector**, um transdutor de posição que converte a característica mecânica do sinal de entrada do conversor (movimentação do acoplamento) em pressão ou corrente, e o outro componente interno é o **amplificador**, que produz o sinal de transmissão ou, do ponto de vista do conversor, o **sinal de saída**. O amplificador acrescenta **amplitude e capacidade** ao sinal gerado pelo detector. Na versão eletrônica, o transformador diferencial desempenha o papel de detector, enquanto que a amplificação é realizada por circuitos integrados e amplificadores operacionais ou, mais modernamente, por microprocessadores. Na versão pneumática, o conjunto bico/palheta funciona como detetor, ao passo que o relé (piloto) promove a amplificação.

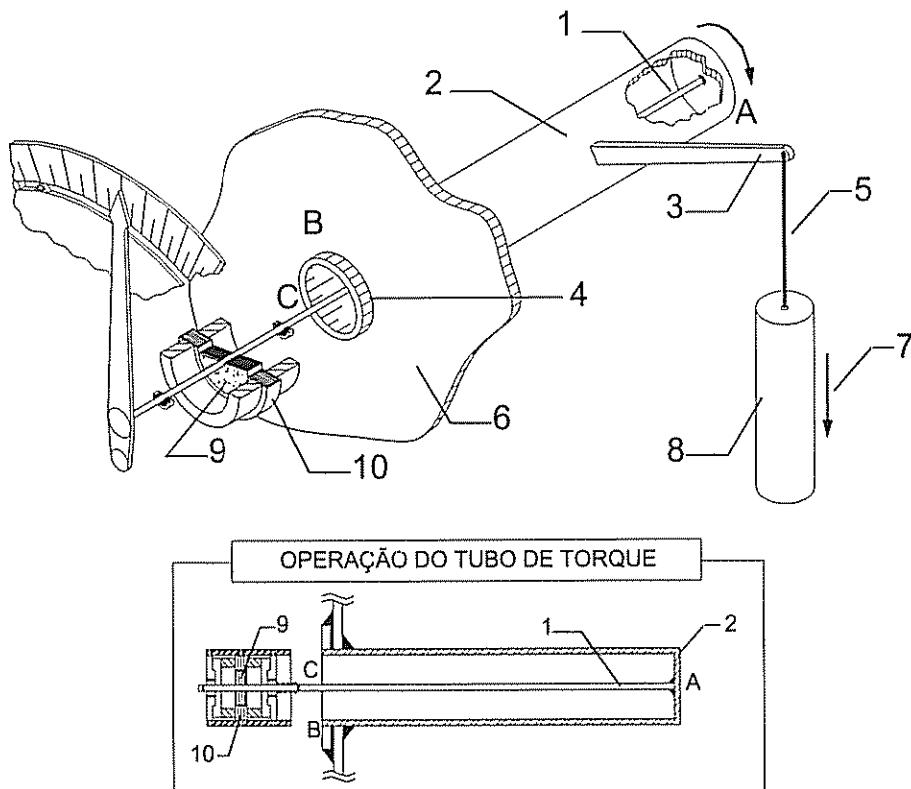
4.4.3 O Instrumento *Displacer*

Dentre as diversas construções de instrumentos utilizando elemento sensor do tipo deslocador, somente a que utiliza o tubo de torque possui as funções de sustentação e vedação realizadas pelo mesmo componente. Como o **tubo de torque revelou-se tão eficiente no cumprimento dessas duas funções**, os instrumentos construídos com este componente tornaram-se conhecidos como *displacer* (denominação em inglês de **deslocador**), fato este que comprova sua popularidade, dentre as demais construções que utilizam o deslocador como elemento sensor.

O tubo de torque constitui-se de um tubo oco, fechado em uma das extremidades, fabricado a partir de materiais como aço inox 304, 316, Inconel, Monel e outros. A espessura de parede do tubo de torque é tipicamente 0,8 milímetro, embora as unidades para medição de densidade sejam fabricadas com espessura de até 0,4 milímetro. Os fabricantes oferecem modelos para atender pressões de trabalho de até 160 kg/cm², estendendo-se a faixa de temperatura de trabalho de -200 °C a +400 °C.

Conforme mostrado na figura 4.19, quando o nível desce o deslocador tende a movimentar-se para baixo, devido ao acréscimo do seu peso aparente. Como a extremidade oposta àquela em que se aplica a solicitação está imobilizada (extremidade B, na figura 4.19), desenvolve-se uma contorção ao longo do tubo de torque. Esta contorção equivale à distensão de uma mola, que equilibra o esforço que lhe é aplicado através de uma reação proporcional à deformação linear sofrida. Da mesma forma, o ângulo com que gira a extremidade livre do tubo de torque é proporcional ao **momento** com que reage o tubo de torque em resposta ao acréscimo do peso aparente. Como a variação do peso

aparente é proporcional à variação de nível (pois o empuxo é proporcional ao volume deslocado, que, por sua vez, é proporcional ao percentual submerso do deslocador), segue-se que a rotação da extremidade livre do tubo de torque é proporcional à variação de nível. Esta rotação, transmitida integralmente ao conversor através do **eixo de transmissão de rotação** e convertida em um sinal elétrico proporcional pelo conjunto rotor/estator (figura 4.19), situa-se entre quatro e cinco graus para uma excursão completa do nível, ao longo do comprimento do deslocador. Observe-se que a haste do deslocador e o braço de torque, por um lado, e o eixo de transmissão de rotação, por outro lado, constituem o **acoplamento**, que "penetra" através do elemento de vedação, representado pelo tubo de torque na figura 4.19. Neste tipo de instrumento, deve-se notar que os blocos **elemento de vedação** e **elemento de sustentação**, mostrados na figura 4.18, encontram-se fundidos em um só.



1. Eixo de transmissão de rotação (soldado na extremidade fechada do tubo de torque).
2. Tubo de torque.
3. Braço de torque.
4. Extremidade do tubo de torque soldada ao corpo do instrumento
5. Haste do deslocador.
6. Corpo do instrumento.
7. Movimento do deslocador quando o nível desce.
8. Deslocador.
9. Rotor.
10. Estator.

FIGURA 4.19 Transmissor tipo *displacer* utilizando tubo de torque e elemento sensor do tipo deslocador.

A analogia que pode ser estabelecida entre o tubo de torque e uma mola linear, permite que o tubo de torque seja considerado como uma mola torsional. Enquanto uma mola linear reage à compressão ou distensão com uma força $F = K_m \cdot x$, onde x é a deformação linear de mola e K_m sua constante de elasticidade, a mola torsional reage à contração com um momento $T = K_{TT} \cdot \theta$, onde θ é o ângulo de contorção e K_{TT} é a constante de elasticidade do tubo de torque.

A figura 4.20 proporciona um outro ângulo de visão dos componentes de um *displacer* típico; nesta figura, ρ_1 e ρ_2 representam as densidades, em kg/m^3 , das duas fases do líquido. Se o fluido mais leve é um gás (o que também é valido para o ar, no caso de tanques atmosféricos) ou vapor, teremos uma **medição de nível de superfície**, situação em que $\rho_1 << \rho_2$, fato que justifica a simplificação $\rho_1 = 0$; se ambos os fluidos são líquidos (caso de medição de nível de interface), a movimentação do deslocador dependerá da densidade diferencial $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$. De qualquer forma, o comportamento do sistema deslocador/tubo de torque pode ser descrito, assumindo-se a situação de interface; as conclusões desta análise serão aplicáveis também para o caso de medição de nível de superfície, bastando que se substitua ρ_1 por zero nas expressões obtidas.

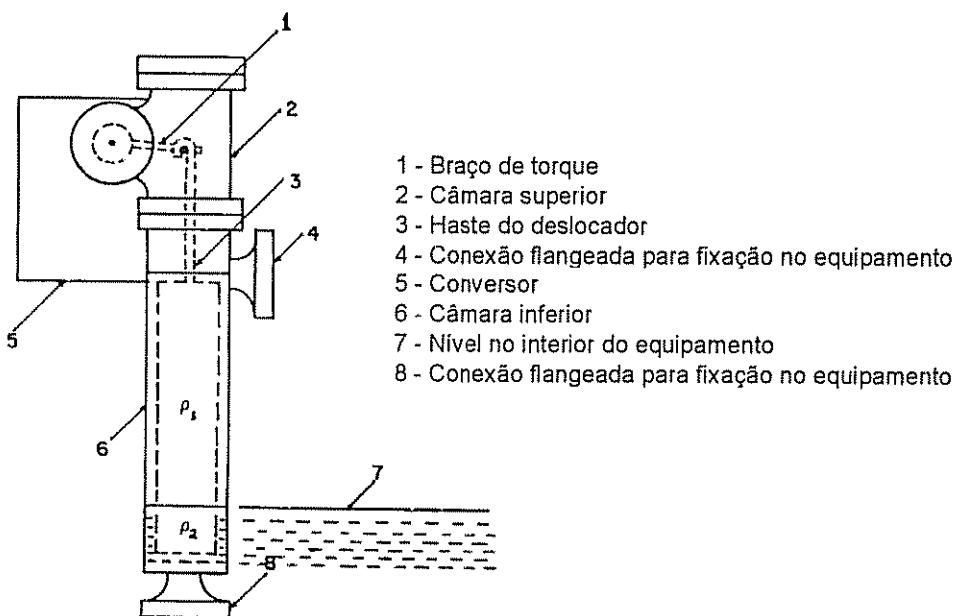


FIGURA 4.20 Componentes de um transmissor tipo *displacer*.

Uma propriedade notável dos instrumentos que utilizam tubo de torque decorre do elevado valor da constante de elasticidade K_{TT} , encontrada nos tubos de torque empregados pelos fabricantes tradicionais. Em função disto, a movimentação do deslocador,

face à excursão total do nível dentro da faixa de medição, é insignificante (da ordem de 1 mm), a amplitude de movimentação do deslocador, apesar da técnica de uniformização em seu volume e da padronização do tubo de torque, depende, com efeito, da densidade diferencial Δp . O reconhecimento da virtual imobilidade do deslocador permite que se comprehenda porque o alcance da medição do nível é dada pelo comprimento deste sensor.

Complementando-se, agora, a análise operacional iniciada na descrição do *displacer*, vê-se na figura 4.20 que quando o nível da interface sobe, aumenta o empuxo devido a p_2 e diminui o empuxo devido a p_1 ; como, $p_2 > p_1$, o empuxo resultante efetivamente aumenta, reduzindo-se o peso aparente do deslocador. Com isto, diminui o esforço aplicado ao tubo de torque, que se "destorce" o suficiente para atingir um novo ponto de equilíbrio. Esta rotação é transmitida ao conversor, que modifica proporcionalmente o sinal de saída transmissor.

4.4.4 Instrumento Tipo Deslocador Utilizando Mola Balanceadora

O instrumento tipo deslocador, utilizando mola balanceadora, apresenta um comportamento dinâmico muito semelhante ao do instrumento tipo *displacer*, já que a movimentação do deslocador, em ambos os casos, resulta da interação do efeito elástico do elemento de sustentação com o empuxo aplicado sobre o deslocador. Entretanto, conforme mostra a figura 4.21, neste caso, o elemento de sustentação é efetivamente uma mola, com constante de elasticidade significativamente menor que a do tubo de torque. Em consequência, a amplitude da excursão total do deslocador na construção do tipo mola balanceadora é muitas vezes maior que no tipo *displacer*, tipicamente da ordem de 20 a 30 mm.

A figura 4.21 ilustra a constituição de um instrumento tipo deslocador utilizando mola balanceadora. Comparando-a com a figura 4.18, podemos identificar facilmente três dos **cinco componentes** desta construção, ou seja, o deslocador, o elemento de sustentação e o conversor. Os outros dois componentes são o elemento de vedação e o acoplamento, cuja constituição específica desta construção merece uma análise mais detalhada. O acoplamento é composto pela haste não-magnética e pela esfera ferromagnética por um lado e pelo magneto e braço de transmissão pelo outro lado; neste caso, o elemento de vedação é representado pelo tubo não-magnético. A esfera ferromagnética se encontra solidária à haste que, por sua vez, está presa ao deslocador. Quando o nível varia, o deslocador e, portanto, a esfera, acompanham essa variação, porém com uma amplitude menor, devido à baixa sensibilidade do conjunto deslocador/mola de sustentação. Do lado externo do elemento de vedação encontra-se o magneto, mecanicamente solidário ao braço de transmissão e magneticamente acoplado à esfera. Quando a esfera se move, o magneto força o braço de transmissão a acompanhá-la, o que é possível, pois este é articulado no interior do conversor. O desvio do braço de transmissão, que é proporcional à variação de nível, estimula o conversor, que produz um sinal de saída correspondente. Através de um cuidadoso alinhamento da haste e do braço de transmissão, elimina-se o contato físico da esfera e do magneto com as paredes interna e externa do

tubo não-magnético, respectivamente. Com esta precaução evita-se atrito entre esses componentes, que, de outra forma, resultaria em uma considerável redução na precisão do instrumento.

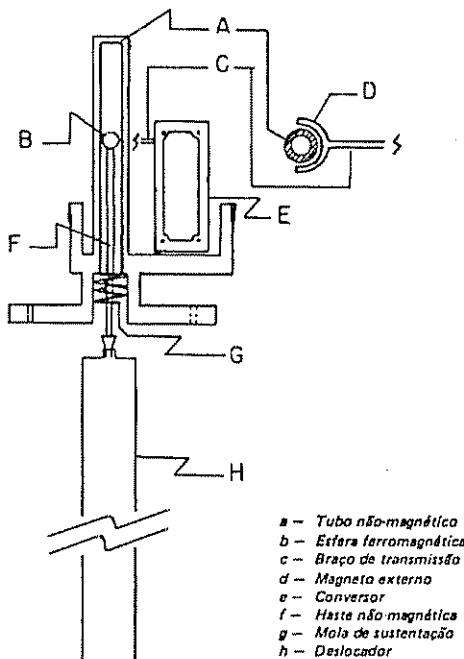


FIGURA 4.21 Instrumento tipo deslocador utilizando mola balanceadora.

Das várias construções de instrumento utilizando deslocador como elemento sensor, a mola balanceadora é a construção que possui o mais eficaz sistema de vedação, seguida do *displacer*, neste aspecto. Como o elemento de vedação não pode ser julgado separadamente do método de acoplamento, pois seus objetivos são, de certa forma conflitantes, o instrumento chamado *displacer* conquistou um *status* privilegiado com respeito à aceitação dos usuários.

O limite de operação da mola balanceadora pode se estender até 400 kg/cm^2 , mais que o dobro da pressão estática máxima suportada pelo tubo de torque. A faixa de temperatura é tipicamente de -150°C a $+300^\circ\text{C}$. Dependendo da aplicação, os componentes situados na área úmida (figura 4.18), isto é, o deslocador e a mola de sustentação (designada em vários textos por *range spring*) podem ser fabricados de materiais especiais como, por exemplo, o *hastelloy*. A utilização da mola balanceadora é restrita a processos com fluidos limpos, pois depósitos ou sedimentação de substâncias sobre a mola de sustentação afetam seu desempenho.

Neste tipo de instrumento, a opção de montagem externa, além da opção de montagem interna ilustrada na figura 4.21, também é disponível, através da utilização de uma câmara para o deslocador. Este recurso é indicado para os casos em que o equipamento principal é pressurizado, contém fluidos tóxicos ou não pode ser isolado do processo para a retirada do instrumento.

4.4.5 Montagem de Instrumentos do Tipo Deslocador

Como o *displacer* é o mais popular dos instrumentos do tipo deslocador, as ilustrações e os comentários no texto deste item farão referência explícita a este tipo de construção. Todavia, as conclusões gerais a respeito do deslocador são extensíveis, consideradas as peculiaridades de cada caso às demais construções.

A figura 4.22 ilustra a montagem de um instrumento do tipo *displacer* em um vaso de distribuição de vapor, de uma planta industrial. Este vaso poderia ser alimentado, por exemplo, pela extração de média pressão de uma turbina acionadora de um compressor de gás. Tais vasos possuem uma conformação especial, denominada **bota**, destinada a coletar o condensado, cujo nível deve ser mantido sob controle. Para isso, neste exemplo utiliza-se um **controlador com transmissor autocontido**, provido de câmara para o deslocador. O nível no interior da câmara do deslocador acompanha o nível na bota, devido às **tomadas de equalização** que interligam os dois compartimentos, através das duas válvulas de bloqueio. O emprego dessas válvulas visa permitir a retirada ou manutenção da câmara, sem a necessidade de parar/despressurizar o vaso. Além das válvulas de bloqueio, duas outras válvulas são recomendadas na montagem da figura 4.22 (*API RP551, Section 3 – Level*). A superior é denominada válvula de alívio e destina-se a despressurizar a câmara do deslocador através da exaustão do vapor nela contido; a inferior é denominada válvula de dreno e permite o esvaziamento do líquido (condensado, no caso) acumulado no interior da câmara do deslocador. A seqüência segura de acionamento destas quatro válvulas é a seguinte:

- 1) fechar as duas válvulas de bloqueio;
- 2) abrir a válvula de alívio;
- 3) abrir a válvula de dreno.

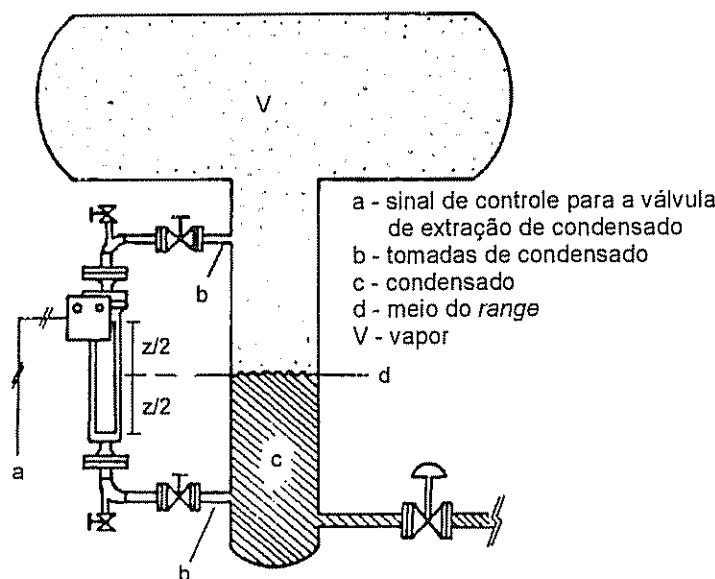


FIGURA 4.22 Medição de nível de superfície utilizando instrumento do tipo *displacer*.

O *manifold* da figura 4.22 também pode ser útil para se calibrar o *displacer* no campo, através do **método da equivalência de níveis**, cuja argumentação teórica será discutida no tópico específico de calibração. Para tanto, basta conectar-se uma mangueira transparente na válvula de dreno e curvá-la até que sua outra extremidade ultrapasse o nível máximo de medição. Fechando-se as válvulas de bloqueio e abrindo-se as de alívio e dreno, introduz-se água na câmara através da mangueira, cuja transparência permite controlar o percentual de imersão do deslocador. Os internos da válvula de alívio deverão estar devidamente desobstruídos, pois, caso contrário, ocorrerá aprisionamento de ar no interior da câmara, o que impedirá a equalização entre os níveis desta e da mangueira transparente. Conforme já comentado, na figura 4.22 tem-se um caso típico de **medição de superfície** utilizando-se instrumento do tipo *displacer*.

Na figura 4.23 está representada uma montagem para **medição de interface**. Trata-se de um separador de óleo/água salgada de plataforma marítima de extração de petróleo. Em termos simplificados, o petróleo, juntamente com a água, é acumulado num dos dois compartimentos do separador, a fim de permitir que o óleo sobrenade a água por diferença de densidade. Separado, o óleo flui para o outro compartimento do separador, a partir do qual será enviado a outras bases através de bombas de expedição e oleoduto marítimo. Neste exemplo, a interface é mantida em níveis seguros por um controlador local do tipo *displacer*, a fim de evitar a penetração de água no segundo compartimento, bem como a penetração de óleo no circuito de drenagem de água (que, normalmente, já está contaminado pelo óleo). Novamente, é requerido o emprego das válvulas de bloqueio e dreno, porém, neste caso, a válvula de alívio é dispensável.

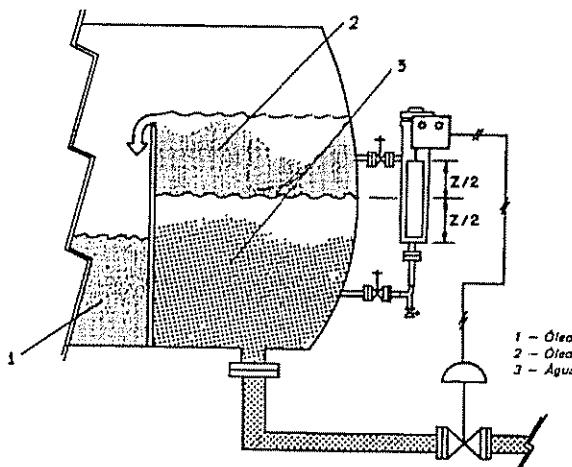


FIGURA 4.23 Medição de interface utilizando instrumento do tipo *displacer*.

Quando se utiliza uma câmara na instalação do instrumento do tipo *displacer* (figuras 4.22 e 4.23), a montagem é chamada de **montagem externa**. Apesar da facilidade de manutenção propiciada pela montagem externa, este tipo de montagem nem sempre é necessária ou mesmo aconselhável. Nos casos em que o equipamento não necessita estar permanentemente alinhado com o processo ou quando sua pressão é atmosférica, a câmara é dispensável.

Por outro lado, quando há presença de partículas sólidas no líquido de processo, quando sua viscosidade é elevada ou quando ele se solidifica à temperatura ambiente, é recomendada a montagem interna, sendo o deslocador introduzido diretamente no equipamento principal. Nestes casos, as tomadas de equalização estariam sujeitas a entupimento pela solidificação ou sedimentação, caso se recorresse à montagem externa. Além disso, a aderência de partículas sólidas na superfície externa do deslocador e interna na câmara do deslocador poderiam obstruir o espaço anular existente entre essas superfícies, em alguns casos bastante reduzido, introduzindo atrito na movimentação do deslocador.

A figura 4.24 ilustra um tanque contendo partículas em suspensão. Neste caso, a medição do nível é feita com um deslocador montado internamente ao tanque.

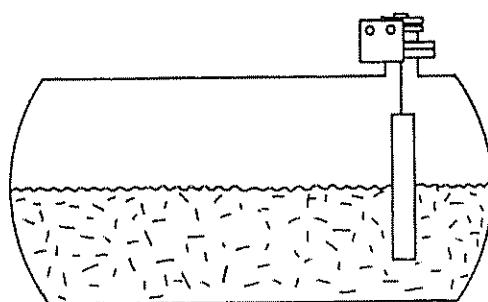


FIGURA 4.24 Medição de nível de superfície utilizando instrumento do tipo *displacer*, montado internamente no equipamento.

A montagem interna do deslocador, quando empregada em equipamentos cujo líquido se encontra em turbulência ou fluindo horizontalmente, além do desvio vertical regular, apresenta o inconveniente do deslocador ser compelido a uma movimentação errática. A solução para este problema consiste em se instalar no interior do equipamento e, envolvendo o deslocador, um guia denominado *camisa de direcionamento* (*stilling well*), que restringirá seu movimento à direção vertical. A camisa de direcionamento, assim como a câmara, influirá no comportamento dinâmico do instrumento.

4.4.6 Calibração de Instrumentos do Tipo Deslocador

Existem dois métodos comumente utilizados na calibração estática dos instrumentos do tipo deslocador. Ambos se baseiam na virtual imobilidade do deslocador e no fato de que a atuação deste sensor, sobre o tubo de torque, se manifesta através de uma força denominada peso aparente, conforme apresentado quando da discussão específica sobre o deslocador.

Assumindo-se uma situação genérica de medição de interface entre dois líquidos de densidades ρ_1 e ρ_2 , onde ρ_2 é a densidade do líquido mais pesado, a equação 4.11 permite que se calcule o peso aparente do deslocador, simplesmente fazendo-se $\rho_1 = 0$:

$$W_{ap} = W_{real} - V_d \cdot [\rho_1 + (z/Z) \cdot \Delta\rho] \quad [4.11]$$

onde:

- | | |
|--------------------------------|--|
| W_{ap} | = peso aparente do deslocador; |
| W_{real} | = peso real do deslocador; |
| V_d | = volume do deslocador; |
| $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ | = densidade diferencial dos líquidos; |
| z | = profundidade de imersão do deslocador no líquido mais denso; |
| Z | = comprimento do deslocador; |
| (z/Z) | = percentual de imersão do deslocador. |

Fazendo-se $(z/Z) = 0$ e $(z/Z) = 1$, sucessivamente, na equação 4.11, determinam-se facilmente as expressões dos pesos aparentes no início, W_{ap} (0%), e, no fim da faixa, W_{ap} (100%). As equações 4.12 e 4.13 fornecem as expressões procuradas, ou seja:

$$W_{ap} (0\%) = W_{real} - \rho_1 \cdot V_d \quad [4.12]$$

$$W_{ap} (100\%) = W_{real} - \rho_2 \cdot V_d \quad [4.13]$$

Os pesos aparentes, correspondentes a 25, 50 e 75% de imersão, podem ser obtidos por média aritmética a partir das equações 4.12 e 4.13:

$$W_{ap} (50\%) = \frac{W_{ap} (0\%) + W_{ap} (100\%)}{2} \quad [4.14]$$

$$W_{ap} (25\%) = \frac{W_{ap} (0\%) + W_{ap} (50\%)}{2} \quad [4.15]$$

$$W_{ap} (75\%) = \frac{W_{ap} (50\%) + W_{ap} (100\%)}{2} \quad [4.16]$$

A maneira como se utiliza as equações de 4.12 a 4.16, se direta ou indiretamente, conduz a cada um dos dois métodos de calibração. Como essas equações supõem apenas a imobilidade e o empuxo do deslocador, ambos os métodos são válidos para o instrumento do tipo *displacer*, não se aplicando, da forma apresentada, ao instrumento que utiliza mola balanceadora pois, neste tipo de instrumento, o movimento do deslocador é perceptível.

O primeiro método de calibração a ser analisado é o método do peso aparente, que baseia-se no emprego direto das equações 4.12 a 4.16. Para possibilitar a aplicação deste método, confecciona-se uma pequena caçamba, com um engaste de haste semelhante ao do deslocador (figura 4.20). A seguir, depositam-se pesos padrões no interior da caçamba e, através de uma balança de precisão adequada, acerta-se o peso do conjunto

(pode-se utilizar areia seca) para atender, seqüencialmente, os valores calculados, utilizando-se as equações 4.12 a 4.16. Em cada um dos cinco pontos da faixa (0, 25, 50, 75 e 100%), verifica-se o valor do sinal de saída do instrumento e, caso necessário, ajusta-se o zero e/ou o alcance do instrumento, a fim de corrigi-lo. O método do peso aparente é geral, podendo ser aplicado a quaisquer líquidos de processo. Seus inconvenientes são a necessidade de desmontagem do deslocador e a dependência da disponibilidade de uma balança de precisão.

O segundo método de calibração origina-se do emprego indireto das equações 4.12 a 4.16. Este método, chamado de **método da equivalência de níveis**, diferentemente do método do peso aparente, é de execução no campo, não dependendo de balança nem da desmontagem do deslocador. Entretanto, este método só poderá ser aplicado aos deslocadores que estejam instalados em câmaras e aos líquidos com densidade menor ou igual à da água. Esta última restrição deve-se ao fato de se utilizar a água como líquido de calibração. Basicamente, este método de calibração consiste na determinação do nível de calibração com água, que produz o mesmo empuxo que um dado nível de processo. Como estes níveis são medidos utilizando-se como referência a base inferior do deslocador, numericamente eles podem ser calculados através da profundidade de imersão z . Se os empuxos são iguais, os pesos aparentes do deslocador em processo e em calibração também serão iguais. A equação 4.11 é apropriada para exprimir o peso aparente em calibração, com a variável z representando o nível de calibração. Fazendo-se $\rho_1 = 0$ e $\rho_2 = \rho_{H_2O}$, tem-se $\Delta\rho = \rho_{H_2O}$. Igualando-se o peso aparente, em calibração assim determinado, aos pesos aparentes definidos nas equações 4.12 e 4.13, teremos explicitados os níveis de calibração $z(0\%)$ e $z(100\%)$, utilizando-se água como líquido de calibração, equivalentes aos níveis de início e fim de faixa em processo, ou seja:

$$z(0\%) = \frac{\rho_1 Z}{\rho_{H_2O}} \quad [4.17]$$

$$z(100\%) = \frac{\rho_2 Z}{\rho_{H_2O}} \quad [4.18]$$

Os demais níveis de calibração com água, são obtidos por interpolações sucessivas, a partir das equações 4.17 e 4.18, ou seja:

$$z(50\%) = \frac{z(0\%) + z(100\%)}{2} \quad [4.19]$$

$$z(25\%) = \frac{z(0\%) + z(50\%)}{2} \quad [4.20]$$

$$z(75\%) = \frac{z(50\%) + z(100\%)}{2} \quad [4.21]$$

O procedimento de calibração pelo método da equivalência de níveis utilizando água como líquido de calibração, consiste em se utilizar uma mangueira flexível transparente, conectada à válvula de dreno da câmara do deslocador e curvá-la até que sua extremidade livre ultrapasse o nível máximo de medição. A seguir, fecham-se as válvulas de bloqueio e abrem-se as de alívio e dreno do *manifold* da câmara do deslocador e introduz-se água na câmara do instrumento através da mangueira. Na prática, marcam-se os níveis mínimo e máximo de calibração com água na mangueira (equações 4.17 e 4.18) e obtêm-se os níveis de calibração com água correspondentes a 25, 50 e 75% (equações 4.19, 4.20 e 4.21), dividindo-se o segmento formado em quatro intervalos iguais.

A equação 4.18 mostra que se $\rho_2 > \rho_{H_2O}$, então $z(100\%) > Z$. Como o deslocador é insensível às variações de nível acima de sua base superior, fica claro que o método é restrito a líquidos menos densos que a água.

Se a medição for de superfície, tem-se $\rho_1 = 0$ e a equação 4.17 indica que $z(0\%) = 0$, ou seja, os zeros de calibração com água e de processo coincidem.

4.5 DISPOSITIVOS DO TIPO PRESSÃO DIFERENCIAL

4.5.1 Princípio de Funcionamento

No caso de medição de nível utilizando-se dispositivos do tipo pressão diferencial, mede-se a pressão da coluna líquida, desenvolvida pelo líquido confinado dentro do equipamento cujo nível se deseja medir. A medição da coluna líquida (hidrostática) é feita utilizando-se transmissor de pressão diferencial, conectando-se as tomadas do instrumento diretamente ao equipamento cujo nível se deseja medir.

Como o valor da pressão exercida pela coluna líquida (hidrostática), cujo valor é medido pelo transmissor de pressão diferencial, é dada por:

$$\text{Pressão} = \text{Densidade do líquido} \cdot \text{Altura da coluna líquida} \quad [4.22],$$

e considerando-se que, usualmente, a densidade do líquido é conhecida e não varia de forma substancial, o nível (altura da coluna líquida) pode ser medido de forma inferencial, utilizando-se dispositivos do tipo pressão diferencial. Assim, rearranjando-se a equação 4.22, tem-se:

$$\text{Altura da coluna líquida (Nível)} = \text{Pressão}/\text{Densidade do líquido} \quad [4.23].$$

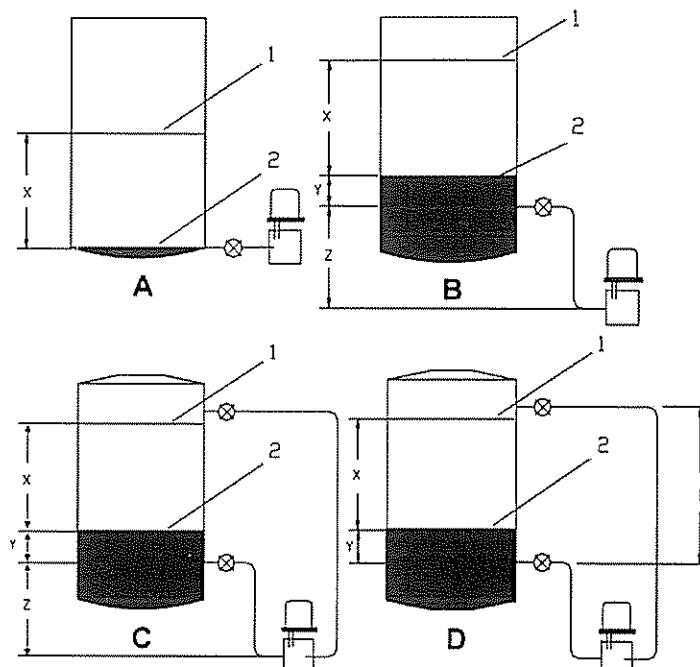
Os diversos tipos de transmissores de pressão/pressão diferencial foram analisados no item 2.4.4, do capítulo Pressão.

4.5.2 Instalação

Na maioria dos casos de medição de nível utilizando-se dispositivos do tipo pressão diferencial, o transmissor é instalado no campo (ao lado do equipamento), em um suporte tubular de cinco centímetros de diâmetro (vertical ou horizontal) e as tomadas do instrumento (alta [H] e/ou baixa [L]) são conectadas diretamente ao equipamento.

Na figura 4.25 estão mostradas as diversas situações encontradas quando da medição de nível utilizando-se transmissor de pressão diferencial. Conforme será analisa-

do a seguir, neste tipo de medição deve-se considerar, cuidadosamente, as colunas líquidas atuantes nas tomadas do transmissor, quando do cálculo de seu ajuste/calibração.



1 - Nível máximo

2 - Nível mínimo

G_L - Densidade relativa do líquido do processo

G_S - Densidade relativa do líquido de selagem

(A) Tanque aberto - transmissor em nível com sua tomada de alta pressão.

(B) Tanque aberto - transmissor abaixo de sua tomada de alta pressão

(C) Tanque fechado - transmissor sem selagem líquida na tomada de baixa pressão.

(D) tanque fechado - transmissor com selagem líquida na tomada de baixa pressão.

FIGURA 4.25 Medição de nível utilizando transmissor do tipo pressão diferencial.

No caso da figura 4.25a, como o tanque está aberto para a atmosfera e o transmissor de pressão diferencial está instalado no mesmo nível que a sua tomada de alta pressão, não há necessidade de compensação de colunas de líquido nas tomadas do instrumento. Neste caso, o dimensionamento do transmissor será feito da seguinte maneira:

$$\text{alcance: } X \cdot G_L$$

No caso da figura 4.25b, como o tanque está aberto para a atmosfera e o transmissor de pressão diferencial está instalado abaixo de sua tomada de alta pressão, será necessário se compensar as colunas de líquido aplicadas na tomada de alta pressão do instrumento (colunas Y e Z). Neste caso, o dimensionamento do transmissor será feito da seguinte maneira:

$$\text{alcance: } X \cdot G_L$$

$$\text{supressão de zero: } Y \cdot G_L + Z \cdot G_S.$$

No caso da figura 4.25c, como o tanque está fechado, o transmissor de pressão diferencial está instalado abaixo de sua tomada de alta pressão e não há selagem líquida na tomada de baixa pressão do transmissor, será necessário se compensar as colunas de líquido aplicadas na tomada de alta pressão do instrumento (colunas Y e Z). Neste caso, o dimensionamento do transmissor será feito da seguinte maneira:

$$\text{alcance: } X \cdot G_L$$

$$\text{supressão de zero: } Y \cdot G_L + Z \cdot G_S$$

No caso da figura 4.25.d, como o tanque está fechado, o transmissor de pressão diferencial está instalado abaixo de sua tomada de alta pressão e existe selagem líquida na tomada de baixa pressão do transmissor, será necessário se compensar a coluna de líquido aplicada na tomada de alta pressão do instrumento (coluna Y) e a coluna de líquido aplicada na tomada de baixa pressão do instrumento (coluna D). Neste caso, o dimensionamento do transmissor será feito da seguinte maneira:

$$\text{alcance: } X \cdot G_L$$

$$\text{elevação de zero: } D \cdot G_S - Y \cdot G_L$$

4.6 DISPOSITIVOS DO TIPO ULTRA-SÔNICO

4.6.1 Aplicação

Os dispositivos do tipo ultra-sônico podem ser utilizados para a detecção contínua de nível, ou podem atuar como sensores de nível predeterminado (chaves de nível).

Os dispositivos do tipo ultra-sônico destinados à detecção contínua de nível caracterizam-se, principalmente, pelo tipo de instalação, ou seja, os transdutores podem ser instalados no topo do equipamento sem contato com o produto, ou instalados totalmente submersos no produto; enquanto os dispositivos destinados à detecção de níveis predeterminados (chaves de nível), se caracterizam pelo número de transdutores envolvidos no sistema, ou seja, um ou dois (sensor tipo amortecido e transmissor liga-desliga, respectivamente). As chaves de nível do tipo ultra-sônico são analisadas no item 4.10.5 deste capítulo.

4.6.2 Princípios Físicos

4.6.2.1 Ultra-som

A vibração de um dispositivo causa vibração nos objetos existentes nas proximidades. Esta transferência de vibração ou movimento através de um meio, é conhecida como som. O som se propaga em forma de onda, com freqüência e velocidade características e que são constantes em um determinado meio.

A geração de uma onda sonora ocorre quando uma força externa excita as moléculas de um meio elástico. Esta excitação é transferida de molécula a molécula do meio, com uma velocidade que depende da elasticidade e inércia das moléculas. A velocidade

de propagação do som depende do meio em que a onda sonora está se propagando. A componente longitudinal da onda sonora propaga-se à velocidade característica do material, ou seja, é uma função exclusivamente deste.

Como a maioria dos instrumentos do tipo ultra-sônico calcula a distância percorrida pela onda, com base na velocidade de propagação da onda no ar, e como a variação do meio afeta a velocidade de propagação da onda, caso o meio de propagação da onda não seja o ar, a variação da velocidade da onda deverá ser compensada, considerando-se o meio onde ela está se propagando.

O ultra-som é uma onda sonora (onda mecânica), cuja freqüência de oscilação é maior do que aquela sensível ao ouvido humano, isto é, acima de 20 kHz; a freqüência de oscilação usualmente utilizada neste tipo de instrumento é de 26,5 kHz.

4.6.2.2 Geração do ultra-som

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

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

Inversamente, quando se aplica uma força em um material piezelétrico, resulta o aparecimento de uma tensão em seu terminal elétrico. Nesta modalidade, o material piezelétrico pode ser utilizado como receptor de ultra-som.

Pela sua estabilidade, o quartzo é um dos materiais mais recomendados para utilização nos dispositivos do tipo ultra-sônico.

Pelo seu preço, versatilidade e potência, usualmente empregam-se cerâmicas piezelétricas nos dispositivos do tipo ULTRA-SÔNICO.

O material piezelétrico, quando montado no receptáculo do dispositivo do tipo ultra-sônico, é chamado de **transdutor**.

4.6.2.3 Medição da distância

O princípio de operação dos dispositivos do tipo ultra-sônico tem por base a seguinte lei da ótica física: **O ângulo de incidência da onda é igual ao seu ângulo de reflexão** (figura 4.26).

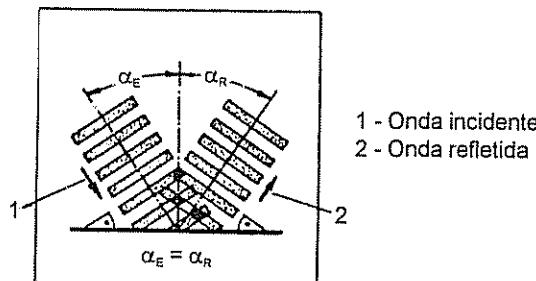


FIGURA 4.26 Princípio de reflexão de ondas.

Quando uma onda ultra-sônica, que se propaga em um meio incide sobre a interface de duas substâncias de densidades diferentes, faz surgir duas ondas emergentes: uma onda ultra-sônica proveniente da reflexão nessa interface (onda refletida) e outra proveniente da mudança de meio de propagação, denominada onda refratada (figura 4.27). Cada interface refletirá a onda de forma diferente, conforme esquematizado na figura 4.27.

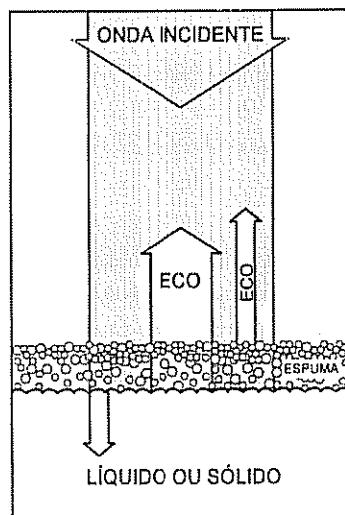


FIGURA 4.27 Reflexão e refração da onda ultra-sônica (diferentes meios resultam em diferentes reflexões).

Como o funcionamento do instrumento de medição de nível do tipo ultra-sônico depende da onda refletida, é importante que o transdutor seja montado perpendicularmente à superfície do produto cujo nível está sendo medido. Um pequeno desalinhamento pode causar significativa degradação na performance do instrumento, uma vez que as ondas ultra-sônicas são refletidas com o mesmo ângulo das ondas incidentes.

O princípio de operação dos dispositivos do tipo ultra-sônico baseia-se na reflexão da onda gerada pelo transdutor, quando encontra a interface com o produto cujo nível se deseja medir ou, mais precisamente, no lapso de tempo gasto pela onda desde o instante em que ela é gerada até o instante em que ela retorna ao transdutor, depois de refletir-se na interface; é a chamada técnica do ECO.

Como o som se propaga com velocidade constante e conhecida em um determinado meio (usualmente o meio de propagação utilizado é o ar) e em uma determinada temperatura, o tempo entre a emissão e a recepção da onda refletida (ECO), será proporcional à distância entre o sensor e o objeto que ocasionou a reflexão. Assim, pode-se escrever que:

$$\text{Distância} = \text{Velocidade} \cdot \text{Tempo}$$

[4.24],

onde:

velocidade = velocidade de propagação da onda ultra-sônica em um determinado meio;

tempo = metade do tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda refletida (ECO).

4.6.3 Medidor Contínuo de Nível do Tipo Ultra-Sônico

Neste sistema, conforme citado no Item 4.6.2.3 deste capítulo, o nível é medido com base na velocidade de propagação da onda no meio e no tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda refletida (ECO).

Usualmente, nas aplicações de medição contínua de nível do tipo ultra-sônico, o transdutor é montado no topo do equipamento, embora também possa ser montado imerso no meio líquido, cujo nível se deseja medir.

A figura 4.28 ilustra algumas aplicações:

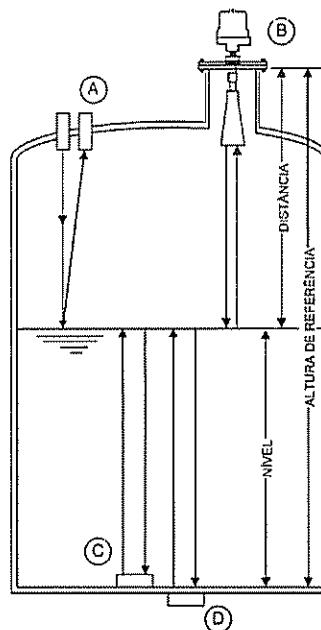


FIGURA 4.28 Medidor contínuo de nível do tipo ultra-sônico.

A instalação A prevê dois transdutores, sendo um para emissão e outro para recepção, montados em posições distintas; esta opção de instalação é pouco utilizada nas aplicações industriais.

Nesta instalação, a onda é gerada e propaga-se no ar, até atingir a interface ar-líquido, onde ocorre a reflexão, para, em seguida, a onda refletida (ECO) ser recebida no receptor.

Na **instalação B**, o transdutor gera um trem de pulsos (*burst*) ultra-sônico; enquanto a energia acústica é gerada, o receptor está desativado. Neste caso, como o emissor e o receptor estão num único instrumento, faz-se necessária a ativação do receptor após a emissão do trem de ondas, visando à detecção da onda refletida (ECO).

A montagem das unidades de emissão/recepção no meio gasoso traz a vantagem de se evitar o contato do instrumento com o fluido do processo; em contrapartida, apresenta a desvantagem de transferir para o meio gasoso uma parcela maior de energia.

Tanto no caso da **instalação A** como na **B**, a medição contínua do nível de líquido se faz de maneira indireta, uma vez que todo o percurso da onda é realizado no meio gasoso (ar).

No caso da **instalação C**, a unidade ultra-sônica está montada imersa no próprio material de processo cujo nível se deseja medir. Nessa instalação, mede-se diretamente o nível do produto.

A **instalação D** é uma variação da **instalação C**. Neste caso, a unidade de medição está montada externamente ao vaso, apresentando a vantagem adicional de não se necessitar furar o equipamento (pode-se utilizar bocais existentes).

Todas as instalações discutidas neste subitem são aplicáveis à detecção de nível de líquidos limpos, enquanto as **instalações A** e **B** também podem ser utilizadas para medir nível de sólidos.

Como as ondas de som produzidas pelos medidores do tipo ultra-sônico são transmitidas mecanicamente pela expansão do meio material, a transmissão das ondas requer um meio para transmissão, consequentemente, variações no meio podem afetar a velocidade de propagação e afetar a medição do nível. Variações na temperatura do meio também afetam a velocidade de propagação do som, por isso, a maioria dos transdutores incorpora um sensor de temperatura que corrige a velocidade do som, em função da temperatura do meio de propagação.

Caso as condições em que o instrumento de medição de nível do tipo ultra-sônico for operar, não sejam aquelas especificadas pelo fabricante do instrumento, os problemas encontrados deverão ser devidamente analisados e compensados ou eliminados, de forma a não afetarem a precisão da medição de nível feita pelo instrumento. Presença de espuma, poeira, vapor, névoa, neblina, turbulência do líquido e bloqueio do sinal pela presença de interferências são alguns dos fatores que afetam a medição de nível e que se ocorrerem, devem ser devidamente compensados ou, se possível, eliminados.

A presença de espuma no processo tem efeitos imprevisíveis em uma medição de nível utilizando dispositivo do tipo ultra-sônico. Dependendo da propriedade da espuma, o ECO pode ser refletido no topo da espuma, refletido por alguma coisa existente dentro da espuma, absorvido completamente pela espuma (resultando na perda do ECO) ou pode não ser afetado pela espuma.

4.6.4 Conclusões

A técnica de medição e/ou detecção de nível por ultra-som é de boa confiabilidade. Suas principais vantagens são a inexistência de partes móveis no sistema, além da capacidade de medição e/ou detecção de nível sem contato com o material de processo.

A medição de nível com este tipo de instrumento não depende do conhecimento de diversas propriedades do processo, e a confiabilidade do instrumento não é afetada por variações na composição, densidade, condutividade térmica ou elétrica, capacância ou outras características do fluido cujo nível está sendo medido.

Os dispositivos do tipo ultra-sônico não devem ser instalados em áreas onde existam fortes campos elétricos (motores, relés, geradores elétricos etc.).

4.7 DISPOSITIVOS DO TIPO RADAR

Os dispositivos do tipo RADAR, são instalados no topo do tanque ou silo (em tubos com diâmetro variando entre 0,1 e 0,3 metro) e emitem ondas eletromagnéticas curtas com freqüência na faixa de 5 a 25 GHz e que se propagam com a mesma velocidade que a luz (300.000 km/s). O sinal eletromagnético emitido pela antena é refletido ao incidir, perpendicularmente, sobre a superfície de um líquido ou sólido com constante dielétrica diferente do meio gasoso (usualmente ar) existente acima do produto. O sinal refletido (ECO) é captado pela própria antena emissora e é utilizado na medição do nível do líquido ou sólido existente no tanque ou silo.

4.7.1 Princípio de Funcionamento

Os dispositivos do tipo RADAR podem operar com base no tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda refletida (ECO), ou podem operar com base na diferença de freqüência entre a onda emitida e a onda refletida (ECO); é o chamado método FMCW (Modulação Contínua de Freqüência de Onda).

No caso dos dispositivos que operam com base no tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda refletida (ECO), o equipamento funciona de maneira semelhante à utilizada pelos dispositivos do tipo ultra-sônico, analisado no item 4.6.2.3 deste capítulo, operando com pulsos curtos de radar com freqüência de cerca de 6,0 GHz. Este tipo de medidor é utilizado em medições rotineiras de nível (precisão de $\pm 0,05\%$), não sendo utilizado para operações de venda/transferência de produtos.

Os dispositivos do tipo RADAR que operam com base no método de variação em freqüência FMCW (Modulação Contínua de Freqüência de Onda), utilizam um sinal de alta freqüência (cerca de 10 GHz) modulado linearmente em freqüência. Conforme mostrado na figura 4.29, seu funcionamento baseia-se na diferença de freqüência (Δf) entre o sinal emitido (f_1) e o sinal refletido pela superfície do material cujo nível está sendo medido ($ECO - f_0$). Neste método, a freqüência do sinal de transmissão (f_1) é aumentada ou diminuída linearmente durante um determinado tempo (varredura em freqüência). Devido ao atraso de tempo (t) decorrido durante a propagação do sinal, a freqüência de transmissão varia, de modo que, fazendo-se a diferença entre a freqüência do sinal emitido (f_1) em um determinado momento (t_0) e a freqüência do sinal recebido ($ECO - f_0$) naquele mesmo momento (t_0), obtém-se um sinal (Δf) de baixa freqüência (da ordem de poucos kHz). A freqüência do sinal (Δf) obtido, fazendo-se a diferença entre o sinal emitido (f_1) e o recebido (f_0), é proporcional à distância (d) até a superfície do líquido ou sólido, e é utiliza-

da para fornecer uma medida bastante precisa do nível (d) existente no tanque, vaso, esfera ou cilindro (precisão de $\pm 0,5$ mm), podendo ser adotado para operações de venda/transfência de produtos.

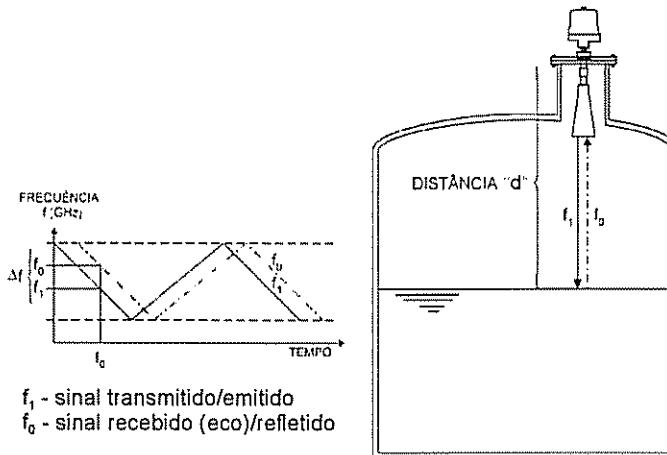


FIGURA 4.29 Princípio de funcionamento do medidor contínuo de nível do tipo RADAR, utilizando tecnologia FMCW.

Usualmente, para se melhorar ainda mais a precisão da medição, a linearidade da varredura do radar é controlada por um circuito digital de referência e a temperatura da parte eletrônica do instrumento também é controlada.

Alguns fabricantes produzem dispositivos do tipo RADAR que utilizam as propriedades físicas da propagação de onda, gerando sinais de radar polarizados, sendo transmitidos em uma direção e recebidos em outra. Em função disso, sempre que o sinal emitido colide com algum objeto, o instrumento introduz uma polarização de 90 graus no sinal. Assim, o instrumento só receberá ecos que foram refletidos uma única vez, ignorando as colisões indiretas e reduzindo sobremaneira as interferências ocasionadas pelos ruídos.

Adicionalmente, este tipo de instrumento utiliza filtros que eliminam todas as informações irrelevantes (interferências provenientes de obstáculos, agitadores e reflexões provenientes das paredes do tanque, ruídos eletromagnéticos etc.) e permitem ao processador do medidor concentrar-se apenas nas informações significativas e nos sinais relevantes.

O medidor de nível do tipo TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo), também conhecido como radar guiado ou radar com onda guiada, é um outro dispositivo do tipo RADAR, que utiliza onda eletromagnética guiada através de hastes ou cabos, em lugar de uma antena. O medidor do tipo TDR, localizado no topo do tanque, envia pulsos de sinal eletromagnético guiado através de dois condutores (haste ou cabo), que é refletido ao incidir sobre

a superfície de um líquido ou sólido com constante dielétrica (ϵ_r) diferente do ar existente acima do produto. Este medidor opera com base no tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda refletida (ECO) e tem precisão de medição equivalente ao do medidor do tipo RADAR, que opera com base no tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda refletida (ECO), não sendo também utilizado para operações de venda/transferência de produtos.

4.7.2 Tipos de Antenas

Os medidores de nível do tipo RADAR utilizam antenas do tipo parabólica ou do tipo corneta ou cônica (*horn*), com diâmetros variando entre 0,1 e 0,5 metro. Usualmente, estes medidores podem medir níveis variando entre 0 e 40 metros, com precisão de até 0,01%.

Quanto maior o diâmetro da antena, maior o ganho ou a amplificação e mais concentrado o sinal de radar, consequentemente, mais forte será o sinal de retorno (ECO). Para uma frequência fixa de onda, a potência do sinal recebido da superfície é proporcional ao diâmetro da antena. Esta regra é válida para todos os tipos de antenas.

Uma antena maior fornece um feixe mais estreito e com maior foco, tornando possível a medição de nível em líquidos com baixa reflexão ao radar (com baixas constantes dielétricas ϵ_r), em distâncias maiores e em aplicações com mais poeira, oferecendo maior precisão.

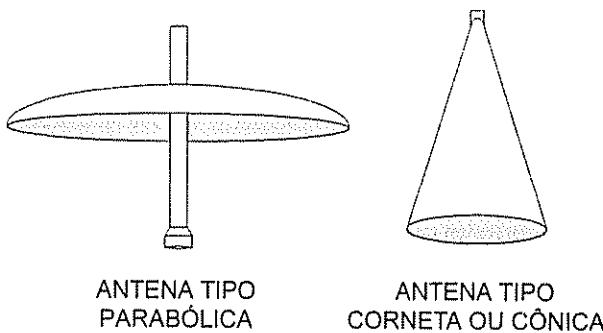


FIGURA 4.30 Tipos de antenas utilizadas por medidores de nível do tipo RADAR.

A antena do tipo parabólica usualmente é adotada em aplicações de tanques de teto fixo, sem a utilização de tubo guia de ondas.

A antena do tipo corneta ou cônica pode ser utilizada com tubo guia de ondas, sendo adotada em aplicações de tanques de teto flutuante, tanques de teto fixo com selo flutuante, esferas e cilindros.

4.7.3 Aplicações

Os dispositivos do tipo RADAR podem ser utilizados para medição de nível de líquidos (hidrocarbonetos, asfalto, GLP, produtos químicos, lama etc.) e de alguns tipos de

sólidos (minério em grãos e carvão). Podem ser utilizados na medição de nível em tanques de teto fixo e teto flutuante, cilindros, esferas de GLP e silos de minério ou carvão, com pressões de até 25 bar e temperaturas de até 250 °C.

No caso de utilização em tanques de teto flutuante, ou tanques de teto fixo com selo flutuante, o medidor de nível é instalado com um tubo-guia de ondas (com diâmetro variando entre 0,1 e 0,2 metro). Em aplicações de medição de nível em esferas ou cilindros, também são utilizados tubos-guia de ondas. Alguns modelos de medidor de nível do tipo RADAR permitem testar-se, automaticamente, a precisão do instrumento, instalando-se um pino de referência internamente ao tubo-guia de ondas, que será visível ao transmissor apenas durante o procedimento de verificação do instrumento.

Os quatro parâmetros que devem ser considerados quando da especificação/seleção de um medidor de nível do tipo RADAR são:

- distância percorrida pelo sinal;
- diâmetro da antena utilizada;
- constante dielétrica do material (ϵ_r);
- estado da superfície do líquido (turbulento ou calmo).

Basicamente, quanto maior a distância percorrida pela onda, até atingir a superfície do material cujo nível se quer medir, menor a potência do sinal refletido e, consequentemente, mais difícil é a medição do nível.

No caso do diâmetro da antena (varia entre 0,1 e 0,5 metro), quanto maior o seu diâmetro, maior a distância (d) que o medidor consegue medir e, quanto menor o diâmetro da mesma, menor a distância (d).

A constante dielétrica (ϵ_r) é o único parâmetro relativo às propriedades do material que influencia na qualidade da medição, quando se utiliza dispositivo do tipo RADAR. Quanto maior a constante dielétrica do material (ϵ_r), mais fácil é a medição do nível e vice-versa. O GLP é um dos produtos que apresentam dificuldade para medição de nível, pois tem uma constante dielétrica muito baixa, dando uma baixa reflexão de onda de RADAR.

Como a onda eletromagnética emitida pelo dispositivo do tipo RADAR não requer um meio para sua propagação, este tipo de sinal não é influenciado por variações na temperatura e pressão do tanque e nas características do meio através do qual o sinal está se propagando (atmosfera do tanque), sendo pouco influenciado pela presença de vapores, espumas e poeiras. A presença de pó depositado sobre a antena, pode afetar a qualidade da medição.

O valor do nível medido por este tipo de transmissor também não será afetado por variações que venham a ocorrer na composição do material (exceto a constante dielétrica ϵ_r , que deverá ser superior ao mínimo admitido pelo dispositivo utilizado) cujo nível está sendo medido, tais como densidade, condutividade e outros fatores.

A presença de ondas/ondulações na superfície do líquido, causadas por agitação, aeração e/ou ebulação, reduzem o range de medição do instrumento (antena) em cerca de 50%. Isto acontece pois, diferentemente de uma aplicação onde a superfície é calma, no caso

da presença de ondas/ondulações na superfície do líquido, uma maior parte da energia do sinal acabará não sendo refletida para o sensor. Usualmente, é recomendável considerar-se que tais condições podem ocorrer, e em função disso, selecionar-se um medidor com antena com diâmetro logo acima daquele requerido na condição em que a superfície do líquido está calma.

A presença de obstáculos ou interferências ao sinal emitido ou refletido irão dificultar, ou mesmo, em alguns casos, impossibilitar a medição de nível utilizando-se dispositivo do tipo RADAR.

O dispositivo do tipo TDR não é afetado pela turbulência na superfície do líquido, nem pela presença de poeira, vapor e espuma, uma vez que o guia de ondas fornece um meio para o pulso de sinal viajar sem interferência, através das camadas de poeira, vapor e espuma. Este tipo de dispositivo consegue medir o nível de produtos com constantes dielétricas mais baixas que os dispositivos do tipo RADAR.

As principais vantagens da utilização dos dispositivos do tipo RADAR são:

- ampla faixa de aplicação;
- imunidade a extremos ambientais;
- baixa manutenção;
- fácil acesso;
- fácil calibração.

Neste tipo de dispositivo, a antena é a única parte do medidor exposta à atmosfera interna do tanque.

4.8 DISPOSITIVOS DO TIPO CAPACITIVO

O capacitor é um componente elétrico, composto de dois condutores, denominados placas, separados por um material isolante (dielétrico). Este componente, muito utilizado em circuitos elétricos, tem como principal característica a propriedade de armazenar cargas elétricas e, consequentemente, se opor a variações na voltagem do circuito onde está instalado. A unidade que caracteriza um capacitor é a capacitância, expressa em farad (F). Um capacitor de um farad armazena um coulomb de carga ao ser submetido a uma diferença de potencial de um volt. Quando submetido a uma tensão alternada (AC), o capacitor é percorrido por uma corrente diretamente proporcional ao valor da sua capacitância.

O valor da capacitância (C) é função da área das placas (A), da distância entre as placas (D) e da constante dielétrica (K) do isolante existente entre as placas do capacitor, ou seja:

$$C = K \cdot \frac{A}{D} \quad [4.25].$$

Para capacitores cilíndricos, que é o tipo mais usualmente utilizado na medição de nível (figura 4.31), o valor da capacitância é dada por:

$$C = 0,614 \cdot \frac{K \cdot X}{\log_{10} D/d} \quad [4.26],$$

onde:

- C = capacidade em picofarad (10^{-12} farad);
 K = constante dielétrica (vide tabela 4.2);
 X = comprimento do capacitor (mm);
 D, d = diâmetros (mm).

TABELA 4.2
Constantes Dielétrica (K) de Vários Materiais

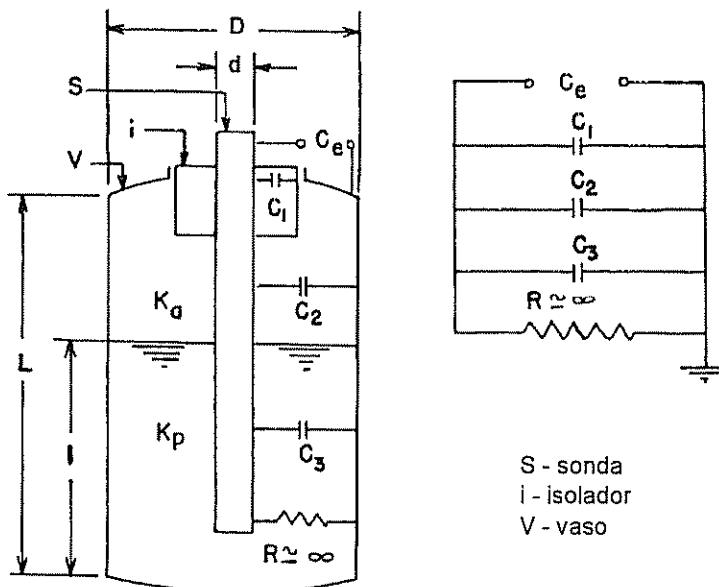
Sólidos			
Material	K	Material	K
Ácido acético	4,1	Polietileno	4,5
Asbestos	4,8	Polipropileno	1,5
Asfalto	2,7	Porcelana	5,7
Baquelite	5,0	Quartzo	4,3
Carbonato de cálcio	9,1	Borracha	3,0
Celulose	3,9	Areia	3,5
Vidro	3,7	Enxofre	3,4
Naftaleno	2,5	Açúcar	3,0
Nylon	45,0	Uréia	3,5
Papel	2,0	Sulfato de zinco	8,2
Fenol	4,3	Teflon	2,0

Líquidos					
Material	Temp.	K	Material	Temp.	K
Amônia	-32	22,4	Querosene	21	1,8
Benzeno	20	2,3	Metanol	25	33,6
Butano	-1	1,4	Álcool metílico	20	33,1
Tetracloreto de carbono	20	2,2	Óleo mineral	27	2,1
Cloro	0	2,0	Naftaleno	20	2,5
Etanol	25	24,3	Octano	20	2,0
Etilbenzeno	20	2,5	Pentano	20	1,8
Cloreto de etileno	20	10,5	Fenol	48	9,9
Éter etílico	20	4,3	Propano	0	1,6
Ácido fórmico	16	58,5	Estireno	25	2,4
Freón 12	21	2,4	Enxofre	400	3,4
Glicol	20	41,2	Tolueno	20	2,4
Heptano	20	1,9	Água	20	80,0
Hexano	20	1,9	Água	0	88,0
Ácido clorídrico	28	4,6	Água	100	48,0
Iodo	107	118	Xileno	20	2,4

4.8.1 Princípio de Funcionamento

Dispositivos do tipo capacitivo consistem, basicamente, de uma sonda cilíndrica, inserida verticalmente no vaso em que se deseja medir o nível (figura 4.31). A sonda (S) pode ser isolada ou não e serve como uma das placas do capacitor, enquanto as paredes do vaso (V) formam a outra placa e o fluido comporta-se como o dielétrico. O valor da capacitância é medido através de um circuito em ponte AC, excitado por um oscilador de alta frequência (0,5 a 1,5 MHz). Quando varia o nível no interior do vaso, alteram-se as proporções entre o líquido (l) e o vapor ($L - l$); como a constante dielétrica (K) da maioria dos líquidos é maior que a dos vapores, as variações de nível no interior do vaso traduzem-se em variações (quase) lineares do valor da capacitância. Consequentemente, os dispositivos do tipo capacitivo também podem ser utilizados para detectar a interface entre dois líquidos com constantes dielétricas (K) diferentes.

A figura 4.31 mostra a instalação de uma sonda capacitiva (S) utilizada na medição do nível de um líquido isolante, armazenado em um vaso (V) com paredes condutoras. Na figura também é mostrado o circuito elétrico equivalente.



S - sonda
i - isolador
V - vaso

$$C_e = C_1 + C_2 + C_3$$

$$C_e = C_1 + \frac{0,614 \cdot K_a \cdot (L - l)}{\log_{10} D/d} + \frac{0,614 \cdot K_p \cdot (l)}{\log_{10} D/d}$$

FIGURA 4.31 Transmissor do tipo capacitivo, utilizado na medição de nível de líquidos isolantes.

No circuito mostrado na figura 4.31, (C_1) representa a capacidade parasita apresentada pelo isolador da sonda; esta capacidade é constante. As capacidades (C_2) e (C_3) representam os efeitos das constantes dielétricas das fases vapor e líquida, respectivamente; as constantes (K_a) e (K_p) representam os valores das constantes dielétrica das fases vapor e líquida, respectivamente; (L) é a altura do vaso e (l) é a altura do produto cujo nível está sendo medido; (D) é o diâmetro do vaso e (d) é o diâmetro da sonda. Quando as constantes dielétricas dos materiais que constituem a fase vapor (K_a) e líquida (K_p) são constantes, a capacidade do sistema é função apenas de (l), ou seja, da altura do produto cujo nível está sendo medido. O valor do resistor (R) deve ser muito elevado (tendendo ao infinito) e representa a resistência efetiva existente entre a sonda e as paredes do vaso.

As condições de pressão e temperatura do vaso irão determinar o tipo de isolador a ser utilizado na sonda, enquanto as condições do fluido (corrosivo ou não) irão determinar o tipo de revestimento a ser utilizado na sonda (geralmente teflon ou cerâmica).

4.8.2 Recomendações de Utilização

Para tanques com grandes diâmetros (D) ou produtos com baixa constante dielétrica, é preferível que a sonda seja formada por um condutor central e uma blindagem concêntrica, agindo como a outra placa do capacitor. Isto aumentará a sensibilidade ($\Delta C / \Delta L$) da sonda, além de possibilitar a linearização da medição, aumentando a precisão. Essa configuração também é utilizada quando a parede do vaso é não-condutora.

Caso o fluido armazenado seja condutor, fluirá uma corrente entre as placas do capacitor, prejudicando a sua precisão. Nesses casos, deverão ser utilizadas sondas com revestimento total de teflon ou material isolante similar. Nesta aplicação, o revestimento da sonda será o dielétrico, enquanto o fluido atuará como a outra placa do capacitor. A figura 4.32 mostra sondas com revestimento isolante.

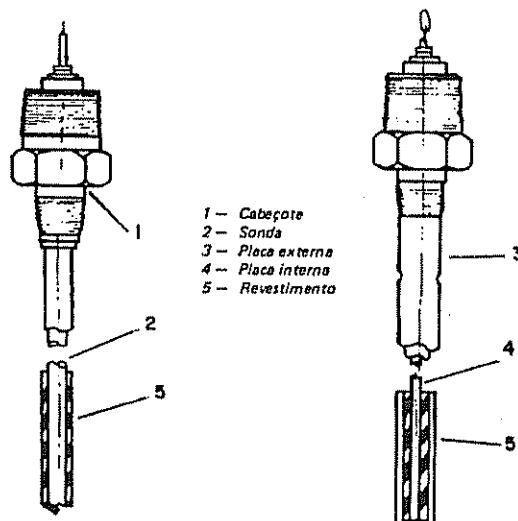


FIGURA 4.32 Sondas capacitivas com revestimento isolante.

As sondas capacitivas com revestimento também podem ser utilizadas quando o fluido armazenado for corrosivo.

Para tanques com alturas elevadas (acima de 3 m), a sonda pode ser construída utilizando-se um cabo de aço isolado ancorado no fundo do vaso. Sondas montadas horizontalmente possuem uma maior precisão e são adequadas para detecção pontual de nível, ou detecção de interface líquido-líquido, líquido-vapor ou sólido-vapor.

A maioria das sondas requer um terra de referência, de forma que elas possam operar efetivamente e livre de interferências externas. Quando os tanques são construídos de material não-condutor, deverá se utilizar terra de referência ou blindagem. O terra de referência pode ser instalado em qualquer lado da parede não-condutora do tanque.

A utilização de dispositivos do tipo capacitivo apresenta os seguintes inconvenientes:

- a constante dielétrica (K) do material muda quando sua temperatura muda. Um valor típico do coeficiente de temperatura é $-0,1\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$. Portanto, se há previsão de variação da temperatura do material, deve-se dotar o sistema de medição de nível do tipo capacitivo com um compensador automático de temperatura;
- a composição química e física do material ou alteração de sua estrutura pode afetar a constante dielétrica (K). Este efeito é mais pronunciado nas aplicações com sólidos, onde a granulometria das partículas e o seu volume específico (m^3/kg) afetam a constante dielétrica;
- em aplicações com líquidos condutivos viscosos, caso o material venha a aderir à superfície da sonda, a camada aderida à superfície ocasionará um erro de medição quando houver redução de nível, uma vez que, nesta condição, o instrumento indicará o valor do nível existente antes da redução;
- em aplicações com produtos condutores pastosos, caso o produto cujo nível se quer medir formar uma camada condutora sobre o isolamento da sonda, esta camada funcionará como eletrodo-terra do dispositivo de medição, impedindo o seu adequado funcionamento, já que o dispositivo de medição sempre acusará presença de material, ou seja, reservatório cheio;
- a presença de bolhas de ar ou espuma na superfície do líquido pode acarretar indicações falsas de nível;
- a interface entre dois líquidos condutores não pode ser detectada por esse tipo de dispositivo;
- devido a elevada constante dielétrica da água, a contaminação do fluido com água afetará bastante a sua constante dielétrica (K), alterando a indicação de nível;
- usualmente são necessárias calibrações empíricas dos dispositivos do tipo capacitivo.

Nota: Líquidos como ácido clorídrico e soluções de cloretos (água do mar), formam um fino filme condutor contínuo nas superfícies do isolamento, que, por sua resistência relativamente baixa, alteram as características elétricas da sonda capacitiva.

A utilização de dispositivos do tipo capacitivo apresenta as seguintes vantagens:

- não contêm partes móveis;
- podem ser fabricados com formato simples e robusto;
- podem ser fabricados para aplicações com produtos corrosivos;
- geralmente são fáceis de limpar;
- mediante projeto específico, podem ser fabricados para trabalhar em locais com alta pressão e alta temperatura.

4.8.3 Dimensionamento de Sondas Capacitivas

Um parâmetro fundamental para seleção da sonda a ser utilizada é a sua capacitância diferencial ($\Delta C/\Delta L$). Esta característica, juntamente com a faixa de medição de nível (ΔL), determina a faixa de trabalho do transmissor, que deve ser superior a 10 picofarads, para não prejudicar a precisão do sistema de medição de nível.

Outra característica importante é que a razão entre a capacitância diferencial ($\Delta C/\Delta L$) e a capacitância terminal ($\Delta C/\Delta T$) deve permanecer na faixa de 4 a 0,25.

Nota: Capacitância terminal ($\Delta C/\Delta T$) é o valor da capacitância efetiva do sistema quando o vaso está vazio.

4.8.4 Formas Construtivas

Os medidores do tipo capacitivo (medidores contínuos ou chaves) podem ser encontrados no mercado em duas construções básicas: compacta e remota.

Na construção compacta, a parte eletrônica (fonte de alimentação e dispositivos de saída) vem integrada à sonda capacitiva, devidamente abrigada em alojamento à prova de tempo ou à prova de explosão. Sua vantagem consiste no fato de não necessitar de dispositivos auxiliares. Por outro lado, este tipo de construção exige que seus ajustes ou recalibrações sejam feitos no local de sua montagem, nem sempre de fácil acesso.

Na construção remota, a sonda de detecção está montada em local fisicamente separado da sua parte eletrônica, ficando aquela no campo, montada no reservatório ou silo cujo nível se quer medir, e a parte eletrônica, em geral, montada no solo, próximo ao reservatório ou silo ou na sala de controle. A interligação entre a sonda e a parte eletrônica é feita utilizando-se um cabo especial blindado (coaxial), de comprimento limitado por recomendações do fabricante. A construção remota tem a vantagem de permitir ajustes ou recalibrações a partir do solo ou da sala de controle, e permitir a instalação da sonda em temperaturas ambientais mais altas, em função da parte eletrônica não estar sujeita às condições ambientais em que está instalada a sonda; a desvantagem neste tipo de construção é a sensibilidade a interferências, às quais estão sujeitos os fios de interligação entre a sonda e a parte eletrônica.

4.9 DISPOSITIVOS DO TIPO ELETROMECÂNICO

4.9.1 Princípio de Funcionamento

Os dispositivos do tipo eletromecânico podem ser classificados como medidores semicontínuos ou cíclicos e medidores contínuos, também conhecidos por medidores por compensação.

4.9.2 Medidores Semicontínuos ou Cíclicos

Os medidores semicontínuos ou cíclicos utilizam um cabo ou fita de medição, tendo na ponta um peso sensor, que é introduzido no equipamento cujo nível se quer medir, desde seu topo até alcançar a superfície do produto cujo nível está sendo medido (figura 4.33). O cabo ou fita é desenrolado de um tambor ou carretel, acionado por um motor-redutor, com o apoio do peso sensor na superfície do material; ocorre o relaxamento da tensão no cabo ou fita de medição, o que provoca, por meio de um mecanismo adequado, a reversão do motor-redutor, que passará a recolher o cabo ou fita de medição, preparando o dispositivo para iniciar novo ciclo de medição.

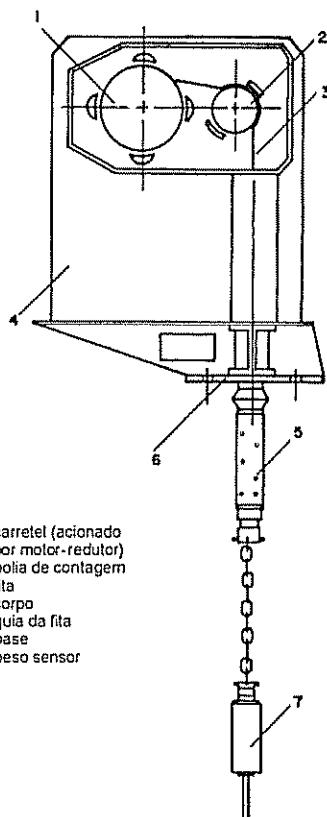


FIGURA 4.33 Medidor eletromecânico semicontínuo ou cíclico de nível.

Durante a descida do peso sensor, haverá a geração de uma sequência de pulsos, proporcional ao comprimento da fita ou cabo de medição introduzido no equipamento. Estes pulsos serão registrados em um contador eletromecânico (como está sendo medido o vazio do equipamento, o contador deverá ser do tipo subtrator), ou então processados eletronicamente e transformados em sinal analógico de saída proporcional ao nível medido.

Este sistema semicontínuo ou cíclico de medição de nível poderá ser automatizado mediante o uso de um temporizador, que iniciará a operação de medição, em intervalos de tempo determinado pelas condições de operação do silo.

O sinal de saída, digital (de pulsos) ou analógico, é mantido constante entre os ciclos de medição, podendo ser utilizado durante cada operação de medição.

4.9.3 Medidores Contínuos ou de Compensação

Em sua configuração geral, este medidor é similar ao descrito no item 4.9.2. No medidor contínuo ou de compensação, o peso sensor ou deslocador é mantido em contato permanente com o material sob medida, não sendo recolhido periodicamente. Assim, a posição do peso sensor ou deslocador é representada, digital ou analogicamente, de maneira contínua, utilizando-se potenciômetros, capacitores, discos codificadores etc. O comando de posicionamento deste peso sensor ou deslocador geralmente é feito por um servo-motor, que detecta as variações de tensão no cabo que conecta o peso sensor (deslocador) ao servo-motor, quando ocorre variação do nível, com a consequente variação da força de empuxo aplicada pelo produto cujo nível está sendo medido sobre o peso do sensor, quando este se apóia mais ou menos no líquido sob medição. A posição do servo-motor é associada à posição do peso sensor ou deslocador e, consequentemente, ao valor do nível medido (figura 4.34).

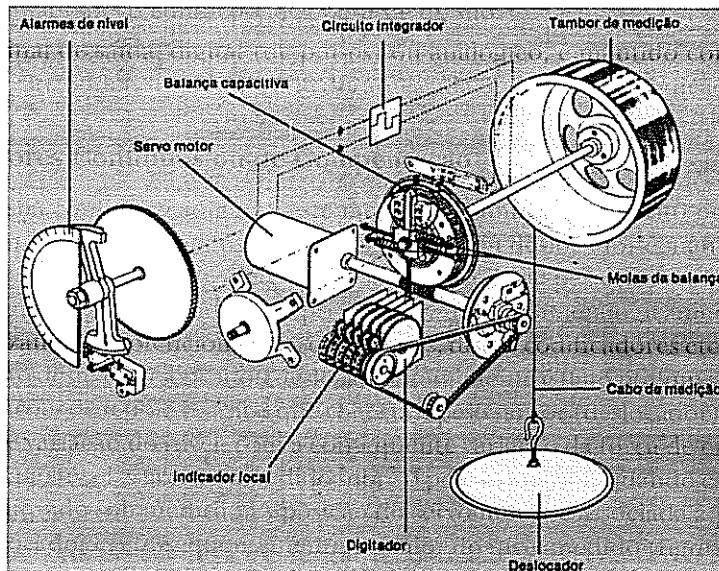


FIGURA 4.34 Medidor eletromecânico contínuo de nível.

4.9.4 Aplicação e Instalação

Os medidores de nível do tipo eletromecânico podem ser aplicados nas medições do nível de sólidos ou líquidos, em reservatórios ou silos, especialmente os de alturas maiores, que exijam faixas de medição de até 75 m.

Os medidores de nível do tipo eletromecânico, por força de seu princípio de funcionamento (uso da força de gravidade), sempre devem ser instalados no topo do recipiente ou silo. O caminho a ser percorrido pelo peso sensor ou deslocador deverá estar fora do jato de alimentação do silo. Normalmente, em silos de armazenagem de sólidos, faz-se um intertravamento entre a operação de medição e a operação de carregamento do silo, de forma a se evitar soterramento do peso sensor ou deslocador, o que poderia dificultar/impedir o seu recolhimento.

4.10 CHAVES DE NÍVEL

As chaves de nível são dispositivos utilizados para atuar em determinados pontos fixos de nível. Estes pontos fixos são valores de nível em equipamentos que, uma vez alcançados, exigem o desencadeamento de alguma ação necessária à boa operação ou à segurança do sistema ao qual pertence o equipamento. Assim sendo, uma chave de nível pode ligar uma bomba, acionar um alarme ou desencadear uma seqüência de operações automáticas quando o nível atinge um ponto fixo, cujo valor é informado à chave através de ajustes a ela inteligíveis.

As chaves de nível fornecem como saída somente um dentre dois estados: energizado/desenergizado para chaves elétricas ou pressurizado/despressurizado para chaves hidráulicas ou pneumáticas. Para cumprirem esta tarefa, as chaves de nível são compostas, basicamente, de duas partes, **detector de nível** e **circuito de saída**. O detector, que está montado no equipamento cujo nível está sendo monitorado, se encarrega de informar ao circuito de saída a presença ou ausência do nível em determinada posição e esse circuito se encarrega de mudar o estado de saída da chave, em função desta informação.

Conforme recomendação constante na API – *Recommended Practice – 551 – Section 3 – Level*, quando as chaves de nível estiverem sendo utilizadas como dispositivos de proteção, elas deverão utilizar conexões ao equipamento, separadas e independentes das conexões utilizadas por outros instrumentos.

Neste item serão analisados os tipos mais comuns de chaves de nível, utilizadas em processos industriais.

4.10.1 Chaves de Nível do Tipo Flutuador (ou Bóia)

As chaves de nível do tipo flutuador são constituídas por um flutuador que monitora o nível do líquido ou a interface entre dois líquidos de densidades diferentes, e por um dispositivo que detecta a movimentação ou a passagem desse flutuador, quando o nível atinge um valor predeterminado.

A detecção da movimentação ou passagem do flutuador quando o nível atinge esse ponto predeterminado é feita pelo acionamento, através da haste do flutuador, de uma chave (usualmente ampola de mercúrio ou microchave), fechando ou abrindo um contato, o que permitirá acionar relés ou CLP's e comandar o acionamento de uma bomba, de uma válvula solenóide ou outros dispositivos.

4.10.1.1 Construção

Os flutuadores utilizados em chaves de nível podem ter forma esférica, cilíndrica, elíptica ou outras configurações.

Conforme citado no item 4.3.2 deste capítulo, o empuxo que equilibrará o peso do flutuador, é determinado pela relação entre a densidade do fluido e a profundidade máxima de imersão do flutuador nesse fluido, nas condições de operação.

Usualmente, os flutuadores são ocos e seu diâmetro varia entre sete e dezoito centímetros. Os flutuadores são fabricados em latão e aço inoxidável e também são disponíveis flutuadores fabricados em aço-liga ou materiais leves.

4.10.1.2 Tipos de montagem

Conforme a sua construção, os flutuadores podem ser classificados como para montagem interna ou externa ao equipamento.

Os flutuadores para montagem interna ao equipamento são mais baratos, porém, possuem duas grandes desvantagens. A primeira é que o vaso deve estar fora de operação, para que a chave possa ser removida para reparo ou manutenção. A segunda desvantagem é que nesta construção as chaves de nível estão sujeitas a atuação falsa, caso haja turbulência no meio líquido. Isto pode ser evitado nos casos de chaves com montagem de topo, instalando-se um tubo acalmodor em volta destas chaves, evitando-se, assim, que a turbulência existente na superfície do fluido afete a atuação da chave de nível do tipo flutuador.

Os flutuadores podem ser montados utilizando-se conexões flangeadas ou rosqueadas. As conexões flangeadas estão disponíveis para montagens de topo ou lateral (ver figuras 4.35 e 4.36), com diâmetros disponíveis variando de 7,5 a 15 centímetros. As conexões rosqueadas são usualmente disponíveis com diâmetros variando de 3,25 a 7,5 centímetros. O material e a classe de pressão da chave de nível devem ser compatíveis com as que o processo requer para a tubulação.

Os flutuadores para montagem externa ao equipamento custam mais caro que os para montagem interna, porém, se durante a instalação forem associados a válvulas isoladoras, estes flutuadores poderão ser removidos sempre que for necessário reparo ou manutenção. Este tipo de flutuador também pode ser instalado em tubulação instalada externamente ao equipamento, o que contorna o problema da turbulência, podendo ser aplicado mesmo em vasos que utilizem agitadores. Os flutuadores mostrados na figura 4.36 são montados dentro de câmaras, que são instaladas externamente aos equipamentos.

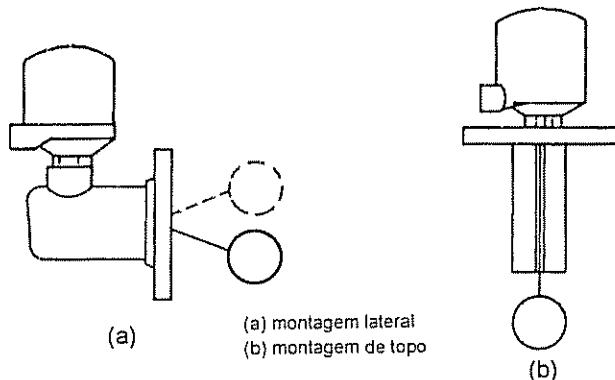


FIGURA 4.35 Chaves de nível do tipo flutuador para montagem interna ao equipamento.

As câmaras externas podem ter várias combinações das conexões para montagem, tais como "Topo e Base" e "Lado e Base".

As conexões "Lado e Base" (figura 4.36a e c) são geralmente as mais utilizadas, por serem de fornecimento padrão dos fabricantes e também por facilidade de instalação, devido à maior flexibilidade para o encaixe das tomadas do instrumento com as tomadas do equipamento, visto ser mais fácil a mudança da distância centro a centro das conexões do processo. No caso do instrumento com tomada tipo "Lado a Lado" (figura 4.36b e d), a distância entre as conexões não pode ser alterada.

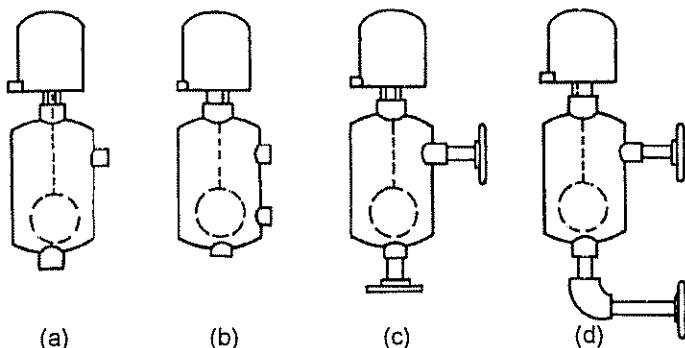


FIGURA 4.36 Chaves de nível do tipo flutuador, para montagem externa ao equipamento.

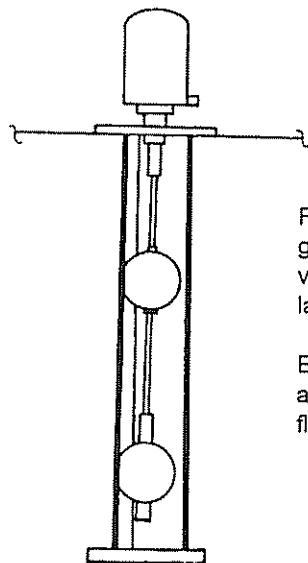
4.10.2 Chaves de Nível Tipo "Tandem"

As chaves de nível tipo "Tandem" ou "Bóia sem seqüência", consistem de chaves de nível construídas com mais de um flutuador.

Os flutuadores, quando fixos em uma mesma haste, atuam no mecanismo de chaveamento, mudando sua posição, ou seja, ligando ou desligando seus contatos, por ação da força transferida ao mecanismo, pela haste do flutuador, que é função da soma vetorial dos pesos e empuxos resultantes dos flutuadores livres ou submersos no líquido.

Os padrões dos fabricantes se restringem, usualmente, a dois flutuadores, entretanto, um maior número de flutuadores pode ser obtido por fabricação especial.

Com chaves de nível tipo "Tandem" ou "Bóia sem seqüênci", podem ser detectados diferenciais de até 3,30 m.



Faz parte desta montagem uma gaiola constituída por 3 hastas verticais, para evitar o deslocamento lateral dos flutuadores

Este tipo de montagem pode permitir até 4 estágios de atuação, se cada flutuador operar com um diferencial.

FIGURA 4.37 Chave de nível do tipo "Tandem" ou "Bóia sem seqüência".

4.10.3 Chaves de Nível do Tipo Deslocador

4.10.3.1 Introdução

As chaves de nível do tipo deslocador são constituídas por um **sensor** (deslocador), um **elemento de sustentação**, um **elemento de vedação** e uma (ou mais) **estação de chaveamento**, (circuito de saída). Com exceção da estação de chaveamento, os demais componentes da chave de nível do tipo deslocador também aparecem na classificação relativa aos Dispositivos do Tipo Deslocador, analisados no item 4.4 deste capítulo.

Em razão desta semelhança, a maioria das propriedades do sistema sensor/elemento de sustentação e características dos elementos de vedação, estudadas mais detalhadamente no item 4.4 deste capítulo, também são aplicáveis às chaves de nível do tipo deslocador.

4.10.3.2 Chaves de nível com deslocador e mola balanceadora

A combinação deslocador/mola linear (em substituição à mola torsional realizada pelo tubo de torque) utilizada na construção do transmissor/controlador com mola balanceadora (item 4.4.4 deste capítulo), também é aplicada em chaves de nível. Neste tipo de construção, os fabricantes disponibilizam tanto o **deslocador integral** quanto o **deslocador seccionado**.

O deslocador integral possui comprimento igual à faixa de ajuste do ponto de açãoamento. O deslocador seccionado é composto de dois ou mais minideslocadores, com comprimento variando entre 5 e 8 centímetros, e que são mantidos suspensos por um cabo de extensão flexível (figura 4.38).

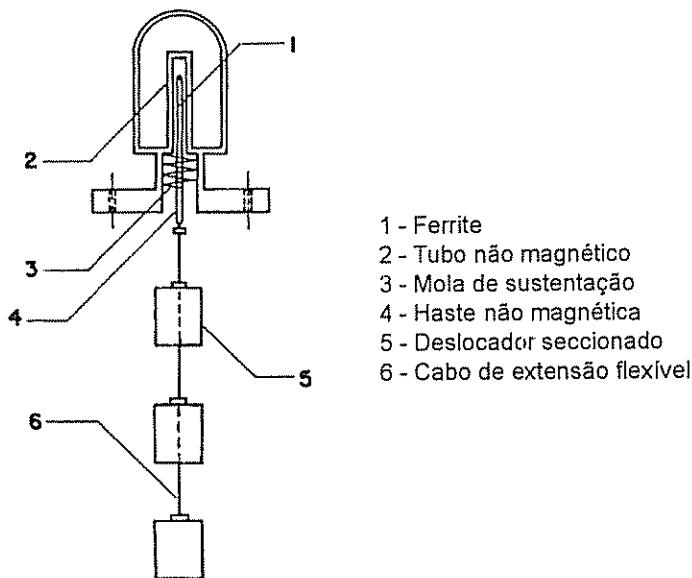


FIGURA 4.38 Chave de nível do tipo deslocador, com deslocador seccionado.

Como a chave de nível com deslocador e mola balanceadora não utiliza tubo de torque, ela usa um elemento de vedação alternativo, o acoplamento magnético. Trata-se de um tubo construído com material transparente ao campo magnético (por exemplo, aço inox), que envolve uma vareta, geralmente também não-magnética, a haste (figura 4.38). Numa das extremidades da haste é preso o cabo de extensão flexível do deslocador e, na outra, é fixada uma peça ferromagnética, popularmente designada por ferrite. Externamente ao tubo não-magnético é fixada uma estação de chaveamento, que é açãoada magneticamente (figura 4.39) e é composta por um magneto, que detecta a aproximação do ferrite e por uma ampola de mercúrio ou microchave.

Restringindo a movimentação da haste e provendo a adequada sustentação ao deslocador, existe a mola balanceadora (figura 4.38), cuja rigidez normalmente é bastante inferior à do tubo de torque, de modo que a movimentação do deslocador neste tipo de instrumento é significativamente maior que a movimentação na construção com tubo de torque; não passando, entretanto, de três ou cinco centímetros.

Os deslocadores seccionados geralmente são fabricados em porcelana, grafite impermeável ou aço inoxidável. Entretanto, qualquer que seja o material e qualquer que seja o

líquido (ou líquidos, no caso de medição de interface), o deslocador deve submergir completamente quando desacoplado do cabo de extensão flexível e da haste, ou seja, quando não contar com a sustentação da mola.

O deslocador seccionado pode ter suas seções distribuídas da forma mais conveniente à aplicação, dentro do comprimento útil do cabo de extensão. Qualquer que seja o arranjo adotado, o comportamento do conjunto sensor/elemento de sustentação funciona basicamente da seguinte maneira: quando o nível, seja de superfície ou de interface, excursiona através da dimensão longitudinal de uma das seções do deslocador, este responde exatamente como no caso do deslocador tradicional, ou seja, move-se no mesmo sentido, porém mais lentamente que o nível. Se o nível estiver subindo, o deslocador começará a submergir e logo estará completamente submerso. Quando o nível excursiona entre duas seções consecutivas, o conjunto mantém-se imóvel, uma vez que o empuxo exercido sobre o cabo de extensão é insignificante.

Na figura 4.39 está representada, esquematicamente, uma estação de chaveamento do tipo ampola de mercúrio, montada externamente ao tubo não-magnético (a). Nesta figura, também são mostradas a haste não-magnética (b) e o ferrite (c), componentes já apresentados na figura 4.38. A estação de chaveamento compõe-se da peça de suporte (d), ampola de mercúrio (l), magneto (f), contrapeso da ampola (g), parafuso de ajuste da angularidade da ampola (h) e parafuso de limitação do curso do magneto (i). Na situação representada na figura 4.39, o ferrite ainda não se aproximou o suficiente para estabelecer um enlace magnético efetivo e fazer o atracamento do magneto. O magneto (f) tem o formato de um "C" (figura 4.39), e está disposto de forma a "abraçar" o tubo não-magnético, quando do atracamento. Observe-se, ainda, que o centro de gravidade do contrapeso e o centro de articulação do suporte são localizados de maneira que o suporte da ampola mantém-se continuamente apoiado no parafuso de angularidade. Por outro lado, o centro de gravidade do magneto e o centro de articulação do respectivo suporte são alinhados de tal forma que o suporte esteja sempre propenso a se afastar do tubo não-magnético, portanto, propenso a se afastar da força magnética de atracamento. Como na condição de nível baixo inexiste a força de atracamento, o suporte do magneto fica apoiado no parafuso de limitação de curso, conforme ilustrado na figura 4.39.

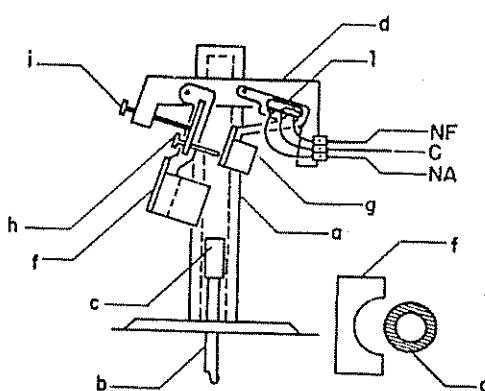


FIGURA 4.39 Estação de chaveamento do tipo ampola de mercúrio.

Quando o ferrite sobe, devido ao aumento do nível, o momento gerado pela força magnética do magneto suplanta a soma dos momentos gerados pela ação da gravidade sobre o contrapeso da ampola (g) e o magneto (f), em consequência, ocorre o atracamento do magneto (f), obrigando o contrapeso da ampola a girar no sentido anti-horário. Uma adequada combinação nos ajustes de angularidade da ampola e limitação do curso do magneto, garante que a rotação do contrapeso da ampola (g), desde a posição correspondente a "magneto desatracado" até a posição "magneto atracado" e retornando à posição original, desloca apropriadamente o mercúrio existente no interior da ampola (l). Na primeira posição, o mercúrio está preenchendo o espaço entre as cavidades central e da direita; na segunda posição, o mercúrio interliga as cavidades central e da esquerda. O mercúrio, sendo um metal líquido e apresentando grande tensão superficial, estabelece um bom contato elétrico, possui a fluidez indispensável para este tipo de utilização e não se subdivide no interior da ampola. O mercúrio é depositado no interior da ampola em quantidade necessária para interligar duas cavidades, porém não suficiente para interligar as três cavidades em qualquer posição da ampola.

O ajuste do ponto de chaveamento na estação de chaveamento do tipo ampola de mercúrio é determinado pela posição em que é colocada a peça de suporte (referência d na figura 4.39) ao longo do tubo não-magnético. A peça de suporte (d) possui uma abertura circular, através da qual passa o tubo não-magnético. Esta abertura, que possui um diâmetro ligeiramente maior que o diâmetro externo do tubo não-magnético (a), é estrangulada em torno do tubo através de um parafuso (não representado na figura 4.39). Se for desejado diminuir o ponto de chaveamento, por exemplo, ao nível onde está posicionado o ferrite na figura 4.39, basta desapertar o mencionado parafuso, deslocar a peça de suporte para baixo até que se observe o atracamento do magneto (f) e, a seguir, reapertar o parafuso. Naturalmente, este procedimento equivale a, aproximadamente, se alinhar o magneto ao ferrite.

O diferencial intrínseco de chaveamento da estação do tipo ampola de mercúrio é um pouco maior que o da microchave, apesar de ambos não admitirem ajuste deste diferencial. Existe um recurso que pode ser utilizado, para proporcionar um ajuste ao diferencial das chaves de nível tipo mola balanceadora com deslocador integral. Este recurso consiste em se permitir ao ferrite (c) liberdade para se deslocar dentro de uma faixa morta X, posicionada ao longo da haste (b). Neste arranjo, quando a haste (b) sobe, o ferrite (c) acompanha solidariamente o movimento. Uma vez atracado o magneto (f), se o nível baixar, a haste (b) se movimenta para baixo, enquanto o ferrite (c) permanece imóvel, devido à atração exercida pelo magneto (f). A haste (b) prossegue movimentando-se através do ferrite (c), até que a contraporca instalada na haste (b) encosta na extremidade superior do ferrite (c), obrigando-o a acompanhar o movimento da haste (b), ou seja, uma vez ocorrido o atracamento, o magneto (f) somente volta a desatracar após um deslocamento X da haste (b).

Quando o deslocador é do tipo seccionado, o diferencial de chaveamento é determinado pela distância entre suas seções. Assim, simplesmente se alterando a posição dos deslocadores ao longo do cabo de extensão (figura 4.38), obtém-se um efetivo ajuste do diferencial. Uma vez que o comprimento do cabo de extensão oferecido pelos fabricantes pode ir além de seis metros, a faixa de ajuste do diferencial pode atender a requisitos que vão desde

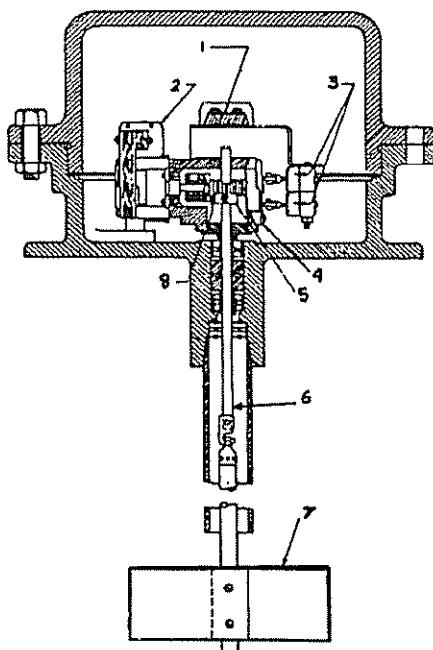
o simples alarme de alto e baixo nível, até o comando de válvulas e bombas destinados a controlar o nível. O deslocador do tipo seccionado é particularmente apropriado para instalação em equipamentos situados abaixo do nível do piso, tais como tanques subterrâneos e caissons de plataformas marítimas de exploração de petróleo. Estes equipamentos, naturalmente, não permitem a instalação de instrumentos laterais, tais como chave de nível do tipo flutuador etc. Além disso, neste tipo de aplicação as faixas de variação de nível são, na maioria das vezes, proibitivamente grandes para utilização de deslocadores integrais internos.

4.10.4 Chaves de Nível do Tipo Pás Rotativas

4.10.4.1 Princípio de operação

As chaves de nível do tipo pás rotativas são aplicadas, basicamente, para monitoração e controle de nível em silos ou equipamentos contendo produtos granulados.

Estas chaves são constituídas, basicamente, por um eixo vertical (figura 4.40), dotado de palhetas, que são acionadas por um motor síncrono e giram continuamente em baixa rotação. Quando o movimento é submetido à resistência do material do silo, indicando, assim, a presença de material junto às pás, a caixa (ou invólucro, ou corpo) do motor tenderá a girar em sentido contrário, e esta reação produzirá uma força que acionará duas "microchaves". A primeira atua como dispositivo de alarme e a segunda desenergiza o motor síncrono.



- 1 - Bloco terminal
- 2 - Motor síncrono
- 3 - Microchaves
- 4 - Mola
- 5 - Engrenagem helicoidal
- 6 - Eixo
- 7 - Pá rotativa
- 8 - Rosca sem-fim

FIGURA 4.40 Chave de nível do tipo pás rotativas.

Quando o nível do produto decrescer, deixando as pás livres de qualquer resistência, uma mola fará com que o conjunto e as "microchaves" retornem à posição original, repetindo-se, então, um novo ciclo.

4.10.4.2 Características gerais

As chaves de nível do tipo pás rotativas tem seu eixo montado sobre rolamentos esféricos, de forma a garantir baixo atrito durante a rotação das pás. O eixo e os rolamentos são protegidos por selos de teflon, comprimidos por molas, garantindo, assim, estanqueidade à umidade e pó, ao mecanismo interno.

As pás girantes são normalmente fabricadas de aço carbono revestido com vinil, sendo disponíveis no mercado pás de aço inoxidável, revestidas ou não com vinil.

Essas chaves de nível podem ser utilizadas em quase todos os tipos de grânulos, são de baixo custo e aplicáveis em produtos com temperaturas de até 500 °C. Apresentam uma sensibilidade melhor que três centímetros, dependendo principalmente da granulometria do produto.

As chaves de nível do tipo pás rotativas usualmente são montadas no topo do silo, estendendo-se o eixo, ou parte inserida, até o ponto onde se deseja monitorar o nível. Para a detecção de nível baixo, utiliza-se uma "placa de deflexão" soldada junto às pás, de forma a protegê-las de impactos com as partículas de produto, quando na operação de carga, e da força de arraste, quando na operação de descarga.

Quando utilizados em processos envolvendo produtos com alta temperatura, o invólucro (motor e demais componentes) deverá ser montado sobre uma plataforma (pescoço ou também denominado seção de resfriamento), onde a temperatura do invólucro não ultrapasse a 50 °C.

4.10.5 Chaves de Nível do Tipo Ultra-Sônico

Usualmente as chaves de nível do tipo ultra-sônico possuem dois transdutores, um atuando como transmissor e outro como receptor. O transmissor emite ondas mecânicas ultrassônicas que são detectadas pelo receptor, após a sua propagação no meio no qual estão imersas.

Os transdutores ultra-sônicos, que funcionam como transmissor e receptor, podem ser montados em um único receptáculo hermeticamente selado, ou em duas unidades distintas, montadas diametralmente opostas na parede do vaso.

A figura 4.41 ilustra alguns tipos de instalação.

No caso da Instalação A, os transdutores estão localizados em posições distintas, a onda se propaga no meio gasoso e a comutação da chave somente ocorrerá quando o nível de fluido de processo subir e atingir a posição onde estão instalados os transdutores. Quando a distância entre a fonte emissora e o receptor for maior do que 3,0 m, deverão ser instalados focalizadores para limitar o ângulo de incidência.

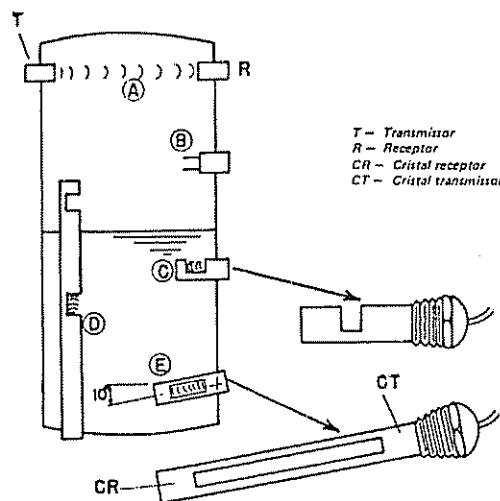


FIGURA 4.41 Montagem de chaves de nível com dispositivo do tipo ultra-sônico.

A instalação B mostra um único instrumento, no qual as ondas mecânicas geradas pelo transmissor serão sentidas pelo receptor somente se ambos estiverem submersos em um meio líquido não compressível. Quando imersos no meio gasoso, o receptor nada detectará.

A instalação C é similar à instalação B. Quando o fluido de processo preencher a ranhura do instrumento que contém os cristais piezelétrico, a onda ultra-sônica incidente será recebida pelo receptor na outra extremidade, indicando a presença de líquido naquele nível preestabelecido.

A instalação D é uma variação múltipla de C, permitindo a detecção dos níveis alto e baixo através de um único elemento.

Na instalação E, a chave de nível é instalada com uma inclinação de 10º em relação à horizontal, permitindo a detecção da interface entre dois líquidos. A onda ultra-sônica gerada pelo cristal piezelétrico será detectada pelo cristal-receptor quando a ranhura contiver um único líquido. Na existência de uma interface, a onda irá refletir-se e refratar-se, impedindo-a de atingir o receptor.

Todas as instalações mostradas na figura 4.41 são próprias para serviço com líquidos limpos ou com líquidos possuindo sólidos em suspensão. Somente a instalação A, a rigor, é recomendada para detecção de nível de sólidos.

4.11 DISPOSITIVOS DO TIPO PESAGEM

4.11.1 Princípio de Funcionamento

O nível de um produto sólido, em um tanque ou silo, pode ser obtido através da pesagem total do tanque ou silo (peso total = peso do silo vazio + peso do produto), subtraindo-se da pesagem total o peso do silo quando completamente vazio.

Os transmissores contínuos de nível do tipo pesagem fornecem continuamente o peso do silo, desde zero (silo vazio) até o fim da escala (silo cheio).

Em plantas modernas e automatizadas, envolvendo o manuseio de sólidos (indústria de transformação) com sistemas de controle que requeiram uma série de sinais para o controle de transportadores e/ou alimentadores, e onde a gerência de produção solicita constantemente a leitura (informações) do conteúdo dos silos de estocagem ou inventário, é essencial a utilização de transmissores contínuos de nível do tipo pesagem. Em aplicações envolvendo inventário de produtos estocados na forma de volume ou, principalmente, de peso, os dispositivos do tipo pesagem também são bastante úteis.

4.11.2 Conceitos Básicos

Os dispositivos do tipo pesagem são construídos tendo como elemento de medição as células de carga. Células de carga são estruturas especiais de medição, construídas à base de dispositivos do tipo *strain-gages* e projetadas de forma a produzirem um sinal elétrico proporcional à carga depositada sobre elas. As células de carga geralmente são montadas embaixo de suporte (ou suportes) ou estrutura de suporte, de um tanque ou silo. O peso do equipamento depositado sobre a célula de carga produz mudanças nas características dos *strain-gages*, que constituem a estrutura da célula de carga.

A estrutura interna da célula de carga é constituída por vários *strain-gages*, distribuídos de forma a permitir vários graus de sensibilidade e linearidade. Estes *strain-gages* são fixados a um "tubo de torque", que se deforma por ação do peso do tanque ou silo, cujo nível se deseja medir. Esta deformação produz variações no valor das resistências dos *strain-gages*, as quais são relacionadas com o nível ou peso do tanque ou silo.

Qualquer que seja a direção do efeito de deformação ocasionado pelo peso do tanque ou silo, este "TUBO DE TORQUE" dará como resultante o mesmo sinal de saída (desde que as forças obtidas nas várias direções sejam iguais), pois a instalação do dispositivo do tipo pesagem é feita de forma que sempre haja um *strain-gage* sob tensão.

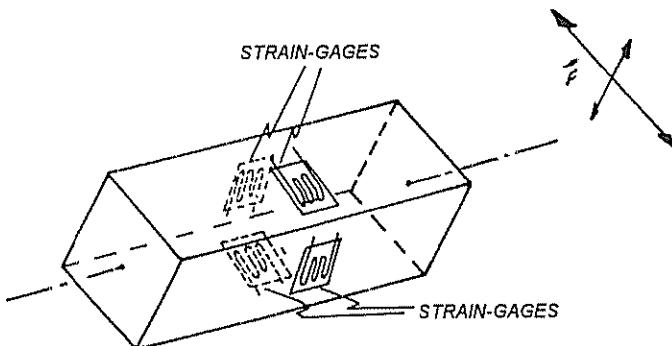


FIGURA 4.42 Célula de carga.

As células de carga são desenhadas para aceitar somente forças verticais que representem o peso a elas aplicado, uma vez que as forças horizontais (componentes horizontais e verticais, gerando uma resultante oblíqua), constituem o principal motivo de erros de medição em dispositivos do tipo pesagem.

As células de carga utilizadas em sistemas do tipo pesagem são protegidas por blindagem de aço inoxidável, sendo fornecidas completamente encapsuladas para proteção adequada contra pó, umidade e produtos corrosivos, viabilizando sua instalação nas mais

severas condições ambientais. Alguns fabricantes fornecem células de carga com proteções especiais contra variações de temperatura.

4.11.3 Características de Instalação

O número de células de carga a ser utilizado em uma pesagem dependerá diretamente da precisão necessária à medida. Este número poderá variar de uma a doze células, dispostas, quando em número maior que duas, obrigatoriamente em forma geométrica regular (triângulo equilátero, quadrado, pentágono, hexágono ..., dodecágono), interligadas em série e ligadas a uma unidade eletrônica (integrador/transmissor).

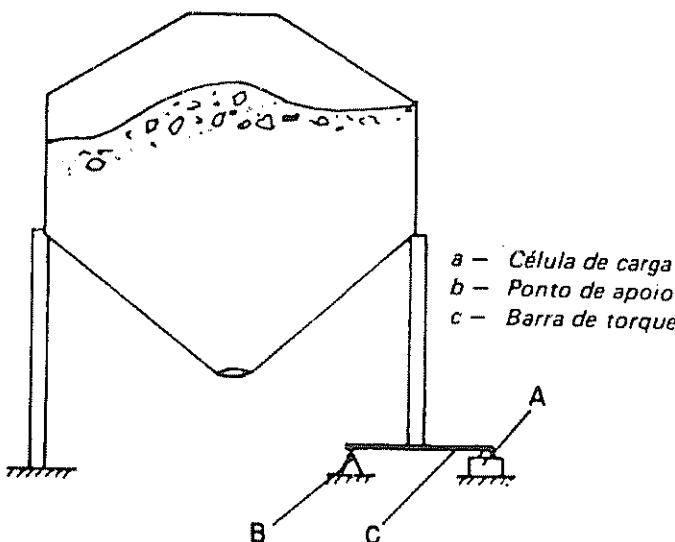


FIGURA 4.43 Silo com pesagem utilizando célula de carga.

4.11.4 Erros

A maioria dos processos industriais contínuos utiliza dispositivos do tipo pesagem quando das operações de transporte, bateladas, mistura, embalagem (ensacamento, por exemplo) ou simplesmente para contabilizar (quantificar) as taras de produção de materiais sólidos.

Existe uma série de causas que geram erros na determinação do nível (ou seja, peso), quando se utiliza dispositivos do tipo pesagem. Neste item analisar-se-á somente as causas principais.

Como o volume é dado por:

$$V = \int_0^H Ah \cdot dH \quad [4.27]$$

e peso é dado por:

$$W = \int_0^H Ah \cdot dH \cdot \rho \quad [4.28]$$

onde:

V = volume, em m^3 ;

H = altura, em m;

A_h = seção de área em função de H , em m^2 ;

ρ = densidade do produto, em kg/m^3 ;

W = peso, em kg.

Das equações 4.27 e 4.28, vemos que volume e peso são simples funções de variáveis nada complexas, mas pequenas variações destas poderão produzir erros significativos na medição.

Analisaremos, a seguir, estas variáveis separadamente.

ERRO 1

Variações na seção reta (A) (corte longitudinal ou diâmetro interno) do silo ou tanque, a qual causa erros na avaliação do volume.

Estas variações podem ser causadas por:

- tolerância fora do normal na fabricação do silo;
- deflexão do silo devido à dilatação térmica, ocasionado pelas condições ambientais.

ERRO 2

Variações na densidade do produto (ρ), ocasionando erro na avaliação do volume.

Como constante multiplicativa na equação 4.28, a densidade do produto (ρ) afeta efetivamente a precisão do sistema. A densidade do produto variará consideravelmente quando houver:

- variação da umidade do produto;
- variação da temperatura e/ou pressão de operação, no caso de tanques contendo líquidos;
- grande espaço de tempo entre as operações de carga e descarga (provocará compactação do conteúdo do silo, no caso de silos contendo grânulos).

ERRO 3

Distribuição/conformação do produto (granulados)

A distribuição inconsistente do produto no interior do silo pode gerar erros na medição do nível. Dependendo do número de células de carga a ser utilizado (número de pontos de apoio do silo sobre as células de carga), e se o silo tiver somente uma "boca de descarga" (a utilização de base tipo cônicas diminuirá o erro), ou se o silo tiver base chata com várias "bocas de descarga" (caso mais crítico), o erro variará.

ERRO 4

Suporte da estrutura do transportador, apoiado no topo do silo

A maioria dos silos de estocagem tem transportadores apoiados em seu topo. Nestes casos há influência na pesagem quando do processo de carga (vibração, peso provocando um momento na base do silo) e quando o transportador estiver desenegrizado e, ao mesmo tempo, carregado.

ERRO 5

“Stress Térmico” (provocado por mudanças freqüentes de temperatura)

O “stress térmico” induzido na estrutura de sustentação dos silos e tanques, provocando deformações na estrutura de sustentação, gerando tensões sobre a célula de carga e, por consequência, erros de medição.

ERRO 6

Dinâmica de Carga e Descarga

Os efeitos da dinâmica de carga e descarga de produtos granulados em silos de estocagem não são significativos o bastante para serem considerados como fontes de erros de medição (são por natureza transientes).

ERRO 7

Efeitos Eólicos

O efeito dos ventos em grandes silos ou tanques de estocagem, apoiados em estruturas de sustentação (que, por sua vez, estarão apoiadas nas células de carga), poderá ser bastante significativo em algumas aplicações de dispositivos do tipo pesagem, utilizados para medição de nível.

4.11.5 Recomendações para Operação Eficiente

Recomenda-se que as células de carga sejam instaladas protegidas da luz do Sol e com a utilização do maior número de células de carga possível, como forma de garantir boa precisão ao sistema de pesagem.

É imperativo o controle da densidade do produto (ρ) ou das variáveis que possam alterá-la.

4.14 REFERÊNCIAS

1. American Petroleum Institute (API) – RP 550 – Manual on installation of refinery instruments and control systems.
2. American Petroleum Institute (API) – RP 551 – Process measurement instrumentations – Section 3 – Level.
3. ANDREW, W. G. Applied instrumentations in the process industries - Gulf Publishing Company.
4. CONSIDINE, D. M. Process instruments and controls handbook. McGraw-Hill Book Company.
5. GILLUM, D. R. Industrial pressure, level and density measurement – ISA (The Instrumentation, Systems and Automation Society).
6. LIPTÁK, B. G. Instrument engineer's handbook – Chilton.
7. PERRY, R. J.; CHILTON, C. H. Chemical engineer's handbook - McGraw-Hill Book Company.

5

TEMPERATURA

ENGº PEDRO ESTÉFANO COHN

5.1 INTRODUÇÃO

5.1.1 Importância

Junto com a pressão, a vazão e o nível, a temperatura é uma das principais variáveis de processo. Sua medição e controle são de fundamental importância numa vasta gama de aplicações, que abrange desde processos físicos e químicos até a proteção de equipamentos.

5.1.2 Conceitos

Segundo a física clássica, a temperatura quantifica o calor, que é uma forma de energia associada à atividade molecular de uma substância. Quanto maior a agitação molecular, maior a quantidade de calor e maior será a temperatura da substância.

A relação entre a quantidade de calor e a temperatura é dada pela fórmula:

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

onde:

ΔQ = variação da quantidade de calor;

m = massa da substância envolvida;

c = calor específico (característica da substância);

ΔT = variação da temperatura.

As unidades que exprimem a quantidade de calor são a caloria e o B.T.U. (*British Thermal Unit*).

- Uma caloria é a quantidade de calor necessária para elevar um grama de água de 14,5 °C a 15,5 °C.
- Um B.T.U. = 252 cal.

Embora não seja unidade do sistema métrico, o INMETRO permite o emprego da caloria, de uso consagrado.

O B.T.U. ainda é empregado na área de refrigeração.

Um conceito fundamental é que o calor, sendo uma forma de energia, não pode ser criado nem destruído. A energia só pode ser transformada ou conduzida de um ponto para outro. Assim, uma unidade de refrigeração, por exemplo, é uma "bomba de calor" e pode ser representada pelo diagrama mostrado na figura 5.1.

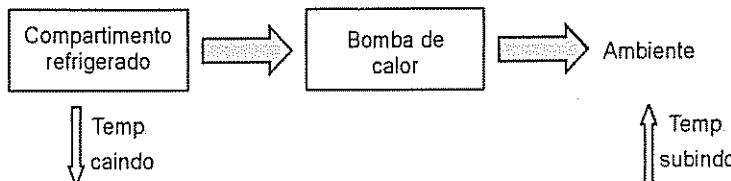


FIGURA 5.1 Conceito de bombeamento de calor.

Uma aplicação prática deste conceito é o condicionador de ar de ciclo reverso, no qual a função de aquecimento é executada invertendo-se a ação da bomba de calor, que passa a transferir calor do meio ambiente externo para o interno.

Toda medição de temperatura é indireta, baseada na alteração de alguma propriedade física de um material, como seu comprimento, volume, resistência elétrica, etc.

5.1.3 Escalas Termométricas

As escalas de medição de temperatura ou escalas termométricas usualmente empregadas são:

- escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$), que tende a se tornar a escala técnica internacional;
- escala Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), ainda em uso em países de língua inglesa;
- escala Kelvin (K), também chamada absoluta ou termodinâmica, empregada nas expressões físicas termodinâmicas.

A temperatura de 0 K corresponde à menor temperatura possível, na qual a agitação molecular cessa ou se torna mínima. É o chamado zero absoluto.

A conversão de escalas pode ser efetuada utilizando-se as seguintes expressões:

$$T \text{ } ^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (T \text{ } ^{\circ}\text{F} - 32)$$

$$T \text{ } ^{\circ}\text{C} = T \text{ K} - 273,16$$

A figura 5.2 apresenta uma visão comparativa das escalas.

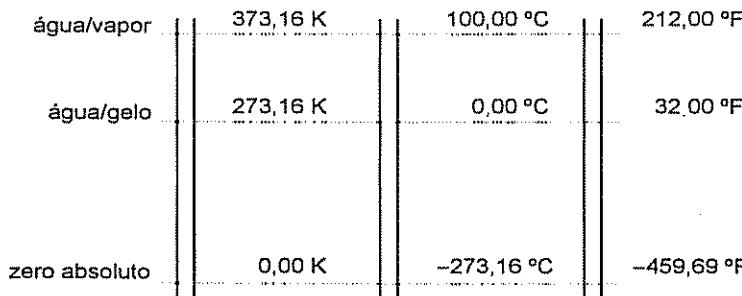


FIGURA 5.2 Comparação entre as escalas termométricas (valores aproximados).

Os padrões de temperatura são baseados em pontos fixos ou primários estabelecidos na Escala Internacional de Temperaturas ou I.T.S. (*International Temperature Scale*), cuja revisão é feita periodicamente, visando sempre obter os valores mais exatos possíveis.

Na área da instrumentação industrial correções da ordem de centésimos não são consideradas.

5.1.4 Especificação do Sistema

A parte crítica da especificação de um sistema para medição de temperatura, dentre os muitos tipos existentes, se concentra na escolha do sensor mais apropriado e do dispositivo de proteção do mesmo.

A escolha do sistema eletrônico (ou eventualmente pneumático) associado é relativamente simples.

Enumeramos, a seguir, os principais fatores técnicos a serem considerados. Além destes, outros podem interferir, como o custo e a padronização da base instalada.

Faixa de Temperatura

Na prática industrial a medição é efetuada numa gama muito extensa, desde temperaturas criogênicas abaixo de -200°C até alguns milhares de graus.

Nenhum sensor individual cobre toda esta gama, e o primeiro critério de escolha será o atendimento à faixa requerida para cada aplicação específica.

A exigência de maior ou menor "rangeabilidade" (capacidade de permitir reconfiguração fácil para outras faixas) será feita em função da probabilidade de alterações posteriores, ou da conveniência de substituição de instrumentos em pontos diferentes.

Precisão e Repetibilidade

Variam bastante, em função do sensor, estando muitas vezes o mesmo tipo disponível com diferentes classes.

Tanto a precisão como a repetibilidade devem atender às necessidades da aplicação, porém a escolha de um sensor que exceda em muito os requisitos exigidos pode elevar desnecessariamente o custo, além de sacrificar outras características.

Proteção

De forma geral, os sensores de temperatura são mecanicamente delicados e incapazes de resistir quando expostos diretamente às condições agressivas de muitos processos.

Por este motivo são protegidos, normalmente, por tubos ou poços. Estes são providos de rosca ou flange para conexão ao processo, e são confeccionados com ligas metálicas ou materiais cerâmicos.

O conhecimento do meio no qual irá operar o sensor, aliado à temperatura de trabalho, permite que se especifique a proteção adequada.

As piores aplicações são as que envolvem temperaturas elevadas em meios agressivos, como ocorre, por exemplo, em gaseificadores de leito fluidizado.

Maiores detalhes serão mostrados no item 5.5.5.

Problemas envolvendo altas temperaturas e meios agressivos podem ser resolvidos pela medição da radiação emitida, sem contato físico direto.

O maior custo destes sistemas é muitas vezes compensado, a médio prazo, pela redução dos custos de reposição dos sensores convencionais.

Tempo de Resposta

Tempo de resposta, T_r , é o tempo que o sensor leva para reagir a uma variação da temperatura do meio que está sendo medido, entrando em equilíbrio com a nova temperatura deste.

Como o sensor se aproxima da nova temperatura de maneira assintótica, é preciso definir o tempo decorrido até podermos considerar, para fins práticos, que as temperaturas do meio e do sensor se igualaram.

Define-se a constante de tempo (τ) do sensor como sendo o tempo que ele leva para atingir 63,2% da variação total, quando submetido a um degrau de variação de temperatura, como na curva da figura 5.3.

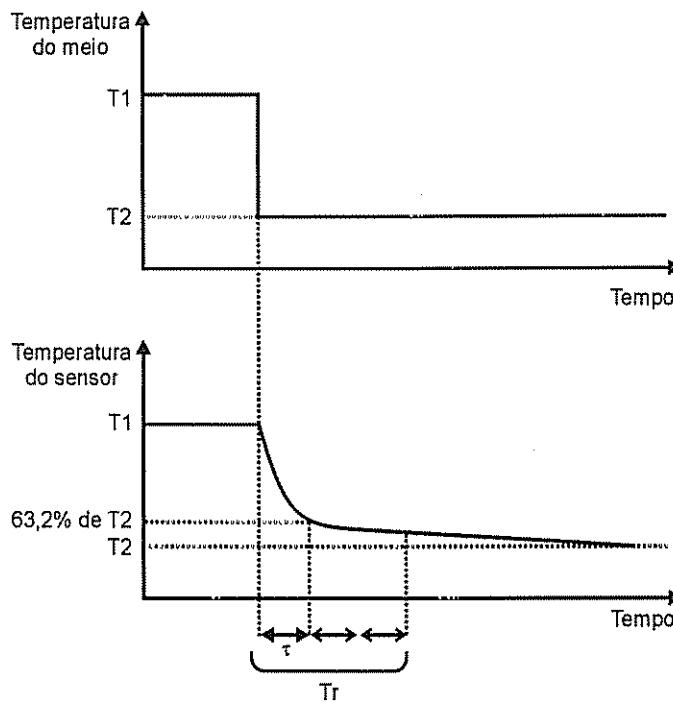


FIGURA 5.3 Representação gráfica do tempo de resposta.

Na prática considera-se $T_r = 3 \cdot \tau$.

Se considerarmos apenas o princípio físico de operação do sensor, este deveria, na maior parte dos casos, apresentar resposta praticamente imediata. Ocorre, porém, que o sistema sofre a influência da massa do sensor e do poço de proteção.

Quanto maior a massa do sensor, maior o tempo decorrente, até que ele entre em equilíbrio térmico com o meio.

Pequenos sensores, com massas às vezes da ordem de miligramas, são extremamente rápidos, mas geralmente de grande fragilidade elétrica e mecânica.

A proteção exerce grande influência sobre o tempo de resposta, devido à massa e condutibilidade térmica da mesma e à resistência térmica de contato entre o sensor e a proteção.

Um sensor montado em um poço poderá ter um tempo de resposta várias vezes maior do que se estivesse exposto, o que é geralmente impraticável.

Maiores detalhes serão analisados quando do estudo dos termopares (item 5.5).

5.2 INDICADORES DE TEMPERATURA

Os indicadores não são instrumentos de medição, mas têm usos importantes na indústria.

5.2.1 Indicadores Cromáticos

Os indicadores cromáticos, aplicáveis somente aos corpos sólidos, compreendem uma família de produtos químicos (usualmente sais de níquel, cobalto, cromo e cristais líquidos) que sofrem alterações marcantes na sua coloração quando atingem uma determinada temperatura.

Estes produtos são incorporados a *crayons* ou tintas com as quais se marca ou reveste o corpo cuja temperatura deve ser determinada, e também a etiquetas.

A mudança da cor é dependente também do tempo, o que requer do operador certa prática na interpretação.

Os indicadores cromáticos estão disponíveis na faixa de aproximadamente 50 °C a 1300 °C e, corretamente usados, permitem muitas vezes avaliar a temperatura com erro menor que ± 10 °C.

Uma aplicação interessante é a pintura de reatores ou colunas que apresentam periculosidade no caso de uma elevação excessiva da temperatura.

A alteração da cor, que deve-se dar a uma temperatura bem abaixo da temperatura de risco, permite que as pessoas envolvidas com a operação e com a segurança industrial, mesmo à distância e sem acesso direto à instrumentação, percebam situações anormais a tempo de tomar providências.

Quando se pretende aplicar estes produtos em ambientes poluídos, o fabricante deve ser consultado com relação à sua vida útil e quanto à possibilidade do indicador sofrer contaminação. Nesses casos, o conhecimento da natureza dos poluentes e de seus níveis aproximados de concentração é fundamental, existindo analisadores que permitem a obtenção destas informações.

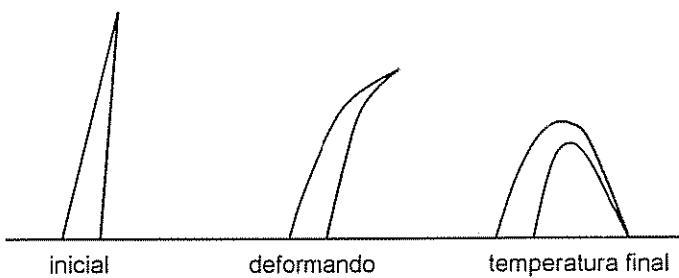
5.2.2 Indicadores Pirométricos

São pequenos dispositivos termomecânicos descartáveis, que indicam a temperatura pela sua deformação.

Empregados principalmente na indústria cerâmica e em alguns processos de tratamento térmico, um tipo usual se apresenta como um cone que se deforma com a temperatura.

A "leitura" é efetuada quando o vértice do cone atinge o nível da base, conforme mostrado na figura 5.4.

FIGURA 5.4 Indicadores pirométricos



Estes indicadores estão disponíveis para temperaturas na faixa de 600 °C a 2000 °C, e o erro pode ser menor que $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Existe, como no caso dos cromáticos, a dependência do tempo e, por isso, eles só se prestam à determinação de uma temperatura final e não de valores intermediários.

Outro dispositivo desta classe é o "plugue metálico pirométrico", cuja dureza é alterada de forma permanente em função da temperatura à qual é submetido.

O "plugue" é embutido em locais de difícil acesso, como partes internas de máquinas e motores, e analisado posteriormente com um durômetro.

5.3 MEDIDORES TRADICIONAIS

5.3.1 Termômetros Bimetálicos

Quando uma lâmina de metal é aquecida, a dilatação provoca o aumento de seu comprimento. Conjugando-se mecanicamente duas lâminas de metais ou ligas de diferentes coeficientes de dilatação, como na figura 5.5, o conjunto sofrerá uma deformação diretamente proporcional ao quadrado do comprimento e à temperatura, e inversamente proporcional à espessura das lâminas.

A maior sensibilidade é conseguida com lâminas de coeficientes de dilatação bem diversas. É comum o uso do invar, liga ferro/níquel de baixíssimo coeficiente, em conjunto com uma liga de alto coeficiente de dilatação.

FIGURA 5.5 Um bimetal.

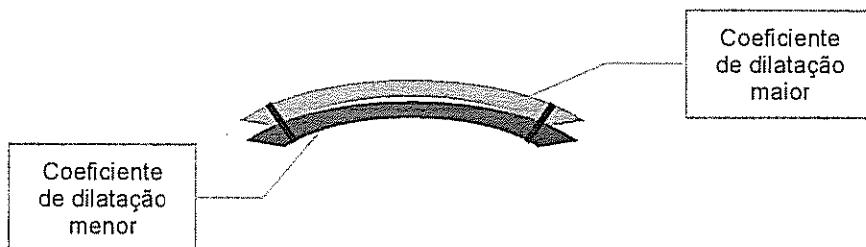


FIGURA 5.5 Um bimetal.

O termômetro bimetálico é muito usado para medição de temperaturas no campo. O sensor é enrolado na forma de espiral e acondicionado em um tubo protetor ou poço acoplado ao processo por meio de rosca ou flange.

O movimento provocado pela dilatação desigual das lâminas é transmitido a um ponteiro que se desloca sobre uma escala, como nas figuras 5.6a e 5.6b.

Estes termômetros são apenas indicadores locais, desprovidos de facilidades para transmissão de sinal, e, portanto, não permitem leitura remota ou fechamento de malhas de controle.

De baixo custo, são fabricados cobrindo faixas diferentes, dentro dos limites aproximados de -50°C a $+500^{\circ}\text{C}$, com precisões que atingem $\pm 1\%$.

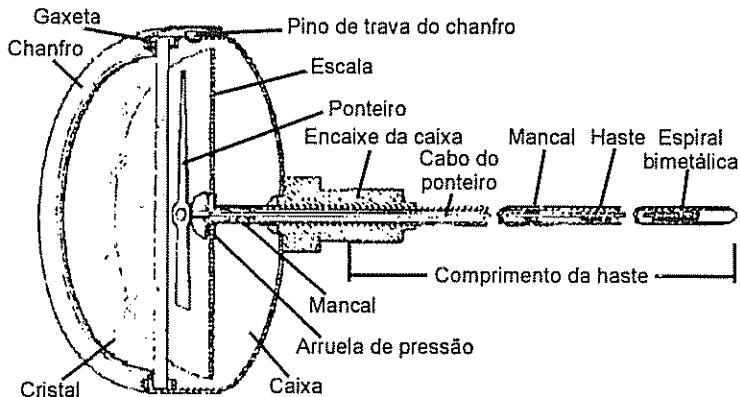


FIGURA 5.6a Construção do termômetro bimetálico.

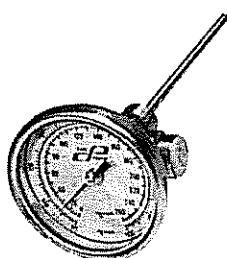


FIGURA 5.6b Aspecto de um termômetro bimetálico. Cortesia: Cole Parmer.

Os termômetros bimetálicos são normalmente instalados no ambiente, sendo a escala, o ponteiro e o mecanismo de acoplamento do mesmo protegidos por um invólucro hermético, denominado caixa do termômetro. O visor é vedado por uma gaxeta.

Para montagem em ambientes agressivos encontram-se disponíveis termômetros com caixas em inox.

A fim de facilitar a visualização, dependendo da posição de instalação, existem modelos de haste angular, e outros que permitem a inclinação variável da caixa em relação à haste.

Além das aplicações na medição, os elementos bimetálicos ainda são muito usados na construção de termostatos, dispositivos que ligam ou desligam um circuito elétrico em função da temperatura.

Encontram-se termostatos em muitos aparelhos eletrodomésticos e na proteção térmica de motores, embora venham sendo gradativamente substituídos por sensores, associados a circuitos eletrônicos, hoje de baixo custo.

5.3.2 Termômetros de Haste de Vidro

São bem conhecidos os termômetros clínicos e de laboratório, nos quais o líquido contido em um bulbo, ao se dilatar com o calor, sobe em um tubo capilar graduado.

Eles são também fabricados para uso industrial, sendo, neste caso, o bulbo protegido por um poço, usualmente de inox, provido de rosca ou flange para conexão ao processo. O capilar é encerrado em uma caixa com um visor, como na figura 5.7.

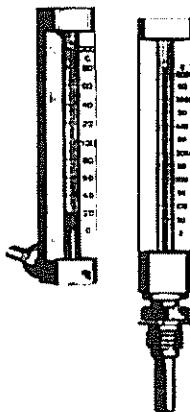


FIGURA 5.7 Termômetros de haste de vidro.

Ainda é usado o mercúrio, embora cada vez mais sujeito a restrições, além de alguns produtos orgânicos como os álcoois, aos quais se adiciona um corante para melhor visibilidade.

Os limites práticos de utilização são da ordem de -150°C a $+350^{\circ}\text{C}$, podendo atingir precisão de $\pm 0,5\%$.

Os termômetros de haste são apenas indicadores locais, e, como os bimetálicos, não permitem leitura remota, nem fornecem sinal para sistemas de controle.

No passado chegaram a ser fabricados tipos com contatos móveis ou sistemas de captação fotoelétricos ou indutivos, para ligação com controles, mas devido à fragilidade e complexidade e ao custo elevado eles foram substituídos por outros tipos de sensores.

5.3.3 Sistemas de Bulbo-Capilar

Também chamados sistemas de bulbo cheio, constam de um pequeno reservatório metálico, o bulbo, conectado por meio de um capilar a um tubo Bourdon similar ao dos manômetros.

A indicação resulta da dilatação do fluido contido no bulbo e no capilar, e do consequente aumento da pressão no tubo Bourdon.

Um instrumento simples é o da figura 5.8

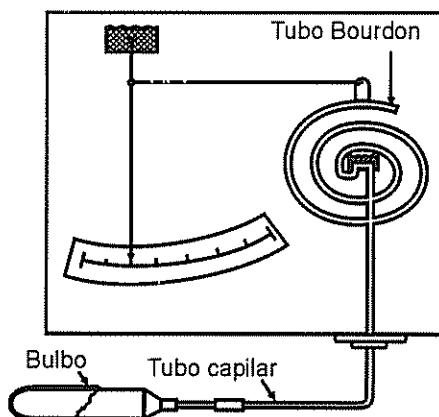


FIGURA 5.8 Termômetro bulbo-capilar.

É empregada a classificação SAMA (*Scientific Apparatus Makers Association – USA*), resumida na tabela 5.1, na qual também são apresentados os limites de temperatura aplicáveis, a linearidade e a precisão.

TABELA 5.1
Classificação SAMA de Sistemas de Bulbo-Capilar

Classificação SAMA	Fluido de preenchimento	Limites de operação aprox.	Linearidade	Precisão típica (fim de escala)
I	Líquido	-100 a +300 °C	Boa exc. baixas temp.	1%
II	Vapor	-200 a +300 °C	Não linear	1%
III	Gás	-260 a +760 °C	Boa exc. baixas temp.	1%
V	Mercúrio*	-40 a +600 °C	Boa	1%

* O mercúrio sofre restrições por ser muito tóxico. A classe IV não existe.

A classificação SAMA inclui ainda uma letra que sucede o número romano, e indica a faixa de operação em relação à temperatura ambiente. A tabela 5.2 apresenta esta codificação.

TABELA 5.2
Classificação SAMA de Faixa de Operação em Relação à Temperatura Ambiente

LETRA	FAIXA DE OPERAÇÃO
A	Apenas temperaturas acima da faixa ambiente.
B	Apenas temperaturas abaixo da faixa ambiente.
C	Temperaturas acima e abaixo da faixa ambiente.
D	Temperaturas acima e abaixo da faixa ambiente e incluindo a mesma

A compensação do efeito da temperatura ambiente sobre o tubo Bourdon (contido na caixa) e sobre o capilar pode ser necessária. Esta compensação é dita plena quando realizada sobre ambos.

Os sensores classe II não requerem compensação.

Os de classe IA, IIIA e VA necessitam compensação plena.

Os de classe IB, IIIB e VB operam apenas com compensação da caixa.

A compensação da caixa (Bourdon) é normalmente feita inserindo-se um elemento bimetálico no acoplamento com o ponteiro ou acionamento do transmissor. A compensação do capilar emprega um segundo Bourdon ligado a um capilar sem bulbo, sendo o movimento resultante o diferencial mecânico entre os Bourdons.

Por questões construtivas, o comprimento máximo do capilar é da ordem de 30 metros, na maioria dos sistemas.

Em alguns casos, a elevação do sensor em relação à caixa (*head effect*) poderá afetar a medição. Este efeito é inexistente na classe III e, geralmente, é desprezível na classe V até uns 10 metros de desnível, mas pode ser significativo nas classes I e II.

Como a deformação do Bourdon é proporcional à diferença entre as pressões interna e externa, a alteração da pressão barométrica pode alterar ligeiramente a resposta dos sistemas. Isto ocorre nas classes II e III, sobretudo quando operam com faixas muito expandidas. Este efeito, normalmente, não é compensado automaticamente.

Os sistemas de bulbo-capilar são ainda empregados em alguns setores industriais, devido à sua simplicidade, robustez e custo relativamente baixo, sendo facilmente acoplados a transmissores eletrônicos ou pneumáticos. A tendência, porém, é a sua substituição gradativa por sensores eletrônicos.

O bulbo-capilar também é utilizado em termostatos, para acionamento de sistemas de aquecimento e refrigeração.

5.4 TERMÔMETROS DE RESISTÊNCIA

Quase todos os materiais condutores elétricos apresentam uma dependência entre a resistência e a temperatura. Este fenômeno permite seu emprego como sensores.

5.4.1 Bulbos de Resistência de Fio Metálico

São também conhecidos como R.T.D. (*Resistance Temperature Detectors* ou detectores de temperatura a resistência).

Para uso industrial são usados sensores com fios de platina, níquel, cobre e também de uma liga de 70% Ni/30% Fe, registrada comercialmente com o nome "Balco". Eventualmente, em lugar do fio pode ser usada uma fita ou um filme metálico depositado num substrato isolante.

A variação da resistência com a temperatura é regida pelas equações de Callendar e Van Dusen:

De -200 °C a 0 °C

$$R_t = R_0 [1 + AT + BT^2 + CT^3 (T - 100)],$$

De 0 °C a 630 °C

$$R_t = R_0 [1 + AT + BT^2].$$

onde:

R_t = resistência em ohms na temperatura T (°C);

R_0 = resistência em ohms na temperatura de referência;

A, B, C = constantes do material.

O coeficiente de variação da resistência com a temperatura, β , é dado pela expressão :

$$\beta = (R_t - R_0) / R_0 \cdot T.$$

O sensor Pt 100

Assim chamado por possuir elemento de platina e resistência padronizada de 100 Ω a 0 °C, o Pt 100 é o termo resistor mais empregado em todo o mundo, devido à sua estabilidade, repetibilidade, precisão e ampla faixa de operação.

Seu custo é praticamente igual ou até inferior ao dos sensores de metais menos nobres, o que se explica pela elevada quantidade fabricada e pelo custo relativamente baixo do material quando comparado ao valor agregado pela sua purificação, montagem e controle de qualidade.

Nos sensores Pt 100 de uso industrial, o fio é disposto sobre um suporte isolante de vidro ou cerâmica, e encapsulado com os mesmos materiais, como na figura 5.9, sendo depois acondicionado em um poço.

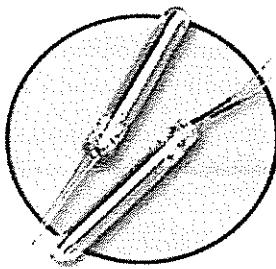


FIGURA 5.9 Sensores Pt 100.

A curva do sensor Pt 100 e os limites permisíveis de erro são fixados por normas.

Para sensores de classe B:

$$\text{Erro máximo} = \pm [0,3 + 0,005 T] ^\circ\text{C}.$$

Para sensores de classe A:

$$\text{Erro máximo} = \pm [0,15 + 0,002 T] ^\circ\text{C}.$$

Exemplo: para um sensor de classe A operando a 380°C , o erro máximo será:

$$\pm [0,15 + (0,002 \cdot 380)] = \pm 0,91 ^\circ\text{C}.$$

Isto corresponde, aproximadamente, a $\pm 0,24\%$ do valor lido, o que pode ser considerado excelente.

Encontram-se sensores Pt 100 para operar na faixa de -250°C até uns 850°C . Para aplicações acima de 600°C , deve ser consultado o fabricante com relação ao erro e à possível redução da vida útil do sensor.

Como qualquer termorresistor, o Pt 100 trabalha associado a circuitos que convertem a sua variação de resistência em leitura de temperatura e/ou sinal padronizado (4-20 mA, HART, Field-Bus, etc.), além de garantir que a corrente no sensor seja suficientemente pequena para que seu auto-aquecimento seja desprezível.

Estes circuitos encontram-se nos transmissores e conversores de temperatura fornecidos por muitos fabricantes. Embora não haja necessidade de nos preocuparmos com eles, devemos se conhecer as opções de conexão entre o sensor e o transmissor/conversor.

A conexão a dois fios está representada na figura 5.10.

O sistema deverá ser calibrado para compensar o termo $R_{c1} + R_{c2}$, e esta calibração sofrerá alteração se for alterado o material ou o comprimento do cabo.

Esta situação é praticamente inadmissível em termos de custos de comissionamento e de manutenção racional.

Existe, além disso, a possibilidade de erros, devido à variação de R_{c1} e R_{c2} com a temperatura ambiente.

Na conexão a três fios, mostrada na figura 5.11, a configuração do circuito do transmissor é tal que, para fins de medição, ele "enxerga" uma resistência $R_t = R_1 - R_2$.

Desta maneira, sendo $R_{c1} = R_{c2} = R_{c3}$, o efeito das resistências dos fios é cancelado.

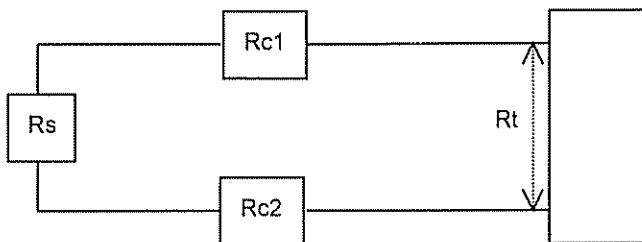


FIGURA 5.10 Conexão a dois fios.

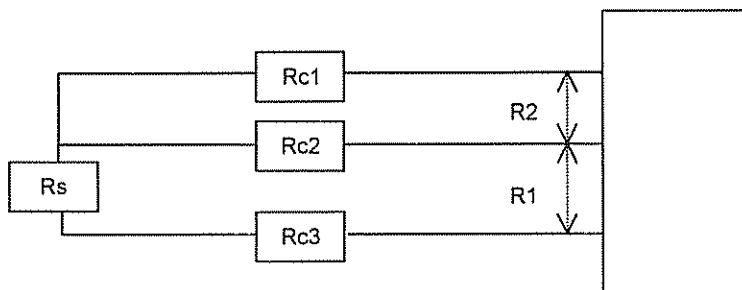


FIGURA 5.11 Conexão a três fios.

A conexão a três fios é muito utilizada e é sujeita apenas a pequenos erros devidos à desigualdade dos condutores do cabo.

A conexão a quatro fios, mostrada na figura 5.12, torna a medição independente do cabo, mesmo que seus condutores sejam desiguais.

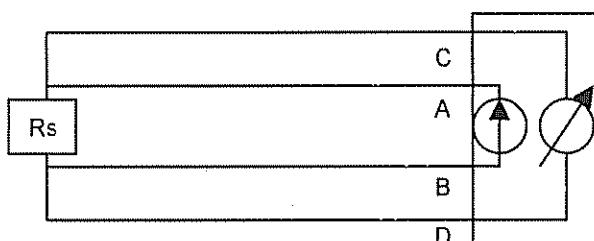


FIGURA 5.12 Conexão a quatro fios.

O termorresistor é alimentado pelos terminais A e B, conectados a um circuito que mantém a corrente constante, qualquer que seja (dentro de certos limites) a resistência dos condutores ligados a estes terminais.

A tensão desenvolvida no sensor é medida entre os terminais C e D por um circuito de alta impedância, tornando a queda ôhmica nos condutores a eles ligados totalmente desprezível.

Conhecidas a corrente e a tensão em R_s , pela lei de ohm o instrumento determina sua resistência e, portanto, a temperatura.

Este método era restrito às medições em laboratório, devido à sua complexidade e à necessidade de cálculos.

Os modernos transmissores, de custo acessível e dotados de circuitos que efetuam todas as operações necessárias, vêm tornando a medição a quatro fios relativamente usual nas indústrias.

Além das vantagens já citadas do Pt 100, não se deve desprezar a vantagem proporcionada por um sensor padronizado internacionalmente, e, portanto, isento de problemas de reposição.

Mesmo fora da área específica da termometria, existem inúmeros equipamentos que utilizam sensores de temperatura auxiliares, com a finalidade de efetuar compensações de erros ou detectar sobreaquecimentos.

Muitos destes equipamentos foram sucateados ou operam precariamente, devido à impossibilidade de obtenção de sensores "especiais" para reposição.

Quando o sensor for um Pt 100 ou um termopar padronizado (vide item 5.5), jamais haverá problemas desta natureza.

Termorresistores de platina Pt 500 e Pt 1000 são também normalizados, mas menos usuais.

5.4.2 Termistores

Os termistores são confeccionados com materiais semicondutores, usualmente óxidos de níquel, manganês, cobalto e outros, que apresentam grande variação da resistência elétrica com a temperatura, numa faixa que se estende aproximadamente de -100 °C a +300 °C. Alguns são vistos na figura 5.13.

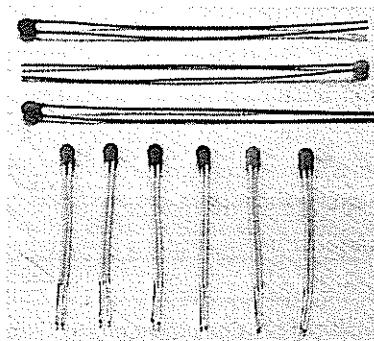


FIGURA 5.13 Termistores.

Embora empreguem materiais semicondutores, não apresentam junções P-N e, portanto, não têm polaridade.

A maioria dos termistores são de coeficiente térmico negativo (NTC – *Negative Thermal Coeficient*), significando que a resistência decresce com o aumento da temperatura. São também fabricados os P.T.C., de característica oposta.

Na prática, podem-se distinguir dois grupos de termistores. O primeiro comprehende tipos de baixa precisão (5 a 10%) e baixo custo, robustos, empregados em medições grosseiras e na proteção térmica.

Aplicações típicas são a indicação e o alarme de temperatura em veículos, e a proteção de motores e semicondutores de potência em circuitos eletrônicos.

No segundo grupo estão os termistores de precisão (até 0,05 °C), eventualmente usados na medição direta, principalmente em laboratório e como sensores auxiliares de compensação de temperatura em instrumentos diversos.

Apesar de fabricados desde a década de 80, e de sua tecnologia ter evoluído bastante, persistem alguns problemas de produção, o que torna os termistores de precisão relativamente caros.

Sua não linearidade exige o uso de circuitos adequados, e normalmente limita a aplicação a faixas estreitas de temperatura.

A relação entre a resistência e a temperatura é obtida das curvas fornecidas pelos fabricantes, e segue aproximadamente a relação:

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

onde:

R = resistência na temperatura T (K);

R_0 = resistência na temperatura de referência T_0 (K);

e = base dos logaritmos neperianos = 2,718;

k = constante do material (válida numa faixa estreita de temperaturas).

As curvas mostradas na figura 5.14 permitem uma comparação da variação de resistência e da linearidade de um Pt 100 com um termistor.

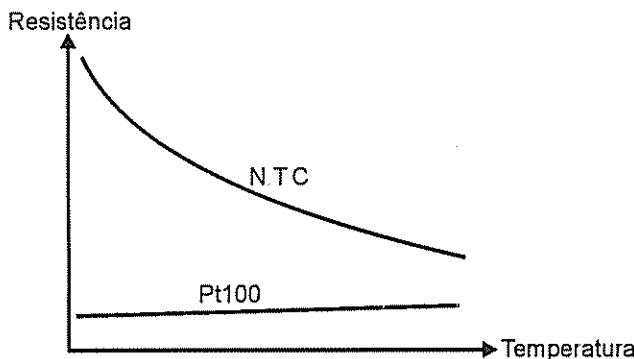


FIGURA 5.14 Comportamento de um N.T.C. e de um Pt 100.

A faixa de temperatura do gráfico é de -100°C a $+300^{\circ}\text{C}$, e os valores de resistência são da ordem de $100\ \Omega$ para o Pt 100 e de alguns $\text{K}\ \Omega$ para o termistor, no caso um N.T.C.

A inexistência de qualquer tipo de normalização de aceitação generalizada, torna problemática a reposição dos termistores.

Os circuitos associados são projetados individualmente, em função do termistor empregado, e não existem no mercado transmissores/conversores de temperatura "universais" para eles, como ocorre para os sensores Pt 100 e para os termopares.

Os termistores são frágeis, exigindo o uso de proteções (vide 5.5.5).

5.5 TERMOPARES

Apesar da crescente aplicação do Pt 100 nas medições de temperatura, os termopares continuam sendo os sensores mais empregados nas aplicações industriais.

Sua confiabilidade, baixo custo e padronização, aliadas à precisão, estabilidade e repetibilidade satisfatórias, na maioria dos casos, justifica esta preferência. Além disso, abrangem uma grande faixa de temperaturas.

5.5.1 Princípios

Os fenômenos termoelétricos envolvidos na operação dos termopares compreendem os efeitos Seebeck, Peltier e Thomson.

Efeito Seebeck

T. J. Seebeck descobriu que em um circuito formado por dois fios condutores de metais diferentes, circula corrente se as duas junções ou juntas J1 e J2 forem mantidas à temperaturas diferentes, T1 e T2, e que esta corrente será diretamente proporcional à diferença entre as temperaturas. Ao sistema assim formado, representado na figura 5.15, damos o nome de par termoelétrico ou termopar.

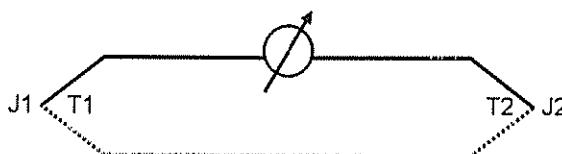


FIGURA 5.15 Um termopar.

A corrente é provocada por uma diferença de potencial, da ordem de milivolts, que também pode ser medida.

Se mantivermos uma das junções uma temperatura constante e conhecida, através da diferença de potencial podemos conhecer a temperatura da outra junção.

A junção mantida à temperatura constante é chamada de **junção de referência** ou **junta fria**, a outra junção é a chamada **junta quente**.

Esta nomenclatura se origina no fato de a maioria das aplicações envolverem medições feitas à temperaturas superiores à ambiente, embora o princípio seja usado também para medição de temperaturas inferiores à de referência, e até criogênicas.

Efeito Peltier

É praticamente complementar ao efeito Seebeck. Quando um circuito contendo duas junções, inicialmente à mesma temperatura, é percorrido por uma corrente, em decorrência da conexão de uma fonte externa, ocorre o aquecimento de uma junção e o resfriamento da outra, conforme mostrado na figura 5.16.

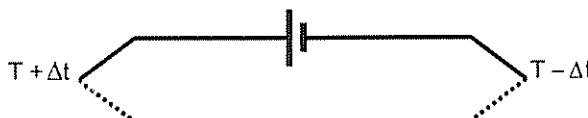


FIGURA 5.16 O efeito Peltier.

O circuito efetivamente bombeia o calor de uma junção para a outra.

O efeito Peltier se sobrepõe ao efeito Joule (aquecimento devido à circulação de corrente em um circuito resistivo), que está sempre presente.

Quando as junções são de metais comuns, o efeito Peltier é perceptível apenas em condições de laboratório.

Semicondutores especiais elevam seu rendimento, tornando-o viável em aplicações de refrigeração de certa sofisticação e de baixa potência.

Casos típicos, além do uso militar e espacial, são resfriadores de lâminas em microscopia e de espelhos em medidores de ponto de orvalho.

A remoção da umidade de gases, por condensação, usual no condicionamento de amostras para analisadores, também utiliza resfriadores termoelétricos, como o da figura 5.17, conhecidos como "blocos Peltier".

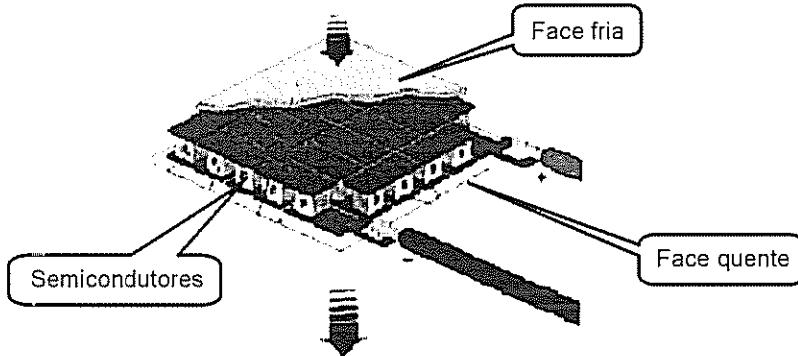


FIGURA 5.17 Um bloco Peltier.

Apesar do custo elevado e do baixo rendimento, estes dispositivos já encontram algumas aplicações no mercado consumidor, como em geladeiras para acampamentos.

Efeito Thomson

Ao longo dos fios de um termopar, na ausência de corrente, a condução do calor causa um gradiente uniforme de temperatura.

Thomson deduziu que, ao circular corrente pelo termopar, a temperatura em diferentes pontos dos condutores assume valores não justificáveis pelo efeito Joule, e estabeleceu as equações que regem o fenômeno, que é dependente da natureza dos metais.

LEIS BÁSICAS

Como consequência dos efeitos Seebeck, Peltier e Thomson, foram formuladas três leis práticas, que regem o uso dos termopares na medição da temperatura.

1 – Lei do Circuito Homogêneo

A força eletromotriz (F.E.M.) que se desenvolve em um circuito que apresenta juntas quente e fria à temperaturas determinadas T_1 e T_2 , depende somente dos metais ou ligas que compõem os condutores e das temperaturas T_1 e T_2 .

Quaisquer temperaturas às quais estiverem sujeitas outras regiões dos condutores, não têm influência sobre a F.E.M.

Esta lei garante que, na medição, não há influência da temperatura ao longo dos fios dos termopares.

2 – Lei dos Condutores Intermediários

A soma algébrica das F.E.M. em um circuito composto por um número n qualquer de condutores de materiais diferentes é zero, se todas as junções estiverem à mesma temperatura.

Consequências práticas importantes desta segunda lei são vistas no diagrama da figura 5.18.

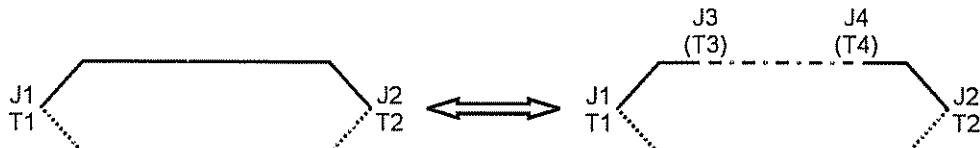


FIGURA 5.18 As F.E.M. serão iguais se $T_3 = T_4$.

Também na figura 5.19, se $T_1 = T_3 = T_4$, não haverá influência sobre a medição.

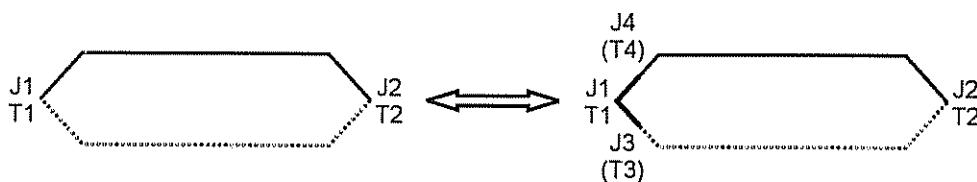


FIGURA 5.19 As F.E.M. serão iguais se $T_1 = T_3 = T_4$.

Uma consequência da lei dos condutores intermediários é que podemos aterrurar uma junta a um poço metálico, sem alterar a medição, como na figura 5.20.

O trecho do poço situado entre os fios do termopar age como condutor intermediário.

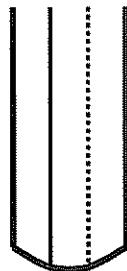


FIGURA 5.20 Termopar com junta aterrada no poço.

Um termopar com junta aterrada no poço apresenta excelente tempo de resposta, mas pode gerar um problema sério.

A boa prática de engenharia recomenda nunca aterrurar uma malha de instrumentação em mais de um ponto, pois como provavelmente os *potenciais de terra* não serão iguais nos dois pontos, circulará uma corrente devido a esta diferença de potencial, o que provocará interferência no sinal.

Como a malha é sempre aterrada na sala de controle, na junta teremos um segundo ponto de aterramento.

Este problema pode ser evitado com o uso de isoladores galvânicos.

3 – Lei da Soma das F.E.M.

Esta é ilustrada pelo diagrama mostrado na figura 5.21, sendo válida para qualquer número de termopares.

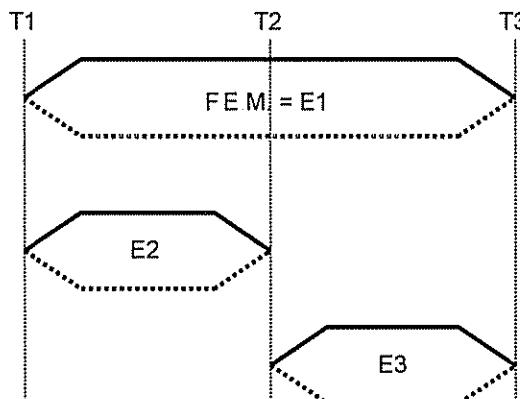


FIGURA 5.21 Sendo os três termopares iguais, tem-se $E1 = E2 + E3$.

A Força Eletromotriz e a Temperatura

Potência termoelétrica, P.T., não é na verdade uma potência, e sim o número de milivolts gerado pelo termopar, para uma dada diferença de temperaturas entre as juntas quente e fria (ΔT). É usual se expressar a potência termoelétrica em mV/100 °C.

A função F.E.M. (ou tensão) x temperatura não é linear, sendo expressa por uma equação do tipo:

$$\text{F.E.M.} = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + \dots$$

onde A, B, C, D são constantes dependentes dos materiais utilizados.

Por este motivo, a P.T. não é constante e será dada pela inclinação da tangente à curva no ponto considerado.

Quando é dada a P.T. de um termopar, é considerado o valor médio da mesma, na faixa de utilização.

Sendo os termopares padronizados, encontram-se tabelados os valores da F.E.M. em função da temperatura, considerando-se que a junta de referência esteja a 0 °C.

5.5.2 Associação de Termopares

Os termopares podem ser associados de três maneiras. Normalmente, só são associados termopares do mesmo tipo.

Associação em Série – Figura 5.22

A F.E.M. da associação em série, mostrada na figura 5.22, será a soma das F.E.M. de cada termopar, ou seja:

$$E = E_1 + E_2 + E_3$$

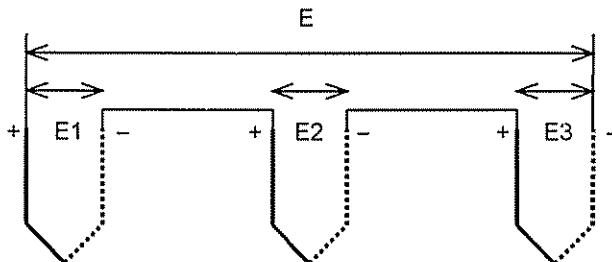


FIGURA 5.22 Associação em série.

Este tipo de associação proporciona maior sensibilidade, multiplicando a P.T. de um termopar pelo número de termopares.

Alguns detectores de energia radiante de alta sensibilidade empregam pequenos termopares associados em série, unidos à superfície de um "corpo negro" que absorve a energia, convertendo-a em calor.

Associação em Oposição – Figura 5.23

Também chamada de ligação diferencial, é similar à associação em série, porém, os termopares são conectados em oposição de polaridade, conforme mostrado na figura 5.23.

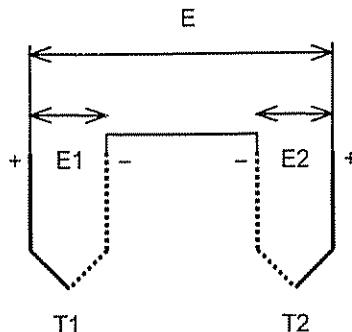


FIGURA 5.23 Associação em oposição.

Na associação em oposição temos: $E = E_1 - E_2$.

Mantidas as juntas frias à mesma temperatura, quando:

$$T_1 = T_2 \Rightarrow E = 0$$

Nos casos de alteração de $T_1 > T_2$ para $T_1 < T_2$, teremos inversão de polaridade na saída da associação.

Esta ligação é útil para medir a diferença de temperatura entre dois pontos ou para, associada a um sistema de controle, manter duas temperaturas iguais, ou com um diferencial constante.

Associação em Paralelo – Figura 5.24

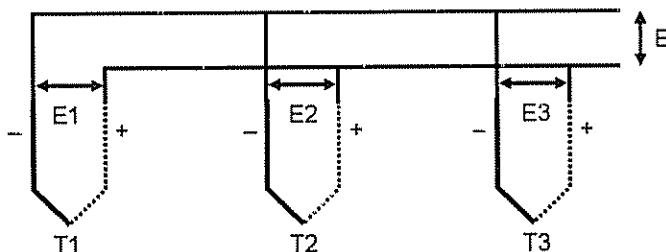


FIGURA 5.24 Associação em paralelo.

Na associação em paralelo, sendo os termopares iguais, temos $E = (E_1 + E_2 + E_3)/3$.

A F.E.M. da associação é a média das F.E.M. dos termopares e corresponde à média das temperaturas T1, T2 e T3.

Com a versatilidade apresentada pelos sistemas digitais, em lugar de associar os termopares no campo, a configuração desejada é programada na sala de controle.

5.5.3 Tipos de Termopares

Os termopares usuais são padronizados e designados por meio de um código alfabético.

Na relação que segue empregamos um sistema de abreviação de materiais e polaridade, conforme o exemplo:

Mat.: Pt-Rh30 / Pt-Rh6 (-)

Trata-se de um termopar cujo elemento positivo é uma liga de 70% de platina e 30% de rhódio, e cujo elemento negativo (-) é uma liga de 94% de platina e 6% de rhódio.

Quando a liga possui uma denominação técnica (nome), o mesmo precede a composição.

A abreviação "Ident." indica um modo prático de se identificar os condutores do termopar.

Usamos a sigla A.P.O.E. para designar "atmosfera permissível para operação exposta".

As faixas de temperatura apresentadas são apenas aproximadas, e seus limites máximos dependem da vida útil desejada, da margem de segurança adotada e do diâmetro dos fios empregados na fabricação do termopar. Apresentam-se, a seguir, as de uso mais comum.

O limite máximo de temperatura recomendado pelos fabricantes depende da bitola dos condutores. A tabela 5.3 é um exemplo para termopares do tipo K.

TABELA 5.3
Bitolas de Condutores

Bitola	8 A.W.G. $\varnothing = 3,26 \text{ mm}$	14 A.W.G. $\varnothing = 1,63 \text{ mm}$	20 A.W.G. $\varnothing = 0,81 \text{ mm}$	24 A.W.G. $\varnothing = 0,51 \text{ mm}$
Temp. máx.	1260 °C	1090 °C	980 °C	870 °C

Segue uma relação dos termopares padronizados.

Termopar Tipo B

Mat.: Pt-Rh30/Pt-Rh6 (-).

Ident.: (-) é mais duro.

P.T. média: 1,05 mV/100 °C.

Faixa: 600 °C a 1700 °C.

A.P.O.E.: inerte ou fracamente oxidante.

Obs.: Menor deriva e maior resistência mecânica que os tipos S e R, a altas temperaturas.

Termopar tipo E

Mat.: Cromel (Ni-Cr10)/Constantan (Cu-Ni42) (-).

Ident.: (+) é mais duro.

P.T. média: 7,64 mV/100 °C.

Faixa: 0 °C a 750 °C.

A.P.O.E.: inerte e oxidante.

Obs.: Maior deriva que outros de metais não nobres. Eventualmente usado abaixo de 0 °C.

Termopar tipo J

Mat.: Fe/Constantan (Cu-Ni42) (-).

Ident.: (+) é magnético (atraído por um imã).

P.T. média: 5,65 mV/100 °C.

Faixa: 0 °C a 750 °C.

A.P.O.E.: inerte ou redutora.

Obs.: Baixo custo.

Termopar tipo K

Mat.: Cromel (Ni-Cr10)/Alumel (Ni95,4-Mn1,8-Si1,6-Al1,2) (-).

Ident.: (-) é levemente magnético.

P.T. média: 4,05 mV/100 °C.

Faixa: 0 °C a 1200 °C.

A.P.O.E.: inerte e oxidante.

Obs.: Mais utilizado na parte superior da faixa. Muito sensível ao SO₂ e ao H₂S; deve ser bem protegido na presença destes gases. Custo geralmente maior que o dos tipos T e J. Eventualmente usado abaixo de 0 °C.

Termopar tipo R

Mat.: Pt-Rh13/Pt (-).

Ident.: (+) é mais duro.

P.T. média: 1,16 mV/100 °C.

Faixa: 0 °C a 1500 °C.

A.P.O.E.: inerte e oxidante.

Obs.: Fabricado com pequenas dimensões e resposta rápida. Custo maior que o dos tipos K e N.

Termopar tipo S

Mat.: Pt-Rh10/Pt (-).

P.T. média: 1,04 mV/100 °C.

Obs.: Demais características similares ao tipo R. Muito usado em sensores descartáveis.

Termopar tipo T

Mat.: Cu/Constantan (Cu-Ni42) (-).

Ident.: (+) é mais avermelhado (cor do cobre).

P.T. média: 5,14 mV/100 °C.

Faixa: -200 °C a +350 °C.

A.P.O.E.: inerte, oxidante e redutora.

Obs.: Sensível à oxidação em temperaturas acima de 300 °C.

Além destes, alguns outros merecem citação.

Tipo N

De desenvolvimento relativamente recente, mas de desempenho comprovado, é similar ao tipo K, com ligeiras alterações na composição das ligas, denominadas nicrosil e nissil. Proporciona maior estabilidade e vida útil que o tipo K.

Tipo Y

É similar ao tipo J, com alteração nas proporções da liga de Constantan. Pode operar a temperaturas superiores às toleradas pelo tipo J. Não é padrão industrial.

Ligas Tungstênio-Rhenio

São termopares de custo elevado que permitem operação contínua até cerca de 2300 °C e intermitente até cerca de 2800 °C.

Termopar Cobre/Ouro-Cobalto

Também de custo elevado, sua principal aplicação é na medição de temperaturas criogênicas em laboratório.

Termopar Ouro-Ferro/Cromel

Permite medições até próximo de 0 K (zero absoluto).

5.5.4 Limites de Erro

Erro de um termopar é o máximo desvio permitido. Os desvios permissíveis são estabelecidos por normas, sendo usual adotarmos a A.N.S.I.

O erro é especificado diretamente em temperatura, ou como desvio percentual do **valor lido**, estando a junta de referência a 0 °C. Quando assinalado de ambas as formas, deve ser considerado o **maior valor**.

Assim, para um termopar operando a 500 °C, que apresenta na faixa de 0 °C a 800 °C erro de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 1\%$, como 1% de 500 corresponde a cinco, o erro máximo será de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A tabela 5.4 apresenta os limites de erro para termopares comuns.

TABELA 5.4
Limites de Erro dos Termopares

Termopar	Faixa	Erro (termopar padrão)	Erro (termopar especial)
B	800 °C a 1 700 °C	$\pm 0,5\%$	----
E	-200 °C a 0 °C	$\pm 1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 1\%$	----
E	0 °C a 900 °C	$\pm 1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,5\%$	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$
J	0 °C a 750 °C	$\pm 2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$	$\pm 1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$
K	-200 °C a 0 °C	$\pm 2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%$	----
K	0 °C a 1250 °C	$\pm 2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$	$\pm 1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$
R e S	0 °C a 1450 °C	$\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,25\%$	$\pm 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,1\%$
T	-200 °C a 0 °C	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 1,5\%$	----
T	0 °C a 350 °C	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$

5.5.5 Construção e Proteção dos Termopares

A construção dos termopares está hoje a cargo de empresas especializadas, sendo muito rara a confecção dos mesmos por parte dos usuários. Não obstante, algumas noções básicas podem auxiliar na sua especificação, no diálogo com os fornecedores e na compreensão de suas limitações.

A Junta

Um processo usual que resulta na chamada "junta de topo" é a soldagem direta dos fios, segundo processos que vão desde a simples solda a prata com fluxo até a solda a plasma, dependendo da temperatura de trabalho do termopar.

Na figura 5.25 observamos a montagem de um termopar com junta de topo.

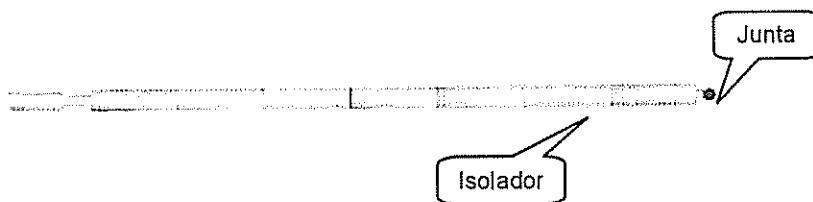


FIGURA 5.25 Um termopar com junta de topo.

Outro processo é a união dos fios por torção, resultando em alta resistência mecânica.

Estas juntas tendem, porém, a apresentar maior erro, e ocorre a indefinição do ponto exato de medição. Esta indefinição geralmente não é importante nas aplicações de processo, mas deve ser evitada nas medições da temperatura de sólidos por contato.

A união dos fios por outros meios mecânicos é possível e pode ser vantajosa, mas exige o uso de dispositivos especiais.

Proteção

Quando o meio permite, o termopar pode operar sem proteção, o que proporciona melhor tempo de resposta. A agressividade dos processos normalmente impossibilita a sua montagem exposta.

Os tubos de proteção podem ser metálicos, encontrados em diversas ligas, desde o aço carbono para operação a até 500 °C em atmosferas não corrosivas, até o aço cromo que resiste temperaturas da ordem de 1100 °C.

O meio no qual o sensor irá operar, juntamente com a máxima temperatura, determina o material aplicável.

À temperaturas acima de 1000 °C ocorre um fenômeno de deformação gradativa do poço, sob ação de seu próprio peso, pois o metal se torna plástico bem antes de atingir o ponto de fusão.

Uma solução é o emprego de poços cerâmicos, embora acarretem tempos de resposta maiores e apresentem baixa resistência à erosão.

O carbeto de silício é aplicável até 1700 °C.

Poços metálicos usinados a partir de barras maciças, como na figura 5.26, são mais resistentes que os tubos, e são indicados em aplicações que envolvem altas pressões e/ou solicitações mecânicas.

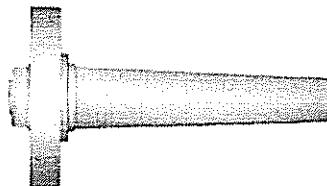


FIGURA 5.26 Um poço usinado.

Quando podem ocorrer fortes vibrações, provocadas possivelmente pela turbulência do fluido, os poços cônicos são indicados, pois apresentam maior resistência e menor frequência de ressonância em relação à sua massa.

A conexão dos tubos e poços ao processo é feita por meio de glande, rosca ou flange, existindo tipos nos quais o comprimento de inserção é ajustável.

Situação da Junta

Quando montada em tubo ou poço metálico, a junta pode ser isolada do mesmo ou aterrada, conforme item 5.5.1 (lei dos condutores intermediários). O aterramento da junta reduz bastante o tempo de resposta do termopar.

Com fins meramente comparativos, apresentamos os tempos de resposta de um mesmo termopar, na tabela 5.5

TABELA 5.5
Tempos de Resposta

Montagem	Tr (em segundos)
Junta exposta	0,09
Poço inox 304; Ø ¼"; junta aterrada	1,70
Poço inox 304; Ø ¼"; junta isolada	4,50

Termopares Descartáveis

Para medição de temperaturas próximas ou acima do ponto de fusão dos fios disponíveis, como ocorre nos processos siderúrgicos, são fabricados termopares descartáveis com proteção em materiais facilmente combustíveis e de baixo custo, que são fixados na extremidade de lanças e imersos no material fundido.

São conectados a circuitos eletrônicos que medem e memorizam a F.E.M. gerada, no breve intervalo de tempo que precede a destruição do termopar.

Isolação

Para isolar os fios do termopar empregam-se tubos ou miçangas de cerâmica ou alumina. O material não deve contaminar o termopar, mesmo na máxima temperatura de operação.

Outra tecnologia que apresenta ótimo desempenho é a da isolação mineral, efetuada com óxido de magnésio em pó, fortemente compactado.

Cabeçote e Bloco Terminal

O cabeçote é o elemento mecânico externo que protege os terminais através dos quais os fios do termopar são ligados ao cabo, que, por sua vez, os conecta com o instrumento. Geralmente de formato esférico achatado, e provido de uma tampa rosada, existem tipos à prova de tempo, à prova de explosão e resistentes à atmosferas corrosivas.

São normalmente metálicos, com pintura epóxi, ou, em alguns casos, confeccionados em materiais plásticos (polímeros).

Vale lembrar que, no caso de equipamento à prova de explosão, todo o conjunto de proteção do sensor, incluindo o cabeçote, deverá ser certificado por órgão credenciado, atendendo a classificação da área onde será montado.

O cabeçote apresenta ainda um prensa-cabos ou uma conexão para o eletroduto de saída. No interior do cabeçote encontra-se o bloco terminal ou bloco de ligação, como na figura 5.27.

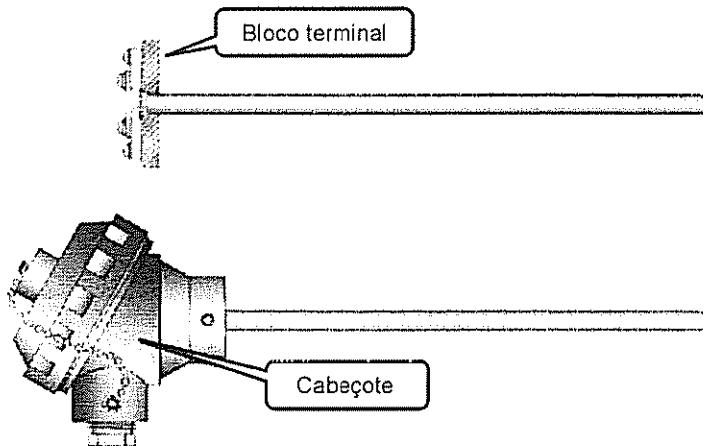


FIGURA 5.27 Bloco terminal e cabeçote.

5.5.6 A Junta de Referência

As juntas frias ou de referência correspondem aos pontos onde os termopares são conectados aos terminais dos respectivos instrumentos, como na figura 5.28.

É impraticável numa instalação industrial manter estes pontos a 0 °C, ou a uma outra temperatura constante, e a variação desta causaria erros de medição.

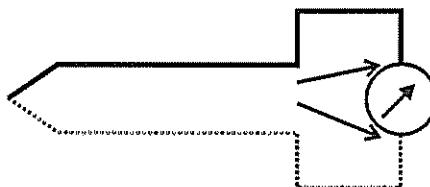


FIGURA 5.28 Junta de referência.

A compensação da variação da temperatura da junta de referência é feita pelo próprio instrumento, que, eletronicamente, soma ou subtrai da tensão de saída do termopar um valor em mV, que compensa a diferença entre a temperatura ambiente e a de 0 °C.

5.5.7 Fios e Cabos de Extensão e Compensação

Na prática, o instrumento se encontra muitas vezes distante, instalado em uma sala de controle. A conexão do termopar é feita usando-se fios* ou cabos* que apresentam as mesmas características termoeletétricas dos fios do termopar, na faixa de temperatura do ambiente de trabalho, simulando a ligação direta destes ao instrumento.

Estes fios ou cabos podem ser de *extensão* ou de *compensação*.

Os fios e cabos de **extensão** são fabricados com as mesmas ligas dos fios termopares, e equivalem, realmente, a alongar os fios do termopar até o instrumento. São usados quando os fios do termopar são compostos por metais não nobres, de baixo custo.

Eventualmente, seu custo pode ser ainda reduzido pelo uso de ligas de menor pureza, pois eles só precisam manter as características na faixa de temperatura do ambiente de trabalho do cabo.

Usamos fios e cabos de **compensação** quando o termopar é composto por metais ou ligas de alto custo. São usadas ligas diferentes das do termopar, mas que apresentam comportamento termoelettrico similar ao destas, mas apenas nas temperaturas às quais é submetido o fio ou o cabo.

Limites de Erro dos Fios e Cabos de Extensão e Compensação

Estes elementos estão sujeitos a erro, assim como os termopares. O erro máximo para cada tipo de fio ou cabo é estabelecido dentro de uma faixa determinada de operação do mesmo, que dificilmente ultrapassa 200 °C.

Os limites de erro, segundo a norma A.N.S.I., estão mostrados nas tabelas 5.6 e 5.7.

TABELA 5.6
Limites de Erro dos Fios e Cabos de Extensão

Termopar	Faixa (do fio ou cabo)	Erro (fio ou cabo padrão)	Erro (fio ou cabo especial)
E	0 °C a 200 °C	± 1,7 °C	----
J	0 °C a 200 °C	± 2,2 °C	± 1,1 °C
K	0 °C a 200 °C	± 2,2 °C	----
T	-60 °C a 100 °C	± 1,0 °C	± 0,5 °C

No caso dos tipos B, S e R, o erro introduzido pelo cabo é função da temperatura da junta quente (temperatura medida). Os valores fixados pela A.N.S.I. são para temperaturas medidas maiores que 870 °C no caso do S e do R, e para temperaturas acima de 1000 °C, no caso do B.

* É comum se efetuar a distinção entre **fio** e **cabo**. Entende-se por fio aquele constituído internamente por um único condutor sólido, enquanto o cabo, mais flexível, é formado por múltiplos condutores mais finos, do mesmo metal ou liga. Esta nomenclatura equivale à distinção feita em eletrônica, entre fio rígido (ou sólido) e cabinho.

TABELA 5.7
Limites de Erros dos Fios e Cabos de Compensação

Termopar	Materiais (condutores do fio/cabo)	Faixa (do fio ou cabo)	Erro (fio ou cabo padrão)
B	Cu/Cu (-)	0 °C a 100 °C	+ 0,000 mV / - 0,033 mV
K	Fe/Cupronel (-)	24 °C a 200 °C	± 3,3 °C
S e R	Cu/Cu-Ni (-)	0 °C a 200 °C	± 0,057 mV

Os termopares vistos anteriormente e não constantes nas tabelas 5.6 e 5.7, são tipos especiais de custo relativamente elevado, operando com fios ou cabos de compensação. Estes eventualmente deverão ser objeto de encomenda especial, por não serem itens de estoque. Os limites de erro deverão ser informados pelo fabricante.

Observamos que para o tipo K, estão disponíveis fios e cabos de extensão e de compensação. Os de extensão são mais caros e introduzem erro menor na medição.

A Codificação dos Fios e Cabos

O uso de um fio ou cabo de extensão ou compensação com um termopar que não o específico dele, ou a troca de polaridade do cabo, leva a erros grosseiros e, para minorar esta possibilidade, os mesmos obedecem a códigos de cores.

A cor da capa identifica o termopar aplicável e indica se é de extensão ou compensação. As cores das isolações individuais dos condutores indicam a polaridade.

Lamentavelmente, existem várias codificações e, em caso de dúvida, deve ser consultado o catálogo geral do fabricante/fornecedor.

Apresentamos na tabela 5.8 as codificações A.N.S.I. (americana), D.I.N. (alemã), B.S. (britânica) e J.I.S. (japonesa).

TABELA 5.8
Alguns Códigos de Cores

		A.N.S.I.			D.I.N.			B.S.			J.I.S.		
Termo-par	Cabo/fio	Capa	+	-	Capa	+	-	Capa	+	-	Capa	+	-
B	Comp	Cz	Cz	Vm	--	--	--	--	--	--	--	--	--
E	Ext	Rx	Rx	Vm	--	--	--	Az	Mr	Az	Rx	Rx	Vm
J	Ext.	Pt	Bc	Vm	Az	Vm	Az	Pt	Am	Az	Am	Vm	Bc
K	Ext.	Am	Am	Vm	Vd	Vm	Vd	Vm	Mr	Az	Az	Vm	Bc
K	Comp.	Bc	Vd	Vm	Vd	Vm	Vd	--	--	--	--	--	--
R	Comp	Vd	Pt	Vm	Bc	Vm	Bc	Vd	Bc	Az	Pt	Vm	Bc
S	Comp.	Vd	Pt	Vm	Bc	Vm	Bc	Vd	Bc	Az	Pt	Vm	Bc
T	Ext.	Az	Az	Vm	Mr	Vm	Mr	Az	Bc	Az	Mr	Vm	Bc

Abreviações das cores: Pt = preto; Mr = marrom; Vm = vermelho; Am = amarelo; Vd = verde; Az = azul; Rx = roxo; Cz = cinza; Bc = branco.

5.5.8 Considerações sobre a Instalação

Os fios e cabos são fornecidos com várias opções de proteção (capas), em função da temperatura e da agressividade do ambiente onde serão instalados.

Sua resistência mecânica depende da bitola e deve ser considerada, sobretudo quando eles forem introduzidos em eletrodutos. Existem opções com blindagem elétrica/eletromagnética, e também com isolamento para temperaturas acima das usuais.

Apesar dos termopares operarem com tensões da ordem de mV, sua baixa impedância torna os circuitos relativamente pouco sensíveis à interferências. Soma-se a isso o fato de os modernos transmissores e conversores incorporarem filtros e apresentarem elevada rejeição de modo comum.

Não obstante, problemas podem surgir e devem ser rigorosamente respeitadas as normas de instalação e as boas práticas de blindagem e aterrramento.

A instalação dos poços também deve atender a cuidados básicos, como a escolha de pontos representativos de medição, evitando-se zonas mortas. A profundidade de inserção deve ser suficiente para minimizar a influência das paredes de tubulações e vasos.

5.6. PIRÔMETROS DE RADIAÇÃO

São instrumentos dedicados à medição da temperatura, sem contato direto com o corpo ou meio cuja temperatura está sendo medida.

Aplicam-se quando a temperatura ultrapassa o limite de utilização dos termopares ou quando outros fatores tornam conveniente a medição remota.

Podem ser fixos, dedicados à medição de um processo, ou portáteis. Distinguem-se dois tipos de pirômetros:

- 1) **pirômetros ópticos** – operam à temperaturas acima de 500/600 °C, nas quais o material começa a emitir radiação no espectro visível (incandescência), até temperaturas da ordem de 5000 °C;
- 2) **pirômetros infravermelhos** – cobrem a faixa aproximada de 0 °C até 4000 °C, captando a energia radiante no espectro infravermelho. Eventualmente, abrangem também o espectro visível e o início do espectro ultravioleta.

5.6.1 Princípios

A Lei de Stefan-Boltzman e o Corpo Negro

Esta lei resulta dos experimentos de Josef Stefan e das deduções de Ludwig Boltzman, e estabelece a relação entre a temperatura de um corpo e a energia térmica irradiada. Sua expressão é dada por:

$$W = \varepsilon \cdot K \cdot T^4,$$

onde:

W = energia irradiada (ou emitida) por unidade de área;

ε = emissividade do corpo;

K = constante de Stefan-Boltzman;

T = temperatura em K.

A emissividade é definida como a relação entre a energia irradiada pelo corpo, num determinado comprimento de onda, e a energia que seria irradiada por um corpo negro neste comprimento de onda, à mesma temperatura.

$$\epsilon = W/W_n, \text{ portanto, } 0 \leq \epsilon \leq 1.$$

O **corpo negro** é aquele que apresenta $\epsilon = 1$, e é considerado padrão de emissão. O refletor ideal é aquele que apresente $\epsilon = 0$.

Na prática, alguns corpos têm comportamento muito próximo ao do corpo negro. Quando isso não ocorre, as medições de temperatura baseadas na lei de Stefan-Boltzman devem ser corrigidas em função da emissividade, que depende também da temperatura e do comprimento de onda.

A tabela 5.9 apresenta alguns valores aproximados de emissividade a determinadas temperaturas.

TABELA 5.9
Alguns Valores Aproximados de Emissividade

Material	Temperatura (°C)	ϵ
Aço laminado	21	0,66
Aço oxidado	100	0,74
Alumínio	26	0,08
Alumínio polido	130	0,06
Alumínio polido	230	0,04
Asfalto	4	0,97
Chapa estanhada	24	0,075
Chapa zincada	28	0,23
Chumbo	130	0,06
Chumbo oxidado	25	0,78
Cobre polido	23	0,05

É interessante notar que o asfalto e o alumínio polido se aproximam dos extremos da faixa, ou seja, do corpo negro e do refletor ideal, respectivamente.

Distribuição Espectral da Radiação

A radiação emitida pelos corpos é desprezível fora da faixa de 0,3 a 20 microns*, e nesta a radiação entre 0,35 e 0,75 microm corresponde ao espectro visível.

Esta radiação não apresenta a mesma intensidade (W) em todos os comprimentos de onda (λ), o que pode ser observado nas curvas de emissão espectral mostradas na figura 5.29.

* O micron é a unidade usual de medida do comprimento de onda, correspondendo a 0,001 mm ou a 10 000 ângstrons (\AA).

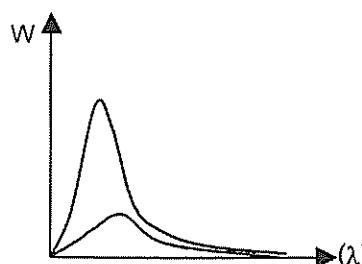


FIGURA 5.29 Duas curvas de emissão espectral.

A energia total emitida, para fins de determinação da temperatura, é dada pela integral da função $W = f(\lambda)$, que corresponde à área delimitada pela curva da figura 5.29.

Refletância e Transmitância

Além do efeito da emissividade, a medição da temperatura de um corpo pode sofrer a influência da energia refletida pelo mesmo, ou transmitida através dele.

Se o corpo possuir alta refletância e estiver próximo ou circundado por um meio de temperatura superior a dele, o pirômetro indicará uma temperatura superior à real, conforme mostrado na figura 5.30.

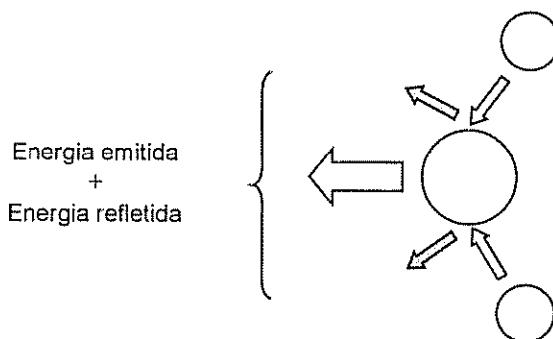


FIGURA 5.30 Erro devido à refletância.

Sob este aspecto, a medição será menos influenciada quando a emissividade for elevada e a refletância for baixa.

A transmitância, para a radiação térmica, é praticamente zero na maioria dos sólidos. Em alguns líquidos e, sobretudo, nos gases, a transmitância não é desprezível e pode ocorrer que o pirômetro "enxergue" uma fonte de radiação térmica situada atrás do alvo de medição, conforme mostrado na figura 5.31.

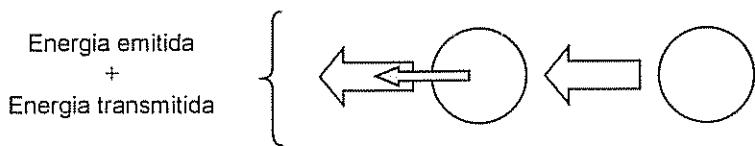


FIGURA 5.31 Erro devido à transmitância.

5.6.2 Pirômetros Ópticos

Como já comentado, medem a temperatura baseados na emissão de radiação no espectro visível.

Baseiam-se na comparação do comprimento de onda (cor) da radiação visível emitida por um corpo (fonte externa), com aquela emitida pelo filamento de uma lâmpada padrão, de temperatura ajustável e conhecida, contida no instrumento.

O diagrama óptico de um pirômetro é apresentado na figura 5.32.

Esta configuração permite que a imagem do filamento seja superposta sobre o fundo de radiação da amostra, para que as cores sejam igualadas, manual ou automaticamente.

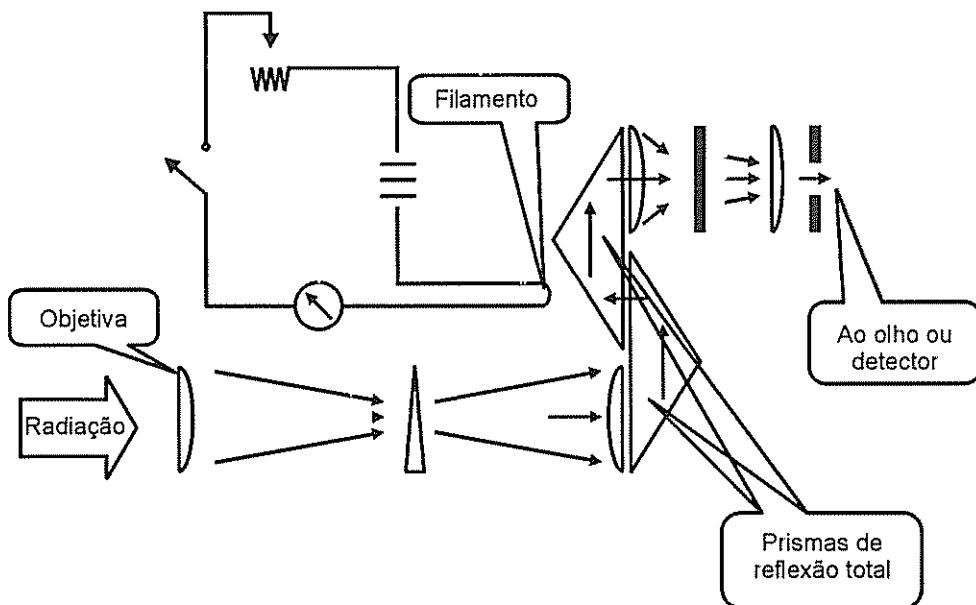


FIGURA 5.32 Diagrama de um pirômetro óptico.

Um instrumento típico é o da figura 5.33.



FIGURA 5.33 Um pirômetro óptico.

Outro equipamento é apresentado na figura 5.34.

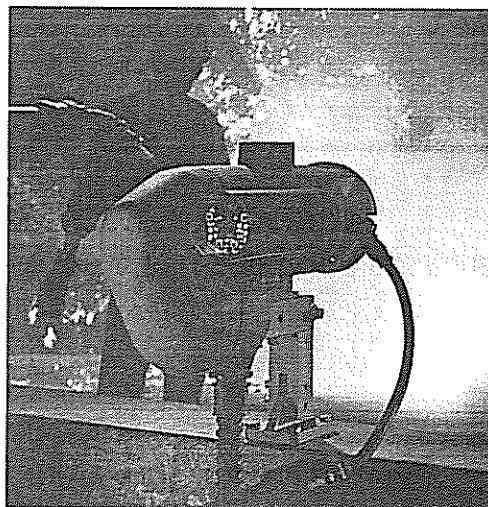


FIGURA 5.34 Um pirômetro óptico, em operação contínua em uma aciaria.

O sistema incorpora a compensação da emissividade e é comandado por um microprocessador.

5.6.3 Pirômetros Infravermelhos

Permitem a medição até de temperaturas um pouco abaixo de 0 °C, usando detectores a termopar (vide item 5.5.2) ou semicondutores especiais cobrindo o espectro infravermelho.

Podem apresentar os recursos como foco automático, ângulo variável e comando a microprocessador.

A existência de modelos compactos, portáteis e de custo acessível abriu uma vasta gama de aplicações na manutenção, onde são usados para detectar maus contatos em instalações elétricas e sobreaquecimento de equipamentos elétricos e mecânicos, como mancais.

Um exemplo de sua sensibilidade é a facilidade com que se localiza, à distância de alguns metros, a posição de um reator no interior da calha de uma lâmpada fluorescente.

Um modelo simples e outro mais sofisticado são vistos na figura 5.35.

Para aplicações que requerem a máxima precisão possível, ou casos especiais como a medição, através de um visor, da temperatura de um produto ou equipamento contido no interior de um reator que contenha um gás ou mistura gasosa, é de grande importância a escolha da faixa de frequência (ou de comprimento de onda) que será empregada na medição).

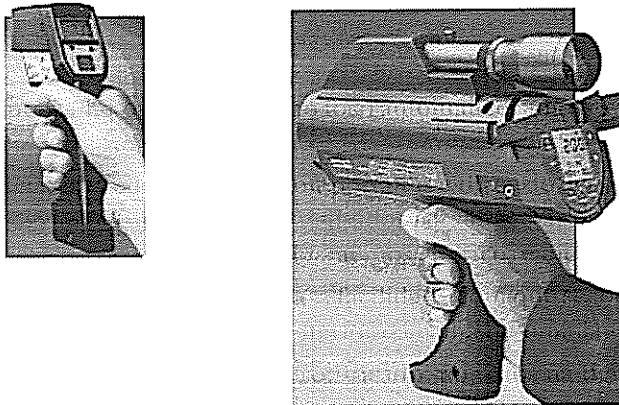


FIGURA 5.35 Dois pirômetros infravermelhos.

5.7 TERMOGRAFIA

Este termo abrange as técnicas de captação, tratamento e interpretação de imagens no espectro infravermelho.

Trata-se de um campo que evoluiu muito em decorrência do aumento da sensibilidade e da resolução dos sistemas de captação (câmeras infravermelhas) e do aperfeiçoamento das técnicas digitais de tratamento de imagens.

A termografia resulta numa imagem onde diferentes tons de cinza, ou diferentes tonalidades de cor, correspondem às diversas temperaturas dos elementos que a compõem.

A figura 5.36 apresenta a foto de um equipamento à esquerda, e à direita a respectiva termografia efetuada após um período de funcionamento.

No original, o sistema foi programado para atribuir diferentes cores às diferentes faixas de temperatura, mas mesmo na reprodução em “escala de cinza” podemos observar regiões mais quentes, sobretudo na parte inferior esquerda.



FIGURA 5.36 Fotografia e termografia de um mesmo equipamento.

A varredura de grandes áreas, empregando câmaras móveis, é possível e pode ser efetuada de forma manual ou automática.

Dentre as aplicações da termografia citamos:

- detecção de temperaturas anormais para fins de manutenção. Todo o salão de máquinas de uma indústria têxtil, por exemplo, pode ser monitorado por um sistema termográfico com varredura, indicando pontos de sobreaquecimento;
- verificação de perdas de energia, devidas a falhas em isolações térmicas;
- verificação de anormalidades em processos, pela alteração da distribuição das temperaturas nos equipamentos.

Enquanto os pirômetros portáteis fazem parte do equipamento normal dos departamentos de manutenção elétrica e mecânica, os trabalhos de termografia, por serem ocasionais e exigirem equipamento e pessoal especializado, são quase sempre terceirizados. O exemplo citado da indústria têxtil é uma exceção, pois trata-se de um sistema que opera continuamente.

5.8 SENSORES DIVERSOS

Serão comentados, a seguir, alguns sensores de aplicação restrita, ou ainda em desenvolvimento, cujo conhecimento poderá facilitar a solução de problemas especiais de medição. É provável que a evolução tecnológica constante resulte no uso mais difundido de pelo menos alguns deles.

5.8.1 Sondas Pneumáticas

Baseadas em uma concepção que data do início do século, são hoje empregadas, principalmente, na medição da temperatura de gases de escape na área aeroespacial.

A vazão mássica de um gás através de uma restrição de geometria constante é função de sua temperatura e das pressões a montante e a jusante da restrição.

Medidas a vazão e as pressões, torna-se conhecida a temperatura. Devem ser compensados fatores como as dilatações do material, atritos e perdas de calor, dentre outros. O sistema é projetado em função de cada aplicação específica.

5.8.2 Sensores Fluídicos

São derivados de pesquisas avançadas na área de mecânica dos fluidos, efetuadas antes da descoberta dos semicondutores, com o intuito de desenvolver circuitos lógicos digitais pneumáticos, já que as válvulas eletrônicas não apresentavam a confiabilidade desejada.

Quando um fluxo de gás é injetado através de uma "lâmina divisora" em uma câmara de dois compartimentos, corretamente dimensionada, o gás será "refletido" de um compartimento para o outro, num movimento oscilatório, conforme mostrado na figura 5.37. A freqüência de ressonância é proporcional à raiz quadrada da temperatura absoluta (K).

Ainda em desenvolvimento, têm sido obtidas precisões de $\pm 1\%$ à temperaturas da ordem de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

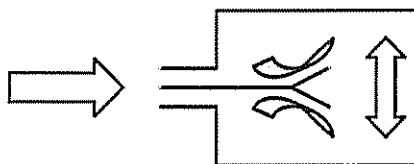


FIGURA 5.37 Princípio do sensor fluídico.

5.8.3 Semicondutores

Tanto os diodos como os transistores apresentam características de variação da corrente com a temperatura, e quando corretamente polarizados podem ser usados como sensores. Dependendo da escolha do semicondutor, pode ser abrangida a faixa de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nos transistores os melhores resultados são obtidos usando-se a corrente de polarização de base como medida da temperatura, mantida constante a corrente de coletor. A sensibilidade chega a $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A principal limitação desta aplicação está na dispersão das características dos semicondutores, tornando obrigatória a calibração individual. Além disso, não existe normalização a respeito.

Muitos circuitos experimentais têm sido publicados, e sensores a semicondutor são usados em vários termômetros comerciais de contato, de imersão e clínicos, sobretudo nos descartáveis. Recomenda-se a calibração freqüente destes instrumentos.

5.8.4 Ultra-Som

Para um determinado gás, à pressão constante, existe uma relação conhecida entre a velocidade de propagação do som e a temperatura.

Transdutores, emissores e receptores, associados a circuitos eletrônicos, permitem a medição precisa da velocidade e, portanto, da temperatura.

O método é utilizado para medição de temperaturas elevadas em plasmas, sem contato direto, sendo as principais desvantagens o custo do equipamento e a necessidade de ser mantida constante a composição do fluido, ou de se recorrer a compensações difíceis.

5.8.5 Reflectometria Acústica no Domínio do Tempo

Este método, similar ao anterior, independe da natureza do fluido. Um fio metálico protegido é imerso no meio, entrando em equilíbrio térmico com o mesmo.

Um pulso de ultra-som percorre o fio e reflete-se na descontinuidade constituída pela sua terminação, retornando a um detector posicionado junto ao emissor.

Um microprocessador determina o tempo decorrido entre a emissão e o retorno do pulso, e calcula a velocidade e a temperatura.

O sistema está esquematizado na figura 5.38.

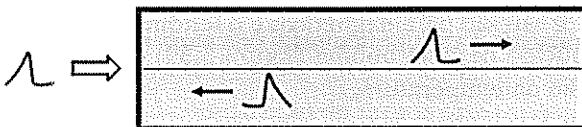


FIGURA 5.38 Reflectometria acústica no domínio do tempo.

5.8.6 Cristais de Quartzo

A frequência de ressonância de um cristal oscilador varia com a temperatura. Por este motivo, nos osciladores eletrônicos de boa precisão e estabilidade, o cristal é instalado em uma câmara de temperatura controlada, constante.

Este efeito permite que o cristal seja usado como sensor, apresentando como pontos fortes a sensibilidade de até $0,0003\text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma estabilidade da ordem de $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante um período de meses.

Para este fim, os cristais são fornecidos para operar na faixa de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, com várias opções de proteção, e são aplicados principalmente em laboratório.

5.8.7 Cristais Líquidos

Pertencem à classe dos indicadores de temperatura, com algumas vantagens com relação aos vistos no item 5.2.1.

Os cristais líquidos são compostos orgânicos que se apresentam no estado líquido, porém, exibem certas propriedades características de um sólido cristalino.

A temperatura é determinada comparando-se a cor assumida por um "filme" do produto, com uma tabela de referência. Praticamente não existe dependência do tempo.

Encontram-se disponíveis para muitas faixas compreendidas entre $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Faixas expandidas de até dois ou três graus são possíveis.

A aplicação do produto e a leitura são efetuadas manualmente.

5.8.8 Ruído Térmico

Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica, a agitação térmica no seu interior sobrepõe a esta corrente pequenas flutuações que se apresentam como um sinal, denominado ruído térmico.

Este efeito é normalmente indesejável e alguns circuitos amplificadores de sinais muito pequenos são resfriados para reduzir o ruído térmico.

Encontram-se em desenvolvimento sensores baseados neste princípio, conhecidos como termômetros de Johnson.

5.8.9 Sensor de Sal Paramagnético

É o método consagrado para a medição de temperaturas muito próximas ao zero absoluto.

O paramagnetismo é uma característica dos materiais que apresentam baixa impedância para o campo magnético, tendendo a concentrar em si as linhas de força. Manifesta-se de forma similar ao ferromagnetismo, porém, de modo menos intenso.

Determinados sais são paramagnéticos e o fenômeno apresenta dependência térmica. Usados como núcleo de uma bobina (figura 5.39), a indutância desta, facilmente mensurável, será função da temperatura.

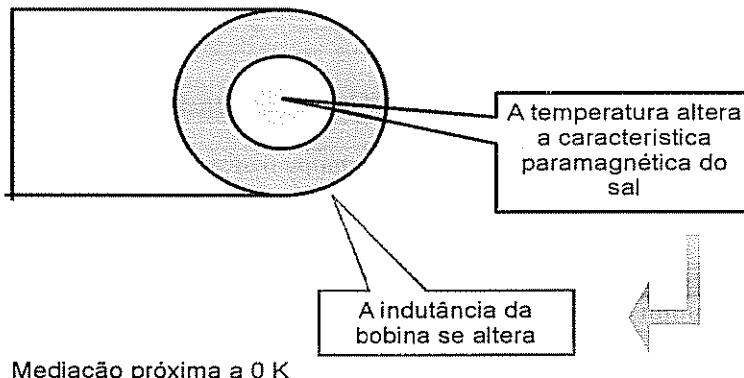


FIGURA 5.39 Sensor de temperatura com sal paramagnético.

5.8.10 Espectroscopia

Usada na astrofísica para determinar a temperatura dos corpos celestes, vem encontrando outros usos, limitados apenas pela complexidade e custo dos equipamentos.

A decomposição espectral da radiação emitida pelos corpos, devidamente interpretada, fornece informação sobre a composição e a temperatura dos mesmos.

5.9 CALIBRAÇÃO E AJUSTE

O Instituto Nacional de Metrologia – INMETRO estabeleceu a terminologia que devemos empregar.

Calibrar é somente confrontar com um padrão.

O certificado de *calibração* de um sensor de temperatura informa, por exemplo, que em determinadas condições o erro de indicação é de $+2^{\circ}\text{C}$. A correção a ser aplicada na indicação deste termômetro é, portanto, de -2°C .

Se o termômetro do exemplo anterior for do tipo de bulbo e capilar de vidro, ele não permite nenhum ajuste, da mesma forma como os pequenos cilindros de aço especial, empregados como padrões de comprimento na calibração dos paquímetros e dos micrômetros também não permitem. Teremos que conviver com o erro, aplicando sempre a correção.

No caso de um conversor eletrônico de temperatura, após a *calibração* podemos efetuar o *ajuste*, levando sua leitura a coincidir com a do padrão. Não devemos porém compensar no ajuste do transmissor um sensor cuja calibração revele um erro acima daquele admitido na norma respectiva.

O termo *aferir* nada mais significa. Desde 1995 este termo não faz mais parte da terminologia metrológica brasileira.

Todos os sensores estão sujeitos à degradação, que será tanto mais rápida quanto mais severas as condições de uso.

Os termopares e R.T.D.s, mesmo estando o poço de proteção aparentemente intacto, sofrem desgaste e contaminação.

De modo geral os sensores não admitem ajuste, e são aferidos periodicamente, sendo descartados quando se encontram fora das tolerâncias definidas.

Para tanto procede se à comparação do sensor com um padrão, em várias temperaturas dentro da faixa de utilização.

Vários equipamentos estão disponíveis para permitir a calibração.

Banhos de água ou óleo, termostatizados, atingem até uns 400 °C.

Banhos de areia ou alumina finamente pulverizada, fluidizados por ar comprimido, operam até 1000 °C, e fornos especiais atingem temperaturas ainda mais elevadas.

A comparação é feita com um padrão primário, secundário ou industrial, cuja escolha dependerá da precisão necessária e do custo.

Os padrões que usamos devem ser certificados, rastreáveis a um padrão primário, e aferidos periodicamente por um laboratório oficialmente credenciado.

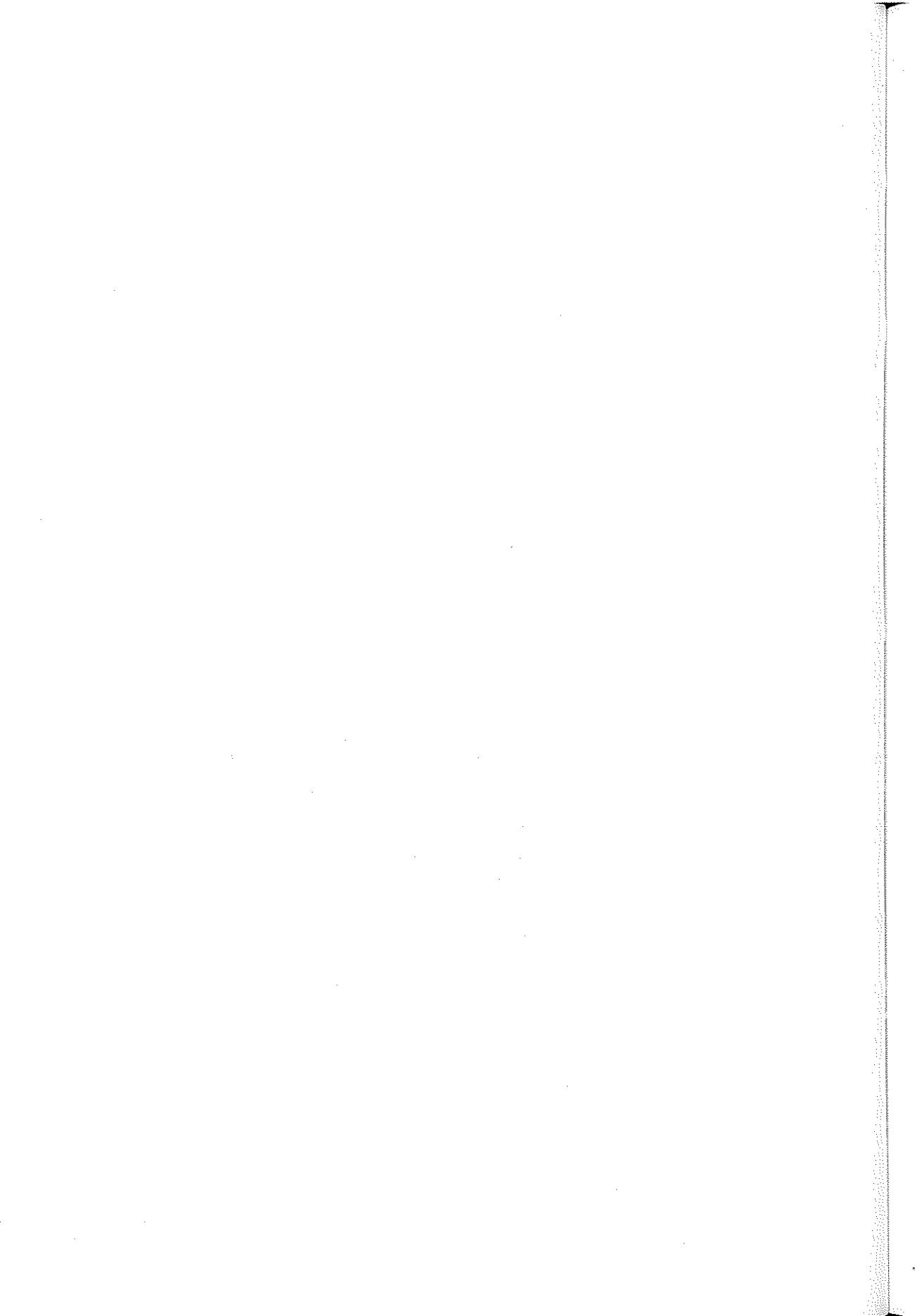
Um sistema típico é o da figura 5.40.



FIGURA 5.40 Calibrando um sensor de temperatura

5.10 TRANSMISSORES

No Capítulo 7 serão comentadas as principais características dos transmissores de temperatura.



6

ANALISADORES

ENGº PEDRO ESTÉFANO COHN

6.1 INTRODUÇÃO

6.1.1 Conceitos

O termo **analisador** é usado para designar praticamente todos os instrumentos destinados à medição das variáveis de um processo, excluídas as fundamentais, temperatura, pressão, vazão e nível.

Assim, além dos instrumentos que efetivamente analisam um produto, no sentido exato do termo, como os cromatógrafos, medidores de grandezas as mais diversas como o pH, a condutividade, a densidade e a viscosidade também estão inclusos no universo dos analisadores.

Praticamente todos os analisadores de processo ou analisadores contínuos resultam da evolução de analisadores de laboratório.

Estes últimos são de grande versatilidade e permitem a análise qualitativa e quantitativa de uma ampla gama de amostras, porém devem ser manipulados por pessoal especializado, em ambiente adequado. As amostras fornecidas ao analisador são discretas, coletadas no campo junto às unidades de processo e levadas ao laboratório.

É normal requererem calibração antes de cada série de análises.

Em contraposição, os analisadores de processo são dedicados à análise quantitativa de um ou de alguns componentes determinados e operam no campo, juntos ou muito próximos à unidade que fornecerá a amostra.

A análise qualitativa é desnecessária, pois o conhecimento do processo é pressuposto. Devem possuir a robustez necessária para operação não assistida em condições de campo, com um mínimo de intervenção humana. Dependendo da precisão exigida e da inevitável deriva do zero e do *span*, podem requerer calibração até diária. Para tanto, existem sistemas automáticos (autocalibração) opcionais.

Os analisadores de processo podem ter função meramente supervisória ou podem fechar malhas de controle.

Foram, e excepcionalmente ainda continuam sendo feitas, algumas tentativas de se adaptar analisadores de laboratório para operação em processos. A justificativa era (ou é) a inexistência de equipamentos apropriados, ou a contenção de despesas.

Esta atitude não se justifica. Hoje, mesmo analisadores altamente sofisticados, como os espectrômetros de massa se apresentam em versões desenvolvidas para aplicações de processo, e a possível economia resultante de uma adaptação provavelmente será corroída pelo funcionamento deficiente.

A maioria dos analisadores opera continuamente, mas alguns são semicontínuos, sendo realizada automaticamente a coleta e a introdução da amostra no mesmo. Nestes casos o tempo de análise ou tempo de ciclo é normalmente suficientemente curto para permitir o fechamento de uma malha, e o controle opera como se a análise fosse contínua. Um dispositivo *sample and hold* precede a saída do sinal, retendo o resultado da última análise até que ela seja atualizada pela seguinte.

Encontram-se analisadores *in situ*, nos quais o sensor opera diretamente no processo, e extrativos, nos quais a amostra é retirada por meio de uma sonda, condicionada e levada até o instrumento.

A possibilidade de instalação *in situ* se limita a alguns poucos casos, sendo usual nos analisadores de pH e condutividade e nos analisadores de combustão (O_2) por célula de óxido de zircônio. A instalação *in situ* tem menor custo e proporciona melhor tempo de resposta e fidelidade, devido à inexistência de sistemas de condicionamento e transporte da amostra.

Em muitos casos, porém, a natureza dos sensores e a agressividade do processo, bem como fatores como pressão, temperatura, umidade e sujeira impossibilitam a montagem direta do sensor no processo, exigindo o pré-tratamento ou condicionamento da amostra.

Recentemente foram introduzidas no mercado versões *in situ* de alguns analisadores que, anteriormente, só estavam disponíveis em versão extrativa. Recomenda-se cautela na especificação dos mesmos, pois mesmo com a garantia do funcionamento adequado em determinadas condições, parâmetros inicialmente desconhecidos ou alterações no processo podem impedir seu funcionamento, e não dispomos, como no caso dos extractivos, do recurso de alterar o sistema de condicionamento para viabilizar a aplicação.

O universo dos analisadores é vasto e continuamente estão sendo lançados novos modelos, ou aperfeiçoamentos de modelos existentes. Nem todos, evidentemente, tiveram seu uso comprovado em todas as aplicações possíveis, e se o passado pode nos ensinar algo na analítica, este ensinamento é que não existe a panacéia universal, na forma do analisador que resolverá todos os problemas.

Hoje pode-se afirmar que para praticamente qualquer componente ou propriedade que se queira medir, existe um analisador dedicado. Cabe ao instrumentista avaliar sua funcionalidade e sua relação custo/benefício.

Dentro do escopo deste trabalho é somente possível examinar alguns dos mais usados; outros serão apenas citados, e muitos ficarão por conta de futura pesquisa dos leitores, na literatura especializada.

Para os que querem ingressar em um campo fascinante, que exige conhecimentos básicos de instrumentação e controle, química, física geral e eletrônica, além de estudo constante, e que apresenta novidades e desafios todos os dias, bem-vindos ao mundo da analítica.

6.1.2 Aplicação

Nos processos, o controle básico é normalmente efetuado pelas variáveis fundamentais. Poucos são aqueles nos quais o emprego de analisadores contínuos é totalmente indispensável. A crescente importância atribuída aos analisadores nos últimos anos deve-se à necessidade de se manter a competitividade e de se zelar pela segurança e pelo meio ambiente.

Ao buscarmos a otimização, entendida como o melhor rendimento possível mantidas as especificações do produto, devemos contar com a medição e o controle de variáveis analíticas. Isto abrange também a redução da variabilidade, evitando despesas na entrega de produtos acima da especificação mínima.

A conservação também é fundamental. Na área de utilidades, os analisadores auxiliam a manter a água, o vapor e o ar, livres de impurezas que podem comprometer os equipamentos. Exemplos são o controle da água de alimentação de caldeiras e de trocadores de calor, e da umidade no ar de instrumento.

Na área ambiental, os analisadores são indispensáveis no tratamento de produtos tóxicos nos efluentes líquidos, e na monitoração das emissões de gases e particulados.

Detectores, nada mais que analisadores simples, efetuam a medição da concentração de gases e vapores tóxicos e inflamáveis, e têm grande aplicação na segurança do trabalho, na segurança patrimonial e na saúde ocupacional.

6.1.3 Particularidades

Muitos analisadores apresentam determinadas particularidades em relação a outros instrumentos, e sua inobservância quase sempre resulta em grandes prejuízos. Prova é o número bastante elevado de analisadores desativados ou operando precariamente.

Mesmo que problemas iniciais sejam resolvidos, é muito difícil recuperar a credibilidade do instrumento junto ao laboratório e ao pessoal de operação da planta. A relativa complexidade de alguns analisadores requer pessoal especializado para efetuar sua especificação. Um erro na especificação pode tornar inútil um analisador para a finalidade prevista. Exemplos são a omissão de contaminantes críticos possivelmente presentes na amostra, dentre eles interferentes, umidade e particulados.

A rangeabilidade pode ser pequena ou mesmo nula (ou depender de retrabalho no país de origem). Erros no projeto do sistema de captação e condicionamento, ou simplificações efetuadas com a finalidade de reduzir custos, podem demandar modificações posteriores caras e demoradas, ou até serem fatais para o analisador. Recomenda-se envolver o fornecedor na especificação, se possível em nível de aplicação no processo.

Outro aspecto a ser considerado é que muitas vezes determinado produto pode ser analisado, ao menos teoricamente, por instrumentos que empregam diferentes princípios de medição ou sensores, mas alguns prestam-se mais a determinada aplicação que outros.

É o caso, por exemplo, dos analisadores de oxigênio em misturas gasosas, e dos analisadores de hidrocarbonetos (óleo) em água. Dentre estes últimos, há os que operam muito bem em determinadas aplicações e se mostram totalmente inoperantes em outras. Somente a experiência, o estudo detalhado do princípio de funcionamento e o exame de aplicações similares garante a escolha correta.

Como a maioria dos equipamentos são importados, a existência de suporte técnico local qualificado deve ser levada em conta. Sua inexistência não inviabiliza a implantação de um analisador, mas pode implicar em treinamento adicional, aquisição de maior quantidade de peças de reposição e despesas com a vinda de técnicos do exterior.

Exigências de treinamento e de manutenção preventiva, por vezes bastante intensiva, são fatores que devem ser considerados. Também precisa ser previsto o custo dos padrões de calibração e, eventualmente, de "utilidades" especiais, como o gás de arraste dos cromatógrafos.

6.1.4 Montagem

Nunca é demais frisar a importância da montagem adequada dos analisadores e dos sistemas de captação, transporte e condicionamento das amostras. Ela abrange vários aspectos, que incluem permitir seu funcionamento correto, viabilizar a manutenção e proporcionar proteção adequada aos mesmos.

Como a montagem dificilmente é realizada por pessoal especializado, a elaboração de "típicos de montagem" detalhados é importante. A importância da montagem com relação à manutenção também não deve ser subestimada.

São comuns reclamações com relação ao excesso de manutenção preventiva demandada pelos analisadores. Em certos casos, observa-se que a montagem pode ser responsável por diferenças enormes no tempo gasto com esta manutenção.

Um exemplo comprovado é o de sondas de medição de pH, nas quais o tempo gasto na remoção, limpeza e calibração pode variar, para cada operação completa, de cerca de cinco minutos para mais de uma hora.

Na figura 6.1 observamos uma montagem que inviabiliza a manutenção. Nesta figura, um técnico tenta "pescar" sondas que caíram no efluente.

Outro erro freqüente, principalmente nos analisadores de líquidos, é a montagem dos sensores à uma distância do transmissor ou conversor, que exige dois técnicos para calibrar um instrumento, quando a calibração é feita manualmente.

Com relação à proteção, nos defrontamos com situações diversas. Alguns analisadores isolados, de pequenas dimensões, são montados no campo, sem maior preocupação, tendo sido adquiridos com invólucros à prova de tempo. Não obstante, um pequeno abrigo ou um simples telhado pode evitar que a temperatura no interior do invólucro, quando exposto ao Sol, ultrapasse o limite especificado pelo fabricante. O telhado facilita também a abertura do invólucro sob condições climáticas adversas.

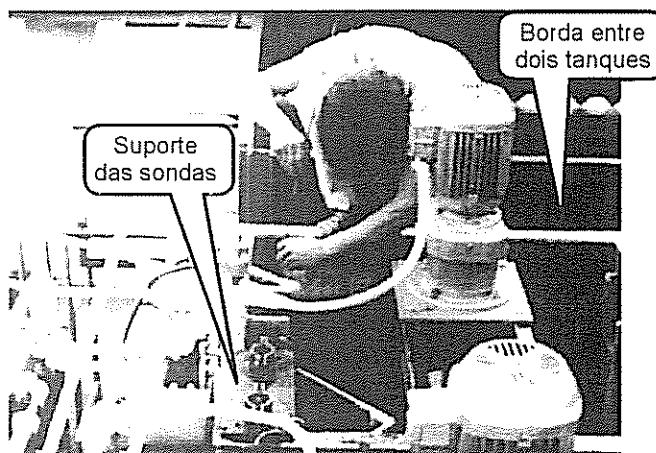


FIGURA 6.1 Manutenção inviável, em uma estação de tratamento de efluente.
Foto: arquivo do autor.

Quando vários analisadores são instalados em uma mesma unidade, ou próximos uns aos outros, é comum a construção de uma "casa de analisadores", usualmente em alvenaria. Dependendo das condições, a mesma pode contar com sistema de ventilação, filtragem de ar e resfriamento. O aquecimento, usual em regiões frias, raramente se faz necessário em nosso país.

Outra opção que vem se tornando comum, sobretudo na área petroquímica, é o fornecimento de analisadores pré-montados em abrigos ou *shelters*. Trata-se de verdadeiras casas de analisadores executadas em fibra resinada, chapa metálica ou outros materiais, que podem ser dotadas de todos os recursos desejados, incluindo sistemas de ventilação e condicionamento de ar, proteção e tomadas de serviço para manutenção.

No caso de áreas de risco, o abrigo pode ser purgado, permitindo a instalação de analisadores certificados para uma classe inferior ao da área externa, conforme comentado no capítulo 8.

6.2. CONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS

6.2.1 Importância

O condicionamento da amostra é fundamental para a correta operação do analisador. Se a amostra não atender às especificações do instrumento, teremos, no mínimo, um resultado incorreto, podendo resultar danos de monta ou comprometimento da vida útil do analisador.

Há casos onde o sistema de condicionamento apresenta um custo considerável, podendo até ultrapassar o do analisador. Devemos lembrar que uma economia indevida neste aspecto irá comprometer todo o sistema. Por outro lado, um condicionamento adequado reduz consideravelmente os custos de manutenção e o *down time*.

O condicionamento, no sentido restrito, efetua o acerto das características da amostra, como temperatura, pressão, umidade, sujeira e outros componentes indesejáveis. No sentido mais *lato*, abrange:

- captação da amostra;
- transporte;
- condicionamento propriamente dito;
- injeção de padrões para calibração;
- pontos de coleta para o laboratório;
- descarte seguro após a análise.

Estas operações devem cumprir uma série de exigências:

- a amostra deve ser representativa do processo;
- qualquer alteração em suas características que afete o resultado da análise deve ser compensada;
- o tempo de resposta ou tempo morto deve ser aceitável;
- deve ser confiável e não exigir manutenção excessiva;
- deve apresentar segurança.

Os componentes do sistema de condicionamento geralmente não se encontram concentrados em um único local. É comum encontrarmos filtros junto ao ponto de captação, alguns componentes montados do lado externo do abrigo onde se encontram os analisadores e outros no interior do abrigo. Quando todo o sistema deve ser montado no campo, ele pode ser alojado em um painel, separadamente ou junto com o analisador.

6.2.2 Implantação do Sistema de Condicionamento da Amostra

O projeto de um sistema de condicionamento, além de se basear em princípios físicos e químicos bem fundamentados, requer experiência e bom senso. Processos aparentemente idênticos, conectados a analisadores iguais, podem divergir em detalhes do condicionamento.

Isto acontece tanto pelo fato de diferentes projetos levarem ao mesmo resultado, como pela necessidade de ajustes experimentais nos sistemas. Sempre que possível, e a menos que se tenha grande experiência, o condicionamento deve ser incluído no fornecimento do analisador. Algumas diretrizes úteis são:

- envolver o fornecedor com o processo;
- no caso, comum, de variáveis incertas, como umidade e teor de particulados, prever o pior caso possível;
- prever condições anormais na partida; é quando mais se pode precisar do analisador. Um exemplo é a formação de *green oil* nas plantas petroquímicas;
- prever custo e tempo para eventuais ajustes após a partida.

Nos próximos itens descrevem-se sucintamente os principais componentes dos sistemas de condicionamento da amostra. A ênfase será com relação às amostras gasosas, mais complexas, mas, em determinados casos, se fará menção às amostras líquidas.

6.2.3 Captação da Amostra

A captação pode envolver desde uma simples luva soldada a uma tubulação do processo, ou um tubo imerso em um tanque do qual bombeamos um líquido, até complexas e caríssimas sondas móveis utilizadas para amostrar diferentes regiões no interior do alto forno de uma usina siderúrgica.

O caso mais comum é o uso de uma sonda, acoplada ao processo por meio de uma rosca ou flange. Dependendo do teor de particulados presentes na amostra, as sondas podem incluir um filtro interno ou externo, como mostrado na figura 6.2.

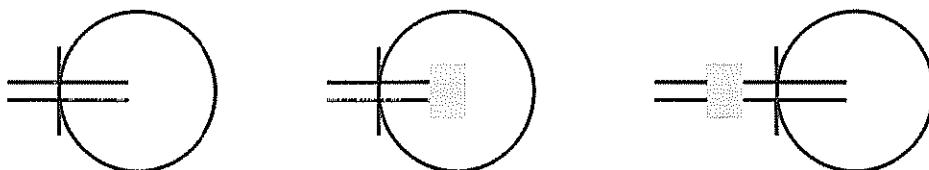


FIGURA 6.2 Sondas de extração da amostra.

Estes filtros podem ser cerâmicos ou de metal sinterizado, com porosidade de algumas dezenas de micrônios, e retêm as partículas maiores.

Quando ocorre entupimento muito frequente do filtro, é feita uma retro sopragem ou *blow-back* com ar ou vapor, como mostrado na figura 6.3. A mesma pode ser manual ou automática, temporizada, congelando-se o sinal do analisador durante a operação.

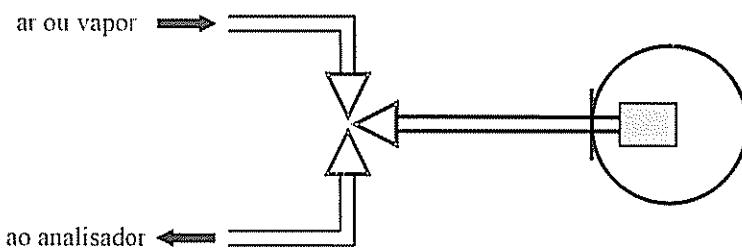


FIGURA 6.3 Sistema de *blow-back*.

A figura 6.4 apresenta uma sonda resfriada e lavada, usada quando a densidade de partículas é muito elevada e a presença de água não prejudica a amostra ou o processo.

Em alguns casos, a obtenção de uma amostra representativa requer um estudo cuidadoso do posicionamento da sonda, ou mesmo o emprego de múltiplos pontos de captação.

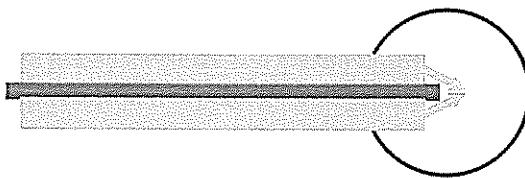


FIGURA 6.4 Sonda resfriada e lavada.

As sondas são normalmente fabricadas em aço inox, ou no caso de temperaturas muito elevadas, em cerâmica, sendo estas últimas sensíveis a choques térmicos. Para temperaturas extremas são utilizadas sondas encamisadas, refrigeradas a água ou vapor.

No tocante a amostras líquidas, elas são freqüentemente obtidas pela própria pressão positiva da tubulação do processo, ou por bombeamento. Embora muitos sensores utilizados na medição de líquidos possam operar *in situ*, sua inserção direta em um reator ou tubulação impossibilita a manutenção com o processo em operação.

Este problema pode ser resolvido com o uso de sondas retráteis, como as da figura 6.5, de custo bastante elevado.

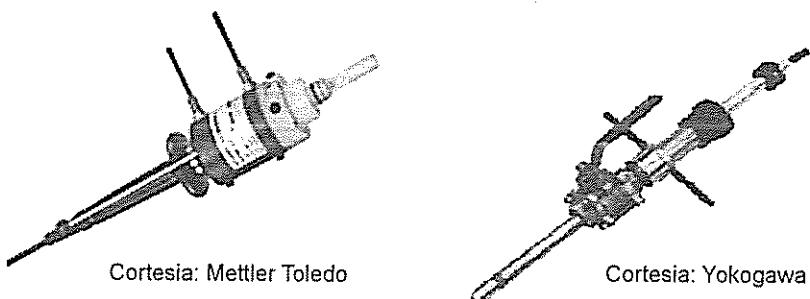


FIGURA 6.5 Instalações típicas de sensores de amostras líquidas.

À esquerda da figura 6.5 vemos uma câmara retrátil com acionamento pneumático, que permite a execução de sistemas totalmente automatizados.

À direita, uma câmara retrátil com acionamento manual e bloqueio por meio de válvula esfera.

Uma alternativa é instalar os sensores em uma câmara como a da figura 6.6.

A figura 6.7 apresenta algumas alternativas para instalação de uma câmara. Todas permitem que ela seja isolada do processo.

Uma solução especial para captação de uma amostra da parte líquida contida em um lodo espesso é mostrada na figura 6.8. Pode ser empregada em algumas modernas plantas de tratamento de efluentes por lodos ativados, que empregam analisadores contínuos para otimizar o processo.

Trata-se, na verdade, de uma sonda combinada com um sistema de filtragem. O lodo é recirculado, passando por um tubo poroso. Uma parcela do líquido atravessa a parede porosa e é encaminhada aos analisadores.



FIGURA 6.6 Câmara para instalação de sensores. Cortesia: Yokogawa.

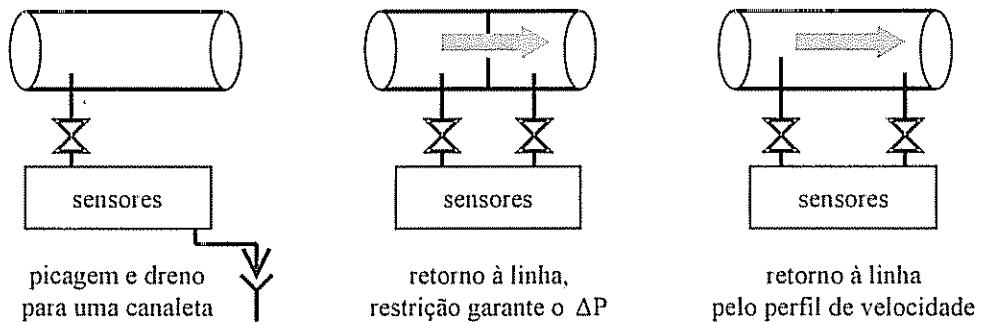


FIGURA 6.7 Instalações de sensores em câmara.

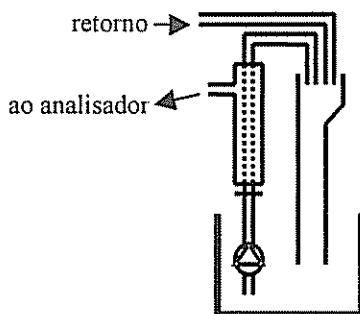


FIGURA 6.8 Captação de amostra líquida em lodo ativado.

A extração de amostras líquidas de polpas com fibras, comuns nas plantas de celulose, se realiza com sondas de extração próprias, dotadas de *blow back*.

6.2.4 Transporte da Amostra

Do ponto de captação as amostras gasosas são conduzidas por uma tubulação, usualmente de inox, com diâmetro da ordem de 1/4 a 1/2 polegada. Dependendo da compatibilidade com os componentes da amostra, outros materiais podem ser utilizados.

Tubos de teflon têm sido utilizados com sucesso. O polietileno pode ser adequado ao uso em local abrigado, respeitadas suas limitações de temperatura, mas este material não resiste ao uso externo.

Como a resposta do sistema analítico depende do tempo que a amostra leva para chegar ao analisador, e do volume morto, a tubulação deve ser a mais curta possível.

Evitar trechos que formem sifões, pois podem provocar entupimento. A figura 6.9 ilustra três situações.

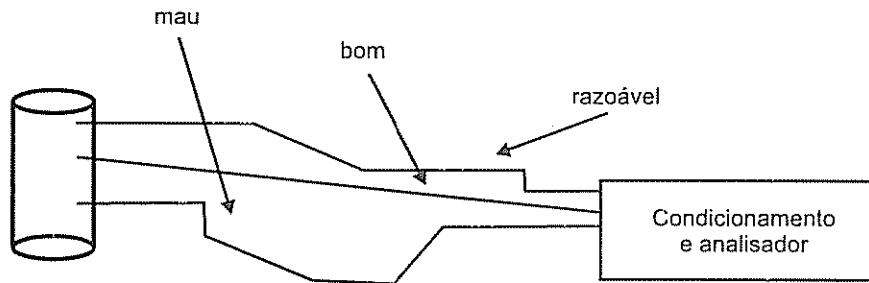


FIGURA 6.9 Percursos de linhas de amostra.

Muitas amostras contêm umidade, muitas vezes com teor elevado. Tanto a tubulação como todos os demais componentes encontrados antes do secador devem ser aquecidos a uma temperatura acima do ponto de orvalho, para evitar a condensação, pois a formação de água provocará entupimentos e poderá danificar componentes do sistema, além de dissolver componentes da amostra.

O aquecimento da linha se faz empregando traço (aquecimento) elétrico ou a vapor.

O cabo da figura 6.10 é fornecido com traço elétrico, pronto para ser instalado.

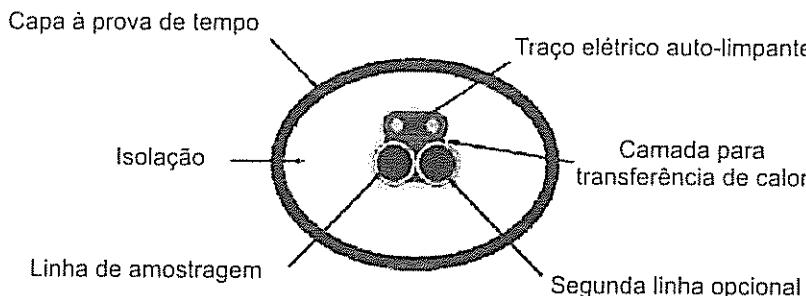


FIGURA 6.10 Linha de amostragem com traço.

Entre nós ainda é muito usado o traço a vapor, mas o traço elétrico proporciona melhor regulação da temperatura, além de ser mais prático.

Para se obter uma resposta rápida, com boa renovação da amostra, é comum usar uma técnica denominada *fast-loop*. Nesta, um volume relativamente grande de amostra circula até próximo do analisador, onde se efetua a tomada da porção que será introduzida no mesmo, geralmente da ordem de apenas um litro por minuto.

A figura 6.11 apresenta, esquematicamente, um *fast-loop*, no qual a amostra é bombeada e a maior parte, que não passa pelo analisador, retorna ao processo.

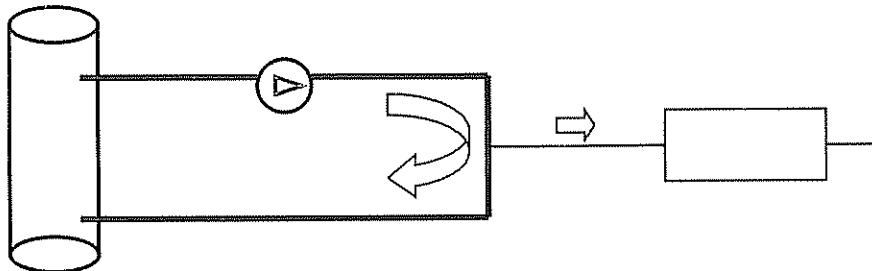


FIGURA 6.11 Um *fast-loop*.

6.2.5 Condicionamento da Pressão e da Temperatura

A pressão no ponto de coleta da amostra pode ser suficiente para impulsionar a amostra, vencendo as perdas de carga do sistema. Há até casos onde a pressão precisa ser reduzida por meio de reguladores.

Quando a pressão não é suficiente, utilizamos bombas especiais, conhecidas como bombas de amostra. Para vazões relativamente grandes, existem bombas centrífugas, mas as mais comuns são pequenas bombas de diafragma, capazes de resistir inclusive a gases e a vapores corrosivos.

A redução de pressão de amostras líquidas pode ser feita por uma restrição, constante de um orifício ou de um tubo capilar, de custo bem menor que o de um regulador. Este método é aceitável desde que não haja possibilidade de ocorrer uma obstrução a jusante da restrição, caso no qual a pressão se elevará até atingir a pressão de entrada, podendo provocar um acidente grave.

A redução da temperatura de uma amostra pode ser feita por simples troca com o ar ambiente, ou por meio de um pequeno trocador de calor a água.

No caso de amostras criogênicas, quando há risco de fracionamento, um vaporizador elétrico provoca vaporização rápida.

6.2.6 Secagem

É normalmente efetuada resfriando-se a amostra, com consequente condensação da água. A maioria dos sistemas de análise requer apenas que o ponto de orvalho seja suficientemente baixo para não ocorrer condensação após a secagem. Na figura 6.12 é mostrado um dispositivo típico.

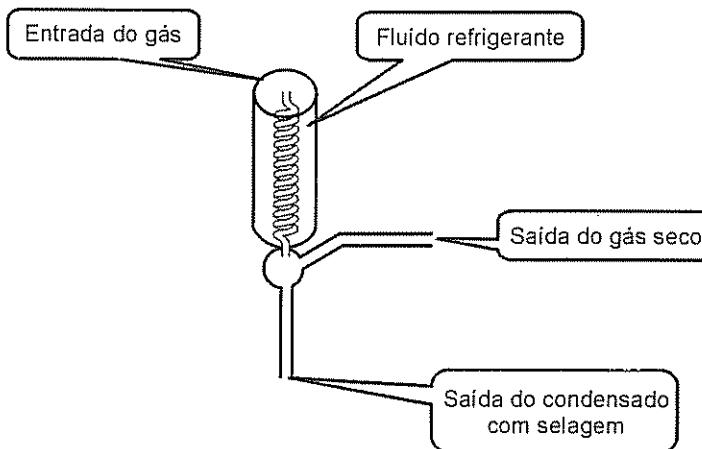


FIGURA 6.12 Secagem por condensação.

A água condensa numa serpentina refrigerada, sendo coletada e drenada. A drenagem pode usar um selo hidráulico ou pode ser feita por meio de uma válvula manual ou temporizada, ou uma bomba peristáltica.

O resfriamento pode ser obtido por um ciclo refrigerante convencional, com compressor, ou por um resfriador termoelétrico (efeito peltier) a semicondutores.

Resfriadores vortex operando com ar comprimido também podem ser usados, mas são de baixo rendimento, ruidosos e de elevado consumo de ar. Um vortex típico, com capacidade suficiente, consumirá da ordem de 400 litros por minuto de ar a uma pressão de cerca de 5 bar.

Quando se deseja um elevado grau de secagem, utiliza-se um secador a peneira molecular, conforme mostrado na figura 6.13. Conhecido como secador Permapure (marca registrada de um fabricante), ele provoca a permeação da umidade através de um material apropriado, sendo a mesma, então, removida por um fluxo de nitrogênio ou ar seco.

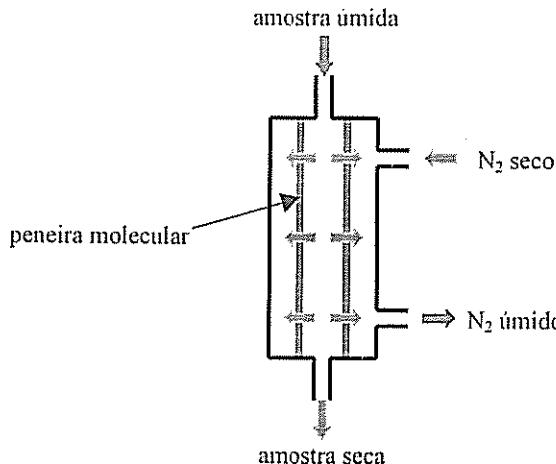


FIGURA 6.13 Secador com peneira molecular.

O secador "Nafion" opera de maneira aparentemente similar, porém a água é transportada por grupos sulfônicos que se movimentam em um polímero.

A secagem por contato com produtos químicos também é possível, mas é pouco usada, pois apresenta vários inconvenientes. Os produtos saturam rapidamente, alguns são tóxicos e/ou corrosivos e, eventualmente, o produto pode reagir com um ou mais componentes da amostra, falseando a mesma.

Gel de sílica, pentóxido de fósforo, perclorato de magnésio, cloreto e óxido de cálcio e ácido sulfúrico concentrado são produtos eventualmente usados.

6.2.7 Filtros

Filtros secos na faixa de 100 microns até um 1 micron ou até menos, são usados nos vários estágios dos condicionadores de amostra. Podem ser de papel, fibras diversas, polímeros ou materiais sinterizados.

Nos filtros *bypass* de membrana, como o mostrado na figura 6.14, a passagem do fluido proporciona uma ação de auto-limpeza.

A remoção de certos componentes indesejáveis pode ser efetuada por meio de frascos lavadores ou cartuchos contendo produtos apropriados, sempre que os mesmos não interfiram demasiadamente com os componentes a serem analisados.

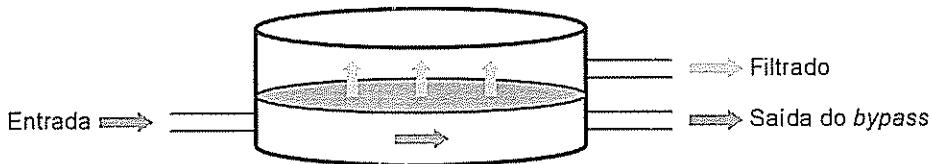


FIGURA 6.14 Filtro *bypass* de membrana.

6.2.8 Outros Componentes

As válvulas de bloqueio, manuais ou do tipo solenóide, têm várias funções, principalmente a de permitir a injeção de padrões para calibração.

A confiabilidade e a estanqueidade desejadas são normalmente obtidas usando-se válvulas pneumáticas, que podem ser pilotadas por solenóides elétricos.

Rotâmetros e válvulas-agulha permitem o ajuste das vazões apropriadas aos vários pontos do sistema.

Chaves de fluxo independentes ou incorporadas aos rotâmetros podem ser usadas para alarmar falhas.

Existem também filtros de proteção com sensores de umidade para alertar em caso de falha dos secadores.

6.2.9 Os Padrões

De modo geral, os analisadores de gases apresentam uma deriva de zero e *span* bastante elevada, podendo atingir a ordem de alguns porcentos do fim de escala por semana.

Isto exige uma calibração freqüente, o que é feito injetando-se gases padrão, ou seja, misturas certificadas com teores conhecidos, fornecidas em cilindros.

A calibração é feita em dois pontos, próximos ao início e ao fim da faixa, e as respectivas misturas são chamadas gás de zero e gás de *span*. Assim, por exemplo, um analisador de oxigênio com faixa de 0 a 5% de O₂ pode ser calibrado com gás de zero contendo 0,5% de O₂, balanço (o restante) N₂, e gás de *span* contendo 4,5% de O₂, balanço N₂.

Os valores citados são nominais, pois como os padrões são analisados pelo fornecedor após a mistura, o certificado indicará um valor próximo, mas dificilmente igual, ao que foi encomendado. Obviamente, é este valor certificado que será considerado.

Gases diferentes podem ser misturados quando não reagirem entre si. Se tivermos, por exemplo, um analisador de O₂ na faixa de 0 a 5% e um analisador de CO₂ na faixa de 0 a 20 %, possivelmente, com sistema de condicionamento comum, o gás de *span* pode ser uma mistura com teores nominais de 4,5% de O₂, 19% de CO₂ e balanço de N₂.

Nos sistemas dotados de calibração automática, o analisador comanda as válvulas que bloqueiam a amostra e liberam os padrões de calibração, retornando ao estado normal de medição quando a calibração for concluída. O intervalo entre operações e os valores corretos dos padrões usados são previamente programados no analisador.

Alguns analisadores de líquidos também podem operar com calibração automática, mas a maior dificuldade apresentada pelo bombeamento dos padrões líquidos limita bastante seu uso.

6.2.10 Coleta e Descarte da Amostra

As medições dos analisadores em linha devem ser verificadas pelo laboratório, e, para tanto, devem ser previstos pontos convenientes para a coleta de amostras.

O descarte da amostra após a sua passagem pelo analisador também precisa ser previsto. Na maioria das vezes basta levar a saída ou *vent* a um ponto elevado em relação ao telhado da sala de analisadores.

Devem ser tomados cuidados para que não ocorra vazamento no interior da sala. O emprego de detectores específicos é obrigatório. Quando a periculosidade da amostra, ou considerações ambientais, não permitem o descarte atmosférico, ela deve ser incinerada, neutralizada quimicamente ou armazenada para posterior descarte.

6.3 ANALISADORES DE GASES

6.3.1 Analisadores de Oxigênio

A maior aplicação dos analisadores de oxigênio é no controle da combustão. Uma caldeira operando com excesso de combustível (falta de ar) resulta em uma combustão incompleta, com consequente desperdício e geração de alto teor de poluentes (CO e resíduos não queimados).

Por outro lado o excesso de ar garante combustão completa, mas também representa desperdício, pois parte do calor gerado estará aquecendo este ar. O ideal é a operação em proporções estequiométricas, ou, pelo menos, na prática, condições próximas, garantidas por um analisador que, através de uma malha de controle, mantenha nos gases de combustão um pequeno excesso de oxigênio, geralmente da ordem de 1 a 3%.

Inúmeras outras aplicações destes analisadores incluem o controle da pureza do oxigênio industrial e hospitalar, processos siderúrgicos e de oxidação em geral, e a manutenção de atmosferas inertes para evitar a deterioração de produtos ou o perigo de combustões indevidas.

Os analisadores de oxigênio constituem uma categoria à parte, pois existem sensores específicos e exclusivos para sua medição. Os principais são as células de óxido de zircônio e os sensores baseados no efeito paramagnético.

Existem, ainda, métodos não específicos, como a condutividade térmica, a cromatografia e a espectrometria de massa, que podem se prestar à análise de oxigênio e de outros gases.

Analisadores com Célula de Óxido de Zircônio

Em temperaturas acima de 500 °C, o óxido de zircônio, embora sólido, se comporta como um eletrólito e permite a construção de uma célula eletroquímica, cujo potencial, mantida constante a temperatura, será proporcional ao logaritmo da relação das concentrações de oxigênio às quais está submetida.

Conhecendo-se uma das concentrações, tomada como referência, obtém-se a outra. Utiliza-se, normalmente, como referência o ar atmosférico, que apresenta teor de O₂ praticamente constante de 20,9%.

Este é o analisador preferencial no controle da combustão, pois permite instalação *in situ*, dispensando o condicionamento da amostra, e é de custo relativamente baixo.

Versões especiais permitem sua instalação em locais com temperatura da ordem de até 1400 °C e elevado teor de particulados.

A vida útil da célula é da ordem de um a três anos, dependendo da presença ou não de produtos corrosivos. A célula é instalada no interior de uma sonda de inserção, junto com os resistores de aquecimento e o sensor de temperatura que comanda o circuito que os alimenta. A figura 6.15 apresenta o conjunto de forma esquemática.

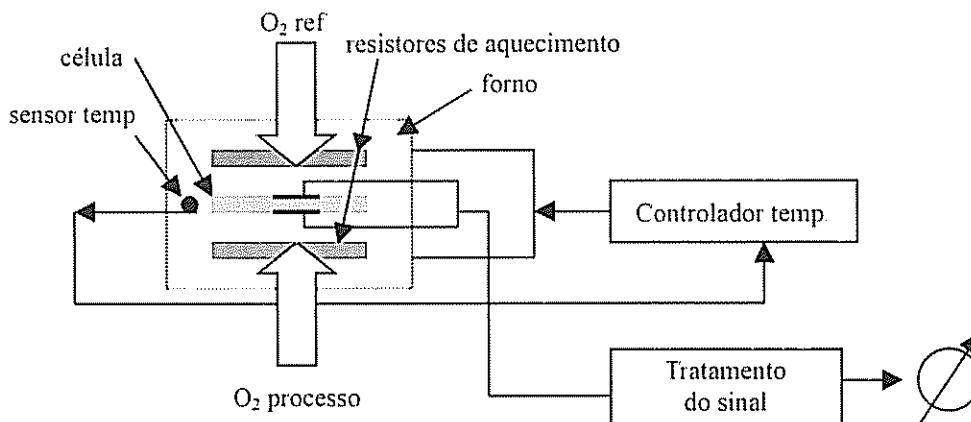


FIGURA 6.15 Analisador com célula de óxido de zircônio.

Uma sonda e um transmissor são vistos na figura 6.16.

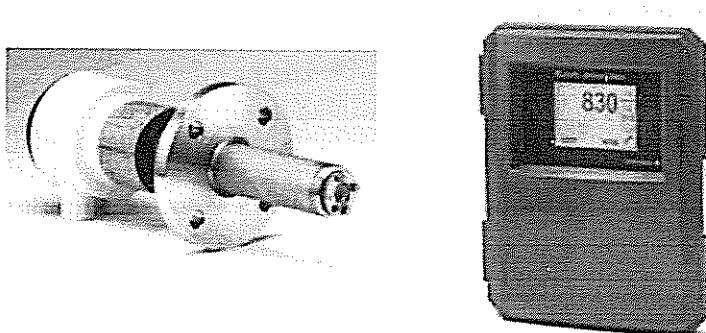


FIGURA 6.16 Sonda e transmissor de oxigênio. Cortesia: Yokogawa.

Estes analisadores não podem ser aplicados quando a elevada temperatura de operação da célula for incompatível com o processo. Outra limitação é que qualquer produto combustível queimarará em contato com a célula, consumindo uma parte do oxigênio presente. Nas aplicações de controle de combustão, por exemplo, a presença de um teor elevado de CO resulta na medição de um teor de O₂ abaixo do real. Teores muito elevados de combustíveis poderão até danificar a célula.

Devido ao fato de medirem a relação entre duas concentrações, nestes analisadores o gás de zero deve conter um teor mínimo de oxigênio, especificado pelo fabricante.

Analisadores Paramagnéticos

Do ponto de vista do comportamento frente a um campo magnético, os materiais podem ser classificados como diamagnéticos, paramagnéticos ou ferromagnéticos. O paramagnetismo é um fenômeno similar ao ferromagnetismo, que se manifesta de forma menos intensa que este, como mostrado na figura 6.17.

Além de alguns óxidos do nitrogênio, o oxigênio é o único gás industrial paramagnético, e esta característica é usada para fins de análise.

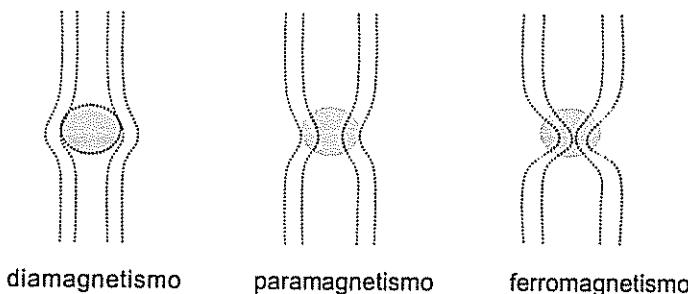


FIGURA 6.17 Comportamento magnético dos materiais.

Assim, o oxigênio é atraído para a região mais intensa de um campo magnético, expulsando qualquer material diamagnético que aí se encontre, conforme mostrado na figura 6.18.

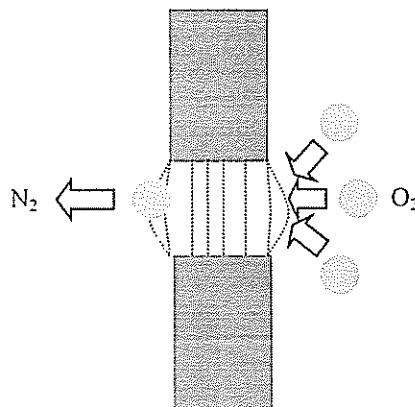


FIGURA 6.18 Atração do oxigênio.

Nos analisadores paramagnéticos do tipo magneto dinâmico, duas pequenas esferas contendo nitrogênio, unidas por uma haste suspensa, são posicionadas entre pólos magnéticos intensos. O oxigênio presente na amostra procura ocupar o espaço entre os pólos, deslocando as esferas. O conjugado que age sobre o conjunto das esferas e haste é medido, sendo proporcional ao teor de oxigênio.

Outro analisador que utiliza o paramagnetismo é o que emprega a célula de Quincke, conforme mostrado na figura 6.19.

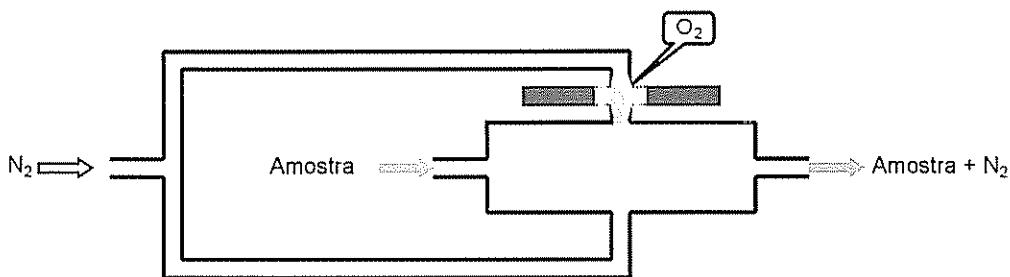


FIGURA 6.19 A célula de Quincke.

O oxigênio presente na amostra em análise tende a se concentrar entre os pólos magnéticos, desbalanceando o fluxo do nitrogênio nos dois braços simétricos.

Um conjunto de sensores de microfluxo mede esta diferença, proporcional ao teor de O₂. Os sensores de microfluxo podem ser dois termistores conectados a uma ponte de Wheatstone. As resistências dos termistores variam com as dissipações térmicas, que são função dos fluxos.

Este tipo de analisador requer um suprimento de nitrogênio, mas o consumo do mesmo é muito pequeno, e a célula de Quincke, além de robusta, pode ser facilmente limpa em caso de falha do sistema de condicionamento.

Ao ser aquecido o oxigênio perde a característica paramagnética, recuperando-a ao esfriar. Esta fato é aproveitado na construção de alguns instrumentos, chamados termo paramagnéticos.

Na célula da figura 6.20, a região entre os pólos magnéticos é aquecida. O oxigênio que sofre aquecimento será deslocado pelo oxigênio frio contido na amostra, formando, assim, um fluxo contínuo conhecido como **vento magnético**. Quanto maior o teor de oxigênio, maior será este fluxo, que é medido com sensores de microfluxo ou pela variação da dissipação do elemento de aquecimento.

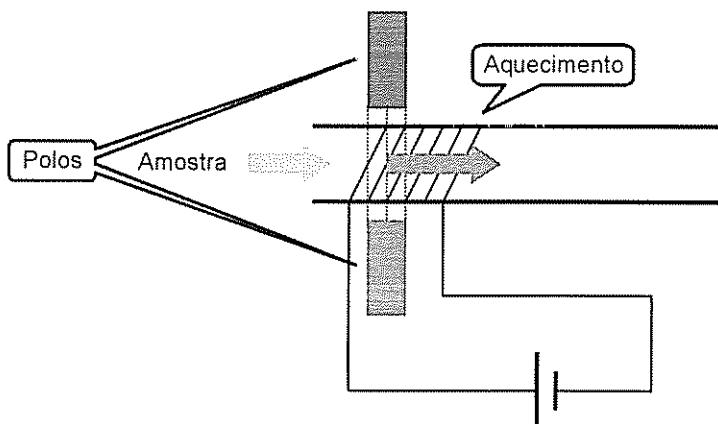


FIGURA 6.20 Célula termo paramagnética.

Todos os analisadores paramagnéticos são do tipo extrativo e requerem um eficiente condicionamento da amostra.

Células Eletroquímicas de Membrana

Nestas células o oxigênio atravessa uma membrana semipermeável e reage com eletrólito existente no interior da célula, causando o surgimento de uma diferença de potencial entre dois eletrodos, proporcional ao teor de O_2 .

De custo relativamente baixo, operam associadas a circuitos bastante simples e podem ser usadas para medir o teor de oxigênio na atmosfera, em locais confinados (aplicação na segurança do trabalho), ou em mistura com outros gases não muito reativos.

O maior emprego delas, porém, é na medição do oxigênio dissolvido na água, a nível de p.p.m., no tratamento dos efluentes líquidos.

Também permitem a medição, a nível de p.p.b., na saída de desaeradores de água de alimentação de caldeiras.

6.3.2 Analisadores por Absorção de Radiação

A energia eletromagnética interage com a matéria em todas as regiões do espectro, sendo que a forma de interação depende da região do mesmo.

A figura 6.21 mostra este fenômeno. Assim, por exemplo, a radiação gama interage a nível nuclear, enquanto que, no outro extremo do espectro, as ondas de rádio interagem com o *spin* dos elétrons. Por serem características de cada material ou substância, estas interações são largamente usadas para fins analíticos.

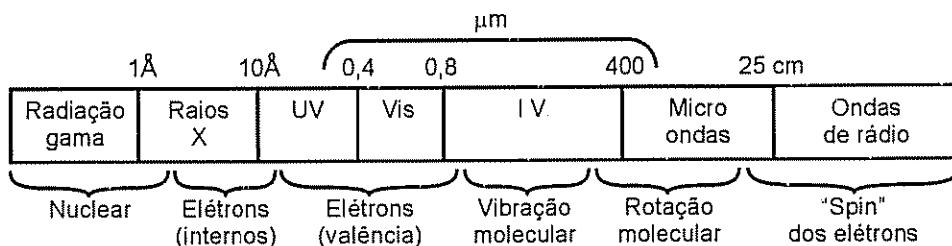


FIGURA 6.21 Intereração da energia com a matéria.

Diversos tipos de analisadores de laboratório fazem uso de todas as regiões do espectro. Nos analisadores de processo é mais usada a região do infravermelho, seguida da região do ultravioleta.

Analisadores Infravermelhos

Esta é a denominação genérica dada aos analisadores que operam pela absorção de energia na região infravermelha (I.V.) do espectro. Para fins analíticos, o I.V. é subdividido em três regiões, conforme mostrado na figura 6.22.

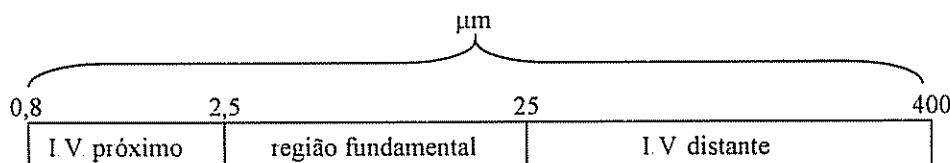


FIGURA 6.22 Regiões do I.V.

Gases heteroatômicos são aqueles cuja molécula é formada por dois ou mais átomos de naturezas diferentes, como o CO, o SO₂ e o HCl. Estes gases absorvem a radiação I.V. em determinadas faixas, dentro da região fundamental, coincidentes com as frequências de vibração da molécula do gás.

A figura 6.23 apresenta o espectro de absorção de um gás, obtido com um analisador de laboratório, do tipo dispersivo, que permite variar continuamente a frequência da radiação.

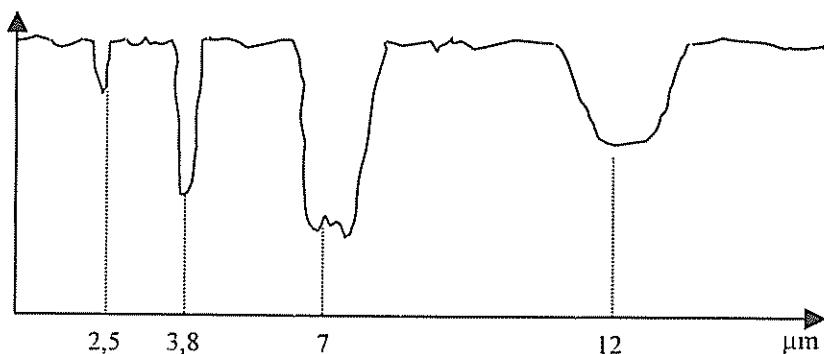


FIGURA 6.23 Espectro de absorção de um gás.

Os analisadores de processo mais usuais são não-dispersivos. Sistemas de filtragem delimitam as faixas de freqüência da radiação para que elas coincidam com determinados picos de absorção dos produtos que serão analisados. A concentração é obtida pela lei de Lambert e Beer:

$$E_2 = E_1 \cdot e^{-(a \cdot b \cdot c)},$$

onde

- E_2 = energia após atravessar a substância;
- E_1 = energia no mesmo ponto sem a substância;
- e = 2,71828;
- a = coeficiente de absorção, função da substância e do comprimento de onda λ ;
- b = espessura da substância;
- c = concentração da substância.

Para uma dada substância, e em função de aspectos construtivos do instrumento, a e b são constantes, e, medindo-se E_2 e E_1 , obtém-se a concentração c da substância.

Na forma mais simples, o analisador poderia se apresentar como mostrado na figura 6.24. A radiação proveniente de um corpo aquecido é filtrada e atravessa a célula pela qual circula o gás, incidindo depois em um detector. O sinal gerado é amplificado e linearizado, proporcionando leitura direta da concentração.

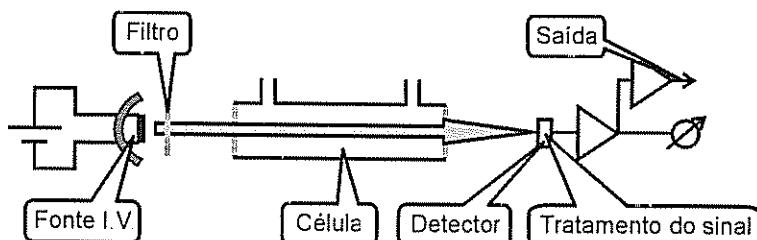


FIGURA 6.24 Princípio de um analisador I.V.

A obtenção da sensibilidade e da estabilidade necessárias à operação contínua nos processos exige recursos mais sofisticados. Existem muitos projetos diferentes, sendo um exemplo o analisador mostrado na figura 6.25.

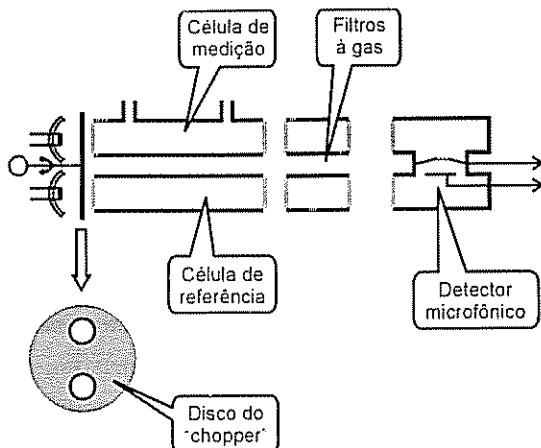


FIGURA 6.25 Um analisador I.V. com comparação de material.

Um disco rotativo, o *chopper*, modula a radiação, o que proporciona maior estabilidade e permite o funcionamento do detector. A radiação atravessa a célula da amostra e outra, contendo um gás de referência, permite que o analisador corrija vários desvios que podem ocorrer.

As células designadas “filtros a gás” são filtros de interferentes e contêm gases que absorvem bandas de radiação correspondentes a componentes (interferentes) existentes na amostra, que falseariam a análise.

O detector consiste de duas câmaras contendo um gás igual ao que será analisado. A radiação é absorvida, provocando seu aquecimento e aumento da pressão.

O diferencial de pressão pode ser detectado capacitivamente, pela deflexão de uma membrana posicionada entre as células, como na figura, ou por meio de um sensor de microfluxo instalado em um canal de comunicação entre as células.

Quase todos os analisadores I.V. são extractivos e operam com condicionamento da amostra. Alguns tipos *in situ* são encontrados no mercado. Recomenda-se cautela na sua aplicação, conforme comentado no início deste capítulo.

Na figura 6.26 observamos uma nova tecnologia, promissora, mas ainda pouco comprovada, que procura unir as vantagens da instalação segura do analisador, afastado do processo, com a medição *in situ*.

Gases e vapores usualmente analisados por I.V. se encontram na tabela 6.1 Os limites apresentadas na coluna “menor faixa” são apenas ilustrativos, pois constantes avanços permitem a fabricação de analisadores cada vez mais sensíveis.

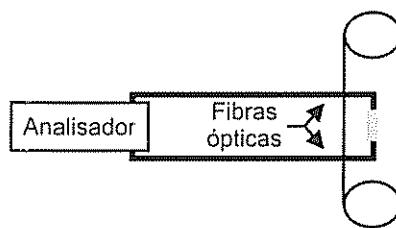


FIGURA 6.26 Acoplamento da radiação ao processo através de fibras ópticas.

TABELA 6.1
Gases e Vapores Usualmente Analisados por I.V.

Fórmula	Substância	Menor faixa
CO	Monóxido de carbono	50 p.p.m.
CO ₂	Dióxido de carbono	10 p.p.m.
CH ₄	Metano	300 p.p.m.
C ₂ H ₆	Etano	500 p.p.m.
C ₃ H ₈	Propano	500 p.p.m.
C ₄ H ₁₀	Butano	500 p.p.m.
C ₆ H ₁₄	Hexano	100 p.p.m.
C ₂ H ₄	Étileno	1 %
C ₃ H ₆	Propileno	---
C ₂ H ₂	Acetileno	1000 p.p.m.
C ₆ H ₆	Benzeno	---
C ₆ H ₅ CH ₃	Tolueno	---
CH ₃ OH	Metanol	---
C ₂ H ₅ OH	Etanol	---
CH ₃ COH	Aldeído acético	---
CH ₃ COCH ₃	Acetona	---
NH ₃	Amônia	300 p.p.m.
H ₂ O	Vapor de água	2000 p.p.m.
SO ₂	Dióxido de enxofre	200 p.p.m.
NO	Óxido nítrico	500 p.p.m.
HCN	Gás cianídrico	---
HCl	Gás clorídrico	---
CS ₂	Sulfeto de carbono	300 p.p.m.
CH ₂ Cl ₂	Cloreto de metila	---
C/F/Cl	Freón	---

Um analisador típico é o da figura 6.27

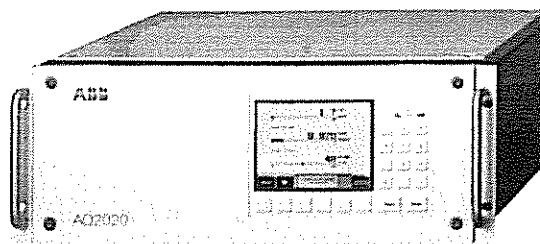


FIGURA 6.27 Um analisador infravermelho. Cortesia: A.B.B.

Analisadores NIR

Os analisadores NIR (*near infra red*) operam no infravermelho próximo, região na qual muitos líquidos, e em particular os hidrocarbonetos, apresentam bandas de absorção. Alguns produtos que podem ser analisados, e as bandas aproximadas, são mostrados na figura 6.28.

Observa-se que a absorção depende das ligações entre os átomos que compõem as moléculas das substâncias.

Ligaçāo	$\lambda \mu\text{m}$								
	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
-CH ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—
->CH ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—
->CH	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C = C - H	—	—	—	—	—	—	—	—	—
=CH	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CH aromático	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R - CH - CH ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H - C = O	—	—	—	—	—	—	—	—	—

FIGURA 6.28 Bandas de absorção no IR próximo.

Analisadores Ultravioletas

São similares aos infravermelhos, mas operam na região ultravioleta (U.V.) do espectro, e se aplicam a gases e vapores cuja absorção no infravermelho é demasiadamente fraca ou inexistente.

Na tabela 6.2 são apresentados alguns produtos que podem ser analisados com radiação U.V. Compostos halogenados e vapor de mercúrio são exemplos típicos.

Em casos onde é aplicável o ultravioleta e o infravermelho, opta-se pelo último, geralmente mais econômico na aquisição e na manutenção.

Com relação à coluna "menor faixa", valem as mesmas observações da tabela 6.1.

TABELA 6.2
Alguns Produtos Analisados por Radiação U.V.

Fórmula	Substância	Menor faixa
CH_3COCH_3	Acetona	5% vol.
CH_3COOH	Ácido acético	1% vol.
NH_3	Amônia	---
$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH})_2\text{C}_6\text{H}_4$	Antraceno	5 g/m³
C_6H_6	Benzeno	5 g/m³
Br_2	Bromo	---
Cl_2	Cloro	100 p.p.m.
ClO_2	Dióxido de cloro	100 p.p.m.
SO_2	Dióxido de enxofre	50 p.p.m.
NO_2	Dióxido de nitrogênio	50 p.p.m.
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	Etanol	10% vol.
$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	Fenol	---
F_2	Flúor	---
COCl_2	Fosgênio	0,5% vol.
I_2	Iodo	---
Hg	Mercúrio	50 p.p.b.
CH_3OH	Metanol	1% vol.
C_{10}H_8	Naftaleno	5 g/m³
O_3	Ozônio	20 p.p.m.
H_2S	Dióxido de enxofre	1% vol.
CCl_4	Tetracloreto de carbono	---
$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	Tolueno	10 g/m³

Analisadores FTIR e FTNIR

Os analisadores FTIR (*Fourier Transform Infra Red*) e FTNIR (*Fourier Transform Near Infra Red*), sofisticados e de aplicação bastante recente, unem as técnicas da interferometria e da teoria matemática da transformada de Fourier.

São multicomponente ou multivariável e, dentre outras, vêm sendo desenvolvidas aplicações no mapeamento de poluentes atmosféricos e na área de refino de petróleo.

Nesta última estão sendo usados na automação do *blending* de combustíveis, para a determinação em linha de grandes como o índice de octanas e cetanas, o C.F.P. (*Cold Filter Plugging Point*) e o teor de enxofre.

A obtenção dos resultados a partir do interferograma depende do desenvolvimento de software específico, o que pode ser trabalhoso e demorado.

Nem sempre o modelo adotado fornece resultados corretos em todas as condições do processo.

Outros Analisadores por Absorção de Radiação

A elevada absorção das microondas pelas moléculas de água levou ao desenvolvimento de alguns analisadores de umidade que empregam esta propriedade.

6.3.3 Analisadores por Condutividade Térmica

As diferenças entre as condutividades térmicas dos diferentes gases e vapores podem ser usadas para sua análise. A tabela 6.3 mostra os valores para alguns produtos, em relação à condutividade térmica do ar.

O método se aplica a misturas binárias, formadas por dois gases de condutividades térmicas distintas, ou a misturas pseudobinárias, nas quais o gás a analisar apresente condutividade térmica distinta da dos demais componentes, os quais, por sua vez, devem ter condutividades próximas entre si. A sensibilidade será tanto maior quanto maior a diferença entre as condutividades térmicas dos gases, o que limita a aplicação destes analisadores.

São excelentes para análise do hidrogênio, pois este apresenta condutividade muito maior que os demais gases, aproximada apenas pelo hélio. Outra aplicação importante é como detectores na saída de colunas cromatográficas.

A medição se baseia na variação da resistência de um filamento aquecido, circundado pela mistura a analisar, como mostrado na figura 6.29. Quanto maior a condutividade térmica da mesma, maior será a dissipação de calor, e a queda da temperatura do filamento resulta na redução de sua resistência elétrica.

Para garantir a estabilidade e a sensibilidade desejadas, quatro filamentos são conectados em ponte, conforme mostrado na figura 6.30, e montados dentro de um bloco

metálico. Dois filamentos são submetidos à amostra, enquanto os outros dois são expostos a um gás de referência.

Os filamentos de referência podem operar em compartimentos selados, ou podem circular por eles um fluxo de ar ou outro gás, como o nitrogênio.

TABELA 6.3
Condutividades Térmicas Relativas ao Ar

Ar atmosférico	1,000
Vapor de água	0,692
Amônia	0,941
Argônio	0,678
Bromo	0,184
Cloro	0,340
Dióxido de carbono	0,636
Dióxido de enxofre	0,367
Dióxido de nitrogênio	2,600
Flúor	1,067
Gás sulfídrico	0,570
Hélio	5,734
Hidrogênio	6,943
Monóxido de carbono	0,964
Nitrogênio	0,994
Oxigênio	1,023
Acetileno	0,815
Álcool etílico	0,562
Álcool metílico	0,547
Benzeno	0,398
Etano	0,834
Etileno	0,780
Freón 12	0,371
Metano	1,312
Propano	0,700

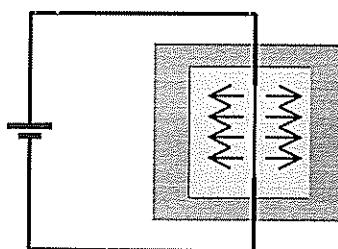


FIGURA 6.29 Princípio de medição.

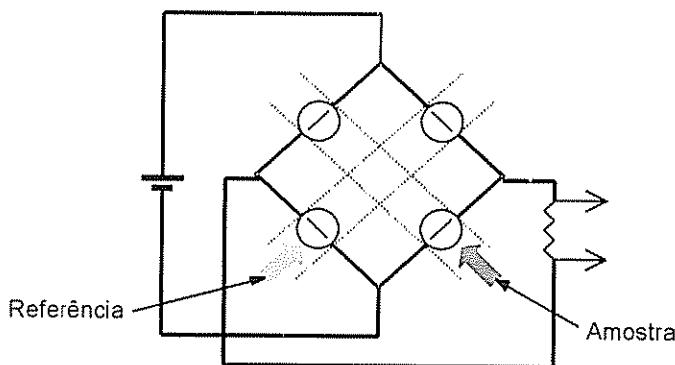


FIGURA 6.30 Detector por condutividade térmica.

6.4 ANALISADORES DE LÍQUIDOS

6.4.1 Analisadores de pH

O pH permite a quantificação da "força" de um ácido ou base (álcali), ou seja, o seu grau de dissociação iônica.

Ao se dissolverem na água os ácidos dão origem aos íons hidrônio H_3O^+ ou adotando-se um modelo simplificado, aos íons hidrogênio H^+ . As bases ou álcalis, por sua vez, geram, na água, íons hidroxila OH^- .

Como a dissociação da água pura gera íons hidrônio e hidroxila em concentrações sempre iguais, empregando-se a simbologia [] para designar a concentração em moléculas gram ou íons gram por litro, pode-se afirmar que:

- | | |
|-------------------------|--------------------------------|
| em uma solução neutra | $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-]$ |
| em uma solução ácida | $[\text{H}^+] > [\text{OH}^-]$ |
| em uma solução alcalina | $[\text{OH}^-] > [\text{H}^+]$ |

Devemo-nos a Sorenson o desenvolvimento da teoria que o levou a definir o pH, através da expressão:

$$\text{pH} = -\log_{10} [\text{H}^+] \text{ em solução aquosa.}$$

Deve-se notar que trata-se de uma **definição**, e não de expressão deduzida, sendo aplicável somente a soluções aquosas. Não tem sentido algum se considerar o pH de uma solução não aquosa.

Como a concentração de íons hidrogênio na água pura a 25 °C é 10^{-7} , resulta da definição que seu pH será 7.

Na prática, o pH varia numa faixa de 0 a 14, sendo que a medição nos extremos da faixa é problemática. Felizmente, muito poucos processos ocorrem fora da faixa de 2 a 12.

Ao se efetuar a neutralização de um ácido com uma base, ou vice-versa, observa-se a natureza logarítmica da variável pH. Para se obter uma variação de duas unidades de pH, necessitamos de 10 vezes mais reagente do que o necessário para se obter a variação de uma unidade, como pode ser observado na figura 6.31.

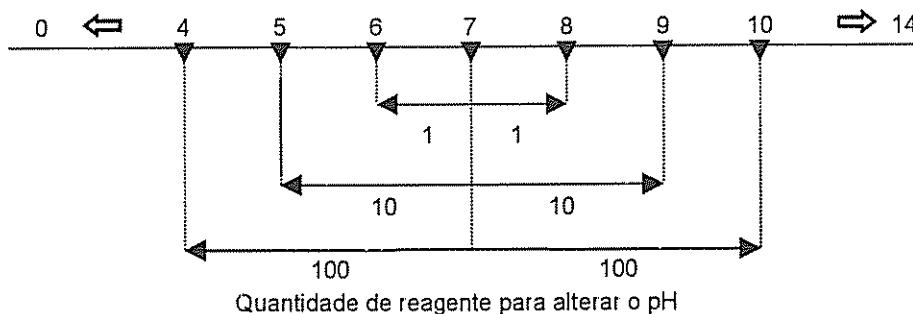


FIGURA 6.31 Variação do pH em função da adição do reagente.

A curva de titulação mostrada na figura 6.32 é outra maneira de apresentar a função pH/demanda de reagente.

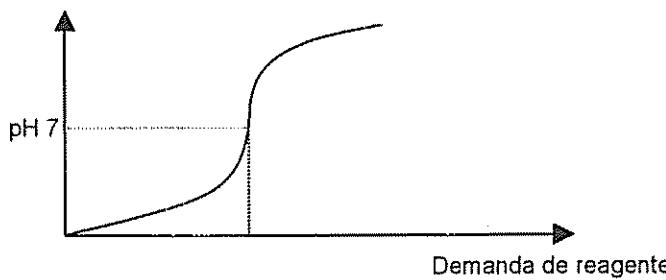


FIGURA 6.32 Uma curva de titulação.

Os valores aproximados do pH de alguns produtos encontram-se na tabela 6.4

A medição do pH é efetuada por meio de um **eletrodo de membrana de vidro**, ou simplesmente **eletrodo de vidro**, cujo potencial, proporcional à concentração de íons hidrogênio, é medido em relação ao potencial de um **eletrodo de referência**.

Um sensor de temperatura, o **termo compensador**, corrige os efeitos da variação de temperatura sobre o eletrodo de vidro. A figura 6.33 apresenta o circuito básico de medição.

TABELA 6.4
pH de Alguns Produtos

Produto	pH aproximado
Ácido clorídrico (HCl) a 4%	0
Ácido clorídrico a 0,4%	1
Ácido clorídrico a 0,04%	2
Ácido clorídrico a 0,004%/Coca-cola	3
Suco de tomate	4
Cerveja	5
Queijo	6
Água pura a 25 °C	7
Gin	8
	9
Sabão líquido	10
	11
Detergente	12
Soda (NaOH) a 0,4%	13
Soda a 4%	14

Eventualmente, em aplicações especiais, o eletrodo de vidro pode ser substituído por outros tipos, como os eletrodos de antimônio, de cerâmicas especiais e os ISFET (*Ion Sensitive Field Effect Transistor*).

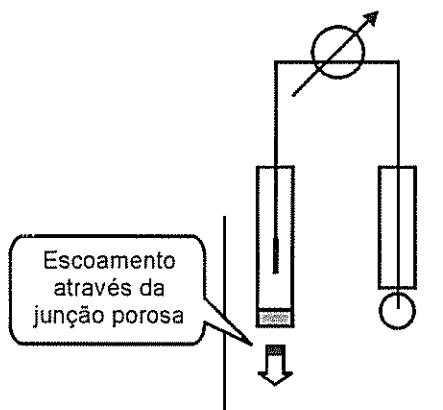


FIGURA 6.33 Medição de pH.

Como o eletrodo de referência troca íons com o processo através de uma junção porosa, ele está sujeito à contaminação. Existem diversos modelos com construção especial para atender a casos específicos.

Devido à fragilidade dos eletrodos, eles são montados em câmaras ou sondas de proteção, que podem ser instaladas *in situ* ou de modo extrativo.

A grosso modo considera-se a vida útil dos eletrodos como sendo em torno de um ano, mas a mesma pode sofrer grandes variações, dependendo das condições de operação.

A maior parte dos problemas pertinentes à medição contínua do pH são devidos à facilidade com que os eletrodos são afetados pela sujeira oriunda do processo.

Sistemas de limpeza automática, quando corretamente aplicados, podem reduzir a carga de manutenção. Os mais usuais são os tipos de jateamento com água ou solventes, limpeza por ultra-som e limpeza com pequenas escovas motorizadas.

Apesar da existência destes sistemas, alguns problemas são de difícil solução, dentre eles a medição do pH em efluentes contendo teores elevados de óleo em emulsão.

Neste caso, só a instalação de um separador de água e óleo, antes do ponto de medição, proporciona um resultado satisfatório.

A 6.34 mostra a característica ideal de um eletrodo de vidro, em três temperaturas diferentes. Desvios na fabricação dos eletrodos e, decorrentes do envelhecimento dos mesmos, são compensados na calibração, realizada com soluções-tampão ou *buffer*, de valores bem determinados.

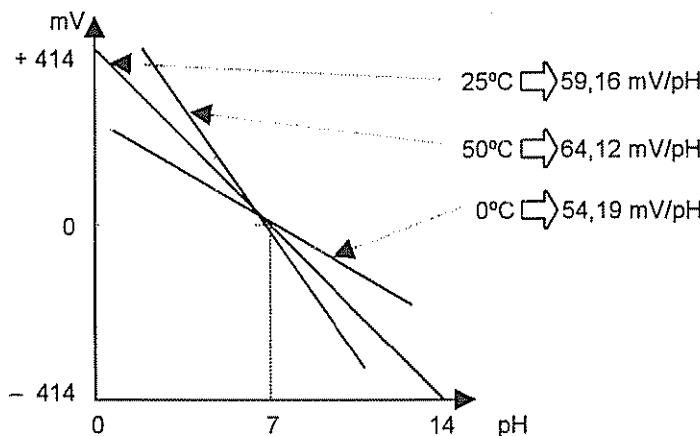


FIGURA 6.34 Resposta ideal do eletrodo de pH.

Primeiro é feita a calibração com solução tampão 7 (ou próximo) e, a seguir, com outra solução de pH diferente de 7, de valor encontrado no comércio, de preferência próximo ao valor do pH a ser medido ou controlado.

Se este valor for ácido, é comum empregar um tampão de pH 4. Para valores alcalinos são usuais os valores de pH 9, 10 e 11.

Para máxima precisão, deve-se observar a variação do pH da solução-tampão com a temperatura, conforme informação do fabricante.

Um transmissor de pH é visto na figura 6.35.

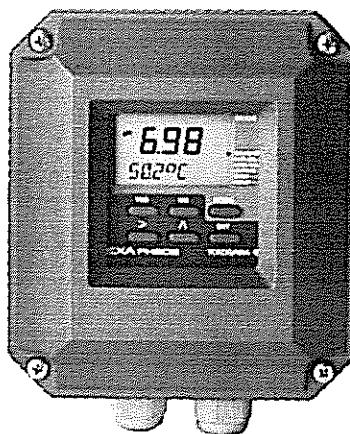


FIGURA 6.35 Transmissor de pH. Cortesia: Yokogawa.

6.4.2 Analisadores Íon Seletivos

Os eletrodos íon seletivos ou íon sensíveis são sensores similares ao eletrodo de medição de pH, porém com sensibilidade a cátions e ânions diferentes do H^+ . Assim, um eletrodo íon seletivo Cl^- gera um potencial proporcional à concentração de íons cloreto em uma solução aquosa.

Bastante usados no laboratório, podem ser incorporados em analisadores de processo. A limitação do uso destes analisadores deve-se à sua complexidade e ao custo relativamente elevado.

Os eletrodos somente operam em condições determinadas, que podem exigir o acerto do pH da solução, a remoção de interferentes e a desagregação de complexos iônicos, exigindo um sistema bastante sofisticado de condicionamento da amostra.

As aplicações mais comuns em processos contínuos são a medição do teor de flúor em instalações de fluoretação de água potável e de sódio em água. Esta última é importante em usinas nucleares e na proteção das palhetas das turbinas a vapor.

6.4.3 Analisadores de Potencial Redox

Denominam-se reações de oxirredução ou reações redox aquelas onde ocorre troca de elétrons entre os átomos envolvidos, como na formação do cloreto de magnésio, representada na figura 6.36, segundo a reação $\text{Mg} + 2 \text{Cl} \rightarrow \text{Mg Cl}_2$.

O elemento que perdeu os elétrons foi oxidado (reduziu o outro participante), enquanto o elemento que ganhou os elétrons foi reduzido (oxidou o outro). Os fenômenos são forçosamente simultâneos, e, quando na prática nos referimos a uma reação de oxidação, é porque o produto que interessa é aquele que foi oxidado, tendo sido empregado um reagente que foi reduzido.

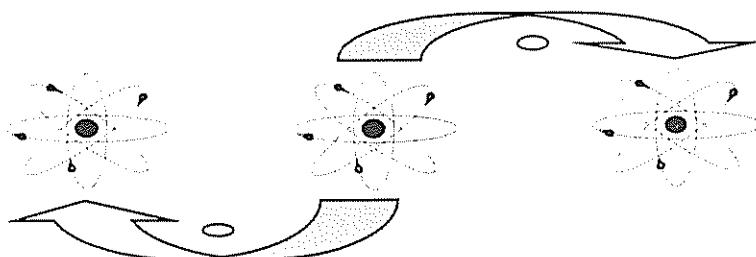


FIGURA 6.36 Um átomo de magnésio cede dois elétrons, um para cada átomo de cloro.

Quando uma reação deste tipo se processa em meio aquoso, um eletrodo metálico, geralmente de platina mas, eventualmente, de prata, ouro ou outro metal, captará um potencial proporcional à relação entre as concentrações da espécie oxidata e da espécie reduzida.

Medido em relação ao potencial de um eletrodo de referência, este potencial fornece informação valiosa com relação ao desenvolvimento da reação. A região de inflexão da curva apresentada na figura 6.37 corresponde às condições de adição de reagente nas quais a reação se completa.

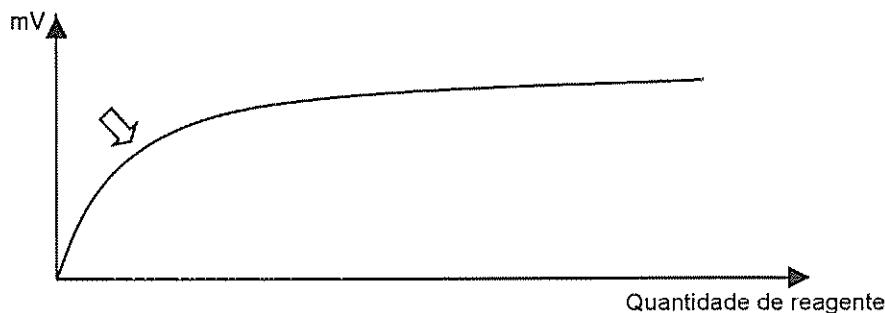


FIGURA 6.37 Variação do potencial redox.

Quando a inflexão resulta pouco pronunciada, é recomendado o emprego de eletrodo de metal diferente. Na prática a seleção do mesmo é feita empiricamente, baseada em casos anteriormente conhecidos ou em tentativas.

Exemplos de aplicação incluem o branqueamento (oxidação) de materiais, como a celulose, empregando-se oxigênio, peróxido de hidrogênio, cloro e dióxido de cloro, e a redução dos cromatos e a oxidação dos cianetos, no tratamento de efluentes líquidos.

Nestes exemplos, opera-se usualmente com eletrodos de platina no branqueamento e na redução dos cromatos, e de ouro no cianeto. A finalidade é sempre o controle da adição do reagente, usando a inflexão da curva como *set point*.

Um erro comum é se supor que através do potencial redox pode-se conhecer a concentração das substâncias envolvidas na reação. Isto é impossível, e caso seja necessário, devemos implantar um analisador apropriado.

A diferença de potencial entre os eletrodos é aplicada a um analisador ou transmissor redox ou O.R.P. (*Oxi Reduction Potential*) bastante similar aos de pH, para tratamento e amplificação do sinal.

Pelo fato do valor absoluto do potencial não ter valor prático, é usual o instrumento apresentar uma escala relativa de 0 a 100%, embora alguns apresentem indicação em mV. Os circuitos permitem gamas extensas de variação de ganho e supressão de zero, necessárias quando do ajuste de operação.

Pelos motivos expostos, não cabe, na partida, uma calibração na verdadeira acepção do termo. O que se deve fazer é a ampliação da região do ponto de inflexão, para facilitar a ação de controle. Suponhamos, por exemplo, que o ajuste inicial do transmissor tenha sido efetuado para cobertura da faixa de -1500 mV a +1500 mV, e que o ponto de inflexão no processo, determinado experimentalmente, situa-se em torno de +600 mV. Alteramos, então, a faixa do transmissor para +300 mV a +900 mV.

Este ajuste é válido somente nas condições de operação nas quais foi efetuado. Como alterações pequenas do processo, como o aparecimento de novos contaminantes, podem alterar substancialmente o ponto de inflexão da curva e, consequentemente, o *set point*, o controle redox deve ser acompanhado intensivamente pelo laboratório.

Existem soluções especiais eventualmente chamadas de "soluções de calibração", mas sua utilidade restringe-se ao teste dos eletrodos, que podem sofrer contaminação ou "envenenamento". O uso destas soluções exige certa experiência para não levar a conclusões falsas, e, em caso de dúvida, recomenda-se a troca experimental dos eletrodos.

6.4.4 Analisadores por Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica ou condutância específica de um material é definida como a condutância medida entre as faces de um cubo de um centímetro de lado.

No caso das soluções aquosas ela depende da concentração dos íons presentes, e de sua mobilidade. Os íons agem como portadores de carga elétrica, de maneira similar aos elétrons livres de um metal.

A unidade empregada é o Siemens por centímetro (S/cm) antigamente denominada mho/cm.

A proporcionalidade existente entre a concentração iônica e a condutividade torna o fenômeno útil na medição de concentrações e, em particular, na determinação da contaminação da água por produtos iônicos.

A grande divulgação desta técnica deve-se ao fato de os equipamentos empregados serem de baixo custo de aquisição, instalação e manutenção, e de elevada confiabilidade.

Na área de processos, além da medição e controle de concentrações aplicam-se no controle da lavagem de materiais e, eventualmente, até na neutralização.

Na área de utilidades, os condutivímetros são indispensáveis na monitoração da pureza da água tratada (deionizada) e na verificação da contaminação em linhas de retorno de condensado.

Acidentes graves envolvendo caldeiras têm sido evitados com o rápido bloqueio de linhas de retorno de condensado, contaminado pelo rompimento de trocadores de calor ou outras causas.

No tratamento de efluentes líquidos, auxiliam na avaliação da carga salina total, prevenindo problemas de operação das estações e alertando para mudanças bruscas no perfil do efluente, provocadas por acidentes de operação ou irregularidades no processo.

Os salinômetros, empregados em todos os processos que envolvem troca de calor entre circuitos de água tratada e água do mar, em especial na área naval, nada mais são que condutivímetros calibrados para indicação em p.p.m. de cloreto de sódio.

Uma aplicação particular é a medição de níveis muito baixos de oxigênio dissolvido na água, pela determinação do aumento da condutividade da mesma após a passagem por um reator de tálio. Em presença de oxigênio ocorre a formação de hidróxido de tálio, fortemente ionizado.

Na tabela 6.5 verificamos que a condutividade de diferentes soluções varia numa faixa que abrange desde frações de $\mu\text{S}/\text{cm}$ até mS/cm .

TABELA 6.5
Condutividade de Algumas Soluções

Produto	Ordem de condutividade
Água de altíssima pureza	0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Água destilada	1 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Água da rede pública	100 $\mu\text{S}/\text{cm}$
NaOH a 0,05%	1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
H_2SO_4 a 1%	50.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
HCl a 20%	850 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Nas curvas mostradas na figura 6.38, observamos a linearidade apresentada entre a concentração e a condutividade, em baixas concentrações, e a sensibilidade do método.

Uma pequena elevação da concentração eleva substancialmente a condutividade. Assim, a adição de 1 mg/l (ou 1 p.p.m.) de cloreto de sódio a uma água desmineralizada de 0,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ eleva sua condutividade para uns 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A existência de curvas distintas para diferentes produtos se deve à diferença entre as mobilidades dos íons de espécies diversas. Íons H^+ e OH^- têm maior mobilidade, o que justifica a maior condutividade dos ácidos e das bases.

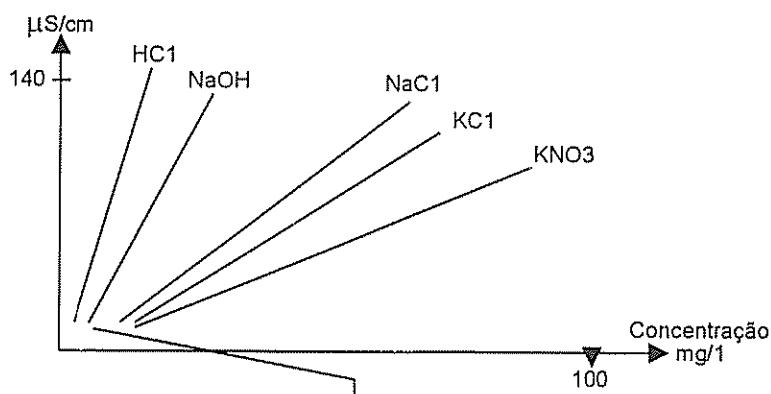


FIGURA 6.38 Variação da condutividade com a concentração (baixas concentrações).

Numa faixa de concentrações elevadas as curvas assumem o aspecto da figura 6.39.

A inversão observada em altas concentrações deve-se à perda de mobilidade causada pela própria elevação da concentração. Esta inversão limita a medição da concentração por condutividade a regiões (faixas) que não incluam o ponto de inversão. Na prática, muitos processos empregam soluções bem diluídas ou concentradas, caindo na faixa acima ou abaixo do ponto de inversão.

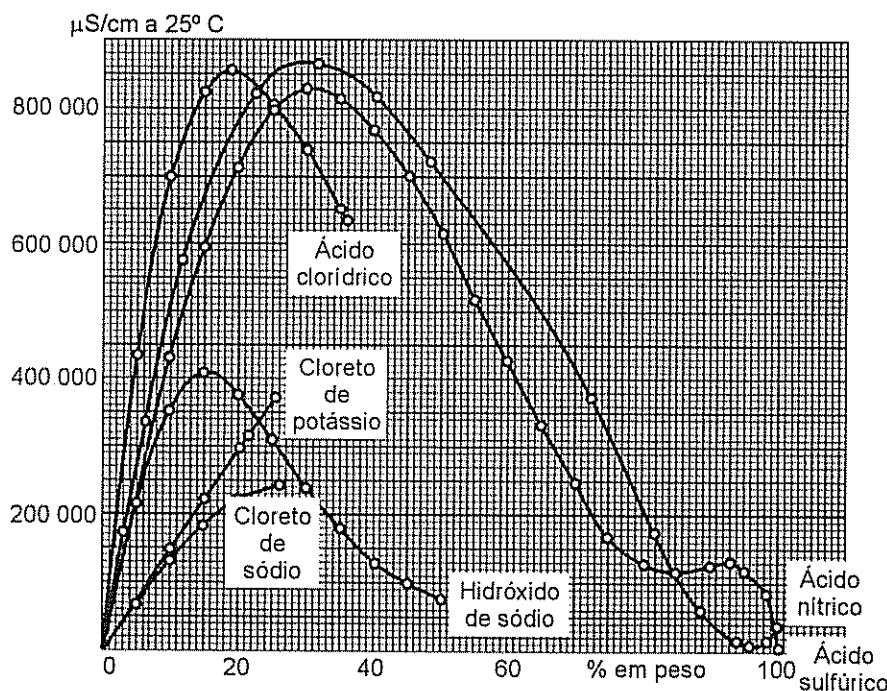


FIGURA 6.39 Variação da condutividade com a concentração (em altas concentrações).

A inversão somente não ocorre quando a solução atinge a saturação da solubilidade antes da perda de mobilidade tornar-se predominante, como no caso do cloreto de sódio e de potássio.

Variação da Condutividade com a Temperatura

O aumento da condutividade com a temperatura, decorrente do aumento da dissociação iônica, deve ser compensado sempre que a aplicação envolva a medição de concentrações ou contaminações.

Devido à dificuldade de se manter a amostra a uma temperatura constante, em aplicações de processo, a compensação é efetuada eletronicamente.

A função de variação depende do produto medido, mas como observamos na tabela 6.6, está normalmente compreendida na faixa de 1 a 3% por grau Celsius, e é aproximadamente linear.

TABELA 6.6
Faixas de Razão de Variação da Condutividade com a Temperatura

Produto	Aumento com a temperatura
Águas emgeral	2%/ $^{\circ}\text{C}$
Sais	de 2,1% a 3%/ $^{\circ}\text{C}$
Ácidos	de 1% a 1,5%/ $^{\circ}\text{C}$
Bases	de 1,8% a 2,2%/ $^{\circ}\text{C}$

Os instrumentos possuem um ajuste ou programação do compensador (*slope*), variável, permitindo acomodar qualquer caso. Quando fornecidos pré-calibrados para medição de concentração de determinado produto, o compensador também deve ser pré-ajustado.

Um caso particular é o da água de alta pureza, cuja variação segue uma função peculiar, não linear. Nos casos onde é necessária uma compensação muito precisa, deve ser usado um instrumento que permita esta compensação.

Quando a aplicação requer a medição da própria condutividade, como no caso do controle da água de resfriamento de sistemas eletrônicos de potência, a condutividade não deve ser compensada, para não falsear o resultado e colocar em risco o equipamento, evitando seu desligamento automático. Nesta aplicação está se avaliando a qualidade da água como isolante elétrico, e qualquer alteração desta deverá ser indicada, independentemente de sua causa.

A Célula de Condutividade

A medição da condutividade baseia-se na intensidade da corrente que circula entre dois eletrodos imersos na solução. O emprego de corrente alternada minimiza os efeitos de polarização (eletrólise). Os eletrodos encontram-se em um sensor denominado célula de condutividade, como a da figura 6.40, conectado ao condutivímetro ou transmissor, como o da figura 6.41, que aplica um potencial aos eletrodos da célula e efetua o tratamento do sinal.

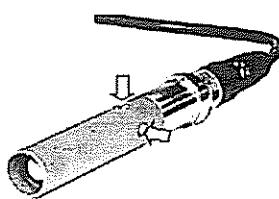


FIGURA 6.40 Uma célula de condutividade. Cortesia: Yokogawa.

O sensor do compensador de temperatura é integrado à célula e, no caso da célula da figura 6.40, se localiza dentro do eletrodo central, que é um cilindro oco, fechado.

Os orifícios assinalados permitem a circulação (renovação) da amostra no interior da célula, evitando que uma mesma porção do fluido fique aprisionada em seu interior. Evitam também o aprisionamento de ar.

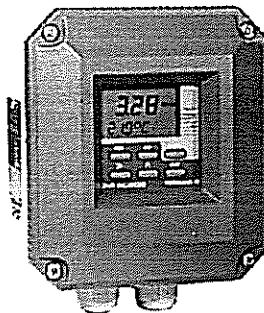


FIGURA 6.41 Um condutivímetro. Cortesia: Yokogawa.

Alguns condutivímetros permitem a conexão de duas células e fornecem leituras independentes ou diferenciais. Os eletrodos da célula são fabricados em diversos materiais, para atender aos diversos fluidos, dentre eles o aço inox e o grafite. O sensor do compensador de temperatura é integrado na célula.

É prática comum estender o alcance do instrumento alterando-se a geometria da célula. A célula passa, então, a ter um fator diferente de 1. Conectado a uma célula de fator 100, por exemplo, as leituras do transmissor devem ser multiplicadas por 100, a menos que a sua programação já inclua este fator.

Da mesma forma, a medição de uma água tratada, na faixa de 0 a 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pode ser feita com um condutivímetro com faixa de 0 a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ conectado a uma célula de fator 0,01.

Recomenda-se, para evitar erros de interpretação e problemas na manutenção, que o transmissor traga claramente assinalado o fator da célula ao qual está conectado, e se a indicação é direta ou não. Esta observação também se aplica a possíveis indicadores remotos.

A Célula Indutiva

É empregada nos condutivímetros do tipo *electrodeless* ou "sem eletrodos".

Este sistema permite a medição da condutividade sem que existam eletrodos em contato com a solução.

Opera pelo princípio indutivo, conforme esquematizado na figura 6.42. Uma bobina primária, ou de entrada, induz corrente em um elo da solução a ser medida. Este elo, por sua vez, induz corrente na bobina de saída. A corrente induzida na bobina de saída será inversamente proporcional à perda no elo de solução, sendo que esta perda é função da condutividade.

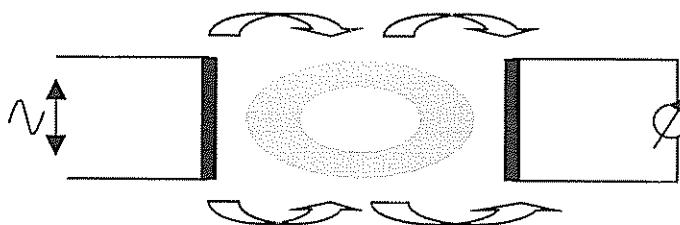


FIGURA 6.42 Sistema indutivo de medição de condutividade.

Sua aplicação requer que a solução apresente uma condutividade mínima, especificada pelos fabricantes. Devido ao seu maior custo e complexidade o uso é recomendado quando as células convencionais não atendem, como na medição de produtos muito agressivos, lamas e polpas.

Células indutivas ou toroidais são vistas na figura 6.43.

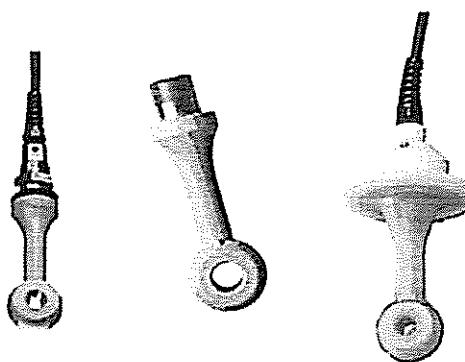


FIGURA 6.43 Células de condutividade toroidais. Cortesia: Yokogawa.

A Calibração

Pode ser realizada utilizando-se soluções de valores conhecidos, preparadas em laboratório, mas encontramos problemas em baixas condutividades devido à extrema facilidade com a qual as soluções se contaminam. Na faixa de alguns $\mu\text{S}/\text{cm}$ a simples dissolução de gás carbônico da atmosfera eleva rapidamente a condutividade, sem se considerar os efeitos de outros poluentes e resíduos existentes na célula retirada do processo.

É mais interessante o uso de soluções "quaisquer", sem preocupação com seu valor absoluto, ou o uso da própria solução do processo, efetuando a comparação direta com um instrumento portátil ou de bancada de qualidade, previamente aferido.

6.4.5 Outros Analisadores no Tratamento de Água

Além dos analisadores de oxigênio dissolvido, citados no final do item 6.3.1, alguns outros analisadores merecem menção devido à sua importância em instalações de tratamento de água e efluentes.

Turbidímetros

A turbidez é consequência do teor de sólidos em suspensão em um líquido, por vezes medida pela massa destes, expressa em p.p.m.

O fenômeno é essencialmente subjetivo, pois baseia-se na sensação provocada no observador. Dependendo do tamanho, cor e refletividade das partículas em suspensão, uma solução pode provocar uma sensação de turbidez maior que outra, embora o teor de sólidos em suspensão seja menor na primeira.

A medição é baseada em princípios ópticos, na faixa da radiação visível, para que apresente coerência com a percepção humana. Mede-se a luz difundida pelas partículas em suspensão, como no instrumento da figura 6.44.

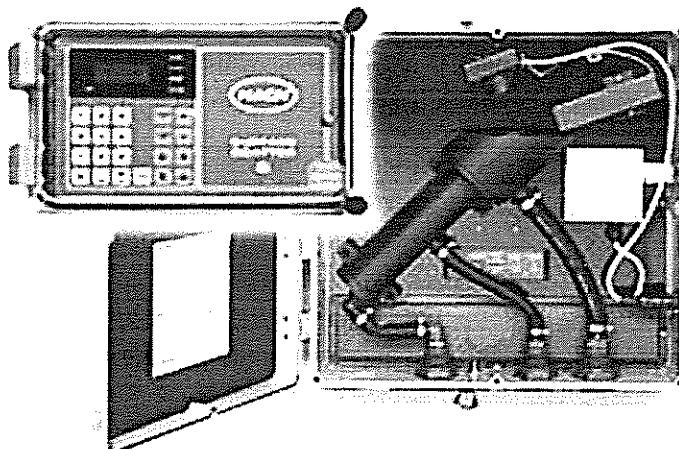


FIGURA 6.44 Um turbidímetro. Cortesia: Hach.

Neste instrumento a difusão da luz se dá na superfície, como esquematizado na figura 6.45.

Além da medição em p.p.m., são empregadas unidades como o N.T.U. (*Nephelometric Turbidity Unit*), o J.C.U. (*Jackson Candle Unit*) e o F.T.U. (*Formazine Turbidity Unit*). As diferentes unidades não são a princípio interconversíveis, pois são baseadas em diferentes padrões arbitrados.

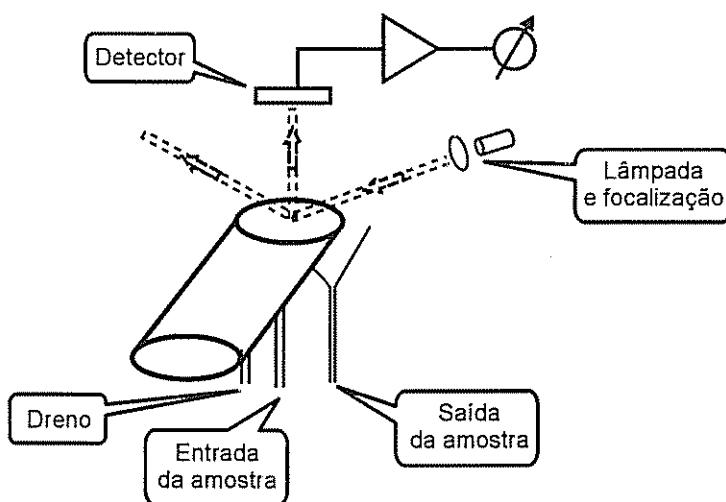


FIGURA 6.45 Princípio do espalhamento (difusão) da luz na superfície líquida.

A medição contínua da turbidez é essencial no tratamento da água potável, e também na indústria de bebidas. Eventualmente, é utilizada no tratamento de efluentes, existindo hoje instrumentos que permitem até a medição em lodos.

Alguns casos de monitoração de contaminação em processos têm sido resolvidos através da medição da turbidez.

Analisadores de Cloro Residual Livre e Combinado

Quase todo o tratamento de água potável emprega a cloração, devido a seu poderoso efeito de desinfecção, proporcionando ainda efeito residual. A reação do cloro com a água resulta na formação de ácido hipocloroso e de íons hipoclorosos.

Na presença de compostos nitrogenados, ocorre também a formação de cloraminas.

A manutenção de um pequeno teor residual de cloro (ordem de ppm) é essencial. Teores elevados são prejudiciais.

Os analisadores de **cloro residual livre** medem o cloro presente na forma de ácido hipocloroso e de íons hipoclorosos.

Os analisadores de **cloro residual combinado** medem o cloro presente na forma de cloraminas.

Os analisadores de **cloro residual total** medem o residual livre somado ao combinado. Estes são instrumentos de maior custo, e sua operação requer um suprimento de reagente apropriado.

A figura 6.46 apresenta ambos os tipos de analisadores.

É conveniente um estudo do processo para a correta especificação do tipo de analisador, pois ocorre o uso de analisadores de cloro residual total, quando o processo requer apenas a medição do residual livre, e vice-versa.

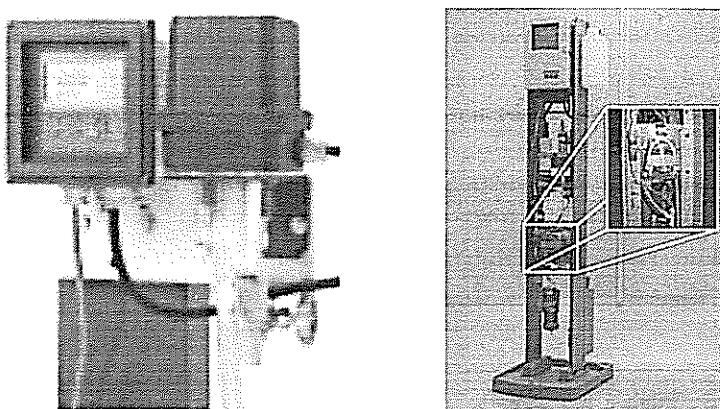


FIGURA 6.46 Analisadores de cloro residual livre à esquerda (Cortesia: Yokogawa) e combinado à direita (Cortesia: DKK-TOA).

Silicômetros

É importante a monitoração do teor de sílica na água de alimentação das caldeiras. Como a mesma se distribui entre as fases líquida e vapor, causa prejuízos e até acidentes graves, não só à própria caldeira, mas também aos equipamentos por ela alimentados, em particular às turbinas. O acompanhamento pode ser feito pelo laboratório, mas tem-se difundido o uso de analisadores em linha.

Existem determinadas análises que são realizadas rotineiramente no laboratório, empregando metodologia clássica que envolve o emprego de reagentes, e a posterior determinação dos resultados por métodos colorimétricos, titulométricos e outros.

Quando pretendemos realizar a mesma análise "em linha", podemos nos defrontar com a inexistência de um analisador usual apropriado.

Um exemplo é justamente a determinação do teor de sílica na água, pois a sílica não apresenta propriedades físicas distintas (ópticas, magnéticas, elétricas, térmicas, etc.) que permitam a aplicação de um analisador convencional. O condutivímetro, sempre presente, reage a produtos iônicos e, portanto, não acusa a presença da sílica.

Para solucionar estes casos, existem instrumentos denominados auto-analisadores. Eles executam, de modo automático, a análise, seguindo a mesma metodologia do laboratório. Reservatórios internos suprem os reagentes necessários.

O silicômetro é um auto-analisador que efetua a análise contínua da amostra. De uma primeira reação com o molibdato de amônio resulta um complexo de cor amarelada. Em seguida, o ácido oxálico suprime a interferência provocada por fosfatos possivelmente presentes, e uma reação final de redução resulta numa coloração azul, proporcional ao teor de sílica presente. Esta cor é medida por um fotômetro.

Um instrumento é visto na figura 6.47 e a seqüência analítica descrita acima é apresentada no diagrama da figura 6.48.

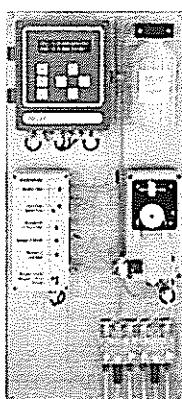


FIGURA 6.47 Um silicômetro com seletor para seis pontos de amostragem.
Cortesia: *Swan Analytical Instruments*.

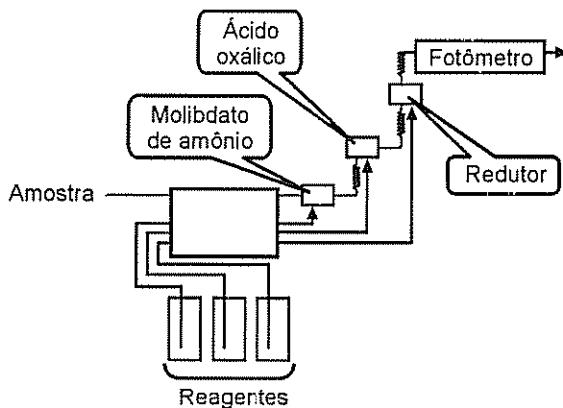


FIGURA 6.48 Diagrama de um silicômetro.

6.5 CROMATÓGRAFOS

Os cromatógrafos de processo são analisadores que permitem a determinação qualitativa e quantitativa de vários componentes de uma amostra, bastando que o instrumento esteja configurado para os componentes e faixas de concentração a serem analisados.

A separação dos componentes se processa numa coluna cromatográfica. Trata-se de um tubo que contém em seu interior um material, a fase estacionária, e é percorrido continuamente por um fluido, a fase móvel.

Uma pequena porção da amostra é injetada na coluna, e as forças que interagem entre os componentes da amostra, a fase estacionária e a fase móvel, determinam a velocidade de propagação das moléculas dos diferentes componentes, e, portanto, seu tempo de eluição, que é o tempo que cada componente leva para atravessar a coluna, a partir do momento da injeção.

Um detector apropriado, instalado na saída da coluna, gera um sinal elétrico em função dos componentes que eluem da coluna.

A identificação dos componentes se faz pelo tempo de eluição, pois para um determinado tipo de coluna, mantidas constantes a temperatura, o gás, a vazão da fase móvel e o volume injetado, um determinado componente eluirá sempre no mesmo tempo.

O sinal do detector, correspondente a cada componente, proporciona a informação quantitativa. Nos modernos cromatógrafos microprocessados, a identificação dos componentes e suas concentrações são apresentadas em uma interface local, existindo também interfaces de comunicação com micros PC compatíveis, PLC's e outros sistemas digitais de controle.

Aplicando-se o sinal do detector a um registrador, obtém-se o cromatograma, uma sequência de picos, como mostrado na figura 6.49, cada um dos quais corresponde a um componente, sendo suas áreas proporcionais à concentração dos respectivos componentes.

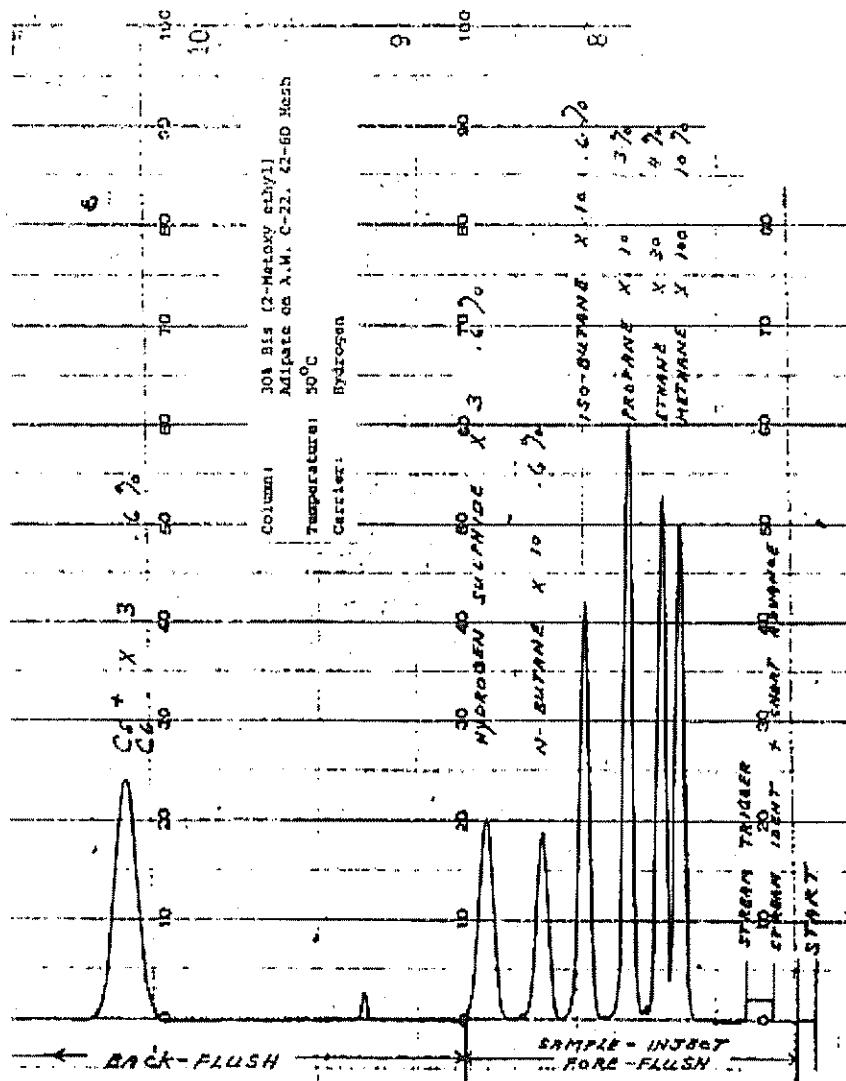


FIGURA 6.49 Cromatograma

A adequada separação de todos os componentes (resolução) depende do correto dimensionamento de todo o sistema, e em particular das colunas, sendo o cromatógrafo de processo montado de acordo com as especificações fornecidas.

O tempo necessário para completar uma análise depende do tempo de eluição do último componente. Nos processos em que o tempo de resposta é fator crítico, devemos limitar a análise aos componentes realmente essenciais.

6.5.1 O Cromatógrafo a Gás

A fase móvel pode ser um gás ou um líquido, e em função dela o cromatógrafo se denomina "a gás" ou "a líquido".

Na tabela 6.7 observamos que a cromatografia a gás permite a separação de componentes de misturas gasosas e líquidas que podem apresentar pesos moleculares da ordem de até 800, o que satisfaz a todas as aplicações usuais de processo.

TABELA 6.7
Utilização dos Cromatógrafos

Produto a ser analisado	Cromatografia gasosa separa?	Cromatografia líquida separa?
Gases	Sim	Alguns
Líquidos voláteis	Sim	Sim
Sólidos voláteis	Sim	Sim
Sólidos não voláteis	Não	Sim
Produtos iônicos	Não	Sim

A cromatografia líquida é usada no laboratório, existindo apenas alguns instrumentos para aplicações especiais de campo.

6.5.2 O Gás de Arraste

O gás empregado como fase móvel é denominado gás de arraste e deve satisfazer às seguintes condições:

- ser inerte com relação à amostra, às colunas e a todos os demais componentes do sistema;
- ser de alta pureza para não falsear a análise, contaminar as colunas ou causar interferência no detector;
- apresentar segurança no uso.

O hidrogênio, nitrogênio, argônio e hélio atendem a estes requisitos. No Brasil, o preço do hélio, importado, eleva consideravelmente o custo operacional do cromatógrafo e, sempre que possível, deve ser evitado. Quando outro gás único não se mostrar adequado, pode haver solução operando-se o sistema com duplo gás de arraste.

A natureza do gás tem pouca influência na separação dos componentes, mas influi no tempo de eluição. No caso do propano, por exemplo, uma determinada coluna apresenta tempo de eluição aproximadamente 1,5 vez maior operando com argônio, do que operando com hidrogênio.

Os cilindros de gás devem ser instalados de modo adequado, respeitadas as normas de segurança. Normalmente, são colocados ao ar livre, do lado externo do ambiente onde se encontram os analisadores, com uma cobertura para proteção dos reguladores e manômetros. Um *header* com cilindro reserva permite a operação contínua e a fácil reposição dos cilindros, e um pressostato pode sinalizar a hora da troca.

A vazão do gás deve ser mantida no valor e dentro da tolerância especificada para o instrumento. Acoplando-se ao cilindro um bom regulador de pressão de dois estágios, o ajuste é efetuado por meio de válvula agulha e rotâmetro incorporados ao painel de controle de gases do cromatógrafo. Existem reguladores eletrônicos de vazão, mas normalmente não são necessários.

6.5.3 O Seletor de Amostras (*Stream Selector*)

Um único cromatógrafo pode analisar sucessivamente amostras provenientes de vários pontos do processo, favorecendo sua relação custo/benefício.

A limitação do número de pontos se dá em função do tempo de resposta exigido, e dos tempos de análise para cada ponto. Esta técnica só não é viável quando se tratarem de amostras de naturezas tão diversas a ponto de exigirem configurações totalmente diferentes do instrumento.

A seleção é feita por meio de válvulas, e o projeto inclui medidas especiais para evitar problemas de contaminação e "volumes mortos".

6.5.4 A Injeção da Amostra

Após o condicionamento, que compreende a limpeza e a adequação da pressão e temperatura, a amostra deve ser injetada na coluna para se iniciar o ciclo de análise.

O volume injetado, geralmente, é da ordem de alguns mililitros para amostras gasosas, e de microlitros para amostras líquidas, devendo ser mantido constante em cada injeção para garantir a repetibilidade da análise. As amostras líquidas são vaporizadas antes da injeção.

Enquanto nos cromatógrafos de laboratório a injeção é usualmente manual, ou semi-automática, nos de processo uma válvula especial, de elevada precisão e durabilidade, se encarrega desta operação. Existem válvulas rotativas, deslizantes (*slide valve*), a pistão (*spool valve*) e de diafragma. O volume de injeção é determinado por um tubo capilar, que pode ser alterado se as condições de operação o exigirem.

No caso de amostras líquidas, é preferível vaporizar as mesmas na própria válvula. O sistema prevê, também, a injeção periódica de um padrão de calibração.

6.5.5 As Colunas

Dentre os muitos tipos de colunas, são mais utilizadas as de fase líquida em suporte sólido de cerâmica ou diatomácea, as de fase sólida com grande área superficial, como as peneiras moleculares, e as de fase sólida sintética (polímeros).

As colunas de peneira molecular têm ótimo desempenho na separação de gases atmosféricos, mas como são sensíveis à água devem operar com uma pré-coluna, como a *porapak*.

As colunas capilares, de uso inicialmente limitado ao laboratório, têm um poder de separação muito superior ao das colunas convencionais, o que pode viabilizar análises complexas.

A evolução tecnológica dos modernos cromatógrafos de processo permite que incorporem colunas capilares quando conveniente.

Colunas empacotadas ou recheadas são construídas com tubos de aço inox de diâmetro compreendido entre 1/16 e 1/2 polegada. Eventualmente, os tubos podem ser de cobre, teflon ou outro material compatível com a amostra e com a temperatura de operação. O comprimento não ultrapassa alguns metros.

Colunas capilares são confeccionadas com tubos de quartzo de grande flexibilidade.

As colunas são enroladas para minimizar o espaço ocupado, e providas de conexões rosadas para facilitar sua montagem e reposição.

6.5.6 Configuração das Colunas

No caso ideal, uma coluna deveria separar adequadamente todos os componentes a serem analisados, num tempo compatível com as necessidades do processo, mantendo o sistema o mais simples possível.

Como isto freqüentemente não ocorre, empregamos artifícios, que são as configurações de colunas, comutadas por válvulas nos momentos adequados. São usados os mesmos tipos de válvulas citadas na injeção da amostra. Muitas configurações são possíveis, tendo as mais comuns denominações no jargão técnico:

- *stripping* – consiste em reverter o fluxo numa coluna, iniciando-se a reversão antes da metade do ciclo, sendo o fluxo reverso eliminado (*back purge to vent*). Isto permite rejeitar frações acima de um determinado peso molecular, eliminar famílias de componentes ou efetuar o *tail cut* que consiste em eliminar um pequeno pico eventualmente encavalado após um pico maior;
- *back flush* – é similar ao *stripping*, porém o fluxo reverso passa pelo detector. Permite medir frações acima de determinado peso molecular, por exemplo C₅₊ (moléculas com mais de cinco átomos de carbono), ou medir uma família de componentes;
- *heart cut* – facilita a análise de traços de componentes que, em sistemas simples aparecem como pequenos picos seguindo picos de grande amplitude. Também é usado para remover interferentes e para reduzir teores antes de injetar componentes em outras colunas.

Colunas duplas estendem a faixa de medição, e sistemas duplicados são usados quando um sistema único se torna demasiadamente complexo, quando a otimização da análise requer injeções de volumes diferentes ou quando se utilizam dois tipos de gás de arraste.

6.5.7 O Forno – Programação de Temperatura

A temperatura de operação das colunas tem forte influência sobre o tempo de eluição, consequentemente, elas devem operar a temperatura constante para garantir a precisão e a repetibilidade da análise. Para tanto, as colunas são montadas em um compartimento aquecido e termicamente isolado, denominado forno.

Para evitar choques térmicos e variações indesejáveis, as válvulas e o detector (ou detectores) também se encontram no interior do forno.

Os fornos são mantidos na temperatura predeterminada de operação por meio de sensores e controladores, com uma precisão mínima de $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, e uma faixa de ajuste da ordem de 50 a $230\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Um sistema de circulação de ar no interior do forno garante a uniformidade da temperatura em todos os pontos de seu interior.

A programação de temperatura, largamente usada nos aparelhos de laboratório, foi incorporada nos cromatógrafos de processo mais sofisticados, aumentando a sua versatilidade. Ela permite variar a temperatura do forno de maneira controlada no decorrer da análise, acelerando a saída de componentes que, de outra forma, eluiriam após um tempo muito grande.

Alguns cromatógrafos com programação de temperatura incorporam um resfriador de ar, permitindo que a programação abranja temperaturas desde $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até mais de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. A temperatura máxima de operação deverá respeitar as limitações das colunas, pois sua vida útil é reduzida quando operadas a temperatura excessiva.

A programação de temperatura permite, ainda, que o cromatógrafo seja empregado para levantar curvas de destilação.

6.5.8 Detectores

Na cromatografia de processo empregam-se, basicamente, três tipos de detectores, embora em casos especiais possam ser usados outros, comuns nos trabalhos de laboratório. Caso necessário, o cromatógrafo pode conter mais de um tipo de detector.

Detector por Condutividade Térmica

Abreviado como D.C.T. ou T.C.D. (*Thermal Conductivity Detector*), é um detector de uso geral, muito empregado devido às suas características de simplicidade e robustez. Essencialmente igual ao sensor empregado nos analisadores de gases por condutividade térmica já descritos, baseia-se no desequilíbrio das temperaturas e, consequentemente, das resistências elétricas, que ocorre nos braços de uma ponte cujos elementos são submetidos, respectivamente, ao gás de arraste e ao efluente da coluna.

Os elementos são filamentos metálicos ou termistores montados em cavidades de um bloco metálico, mantidos à temperatura constante. Quando um componente elui da coluna, altera-se a condutividade térmica do meio que circunda os elementos, alterando a condução de calor entre eles e o bloco, e, portanto, sua temperatura.

Um circuito eletrônico detecta e amplifica o desequilíbrio da ponte. Para que seja aplicável, os componentes a analisar devem apresentar condutividade térmica razoavelmente distinta da do gás de arraste.

Suas limitações são uma faixa dinâmica restrita a umas três décadas, e uma sensibilidade que dificilmente permite medições muito abaixo de 1000 p.p.m.

Detector por Ionização de Chama

É conhecido como D.I.C. ou F.I.D. (*Flame Ionization Detector*). A técnica de ionização de chama proporciona uma maneira muito sensível de se detectar compostos orgânicos.

Quando uma amostra contendo ligações carbono/hidrogênio é ionizada, ligações são rompidas, resultando íons. Estes fecham um circuito elétrico, cuja corrente é medida. Teores abaixo de 1 p.p.m. são mensuráveis.

A amostra é introduzida em um pequeno queimador. O combustível é o hidrogênio, sendo o ar para queima injetado separadamente.

Entre o bico queimador e um eletrodo coletor é mantida uma diferença de potencial, de modo que os íons gerados pelo calor da chama fecham um circuito, no qual circula uma corrente da ordem de 10^{-12} A. Esta corrente é aplicada a um amplificador de alta impedância de entrada, denominado amplificador eletrométrico.

A figura 6.50 apresenta o princípio de um detector F.I.D. e o aspecto do mesmo, cortado.

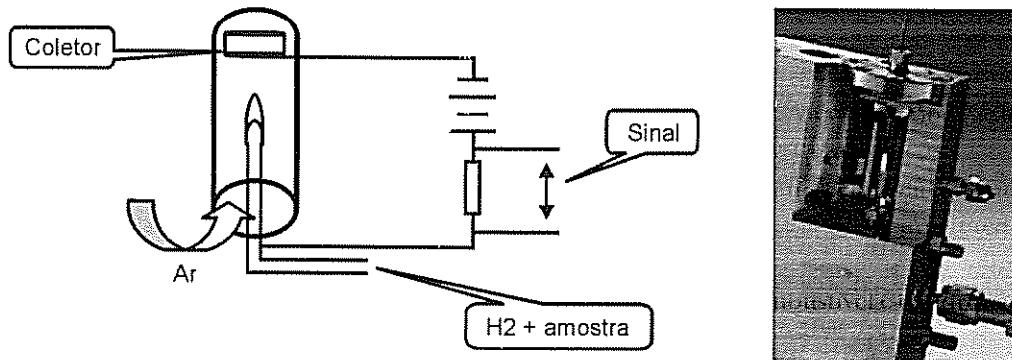


FIGURA 6.50 O detector F.I.D. Cortesia: A.B.B.

A pureza do hidrogênio e do ar de queima é fundamental, pois qualquer impureza poderá ser detectada e interpretada como pertencente à amostra.

Como o instrumento opera freqüentemente em áreas classificadas, tornando impossível sua abertura para acendimento da chama, é incorporado um sistema de ignição remota, por meio de um fio incandescente ou de um faiscador piezoelétrico.

A faixa dinâmica é extensa, sendo comum apresentar linearidade ao longo de seis décadas. O detector opera bem com pequenos volumes de amostra, o que otimiza a separação nas colunas.

Nos detectores por foto ionização, a fonte que proporciona a energia para romper as ligações carbono/hidrogênio, em lugar de uma chama, é a radiação ultravioleta de alta energia (pequeno comprimento de onda), produzida por uma lâmpada apropriada. Este tipo não é de uso normal nos cromatógrafos.

Detector Fotométrico de Chama

É indicado especificamente para a detecção de compostos de enxofre, para os quais apresenta elevada sensibilidade. Os componentes são queimados em uma chama e a radiação resultante é filtrada no comprimento de onda específico de emissão e absorção do enxofre, e depois detectada.

6.5.9 Controlador – Interfaces

Nos antigos cromatógrafos de processo, cuja interface com o operador se limitava ao cromatograma e aos sinais de 4 a 20 mA, a unidade de comando se resumia a um sequenciador, que comandava a operação das válvulas, inclusive as do seletor de amostras, quando existente.

Várias técnicas foram empregadas, dentre elas microchaves atuadas por cames motorizados, programadores ópticos, fitas magnéticas e programadores eletrônicos com componentes discretos ou circuitos integrados digitais.

Com o advento dos microprocessadores, o controlador evoluiu, atingindo uma sofisticação que permite a apresentação numa IHM (Interface Homem-Máquina) do *status* de operação, dos alarmes ativados e do resultado da análise, na forma de listagem de componentes e concentrações. Funções como autodiagnóstico e gráficos de tendências também são disponibilizadas.

Algumas telas de uma I.H.M. estão na figura 6.51.

Também é possível a conexão à redes, o interfaceamento com sistemas digitais de controle e a comunicação por meio de um microcomputador.

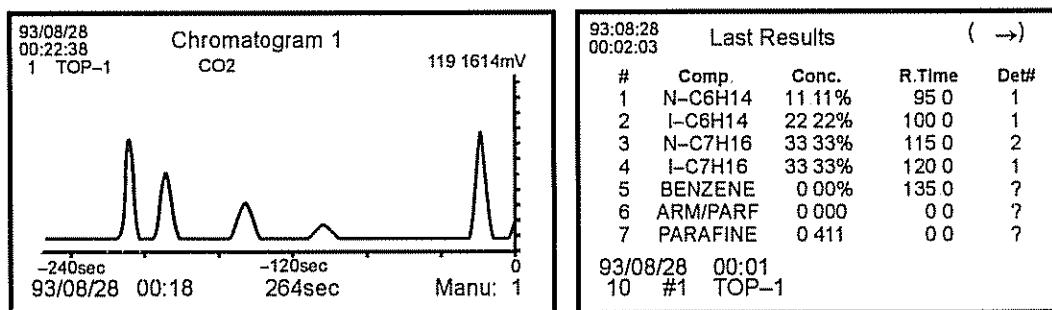


FIGURA 6.51 Algumas telas da I.H.M. de um cromatógrafo. Cortesia: Yokogawa.

A figura 6.52, apresenta os aspectos externo e interno de um moderno cromatógrafo, pressurizado, apropriado para uso em áreas classificadas.

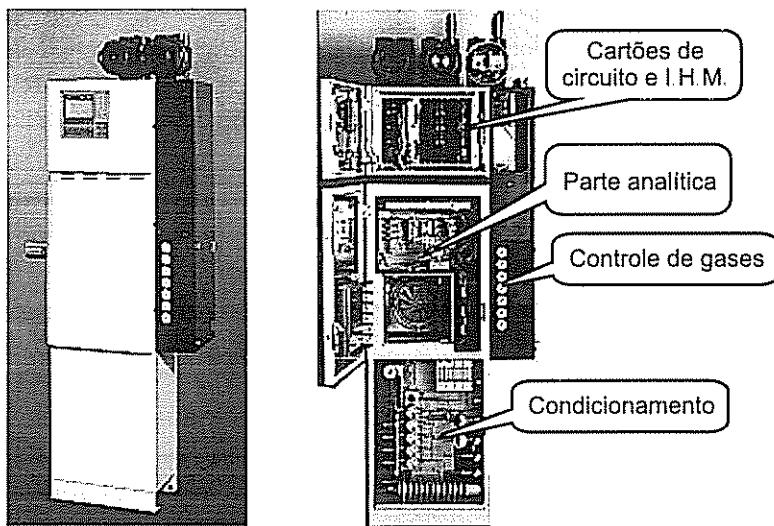


FIGURA 6.52 Cromatógrafo. Cortesia: Yokogawa América do Sul.

No gabinete superior encontram-se os circuitos eletrônicos e a IHM. Na parte central está localizada a parte analítica, compreendendo os fornos isotérmico e programável, colunas e detectores. A parte inferior aloja os filtros de amostra. À direita está instalada a unidade de controle de gases. Como a proteção é Exp., sobre o gabinete, um invólucro à prova de explosão aloja o pressostato de segurança.

6.6. ESPECTRÔMETROS DE MASSA

6.6.1 Introdução

O espectrômetro de massa é um analisador que permite a determinação qualitativa e quantitativa de vários componentes de uma amostra, como ocorre com os cromatógrafos.

Ao contrário destes, porém, seu ciclo de análise é da ordem de segundos, no máximo, e não de minutos. Os espectrômetros de massa não devem ser confundidos com os espectrômetros usuais, que trabalham nas regiões do espectro eletromagnético, pois não apresenta nenhuma semelhança com estes.

O nome advém do fato do resultado da análise, uma distribuição de relações entre massas e cargas, poder ser apresentada de uma forma gráfica que pode ser considerada um espectro. Durante muito tempo limitado ao uso em laboratório, apresenta se hoje como um analisador de processo.

Já existem vários equipamentos operando em plantas em nosso país, tanto na área de processos como na monitoração da presença de produtos tóxicos no ar.

Na área petroquímica, por exemplo, o espectrômetro de massa apresenta uma opção interessante em relação aos cromatógrafos, pois o tempo muito curto de análise permite que um espectrômetro analise um número elevado de pontos do processo.

6.6.2 Princípio de Operação

O diagrama de blocos da figura 6.53 apresenta o princípio de funcionamento de um espectrômetro de massa.

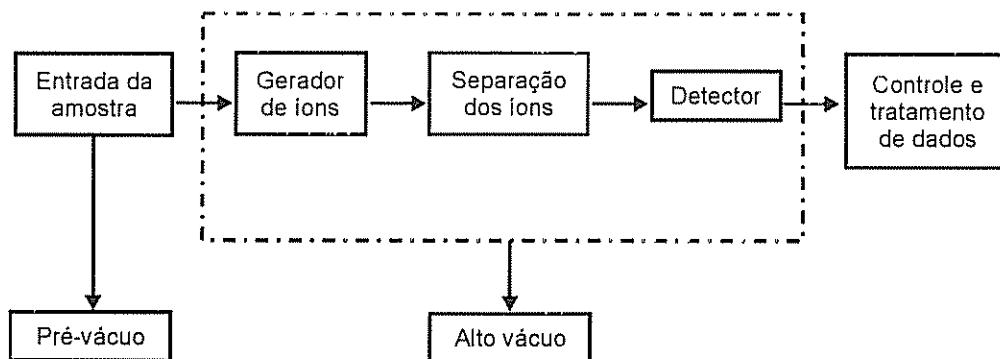


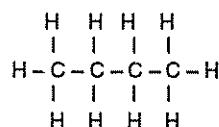
FIGURA 6.53 Diagrama em blocos de um espectrômetro de massa

Moléculas da amostra são introduzidas em uma câmara sob alto vácuo e bombardeadas com elétrons para provocar sua ionização.

A seguir as diferentes espécies iônicas ou *frações*, como são chamadas na espectrometria, são separadas em função da relação entre a sua massa e sua carga elétrica, e detectadas.

Em função das frações e da quantidade relativa de cada fração detectada, o sistema de tratamento de dados fornece informação qualitativa e quantitativa sobre os componentes da amostra.

Tomemos como exemplo o butano, de fórmula molecular C_4H_{10} , e massa molecular $(12 \times 4) + (1 \times 10) = 58$. A fórmula estrutural de butano é:



A ionização do butano no espectrômetro resulta em 28 *fragmentos* ou íons diferentes.

Cabe aqui alertar que em diferentes fontes podemos encontrar informações divergentes com relação ao número de fragmentos gerados por determinado produto, pois dependendo da resolução do instrumento empregado, alguns fragmentos podem não ser detectados, ou ser considerados desprezíveis para fins analíticos normais.

Os dados aqui apresentados para o butano são fornecidos pelo Instituto Max-Planck na Alemanha. A quantidade relativa ou *abundância* dos diferentes fragmentos varia muito. No caso do butano a relação do menos abundante para o mais abundante é da ordem de 1:1000.

Confeccionamos um gráfico, no qual o eixo vertical representa a abundância em relação ao *ion mais abundante*, que chamamos de *pico base*, e o eixo horizontal representa as relações carga/massa. Este gráfico é o *espectro de massas* do butano.

No gráfico da figura 6.54 representamos apenas alguns dos 28 fragmentos. Outro pico importante é o pico correspondente ao *ion molecular*. Este se forma sem quebra da molécula, pela perda de um elétron pertencente a um átomo de carbono, elétron este que não participa de nenhuma ligação.

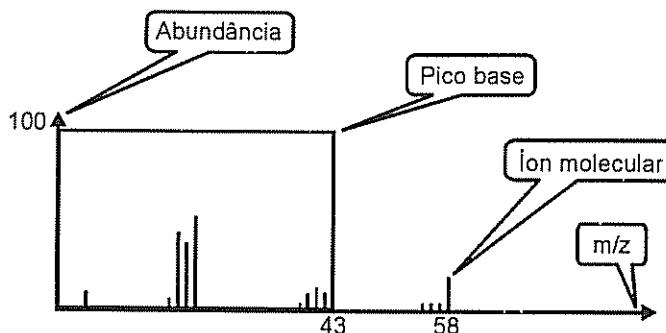


FIGURA 6.54 Espectro parcial de massas do butano

Um espectrômetro de massa moderno é visto na Figura 6.55.

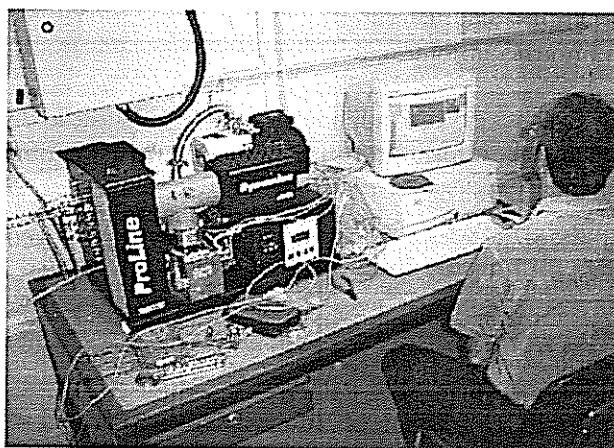


FIGURA 6.55 Configurando um espectrômetro de massa. Cortesia: Ametek/I.M.E.

O instrumento da figura 6.55 é compacto e totalmente modular, e inclui um seletor de amostras com 16 pontos.

6.6.3 Aplicações

O reduzido tempo gasto para executar uma análise permite que um único espectrômetro de massa monitore muitos pontos sem apresentar um tempo muito grande para varrer todos os pontos. Isto gera um temor, que é a perda de muita informação em caso de parada do instrumento.

Nos modernos espectrômetros a modularidade, a facilidade de troca dos módulos e o custo acessível dos mesmos resolve esta problema. Dentre inúmeras aplicações citamos:

- análise de hidrocarbonetos em plantas petroquímicas, onde um espectrômetro de massa pode substituir muitos cromatógrafos;
- análise da composição e da pureza de gases e misturas gasosas em plantas de separação de ar e usinas siderúrgicas;
- controle de processos de fermentação pela análise dos gases neles gerados (áreas bioquímica e farmacêutica);
- na segurança do trabalho monitorando o ar em muitos pontos da planta para a detecção, em nível de p.p.m. ou mesmo p.p.b. de gases e vapores muito tóxicos e/ou carcinogênicos como o benzeno e o cloreto de vinila.

6.7 VALIDAÇÃO E DIVERGÊNCIAS COM O LABORATÓRIO

A importância crescente das medições analíticas e o atendimento à ISO 9000 e 14000 torna fundamental sua validade. Por maior que seja a suposta confiabilidade de um analisador, seu resultado tem que ser validado pelo laboratório da planta.

Em muitos casos, surgem divergências maiores ou menores entre os resultados apresentados pelo analisador em linha e pelo laboratório, e estas divergências devem ser elucidadas.

Excluindo-se simples casos de funcionamento incorreto do analisador no campo, resolvidos com a correta especificação e instalação, e com uma manutenção preventiva e corretiva adequadas, outras causas podem surgir. Listamos as mais comuns:

- diferenças de metodologia entre a medição em linha e a do laboratório, por exemplo, nas medições de amostras gasosas em base seca e base úmida;
- diferenças entre os sensores empregados no campo e no laboratório. O sensor "universal" não existe;
- erros na coleta e no transporte das amostras. Alguns casos traiçoeiros são os da condutividade da água de alta pureza e o de reações que continuam se processando após a coleta, como algumas reações de oxi-redução;
- efeitos da vazão (velocidade) de líquidos sobre os sensores;
- erros na interpretação do significado da compensação de temperatura nas medições de pH e condutividade;
- variação da pressão na saída (*vent*) de analisadores de gases e de cromatógrafos. O efeito geralmente pode ser compensado automaticamente, mas este recurso é raramente implementado;

- presença de interferentes cuja influência sobre os instrumentos de campo e de laboratório não são iguais;
- alterações introduzidas pelo condicionamento das amostras no campo.

A solução das divergências pode ser trabalhosa, mas um sólido conhecimento dos aspectos instrumentais e químicos envolvidos, somado a uma boa dose de paciência, sempre levam a um resultado satisfatório, que, no pior caso, será uma correlação ou um fator de correção entre os resultados.

6.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme já mencionado, além dos equipamentos abordados neste capítulo existem hoje instrumentos dedicados à medição de praticamente todas as variáveis analíticas. Citamos alguns:

- medidores de umidade em gases, líquidos e sólidos;
- densímetros, viscosímetros, refratômetros e polarímetros;
- analisadores de destilação, índice de cetanas e de octanas, teor de enxofre e outros, específicos da área de petróleo e petroquímica;
- analisadores de alcalinidade, consistência, alvura e outros, dedicados à área de celulose e papel;
- no controle ambiental – analisadores de particulados (por opacidade e eletrostáticos) e de outras emissões poluentes. Aqui se incluem sistemas especiais para reduzir o erro na medição de NO_x e SO₂ a níveis de p.p.m.;
- detectores de gases e vapores explosivos e tóxicos destinados à segurança do trabalho e patrimonial.

Também despontam os analisadores virtuais, nos quais um programa baseado em lógica de redes neurais é "treinado" para fornecer o valor de variáveis analíticas, a partir de outras variáveis de mais fácil medição.

7

TRANSMISSORES

ENGº PEDRO ESTÉFANO COHN

7.1 CONCEITOS

Os primeiros instrumentos usados nos processos tinham função meramente supervisória, o que significa que somente permitiam a leitura da variável.

A indicação era local, e o controle, quando existente, era manual, como na figura 7.1.

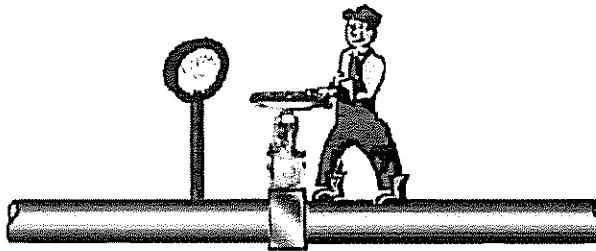


FIGURA 7.1 - Instrumento com indicação apenas local

O surgimento dos primeiros controladores, e a adoção da supervisão e do controle centralizados em uma sala própria, a *sala de controle*, tornaram necessário o envio à distância de um sinal proporcional à variável medida, ou seja a *transmissão do sinal*.

Quando se tornou generalizado o emprego da instrumentação pneumática, o sinal padrão adotado foi a variação da pressão do ar na faixa de 3 a 15 p.s.i. (pounds square inch ou libras por polegada quadrada).

Entre nos, para evitar conversões fracionárias de unidades, a faixa usada era de 0,2 a 1 kgf/cm² ou de 0,2 a 1 bar (20kPa a 100 kPa na unidade do sistema métrico).

Algumas malhas pneumáticas ainda se encontram em operação, e o sinal pneumático continua sendo empregado na atuação de válvulas de controle.

Com o advento da instrumentação eletrônica, analógica, ainda largamente usada, foi padronizada a transmissão de sinais na forma de corrente contínua, na faixa de 4 a 20 mA.

7.2. O TRANSMISSOR – DEFINIÇÃO

Entendemos por transmissores ou conversores os instrumentos que convertem o sinal de um transdutor ou sensor em um sinal padrão para ser enviado à distância. Consideraremos aqui somente os transmissores eletrônicos.

No caso de transdutores passivos, como a célula capacitiva para medição de pressão, o transmissor também compreende os circuitos necessários para converter a variação do parâmetro capacitância em um sinal elétrico. Outras funções de tratamento dos sinais, como a filtragem e a linearização são também incorporados ao transmissor.

7.3. ALIMENTAÇÃO

A alimentação dos transmissores pode ser a quatro, dois ou três fios.

7.3.1 Alimentação a Quatro Fios

Nos transmissores a quatro fios a alimentação é efetuada com 110/115/127 ou 220/240 volts, em corrente alternada, e um par independente de terminais fornece o sinal de 4 a 20 mA. Transmissores a quatro fios podem incorporar reles de alarme.

Esta a técnica mais antiga, é ainda empregada, principalmente nos instrumentos que requerem potências relativamente elevadas. Sua desvantagem é o maior custo de instalação, pois requer fiações independentes para a alimentação e para o sinal.

Há também a questão da segurança, pois expõem o pessoal de manutenção a tensões potencialmente perigosas, e não permite o emprego da técnica da segurança intrínseca. Além disto, uma inversão entre a fiação de alimentação e de sinal pode causar danos graves.

7.3.2 Alimentação a Dois Fios

Nos instrumentos a dois fios, de baixo consumo de energia, a alimentação é proporcionada pelo próprio sinal de 4 a 20 mA. A tensão nominal de alimentação é de 24 volts, corrente contínua.

Para emprego em áreas classificadas os transmissores podem ser intrinsecamente seguros. Normalmente se exige que a saída de corrente do transmissor seja isolada galvanicamente.

Isto evita problemas quando a malha apresentar mais de um ponto de aterramento, como no caso de termopares aterrados no poço. Não estando disponível saída isolada, um isolador galvânico pode ser instalado separadamente.

É importante observar que a impedância dos receptores conectados ao transmissor, somados à dos cabos, não pode ultrapassar o valor máximo especificado pelo fabricante, sob pena de falsear o sinal de saída.

7.3.3 Alimentação a Três Fios

Pouco empregada, a alimentação a três fios é um artifício que permite que instrumentos com exigências de potência maiores que aquela disponível no sistema a dois fios sejam alimentados com uma fonte “padrão” de 24 volts, do tipo empregado nos sistemas a dois fios.

Um exemplo são alguns detectores de gases inflamáveis.

A conexão é efetuada como na figura 7.2 ou na figura 7.3.

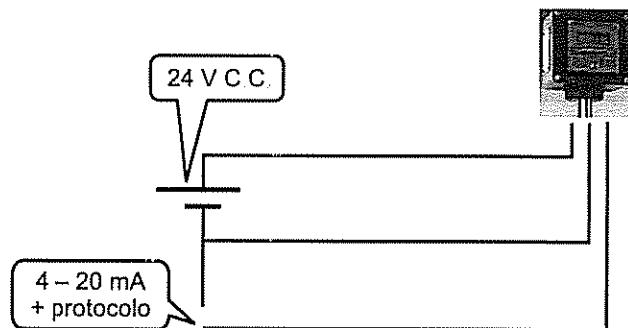


FIGURA 7.2 Alimentação a três fios com fonte na sala de controle. Cortesia: Dräger

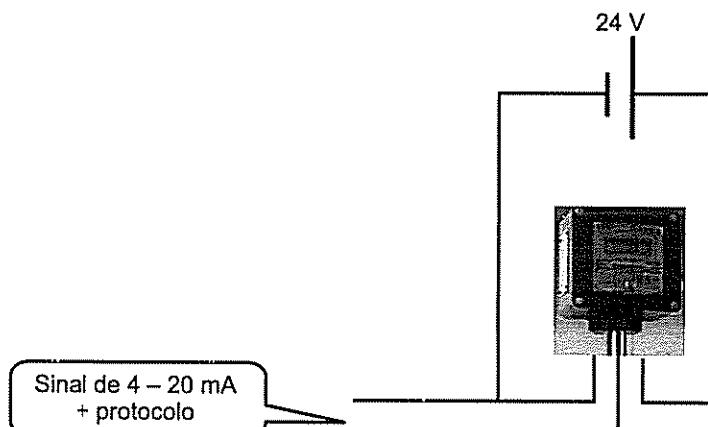


FIGURA 7.3 Alimentação a três fios com fonte no campo.

7.4. PROTEÇÃO

Conforme descrito no capítulo 8, os transmissores podem ou não apresentar proteção para utilização em uma área classificada, além da proteção segundo a classificação I.P.

Alguns transmissores fabricados em larga escala, como os das figuras 7.5, 7.6 e 7.7, são disponibilizados apenas em versão Ex certificada, e elevado grau de proteção I.P. Outros, como o da figura 7.4, para emprego em condições menos severas, apresentam custo bem menor.

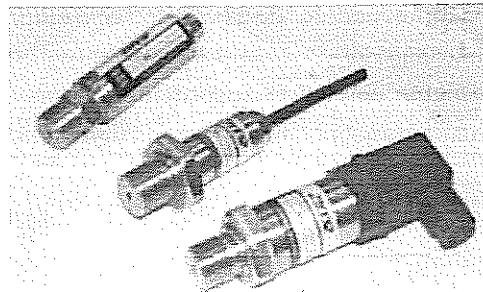


FIGURA 7.4 Transmissores para uso em condições pouco severas

Os transmissores são normalmente providos de ferragens para montagem em pedestal de duas polegadas ou sobre uma superfície. Eventualmente pode ser possível a montagem em painel.

7.5. A INDICAÇÃO LOCAL

Os transmissores podem ser cegos (sem indicação local), ou dotados de indicação local analógica ou digital. Os três tipos são vistos na figura 7.5.

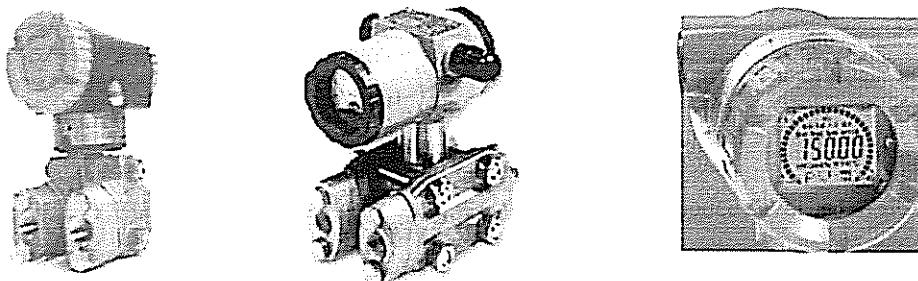


FIGURA 7.5 A partir da esquerda, transmissor cego, com indicação analógica e com indicação digital

Muitos transmissores cegos, como o da figura 7.5, podem facilmente receber um módulo indicador local. Outros, como os da figura 7.4, não permitem o acréscimo de um indicador.

A tendência atual de operar as unidades industriais sem manter pessoal no campo, aliada à facilidade da comunicação digital remota, favorece o emprego dos transmissores cegos.

Uma desvantagem da indicação digital, para visualização rápida e aproximada no campo, é que ela não proporciona a visualização “posicional” de um ponteiro. Torna também muito difícil avaliar a rapidez com que uma variável está mudando.

Este problema foi resolvido conjugando-se à indicação digital numérica um *bar graf*, como no transmissor visto a direita da figura 7.5. Outras informações podem também ser apresentadas. Os indicadores locais digitais empregam usualmente LEDS (diodos emissores de luz) ou cristais líquidos.

Os primeiros são de visualização difícil sob luz intensa, enquanto que os segundos podem sofrer danos sob incidência prolongada de radiação solar. Quando estas situações possam ocorrer, os fabricantes devem ser consultados, e devem ser tomados os cuidados recomendados.

7.6. CONEXÃO AO SENSOR OU TRANSDUTOR

O sensor pode estar localizado a uma certa distância (geralmente pequena) do transmissor, ou pode estar acoplado diretamente ao mesmo, como é o caso do poço de termopar da figura 7.6.

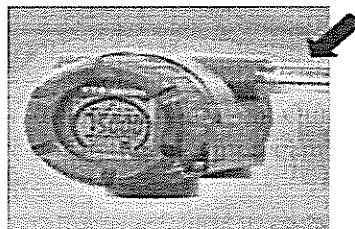


FIGURA 7.6 Termopar em poço, acoplado diretamente a um transmissor de temperatura
Cortesia: Yokogawa.

A possibilidade de realização deste tipo de montagem depende do posicionamento físico, que não deve impedir a visualização do indicador local, e do limite máximo de temperatura admissível para o transmissor. Nos transmissores de pressão como o da figura 7.7, o sensor se encontra no interior do corpo do transmissor, que é montado diretamente sobre o *manifold*.

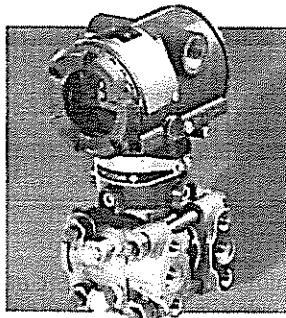


FIGURA 7.7 Transmissor de pressão com sensor interno. Cortesia: Yokogawa.

7.7. SINAIS DE SAÍDA

Além do já citado sinal de corrente de 4 a 20 mA, corrente contínua, mantido até hoje, a faixa de 10 a 50 mA foi introduzida por um fabricante, mas não frutificou, e foi logo abandonada. A faixa de 0 a 20 mA é empregada na Alemanha e em alguns outros países. Não é usada entre nós, e apresenta desvantagens. Não é compatível com instrumentos a dois fios, pois é impossível alimentar um transmissor com corrente zero, ou muito próxima de zero. Além disto não tem "zero vivo", não permitindo distinguir entre um valor da variável no início da faixa e uma falha geral do sistema.

Muitos receptores requerem sinal de entrada de 1 a 5 volts, corrente contínua, o que se obtém facilmente circulando a corrente de 4 a 20 mA por um resistor padrão de $250\ \Omega$ como na figura 7.8.

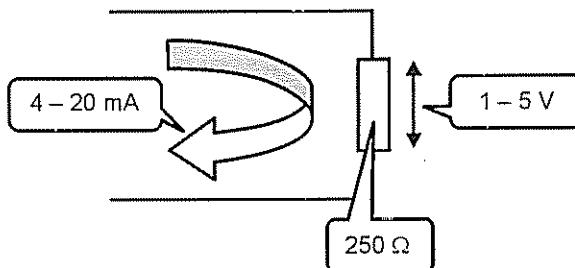


FIGURA 7.8 Conversão de sinal de corrente em tensão.

Muitos transmissores modernos apresentam comunicação digital por meio de pulsos que são superpostos ao sinal de 4 a 20 mA. Os principais protocolos de comunicação bidirecional, usando barramentos de campo, são o H.A.R.T., o Foundation Fieldbus e o Profibus.

7.8. TRANSMISSORES E CONVERSORES

Os termos transmissor e conversor são usualmente empregados como sinônimos, mas pode haver uma distinção entre eles. Na medição de temperatura por meio de termopares, por exemplo, podemos levar os cabos de compensação ou extensão até a sala de controle. Neste caso não necessitamos de um transmissor com invólucro para montagem externa. Ele será instalado em um painel e é freqüentemente chamado de conversor. Estando já localizado na sala de controle poderá apresentar saída em tensão.

As técnicas de miniaturização e encapsulamento permitem a fabricação de conversores que podem ser instalados no interior dos cabeçotes. Neste caso é preciso que a temperatura do cabeçote não ultrapasse a máxima temperatura permitível para o conversor, usualmente da ordem de 50 °C a 70 °C.

O conversor da figura 7.9 é deste tipo, e nada mais é que um transmissor cego que deve ser montado em um invólucro que proporcione uma proteção adicional.

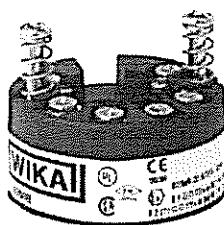


FIGURA 7.9 Um conversor de temperatura para montagem em um cabeçote. Cortesia: Wica.

7.9. TRANSMISSORES INTELIGENTES

Não existe uma definição exata do que seja um transmissor inteligente, mas entende-se que os transmissores inteligentes, micro processados, devem apresentar facilidades como a identificação, a configuração, a calibração e o diagnóstico, local por meio de um comunicador portátil do tipo conhecido como *hand held*, ou remota, e permitir a simples integração a um sistema digital de controle.

O diagrama de blocos da figura 7.10 é típico de um transmissor de temperatura inteligente. A configuração abrange o tipo de sensor, o modo de conexão do mesmo (2, 3 ou 4 fios no caso de um R.T.D.), a faixa de operação, a filtragem e a unidade de leitura/transmissão.

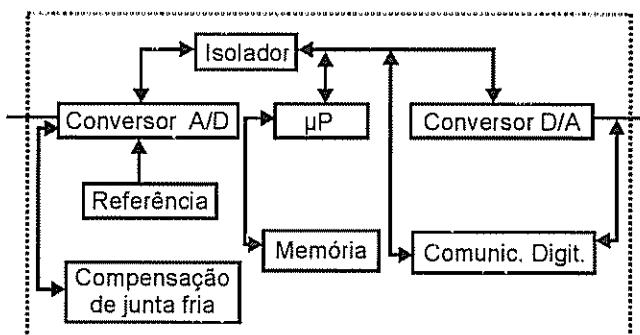
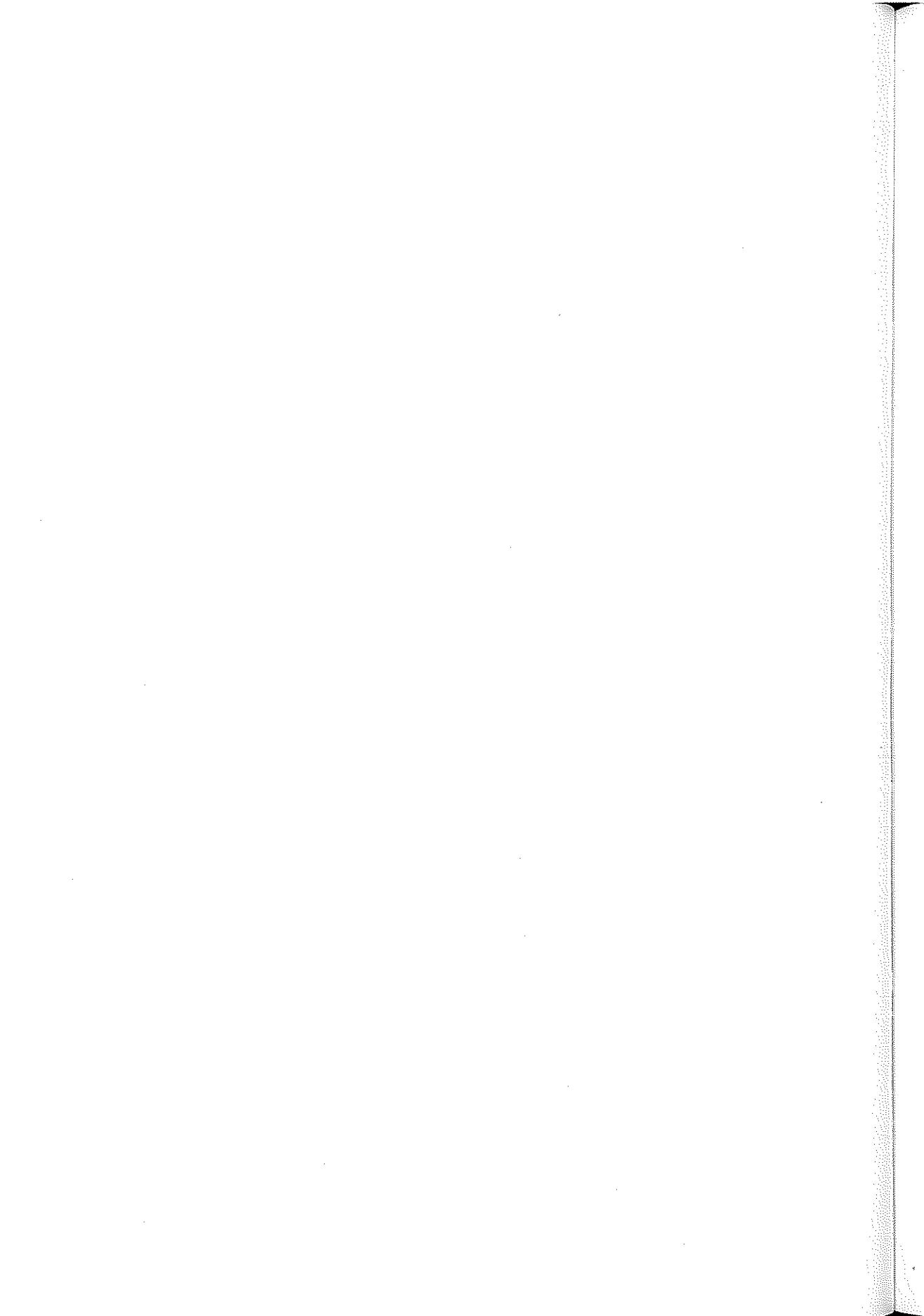


FIGURA 7.10 Diagrama de blocos de um transmissor inteligente

O micro processador executa as funções de linearização, acerto da faixa, filtragem, diagnóstico e conversão de unidades, além de supervisionar a comunicação. A memória não volátil (retém informação na ausência de alimentação) armazena as configurações.

A compensação de junta fria somente é ativada quando o instrumento for configurado para operar com sensor do tipo termopar.

Além do comunicador portátil, a comunicação pode ser efetuada por meio de um micro computador carregado com o devido programa, ou por um sistema digital de controle que suporte o protocolo utilizado.



8

ATMOSFERAS EXPLOSIVAS

ENGº PEDRO ESTÉFANO COHN E ENGº ROBERVAL BULGARELLI

8.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos envolvendo a classificação de áreas e a especificação e a instalação de instrumentos em locais que apresentam riscos de explosão devido à presença de materiais inflamáveis ou gases explosivos.

As seguintes instalações normalmente apresentam a existência de áreas classificadas e, portanto necessitam possuir um plano de classificação de áreas, de forma a mapear as extensões das áreas que apresentam o risco devido a possibilidade de existência de misturas potencialmente explosivas:

- Plataformas *Offshore* para prospecção de petróleo.
- Refinarias de Petróleo.
- Terminais de armazenamento de petróleo e derivados.
- Gasodutos
- Indústrias químicas e petroquímicas (tintas, vernizes, cosméticos, plásticos, resinas, etc.).
- Indústrias farmacêuticas.
- Indústrias Alcooleiras.
- Tanques de armazenamento de combustíveis em navios e aviões.
- Aeroportos.
- Estações de carregamento de caminhões para transporte de produtos químicos inflamáveis ou gases liquefeitos
- Postos de abastecimento de gasolina, álcool, diesel e gás natural veicular (GNV)

É importante ressaltar que devido às responsabilidades envolvidas e às graves consequências de um eventual acidente, todas as etapas e atividades relacionadas com este tipo de instalação de equipamentos elétricos, eletrônicos e de instrumentação em áreas classificadas, devem ser acompanhadas por uma gestão de risco. Desde os estudos de classificação de áreas, passando pela especificação dos equipamentos e o projeto de instalação, incluindo os serviços rotineiros de inspeção, manutenção e reparos, devem ser realizadas por pessoal treinado e qualificado, e em total concordância com as normas técnicas e legislações aplicáveis.

Na área de instrumentação industrial, a preocupação com a elaboração de normas e com a certificação de equipamentos para instalações em atmosferas explosivas ganhou um grande impulso a partir da década de 50, com a crescente utilização de instrumentos eletrônicos, uma vez que, até então, a instrumentação de campo era basicamente pneumática ou eletromecânica.

Os primeiros instrumentos projetados para uso em atmosferas explosivas eram do tipo à prova de explosão, onde os instrumentos eram enclausurados em grandes e pesados invólucros metálicos, que tinham por finalidade conter uma eventual explosão que ocorresse em seu interior.

Ainda hoje encontram-se especificados e comercializados equipamentos com invólucros à prova de explosão. Esta tecnologia e tipo de proteção, entretanto, apresenta uma freqüência de utilização decrescente, sendo gradativamente substituída por tecnologias mais recentes, tais como encapsulamento, segurança aumentada e segurança intrínseca. Técnicas e tipos de proteção mais modernos estão sendo especificados e utilizados, uma vez que proporcionam maior grau de segurança, com menores custos de instalação e de manutenção.

Neste capítulo são apresentadas as principais normas técnicas aplicáveis a instalações em atmosferas explosivas, tais como classificação de áreas, tipos de proteção aplicáveis e procedimentos e requisitos de instalação, inspeção e manutenção neste tipo de instalação de equipamentos elétricos e de instrumentação. Também são apresentadas as designações dos graus de proteção dos invólucros referente às características contra ingresso de materiais sólidos ou poeira e de água em seu interior (índices IP).

8.2 OS COMPONENTES DO RISCO

8.2.1 O Triângulo do Fogo

Para que uma reação química da combustão seja iniciada é necessário que exista a ocorrência simultânea das três partes integrantes desta reação: o combustível, o oxidante e a fonte de ignição.

Considerando a instalação de instrumentos em plantas de processamento, os combustíveis são normalmente representados pelos líquidos, gases, vapores e poeiras que possam se fazer presentes, comuns sobretudo em plantas químicas, petroquímicas e em refinarias de petróleo.

O oxidante, nesta reação físico-química, é representado pelo oxigênio do ar, o qual está sempre presente na atmosfera.

A fonte de ignição é proporcionada por qualquer liberação de energia em quantidade suficiente para iniciar o processo de reação de oxidação. Em certos casos, dependendo da natureza do combustível, a quantidade de energia necessária para detonar a explosão pode ser muito pequena.

Fontes usuais de ignição são normalmente centelhas provocadas por comutação de contatos elétricos, fugas de corrente devido a falhas no isolamento elétrico, curtos-circuitos, queima de fusíveis ou de outros componentes, descargas eletrostáticas, impactos mecânicos ou superfícies quentes.

As condições para ocorrência da combustão, acima descritas, são representadas pelo "Triângulo do Fogo", mostrado na figura 8.1.



FIGURA 8.1 Triângulo do fogo.

Por definição, área classificada é qualquer local onde possam existir combustível e oxigênio em proporções que permitam a formação de atmosfera explosiva, capaz de dar origem a um processo de combustão.

O objetivo fundamental em instalações de sistemas de instrumentação e automação em áreas classificadas é evitar que tais instrumentos se tornem fontes de ignição, ou garantir que, no pior caso, uma eventual explosão que possa ocorrer em seu interior, fique confinada ao interior do invólucro do instrumento ou sistema, não se propagando ao ambiente externo.

8.2.2 Explosividade dos Materiais

Os combustíveis formam misturas explosivas com o ar dentro de determinadas faixas de concentração, que variam de produto para produto. O limite inferior (*LEL – Low Explosive Limit*) e superior de explosividade, correspondem aos limites da faixa de concentração na qual a mistura é explosiva. A tabela 8.1 apresenta os limites de explosividade para alguns gases explosivos.

TABELA 8.1
Limites de Explosividade de Alguns Gases

Gás	Limite inferior*	Limite superior*
Hidrogênio	4%	75,6%
Monóxido de carbono	12,5%	74%
Metano	5%	15%
Propano	2,1%	9,5%
Butano	1,5%	8,5%
Acetileno	2,4%	83%

*@ 20 °C, 1.013 bar – % em volume Fonte: Auer Technikum – 12ª edição.

Os valores numéricos podem variar ligeiramente, dependendo da fonte bibliográfica consultada, devido à diferenças nas condições do ensaio, da metodologia utilizada e da precisão. Na prática, trabalha-se sempre com grandes margens de segurança.

Nos detectores de gases e vapores explosivos, a indicação é normalmente apresentada em "% do LEL" do produto para o qual o detector foi calibrado (usualmente, o gás metano). Assim, 50% LEL metano corresponde à concentração de 2,5% de metano no ar, em volume, ou seja, metade da concentração necessária para que a mistura se torne explosiva.

Com relação à energia mínima capaz de provocar a ignição de uma mistura explosiva, ela varia muito de um produto para o outro. É por esta razão que o risco envolvido em uma instalação localizada numa área onde pode ocorrer vazamento de acetileno ou hidrogênio, é muito maior do que no caso do propano.

A energia de ignição depende também da concentração do combustível no ar. Os valores considerados são sempre para o pior caso (menor energia). Para o hidrogênio, por exemplo, o valor de energia de ignição mostrado na tabela 8.2, corresponde à concentração de, aproximadamente, 27% em volume.

TABELA 8.2
Energia de Ignição para Alguns Gases Explosivos

Gás	Energia de ignição
Acetileno	20 µJ
Hidrogênio	20 µJ
Etileno	60 µJ
Propano	180 µJ

Efeitos indiretos também podem se fazer presentes. O hidrogênio e o acetileno possuem a mesma energia mínima de ignição, mas este último representa maior risco, pois, em contato com o cobre, forma compostos cuja energia de ignição é inferior à do próprio acetileno.

Superfícies quentes são possíveis fontes de ignição. A mínima temperatura de uma superfície capaz de provocar a ignição de um determinado combustível, no ar, é a Temperatura Espontânea de Ignição (TEI). Esta temperatura é determinada experimentalmente, considerando-se normalmente a temperatura ambiente de 40 °C. Não há relação direta entre a temperatura espontânea de ignição e a energia de ignição. Assim, o hidrogênio e o metano têm uma TEI da ordem de 500 °C, embora a energia de ignição do hidrogênio, considerando-se que a fonte de ignição seja um arco ou centelha, seja muito menor que a energia de ignição do metano.

8.3 A NORMALIZAÇÃO INTERNACIONAL – IEC

8.3.1 A Estrutura da IEC e Objetivos da Normalização Internacional Elétrica

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) é a principal organização global que prepara e publica normas internacionais para todos os equipamentos elétricos, eletrônicos e tecnologias correlatas. Estas normas servem de base para normalizações nacionais bem como referência na elaboração de contratos e propostas internacionais.

Através de seus membros, a IEC promove a cooperação internacional sobre todas as questões sobre a normalização internacional e assuntos relacionados, tais como normas para avaliação de conformidade e normalização nas áreas de eletricidade, eletrônica e tecnologias associadas.

A carteira de Normalização da IEC inclui todas as tecnologias na área da eletrotécnica, incluindo eletrônica, magnetismo, eletromagnetismo, eletroacústica, multimídia, telecomunicações e produção e distribuição de energia, bem como as disciplinas gerais associadas, tais como terminologia e simbologia, compatibilidade eletromagnética, medições e desempenho, confiabilidade, projeto e desenvolvimento, segurança e meio ambiente.

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) possui em sua estrutura básica, duas diretorias com poder de decisão: a Diretoria de Normalização e a Diretoria de Certificação de Conformidade. À diretoria de Normalização estão ligadas as gerências do setor industrial e os Comitês Técnicos. À Diretoria de avaliação de Certificação de Conformidade estão ligados os CA's (*Conformity Assessment Schemes*).

8.3.2 A Normalização IEC

As normas internacionais da IEC facilitam o comércio mundial, através da remoção de barreiras técnicas, levando o crescimento econômico a novos mercados. Exemplificando de forma simplificada, um equipamento, instrumento ou sistema de automação fabricado com base nas normas IEC no país A pode ser comercializado e utilizado nos países de B até Z.

As normas IEC são também vitais porque representam o núcleo dos acordos da OMC/WTO (Organização Mundial do Comércio/*World Trade Organization*) nas Barreiras Técnicas para o Comércio (TBT – *Technical Barriers to Trade*). Sobre tais acordos, mais de 100 governos de países membros explicitamente reconhecem que as normas internacionais IEC agem como um papel chave para o incremento da eficiência industrial e para o desenvolvimento do mercado mundial. A quantidade de organismos de normalização (total de 119, em 2002) que têm aceitado o Código de Boas Práticas para a Preparação, Adoção e Aplicação de Normas ISO/IEC apresentadas no Anexo 3 dos Acordos WTO/TBT ressalta a importância e o alcance deste acordo. O Brasil é representado pelo INMETRO neste TBT/WTO – Comitê sobre Barreiras Técnicas para o Comércio da OMC.

As normas IEC fornecem à indústria e aos usuários padrões para a economia de projeto, maior qualidade de produtos e serviços, maior interoperabilidade e melhor eficiência na produção e distribuição. Ao mesmo tempo, as normas IEC também objetivam uma melhoria na qualidade de vida, através da contribuição para a segurança, para a saúde humana e para a proteção do meio ambiente.

8.3.3 Os Objetivos dos Comitês Técnicos de Normalização da IEC e o TC-31

Os objetivos dos Comitês Técnicos de Normalização da IEC são:

- atender eficientemente aos requisitos do mercado global;
- assegurar a primazia e a máxima utilização mundial de sua normalização e esquemas de avaliação de conformidade;

- avaliar e melhorar a qualidade dos produtos e serviços cobertos pelas suas normas;
- estabelecer as condições para a interoperabilidade de sistemas complexos;
- aumentar a eficiência de processos industriais;
- contribuir para o incremento da saúde e da segurança humana;
- contribuir para a proteção e preservação do meio ambiente.

O Comitê Técnico TC-31 da IEC – *Equipment for Explosive Atmospheres*, foi fundado em julho de 1948 e tem o seguinte objetivo e escopo: “Preparar e manter as Normas internacionais referentes aos equipamentos para utilização onde existe o risco devido à possibilidade da presença de atmosferas explosivas de gases, vapores, névoas ou poeiras combustíveis”.

Os equipamentos cobertos por este Comitê Técnico TC-31 são utilizados basicamente nas indústrias de petróleo, gás, química, de plásticos, grãos, farmacêutica, mineração e de carvão, durante a produção, estocagem, processamento, transporte, distribuição e utilização de seus produtos.

O aumento dos níveis de segurança nos ambientes onde atmosferas explosivas possam ocorrer é a preocupação básica do TC-31. Existe, porém também a necessidade de uniformização das práticas técnicas, de gestão e operacionais nestas áreas, de forma a promover o desenvolvimento econômico e o livre comércio.

Aplicações em minas de carvão normalmente possuem requisitos especiais e são freqüentemente sujeitas a requisitos compulsórios nacionais. Muitos países possuem também requisitos compulsórios para equipamentos utilizados em atmosferas explosivas nas indústrias de superfície. Estes requisitos nacionais e regionais em muitos países adotam as Normas do TC-31 do IEC.

As Normas do TC-31 têm assumido uma maior importância nos anos recentes. Muitos países as têm agora adotado na sua totalidade e alguns países definem algumas diferenças nacionais entre elas. Uma significante força motora é o IEC *Ex Scheme*, que utiliza as Normas do TC-31 como base de certificação de conformidade, baseado em ensaios padronizados, estabelecidos nestas normas.

De agora em diante os documentos do TC-31 passam da condição de serem documentos consultivos para serem bases para demonstração de conformidade internacional. O ritmo desta tendência é de acelerar nos próximos anos.

As normas do TC-31 contribuem para operações mais seguras e eficientes na indústria, objetivando a prevenção de perdas de vidas e a preservação do meio ambiente.

Grandes problemas de meio ambiente podem ocorrer como resultado de explosões decorrentes de rupturas de vasos. Como por exemplo, pode-se evitar a explosão de um navio petroleiro e a resultante emissão de materiais devida àquela explosão para o meio ambiente.

O Brasil é um membro do tipo “P” (*Participating*) do TC-31 da IEC, com participação na elaboração, comentários e voto nos ciclos de atualização das normas internacionais sobre atmosferas explosivas.

8.4. A NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA – ABNT

8.4.1 Objetivos e Estrutura da ABNT

Fundada em 1940, a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – é o órgão responsável pela normalização técnica no país. É uma entidade privada, sem fins lucrativos, reconhecida como Fórum Nacional de Normalização – ÚNICO – através da Resolução nº 07 do CONMETRO, de 24.08.1992.

O modelo para elaboração de Normas Técnicas no Brasil então adotado teve como objetivo melhorar os resultados considerados insatisfatórios quando comparados com as necessidades da sociedade brasileira do modelo de normalização vigente até então, excessivamente centralizado.

A ABNT é membro fundador da ISO (*International Organization for Standardization*), da COPANT (Comissão Panamericana de Normas Técnicas) e da AMN (Associação Mercosul de Normalização). A ABNT é a única e exclusiva representante no Brasil da IEC – *International Electrotechnical Commission*.

A Normalização da ABNT possui os seguintes objetivos:

- **Economia** – Proporcionar a redução da crescente variedade de produtos e procedimentos.
- **Comunicação** – Proporcionar meios mais eficientes na troca de informação entre o fabricante e o cliente, melhorando a confiabilidade das relações comerciais e de serviços.
- **Segurança** – Proteger a vida humana e a saúde.
- **Proteção do Consumidor** – Prover a sociedade de meios eficazes para aferir a qualidade dos produtos.
- **Eliminação de Barreiras Técnicas e Comerciais** – Evitar a existência de regulamentos conflitantes sobre produtos e serviços em diferentes países, facilitando assim, o intercâmbio comercial;

O Conselho Técnico é o órgão colegiado, composto pelos Superintendentes dos Comitês Brasileiros (CB), com as atribuições previstas no Estatuto e o funcionamento estabelecido no respectivo Manual. Nos termos da legislação em vigor, têm assento e voto neste Conselho os representantes dos Organismos de Normalização Setorial (ONS), conforme atribuições expressas em convênio próprio.

8.4.2 O CB-03 da ABNT e o COBEI

O âmbito de atuação do CB-03 é a normalização no campo da eletricidade, eletrônica e telecomunicações compreendendo geração, transmissão e distribuição de energia; instalações elétricas e equipamentos eletro-eletrônicos, inclusive para atmosferas explosivas; dis-

positivos e acessórios elétricos; instrumentação; bens de consumo; condutores elétricos; iluminação; compatibilidade eletromagnética, no que concerne a terminologia, requisitos, métodos de ensaio e generalidades.

O COBEI é uma sociedade civil de direito privado, sem fins lucrativos, a qual gerencia as Normas do CB-03 da ABNT. A missão do COBEI é a de mobilizar as empresas e entidades do complexo eletroeletrônico e afins, visando apoiar as atividades de normalização do setor no país.

São os seguintes os objetivos do COBEI:

- mobilizar recursos junto às empresas e entidades do complexo eletroeletrônico e afins para sustentação da sociedade, visando apoiar as atividades de normalização do complexo eletroeletrônico e afins, no País;
- prover de suporte técnico e financeiro às atividades de normalização, disponibilizando recursos materiais e humanos para esse fim;
- incentivar e promover o desenvolvimento e difusão da normalização técnica no País;
- colaborar com as autoridades no estudo e solução dos problemas que se relacionem com a normalização técnica, no âmbito do complexo eletroeletrônico e afins;
- firmar convênios ou contratos com instituições e órgãos governamentais no Brasil ou no exterior, que estejam relacionados com os objetivos sociais da sociedade;
- atuar junto aos órgãos oficiais visando a intensificação do processo de elaboração e revisão de normas técnicas;
- participar de organismos, sociedades, entidades ou associações nacionais e internacionais, governamentais ou privadas, cujas atividades estejam relacionadas aos objetivos sociais da sociedade.

8.4.3 O Subcomitê SC-31 do COBEI – Equipamentos e Instalações em Atmosferas Explosivas

A missão do Subcomitê SC-31 do COBEI é elaborar e manter as normas brasileiras referentes aos equipamentos e instalações onde exista o risco devido à presença de atmosferas explosivas de gases, vapores, névoas ou poeiras combustíveis.

O Subcomitê SC-31 do COBEI é formado por profissionais envolvidos em equipamentos e instalações elétricas em atmosferas explosivas, representantes de cerca de 40 empresas das áreas de consultoria, projeto, instalação, fabricação, laboratórios de ensaios, certificação, seguros, órgãos de classe e indústria siderúrgica, química e petroquímica.

O Subcomitê SC-31 é composto por Comissões de Estudos (CE), organizadas por assuntos e por áreas de especialização técnica, de forma a otimizar a participação dos profissionais e dos recursos humanos envolvidos nos trabalhos. Cada uma das Comissões de Estudos do SC-31 é constituída por um grupo de profissionais envolvidos com equipamentos ou instala-

lações em atmosferas explosivas em seus trabalhos profissionais e com os assuntos técnicos e normativos tratados nas respectivas Normas de trabalho de cada Comissão de Estudo. Atendendo a estatutos da ABNT, na composição das Comissões de Estudos, há a necessidade da participação de profissionais representantes dos segmentos da sociedade: produtores, consumidores e neutros.

Um dos principais objetivos das Comissões de Estudos do SC-31 do COBEI é a elaboração de Normas Brasileiras, baseadas em texto consensado pelos integrantes do grupo, no formato ABNT / NBR - IEC e baseada na respectiva norma IEC, sem desvios. Seguindo orientação da ABNT e a tendência de diversos outros Comitês Técnicos de diversos países, as Normas brasileiras sobre atmosferas explosivas são normas **equivalentes** às respectivas normas IEC, objetivando assim estar alinhado com a normalização técnica internacional.

Tal prática tem por objetivo a incorporação do estado da arte e tecnologia internacional na normalização nacional, bem como facilitar a certificação e aceitação dos produtos nacionais no mercado externo. No caso dos equipamentos com certificação compulsória para atmosferas explosivas, a existência de normas brasileiras equivalentes às IEC facilita também a aceitação relatórios de ensaios normalizados, colaborando nos procedimentos de certificação por parte dos Organismos de Certificação de Produtos, tanto no Brasil como em outros países.

O subcomitê SC-31 do COBEI tem em sua carteira de trabalho, projetos de normas que envolvem, entre outras, a elaboração das Normas NBR IEC sobre terminologia, requisitos gerais, procedimentos de classificação de áreas, procedimentos de instalação, inspeção, manutenção, reparo e revisão de equipamentos e instalações em atmosferas explosivas. As normas sob responsabilidade do SC-31 abrangem também a definição das características técnicas e de desempenho e procedimentos de ensaios dos diversos tipos de proteção dos equipamentos tanto para instalação em áreas de gases como em áreas de poeiras combustíveis, além especificações técnicas e ensaios de graus de proteção de invólucros.

A Normalização Brasileira, através da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), nesta área, possui um grande número de normas aplicáveis ao tema de instalações em atmosferas explosivas, tanto referentes aos diversos tipos de proteção, como a requisitos construtivos gerais e aos procedimentos e requisitos de instalação, inspeção, manutenção e reparos.

A tabela 8.3 apresenta a relação das principais Normas da ABNT sobre equipamentos e instalações em atmosferas explosivas, elaboradas pelo Subcomitê SC-31 do COBEI. O processo de elaboração de novos projetos de normas equivalentes NBR IEC e do ciclo de atualização das normas existente é constante, seguindo os trabalhos efetuados pelo TC-31 da IEC. Por ocasião da publicação deste livro, alguns projetos de normas do Subcomitê SC-31 do COBEI ainda se encontravam em processo de elaboração do texto base ou em fase de consulta pública nacional, através do CB-03 da ABNT. Nos casos de alguma norma NBR IEC ainda não haver sido publicada pela ABNT, é aplicável a respectiva norma internacional IEC.

TABELA 8.3
Principais Normas da ABNT sobre Equipamentos e Instalações Elétricas em Atmosferas Explosivas, elaborada pelo Subcomitê SC-31 do COBEI

Norma	Título
NM IEC 60050-426	Equipamentos para atmosferas explosivas – Terminologia
NBR IEC 60079-0	Equipamentos para Atmosferas Explosivas – Requisitos Gerais
NBR IEC 60079-1	À Prova de explosão: Tipo de proteção Ex "d"
NBR IEC 60079-2	Invólucros com Pressurização ou diluição contínua; Ex "p"
NBR IEC 60079-5	Imersão em areia: Tipo de proteção Ex "q"
NBR IEC 60079-6	Imersão em óleo: Tipo de proteção Ex "o"
NBR IEC 60079-7	Segurança Aumentada: Tipo de proteção Ex "e"
NBR IEC 60079-10	Classificação de áreas – Procedimento
NBR IEC 60079-11	Segurança Intrínseca: Ex "i" – Equipamentos Intrinsecamente Seguros
NBR IEC 60079-13	Construção e utilização de edificações protegidas por pressurização
NBR IEC 60079-14	Instalações em Atmosferas Explosivas – Procedimento
NBR IEC 60079-15	Não Acendível: Tipo de proteção Ex "n"
NBR IEC 60079-16	Ventilação artificial para proteção de casas de analisadores
NBR IEC 60079-17	Inspeção e Manutenção em Atmosferas Explosivas – Procedimento
NBR IEC 60079-18	Encapsulamento: Tipo de proteção Ex "m"
NBR IEC 60079-19	Reparo e revisão de equipamentos em atmosferas explosivas
NBR IEC 60079-25	Segurança Intrínseca: Ex "i" – Sistemas Intrinsecamente Seguros
NBR IEC 60079-27	Segurança Intrínseca: Ex "i" – Field Bus Intrinsecamente Seguro
NBR IEC 60529	Invólucros para equipamentos elétricos – Graus de proteção (IP)
Série NBR IEC 61241	Equipamentos para utilização na presença de poeiras combustíveis
Série NBR IEC 61779	Equipamentos para detecção e medição de gases inflamáveis
NBR IEC 62086-1	Traceamento elétrico resistivo – Parte 1: Requisitos gerais
NBR IEC 62086-2	Traceamento elétrico resistivo – Parte 2: Projeto, instalação e manutenção

A participação do Brasil no bloco macroeconômico do MERCOSUL e em sua normalização técnica AMN (*Asociación Mercosur de Normalización*), propicia os benefícios de integração e padronização de Normas entre os países membros, alinhando-as com a normalização internacional IEC, facilitando a certificação de conformidade, o comércio de produtos e uniformizando os procedimentos de classificação de áreas, instalação, inspeção, reparos e verificação. Quando uma determinada Norma Mercosul (NM IEC) é publicada, equivalente com a respectiva norma IEC, esta norma cancela e substitui as respectivas normas dos respectivos países membros do Mercosul, como é o caso da norma sobre terminologia de equipamentos para atmosferas explosivas (NM IEC 60050-426).

8.5. PLANO DE CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS EM UMA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

8.5.1 - Objetivos do Plano de Classificação de Áreas

Ao se instalar sistemas de instrumentação ou de automação em uma planta de processamento petroquímico ou em um local onde possam estar presentes produtos inflamáveis, as medidas de proteção tomadas e o grau de proteção que elas conferem, dependem do risco potencial envolvido. O estudo de classificação de áreas tem por finalidade mapear e determinar as extensões e abrangências das áreas que podem conter misturas explosivas e, consequentemente permitir a posterior especificação de equipamentos e sistemas adequados para cada tipo de área classificada.

Embora varie conforme as normas adotadas em cada país, a classificação de áreas sempre é feita em função do tipo de material inflamável presente e da probabilidade de sua presença, em concentrações que tornem explosiva sua mistura com o ar. As áreas da planta de processamento são classificadas na fase inicial do projeto, envolvendo principalmente a especificidade de processo, a partir das informações relativas a dados de processo, tais como a pressão, a concentração e o inventário dos diversos produtos combustíveis presentes no processamento da planta.

A partir deste estudo de classificação de áreas, deve ser assegurado que a especificação e instalação dos equipamentos atenda às exigências da área, em conformidade com as respectivas Normas aplicáveis.

Um plano de classificação de áreas é um grupo de documentos que fornecem informações sobre as áreas que contenham ou possam conter atmosferas potencialmente explosivas de uma planta de processamento químico ou de petróleo, tanto *onshore* como *offshore*. Este grupo de documentos compreende desenhos de plantas e elevações com as extensões das áreas classificadas, lista de dados de processo sobre as substâncias inflamáveis, lista dos dados das fontes de risco, e nos casos de espaços fechados, informações pertinentes ao projeto de ventilação e de ar condicionado, os quais possam afetar a classificação ou a extensão das áreas classificadas.

Os documentos das áreas classificadas constituem um grupo de desenhos que mostram, em escala, o arranjo completo das instalações industriais da planta, mostrando as marcações das extensões das áreas classificadas. Estas extensões e tipos de áreas classificadas devem ser definidos com base nas informações contidas nas listas de dados de processo das substâncias inflamáveis e nas fontes de risco, para todas as instalações existentes.

O plano de classificação de áreas deve ser elaborado com base na obtenção de informações referentes às características do processo e da planta. Para esta finalidade, adicionalmente às recomendações técnicas prescritas nas normalizações sobre classificações de áreas, devem ser consultados profissionais da respectiva planta, representantes das seguintes disciplinas:

- pessoal da engenharia de processo;
- pessoal de operação;
- pessoal de manutenção e da inspeção de equipamentos;
- pessoal de projeto (tubulação, caldeiraria, mecânica, elétrica e instrumentação);
- pessoal de segurança industrial.

Sempre que possível, um grupo multidisciplinar, formado por profissionais representantes destas áreas, deve ser designado para os serviços de elaboração da documentação requerida pelo plano de classificação de áreas.

Para instalações *offshore*, o plano de classificação de áreas deve também possuir as seguintes informações:

- as Normas técnicas ou regulamentos da sociedade de classificação naval aplicáveis ao projeto, incluindo o respectivo ano de edição;
- indicação da localização de dispositivos estanques a gás, considerados na separação de áreas classificadas;
- localizações de escotilhas e aberturas utilizadas para transporte de cargas;
- os procedimentos e restrições operacionais aplicáveis, de forma a minimizar o risco de contaminação cruzada de ambientes;
- a indicação de tag e função dos painéis e consoles de operação instalados em atmosferas explosivas que sejam mantidos pressurizados.

Os planos de classificação de áreas elaborados em bases “preliminares”, ou seja, em fases de projeto básico, devem conter notas indicando claramente que toda a documentação foi emitida somente como base de referência e não são válidas para a operação da planta. Nestas situações, toda a documentação do plano de classificação de área deve ser revisada de acordo com os dados reais e certificados de processo e de arranjo físico dos equipamentos, durante a fase de detalhamento do projeto.

8.5.2 Elaboração dos Estudos de Classificação de Áreas

É de fundamental importância o conhecimento das extensões e dos tipos das áreas classificadas existentes em uma indústria petroquímica. As áreas classificadas requerem que os equipamentos elétricos e eletrônicos instalados possuam requisitos construtivos especiais de proteção e certificação de conformidade. Estas áreas também requerem a aplicação de procedimentos normalizados de instalação, inspeção e de manutenção, de forma a assegurar que tais equipamentos não constituam fontes de ignição, através da geração de centelhas ou de altas temperaturas, durante todo o longo período de tempo em que estiverem instalados, ao longo de anos ou mesmo de décadas. A aplicação destas Normas, por suas características gerais, deve ser complementada por guias de aplicação representativas dos processos produtivos, emitidas pelas empresas ou pelos organismos de normalização.

Em instalações industriais existentes, grande parte da documentação pode encontrar-se desatualizada ou baseada em antigos critérios de projeto e de normalização de suas épocas de implantação, originários da filosofia utilizada pelas empresas projetistas. Os critérios e procedimentos para a classificação de áreas, indicados na normalização nacional, internacional e estrangeira, passaram por um processo de grande desenvolvimento nas últimas décadas. Dentre tais normas, podem ser indicadas:

- NBR IEC 60079-10 – Equipamentos para atmosferas explosivas – Classificação de áreas;

- API RP 505 – American Petroleum Institute – Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1 and Zone 2;
- NFPA 497 – National Fire Protection Association – Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapors and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas;
- AS/NZS 2430 – Australian/New Zealand Standards – 2430 Series – Classification of Hazardous Areas.

Os serviços de classificação de áreas para plantas petroquímicas industriais abrangem uma série de processos produtivos, tais como unidades de destilação, craqueamento catalítico, tratamento de gasolina, diesel e GLP, processamento de gás natural, geração e purificação de hidrogênio, torres de resfriamento de águas industriais, tratamento de despejos industriais, flotação, incineração de amônia, esferas de armazenamento de GLP e tanques de armazenamento de produtos acabados.

Para cada uma dessas áreas de processo deve ser gerada uma documentação sobre classificação, incluindo Memoriais Descritivos de Processo, Listas de Dados de Processo para Classificação de Áreas, Plantas de arranjo e de cortes de elevações de equipamentos e novos desenhos de plantas e cortes indicando as extensões e os tipos das áreas potencialmente explosivas existentes.

8.5.3 Princípios de Segurança na Classificação de Áreas

Instalações onde os materiais inflamáveis são manuseados ou armazenados, devem ser projetadas, operadas e mantidas de modo que qualquer liberação de material inflamável e consequentemente, a extensão da área classificada seja a menor possível, seja em operação normal ou com relação à freqüência, duração e quantidade.

É importante examinar as partes de equipamentos em processo e sistemas, os quais possam liberar material inflamável, e considerar modificações do projeto para minimizar a probabilidade e freqüência de liberação, quantidade e a taxa de liberação de material.

Em caso de atividades de manutenção, exceto aquelas de operação normal, a extensão da zona pode ser afetada, mas é esperado que esta seja controlada por uma sistemática de permissão de trabalho.

Os seguintes passos devem ser seguidos em uma situação que possa haver uma atmosfera explosiva de gás:

- a) eliminar a probabilidade de ocorrência de uma atmosfera explosiva de gás ao redor da fonte de ignição;
- b) eliminar a fonte de ignição.

Se estas medidas não forem possíveis de serem executadas, medidas de proteção, equipamentos de processo, sistemas e procedimentos devem ser selecionados e preparados

de tal modo que a probabilidade de ocorrência simultânea dos eventos a) e b) acima seja a menor possível. Tais medidas podem ser usadas independentemente, se elas forem reconhecidas como sendo altamente confiáveis, ou em combinação, para atingir um nível equivalente de segurança.

8.5.4 Objetivos da Classificação de Áreas

A classificação de áreas é um método de análise e classificação do ambiente onde possa ocorrer uma atmosfera explosiva, de modo a facilitar a seleção adequada e instalação de equipamentos a serem usados com segurança em tais ambientes, levando em conta os grupos de gás, assim como as respectivas classes de temperatura.

Na maioria dos locais onde os produtos inflamáveis são utilizados, é difícil assegurar que jamais ocorrerá a presença de uma atmosfera explosiva. Pode também ser difícil assegurar que os equipamentos jamais se constituirão em fontes de ignição. Entretanto, em situações onde exista uma alta probabilidade de ocorrência de uma atmosfera explosiva, a confiabilidade é obtida pelo uso de equipamentos que tenham uma baixa probabilidade de se tornarem fontes de ignição. Por outro lado, onde houver uma baixa probabilidade de ocorrência de uma atmosfera explosiva, pode-se utilizar equipamentos construídos com base em normas industriais de aplicação geral.

Raramente é possível, através de uma simples observação de uma planta industrial ou mesmo de um projeto, decidir que partes daquela indústria podem ser enquadradas na definição de zonas (zonas 0, 1 e 2). É necessário um estudo mais detalhado e isto envolve a análise das probabilidades básicas de ocorrência de uma atmosfera explosiva.

O primeiro passo é avaliar essa probabilidade de acordo com as definições de zona 0, zona 1 e zona 2. Uma vez que se tenha avaliado a probabilidade da freqüência e duração de uma liberação (bem como o grau de risco), a taxa de liberação, concentração, velocidade, ventilação e outros fatores que afetam o tipo e/ou a extensão da zona, haverá então uma base confiável para determinar a probabilidade de presença de mistura explosiva nas áreas vizinhas.

Este estudo requer considerações detalhadas a serem aplicadas para cada item do equipamento de processo que contém o produto inflamável, e que poderia se tornar uma fonte de risco.

Especificamente as áreas de zona 0 ou zona 1 devem ser minimizadas em número e extensão, quer seja a partir do projeto, quer seja por procedimentos operacionais adequados. Em outras palavras, plantas e instalações devem ser principalmente do tipo zona 2 ou área não classificada. Se a existência da fonte de risco for inevitável, os itens dos equipamentos de processo devem ser limitados àqueles que dão origem a fontes de risco de grau secundário ou, na impossibilidade (isto é, onde for inevitável ter-se fontes de risco de grau primário ou contínuo), as fontes de risco devem ser muito limitadas em quantidade e vazões. Ao desenvolver uma classificação de áreas, estes princípios devem receber considerações prioritárias. Onde necessário, o projeto, operação ou locação dos equipamentos de processo deve assegurar que, mesmo quando operando anormalmente, a quantidade de material inflamável liberado seja minimizada, de modo a reduzir a extensão da área classificada.

Uma vez que a planta tenha sido classificada e efetuados todos os registros necessários, é importante que nenhuma modificação no equipamento ou no procedimento de operação deste seja feita sem discussão prévia com todos os responsáveis pela classificação da área. Ações não autorizadas podem invalidar a classificação de áreas. É necessário assegurar que todos os equipamentos que afetam a área classificada e que tenham sido submetidos à manutenção tenham sido cuidadosamente verificados durante e após a montagem, com o fim de garantir que a integridade original de projeto, relativa a segurança, tenha sido mantida antes que os mesmos retornem em serviço.

8.5.5 Equipe Multidisciplinar para os Serviços de Classificação de Áreas

O estudo de classificação de áreas de uma planta industrial deve ser elaborado por uma equipe de profissionais multidisciplinar, que tenham conhecimento sobre as propriedades dos materiais inflamáveis, o processo e os equipamentos, com participação, onde apropriado, ainda dos profissionais de segurança, eletricidade, mecânica, manutenção e outros da área de engenharia.

A classificação de áreas deve ser elaborada quando os diagramas iniciais de tubulações e instrumentação, e os planos de arranjo iniciais estiverem disponíveis e confirmados, antes da planta entrar em operação. Revisões da documentação devem ser desenvolvidas durante a vida útil da planta, em funções das ampliações e modificações que normalmente são implementadas.

Os trabalhos de elaboração do estudo de classificação de áreas devem abranger o levantamento de campo de todas as instalações em todas as Unidades de Processo da Planta. Deve incluir também, a consulta e atualização das plantas de arranjo e fluxogramas existentes, a consulta *on-line* aos dados de processo, através de programas que emulem o sistema digital de controle de processo distribuído e a consulta a bancos de dados de taxas de falhas de equipamentos estáticos e rotativos.

Dada a complexidade de tais estudos, a equipe multidisciplinar deve possuir profissionais com grande foco nas áreas de processo, operação e manutenção, de forma que sejam considerados os diversos pontos de vista e as experiências de cada especialidade. É preciso reconhecer que a determinação da existência dessas áreas é feita pelas fontes de risco representadas pelos equipamentos de processo e pelas substâncias inflamáveis que são manipuladas neste processo. Os estudos de classificação de áreas não devem ser executados somente por profissionais da área de eletricidade, como normalmente ocorria no passado, nas empresas projetistas.

8.5.6 Identificação das Fontes de Risco para a Classificação de Áreas

Os elementos básicos para se definir as áreas classificadas consistem na identificação das fontes de risco e na determinação do seu grau.

Fontes de risco podem ser definidas como pontos ou locais nos quais um gás, vapor ou líquido inflamável pode ser liberado para a atmosfera de modo a possibilitar a formação de uma atmosfera explosiva.

Considerando que uma atmosfera explosiva somente pode existir se um gás, vapor ou poeira está presente com o ar, é necessário decidir se algum desses materiais inflamáveis pode existir na respectiva área. De maneira geral, tais gases, vapores ou poeiras (bem como líquidos e sólidos inflamáveis que podem dar origem a eles) estão contidos em equipamentos de processo que podem ou não estar totalmente fechados. É necessário identificar onde pode existir uma atmosfera explosiva em uma planta de processo, ou onde a liberação de materiais inflamáveis pode criar uma atmosfera explosiva externamente à planta de processo.

Cada item do equipamento do processo (por exemplo, tanques, bombas, tubulações, vasos, etc.) deve ser considerado como uma fonte potencial de risco de liberação de material inflamável. Se o equipamento não contém material inflamável, fica claramente evidenciado que o mesmo não criará uma área classificada ao seu redor. O mesmo se aplica se o equipamento contém material inflamável, porém ele não pode liberar esse material para o meio externo (por exemplo, união soldada de tubulação não é considerada como fonte de risco).

Se é estabelecido que o equipamento pode liberar material inflamável para a atmosfera, é necessário, em primeiro lugar, determinar o grau de risco de liberação de acordo com as definições, estabelecendo a freqüência e a duração da liberação. Deve ser reconhecido que a abertura de partes de sistemas de processo fechados (por exemplo, durante troca de filtros ou enchimento por batelada) deve também ser considerada como fonte de risco quando da elaboração da classificação de áreas. Por meio deste procedimento, cada fonte de risco deve ser denominada como grau "contínuo", "primário" ou "secundário".

8.5.6.1 Exemplos de Fontes de Risco de Grau Contínuo

- A superfície de um líquido inflamável em um tanque de teto fixo, com respiro permanente para a atmosfera;
- A superfície de um líquido inflamável que esteja aberto para a atmosfera, continuamente ou por longos períodos (por exemplo, um separador de óleo/água).

8.5.6.2 Exemplos de Fontes de Risco de Grau Primário

- Selos de bombas, compressores ou válvulas, se a liberação de material inflamável for esperada de ocorrer durante a operação normal;
- Pontos de drenagem de água em vasos que contém os líquidos inflamáveis, que podem liberar o material inflamável para a atmosfera durante a drenagem de água em operação normal;
- Pontos de coleta de amostra em que são previstos haver liberação de material inflamável para a atmosfera durante a operação normal;
- Válvulas de alívio, respiros e outras abertura em que são previstos haver liberação de material inflamável para a atmosfera durante a operação normal.

8.5.6.3 Exemplos de Fontes de Risco de Grau Secundário

- Selos de bombas, compressores e válvulas onde a liberação de material inflamável para a atmosfera não é prevista de ocorrer em condições normais de operação;

- Flanges, conexões e acessórios de tubulação, onde a liberação do material inflamável para a atmosfera não é prevista de ocorrer em condições normais de operação;
- Pontos de coleta de amostras, onde a liberação do material inflamável para a atmosfera não é prevista de ocorrer em condições normais de operação;
- Válvulas de alívio, respiros e outras aberturas onde a liberação do material inflamável para a atmosfera não é prevista de ocorrer em condições normais de operação.

8.5.7 Tipos de Zonas e de Grupos de Áreas Classificadas

Tendo sido estabelecido o grau da fonte de risco, é necessário determinar a taxa de liberação e outros fatores que podem influenciar o tipo e extensão da zona. Se a quantidade de material inflamável possível de ser liberado é “pequeno”, por exemplo, caso de um laboratório, cujo risco potencial existe, pode não ser apropriado utilizar o procedimento normalizado de classificação de áreas. Nesses casos, as considerações devem ser particularizadas ao risco envolvido. A classificação de áreas de equipamentos de processo onde o material inflamável é queimado, por exemplo, queimadores, fornalhas, caldeiras, turbinas a gás, etc., deve levar em consideração suas etapas do ciclo de purga, partida e parada.

A norma brasileira de classificação de áreas (NBR IEC 60079-10), seguindo a Normalização Internacional IEC, classifica as áreas de risco em **Zonas e Grupos**.

A probabilidade de presença de uma atmosfera explosiva de gás bem como o tipo de zona dependem, principalmente, do grau da fonte de risco e da ventilação.

A determinação dos tipos de **Zonas** das áreas classificadas são baseadas na freqüência ou na probabilidade estatística de ocorrência e duração de uma atmosfera explosiva de gás na área de processo considerada no estudo, como definido a seguir, pela Norma NBR IEC 60079-10:

- **Zona 0:** área na qual uma atmosfera explosiva de gás consistindo de uma mistura com ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa continuamente presente ou por longos períodos ou freqüentemente.
- **Zona 1:** área na qual uma atmosfera explosiva de gás consistindo de uma mistura com ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa que pode ocorrer ocasionalmente em condições normais de operação.
- **Zona 2:** área na qual uma atmosfera explosiva de gás consistindo de uma mistura com ar e substâncias inflamáveis em forma de gás, vapor ou névoa que não é previsto ocorrer em condições normais de operação mas, se ocorrer, irá persistir somente por um curto período.

Os procedimentos para classificação de áreas consideraram que uma área na qual a probabilidade de ocorrência de presença de atmosfera explosiva seja maior do que 1000 horas por ano deva ser classificada como sendo **Zona 0**. Se a probabilidade de ocorrência de presença de atmosfera explosiva seja menor do que 10 horas por ano, segundo os procedi-

mentos de classificação de áreas, a área classificada deve ser considerada como sendo **Zona 2**. Caso a probabilidade de ocorrência de atmosfera explosiva seja menor do que 1000 horas/ano e maior do que 10 horas/ano a área classificada deve ser considerada como sendo **Zona 1**.

A determinação do **Grupo** é estabelecida em função dos gases explosivos presentes no ambiente, sendo subdividido em Grupo I ou Grupo II.

Grupo I é relativo às instalações *subterrâneas*, como nas minas de carvão, onde se encontra basicamente a presença do gás *metano*.

Grupo II é relativo às instalações de *superfície*, sendo subdividido em Grupo IIA, IIB e IIC, de acordo com o gás representativo do local da instalação.

- Grupo IIA: propano.
- Grupo IIB: eteno.
- Grupo IIC: hidrogênio.

Atualmente, no Brasil, os projetos de classificação de áreas são normalmente elaborados baseando-se na Norma NBR IEC 60079-10 e em guias de aplicação específicos, estabelecidos na normalização interna das próprias empresas químicas ou petroquímicas. Tais guias de aplicação ou normas internas de classificação de áreas são elaboradas com base nas características de seus processos produtivos, nos características dos produtos manipulados (explosividade, volume dos inventários, níveis de pressão, temperatura e vazão) e nos arranjos de suas instalações (ao tempo ou no interior de prédios fechados). Normalmente tais guias de aplicação contêm figuras típicas de classificação de áreas, com determinação das extensões das áreas classificadas ao redor de fontes de risco, equipamentos ou instalações típicas de seu processo produtivo.

O NEC (*National Electric Code*), em artigo 500 a partir do ano de 1996, também passou a incorporar a designação de Zonas e de Grupos para os estudos de classificação de áreas. Até então, a designação utilizada baseava-se em critérios diferentes para a identificação de Divisões e Grupos. As Divisões eram denominadas de Divisão 1 (equivalente a Zona 1 da IEC) e Divisão 2 (equivalente a Zona 2 da IEC). Os Grupos eram subdivididos em Grupos A, B (equivalente ao Grupo IIC da IEC), Grupo C (equivalente ao Grupo IIB da IEC) e Grupo D (equivalente ao Grupo IIA da IEC).

Também a Norma API 505 – *American Petroleum Institute - Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities* passou a incorporar a definição de zonas em seus procedimentos de classificação de áreas, a partir de 1997. Apesar das alterações ocorridas no NEC e no API, alinhando-se com as nomenclaturas internacionais da IEC sobre classificação de áreas, ainda hoje podem ser encontrados projetos com a terminologia antigamente utilizada nas normas norte americanas, seja na documentação de projetos antigos ou na documentação de equipamentos importados dos EUA.

Extensão da Zona de Classificação de Área

A extensão da zona depende da distância estimada ou calculada na qual uma atmosfera explosiva de gás exista antes de que a concentração seja dispersada no ar, abaixo do seu limite inferior de explosividade. Devem ser previstos sistemas de monitoração e alarmes de gases combustíveis, devem ser acionados quando existirem gases e vapores dispersos em concentração superior ao limite inferior de explosividade.

Considerações devem ser sempre feitas sobre a possibilidade de que um gás mais pesado do que o ar possa fluir para dentro de área abaixo do nível do solo, como por exemplo em canaletas de drenagem, tubovias ou depressões. Devem ser feitas considerações também para os casos em que um gás mais leve do que o ar possa ser acumulado em um nível superior, por exemplo, no espaço sob um telhado de uma casa de compressores de hidrogênio, onde devem ser previstas saídas para ventilação do gás acumulado.

Nos locais onde a fonte de risco esteja situada fora da área sob consideração ou em uma área adjacente, a penetração de uma quantidade significativa de gás ou vapor inflamável para essa área, deve ser evitada por meios adequados, tais como:

- a) barreiras físicas;
- b) manutenção de uma adequada sobrepressão na área em relação a área classificada adjacente, evitando o ingresso de atmosfera de gás explosivo;
- c) insuflando a área com suficiente vazão de ar, assegurando que o ar escape por todas as aberturas por onde possa existir a penetração de gás ou vapor inflamável.

A extensão da zona é principalmente afetada pelos seguintes parâmetros químicos e físicos, alguns dos quais são propriedades intrínsecas do material inflamável; outros são específicos do processo.

Temperatura de Ignição e Classes de Temperatura de Superfície dos Equipamentos

A mais baixa temperatura de ignição das substâncias explosivas que possam dar origem a atmosferas explosivas, em uma área sob estudos de classificação de áreas, deve ser superior à temperatura máxima de superfície dos equipamentos elétricos a serem instalados nesta área, de forma a assegurar que os equipamentos elétricos não possam constituir fontes de risco.

Para o caso geral e mais usual de instalações de superfície (áreas classificadas do Grupo II), a máxima temperatura de superfície que um determinado equipamento pode apresentar é designada pela "Classe de temperatura" ou "T rating", definida na Norma NBR IEC 60079-0 (Equipamentos Elétricos para Atmosferas Explosivas – Requisitos Gerais), conforme mostrada na tabela 8.4 A indicação da classe de máxima temperatura de superfície de um equipamento elétrico, determinada nos respectivos ensaios de certificação e indicada no respectivo certificado de conformidade, deve ser indicada na marcação do equipamento.

A informação da classe de temperatura deve ser indicada nos desenhos de extensões de classificação de áreas, juntamente com as informações da zona e do grupo do gás representativo de classificação de cada área.

TABELA 8.4

Classificação das temperaturas máximas de superfície para equipamentos elétricos do Grupo II, de acordo com a Norma NBR IEC 60079-0

Classe de Temperatura (T rating)	Máxima temperatura de superfície do equipamento elétrico
T1	450°C
T2	300°C
T3	200°C
T4	135°C
T5	100°C
T6	85°C

8.5.8 Documentação de Classificação de Áreas

É recomendado que a classificação de área seja realizada de forma que os vários passos que conduzam a classificação de área final sejam documentados apropriadamente.

Toda a informação relevante deve ser referenciada. Exemplos de tais informações ou de métodos utilizados podem ser:

- a) Recomendações de padrões e normas relevantes;
- b) Características e cálculos da dispersão de gás e vapor;
- c) Estudo das características de ventilação em relação aos parâmetros de liberação do material inflamável, para que possa ser avaliada a efetividade da ventilação.

Aquelas propriedades que são relevantes à classificação de área de todo material de processo utilizado na planta deve ser listado e incluir o peso molecular, ponto de fulgor, ponto de ebulição, temperatura de ignição, pressão do vapor, densidade do vapor, limites de explosividade, o grupo do gás e a classe de temperatura. Os resultados do estudo de classificação de área bem como qualquer alteração subsequente, devem ser registrados em memoriais descritivos de processo, planilhas e tabelas de dados de processo e desenhos de plantas e de elevações das instalações físicas da planta.

Os documentos de classificação de área devem incluir plantas e elevações, onde apropriado, que mostrem o tipo e a extensão das zonas, temperatura de ignição, classe de temperatura e grupo do gás. Onde a topografia de uma área influencie a extensão das zonas, isto deve ser documentado.

Os documentos também devem incluir outras informações relevantes, tais como:

- a) a localização e identificação das fontes de risco. Para plantas grandes e complexas ou áreas de processo, pode ser útil itemizar ou numerar as fontes de risco, para facilitar a correlação de dados entre as informações técnicas de classificação de área e os desenhos;
- b) a posição das aberturas em edificações (por exemplo, as portas, janelas, entradas e saídas de ar para ventilação).

8.5.9 Exemplos de Desenhos de Plantas e de Cortes de Classificação de Áreas

Uma vez de posse dos desenhos de arranjo e de elevação das instalações físicas da planta e de posse da lista de dados de processo e dos cálculos de extensões das áreas classificadas, ou das figuras padronizadas de extensões elaboradas pelas respectivas empresas, são elaborados os respectivos desenhos de plantas e cortes das extensões de áreas classificadas.

As figuras 8.2 e 8.3 mostram respectivamente exemplos típicos de desenhos de projeto de arranjo de equipamentos e de elevação, elaborados para plantas de processamento petroquímico em instalações terrestres. Nestes desenhos são indicadas as extensões e os limites de classificação de áreas, sendo definida, para cada área classificada, os respectivos dados de zona, grupo e classe de temperatura. São indicados também nestes desenhos, as fronteiras entre áreas classificadas e áreas seguras, bem como as áreas que podem ser consideradas como seguras somente se forem mantidas sob pressurização com ar, tais como casas de controle locais (onde normalmente são instalados os sistemas digitais de controle de processo) e as subestações (onde normalmente são instalados os painéis do tipo centro de controle de motores).

Através de legenda com diferentes tipos de hachuras, são diferenciadas, nos desenhos de classificação de áreas, as diferentes classificações de cada área, tais como áreas não classificadas, áreas do tipo zona 0, 1 e 2, os diferentes grupos IIA, IIB e IIC e as diferentes classes de temperatura (T1, T2, T3, etc.).

Com base nas informações de zona, grupo e classes de temperatura de cada área, obtidas destes desenhos, são especificados os tipos e características de proteção dos instrumentos e demais equipamentos elétricos e eletrônicos a serem instalados no campo.

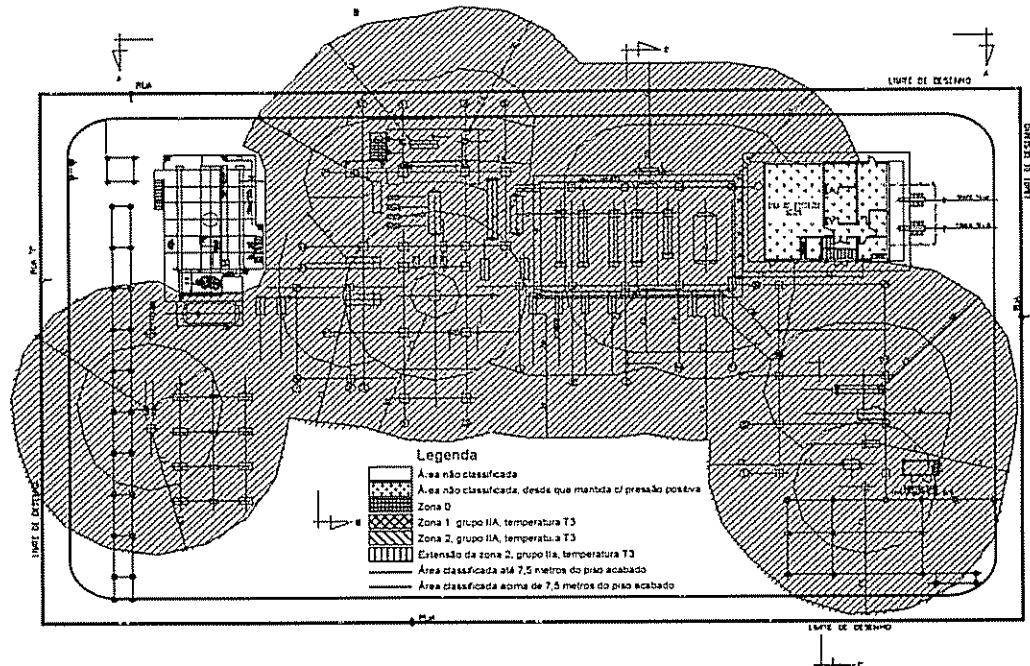


FIGURA 8.2 Exemplo de desenho de projeto de planta de extensão de áreas classificadas em uma planta de petroquímica em instalação terrestre

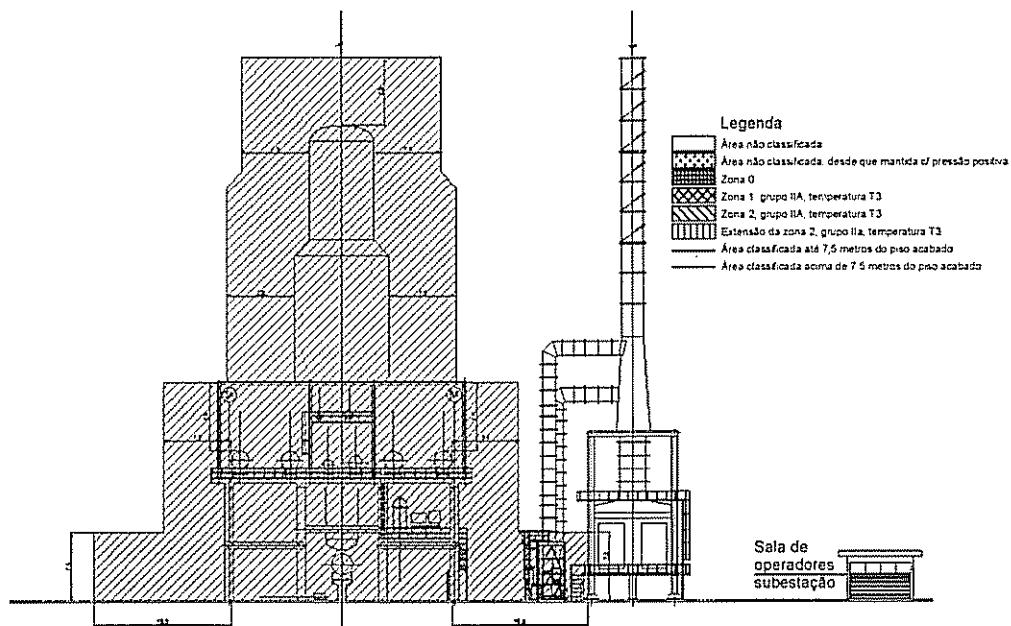


FIGURA 8.3 - Exemplo de desenho de projeto de elevação de extensão de áreas classificadas em uma planta de petroquímica em instalação terrestre

8.5.10 Resultados e Benefícios do Plano de Classificação de Áreas

A distribuição de potência elétrica em uma instalação fisicamente distribuída é normalmente dispersa, como é o caso usual em modernas plantas de processamento químico e de petróleo. Neste caso um espaço seguro necessita ser projetado, através de planejamento de arranjo dos equipamentos de processo, dentro da área classificada, para a construção de uma subestação ou de uma sala de controle local. Painéis de distribuição de força e de Centro de Controle de Motores “comuns” podem ser instalados nestas subestações instaladas em áreas seguras. Os painéis dos sistemas digitais de controle e de monitoração distribuídos (SDCD ou PLC), painéis de relés e respectivos painéis de rearranjo também são instalados em salas de controle localizadas preferencialmente em áreas não classificadas. Desta forma, a adequada decisão do local de instalação das edificações de Casas de Controle Locais e de Subestações, em áreas seguras, deve ser baseada em um plano de classificação de áreas atualizado.

Também como resultados e benefícios de um estudo de classificação de áreas atualizado, destacam-se possibilidade da correta especificação dos novos equipamentos elétricos e eletrônicos necessários para os novos projetos; e a possibilidade da correta aplicação, dos procedimentos de inspeções periódicas dos sistemas instalados em áreas classificadas.

A segurança das instalações elétricas em atmosferas explosivas é dada por um conjunto de ações, encadeadas como elos de uma corrente, tais como projeto, especificação técnica, suprimento, instalação, inspeção, manutenção e reparo. Se um dos elos desta corrente falhar, a segurança de todo o processo pode ficar comprometida, o que requer a capacitação e treinamento de todo o pessoal envolvido.

Os documentos do estudo de classificação de áreas devem ser constantemente atualizados, em função das ampliações das plantas de processo, uma vez que a instalação de novos equipamentos de processo introduz novas fontes de risco, ampliando as extensões das áreas classificadas. Tais ampliações podem alterar a classificação de áreas existentes, alterando o tipo de zona, de grupo ou de classe de temperatura, podendo inclusive tornar em uma área classificada uma área antes considerada como sendo não classificada, o que leva a necessidade de estudo ou de substituição dos equipamentos elétricos e de instrumentação existentes em tais locais.

Desta forma, a manutenção da documentação de classificação de áreas de uma unidade industrial é um importante fator para o controle da segurança operacional e da confiabilidade das instalações da planta.

A documentação de classificação de áreas constitui também uma fonte de dados para consulta das pessoas envolvidas com a operação da planta, com a segurança, meio ambiente e saúde, e dos executantes dos serviços rotineiros de manutenção, próprios ou contratados do usuário. Esta documentação deve ser utilizada como base o para norteamento na elaboração das análises preliminares de risco, verificando os procedimentos requeridos e a especificação, por exemplo, das ferramentas manuais elétricas e instrumentos a serem utilizadas em trabalhos realizados em áreas classificadas, bem como para a emissão das respectivas Permissões de Trabalho.

8.6 TÉCNICAS E TIPOS DE PROTEÇÃO

8.6.1 Conceitos Gerais

Diferentes técnicas construtivas são aplicadas na fabricação de instrumentos para operar em áreas classificadas, distinguindo-os dos instrumentos de "uso industrial geral", os quais não são apropriados ou certificados para aplicação em locais de risco contendo atmosferas explosivas.

As técnicas construtivas para a fabricação de equipamentos elétricos ou eletrônicos para instalação em atmosferas explosivas podem ser agrupadas em cinco categorias gerais:

- 1) contenção;
- 2) segregação;
- 3) limitação de energia;
- 4) segurança aumentada;
- 5) especiais.

A técnica de **contenção** visa confrinhar a energia resultante de uma eventual explosão ocorrida no interior do invólucro, impedindo que a mesma se propague e provoque a ignição da atmosfera explosiva existente exteriormente. Neste tipo de instrumento, o gás explosivo pode penetrar no interior do invólucro e entrar em contato com partes centelhantes ou temperaturas acima da temperatura de ignição do gás. Esta técnica resulta nos instrumentos e invólucros com tipo de proteção à prova de explosão.

A técnica de **segregação** visa evitar o contato entre uma atmosfera explosiva e possíveis fontes de ignição. A segregação é obtida pela imersão em óleo, areia ou pó inerte, pelo encapsulamento ou pela pressurização do invólucro com o ar ou com o gás inerte.

A técnica de **imersão** geralmente é incompatível com as necessidades construtivas requeridas pelos sistemas de instrumentação de campo, sendo também utilizada na área elétrica, em aplicações como em reatores eletrônicos para luminárias fluorescentes, os quais são normalmente imersos em areia e em resina.

Na área de instrumentação, um exemplo de aplicação da técnica de imersão é a construção de Caixas de Areia, as quais evitam a passagem de gases ou vapores inflamáveis do ambiente externo para o interior de áreas não classificadas, nos locais de entrada e saída de cabos e multicabos.

A técnica de **encapsulamento** geralmente não é aplicável a um instrumento inteiro, mas somente a alguns de seus componentes integrantes, tais como fusíveis e pequenos transformadores de sinal, os quais são, freqüentemente, encapsulados. Normalmente, o encapsulamento é empregado como auxiliar de outras técnicas de proteção, como é o caso de solenóides encapsuladas em resina, com os bornes terminais utilizando o tipo de proteção Segurança Aumentada.

Por suas características construtivas, a manutenção corretiva dos componentes e circuitos encapsulados por parte do usuário é inviável. Esta situação é proposital e evita o comprometimento da integridade original do dispositivo encapsulado, o que poderia reduzir sua segurança e descaracterizar a proteção do projeto original do fabricante, para o qual o instrumento foi ensaiado, aprovado e certificado.

A técnica de **pressurização** ou purga encontra várias aplicações na área de instrumentação, como é o caso dos painéis locais de controle de grandes máquinas, onde o ambiente interno do painel é mantido pressurizado com ar, possibilitando a instalação de componentes comuns, não necessariamente aprovados para instalação direta em atmosferas explosivas.

A limitação de energia a níveis que não permitam a ignição de mistura explosiva é bastante segura, sendo largamente aplicada na área de instrumentação e de fabricação de instrumentos de campo, conhecida como **segurança intrínseca**. Este tipo de proteção não se restringe ao instrumento de campo, mas envolve todos os componentes do circuito, incluindo a barreira ou isolador galvânico intrinsecamente seguro e a fiação existente entre ambos. Este tipo de proteção é o único aplicável para instalação de instrumentos em áreas classificadas como Zona 0.

A técnica de **segurança aumentada** resulta da elaboração cuidadosa do projeto de um determinado equipamento ou componente elétrico, incorporando ao mesmo características construtivas que tornam impossível a ocorrência de centelhamento ou de sobreaquecimento, mesmo em condições de ocorrência de falha. Este tipo de proteção tem grande aplicação na área de instrumentação como, por exemplo, na construção de *junction-boxes*, instalados no campo, próximos aos instrumentos, para ligação de cabos e multicabos e na construção de painéis locais de controle.

Técnicas especiais, aplicadas a casos particulares, incluem a diluição contínua e o emprego de corta-chamas.

A diluição contínua é aplicada quando a operação de um instrumento, como um analisador de gás, requer a introdução de um fluido inflamável no interior do invólucro.

Os corta-chamas são dispositivos que permitem a passagem de pequenos volumes de gases ou vapores, mas impedem que uma eventual detonação se propague de um lado ao outro.

8.6.2 Tipo de Proteção à Prova de Explosão (Ex “d”)

O invólucro com tipo de proteção à prova de explosão deve ser capaz de confinar em seu interior qualquer detonação que ocorra, devido ao ingresso de substância explosiva, impedindo que a energia decorrente desta explosão se propague para o ambiente externo.

O invólucro à prova de explosão é dimensionado mecanicamente, de forma a resistir à grande pressão interna (pressão de pico) que pode resultar desta detonação interna.

O projeto construtivo do invólucro deve garantir que os vazamentos de gases para o exterior do mesmo, através de flanges, roscas ou pequenos orifícios, sejam resfriados a valores seguros, de modo a garantir que, quando atinjam a parte externa do equipamento, estejam abaixo da temperatura de ignição dos gases externos existentes.

Além destas críticas características construtivas, outra característica necessária ao invólucro à prova de explosão é a de que nenhuma superfície externa ultrapasse a temperatura máxima admissível da classe da substância explosiva, seja em operação normal ou seja em caso de defeito dos componentes internos.

Na técnica de proteção do tipo à prova de explosão, o projeto de construção do invólucro depende das características do gás explosivo da área onde o mesmo for instalado, ou seja, do Grupo de classificação da área.

Um invólucro projetado e certificado para os Grupos IIA e IIB, por exemplo, não pode ser instalado em áreas do Grupo IIC.

Existem diferenças construtivas nos invólucros do tipo à prova de explosão normalmente produzidos por fabricantes europeus, que utilizam basicamente invólucros com tampas roscadas e por fabricantes americanos, que adotam basicamente os invólucros com juntas planas aparafusadas.

Características dos invólucros Ex “d” com tampas roscadas (figura 8.4)

- Invólucro com tampas roscadas e entrada indireta de cabos.
- Instalação facilitada, sem necessidade de fixação de grande quantidade de parafusos.
- Não requer instalação, selagem e inspeção de unidades seladoras para eletrodutos. A passagem dos cabos da caixa Ex “e” para o interior do invólucro Ex “d” é feita através de buchas à prova de explosão, instaladas pelo fabricante.

- Mais seguro, sendo menos propenso a falhas de instalação ou manutenção.
- Entrada indireta de cabos, possibilitando ligações simplificadas dos cabos externos na caixa de bornes Ex "e", sem necessidade de abertura ou invasão do invólucro Ex "d".

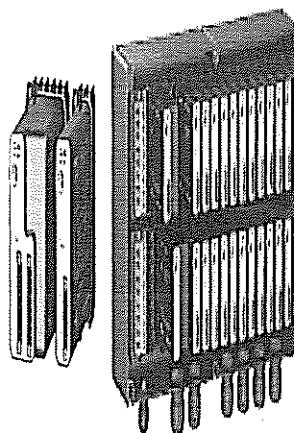


FIGURA 8.4 Invólucro do tipo à prova de explosão (Ex "d"), com tampa do tipo roscada.
(Foto: cortesia Crouse-Hinds/CEAG.)

Características dos invólucros Ex "d" com tampa do tipo junta plana (figura 8.5)

- Invólucro com tampas de juntas planas aparafusadas e entrada direta de cabos através de eletrodutos.
- Difícil instalação, com grande número de parafusos para fixação da junta plana.
- Requer instalação de unidades seladoras externas.
- Requer maior capacitação do pessoal de manutenção.
- Maior possibilidade de falha de instalação e de manutenção, podendo levar a instalações irregulares e fora de conformidade.

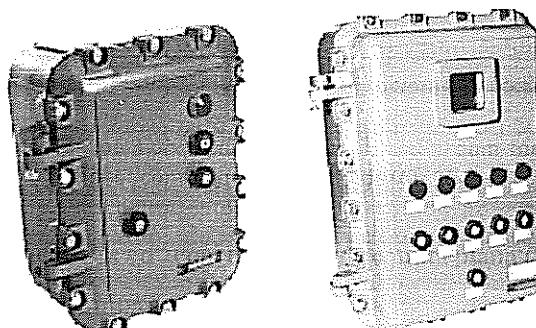


FIGURA 8.5 Invólucros do tipo à prova de explosão (Ex "d"), com tampa flangeada do tipo de junta plana. (Foto: cortesia Crouse-Hinds/CEAG.)

Construtivamente, os instrumentos de menores dimensões, como os transmissores de pressão e temperatura, apresentam invólucros à prova de explosão com formato cilíndrico e com tampas rosadas, conforme exemplos mostrados na figura 8.6. Instrumentos com dimensões maiores empregam, normalmente, invólucros retangulares, com tampas flangeadas com juntas planas.

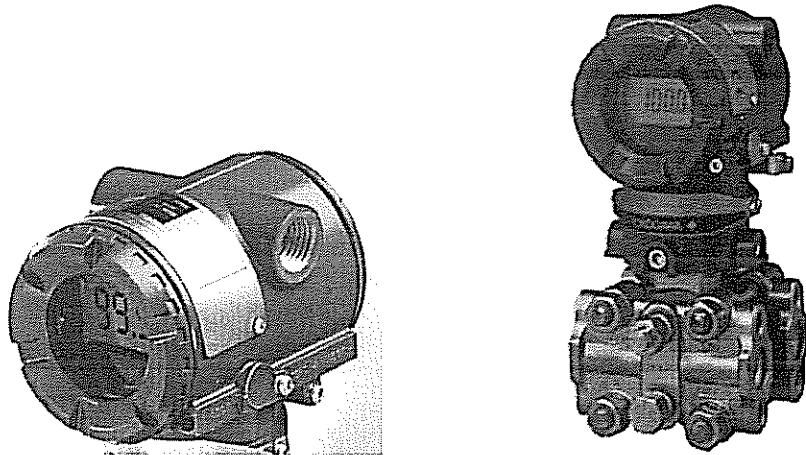


FIGURA 8.6 Instrumento transmissor de campo, com invólucro metálico do tipo à prova de explosão (Ex "d"), com tampa do tipo rosada. (Foto: cortesia Yokogawa.)

É possível compreender melhor o princípio envolvido na segurança de um invólucro com tipo de proteção à prova de explosão, observando-se como é executado o ensaio do mesmo, para fins de Certificação de Conformidade, simulando condições reais de uma explosão. Neste ensaio normalizado, o invólucro sob ensaio, contendo atmosfera explosiva (mistura de gás explosivo e ar) em seu interior, é colocado no interior de uma câmara, a qual, por sua vez, também contém atmosfera explosiva. Detonada a mistura no interior do invólucro, a energia resultante desta explosão não deve se propagar à atmosfera da câmara, a qual não deve entrar em ignição.

Os invólucros metálicos do tipo à prova de explosão são normalmente fabricados em ligas de alumínio, através do processo de fabricação por injeção ou fundição.

Para garantir a segurança proporcionada pelo invólucro à prova de explosão não basta que o mesmo tenha sido certificado. É necessário, também, assegurar que sua instalação seja adequada. Os procedimentos de instalação de sistemas elétricos em atmosferas explosivas são regidos por normalização brasileira aplicável.

Nos invólucros à prova de explosão, a fiação dos circuitos externos normalmente é protegida por meio de eletrodutos rígidos. Nos casos de entrada direta de eletrodutos no invólucro, todas as junções devem utilizar unidades seladoras (critério do invólucro). Exemplos de unidades seladoras de eletrodutos são apresentados na figura 8.7.

A instalação de unidades seladoras e a sua posterior selagem impedem a propagação de gases e vapores ao longo do sistema, mantendo-os confinados no local onde ocorreu um vazamento, além de impedir a propagação, no caso da ocorrência de uma detonação interna ao invólucro.

Em casos como o de eletrodutos longos, ou em casos de passagem de eletrodutos de uma área Zona 0 ou Zona 1 para uma área Zona 2, também são instaladas unidades seladoras (critério da fronteira).

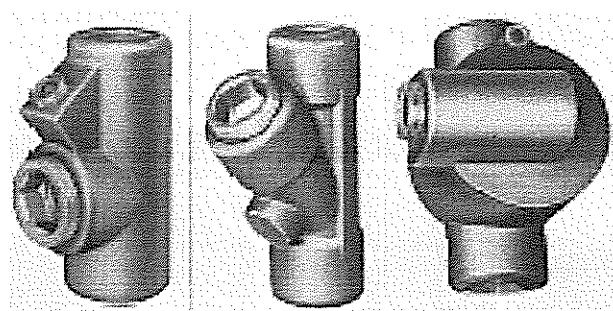


FIGURA 8.7 Unidades seladoras do tipo à prova de explosão (Ex "d") para eletrodutos (Fotos: cortesia Stahl.)

Podem também ser encontrados, no mercado, eletrodutos metálicos flexíveis certificados, próprios para instalação em áreas classificadas. Estes eletrodutos flexíveis são normalmente instalados em trechos curtos, tais como em aplicações de interligação entre equipamentos fixos e outros submetidos a vibração, ou entre instrumentos e sensores que precisam ser removidos com certa freqüência para sofrerem manutenção ou calibração.

Antes da partida de uma planta de processamento e em intervalos periódicos, durante a vida útil do equipamento e operação da planta, os equipamentos elétricos e eletrônicos dos sistemas de elétrica e de instrumentação devem passar por rigorosos processos de inspeção periódica, de forma a assegurar a continuidade da segurança provida pelos mesmos e a manutenção de suas características especiais de construção.

A inspeção de equipamentos do tipo à prova de explosão, inclui a verificação da integridade física dos invólucros, visores, conexões rosadas, plugues, unidades seladoras e o aperto de tampas rosadas, parafusos de flanges e conexões.

Todas as unidades seladoras devem estar preenchidas com material apropriado e, preferencialmente, identificadas externamente, através de pintura com tinta na cor vermelha.

A abertura de um invólucro, com a unidade em operação, estando o equipamento energizado, só poderá ser efetuada após a liberação pelo pessoal da segurança da planta, o qual verificará se a área realmente apresenta condições seguras para a abertura destes equipamentos.

Em casos de equipamentos ou componentes elétricos envolvendo elementos centelhantes com pequenas dimensões e com pequenos volumes, como são os casos dos contatos elétricos, são fabricados componentes elétricos, tais como contatos, chaves e disjuntores, moldados em invólucros de resina plástica, utilizando polímeros de elevada resistência química e mecânica, que são encapsulados em conjunto com os componentes elétricos, formando blocos selados em fábrica, certificados como sendo à prova de explosão. Os bornes terminais externos são certificados com o tipo de proteção segurança aumentada. Estes tipos de

componentes com tipos de proteções combinadas recebem a marcação Ex "de" e podem ser instalados em áreas do tipo Zona 1, apresentando grandes vantagens de segurança, dimensões e peso, em relação aos antigos invólucros metálicos externos à prova de explosão. Um exemplo de equipamentos utilizando componentes elétricos encapsulados em resinas é apresentado na figura 8.8.

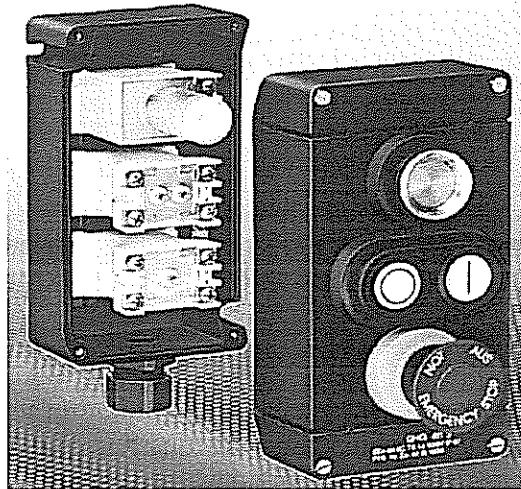


FIGURA 8.8 Botoeira do tipo segurança aumentada, com invólucro em resina de poliéster reforçado com fibra de vidro, contendo blocos de contatos encapsulados de fábrica, com marcação Ex de IIC. (Foto - cortesia Crouse-Hinds/CEAG)

A utilização de equipamentos com invólucros metálicos, do tipo à prova de explosão, é tradicional e ainda continua sendo adotada, embora em processo de gradual desuso, sendo recentemente substituída, sempre que possível, pela utilização de equipamentos com os tipos de proteção segurança aumentada ou segurança intrínseca. Este tipo de proteção, com invólucros metálicos, apresenta diversas desvantagens em relação a outros tipos de proteção, tais como:

- invólucros pesados, volumosos e de elevado custo de fabricação e de instalação;
- manutenção muito complexa, principalmente quando envolve abertura freqüente, como é o caso dos analisadores de processo;
- altamente sujeitos a falhas humanas, perdendo as suas características de proteção. A falta de aperto de todos os parafusos dos flanges das tampas ou a falta de preenchimento das unidades seladoras com a massa adequada, são exemplos de graves problemas de instalação e de manutenção, devido a falhas humanas.

8.6.3 Proteção por Pressurização (Ex "p")

A pressurização é uma técnica que evita muitas das desvantagens apresentadas pelos invólucros à prova de explosão, podendo ser aplicada em instrumentos cujos altos níveis de energia de seus circuitos não permitem aplicar a técnica de proteção da segurança intrínseca.

Quando um instrumento ou painel de controle local não gerar ou não permitir a ocorrência de material inflamável em seu interior, a manutenção de uma pequena pressão positiva, através da injeção de ar ou gás inerte, é suficiente para impedir a penetração de gases ou vapores inflamáveis que possam existir no ambiente externo.

Normalmente, a pressurização é feita com ar, podendo também ser utilizados gases inertes, tais como o nitrogênio ou o dióxido de carbono. O ar utilizado deve ser limpo e, obrigatoriamente, ser oriundo de uma área não classificada, para garantir que não contenha produtos inflamáveis. No caso do ar ser aspirado através de dutos que atravessam uma área classificada, os mesmos devem apresentar vedação suficiente, para garantir que não sejam aspirados produtos inflamáveis eventualmente presentes na área classificada.

Exemplo de painel de controle local com tipo de proteção por pressurização, instalado em atmosfera explosiva, é apresentado na figura 8.9. Neste exemplo de instalação de sistema de instrumentação em áreas classificadas, no interior do invólucro pressurizado do painel são instalados equipamentos eletrônicos comuns de medição, controle, automação e comunicação, tais como governadores digitais para controle de rotação de grandes turbinas à vapor, PLCs, sistemas microprocessados para monitoração de vibração e temperatura, barreiras de segurança intrínseca, anunciantes de alarmes e réguas de bornes terminais, que não são destinados para instalação direta em atmosferas explosivas.

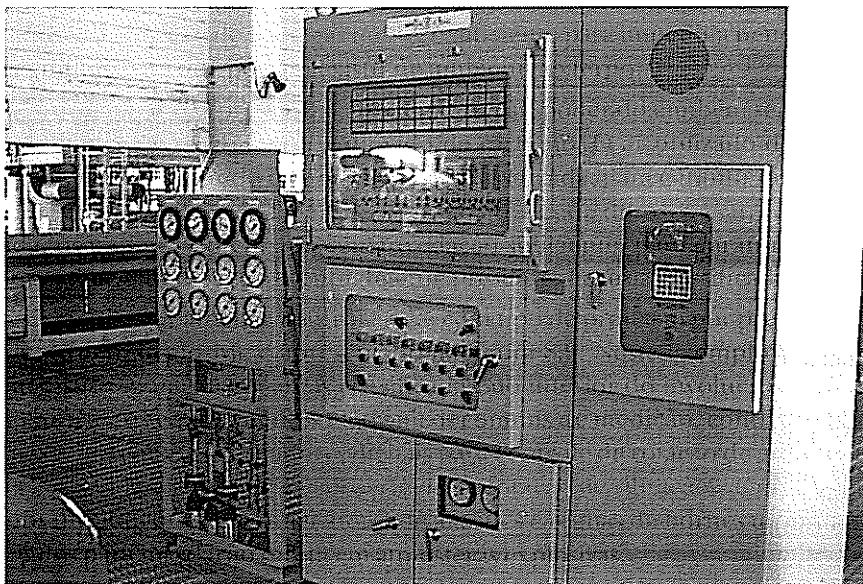


FIGURA 8.9 Painel Local de Controle pressurizado, instalado em Área Classificada. (Foto: cortesia PETROBRAS / Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão.)

A técnica de proteção Ex “p” é aplicável não somente para invólucros de painéis pressurizados, mas também para ambientes e edificações pressurizados, tais como Shelters ou casas de analisadores contínuos de processo e Casas de Controle Locais, onde são normalmente instalados equipamentos de automação, interfaces homem máquina e sistemas digitais de controle, tais como PLC e SDCD.

Um exemplo de instalação de *Shelter* pressurizado para analisadores contínuos de processo é apresentado na figura 8.10. Para os casos de casas de analisadores são aplicáveis os requisitos da Norma NBR IEC 60079-16 – Ventilação artificial para proteção de casas de analisadores. Para os casos de Casas de Controle Locais são aplicáveis os requisitos da Norma NBR IEC 60079-13 – Construção e utilização de edificações protegidas por pressurização.

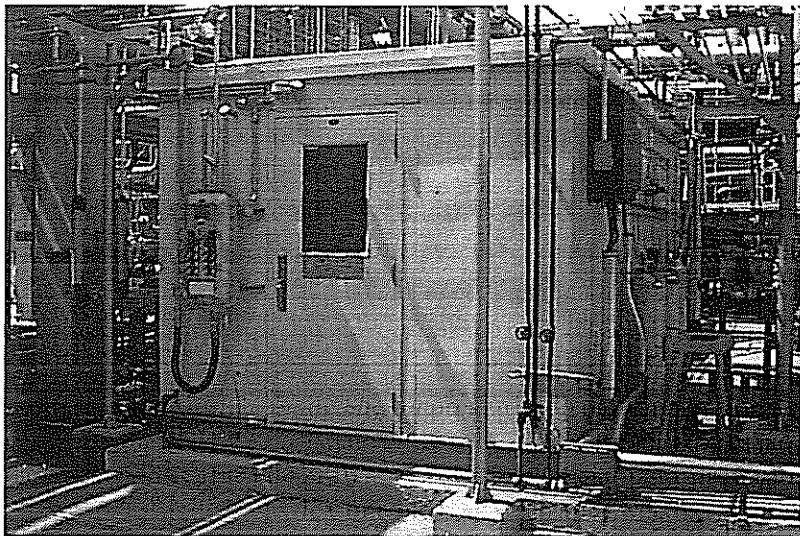


FIGURA 8.10 Casa de analisadores pressurizada, instalada em Área Classificada.
(Foto: cortesia PETROBRAS/Refinaria Presidente Bernardes, de Cubatão.)

Este tipo de proteção consiste em se manter, no interior do invólucro, uma pressão positiva de ar, superior à pressão atmosférica, de modo que, se houver presença de mistura inflamável ao redor do equipamento, esta não entrará em contato com as partes internas que possam causar ignição. A pressão interna é mantida com ou sem a renovação contínua do ar de pressurização.

A Norma norte-americana NFPA 496 (*National Fire Protection Association*) e a Norma NBR IEC-60079-2 definem três tipos de purga::

- Purga tipo Z: Redução de classificação de área de Zona 2 para Área Segura.
- Purga tipo Y: Redução de classificação de área de Zona 1 para Zona 2.
- Purga tipo X: Redução de classificação de área de Zona 1 para Área Segura.

Purga Tipo Z

Permite que, com o invólucro instalado em uma área classificada como Zona 2, seu interior seja considerado como área não classificada.

Os requisitos são a manutenção de uma sobrepressão determinada pelas normas, e a garantia de que em nenhum ponto a temperatura externa do invólucro ultrapasse 80% da temperatura de ignição do gás ou vapor que possa estar presente. O invólucro ainda deve atender a requisitos mínimos de resistência mecânica.

Para a abertura do invólucro pressurizado, além do prévio desligamento do circuito de alimentação elétrica, deve ser aguardado um tempo suficiente para permitir o resfriamento de possíveis pontos quentes no interior do invólucro.

No religamento, o invólucro deve ser previamente purgado com, no mínimo, quatro vezes seu volume interno antes de se energizar os componentes dos circuitos de seu interior.

Um medidor de pressão ou de vazão, não necessariamente dotado de alarme, é instalado para indicar falha de pressurização. Esta pode ocorrer por falha no suprimento de ar, por vazamento ou por entupimento.

O desligamento automático, em caso de falha, não é exigido por Norma para este tipo de purga.

Purga Tipo Y

Permite que, com o invólucro instalado em uma área classificada como Zona 1, seu interior seja considerado como área classificada do tipo Zona 2.

Na prática, este tipo de purga permite instalar um equipamento certificado com um tipo de proteção adequado para Zona 2 (dentro do invólucro purgado) em uma área classificada como Zona 1.

Os requisitos de segurança e proteção para este tipo de purga são iguais aos da purga do tipo Z, sendo também obrigatória a existência de fusíveis no circuito de alimentação, tornando, assim, remota a possibilidade de um curto-circuito, mesmo para a massa (carcaça ou invólucro do painel), que possa gerar um "ponto quente" perigoso.

Purga Tipo X

Permite que, com o invólucro instalado em uma área classificada como Zona 1, seu interior seja considerado como área não classificada.

Os requisitos são os mesmos aplicáveis para a purga tipo Y, acrescentando-se:

- a porta do invólucro deve ser intertravada com a alimentação elétrica, desconectando-a imediatamente em caso de abertura. Algumas Normas dispensam este requisito quando a abertura somente é possível com o emprego de ferramentas;
- um intertravamento garante o desligamento em caso de perda de pressurização e emite um alarme com conhecimento remoto;
- quando do fechamento do invólucro, um temporizador só conecta a alimentação elétrica após decorrido um tempo que permita, no mínimo, a renovação de quatro vezes o volume interno do invólucro.

A pressurização só é eficaz, oferecendo a proteção desejada, quando os equipamentos forem montados de forma correta, atendendo aos requisitos de projeto e recomendações do fabricante. Devem ser elaborados desenhos de montagem para cada caso de instalação.

As pessoas envolvidas com as atividades de montagem, inspeção e manutenção devem possuir capacitação e os conhecimentos específicos requeridos na instalação deste tipo de proteção. A existência de um procedimento para realização de inspeção periódica é imprescindível para garantir a conformidade da instalação, ao longo de toda a vida útil do equipamento pressurizado.

Todos os dispositivos elétricos e eletrônicos auxiliares, tais como pressostatos, chaves de fluxo e temporizadores, não podem ser instalados no interior do invólucro pressurizado, porque necessitam ser energizados antes da pressurização estar presente e do ambiente estar seguro. Estes dispositivos são normalmente instalados no interior de invólucros à prova de explosão ou, então, instalados remotamente, em locais seguros, como no interior de Salas de Controle.

8.6.4 Proteção por Segurança Intrínseca (Ex “i”)

Um sistema intrinsecamente seguro pode ser definido como aquele que é incapaz de liberar energia, seja na forma elétrica ou térmica, suficiente para provocar a ignição de determinada mistura explosiva que possa se fazer presente. A impossibilidade de ignição deve ser mantida e garantida, mesmo em caso de falha do sistema.

A máxima energia que pode ser liberada, sem comprometer a segurança, depende da atmosfera considerada, o que é levado em consideração pelas normas e pela certificação.

As falhas abrangem problemas ocorridos com a fiação e, também, falhas de um ou até dois componentes, simultaneamente. O conceito de segurança intrínseca é mais antigo do que geralmente pode ser imaginado, sendo que as primeiras certificações ocorreram em 1917, decorrente de uma explosão ocorrida em uma mina subterrânea de carvão, em 1912.

A filosofia da proteção do tipo segurança intrínseca enfoca o circuito como um todo e não somente o instrumento de campo, como é o caso dos outros tipos de proteção, como a do invólucro à prova de explosão, por exemplo. São considerados circuitos intrinsecamente seguros aqueles em que existe uma compatibilidade de características elétricas entre os componentes do mesmo (instrumento de campo, fiação e barreira), de forma a não ser possível o acúmulo de energia suficiente para a ocorrência de centelhas, mesmo em casos de falhas dos componentes ou curto-círcuito. Esta técnica de proteção tomou maior impulso recentemente, com a evolução dos componentes eletrônicos, como, por exemplo, os componentes SMD (*Surface Mounted Devices*), que viabilizou o projeto e fabricação de instrumentos de muito baixo consumo de energia.

Por ser baseada no projeto dos equipamentos, e não na inclusão de medidas auxiliares de proteção, um sistema intrinsecamente seguro uma vez adequadamente projetado, especificado e instalado, apresenta elevado índice de segurança e imunidade à introdução de falhas humanas nos procedimentos de manutenção.

Falhas humanas, que podem chegar a ser fatais em sistemas que empregam outras técnicas, como, por exemplo, a abertura de um instrumento com invólucro do tipo à prova de explosão, em condições onde haja presença de atmosfera explosiva ou o fechamento inadequado da tampa deste invólucro, não constituem condições de risco na proteção Ex “i”.

Além disso, os custos de instalação e manutenção são muitas vezes inferiores aos de outras técnicas de proteção.

O tipo de proteção intrinsecamente segura aplica-se à instrumentação a dois fios e para sinais do tipo 4 a 20 mA e também é compatível com o emprego de protocolos digitais de comunicação de dados, tais como Hart, Field Bus Foundation, Profibus, Modbus e outros.

A limitação da aplicabilidade desta técnica, baseada na limitação da energia, é o consumo e o armazenamento de energia do próprio instrumento.

Atualmente, diversos tipos e modelos de transmissores de pressão, temperatura, vazão e nível apresentam versões com tipo de proteção segurança intrínseca. Alguns analisadores, como os de pH e condutividade, também possuem modelos com este tipo de proteção.

Outros instrumentos, como os cromatógrafos, apresentam consumo da ordem de centenas de watts, o que impossibilita, em função do maior grau de energia manipulada no circuito, da incorporação de forma intrinsecamente segura.

Como praticamente toda a malha de instrumentação é alimentada por uma fonte de tensão, que, por sua vez, obtém energia de uma rede, não se pode pretender que toda a malha seja intrinsecamente segura. A fonte e a rede à qual ela está conectada operam com níveis de energia elevados. É considerado suficiente que apenas a parte da malha ou sistema que se localiza na área classificada apresente características intrinsecamente seguras.

A parte do circuito constituída pela fonte de alimentação, juntamente com os controladores digitais do processo, tais como SDCDs e PLCs, que não são intrinsecamente seguros, são instalados em áreas seguras (áreas não classificadas), como, por exemplo, no interior de uma Sala de Controle Local. A barreira de segurança intrínseca, inserida neste circuito, limita a energia que pode ser enviada à parte do circuito de campo, instalado na área classificada, constituído pelo instrumento transmissor de campo e pela fiação de interligação.

A figura 8.11 apresenta um diagrama típico de instalação de um circuito intrinsecamente seguro, composto por instrumento de campo intrinsecamente seguro, barreira de segurança (componente associado ao instrumento Ex "i") e o sistema de controle.

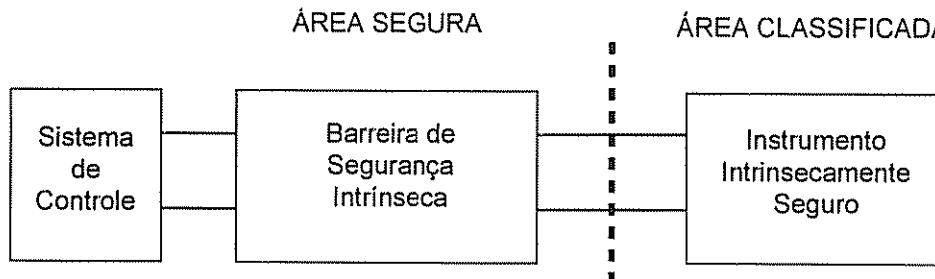


FIGURA 8.11 Exemplo de circuito intrinsecamente seguro contendo instrumento de campo (instalado em área classificada), barreira de segurança intrínseca e Sistema Digital de Controle Distribuído - SDCD (instalado em área segura).

É importante ressaltar que a segurança intrínseca abrange o sistema constituído por todas as partes componentes deste circuito como um todo e não somente o instrumento de campo isoladamente.

Exemplo de instalação de componentes associados em área segura, tais como barreiras de segurança intrínseca, é apresentado na figura 8.12.

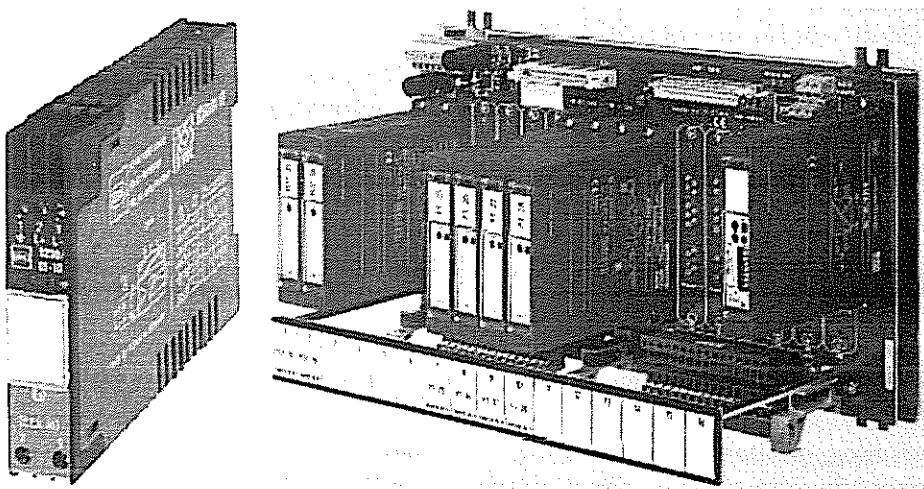


FIGURA 8.12- Barreiras de proteção do tipo Intrinsecamente Seguro com *back-planes* de montagem. Fotos: cortesia Stahl.

Um transmissor de pressão certificado como intrinsecamente seguro, significa que o mesmo pode ser instalado em área classificada, desde que devidamente associado a outros elementos, como cabos e barreiras Ex "i", que resultem em circuito ou sistema intrinsecamente seguro.

Durante a fase de projeto, cabe ao pessoal da especialidade de instrumentação especificar corretamente os instrumentos de campo e as barreiras de segurança intrínseca, considerando os seus dados de certificação e os dados de instalação de campo, tais como o comprimento dos cabos envolvidos em cada circuito.

Os equipamentos intrinsecamente seguros são enquadrados nas categorias "ib" e "ia".

Os equipamentos da categoria "ib" devem ser incapazes de provocar ignição em operação normal, ou em caso de ocorrência de uma falha (defeito) qualquer. São apropriados para instalação em áreas do tipo Zona 1 e Zona 2.

Os equipamentos da categoria "ia" devem ser incapazes de provocar ignição em operação normal, ou em caso de ocorrência de até duas falhas (defeitos) simultâneas quaisquer, possuindo, em sua concepção de circuitos, componentes eletrônicos redundantes que garantam a manutenção da baixa energia no circuito de campo, mesmo em caso da ocorrência de defeitos ou de erros de ligações. São apropriadas inclusive para instalação em áreas classificadas do tipo Zona 0. Os dispositivos utilizam componentes eletrônicos especiais de alta confiabilidade.

Barreiras ativas, denominadas isoladores galvânicos, permitem o processamento de sinais por meio de amplificadores/casadores de impedância e filtros ativos, além de alimentar os circuitos na saída.

As barreiras são, normalmente, elementos descartáveis, encapsulados, não permitindo propositalmente a substituição de qualquer componente. Desta maneira é evitada a possibilidade da substituição indevida, por parte do usuário, de um componente por outro com especificações incorretas ou de confiabilidade insuficiente, alterando e descharacterizando seu projeto original e anulando a Certificação de Conformidade.

Ao se especificar uma barreira de segurança intrínseca, além da adequação à malha, deve ser levado em consideração que os instrumentos envolvidos irão operar somente com sinal padrão do tipo 4 a 20 mA ou irão operar também com comunicação digital, já que nem todas as barreiras permitem a passagem dos pulsos. O fabricante deve garantir a comunicação com o protocolo escolhido. Já foram verificados casos onde a substituição de transmissores puramente analógicos por outros do tipo microprocessado implicou na necessidade de troca das barreiras.

A fabricação, ensaios e instalação de equipamentos, sistemas e redes de comunicação do tipo *Field Bus* intrinsecamente seguros é regida por Normalização brasileira específica, através das Normas NBR IEC 60079-11, NBR IEC 60079-25 e NBR IEC 60079-27. Estas normas abrangem os requisitos referentes tanto à fabricação e ensaios de equipamentos e sistemas, quanto aos procedimentos e práticas de instalação. Estes procedimentos incluem a codificação, a identificação e a segregação dos circuitos, cabos e multicabos, as técnicas de passagem de cabos entre áreas de classificação diferentes e de uma área classificada para uma área segura e o aterramento necessário, no caso de instalação de barreiras passivas do tipo zener (resistência de aterramento requerida menor do que 1 ohm).

Um exemplo de instrumentos transmissores de pressão, instalados em áreas classificadas, com tipo de proteção Ex "i" é mostrado na figura 8.13.

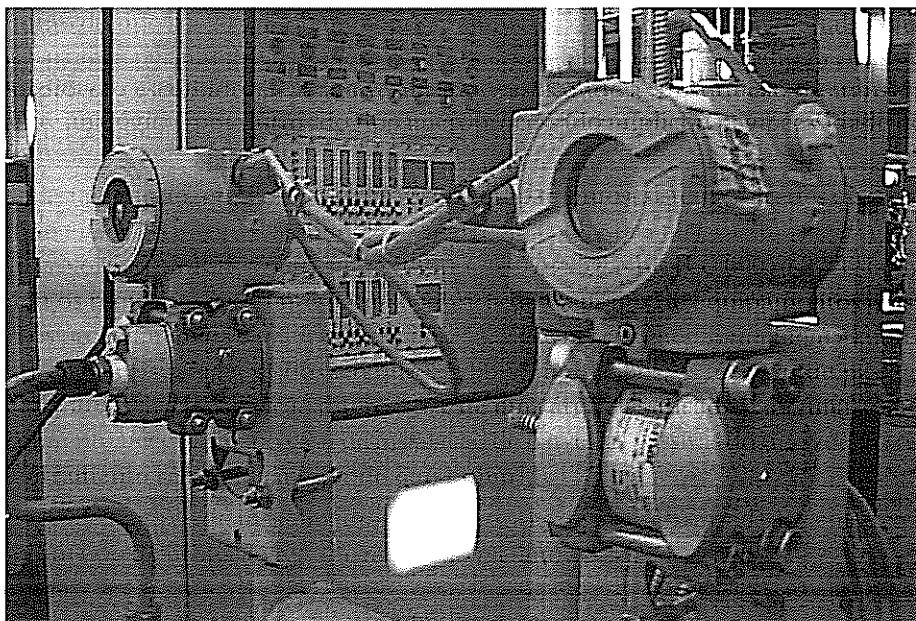


FIGURA 8.13 Transmissores intrinsecamente seguros instalados em áreas classificadas.
(Foto - cortesia PETROBRAS/Refinaria Presidente Bernardes, de Cubatão.)

Em uma situação em que um transmissor intrinsecamente seguro é erroneamente conectado a um cabo, cuja elevada capacidade permite o armazenamento de uma quantidade de energia suficiente para provocar uma ignição, o sistema não apresentará segurança por não atender ao conceito de entidade.

Como elementos indutivos e capacitivos armazem energia elétrica, existem limitações tanto para os valores de capacidade quanto para de indutância máxima em circuitos intrinsecamente seguros.

O conceito de entidade permite a interligação de instrumentos de campo com barreiras (componentes associados), sem que os mesmos tenham sido certificados em conjunto.

CRITÉRIOS DE INTERCONEXÃO DE COMPONENTES EM UM CIRCUITO INTRINSECAMENTE SEGURO

- Os valores da tensão e a corrente que os instrumentos podem receber (U_i e I_i) devem ser maiores ou iguais à tensão e à corrente fornecidas pela barreira (U_o e I_o).
- Os valores da capacidade e a indutância do instrumento de campo (C_i e L_i), incluindo a fiação de interligação (C_{cabo} e L_{cabo}), devem ser menores ou iguais à capacidade e à indutância que pode ser conectada com segurança à barreira (C_o e L_o).

Os critérios de interconexão para equipamentos Ex "i" e respectivos componentes associados (barreiras de proteção) são apresentados na Tabela 8.5.

TABELA 8.5
Critérios para Interconexão entre Barreiras e Instrumentos de Campo
para um Circuito Instrinsecamente Seguro

Barreira		Campo
U_o	\leq	U_i
I_o	\leq	I_i
C_o	\geq	$C_i + C_{cabo}$
L_o	\geq	$L_i + L_{cabo}$

São apresentados a seguir dois exemplos práticos e numéricos, que mostram a metodologia e os dados necessários para a execução de verificação de parâmetros de entidade para interconexão de um circuito intrinsecamente seguro.

Exemplos de Verificação da Compatibilidade de Parâmetros entre Instrumento de Campo e Barreira

EXEMPLO 1 – Transmissor Eletrônico de Sinal Analógico

Dados do transmissor (indicados no Certificado de Conformidade):

- transmissor eletrônico de sinal analógico do tipo 4 a 20 mA;
- marcação Ex ia IIC T6;
- $U_i = 30 \text{ V}$, $I_i = 165 \text{ mA}$, $L_i = 0,73 \text{ mH}$, $C_i = 22,5 \text{ nF}$.

Dados da barreira de segurança intrínseca (indicados no Certificado de Conformidade):

- isolador galvânico do tipo entrada analógica;
- marcação Ex [ia] IIC T6;
- $U_o = 28 \text{ V}$, $I_o = 86 \text{ mA}$, $L_o = 5 \text{ mH}$, $C_o = 130 \text{ nF}$.

Dados dos cabos/multicabos de interligação entre instrumento e barreira:

Os dados de indutância e de capacitância próprias dos cabos devem ser obtidos a partir de catálogos de fabricantes, em função dos tipos dos cabos e multicabos utilizados. Para fins de simplificação de cálculos, conservativamente, podem ser utilizados, nos casos gerais, os seguintes valores típicos: $C_c = 110 \text{ nF} / \text{km}$, $L_c = 1 \text{ mH/km}$. Considerando-se um comprimento total de cabo de 500 metros (dado a ser obtido a partir das plantas de instalação e de encaminhamento elétrico das bandejas de cabos ou eletrodutos), têm-se os valores de $C_c = 55 \text{ nF}$ e $L_c = 0,5 \text{ mH}$.

Verificações de compatibilidade de parâmetros para interconexão:

	Verificação
$U_o (28 \text{ V}) \leq U_i (30 \text{ V})$	OK
$I_o (86 \text{ mA}) \leq I_i (165 \text{ mA})$	OK
$C_o (130 \text{ nF}) \geq C_i (22,5 \text{ nF}) + C_c (55 \text{ nF})$	OK
$L_o (5 \text{ mH}) \geq L_i (0,73 \text{ mH}) + L_c (0,5 \text{ mH})$	OK

EXEMPLO 2 – Sensor de Proximidade Indutivo (NAMUR)

Dados do sensor de campo (indicados no Certificado de Conformidade):

- sensor de proximidade indutivo do tipo NAMUR;
- marcação Ex ia IIC T6;
- $U_i = 15,5 \text{ V}$, $I_i = 52 \text{ mA}$, $L_i = 0,07 \text{ mH}$, $C_i = 210 \text{ nF}$.

Dados da barreira de segurança intrínseca (indicados no Certificado de Conformidade):

- isolador galvânico do tipo entrada NAMUR;
- marcação Ex [ia] IIC T6;
- $U_o = 11,5 \text{ V}$, $I_o = 25,8 \text{ mA}$, $L_o = 46 \text{ mH}$, $C_o = 2000 \text{ nF}$.

Dados dos cabos/multicabos de interligação entre instrumento e barreira:

Considerando-se um comprimento total de cabo de 300 metros (dado a ser obtido a partir das plantas de instalação e de encaminhamento elétrico das bandejas de cabos ou eletrodutos), têm-se os valores de $C_c = 33 \text{ nF}$ e $L_c = 0,3 \text{ mH}$.

Verificações de compatibilidade de parâmetros para interconexão:

	Verificação
$U_o \text{ (11,5 V)} \leq U_i \text{ (15,5 V)}$	OK
$I_o \text{ (25,8 mA)} \leq I_i \text{ (52 mA)}$	OK
$C_o \text{ (2000 nF)} \geq C_i \text{ (210 nF)} + C_c \text{ (33 nF)}$	OK
$L_o \text{ (46 mH)} \geq L_i \text{ (0,07 mH)} + L_c \text{ (0,3 mH)}$	OK

Mais recentemente, com a evolução das barreiras de segurança intrínseca e com a incorporação de diferentes tipos de proteção a um mesmo equipamento, foi desenvolvida uma nova geração de equipamentos Ex "i", os denominados I/O Remotos ou Unidades Terminais Remotas, onde as próprias barreiras de segurança intrínseca, CPUs e os cartões de comunicação de rede são adequados e certificados para instalação no campo, diretamente montados em atmosfera explosiva.

Neste tipo de arranjo de equipamentos, apropriado para instalação mesmo em áreas classificadas do tipo Zona 1, as fontes de alimentação são instaladas dentro de invólucros do tipo à prova de explosão e as barreiras, junto com módulos de CPUs e de gateways são conectadas à *backplanes* através de conectores do tipo segurança aumentada. Na figura 8.14 são apresentados exemplos de componentes de uma Unidade Terminal Remota de circuitos intrinsecamente seguros.

A comunicação de dados entre o campo e os controladores do tipo PLC ou SDCD, instalados na Sala de Controle, é feita através de uma rede de comunicação de dados redundante, através de diversos protocolos de comunicação disponíveis no mercado. Neste tipo de arquitetura e configuração de sistemas de instrumentação de campo instalados em atmosferas explosivas, são mantidas todas as características de proteção e segurança dos circuitos de segurança intrínseca, incorporando-se também os benefícios da grande redução da quantidade de circuitos e fiação entre instrumentos, *junction-boxes*, multicabos, armários de rearranjo e cartões de entrada e saída dos controladores.

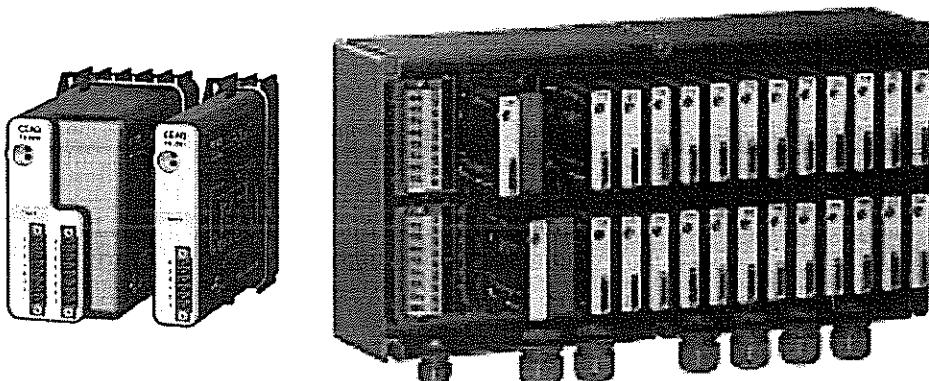


FIGURA 8.14 Módulos de I/Os remotos intrinsecamente seguros, fonte de alimentação e gateway certificados para instalação em áreas classificadas.
(Fotos - cortesia Crouse-Hinds/CEAG.)

8.6.5 Proteção do Tipo Segurança Aumentada (Ex “e”)

O tipo de proteção Segurança Aumentada (Ex “e”) é aplicável a instrumentos e equipamentos elétricos que, em condições normais de operação, não apresentam fontes de ignição, normalmente não produzindo centelhas ou apresentando pontos quentes.

Para que o equipamento seja considerado como possuindo o tipo de proteção Segurança Aumentada, são introduzidas, na etapa do projeto do equipamento, medidas construtivas conservativas que impossibilitam a ocorrência de centelhas ou da existência de pontos com altas temperaturas.

Equipamentos com este tipo de proteção podem ser instalados em áreas classificadas do tipo Zona 1 ou Zona 2 e encontram grande aplicação na área de instrumentação de campo em ambientes industriais. Na figura 8.15 é apresentado um exemplo típico de *junction-box* para circuitos de instrumentação com tipo de proteção Ex “e”, constituída por invólucro e prensa cabos plásticos e régua de bornes terminais certificados.

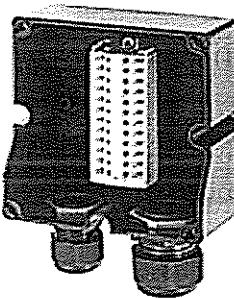


FIGURA 8.15 *Junction-box* do tipo segurança aumentada.
(Foto - cortesia Crouse-Hinds/CEAG.)

O desenvolvimento da tecnologia da injeção de plástico permite a utilização de invólucros e caixas fabricadas com este tipo de material, sendo mais freqüentemente utilizada a resina de poliéster reforçada com fibra de vidro, devido às suas excelentes propriedades físicas e químicas. Invólucros feitos com este tipo de plástico, com certificação Ex-e, tais como as *junction-boxes* e painéis locais de controle, possuem muitas vantagens em relação às caixas com invólucros metálicos Ex “d” utilizadas até então. Dentre tais vantagens destacam-se a elevada resistência química contra a corrosão e elevada resistência térmica, além do peso ser consideravelmente menor. *Junction-boxes* fabricadas com este tipo de material normalmente possuem Grau de Proteção IP-65, índice este superior ao normalmente encontrado nas caixas metálicas do tipo à prova de explosão.

Outro exemplo de aplicação deste tipo de proteção na área de instrumentação são os painéis locais de controle, contendo instrumentos de medição, transformadores de comando, lâmpadas sinalizadoras do tipo LED, botões de comando, réguas de bornes terminais e prensa-cabos para conexão dos cabos e multicabos dos circuitos de campo, conforme mostrado na figura 8.16.

Painéis locais de controle com este tipo de proteção são mais simples, leves e seguros do que os respectivos painéis utilizando invólucros metálicos do tipo à prova de explosão.

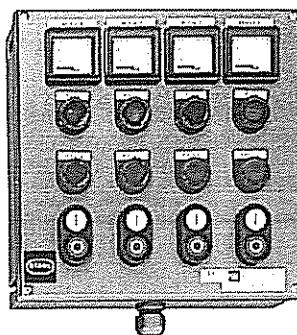


FIGURA 8.16 Painel local de controle com proteção do tipo segurança aumentada, contendo instrumentos indicadores, sinaleiros, botões de comando, relés, disjuntores, bornes terminais, prensa-cabos, etc. (Foto: cortesia Stahl.)

8.6.6 Caixas de Areia para Passagem de Cabos em Fronteiras de Áreas Classificadas

A construção de prédios utilizando Caixas de Areia para instalação de cabos e multicabos é uma técnica que impede a entrada de gases explosivos existentes no lado externo de uma Sala de Controle para o interior da mesma, onde se requer a existência de área segura, assim mantida através de pressurização com ar.

Neste tipo de construção, os cabos são lançados do campo para o interior da Sala de Controle através de aberturas feitas na parede do prédio, nas quais são construídas caixas em alvenaria, as quais são preenchidas com areia, após a instalação e ensaios dos circuitos dos cabos.

A utilização desta técnica construtiva, em comparação com o sistema de entrada de cabos através de entradas com eletrodutos, possui as seguintes vantagens:

- facilita os serviços de instalação dos cabos e multicabos;
- facilita os serviços de passagem de novos cabos em casos de ampliação, sem necessidade de quebra de parede para passagem de novos eletrodutos ou quebra de unidades seladoras existentes;
- dispensa a instalação, selagem e identificação de unidades seladoras;
- instalação mais segura e menos sujeita a erros ou falhas de montagem.

A utilização de Caixas de Areia para a entrada de cabos de circuitos de instrumentação no interior de Casas de Controle tem mostrado ser uma solução prática e flexível, mesmo em casos de necessidade de ampliações ou modificações. O projeto de Caixas de Areia depende das condições locais da instalação, sendo preferível a instalação de cabos acima do nível do solo, tais como em sistemas de bandejamento. Quando da construção de Caixas de Areia, cuidados devem ser tomados para que a areia possa ser facilmente removida. Deve ser

utilizada areia seca e com grãos finos e limpos e a instalação dos cabos deve ser tal que a areia não seja contaminada por líquidos e que qualquer líquido que escorra pelos cabos possa pingar fora das caixas.

Um exemplo de instalação de Caixas de Areia para passagem de multicabos de instrumentação instalados em áreas classificadas, para o interior de uma Casa de Controle Local, mantida com seu interior seguro através de pressurização é apresentado na figura 8.17.

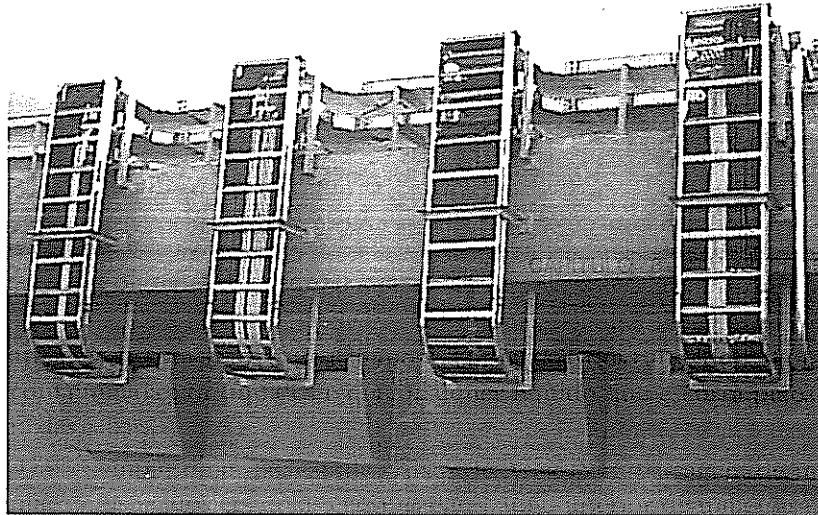


FIGURA 8.17 Construção de Caixas de Areia para entrada de cabos em casa de controle situada em Área Classificada
(Foto: cortesia PETROBRAS/Refinaria Presidente Bernardes, de Cubatão)

8.7 A CERTIFICAÇÃO DE CONFORMIDADE PARA EQUIPAMENTOS “EX”

Por necessidade de garantir a segurança nas instalações em atmosferas explosivas e por exigência legal no Brasil e na maioria dos países no mundo, todo material, componente ou equipamento construído para ser instalado em área classificada deve possuir um Certificado de Conformidade. No Brasil, este Certificado deve ser emitido por um Organismo de Certificação de Produto (OCP), reconhecido pelo INMETRO, tais como CEPEL/LABEX, UCIEE, CERTUSP e UL do Brasil.

Este Certificado de Conformidade é um documento que assegura ao usuário que o instrumento foi ensaiado e aprovado por um laboratório de ensaios independentes e que atende a todos os requisitos de proteção e de segurança exigidos pelas normas aplicáveis ao tipo de proteção.

A Certificação de Conformidade para equipamentos elétricos para instalação em atmosferas explosivas é compulsória, ou seja, é obrigatória, tanto no Brasil como internacionalmente. Assim sendo, somente equipamentos ou instrumentos certificados podem ser comercializados por seus fabricantes. Da mesma forma, somente equipamentos ou instrumentos certificados podem ser fabricados, comercializados, adquiridos e instalados.

A comercialização e instalação de instrumentos ou demais equipamentos elétricos deste tipo, sem que os mesmos possuam os respectivos certificados de conformidade, além de colocar em situação de ilegalidade e de risco as instalações de uma companhia, também implica em responsabilidade criminal em caso de acidentes com perdas ou danos materiais ou pessoais.

No caso de fornecedores brasileiros, a execução dos ensaios e emissão do Certificado de Conformidade normalmente é requerida pelo fabricante dos equipamentos ou instrumentos e concedida pelo OCP, depois que os mesmos tiverem sido submetido com sucesso a todos os ensaios exigidos pela normalização aplicável.

Em princípio, e até que sejam estabelecidos acordos de reciprocidade com os principais órgãos certificadores do exterior, os equipamentos importados devem ser ensaiados e certificados no Brasil, mesmo que possuam certificação em seu país de origem, ou em outro país. Estes mesmos procedimento de certificação são adotados e requeridos quando se trata da entrada de produtos brasileiros em outros países.

Fabricantes brasileiros, interessados na exportação de seus produtos, estão providenciando a certificação de seus produtos no exterior, optando pelos Organismos certificadores mais indicados em função do mercado a ser atingido.

No caso de importação de equipamentos elétricos em pequenas quantidades, como uma exceção à regra geral, a legislação brasileira prevê a possibilidade de emissão, por parte de OCPs do INMETRO, de Certificados de Conformidade baseados nos Certificados de Conformidade estrangeiros, sem a necessidade de testes e recertificações do equipamento no Brasil.

A Certificação de Conformidade “Ex” da IEC – IEC *Ex Scheme*

Os ensaios e a certificação de equipamentos industriais do tipo “Ex” são mais complexos e requerem mais tempo do que para os produtos industriais não “Ex”, sendo assim, mais caros. O tempo médio para se obter uma certificação é de cerca de 10 meses ou mais. O IEC *Ex Scheme* visa eliminar os múltiplos ensaios e certificações em diferentes países integrantes da comunidade IEC. Este esquema visa fornecer uma certificação de conformidade única a diferentes países cujas normas nacionais são idênticas ou baseadas nas normas IEC.

O IEC *Ex Scheme* tem uma proposta com duplo caminho, com dois objetivos em mente:

- atender às preocupações e necessidades atuais e de um futuro imediato, através de um bem definido e prático período de transição.
- prover um caminho para um objetivo final de utilização de uma certificação e marcação internacional aceita por todos os países participantes.

O IEC *Ex Scheme* visa fornecer os meios para os fabricantes de equipamentos “Ex” para obter Certificados de Conformidade que sejam aceitos a nível nacional, em todos os países participantes. Um Certificado de Conformidade pode ser obtido a partir de qualquer Órgão de Certificação aceito pelo IEC *Ex Scheme*. O Certificado atestará que o projeto do equipamento encontra-se conforme com as normas IEC relevantes e que o produto é fabricado sob um sistema de garantia de qualidade assegurado por um Órgão de Certificação.

Os fabricantes que possuírem estes Certificados de Conformidade podem fixar a marca de conformidade *IECEx* aos seus produtos. Os Órgãos de Certificação e os Laboratórios de Ensaios são aceitos no IEC *Ex Scheme* após a verificação satisfatória de sua competência, avaliada de acordo com as Normas ISO/Guides 17025, 65 e documentos técnicos do IEC *Ex Scheme*.

O objetivo final do IEC *Ex Scheme* é a aceitação mundial de uma só normalização, um só Certificado de Conformidade e uma só marcação, e o Brasil, como país integrante da comunidade IEC acompanha a condução e a evolução deste assunto, através de representação do INMETRO.

É de responsabilidade legal do usuário de equipamentos elétricos, eletrônicos e de instrumentação instalados em áreas classificadas, a posse, o controle e o arquivamento dos respectivos Certificados de Conformidade compulsórios, emitidos pelos OCPs do INMETRO. De acordo com os requisitos da Norma Regulamentadora NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, tais Certificados de Conformidade devem fazer parte do Prontuário de Instalações Elétricas, requeridos para todas as instalações industriais, e devem ser evidenciados quando das auditorias realizadas pelas respectivas Delegacias Regionais do Trabalho (DRT).

A não existência ou a não apresentação dos respectivos Certificados de Conformidade, por parte do usuário, pode levar a uma situação de não conformidade das instalações elétricas e de instrumentação de uma planta. Tal desvio pode incorrer na aplicação das penalidades penais previstas na legislação, em casos de auditorias dos órgãos competentes ou em casos de incidentes envolvendo equipamentos elétricos ou de instrumentação instalados em áreas classificadas.

8.8 PROTEÇÃO PROVIDA PELO INVÓLUCRO CONTRA INGRESSO DE ÁGUA E POEIRA (ÍNDICES IP)

Distinta dos tipos de proteção para uso em áreas classificadas, a proteção provida por invólucros contra penetração enfoca a proteção do equipamento em si e também do pessoal envolvido. Esta proteção abrange desde a simples proteção contra o contato acidental em pontos energizados ou superfícies quentes, até a proteção de um instrumento contra jatos de água ou imersão prolongada.

A classificação IP (*Index of Protection*) é codificada pelas letras IP, seguidas de dois algarismos, (IP-__), conforme mostrado na tabela 8.6.

- O primeiro algarismo indica o grau de proteção contra a penetração de corpos sólidos ou poeira.
- O segundo algarismo indica o grau de proteção com relação à penetração de água, em condições normalizadas, estabelecidas na Norma NBR IEC-60529.

TABELA 8.6
Designação dos Algarismos do Índice de Proteção (IP-__),
Conforme Norma NBR IEC 60529

Primeiro algarismo	Proteção contra ingresso de corpos sólidos e poeira	Segundo algarismo	Proteção contra a entrada de água
0	Não protegido	0	Não protegido
1	Protegido contra objetos sólidos maiores que 50 mm	1	Protegido contra quedas verticais de gotas d'água
2	Protegido contra objetos sólidos maiores que 12 mm	2	Protegido contra queda de gotas d'água para uma inclinação máxima de 15°
3	Protegido contra objetos sólidos maiores que 2,5 mm	3	Protegido contra água aspergida
4	Protegido contra objetos sólidos maiores que 1,0 mm	4	Protegido contra projeções de água
5	Protegido contra poeira	5	Protegido contra jatos da água
6	Totalmente protegido contra poeira	6	Protegido contra ondas do mar
		7	Protegido contra imersão
		8	Protegido contra submersão

A normalização NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) adota classificação de proteção provida por invólucros diferente da normalização ABNT/IEC, que não apresenta correspondência exata com a designação IP, pois se baseia em outras condições de teste.

Na tabela 8.7 são apresentadas algumas equivalências aproximadas entre as designações de grau de proteção adotada pelas normalizações ABNT/IEC e NEMA.

TABELA 8.7
Comparação Aproximada de Graus de Proteção Providos por Invólucros,
Conforme Designações ABNT/IEC e NEMA

ABNT/IEC	NEMA
IP 30	NEMA 1
IP 31	NEMA 2
IP 52	NEMA 12/12K
IP 54	NEMA 3/3R/3S
IP 55	NEMA 13
IP 56	NEMA 4/4X
IP 67	NEMA 6/6P

Diferentemente da Certificação de Conformidade para os tipos de proteção aplicáveis para áreas classificadas, a Certificação de Conformidade referente ao grau de proteção

provisto por invólucros de instrumentos não é compulsória, mas sim voluntária, por iniciativa do fabricante.

Existem, porém, em muitos casos da obrigatoriedade do equipamento certificado possuir um grau de proteção mínimo, como por exemplo, o grau de proteção IP-54, como ocorre freqüentemente com o tipo de proteção Ex "i".

O grau de proteção de invólucros de instrumentos é normalmente ensaiado e certificado por um órgão ou laboratório independente, de forma a atestar as características de desempenho do produto contra ingresso de poeira ou água para o seu interior.

Invólucros com requisitos de desempenho contra a entrada de água devem ser especificados e ensaios com o segundo dígito até 5. Invólucros com requisitos de desempenho para imersão ou submersão devem ser especificados e ensaios para o segundo dígito 6 ou 7. Caso um mesmo invólucro necessite possuir requisitos de desempenho simultaneamente de grau de proteção para entrada de água e imersão/submersão o mesmo deve possuir marcação contendo os respectivos ensaios. Este critério, indicado na Norma NBR IEC 60529 deve-se ao fato das diferentes metodologias de ensaios de grau de proteção para estes diferentes requisitos de desempenho. Desta forma, um instrumento com marcação de grau de proteção IP-68 não atende necessariamente ao requisito de grau de proteção IP 65.

Outro critério importante a ser utilizado para instrumentos destinados à instalados em ambientes agressivos, como aqueles sujeitos à presença de água do mar, cloro ou vapores ácidos ou alcalinos é a proteção contra corrosão. Podem ser aplicados ensaios, como o de *salt spray*, ou feitas exigências especiais, como, por exemplo, a de que o invólucro seja fabricado com alumínio isento de cobre (*copper-free*) ou com pintura eletrostática em resina epóxi. Em casos como este, pode ser exigido certificado de análise do alumínio, de forma a atestar o teor de presença de cobre no alumínio.

Parafusos soltos, falta de colocação de juntas de vedação, eletrodutos mal roscados, prensa-cabos mal dimensionados, condutores ou acessórios de eletrodutos abertos ou com tampas mal fixadas, podem comprometer o grau de proteção dos invólucros e prejudicar a instalação ou o funcionamento dos equipamentos.

É necessária a programação da execução de inspeções periódicas para verificação das condições dos invólucros, quanto ao grau de proteção, de forma similar às inspeções que devem ser realizadas para a verificação da conformidade das instalações em atmosferas explosivas.

8.9 CRITÉRIOS DE PROJETO E DE ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA INSTALAÇÕES EM ÁREAS CLASSIFICADAS

Durante a fase de projeto de um empreendimento, deve ser realizado um estudo de classificação de área do local da instalação, determinando-se suas extensões e seus tipos (Zona 0, 1 ou 2) e os seus grupos representativos (IIA, IIB ou IIC).

Esta fase inicial do projeto deve ser feita conjuntamente pelo pessoal da engenharia de processo e pelo pessoal da engenharia elétrica/instrumentação. A engenharia de processo será a responsável por fornecer todas as informações referentes aos tipos de produtos e substâncias explosivas a serem processadas na instalação ou na planta.

Devem ser elaborados documentos do tipo Lista de Dados de Classificação de Áreas, contendo dados de processo, tais como identificação e localização dos equipamentos envolvidos, temperatura, pressão e volume de operação dos materiais inflamáveis ou explosivos e tipo de ventilação do local.

De posse de tais informações, e com base nas normas técnicas e na legislação aplicável, incluindo as eventuais figuras padronizadas representativas aplicáveis ao processo, devem ser elaborados, pela equipe de engenharia de processo, elétrica e instrumentação, os desenhos de plantas e cortes de classificação de área dos locais da instalação.

A partir de tais desenhos e da definição dos tipos de proteção a serem utilizados, serão feitas as especificações técnicas dos instrumentos a serem comprados e instalados. Deve ser ressaltado, neste ponto, a importância do conhecimento prévio, por parte do pessoal de projeto envolvido, das diversas técnicas de proteção e dos equipamentos e instrumentos disponíveis no mercado.

Uma forma de trabalho que deve ser evitada, nesta etapa de projeto de especificação dos instrumentos, é a de se transferir para o fornecedor dos equipamentos a engenharia de aplicação, e de deixar em aberto a liberdade de oferta de produtos diversos. Esta situação ocorre quando se especifica para compra um instrumento mencionando somente a classificação da área onde o mesmo será instalado, ao invés de se especificar o tipo de proteção a ser utilizado.

Por exemplo, no caso da especificação de uma válvula solenóide, se apenas for especificada a classificação da área onde a solenóide será instalada (por exemplo, "Zona 2 - Grupo IIA Temperatura T3"), poderão ser oferecidas solenóides com os tipos de proteção Ex "d", Ex "m", Ex "n", Ex "i" etc., sendo que todos estes tipos de proteção são adequados para instalação neste tipo de área classificada. Se, ao contrário, for especificado o tipo de proteção previamente definido e padronizado pelo projeto, por exemplo, Ex "i", não se transfere esta definição para o fornecedor da válvula solenóide, definindo-se, de antemão, o tipo de proteção e a tecnologia a ser fornecida.

Na tabela 8.8 são indicados os tipos de proteção aplicáveis para cada um dos três tipos de áreas classificadas existentes (Zona 0, 1 ou 2).

TABELA 8.8

Aplicabilidade dos Tipos de Proteção em Áreas Classificadas em Função do Tipo de Zona Existente

Zona	Tipos de proteção aplicáveis	Marcação
0	<ul style="list-style-type: none"> • Segurança intrínseca "a" • Proteção especial adequada para a Zona 0 <p>Qualquer tipo de proteção adequada para Zona 0:</p> <ul style="list-style-type: none"> • à prova de explosão; • segurança intrínseca "b"; • pressurizado; • segurança aumentada; • imerso em óleo; • imerso em areia; • imerso em resina; • proteção especial. 	Ex "ia" Ex "s"
1		Ex "d" Ex "ib" Ex "p" Ex "e" Ex "o" Ex "q" Ex "m" Ex "s"
2	<p>Qualquer tipo de proteção adequado para Zona 0 ou Zona 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> • não acendível 	Ex "n"

8.10 SERVIÇOS DE INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO, INSPEÇÃO E REPAROS DE INSTALAÇÕES EM ÁREAS CLASSIFICADAS

8.10.1 Instalação dos Equipamentos Elétricos e de Instrumentação em Atmosferas Explosivas

A responsabilidade do instalador e do usuário de uma planta de processamento petroquímico – tanto o pessoal de montagem próprio ou uma empresa de montagem contratada pelo operador da planta – para a correta instalação de equipamentos elétricos, eletrônicos e de instrumentação em atmosferas explosivas é particularmente séria. Devido à possibilidade do risco de explosão no evento de uma falha de execução dos serviços de montagem e inspeção destes tipos de equipamentos, a gestão sobre a capacitação do pessoal envolvido e sobre aplicação correta dos respectivos procedimentos normalizados deve ser constante por parte do usuário.

As fases de projeto, especificação e compra de instrumentos para uso em atmosferas explosivas são as fases iniciais e temporárias (da ordem de duração de semanas ou meses) de um processo muito mais longo e permanente de garantia de segurança (da ordem de anos ou décadas), que acompanha tais equipamentos durante toda a vida útil de uma planta de processo petroquímico.

Após a sua construção e partida, durante décadas, devem executados, permanentemente, serviços e procedimentos de rotina de operação, manutenção, inspeção e reparos dos equipamentos elétricos, eletrônicos e de instrumentação instalados, de forma a assegurar que permaneçam sendo adequadamente atendidos todos os requisitos dos respectivos tipos de proteção e, desta forma, manter os níveis de segurança das instalações e das pessoas.

A garantia de que uma instalação se encontra segura não se baseia somente no projeto, especificação e compra, mas também no evento da instalação e nas atividades permanentes de manutenção e inspeções periódicas.

De nada valem os esforços dos equipamentos terem sido corretamente especificados e adquiridos, com os respectivos Certificados de Conformidade, se os mesmos não forem adequadamente instalados e manutencidos, o que pode levar ao comprometimento da segurança das instalações e das pessoas envolvidas.

Desta forma, são de fundamental importância o treinamento e a capacitação do pessoal de campo envolvido com a instalação, manutenção e inspeção de instalações elétricas em áreas classificadas, de modo a se garantir a segurança das instalações de uma forma efetiva. Somente a qualificação, o treinamento, a conscientização e a constante reciclagem de todo o pessoal de instalação e manutenção envolvido com este tipo de instalação pode assegurar o desempenho de proteção necessário.

Em termos de instalação, a meta a ser atingida através de normalização específica é a de que, de modo análogo que se requer a certificação de conformidade compulsória de produto para áreas classificadas, que se requeira também a certificação da instalação, a ser conferida por peritos ou inspetores de conformidade em instalações em áreas classificadas, reconhecidos por organismos de certificação credenciados.

Os requisitos e recomendações indicados na Norma NBR IEC 60079-14 devem ser atendidos nas etapas de instalação de sistemas elétricos, de instrumentação e de automação em atmosferas explosivas.

8.10.2 Inspeção das Instalações Elétricas e de Instrumentação em Atmosferas Explosivas

Somente através da aplicação periódica de inspeções das instalações é possível evitar casos potenciais de riscos ou de não conformidades. Tais casos podem ser representados como a falta de instalação de unidades seladoras, unidades seladoras instaladas sem colocação de resina interna, tampas de invólucros à prova de explosão abertas ou com parafusos soltos, conexões de eletrodutos em invólucros à prova de explosão com menos de 5 roscas de fixação ou execução de modificações (furações) não autorizadas em invólucros à prova de explosão. Também podem ser indicados como pontos de falhas em instalações de equipamentos "Ex" a existência de invólucros ou edificações pressurizadas sem a devida pressurização ou com pressurização deficiente ou inoperante.

É nesta fase de inspeção que se percebe a vantagem de utilização de instrumentos e equipamentos com outros tipos de proteção mais modernos, do que os antigos equipamentos do tipo à prova de explosão. Durante as inspeções de campo, fazendo-se uma comparação entre diferentes instalações com estes dois tipos de proteção, torna-se muito mais simples verificar, por exemplo, a conformidade de sistemas intrinsecamente seguros, do que verificar a conformidade de instalações com equipamentos utilizando técnicas de proteção do tipo à prova de explosão.

São atividades relativamente simples de inspeção as verificações da compatibilidade entre os parâmetros de entidade dos instrumentos de campo e das barreiras da instalação e da inspeção visual de segregação, no campo, da instalação dos cabos dos circuitos intrinsecamente seguros (normalmente com cabos com capa externa na cor azul clara) e circuitos não intrinsecamente seguros. São, porém, complexas e difíceis de serem executadas no campo as atividades de inspeção, nos invólucros metálicos do tipo Ex "d", de que todos os parafusos se encontram devidamente fixados e que todos os eletrodutos estão devidamente roscados com pelo menos 5 fios de rosca, detalhes estes de difícil, mas necessária execução e verificação, de modo a assegurar a conformidade da instalação.

Sob este ponto de vista, deve ser ressaltada a importância do conhecimento prévio, por parte da engenharia de projeto, das dificuldades e problemas encontrados no dia a dia do campo, relativos às etapas de instalação, manutenção e de inspeção. A experiência e o conhecimento de tais dificuldades, quando da definição do tipo de proteção a ser especificado para os sistemas de instrumentação para uso em áreas classificadas, colaboraram para conferir à planta um maior índice de segurança com o maior grau de simplicidade possível.

Mesmos as partes dos equipamentos instaladas localizadas fora das áreas classificadas necessitam, sob certas circunstâncias, serem levadas em consideração quando da aplicação dos procedimentos de inspeção, como por exemplo, no caso da instalação de circuitos e sistemas intrinsecamente seguros, onde os equipamentos associados (barreiras e isoladores galvânicos) podem ser instalados em áreas seguras, como no interior de Casas de Controle Locais.

Os equipamentos elétricos instalados em atmosferas explosivas devem ser inspecionados, pelo menos, a intervalos de cada 3 anos, por pessoal qualificado. Os resultados dos ensaios e os relatórios das inspeções devem ser arquivados no Prontuário das Instalações Elétricas da instalação, conforme requerido na Norma Regulamentadora NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, do Ministério do Trabalho e do Emprego (MTE).

8.10.3 Operação dos Equipamentos Elétricos e de Instrumentação em Áreas Classificadas

Para os equipamentos elétricos, eletrônicos e de instrumentação, uma distinção deve ser feita entre as áreas de produção da planta, tais como motores, aquecedores, iluminação e instrumentação, operadas pelo pessoal de produção da planta, e os equipamentos elétricos, eletrônicos e de instrumentação instalados e operados no interior de casas de controle locais em de subestações.

O controle e a operação dos equipamentos elétricos e de instrumentação instalados nas áreas classificadas da planta devem ser especificados e projetados de forma que o pessoal da operação, que normalmente não possuem conhecimentos específicos de eletricidade e de instrumentação, possa operá-los sem a necessidade de extensivas instruções ou treinamentos específicos.

Os procedimentos e instruções de operação devem ser baseados, desta forma, na definição dos procedimentos a serem realizados nos eventos de falha e na restrição dos operadores de interferirem com os equipamentos elétricos e de instrumentação, de forma a não alterarem as suas características de proteção.

8.10.4 Serviços de Inspeção e Manutenção de Equipamentos Elétricos e de Instrumentação para Áreas Classificadas

Os equipamentos elétricos e de instrumentação instalados em atmosferas explosivas devem ser manutenciados e mantidos em um estado de integridade de acordo com as suas especificações de instalação. Isto não requer, normalmente, que os equipamentos existentes atendam, em cada caso, com os requisitos e especificações de instalação posteriores à época de sua construção, que possam ser mais rigorosas. Todos os equipamentos devem, porém estar de acordo com as respectivas especificações e instruções de instalação elaboradas pelos fabricantes.

Também a execução dos serviços rotineiros de manutenção de equipamentos elétricos e de instrumentação construídos de acordo com especificações já alteradas pela normalização ou pelo fabricante não requer que os equipamentos sejam substituídos ou modificados. Um pré-requisito para esta manutenção é que, após a execução dos serviços, com a utilização de peças sobressalentes originais, onde necessário, o equipamento ainda corresponda e atenda a todas as especificações originais de construção.

As listas de verificação e as recomendações existentes na Norma NBR IEC 60079-17 devem ser aplicadas nestes casos.

8.10.5 Serviços de Reparo e Revisão em Equipamentos Elétricos e de Instrumentação para Áreas Classificadas

Os reparos e revisão de equipamentos elétricos, de instrumentação ou automação para atmosferas explosivas são normalmente realizados em oficinas especializadas que possua um profissional especializado a sua disposição ou nas instalações do fabricante, de forma que seja assegurado o conhecimento necessário seja aplicado durante a execução dos serviços de

reparo. Tais oficinas especializadas ou instalações do fabricante são também as organizações adequadas para a tomada da decisão necessária sobre se o resultado do reparo é aceitável ou não.

Quando partes defeituosas necessitarem de substituição, a utilização de peças sobressalentes originais fornecidas ou indicadas pelo fabricante deve ser fundamentalmente seguida. Quando da execução de reparos que não afetem o tipo de proteção, certas exceções a esta regra geral podem ser aceitáveis, levando-se em consideração que nenhum reparo pode ser realizado que possa afetar a proteção contra explosão.

Quando da execução dos serviços de reparo, um pré-requisito é a cuidadosa execução e o conhecimento das características do tipo de proteção em cada caso, de forma que na remontagem do equipamento, atenção especial seja dada à manutenção da proteção contra explosão e para assegurar que nenhuma alteração tenha ocorrido que possa prejudicar esta proteção contra explosão.

Para equipamentos com tipo de proteção a prova de explosão, por exemplo, estes cuidados e atenção incluem a verificação de que as folgas entre os invólucros e eixos foram mantidas dentro de limites aceitáveis. Os serviços de acabamento necessário sobre as superfícies das partes que formam as juntas, que não estejam mais em condições satisfatórias para a proteção contra explosão, devem ser limitados a remoção da corrosão superficial. Em eventos de ocorrência de danos mais severos, o profissional especialista ou um representante do fabricante deve ser consultado.

Os procedimentos e requisitos indicados na Norma NBR IEC 60079-19 devem ser aplicados nestes casos de necessidade de reparo ou revisão.

8.11 GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS DA IEC E TERMOS “EX”

Encontra-se disponível como fonte de consulta para acesso público *on-line*, no website da IEC, o **Glossário de Termos Técnicos da IEC**. Este glossário de termos técnicos da IEC pode ser encontrado no seguinte endereço: <http://dom2.iec.ch/terms>.

Este glossário é uma compilação da terminologia eletrotécnica, em inglês e francês, extraída das seções “Termos e Definições” das diversas Normas IEC, publicadas a partir de 2003 e em alguns casos de termos coletados a partir de publicações anteriores. O banco de dados atualmente conta com cerca de 10.000 itens, com novos termos sendo adicionados continuamente.

Os termos técnicos “Ex” específicos sobre equipamentos e instalações em atmosferas explosivas, para as publicações do TC-31 podem ser encontrados nos seguintes websites:

Glossário de Termos Técnicos “Ex” do Comitê Técnico TC-31

<http://dom2.iec.ch/terms/terms.nsf/ByTC?OpenView&Count=1&RestrictToCategory=31>

Glossário de Termos Técnicos “Ex” do Subcomitê SC-31G - Segurança Intrínseca

<http://dom2.iec.ch/terms/terms.nsf/ByTC?OpenView&Count=1&RestrictToCategory=31G>

Glossário de Termos Técnicos “Ex” do Subcomitê SC-31H - Poeiras Combustíveis

<http://dom2.iec.ch/terms/terms.nsf/ByTC?OpenView&Count=1&RestrictToCategory=31H>

Glossário de Termos Técnicos "Ex" do Subcomitê **SC-31J** - IEC 60079-10/14/17/19
<http://dom2.iec.ch/terms/terms.nsf/ByTC?OpenView&Count=1&RestrictToCategory=31J>

Glossário de Termos Técnicos da IEC (cerca de 80 áreas da eletricidade com mais de 10.000 termos)
<http://dom2.iec.ch/terms>

International Electrotechnical Vocabulary (*IEV*) Online Database
<http://dom2.iec.ch/iev>

8.12 FONTES DE REFERÊNCIA E BIBLIOGRAFIA SOBRE ATMOSFERAS EXPLOSIVAS

São listados abaixo *links* para alguns endereços de *websites* da internet que contém fontes de referência oficiais, bibliografia e informações, documentos, legislação e normalização para equipamentos e instalações elétricas para atmosferas explosivas.

IEC, Mission and Objectives
<http://www.iec.ch/about/mission-e.htm>

IEC, WTO TBT Agreement
<http://www.iec.ch/about/partners/agreements/wto-e.htm>

WTO - World Trade Organization, Technical Barriers to Trade
http://www.wto.org/english/docs_e/legal_e/17-tbt.pdf

WTO - World Trade Organization, Committee on Technical Barriers to Trade, National Enquiry Points, G/TBT/ENQ/21, 29/11/2002
<http://docsonline.wto.org/ddfdocuments/t/g/tbt/enq21.doc>

WTO - World Trade Organization, Technical Barriers to Trade (TBT) - Annex 3 - Code of good practice for the preparation, adoption and application of standards
<http://www.iso.org/iso/en/comms-markets/wto/pdf/tbt-a3.pdf>

IEC, TC-31, Equipment for Explosive Atmospheres
<http://www.iec.ch/cgi-bin/procgi.pl/www/iecwvw.p?wwwlang=E&wwwprog=dirdet.p&progdb=db1&committee=TC&number=31>

IEC, TC-31, Equipment for Explosive Atmospheres, Strategic Policy Statement
<http://www.iec.ch/cgi-bin/getspes.pl/31.pdf?file=31.pdf>

IEC, Ex Scheme
<http://www.iecex.com/>

ANM – Associação de Normalização Mercosul, Informações Gerais
<http://www.amn.org.br/br/00401007.asp>

ABNT, Apresentação
http://www.abnt.org.br/instit_apresen.htm

COBEI - Objetivos e Finalidade

<http://www.cobei.org.br/>

INMETRO, Portaria 0176/2000, de 17/07/2000,

<http://www.inmetro.gov.br>

MTE – Ministério do Trabalho e do Emprego, Legislação sobre Segurança e Saúde no Trabalho, NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade,

<http://www.mte.gov.br/Empregador/segsau/Legislacao/Normas/Default.asp>

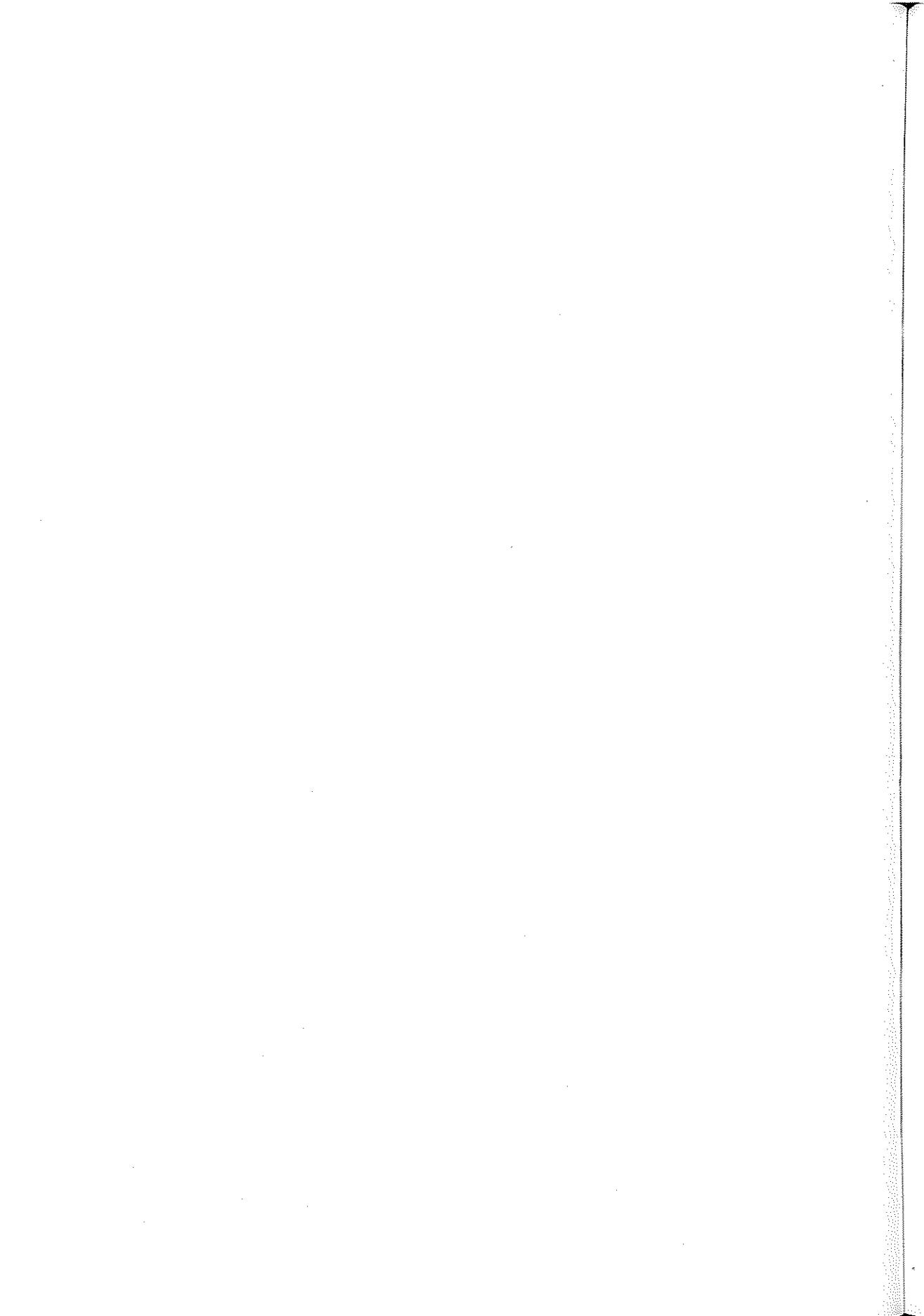
8.13 REFERÊNCIAS DAS FOTOS E FIGURAS UTILIZADAS PARA ILUSTRAÇÃO NESTE CAPÍTULO

As fotos e figuras apresentadas neste capítulo, que contribuem para ilustrar exemplos de equipamentos e de instalações elétricas e de instrumentação em atmosferas explosivas foram gentilmente cedidas e publicadas sob autorização das empresas abaixo indicadas.

Fotos: Cortesia da PETROBRAS - Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão - RPBC.

Figuras: Obtidas a partir de “sites” da Internet, em “*home-pages*” de fabricantes de equipamentos e instrumentos para instalação em Atmosferas Explosivas, tais como:

- CROUSE HINDS (<http://www.crouse-hinds.com>),
- CEAG (<http://www.ceag.de/products/em>),
- STAHL (<http://www.rstahl.com/home/home.htm>),
- YOKOGAWA (<http://www.yokogawa.com/fld/PRESSURE/EJX/fld-ejx110a-01en.htm>).



9

VÁLVULAS DE CONTROLE

ENGº RICARDO KOCH

9.1 INTRODUÇÃO

9.1.1 A Válvula na Malha de Controle

A válvula de controle desempenha um papel muito importante no controle automático de processos industriais que dependem da correta distribuição e controle de líquidos, gases e vapores.

Tais processos dependem de algum tipo de elemento final de controle para executar tarefas de transferência de fluidos para tanques de armazenamento, controle de transferência de calor (energia), redução de pressão etc.

Os elementos finais de controle que têm na válvula seu principal representante são os responsáveis pela manipulação do fluxo de matéria e/ou energia, que tem como finalidade atuar no processo de modo a corrigir o valor da variável controlada sempre que houver algum desvio em relação ao valor desejado.

A figura 9.1 contém o desenho de uma malha de controle, destacando a válvula como elemento final de controle.

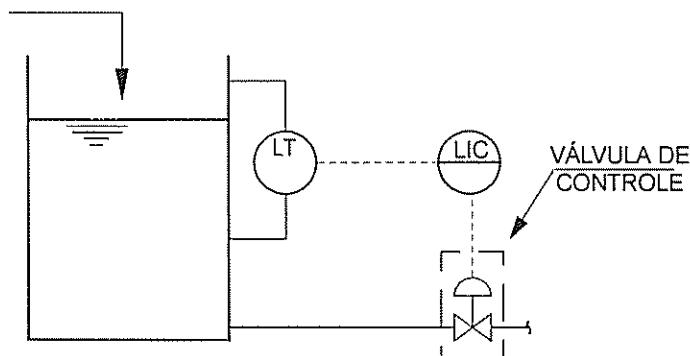


FIGURA 9.1 A válvula numa malha de controle.

Outros elementos finais de controle podem ser bombas dosadoras, *dampers* e *louvers* (variações de válvulas borboleta), hélices de passo variável, motores com variadores de velocidade etc.

Apesar de largamente utilizada, a válvula de controle é o elemento que normalmente recebe menos atenção dentro da malha de controle. Na maioria dos casos, a válvula de controle é o componente mais sujeito a condições severas de pressão, temperatura, corrosão, erosão etc. e, ainda assim, deve operar de modo satisfatório, para não comprometer o controle da variável em consideração.

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

A fim de melhor compreendermos o que é uma válvula de controle, vamos verificar quais os seus componentes, funções e características principais.

9.1.2 Componentes de uma Válvula de Controle

Uma válvula de controle divide-se basicamente nas seguintes partes:

- atuador;
- corpo e internos;
- castelo e engaxetamento.

A figura 9.2 ilustra uma válvula de controle com destaque para o corpo, castelo e atuador.

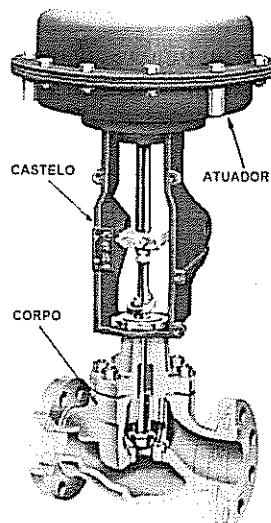


FIGURA 9.2 Válvula de controle com seus três componentes básicos.

9.1.2.1 Atuador

É a parte da válvula de controle que fornece a força com que a válvula realiza seu trabalho. O atuador mais comumente utilizado no acionamento de válvulas de controle consiste numa câmara bipartida que contém um diafragma flexível. Numa das partes desta câmara o atuador recebe o sinal de controle, e, na outra parte, o diafragma é fixado a um prato, onde se apóiam uma haste e uma mola.

Quando se aplica em seu lado próprio, ar, proveniente diretamente do controlador, se este for pneumático ou de um posicionador eletropneumático (será estudado mais adiante), a força produzida se opõe à força gerada pela mola, a qual limita o curso e regula a posição da haste. Assim, esse tipo de atuador transforma a pressão de ar aplicada num movimento de translação.

A mola tem a função de se opor à força desenvolvida pela pressão do ar de atuação que age no diafragma, de modo a posicionar a haste do atuador para cada sinal recebido do controlador.

A maioria dos atuadores opera numa faixa de pressão que varia de 3 a 15 psi (*pounds per square inch*), a qual, para o sistema métrico que estamos utilizando, representa 0,2 a 1,0 kgf/cm².

Com uma pressão de 0,2 kgf/cm² aplicada ao atuador, o diafragma começa a se mover, dando início ao curso da haste. Para uma pressão de 0,6 kgf/cm² (metade do valor da faixa de atuação), o curso da haste corresponde à metade do curso total e, para uma pressão de 1,0 kgf/cm², a haste completa o seu curso, atingindo a outra posição extrema.

O sistema de atuação das válvulas de controle, em última análise, transforma pressão de ar em força aplicada ao diafragma e existe uma relação praticamente linear entre a pressão de ar de atuação e o deslocamento (curso da haste). Tal relação pode ser ilustrada na figura 9.3.

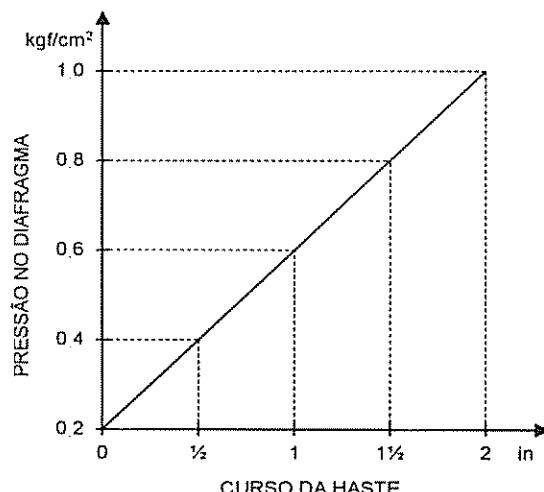


FIGURA 9.3 Relação entre a pressão de ar no diafragma e o curso da haste da válvula de controle.

A faixa de variação da pressão de atuação aplicada ao diafragma constitui-se na faixa da mola, a qual é ajustada para equilibrar a pressão de atuação e posicionar a haste da válvula de modo conveniente à realização do controle.

Existem outras faixas de mola além da faixa 0,2 a 1,0 kgf/cm², em função dos valores de pressão de operação a que os internos da válvula sejam submetidos. Por questões de equilíbrio dinâmico, os fabricantes determinam a faixa da mola necessária ao correto posicionamento da haste.

Uma outra faixa de atuação também comumente utilizada é 6-30 psi, designada no sistema métrico como 0,4-2,0 kgf/cm².

Na especificação de uma válvula de controle através de um formulário padronizado, como veremos mais adiante, um dos valores que se deve especificar é a pressão de ar de acionamento disponível na planta, para que o fornecedor defina as dimensões do atuador em função das forças necessárias à sua operação, bem como os eventuais acessórios para o condicionamento da pressão aos valores exigidos.

Os atuadores tipo mola e diafragma apresentam algumas variações que devem ser analisadas, em função das necessidades do processo.

Os atuadores, quanto à ação, podem ser do tipo ação direta ou ação inversa, como se pode observar nas figuras 9.4 e 9.5, respectivamente.

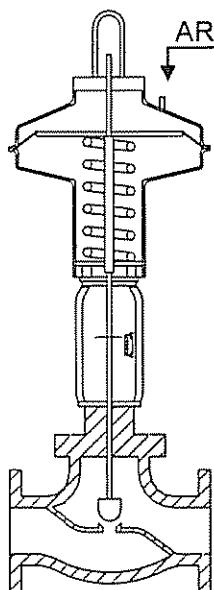


FIGURA 9.4 Atuador tipo mola e diafragma de ação direta.

Um atuador de ação direta, no qual a válvula de controle fecha com o aumento da pressão de ar, por exemplo, assume a posição totalmente aberta em caso de falha de suprimento do ar de acionamento. O atuador de ação inversa, por sua vez, se dirige à posição totalmente fechada.

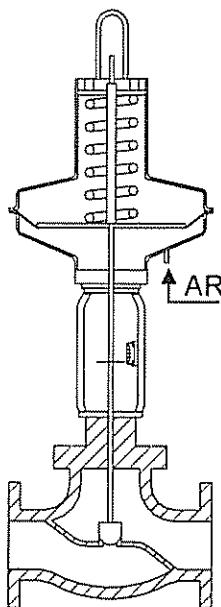


FIGURA 9.5 Atuador tipo mola e diafragma de ação inversa.

Normalmente, estes atuadores apresentados destinam-se ao acionamento de válvulas denominadas de curso linear, ou seja, haste ascendente ou descendente, dependendo da abertura ou fechamento da mesma. As válvulas acionadas por estes tipos de atuadores são normalmente as denominadas válvulas globo e suas variações.

Quando se utilizam, em função das necessidades do processo, válvulas do tipo esfera ou borboleta cujo movimento do eixo é rotativo, estas necessitam de atuadores que produzem deslocamentos angulares, cujo movimento é transmitido ao eixo da válvula (figura 9.6).

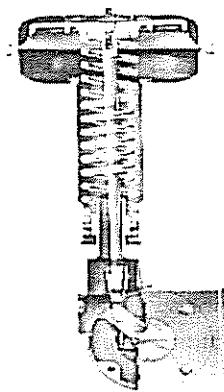
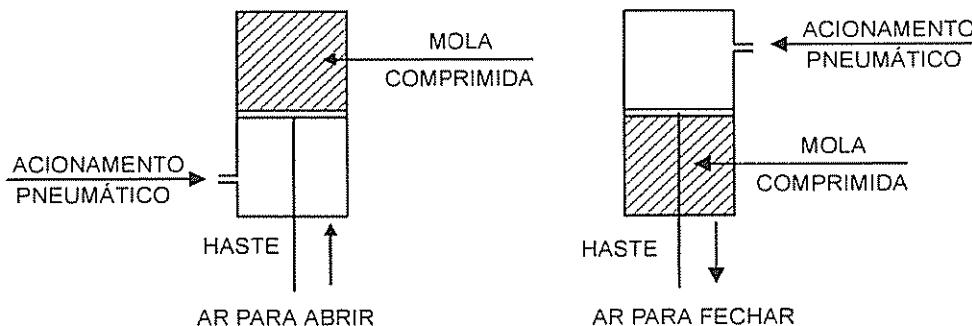


FIGURA 9.6 Atuador para válvulas rotativas (esfera ou borboleta).

Além dos atuadores tipo mola e diafragma apresentados, existem outros tipos de atuadores pneumáticos bastante aplicados em indústrias de processo para controle e principalmente bloqueio de fluxo. São os atuadores a pistão.

Nas figuras 9.7a e 9.7b são apresentados esquemas dos atuadores do tipo pistão com retorno por mola.



**FIGURA 9.7 Atuadores pneumáticos tipo pistão com retorno por mola:
ar para abrir e ar para fechar.**

Estes atuadores destinam-se normalmente a bloqueio de fluxo por questões de segurança de processo e de equipamentos, sendo que a válvula pode assumir, neste caso, a posição aberta ou fechada. A mola é instalada numa câmara oposta ao compartimento onde é injetado o ar de acionamento, de modo que, na falha de alimentação pneumática, a mola leva o atuador e, consequentemente, a válvula para a posição desejada.

Estes atuadores têm uma certa restrição quando a pressão na tubulação é muito elevada, uma vez que a mola deve ser, neste caso, muito robusta para conseguir vencer a resistência do escoamento. Além disso, a mola, em algumas aplicações, opera durante um bom período na posição comprimida pelo ar da câmara oposta, fazendo com que sua força de acionamento seja reduzida, podendo, eventualmente, influir na estanqueidade da válvula.

Para contornar estas situações utilizam-se, alternativamente, os atuadores pneumáticos do tipo cilindro de dupla ação, onde o ar comprimido atua em duas câmaras opostas, incidindo de forma alternada num ou outro compartimento, comutando a posição da válvula que pode abrir, ou fechar.

Tanto no caso dos atuadores pneumáticos do tipo pistão com retorno por mola, como nos cilindros de dupla ação, o comando para mudança na posição da válvula se efetiva através de uma válvula acionada por um solenóide instalada na linha de ar para o atuador. Estas válvulas solenóide são também conhecidas como válvulas piloto e podem ser de três, quatro ou cinco vias.

No caso de válvulas acionadas por atuadores do tipo retorno por mola, as solenóides piloto utilizadas são de três vias. Para comando de atuadores do tipo cilindro de dupla ação, as válvulas solenóide normalmente aplicadas são as de quatro vias, podendo também ser de cinco vias.

As válvulas solenóide de comando são válvulas que, por construção, promovem o desvio do fluxo de ar do atuador da válvula principal, de modo que esta possa assumir a posição de falha desejada. Dependendo dos requisitos de operação e, principalmente, de segurança do processo, as válvulas podem assumir a posição fechada, aberta ou ainda permanecerem na última posição antes da falha de energia ou fluido de comando que, normalmente, é ar comprimido.

O comando da solenóide é elétrico, normalmente vindo do sistema de intertravamento da planta, o qual energiza ou desenergiza a solenóide, dependendo da especificação da ação da mesma.

A figura 9.8 mostra uma válvula atuada por cilindro com retorno por mola, acionada por uma válvula solenóide de três vias.

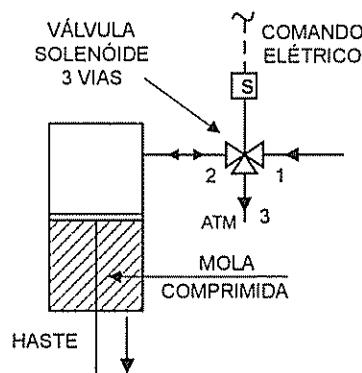


FIGURA 9.8 Válvula atuada a pistão com retorno por mola comandada por solenóide de 3 vias.

Para ilustrar a aplicação da figura 9.8, vamos considerar que:

- a solenóide piloto está energizada, ou seja, circula corrente através de sua bobina (solenóide propriamente dito), fazendo com que o ar passe da via 1 para a via 2, alimentando o pistão com ar comprimido. A via 3 da solenóide piloto está fechada, de modo a manter o pistão pressurizado pela aplicação da pressão;
- a mola oposta à câmara do pistão está comprimida para manter a válvula principal na posição desejada (aberta ou fechada).

Nestas condições, quando a solenóide for desenergizada por um comando externo, a via 1 será bloqueada, impedindo a entrada de ar comprimido, a via 3 será aberta, provocando o escape do ar contido na câmara do pistão para a atmosfera, despressurizando este compartimento. A mola oposta, até então comprimida, deverá, nestas condições, levar a válvula para a posição oposta.

O dimensionamento do pistão, bem como da mola, depende da pressão máxima da tubulação na qual a válvula está instalada.

Na figura 9.9, é ilustrada a operação de um cilindro pneumático de dupla ação comandado por uma válvula solenóide piloto de quatro vias.

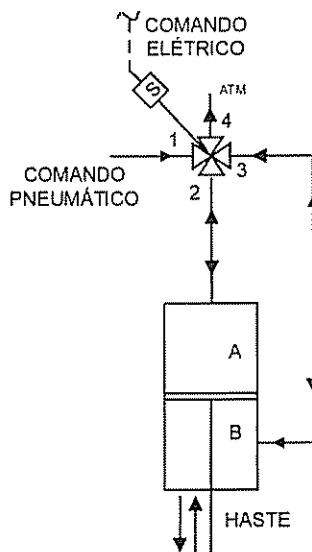


FIGURA 9.9 Cilindro pneumático de dupla ação, atuado por solenóide de quatro vias.

Para melhor compreender a operação deste sistema de atuação, vamos considerar que:

- a solenóide piloto está energizada, fazendo com que o ar passe da via 1 para a via 2, pressurizando o compartimento "A" do cilindro e, ao mesmo tempo, o ar do compartimento "B" é dirigido para a atmosfera, da via 3 para a via 4 da válvula solenóide piloto.

Caso um comando externo desenergize a solenóide, a mesma deverá efetuar uma comutação, de modo que o ar de comando se dirija à câmara "B", da via 1 para a via 3, e o ar anteriormente contido no compartimento "A" se dirija para a atmosfera escoando da via 2 para a via 4. Deste modo, o cilindro inverte a posição da válvula principal, para satisfazer as condições do processo.

Este tipo de atuador tem sua aplicação facilitada quando especificado para permanecer na última posição, em caso de falha de ar de comando. Quando, entretanto, a válvula deve assumir posição aberta ou fechada, em caso de falha de comando pneumático, deverá ser especificado um sistema de acionamento que contenha um volume de ar de reserva na pressão necessária, de acordo com a pressão da linha.

Além dos atuadores do tipo mola e diafragma e dos cilindros pneumáticos abordados até o momento, que são os tipos mais representativos, temos também os seguintes atuadores:

Atuadores Manuais

Nessa classificação podemos incluir as válvulas acionadas por volantes e hastes rosadas, alavancas e volantes com caixa de redução.

A figura 9.10 apresenta uma válvula acionada por volante e haste rosada, muito utilizada para bloqueio em caso de pressões mais baixas, em linhas de pequeno diâmetro, bloqueio de tomadas de instrumentação etc. A maior utilização deste tipo de acionamento se dá em caso de necessidade de se efetuar regulagem manual de fluxo para alguma finalidade de processo, tais como ajuste de fluxo em tomadas de amostras, manutenção de pressão num dado valor e outras.

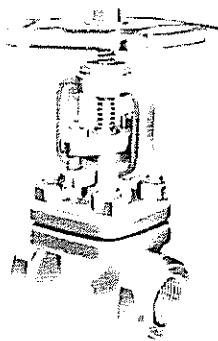


FIGURA 9.10 Acionamento manual por volante e haste rosada

A figura 9.11 ilustra uma válvula do tipo esfera acionada manualmente por meio de alavanca.

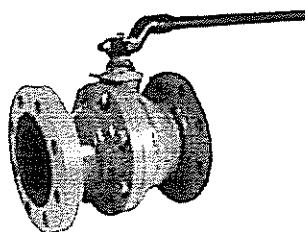


FIGURA 9.11 Válvula esfera com acionamento manual por alavanca

Estas válvulas acionadas por meio de alavanca são do tipo quarto de volta, e são instaladas em aplicações que requerem fechamento rápido e eficiente, livres de vazamento.

As estações de redução de pressão de gás natural, por exemplo, utilizam muito este tipo de válvulas como bloqueio, de modo a efetuar manobras de comutação, isolar equipamentos para substituição e manutenção e outras. São utilizadas normalmente em linhas de até 6" na classe de pressão 150#, operando normalmente em pressões baixas e

médias. Dessa forma, é possível efetuar o acionamento manual sem muito esforço por parte do operador. A pressão de projeto de uma linha na classe 150# é de 20 kgf/cm².

Em casos de tubulações que operam em altas pressões, linhas classe 300#, onde a pressão de projeto é de 50 kgf/cm² ou pressões superiores, em diâmetro de 6" ou maiores, as válvulas manuais possuem acionamento por meio de volante com caixa de redução, o que confere maior torque de atuação (figura 9.12).

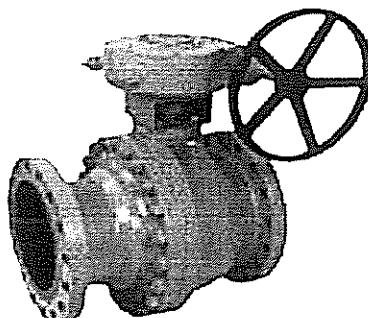


FIGURA 9.12 Válvula esfera com acionamento por volante e caixa de redução.

Atuadores Elétricos

Este tipo de atuador é composto por um motor elétrico acoplado a uma caixa de redução, conforme mostra a figura 9.13.

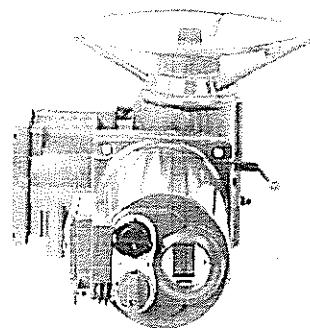


FIGURA 9.13 Atuador elétrico (motor elétrico).

As válvulas equipadas com este conjunto moto-redutor são normalmente de grandes diâmetros, onde as forças requeridas para abertura e fechamento são, em geral, grandes, não podendo ser fornecidas com atuadores pneumáticos.

A utilização mais comum deste tipo de atuador encontra-se em adutoras, oleodutos, terminais de tancagem de produtos químicos e petroquímicos, e similares, onde as distâncias entre o ponto de comando e o da localização da válvula são grandes.

Atualmente, com o grande desenvolvimento da tecnologia eletrônica digital, as válvulas com atuadores elétricos são muito aplicadas em controle modulante e mesmo

em operações de bloqueio, sendo interligadas em redes através das quais se comunicam entre si e com outros dispositivos do sistema de controle e monitoração, possibilitando operações de diagnósticos operacionais e de falhas, coleta de dados para estabelecer rotinas de manutenção etc. A figura 9.14 mostra uma série de válvulas interligadas em rede.

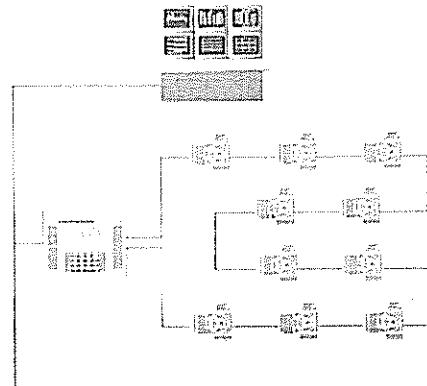


FIGURA 9.14 Atuadores elétricos interligados em rede.

Atuadores Hidráulicos

Trata-se de atuadores que são compostos de um pistão e uma bomba de óleo, que, quando solicitada por um comando externo, bombeia mais ou menos óleo (ou outro fluido hidráulico) para o interior do pistão.

A figura 9.15 ilustra este tipo de atuador, que é normalmente aplicado em locais onde a temperatura ambiente é elevada para atuadores pneumáticos, ou quando se necessita de forças de atuação maiores.

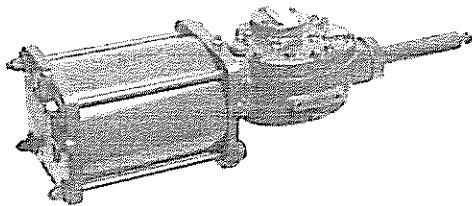


FIGURA 9.15 Atuador hidráulico.

9.1.2.2 Corpo e internos

Como já visto anteriormente, a válvula de controle varia a vazão, introduzindo uma restrição no circuito, dissipando uma parte da energia proveniente de uma fonte de pressão, que normalmente é uma bomba centrífuga. A válvula reduz a pressão na descarga da bomba, de modo análogo a um resistor, o qual faz cair a tensão desenvolvida por uma fonte de energia elétrica.

O fluido de processo passa pelo corpo da válvula de controle, sendo que o obturador é o elemento móvel da válvula, responsável por restringir a vazão. O seu formato fixa a relação entre a abertura da válvula e a vazão correspondente, dando origem, como veremos mais adiante, à característica de vazão da válvula de controle. O corpo da válvula é função da aplicação, bem como os seus internos.

O tipo de corpo mais freqüentemente utilizado é o da válvula globo de sede simples, o qual é tomado como exemplo, nesta etapa, apenas para ilustrar a forma como a manipulação do fluido é exercida.

A figura 9.16 mostra uma válvula globo do tipo sede simples, através da qual passa o fluido de processo.

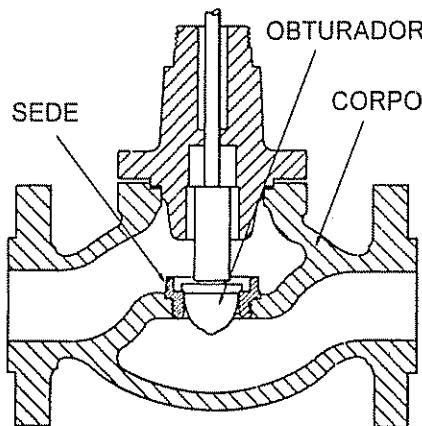


FIGURA 9.16 Corpo e internos de uma válvula de controle.

Obviamente, qualquer que seja o tipo de válvula utilizado, a manipulação é feita de forma semelhante, com a diferença que, para cada aplicação, o tipo de válvula adequada deve ser escolhido, como veremos adiante nos itens 9.2 – Tipos de válvulas de controle e 9.4 – seleção, dimensionamento e especificação de válvulas de controle. Nestes itens, o corpo e os internos das válvulas serão um pouco mais detalhados.

9.1.2.3 Castelo e engaxetamento

O castelo é a parte da válvula que conecta o atuador ao corpo da válvula, guiando a haste da mesma, alojando o sistema de selagem do fluido de processo e exercendo um papel importante de realizar troca de calor do sistema de engaxetamento com o ambiente.

Pode ser dividido em quatro tipos:

1. castelo normal;
2. castelo aletado;
3. castelo alongado;
4. castelo com fole de vedação.

Com o castelo normal, a válvula pode ser utilizada em praticamente todos os tipos de aplicação em que a temperatura não ultrapasse 180 °C (podendo variar um pouco, de acordo com o fabricante) e que o fluido de processo não possua características tóxicas ou inflamáveis.

O castelo alongado com aletas de resfriamento é utilizado quando a temperatura ultrapassa 180 °C. Deve ser convenientemente dimensionado para garantir uma queda acentuada de temperatura, para proteger principalmente o sistema de atuação.

Há também os castelos alongados utilizados para prevenir o congelamento das gaxetas em aplicações criogênicas. Devem ser adequadamente longos, para que a temperatura das gaxetas não seja inferior a -25 °C, sendo recomendados para aplicações em temperaturas inferiores a -5 °C.

Com relação aos castelos com fole de vedação, os mesmos são utilizados para fluidos tóxicos e inflamáveis e servem como reforço das gaxetas. O fole é normalmente fabricado de liga metálica resistente à corrosão, flexível, devendo ser soldado à haste da válvula.

Os castelos abordados acima são empregados em válvulas do tipo convencional, onde a haste executa movimentos de translação em conformidade com o sinal de atuação enviado pelo controlador. A figura 9.17a, b e c ilustra os castelos do tipo normal, alongado e com foles.

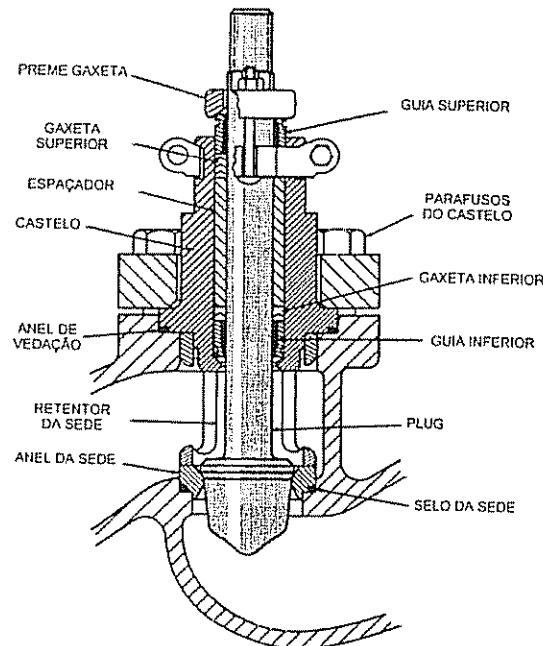


FIGURA 9.17a Castelo normal.

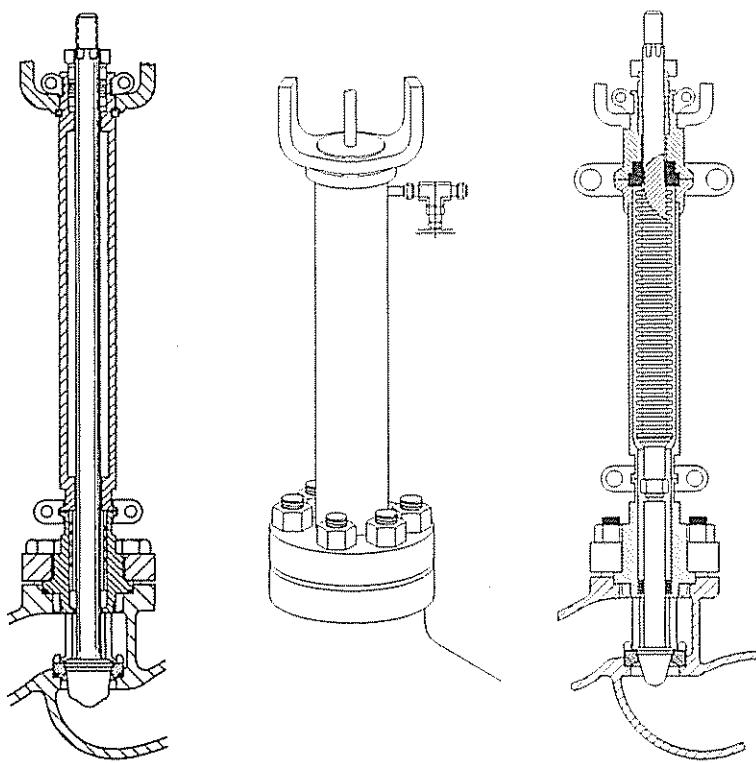


FIGURA 9.17b,c Castelos alongado e com foles.

Quanto às gaxetas, nas válvulas do tipo esfera e borboleta, que possuem haste ou eixo com deslocamento rotativo, o desgaste das mesmas, normalmente anéis de vedação em torno do eixo, é menor.

No caso das válvulas globo, como a haste é deslizante há a necessidade de uma selagem da haste através do denominado sistema de engaxetamento, como se observa na figura 9.18.

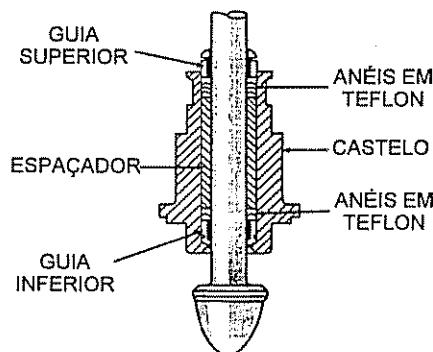


FIGURA 9.18 Sistema de engaxetamento de uma válvula globo.

Constituem-se de anéis e acessórios com a função de fixar o sistema ao castelo, em torno da haste, de modo a se evitar vazamentos do fluido de processo.

Os materiais mais utilizados no engaxetamento das válvulas de controle são o teflon, o asbesto e o grafite. O material das gaxetas deve ser compatível com o fluido do processo, deve efetuar uma boa selagem da haste e produzir mínimo atrito no deslizamento da haste. O teflon é o material mais utilizado, cobrindo a maior parte das aplicações. Em serviços com alta temperatura e/ou pressão, o teflon pode ser impregnado com outros materiais, como, por exemplo, a fibra de vidro.

O teflon está limitado a temperaturas da ordem de 230 °C mas, caso carregado com fibra de vidro, pode atender até temperaturas de 450 °C. Nestas temperaturas, porém, utilizam-se materiais mais apropriados, como o asbesto ou o grafite. O limite mínimo pode chegar a -185 °C.

O asbesto é o material mais antigo na fabricação de gaxetas. Os anéis deste material devem ser lubrificados para diminuir o atrito com a haste, e isto é normalmente feito através de injeção de graxa lubrificante, por meio de lubrificador externo e válvula isolante, conforme a figura 9.19.

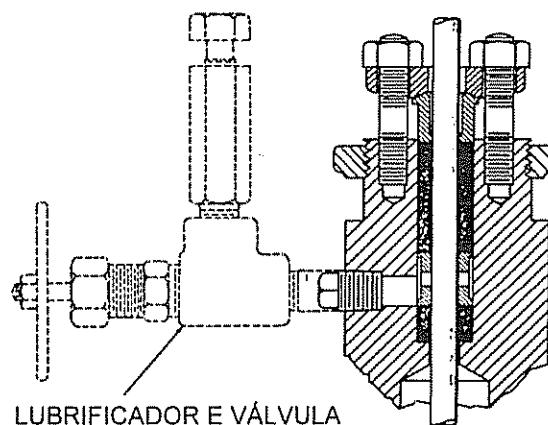


FIGURA 9.19 Lubrificador externo com válvula.

Um dos materiais mais aplicados nos sistemas de engaxetamento é o grafite, onde a maior vantagem é a resistência a altas temperaturas (540 °C). Alguns tipos especiais de grafite utilizados em castelos estendidos podem atingir temperaturas de até 640 °C.

Uma desvantagem do grafite, entretanto, é a menor durabilidade, obrigando sua substituição com maior freqüência.

As condições extremas de utilização devem ser bem especificadas, de modo que os fabricantes possam auxiliar no fornecimento do sistema de engaxetamento mais adequado.

9.2 TIPOS DE VÁLVULAS DE CONTROLE

9.2.1 Válvulas Globo

As válvulas de controle mais freqüentemente utilizadas são as do tipo globo de sede simples ou sede dupla, genericamente designadas por globo.

São para aplicação em caso de fluidos limpos, isentos, portanto, de sólidos em suspensão, fibras etc., os quais poderiam danificar os internos da válvula, comprometendo seu fechamento.

As válvulas de sede dupla, como mostrada na figura 9.20, são normalmente construídas para serem reversíveis, ou seja, as partes podem ser montadas para assentamento do obturador contra as sedes por cima ou por baixo. Observa-se que esta válvula é guiada no topo e no fundo.

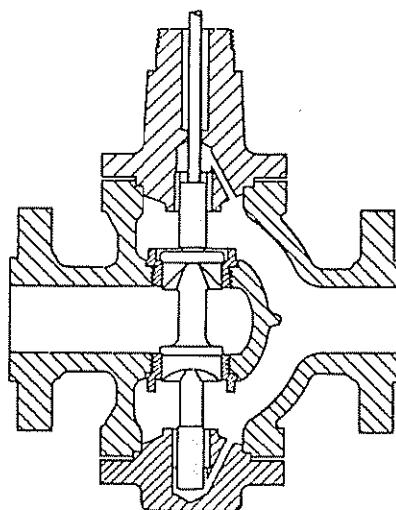


FIGURA 9.20 Válvula globo do tipo sede dupla.

As válvulas de sede dupla são dotadas de um obturador balanceado e utilizam atuadores pequenos, mas possuem a desvantagem de permitir um certo vazamento entre o obturador e a sede.

As válvulas de sede simples, por sua vez, apresentam menor vazamento. Entretanto, as forças requeridas para o seu acionamento são maiores do que nas de sede dupla.

Quanto à guia da haste, existem válvulas globo guiadas no topo que utilizam um orifício de menor diâmetro para se obter uma mesma capacidade de vazão. A figura 9.21 apresenta uma válvula globo das mais utilizadas, ou seja, tipo sede simples guiada no topo.

Um outro tipo de válvula bastante utilizada em controle de processos é a válvula globo de sede simples com corpo reversível, guiada no topo e no fundo (figura 9.22).

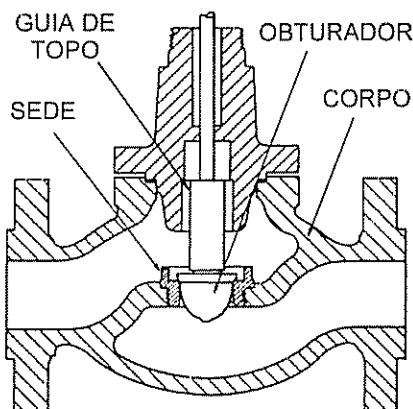


FIGURA 9.21 Válvula globo sede simples guiada no topo.

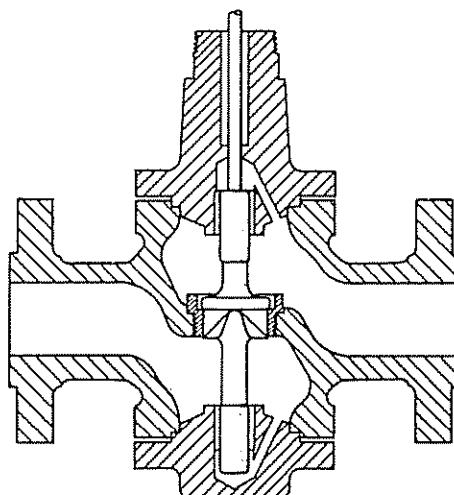


FIGURA 9.22 Válvula globo de sede simples, guia topo e fundo assento reversível.

Em termos de facilidade para montagem e desmontagem da válvula na tubulação, há um projeto denominado de corpo bipartido ou *split-body*, que consiste de um corpo em duas metades, entre as quais fica alojada a sede. A maior vantagem desta construção é permitir a substituição da sede quando necessário. Este tipo de válvula globo é ilustrado na figura 9.23.

Uma variação de válvula globo é a válvula do tipo angular. O desenho da válvula faz com que se diminua o processo de erosão do corpo, especialmente em aplicações envolvendo lamas, em inglês *slurry*. Esta válvula, mostrada na figura 9.24, destina-se a aplicações gerais e o obturador é guiado no topo.

Existem condições de operação muito adversas, como, por exemplo, hidrocarbonetos em estado de "flasheamento" (vaporização), com tendência de incrustação de resíduos formados, em que o projeto da válvula deve ser específico. Um tipo de válvula ade-

quando para esta aplicação é a válvula angular com guia reforçada no obturador, como ilustrado na figura 9.25.

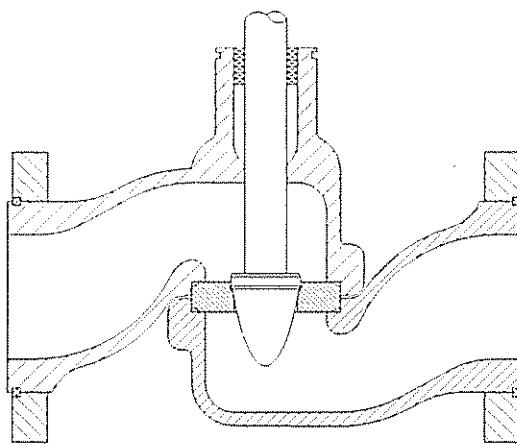


FIGURA 9.23 Válvula globo com corpo bipartido.

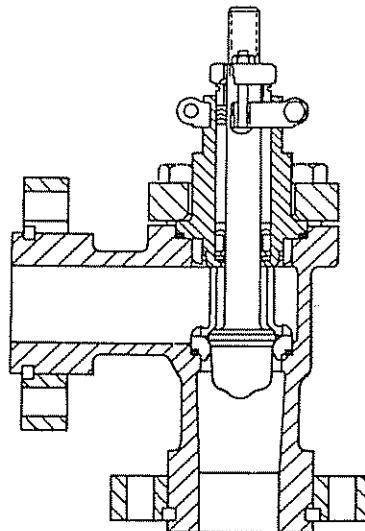


FIGURA 9.24 Válvula angular, guia no topo.

Os fabricantes devem normalmente ser consultados em casos de aplicações especiais, tendo em vista a experiência e as pesquisas por eles efetuadas em torno de cada aplicação particular não convencional.

Muitas aplicações utilizam um projeto conhecido como válvulas globo do tipo gaiola (figura 9.26). Assim, para altas velocidades do fluido de processo, para grandes perdas de cargas requeridas e para quando os ruídos devem ser atenuados, estas válvulas são usadas com sucesso.

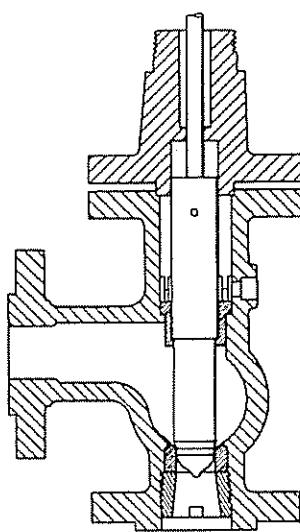


FIGURA 9.25 Válvula angular para serviços severos.

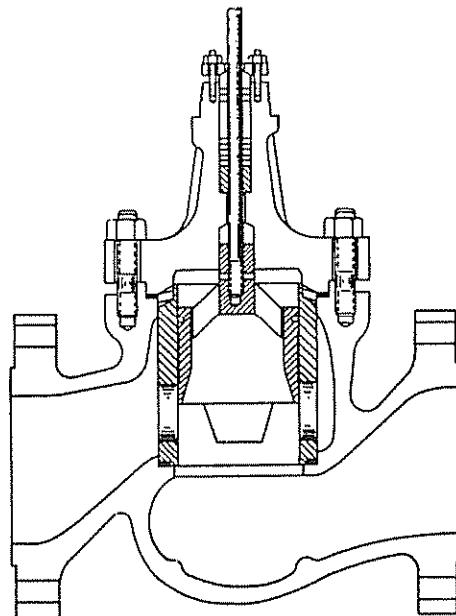


FIGURA 9.26 Válvula globo com internos tipo gaiola.

Outro tipo de válvula globo muito útil para aplicações em que o fluxo deve ser separado ou quando dois fluxos devem ser combinados, é a válvula de três vias.

A título de ilustração podemos citar um exemplo prático, muito comum em controle de temperatura para gás natural, onde aplicações que requerem uma grande redução de pressão podem provocar uma queda brusca de temperatura devido à expansão do gás.

(efeito Joule-Thompson), causando condensação de componentes indesejáveis que provocam corrosão nas tubulações.

Neste caso, o controle da temperatura do gás na saída da estação de redução de pressão é efetuado fazendo com que uma parte do gás passe por um aquecedor e a outra parte desvie deste.

A mistura dos fluxos, num ponto adiante da tubulação, resulta numa temperatura controlada de acordo com o valor desejado, o qual é ajustado no controlador de temperatura.

Uma válvula globo de três vias do tipo divergente resolve tanto o problema do controle de temperatura em si, como também facilita o encaminhamento das tubulações de entrada e saída, uma vez que substitui um tê para desviar o fluxo (O desvio, então, é efetuado na própria válvula.)

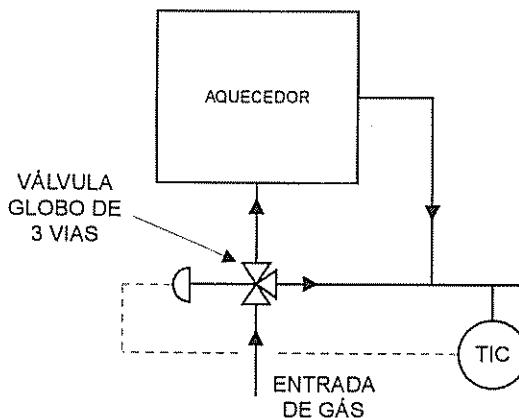


FIGURA 9.27 Controle de temperatura utilizando uma válvula globo de três vias divergente.

Quanto aos materiais de construção, as válvulas globo são normalmente fabricadas com corpo em aço carbono fundido (ASTM A-216 WCB) que é o material utilizado na maioria das aplicações, sendo os internos fabricados normalmente em aço inox AISI 304 ou AISI 316. Cabe ressaltar que os internos das válvulas de controle devem ser sempre fabricados em material melhor do que o do corpo, principalmente nas válvulas globo, uma vez que o desgaste e a erosão dos internos é sempre maior que o do corpo.

Outros materiais de construção são disponíveis tanto para o corpo como para os internos, sendo seguida, sempre, a especificação de materiais de tubulação para se determinar não só os materiais, como também as conexões e seus acabamentos, classe de pressão, engaxetamento etc.

As conexões das válvulas globo ao processo são normalmente flangeadas, sendo conectadas às flanges da tubulação através de parafusos do tipo estojo. Podem, em casos excepcionais, serem soldadas às tubulações, e muito pouco utilizadas com conexões rosadas, as quais somente são especificadas em caso de serviços leves como água, ar comprimido etc.

9.2.2 Válvulas Esfera

Este tipo de válvula era originalmente utilizada em serviços de bloqueio (*shut-off*) e, atualmente, transformou-se num dos tipos de válvulas dos mais aplicados em vários tipo de indústrias que manipulam fluidos denominados "fluidos sujos", com fibras, sólidos em suspensão e outros.

Tais indústrias são, por exemplo, as de papel e celulose, mineração, química, siderurgia. Nas indústrias petroquímicas, por sua vez, as válvulas esfera são pouco utilizadas, devido à maioria dos fluidos se constituir nos chamados "fluidos limpos". Nestes casos, as válvulas do tipo globo dominam as aplicações de manipulação de fluidos.

A figura 9.28 mostra uma válvula do tipo esfera com haste e esfera montados pelo topo (*top-entry*).

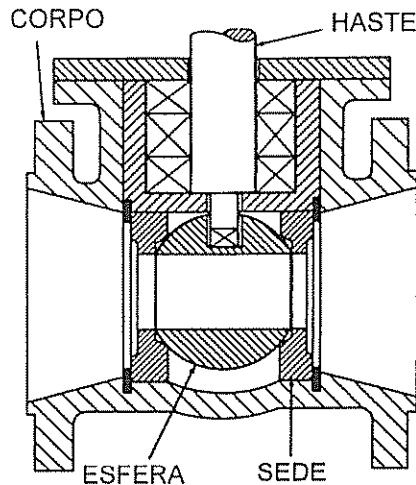


FIGURA 9.28 Válvula de controle do tipo esfera.

As válvulas esfera apresentam boa característica de controle e também muito boa vedação, assumindo papel duplo, ou seja, propiciam bom controle e boa vedação quando chamadas a intervir como bloqueio.

Os internos de uma válvula esfera são compostos pela esfera propriamente dita, assentos normalmente fabricados em teflon, aplicados aos dois lados da esfera (montante e jusante), sendo que podem ser compostos também por materiais metálicos reforçando o plástico, de modo a conferir melhor assentamento e vedação.

A esfera e o eixo são normalmente usinados em uma única peça, flutuando no interior do corpo, ou a esfera e o eixo são presos no topo e no fundo do corpo girando em torno de mancais apropriados.

A figura 9.29 ilustra uma válvula esfera em sua função de restrição de fluxo.

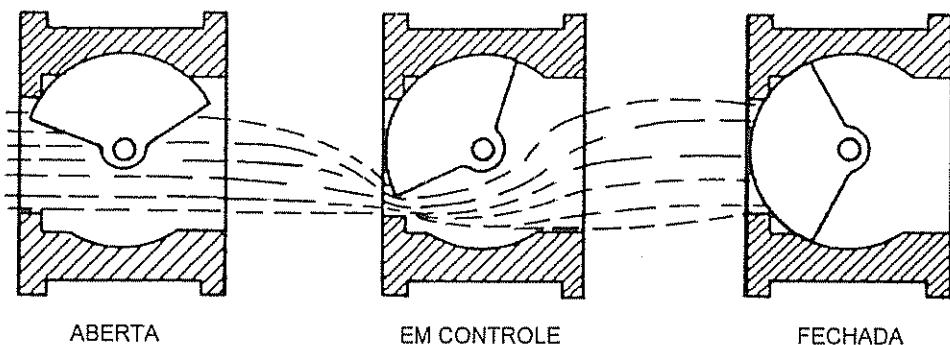


FIGURA 9.29 Válvula esfera atuando em controle.

A figura 9.30 apresenta um conjunto válvula esfera-atuador.

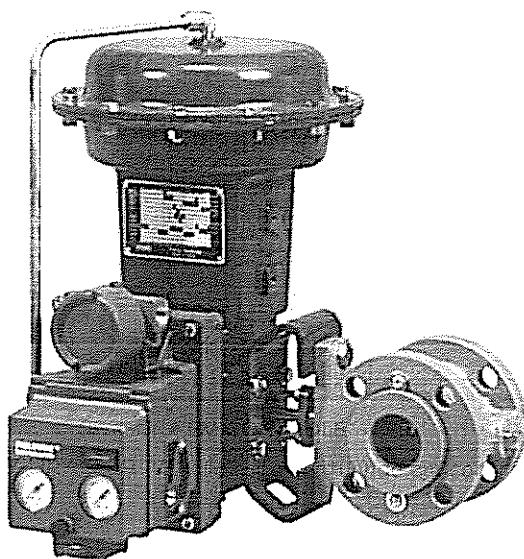


FIGURA 9.30 Válvula esfera com atuador pneumático.

Quando aplicada em controle, muitas vezes a esfera apresenta um desenho caracterizado, ou seja, uma usinagem com perfil diferente do cilíndrico, de modo a determinar a curva característica, ou seja, o modo como a válvula deixa passar a sua vazão em função do ângulo de abertura da válvula.

A figura 9.31a e b mostra uma válvula esfera caracterizada com suas partes e a passagem de fluxo.

Os materiais mais comumente especificados em válvulas esfera são o aço carbono para construção do corpo e o aço inox 316 para os internos, especificamente a esfera e o eixo da válvula.

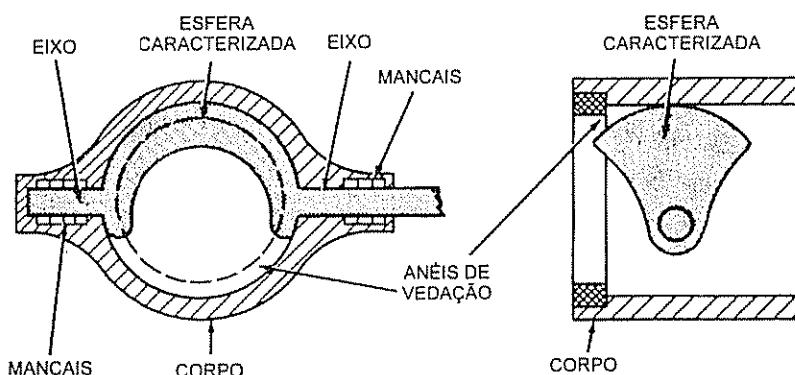


FIGURA 9.31 Válvula esfera caracterizada.

9.2.3 Válvulas Borboleta

As válvulas borboleta constituem-se num dos tipos mais antigos de válvulas de controle e têm encontrado aplicações cada vez maiores. São, na verdade, restritores compostos de um disco basculante num eixo, o qual obstrui uma seção de tubulação.

Trata-se de válvulas com baixo custo inicial e baixo custo de manutenção, peso reduzido e alta capacidade se comparadas com válvulas globo do mesmo diâmetro, apresentando boa característica de controle.

As válvulas borboleta inicialmente foram utilizadas como *dampers*, em serviços de baixa pressão normalmente encontrados em operação com água. Os projetos modernos de válvulas borboleta são utilizados em grande variedade de aplicações, tais como altas perdas de carga, vedação estanque e fluidos corrosivos.

O desenho normal de uma válvula borboleta (eixo alinhado com o disco) possui boa capacidade e resistência à erosão. Com o projeto de disco excêntrico, as válvulas borboleta são atualmente utilizadas em serviços cada vez mais severos. São as válvulas borboleta de alto desempenho.

A figura 9.32 apresenta uma válvula borboleta nas posições fechada, em controle e aberta.

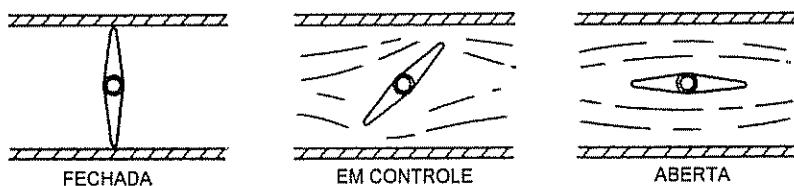


FIGURA 9.32 Operação de uma válvula borboleta.

A operação é muito simples, podendo ser manual, através de uma alavanca, ou de um sistema de engrenagem e volante em válvulas que requeiram maior torque.

A operação automática pode ser efetuada por um atuador pneumático, hidráulico ou elétrico acoplado ao eixo da válvula. Se for considerada a rotação do disco de 0 a 90°, a curva característica (vazão em função da abertura) é conforme a figura 9.33.

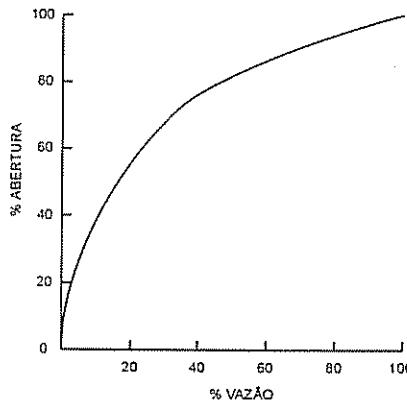


FIGURA 9.33 Curva característica de uma válvula borboleta.

Como será visto no item 9.4 acessórios para válvulas de controle são instalados posicionadores com *cames* que caracterizam a válvula, modificando sua resposta de vazão com a abertura.

Basicamente, as válvulas borboleta são constituídas pelo corpo, pelo eixo ligado ao disco, buchas ou mancais que sustentam o eixo, a vedação do eixo e um sistema de acoplamento do operador manual ou automático ao eixo da válvula.

Entretanto, estas válvulas são construídas de acordo com duas categorias, ou seja, as válvulas de uso geral e as válvulas de alto desempenho.

As válvulas de uso geral apresentam o eixo e o disco de forma simétrica, havendo uma pequena folga entre o disco e o corpo da válvula. O corpo é normalmente do tipo anel sólido, montado entre flanges de tubulação.

Pode ser instalada entre flanges, conhecida como montagem *wafer*, ou o próprio corpo contém a furação correspondente, para que os parafusos do tipo estojo sejam instalados de forma passante através do corpo da válvula.

Um outro projeto deu origem às válvulas borboleta de alto desempenho, que são válvulas utilizadas em serviços que requerem fechamento hermético, denominado, em inglês e muito comumente designado de forma corrente como *tight-shut-off*.

O eixo é deslocado em relação ao centro do disco, com anéis de vedação laminados revestindo o corpo da válvula assentando o disco de forma hermética. Alguns anéis são colados ao corpo e outros são removíveis. Para aplicações em fluidos corrosivos utiliza-se assentamento de *teflon*.

A figura 9.34 ilustra uma válvula borboleta utilizada em altas temperaturas e altas pressões. Os catálogos dos fabricantes devem ser consultados para especificação dos materiais recomendados.

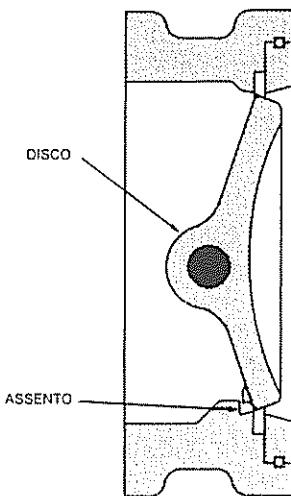


FIGURA 9 34 Válvula borboleta de alto desempenho.

Quanto aos materiais de construção, os mesmos variam de acordo com cada aplicação, sendo as principais conforme segue.

Ventilação e Ar Condicionado

Nestas aplicações, encontram-se grandes volumes de água quente, água gelada e água de incêndio. No caso de água gelada, as condições são geralmente 4 kgf/cm² e 7 °C (classe 150#). Para água quente as condições são bem mais severas, podendo atingir 175 °C e 31 kgf/cm² (classe 300#).

O corpo das válvulas borboleta, nestas condições, é normalmente de aço carbono com assentos em teflon. O disco é normalmente fabricado em aço carbono para controle liga-desliga (*on-off*) e aço inox 316 no caso de controle modulante (regulagem).

Serviços com Oxigênio

Em algumas aplicações, principalmente alta pressão, a alta velocidade no momento do fechamento da válvula tende a erodir o assento, sendo, nestes casos, aplicados assentos de *teflon* e válvulas com disco excêntrico, com vedação estanque.

Deve-se sempre prevenir vazamentos de oxigênio com exposição à poeira, graxa ou outro material orgânico que possa reagir, causando até mesmo eventuais explosões.

Deve-se ter bastante cuidado com a seleção dos materiais da válvula, bem como na preparação e montagem das partes da válvula. O item limpeza e embalagem é também muito crítico, sendo os procedimentos extremamente rigorosos, todos devendo ser detalhados na ocasião da especificação da válvula.

A escolha dos materiais metálicos deve considerar sua resistência à ignição, suscetibilidade à oxidação e características não centelhantes. O cobre e suas ligações e o níquel são os mais resistentes à ignição. Depois, vêm o aço inox 316 e, finalmente, o aço carbono. O material mais recomendado para assentos e gaxetas é o *teflon*.

Outro fator muito importante a ser considerado nas válvulas que operam com oxigênio é a proteção contra descargas eletrostáticas. As válvulas devem possuir uma conexão de aterramento na haste, em contato também com o castelo, de forma a drenar para a terra, através do corpo, eventuais potenciais eletrostáticos.

Aplicações em Vapor d'Água

Quando se trata de vapor saturado, há sempre a formação de pequenas gotas de condensado, devido a perdas de calor que atingem grandes velocidades, tornando-se abrasivas ao disco e ao assento da válvula, principalmente durante a abertura e o fechamento da válvula.

Um bom projeto de válvula borboleta pode minimizar este efeito, afastando rapidamente o disco do assento da válvula.

Também importante de se considerar é o escoamento de vapor de baixa qualidade, ou seja, com 20 ou 30% de água. Quando ocorre uma diminuição da pressão, ocorre um processo de cavitação, que contribui para danificar o disco da válvula.

A válvula poderá operar, eventualmente, com água quente próxima da saturação que, com uma pequena queda da pressão se transforma em vapor d'água.

Finalmente, vapor superaquecido pode ser também manipulado pela válvula de controle, atingindo temperaturas relativamente altas.

Válvulas borboleta padrão são normalmente aplicadas em serviços *on-off* com vapor saturado a até 10 kgf/cm². Válvulas padrão são construídas em aço carbono com assento em *teflon* reforçado e disco em aço inoxidável cromado. Em controle modulante, o disco deve ser em aço inox e o assentamento revestido com *stellite*, para conferir maior durabilidade à válvula.

Operação com Vácuo

Operação com vácuo requer uma preparação especial da válvula, e as condições de vácuo a que a válvula deverá ser submetida devem ser bem definidas.

Tomando-se em consideração a pressão atmosférica (760 mmHg absoluta), considera-se baixo vácuo o valor de 25 mmHg absoluto, e alto vácuo o valor de 0,000001 mmHg absoluto. Quanto maior o vácuo, maior o cuidado na determinação dos materiais dos componentes da válvula, principalmente quanto ao assento e à selagem através da haste. A válvula pode ter revestimento em *teflon* em vácuo de até 0,02 mmHg absoluto. Em condições de alto vácuo, as superfícies da válvula devem ser livres de quaisquer imperfeições e deve ser feita uma cuidadosa limpeza para retirar lubrificantes, graxa; nenhum vazamento pode ser tolerado.

9.2.4 Válvulas Especiais

Sem dúvida, as válvulas de controle mais utilizadas na maioria das aplicações industriais são as anteriormente estudadas, ou seja, as válvulas globo, as esfera e as borboleta. Apresentamos, a seguir, três tipos de válvulas utilizadas em aplicações específicas que podem ser consideradas como válvulas especiais.

9.2.4.1 Válvulas tipo diafragma (*saunder*)

Este tipo de válvula, apresentado na figura 9.35, é constituído basicamente do corpo e de um diafragma elástico que se move em direção a uma veia, produzindo o assentamento da válvula. O movimento ascendente da haste ligada ao diafragma regula a abertura da válvula.

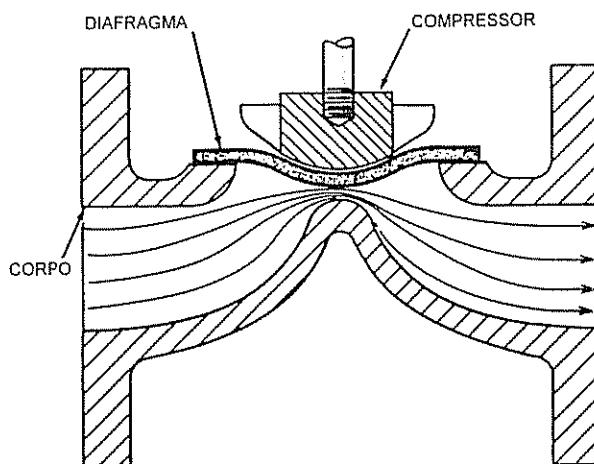


FIGURA 9.35 Válvula diafragma.

A figura 9.36, por sua vez, ilustra a curva característica da válvula do tipo diafragma, ou seja, a variação da vazão através da válvula, em função da abertura da mesma. A característica em questão é a inerente, ou seja, com queda de pressão constante através da válvula.

A construção deste tipo de válvula favorece seu revestimento interno, fazendo com que seja utilizada em serviços corrosivos, onde os materiais metálicos padrão sejam incompatíveis com o fluido de processo. São comuns, nestas válvulas, os revestimentos de vidro, plástico, titânio, zircônio e outros.

O corpo da válvula é normalmente fabricado em ferro fundido, aço carbono e aço inoxidável, algumas ligas e, em alguns casos, material plástico.

O diafragma pode ser fabricado em polietileno, *hycar*, borracha natural, neoprene, KEL-F, *teflon*, etc.

As válvulas do tipo diafragma têm, na indústria química, seu maior campo de aplicação, devido aos fluidos que são manipulados nestas indústrias, como ácidos e hidróxidos muito corrosivos e fluidos passíveis de cristalização e contendo sólidos em suspensão.

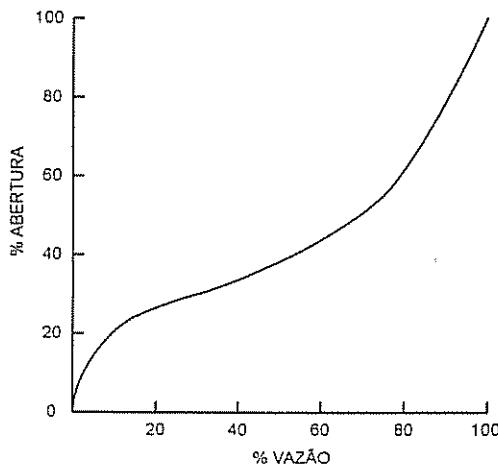


FIGURA 9.36 Característica inerente de uma válvula diafragma.

9.2.4.2 Válvulas macho

Trata-se de um dos tipos mais antigos de válvulas encontrados na engenharia. As primeiras válvulas macho foram fabricadas em madeira e utilizadas em sistemas de distribuição de água. Atualmente, são menos utilizadas na indústria do que as válvulas do tipo esfera convencionais, mas encontram aplicação em alguns problemas específicos de controle.

As válvulas macho apresentam vedação estanque sob condições que variam desde vácuo até pressões extremamente altas, da ordem de 690 kgf/cm^2 .

As válvulas macho são normalmente aplicadas em escoamento de gases, líquidos e lamas não abrasivas, embora válvulas com macho lubrificado podem ser utilizadas em serviços abrasivos.

Devemos ressaltar que estas válvulas não são muito utilizadas em serviços que exigem boa característica de controle modulante, sendo mais utilizadas em aplicações como válvulas de bloqueio (*on-off*).

A figura 9.37 mostra a aplicação de válvula macho em serviço de desvio de fluxo.

As válvulas macho convencionais, como já mencionado, não são utilizadas em controle. Entretanto, um projeto especial de válvula do tipo *plug*, como são também designadas as válvulas macho, é o lançamento feito por um fabricante tradicional de válvulas de controle, a Dresser Divisão Masoneilan. Trata-se da válvula do tipo *plug* excêntrico rotativo patenteada com o nome "Camflex", cuja principal característica é o baixo torque requerido para sua operação em controle. Sua máxima abertura corresponde a um ângulo de 50° e tem característica de controle inerente bem próxima da linear, apresentando alta capacidade de vazão e fator crítico de vazão bem maior do que as válvulas do tipo globo convencionais, que são as mais utilizadas em controle, como já visto. São fabricadas

em diâmetros de 1" até 12", para operação em pressões de até 40 kgf/cm², normalmente para instalação entre flanges, ou wafer. Outra característica importante deste tipo de válvula é a sua alta rangeabilidade, ou seja, a relação entre a máxima e a mínima vazão controlável pela válvula, normalmente 50:1. A figura 9.38 apresenta a válvula tipo *plug rotativo* (Camflex).

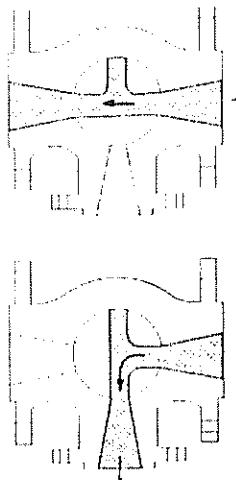


FIGURA 9.37 Válvula macho utilizada em desvio de fluxo.

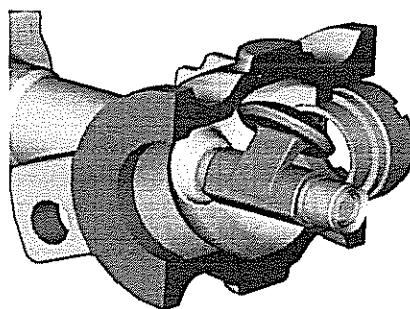


FIGURA 9.38 Válvula tipo *plug rotativo* (Camflex - fabricação Masoneilan).

9.2.4.3 Válvulas tipo guilhotina (*sliding gate*)

As válvulas denominadas guilhotina utilizam um meio básico de se variar a restrição a um escoamento, que é deslizar uma placa através de uma abertura, normalmente circular, conforme mostra a figura 9.39. São também denominadas válvulas gaveta.

O desenho de válvula guilhotina mais utilizado é a válvula de gaveta deslizante (*sliding gate*), onde um disco desliza por uma abertura em forma de "V", originando uma abertura de forma caracterizada.

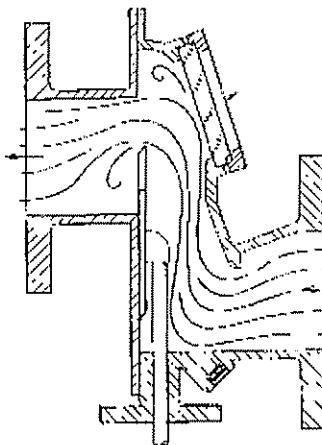


FIGURA 9.39 Válvula gaveta do tipo guilhotina.

São normalmente utilizadas na indústria de papel e celulose devido a manipulação de polpas, sendo o desenho destas válvulas favorável à remoção de fibras eventualmente remanescentes no disco da válvula, devido à característica cortante das bordas do disco e da sede.

A figura 9.40 ilustra uma válvula guilhotina com abertura em "V".

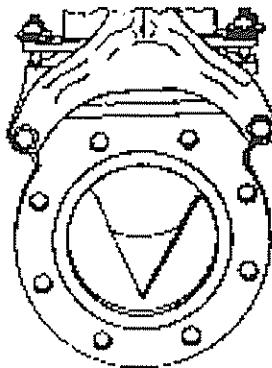


FIGURA 9.40 Válvula gaveta deslizante, abertura em "V".

9.3 APLICAÇÃO DE VÁLVULAS DE CONTROLE

Como já vimos anteriormente, a válvula regula o fluxo de material ou energia num processo ajustando uma abertura através da qual passa um determinado fluido. Trata-se de um orifício variável na linha de processo, onde a vazão através deste orifício segue a equação de Bernoulli, ou seja:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{\Delta P}$$

A vazão através da válvula é proporcional à área de abertura e à raiz quadrada da queda de pressão (ΔP) na válvula. A abertura varia devido ao posicionamento da haste da válvula e a queda de pressão é dada pelas características do processo, de acordo com o *layout* da instalação, das tubulações e equipamentos e dos fluidos que estão sendo manipulados.

A figura 9.41 apresenta um gráfico da variação de vazão pela válvula, em função de sua abertura.

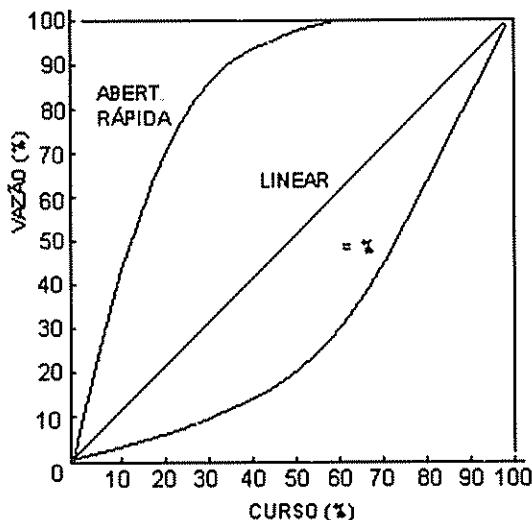


FIGURA 9.41 Características de uma válvula de controle.

O gráfico acima mostra a variação de vazão para as três características mais comuns, que são a linear, a igual porcentagem e abertura rápida.

9.3.1 Queda de Pressão Através da Válvula

Nos processos industriais, entretanto, raramente encontramos perda de carga constante e sim, quedas de pressão variáveis de acordo com o processo.

Vazão, densidade e temperatura são facilmente determinadas. Porém, a perda de carga para o dimensionamento de uma válvula de controle é mais difícil de ser obtida. É importante ter em mente que não é a válvula de controle que define sua perda de carga, mas a válvula absorve o excesso de pressão remanescente no sistema, o que pode ser ilustrado pela figura 9.42.

O gráfico mostra as perdas de pressão na vazão máxima e na vazão mínima em relação à posição física na instalação. Plota-se a pressão da esquerda para a direita até a entrada da válvula de controle. Plota-se a pressão requerida da direita para a esquerda, até a saída da válvula de controle. A diferença entre estes pontos (entrada e saída da válvula de controle) é a queda de pressão que a válvula deve manter, na máxima vazão.

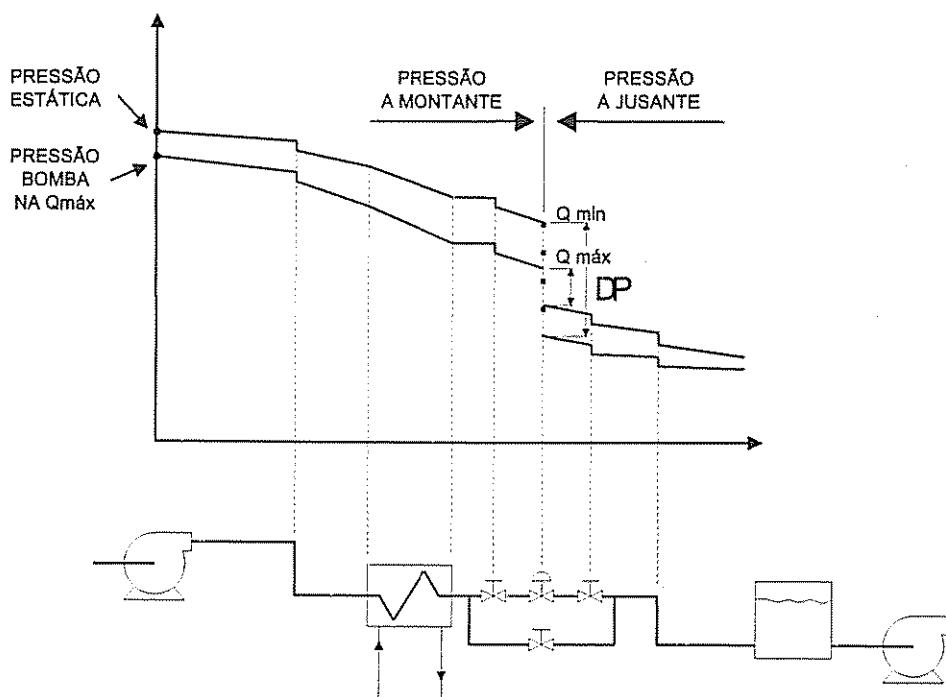


FIGURA 9.42 Gradiênte hidráulico de um sistema.

Segue-se o mesmo procedimento com o sistema operando na vazão mínima. Partindo-se da curva de uma determinada bomba, observa-se que a pressão de saída é maior, à menor vazão. Devido à menor velocidade na tubulação, as perdas de pressão na vazão mínima são menores do que na vazão máxima. Sendo assim, a queda de pressão através da válvula de controle na vazão mínima é maior do que na vazão máxima.

O procedimento adotado no dimensionamento de válvulas de controle é, então, efetuar o cálculo da válvula para a máxima vazão, considerando-se o mínimo ΔP .

9.3.2 Característica de uma Válvula de Controle

Como definido acima, a característica relaciona vazão com abertura da válvula, e a figura 9.41 ilustra graficamente as características linear, igual porcentagem e abertura rápida. Como a vazão é diretamente afetada pela perda de carga através da válvula, o ΔP é parte integrante da característica de vazão.

As curvas características de vazão, mostradas em catálogos de fabricantes, são obtidas utilizando-se, no teste, perda de carga constante na válvula, devido a impossibilidade de se prever as condições em que a válvula será instalada. A característica obtida em bancada, ou seja, com ΔP constante, é denominada **característica inerente de vazão**.

As características de vazão utilizadas em controle de processos são as características linear, igual porcentagem e abertura rápida.

A característica linear é aquela cuja variação na vazão é proporcional à abertura da válvula. A característica de igual porcentagem é aquela que introduz uma modificação de vazão em relação à abertura tal que se mantém uma relação percentual constante de variação de vazão em relação à vazão anterior. A característica abertura rápida é aquela que introduz uma grande variação na vazão, com pequenos aumentos de abertura da válvula. Seu uso é limitado a serviços *on-off*, para controle liga-desliga ou mesmo bloqueio de fluxo.

As curvas características podem ser melhor investigadas e entendidas colocando-se a válvula numa instalação real, como é o caso dos exemplos a seguir, nos quais uma bomba centrífuga é utilizada para alimentar água a um sistema no qual a válvula tem a função de regular a pressão na saída em $5,6 \text{ kgf/cm}^2$.

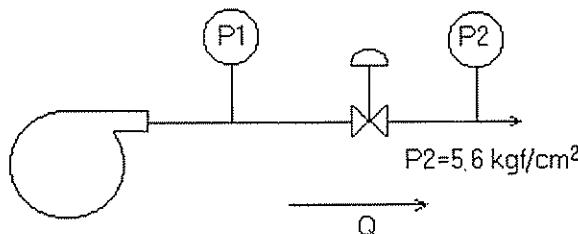


FIGURA 9.43 Válvula de controle: controle de pressão.

A máxima vazão requerida (Q) será de $45 \text{ m}^3/\text{h}$, com uma pressão de descarga da bomba (P_1) igual a $7,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Como veremos mais adiante, toda válvula tem seu chamado coeficiente de vazão (C_v) que define sua capacidade, valor este publicado pelos fabricantes em função do tipo de válvula, diâmetro do corpo e características de seus internos.

O C_v para líquidos é dado pela equação:

$$C_v = 1,16 \cdot Q \cdot \sqrt{\frac{G}{\Delta P}}$$

Assim, nas condições acima, o C_v calculado para a válvula é igual a 45. Se considerarmos a instalação de uma válvula de 2" com C_v igual a 48 na tubulação, podemos fazer uma análise do comportamento da válvula neste processo específico, analisando uma válvula com características linear e igual porcentagem.

Vamos considerar que a bomba centrífuga em questão possua a curva característica da figura 9.44.

As características linear e inerente fornecidas em catálogos de fabricantes são conforme a figura 9.41.

Com o auxílio da figura 9.44 assumindo-se alguns valores de vazão, determinando-se a pressão P_1 correspondente e tendo-se em conta que a pressão a jusante da válvula de controle deve-se manter em $5,6 \text{ kgf/cm}^2$, pode-se calcular o C_v requerido para cada vazão, seu

percentual em relação ao Cv da válvula escolhida (48) e, consequentemente, o percentual de abertura da válvula escolhida tanto com característica linear, como igual porcentagem.

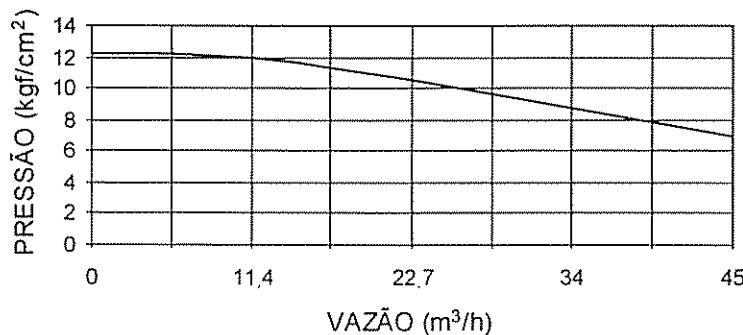


FIGURA 9.44 Curva característica da bomba centrífuga.

A tabela 9.1 apresenta os valores calculados:

TABELA 9.1
Valores Calculados para as Características Instaladas
– Controle de Pressão: Caso Teórico

Vazão (m³/h)	Pressão descarga (kgf/cm²)	DP válvula (kgf/cm²)	Cv requerido	% máx. Cv	% abertura linear	% abertura = %
45	7,0	1,40	45	94	94	98
34	8,78	3,16	22	46	46	79
22,7	10,5	4,92	12	25	25	65
11,4	12,0	6,33	5,2	11	11	41

Dessa forma, obtém-se as curvas do percentual de abertura em relação à vazão, conforme a figura 9.45.

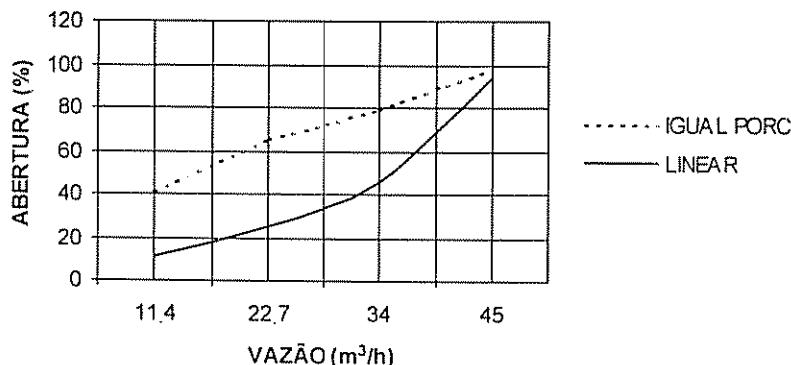


FIGURA 9.45 Características instaladas: válvula num sistema teórico.

Nota-se que as duas características inerentes, linear e igual porcentagem, se comportam de forma semelhante, apresentando um comportamento próximo do linear quando instaladas no processo apresentado.

Uma instalação mais realista é aquela na qual, na saída da válvula, há uma resistência em série com a mesma, que pode equivaler a um grande trecho de tubulação, ou mesmo uma série de acessórios de tubulação, algum equipamento de processo etc.

A figura 9.46 apresenta o sistema em análise.

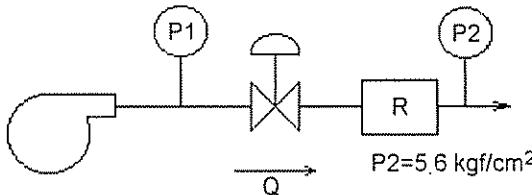


FIGURA 9.46 Bomba centrífuga com válvula de controle, tubulações e resistências em série.

Utilizando-se a mesma curva da bomba do exemplo anterior, pode-se determinar a curva de abertura da válvula em relação à vazão. Seja ΔP_r a perda de carga na restrição e ΔP a perda de carga na válvula de controle. Sendo ΔP_r igual a $1,12 \text{ kgf/cm}^2$ na vazão de $45 \text{ m}^3/\text{h}$, a perda na válvula será de $0,28 \text{ kgf/cm}^2$. Nestas condições, o Cv da válvula adequada a este caso será calculado pela mesma equação anterior, ou seja:

$$C_v = 1,16 \cdot Q \cdot \sqrt{\frac{G}{\Delta P}}$$

Então, $Cv = 100$, sugerindo uma válvula globo de 3" com Cv nominal igual a 110.

$$\text{Como } \frac{Q}{\sqrt{\Delta P}} = \text{cte}, \frac{200}{\sqrt{16}} = 50 \text{ e } \Delta P_r = \left(\frac{Q}{50} \right)^2,$$

ΔP_r sendo a perda de carga na restrição.

ΔP em psi. A construção da tabela requer, portanto, a conversão para m^3/h e kgf/cm^2 , respectivamente.

Dessa forma, determina-se o valor de ΔP_r para cada valor de vazão e, consequentemente, o valor de ΔP , tendo-se em vista que P_1 é conhecido, conforme a curva da bomba, e P_2 é $5,6 \text{ kgf/cm}^2$.

A tabela 9.2 apresenta os valores calculados.

Com os valores da tabela 9.2, obtém-se as curvas características instaladas da figura 9.47, para as válvulas com características inerentes linear e igual porcentagem.

Nota-se, no gráfico, que a característica inerente igual porcentagem, quando instalada, apresenta uma relação quase linear, ao passo que a característica linear se aproxima da característica abertura rápida.

TABELA 9.2
Valores Calculados para as Curvas Características Instaladas
– Controle de Pressão: Caso Real

Vazão (m ³ /h)	P ₁ (kgf/cm ²)	D _P válv. (kgf/cm ²)	D _{Pr} (kgf/cm ²)	C _v req.	% máx. C _v	% abertura linear	% abertura = %
45	7,0	0,28	1,12	100	91	91	97
34	8,78	2,53	0,63	25	22,7	22,7	62
22,7	10,5	4,64	0,28	12,3	11,2	11,2	41
11,4	12,0	6,26	0,07	5,3	4,8	4,8	25

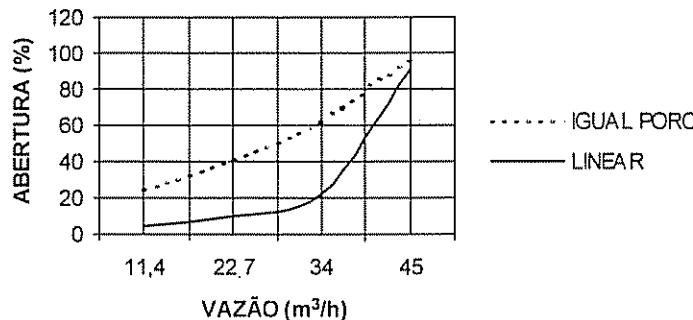


FIGURA 9.47 Características instaladas: válvula num sistema real.

A escolha da característica mais adequada para uma válvula de controle depende muito da concentração da perda de carga, em função do processo. Existem critérios para especificação e seleção de válvulas de controle que auxiliam também na seleção da melhor característica, em função da relação entre o ΔP na válvula e o ΔP total do sistema.

9.3.3 Rangeabilidade de uma Válvula de Controle

A rangeabilidade é definida como a razão entre a máxima vazão controlável e a mínima vazão controlável. A rangeabilidade de uma válvula de controle varia de 5:1 no caso de válvula tipo diafragma até 300:1 em casos extremos de válvulas esfera. A rangeabilidade de uma válvula globo normalmente varia na faixa de 30:1 a 50:1. A controlabilidade nos pontos extremos do curso de uma válvula é questionável. Observa-se, na figura 9.48, que, ao se mover pelos extremos da curva de uma válvula com característica igual porcentagem, pequenas variações de curso provocam grandes variações na rangeabilidade da válvula. Vê-se, portanto, que a rangeabilidade é função da definição da controlabilidade nos extremos do curso da válvula.

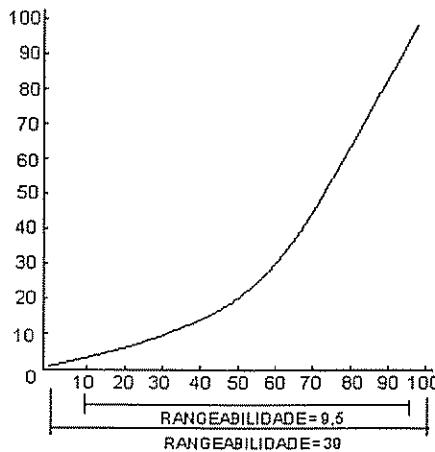


FIGURA 9.48 Rangeabilidade.

A tabela 9.3 apresenta a rangeabilidade de alguns tipos de válvulas.

TABELA 9.3
Rangeabilidade Típica para Cada Tipo de Válvula

Tipo de válvula	Rangeabilidade típica
Globo sede dupla	50:1
Globo sede simples	50:1
Corpo bipartido	30:1
Globo angular	30:1
Diafragma	5:1
Borboleta 60º de abertura	15:1
Borboleta 90º de abertura	100:1
Esfera plena	100:1

9.3.4 Cavitação

O fluxo através de uma válvula de controle causa uma perda de carga, sendo que a pressão tem seu valor mínimo na chamada *vena-contracta*, havendo uma recuperação parcial da pressão a jusante da válvula. A figura 9.49 mostra esta queda de pressão e a correspondente recuperação quando o fluido é um líquido e continua líquido. P₁ é a pressão a montante e P₂ a pressão à jusante da válvula.

Quando um líquido entra na válvula de controle e a pressão estática na *vena-contracta* cai abaixo da pressão de vapor do líquido e a pressão a jusante permanece abaixo desta pressão de vapor, temos uma condição denominada *flashing*, com vapor na saída da válvula.

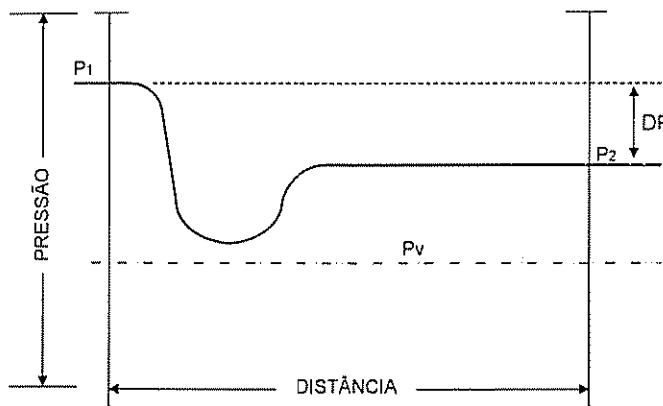


FIGURA 9.49 Condição normal de operação na válvula de controle.

Esta condição é ilustrada na figura 9.50.

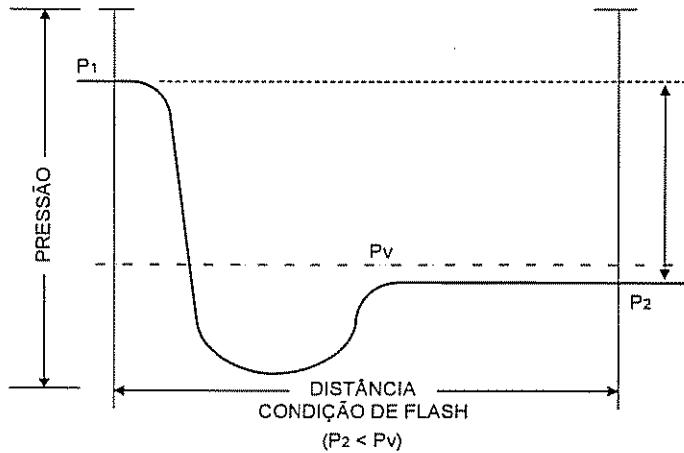


FIGURA 9.50 Condição de *flash*.

A figura 9.51 apresenta uma terceira condição, denominada cavitação.

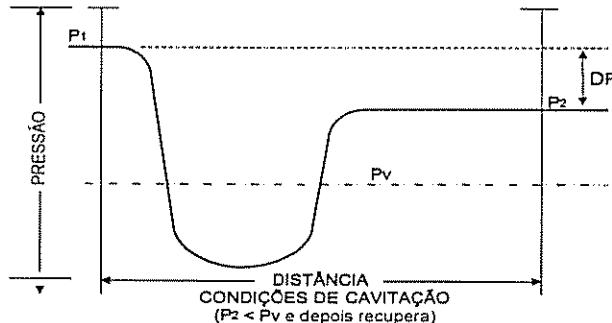


FIGURA 9.51 Cavitação numa válvula de controle.

Nesta condição, como a pressão cai abaixo da pressão de vapor e depois se recupera, ficando acima desta pressão, há um colapso ou implosão das bolhas de vapor formadas na *vena-contracta*. Em caso de cavitação ou *flashing*, deve ser feito um dimensionamento apropriado da válvula de controle, bem como selecionar os internos compatíveis com estas condições.

Uma rápida avaliação pode ser feita para se determinar se a válvula está operando sob condições de *flashing* ou cavitação, calculando-se o ΔP limite como:

$$\Delta P_{\text{lim}} = C_f^2 \cdot (P_1 - P_v),$$

onde:

C_f = coeficiente de recuperação de pressão;

P_1 = pressão a montante ($\text{kgf/cm}^2 \text{ a}$);

P_v = pressão de vapor do líquido à temperatura de entrada ($\text{kgf/cm}^2 \text{ a}$).

Mais adiante, serão abordadas as equações utilizadas nas condições normais de vazão (fluxo subcrítico) e nas condições de cavitação ou *flashing* (fluxo crítico).

O valor de C_f é função da geometria (tipo) de válvula e das condições de fluxo, e indica quanto cai, na *vena-contracta*, a pressão, abaixo da pressão de vapor. A tabela 9.4 mostra os valores de C_f para alguns tipos de válvula.

TABELA 9.4
Valores Comparativos de C_f

Tipo de válvula	Coeficiente C_f
Globo sede simples	0,9
Globo sede dupla	0,8
Plug rotativo (Camflex)	0,7
Borboleta	0,65
Esfera	0,6

Resumidamente, duas medidas para se evitar a cavitação são normalmente adotadas:

- 1) reduzir a perda de carga através da válvula para um valor inferior ao ΔP crítico, o que pode ser conseguido instalando-se a válvula num ponto mais abaixo da tubulação;
- 2) instalar a válvula com maior fator C_f .

9.3.5 Escoamento Laminar

O escoamento laminar irá ocorrer quando a viscosidade do líquido for grande.

O dimensionamento da válvula, neste caso, será efetuado utilizando-se uma equação específica, como veremos mais adiante.

9.3.6 Escoamento em Duas Fases (Bifásico)

A condição de escoamento em duas fases ocorre normalmente na entrada da válvula, podendo-se ter duas situações:

- 1) líquido e gás não condensável entrando na válvula;
- 2) líquido e seu vapor entrando na válvula.

Cada situação conduz a uma equação apropriada para o cálculo do Cv da válvula.

9.4 SELEÇÃO, DIMENSIONAMENTO E ESPECIFICAÇÃO DE VÁLVULAS DE CONTROLE: EXEMPLOS PRÁTICOS

9.4.1 Seleção

Com certeza, a escolha da melhor válvula depende da determinação das condições de operação, onde alguns parâmetros nem sempre são disponíveis de forma clara, sendo que alguns dados são, em geral, estimados.

A estimativa, entretanto, deve ser efetuada utilizando-se a experiência de quem o faz. Deve-se ter em conta que, dependendo do parâmetro, a influência de uma estimativa não muito aproximada de seu valor sobre o resultado final pode ser pequena. Um bom exemplo disto é a densidade, que aparece na equação de dimensionamento sob a forma de raiz quadrada; desta forma, um erro de 10% na estimativa de seu valor tem uma influência menor do que 5% no resultado do cálculo do Cv. Um bom controle pode normalmente ser conseguido quando a válvula de controle manipula desde a vazão mínima até o valor de 120% da máxima vazão requerida.

Um fator que afeta bastante o dimensionamento de uma válvula de controle é sem dúvida, a queda de pressão através da mesma, conforme anteriormente citado.

Assim, dois tipos de sistema são encontrados na prática:

- 1) sistemas à pressão constante;
- 2) sistemas com pressão variável.

Um sistema à pressão constante pode ser exemplificado pela transferência do líquido de um vaso a outro com pressões diferentes, as quais se mantêm relativamente constantes. Quando uma válvula é instalada no trecho entre os dois pontos, a queda de pressão através da mesma é facilmente determinada, descontando-se as perdas nos acidentes de tubulação e a altura da coluna de líquido. Os sistemas mais comumente encontrados na prática, entretanto, são aqueles cuja queda de pressão é variável, conforme ilustrado na figura 9.46.

Deve-se lembrar, mais uma vez, que o ΔP para a válvula é maior na vazão mínima do que na vazão máxima.

A seguir, alguns critérios úteis para a seleção de uma válvula de controle:

- a) após a obtenção do Cv requerido nas condições máxima e mínima, selecione uma válvula tal que a mesma possa manipular seu máximo Cv a 85 ou 90% de abertura e seu mínimo Cv a 10 a 15% de abertura;

- b) utilizar característica linear para sistemas de controle de nível e em outros sistemas nos quais a perda de carga na válvula seja cerca de 40% ou mais da perda de carga total do sistema;
- c) em controle de pressão de líquidos, utilizar válvula com característica igual porcentagem;
- d) para controle de pressão de fluidos compressíveis, utiliza-se, em geral, característica linear;
- e) utilizar característica igual porcentagem:
 - em processos rápidos;
 - quando se requer grande rangeabilidade;
 - quando não se conhece muito bem a dinâmica do processo;
- f) a característica igual porcentagem perde sua característica inerente quando instalada no processo, aproximando-se da linear. Por isso, e também devido à sua alta rangeabilidade, é a característica mais utilizada em controle de processos;
- g) a característica abertura rápida deve ser utilizada em casos de controle liga-desliga (*on-off*) e quando a máxima capacidade da válvula deve ser rapidamente obtida.

Para se estabelecer uma boa comparação entre os valores de Cv para válvulas globo sede simples e respectivos diâmetros, apresenta-se a tabela 9.5 a seguir

TABELA 9.5
Valores de Cv de Válvulas Globo para Diferentes Diâmetros

Válvula	Característica	Diâmetro da válvula (in)									
		½	¾	1	1 ¼	2	3	4	6	8	10
Sede	Linear			10	26	40	90	152			
Simples	Igual porcentagem	4	7,6	10	24	43	99	153	348	587	
	Abertura rápida	5	6,1	11	26	47	98	179	424	666	1280

Quanto ao corpo e aos internos, a seleção do tipo de válvula é feita de maneira relativamente fácil, uma vez que cada válvula apresenta aplicação bem definida

Basicamente, para fluidos limpos, como água, gases à alta pressão e uma grande maioria de fluidos petroquímicos, as válvulas globo são as mais utilizadas.

Quando se trata de fluidos que contêm sólidos em suspensão, lamas e fluidos pastosos ou fibrosos, as válvulas esfera encontram grande aplicação, uma vez que facilitam a passagem do fluido (passagem plena).

Em se tratando de gases à baixas pressões em linhas de grandes diâmetros, as válvulas do tipo borboleta são as mais adequadas devido a boa controlabilidade e baixo custo, se comparadas com as válvulas esfera e globo de mesmo diâmetro.

A seguir, segue uma comparação entre os principais tipos de válvulas, suas vantagens e desvantagens, facilitando a escolha.

a) Válvula Globo Sede Simples

Vantagens

- Alta rangeabilidade.
- Permite vedação estanque.
- Disponível com obturador reversível.
- Bastante utilizadas em pequenos diâmetros (menores do que 2").

Desvantagens

- A construção não balanceada exige maiores atuadores para vencer os esforços.
- Possui baixa recuperação de pressão.

b) Válvula Globo Sede Dupla

Vantagens

- Maior capacidade de vazão do que as de sede simples de mesmo diâmetro.
- Alta rangeabilidade.
- Construção balanceada, requerendo menores esforços e menores atuadores.
- Disponível com obturador reversível.
- Utilizadas em diâmetros maiores do que 2".

Desvantagens

- Vazamento relativamente alto, sendo aceito normalmente 1% da capacidade.
- Possui baixa recuperação de pressão.
- Pode ocorrer erosão em operação com alta pressão diferencial.

c) Válvula Globo de 3 Vias

Vantagens

- Boa para mistura de fluidos ou divisão de fluxo.
- Em certas aplicações, substituem duas válvulas de duas vias.
- Freqüentemente utilizadas para controle de temperatura em trocadores de calor.

Desvantagens

- Não podem ser utilizadas em controle de vazão plena.
- As condições de escoamento precisam ser muito bem definidas.

d) Válvula Globo Tipo Corpo Dividido (*split body*)**Vantagens**

- Boa característica de controle.
- Vedaçāo estanque.
- Construçāo simples, disponível em materiais especiais.
- Fácil manutenção, devido à rápida desmontagem.

Desvantagem

- Queda de pressão limitada, devido à construção guiada de topo.

e) Válvula Globo Angular**Vantagens**

- Boa característica de controle.
- Alta capacidade e boa rangeabilidade.
- Minimiza problema de erosão.
- Aplicada em locais de pouco espaço, devido à construção angular (90°).
- Pode controlar fluidos com sólidos em suspensão ou lamas.

Desvantagens

- O diâmetro mínimo é 2".

f) Válvula Tipo Diafragma**Vantagens**

- Alta capacidade e baixo custo.
- Boa para fluidos sujos.
- O diafragma isola as partes da válvula do contato com o fluido de processo.
- Proporciona vedaçāo estanque a baixas pressões.
- Pode manipular fluidos corrosivos devido à grande gama de materiais do diafragma e revestimentos do corpo.

Desvantagens

- A característica de controle não é boa.
- Baixa rangeabilidade.
- Curta durabilidade do diafragma.
- Baixa velocidade de resposta.
- Temperaturas de operação limitadas pelas características do diafragma.

g) Válvula Borboleta**Vantagens**

- Alta capacidade de vazão.
- Baixo custo, especialmente em grandes diâmetros.
- Boa recuperação de pressão – baixa perda de pressão através da válvula.
- Aplicada em fluidos sujos.
- Requer um mínimo espaço para instalação.
- Disponível em grandes diâmetros.

Desvantagens

- Alto torque operacional exigido em caso de alta queda de pressão, embora os projetos modernos diminua bastante este efeito.
- Vedação estanque depende muito do revestimento resiliente, o que limita a temperatura de operação.
- O curso operacional para aplicação em controle é limitado a 60°, em alguns casos.

h) Válvula Esfera**Vantagens**

- Alta capacidade de vazão.
- Boa característica de controle.
- Boa rangeabilidade.
- Custo razoável.
- Bastante aplicada em controle de lamas, fluidos viscosos e fibrosos.

Desvantagens

- Não tem bom desempenho em altas quedas de pressão.

9.4.2 Dimensionamento

O dimensionamento de válvulas de controle, atualmente, é efetuado por programas de computador que fornecem rapidamente o coeficiente de vazão (C_v) da válvula.

Este capítulo sobre válvulas de controle, entretanto, objetiva fornecer os elementos necessários para o conhecimento dos principais aspectos que envolvem o cálculo, a seleção e a especificação de uma válvula, de acordo com as condições de operação e de instalação da mesma.

São apresentadas equações para o dimensionamento no caso de escoamento de líquidos, gases e vapores, vapor d'água, escoamento laminar e escoamento bifásico.

O dimensionamento por computador considera as fórmulas completas com todos os fatores de correção envolvidos, de modo que o valor da capacidade da válvula obtido é muito preciso.

No presente texto são apresentadas as equações de forma simplificada e são comentados os fatores que influenciam o dimensionamento (valor final preciso do Cv).

Numa primeira etapa de aprendizado deve-se saber estimar o valor do Cv através das equações simplificadas, e entender que a existência das correções conduzem a resultados definitivos através do computador.

9.4.2.1 Coeficiente de vazão – Cv

Trata-se de um índice que traduz a capacidade de uma válvula de controle, o qual é utilizado pelos usuários e publicados pelos fabricantes de válvulas com base em testes de bancada.

Por definição, o coeficiente Cv de uma válvula de controle é a vazão de água em galões por minuto (GPM) que passa pela válvula, quando a queda de pressão através da mesma for de 1 psi. Trata-se, basicamente, de um índice cujo valor conduz à identificação do diâmetro da válvula, necessário ao controle da variável à qual a válvula se destina, em função das condições de processo, conforme veremos em seguida.

O cálculo de uma válvula de controle conduz ao **Cv requerido**. A escolha da melhor válvula, entretanto, é função também da análise da curva característica da mesma, onde a abertura da válvula nas condições máxima e mínima deverá ser observada na seleção do **Cv da válvula**.

A seguir, vamos apresentar as equações simplificadas para o cálculo de válvulas de controle, nos escoamentos de líquidos, gases e vapor d'água.

Qualquer que seja o fluido, antes de se iniciar o cálculo do Cv deve ser efetuada uma verificação das condições do escoamento, ou seja, se o fluxo é crítico ou subcrítico.

O escoamento é considerado subcrítico, quando a queda de pressão através da válvula (ΔPv) é menor que a queda de pressão crítica (ΔP crit.). Se ΔPv for maior que ΔP crit., o fluxo será considerado crítico.

As equações a serem utilizadas variam de um caso para outro, e o devido cuidado deve ser tomado quando do dimensionamento, de forma a escolher a equação correta.

1. LÍQUIDOS

Sendo ΔP crítico designado por ΔPs , Cf o fator crítico de vazão, Pv a pressão de vapor do líquido, P1 a pressão a montante da válvula e Pc a pressão crítica do produto, temos:

- se $Pv < 0,5 \cdot P1$, $\Delta Ps = P1 - Pv$;
- se $Pv \geq 0,5 \cdot P1$.

$$\Delta P_s = P_1 - \left(0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{P_v}{P_c}} \right) \cdot P_v$$

Calculado o ΔP_s , efetua-se a seguinte análise:

- a) $\Delta P < C_f^2 \cdot \Delta P_s$, o fluxo é subcrítico;
- b) $\Delta P \geq C_f^2 \cdot \Delta P_s$, o fluxo é crítico.

Adotando-se, para líquidos, vazão volumétrica (m^3/h) e o sistema métrico, as seguintes equações devem ser utilizadas no dimensionamento:

- **Fluxo Subcrítico**

$$C_v = 1,16 \cdot q \cdot \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P}} \quad (9.1)$$

onde:

q = vazão, m^3/h ;

G_f = densidade relativa do líquido (água = 1,0 $\cong 15^\circ C$);

P_1 = pressão de entrada (bar a);

P_2 = pressão de saída (bar a);

ΔP = queda de pressão = $P_1 - P_2$ (bar).

- **Fluxo Crítico**

$$C_v = \frac{1,16 \cdot q}{C_f} \cdot \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P_s}} \quad (9.2)$$

onde:

C_f = Fator crítico.

2. GASES E VAPORES

Se $\Delta P < 0,5 \cdot C_f^2 \cdot P_1$, o fluxo é subcrítico.

Se $\Delta P \geq 0,5 \cdot C_f^2 \cdot P_1$ ou $0,5 \cdot C_f^2 \cdot P_1 \leq \Delta P < C_f^2 \cdot P_1$, o fluxo é crítico.

- **Fluxo Subcrítico**

$$C_v = \frac{q}{295} \cdot \sqrt{\frac{G \cdot T}{\Delta P \cdot (P_1 + P_2)}} \quad (9.3)$$

onde:

q = vazão volumétrica, m^3/h ;

G = densidade relativa do gás (ar = 1,0);

T = temperatura do escoamento (K).

- Fluxo Crítico

$$C_v = \frac{q \cdot \sqrt{G \cdot T}}{257 \cdot C_f \cdot P_1} \quad (9.4)$$

Em caso de vapor d' água (*steam*), temos:

a) Vapor Saturado

- FLUXO SUBCRÍTICO

$$C_v = \frac{72,4 \cdot W}{\sqrt{\Delta P \cdot (P_1 + P_2)}} \quad (9.5)$$

onde:

W = Vazão em massa (ton/h).

- FLUXO CRÍTICO

(9.6)

b) Vapor Superaquecido

- FLUXO SUBCRÍTICO

$$C_v = \frac{83,7 \cdot (W + 0,00126 \cdot T_{sh}) \cdot W}{C_f \cdot P_1 - C_f \cdot P_1} \quad (9.7)$$

$$C_v = \frac{72,4 \cdot (1 + 0,00126 \cdot T_{sh}) \cdot W}{\sqrt{\Delta P \cdot (P_1 + P_2)}} \quad (9.7)$$

- FLUXO SUBCRÍTICO

(9.8)

3. ESCOAMENTO LAMINAR

$$C_v = 0,072 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{\mu \cdot q}{\sqrt{\Delta P}} \right)^2} \quad (9.9)$$

onde:

μ = viscosidade (cP).

9.4.3 Especificação de Válvulas de Controle

A especificação de válvulas de controle, como a maioria dos equipamentos e instrumentos, utiliza um formulário apropriado, a **folha de dados**, para centralizar todas as características técnicas.

Estas características são agrupadas de acordo com as partes da válvula, como se pode observar na figura 9.52.

Ao se especificar uma válvula de controle, o seguinte roteiro deve ser seguido:

- a) observar a válvula na malha de controle, atribuindo a ela uma identificação (*tag no.*);
- b) identificar o serviço que a mesma deverá executar, que caracteriza sua função na malha, assinalando o diâmetro nominal da tubulação e a respectiva designação do *schedule* para determinar o diâmetro interno da linha em que a válvula está instalada;
- c) efetuar uma análise das condições de operação a que a válvula será submetida, tais como o fluido e seu estado físico, a faixa de vazão, pressão e temperatura normal, mínima e máxima, dados como densidade, viscosidade, sólidos etc.;
- d) com estes dados escolhe-se o tipo de válvula a ser utilizado (globo, borboleta, esfera, diafragma, angular, três vias), o tipo de atuador em função principalmente da pressão máxima contra a qual o atuador deverá se opor para levar a válvula à condição segura em caso de falha de ar ou outro meio de acionamento;
- e) determinar a posição que a válvula deverá assumir em caso de falha (aberta, fechada ou mesma posição), uma vez que este dado é função de uma boa análise do processo em si e das condições de segurança do processo e dos equipamentos;
- f) definir o tipo de atuador a ser aplicado como mola e diafragma ou pistão;
- g) definir o diâmetro da válvula de controle através do correto dimensionamento da mesma, de acordo com as equações abordadas, obtendo o Cv requerido e escolhendo o Cv da válvula. Nesta etapa, deve-se definir a classe de pressão e as conexões da válvula, conforme a especificação de tubulação;
- h) selecionar os materiais de construção do corpo, dos internos, do engaxetamento;
- i) determinar a classe de vazamento com a válvula totalmente fechada, conforme a norma ANSI, o que é definido pela engenharia de processos;
- j) verificar a necessidade de instalar acessórios, tais como válvulas solenóide piloto, posicionador, chaves limite para detectar válvula aberta e/ou fechada, filtro regulador para o ar de alimentação;
- k) se a válvula for do tipo *on-off*, definir o atuador, cilindro de simples ação com retorno por mola ou cilindro de dupla ação;
- l) determinar as condições de inspeção e testes a serem efetuados na válvula, como teste hidrostático do corpo durante a fabricação para certificar a integridade mecânica do corpo e das conexões, testes de vazamento de acordo com a classe definida na especificação e teste de desempenho do conjunto válvula/atuador.

	FOLHA DE DADOS		NÚMERO				IT 9			
	EMPRESA/NOVAMENTO				10.16 de					
	TÍTULO									
	VÁLVULA DE CONTROLE									
01	IDENTIFICAÇÃO									
02	SERVIÇO									
03	DIÂMETRO DA LINHA / SCHEDULE									
CORPO E INTERNOS	04	TIPO								
	05	MATERIAL DO CORPO								
	06	DIAM. CORPO	DIAM. INTERNOS							
	07	CONEXÕES E CLASSE DE PRESSÃO								
	08	CASTELO TIPO								
	09	MATERIAL DAS GAXETAS								
	10	LUBRIFICADOR	VALV ISOL.							
	11	GUIA				No DE SEDES				
	12	CARACTERÍSTICA								
	13	CLASSE DE VEDAÇÃO								
	14	MATERIAL DOS INTERNOS (PLUG E SEDFI)								
	15	VAZÃO TENDÊNCIA								
ATUADOR	16	TIPO								
	17	LAMANHO E MODELO								
	18	FECHA A	ABRE A							
	19	POSIÇÃO DE FALHA								
	20	VOLANTE	LOCALIZAÇÃO							
POSICIONADOR	21	TIPO								
	22	ENTRADA	SAIDA							
	23	CONTORNO				MANÔMETROS				
	24	PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO								
	25	CLASSIFICAÇÃO DA ÁREA / INVÓLCRIO								
ACESSOS	26	FILTRO REGULADOR C/ MANÔMETRO								
	27	VÁLVULA SOLENOIDE DE 3 VIAS								
	28	INDIC POS HASTE	CHAVE LIMITE							
	29	TUBINGS PARA INTERLIG. PNEUMÁTICAS								
	30	FLUIDO				ESTADO FÍSICO				
CONDICÕES DE OPERAÇÃO	31	VAZÃO MIN	VAZÃO NOR		VAZÃO MAX					
	32	PRESS ENTRADA	NOR	MAX	MIN					
	33	A VAZÃO	NOR	MAX	MIN					
	34	PRESS SAIDA	NOR	MAX	MIN					
	35	A VAZÃO								
	36	MAX. A P. DE FECHAMENTO (SHUT OFF)								
	37	TEMPERATURA NOR								
	38	MAX. A P. DE ABERTURA (OPENING)								
	39	PESO ESPECÍFICO (kg/m³)								
	40	VISCOSIDADE (cP)								
	41	PESO MOLECULAR								
	42	RUÍDO MAX PERMITIDO								
	43	PRESSÃO CRÍTICA	PRESSÃO DE VAPOR							
	44	Cv NORMAL	Cv REQUERIDO							
	45	Cv DA VÁLVULA	FATOR FL							
	46	FABRICANTE DE REFERÊNCIA								
	47	MODELO DE REFERÊNCIA								
	48	UNIDADES: PRESSÃO (kg/cm²/min); TEMPERATURA (°C); VAZÃO (Nm³/h)								
	49	NOTAS								

FIGURA 9.52 Folha de dados de uma válvula de controle.

Aliada à definição destas características reunidas na folha de dados da válvula de controle, utiliza-se uma folha adicional para complementar a especificação, contendo esquema de atuação, detalhes técnicos dos acessórios como válvula solenóide piloto, chaves limite, posicionador, suportes mecânicos dos componentes e tubos de interligações.

São descritos também procedimentos de inspeção, procedimentos de pintura e testes de desempenho do conjunto composto pela válvula e acessórios.

9.4.4 Exemplos Práticos

Para ilustrar o procedimento de seleção, dimensionamento e especificação de uma válvula de controle, três exemplos práticos são apresentados a seguir.

1. **Válvula de controle para líquido:** seja o escoamento de óleo combustível através de uma tubulação de $1\frac{1}{2}$ " de diâmetro, na qual deseja-se exercer um controle de pressão, nas seguintes condições:

fluido:	óleo combustível;
vazão máxima:	$0,448 \text{ m}^3/\text{h}$;
densidade relativa:	0,851 (nas condições de operação);
pressão a montante (P1):	26 bar a;
pressão a jusante (P2):	1 bar a;
pressão de vapor (Pv):	0,75 bar a;
viscosidade :	12 cP (nas condições de operação).

A válvula mais adequada para esta aplicação é uma válvula globo de sede simples, com fator $C_f = 0,9$.

$$\text{Como } Pv < 0,5 \cdot P_1, \quad \Delta P_s = P_1 - Pv = 26 - 0,75 = 25,25 \text{ bar.}$$

Sendo $\Delta P \geq C_f^2 \cdot \Delta P_s$ ($25 \geq 20,45$) o fluxo é crítico.

Substituindo-se os valores na equação 9.2,

$$C_v \text{ calculado} = 0,106 \text{ (C}_v \text{ requerido).}$$

Uma válvula para pequenas vazões com $C_v = 0,25$, diâmetro de 1" e característica igual porcentagem deverá operar a uma abertura de aproximadamente 76%, o que é um valor bem razoável.

2. Válvula globo sede simples operando com vapor de atomização, saturado, para controle de pressão diferencial entre o óleo injetado num queimador e o vapor de atomização, nas seguintes condições:

fluido:	vapor saturado;
diâmetro da tubulação:	1";
temperatura de operação:	430 °C;
pressão a montante (P1):	31 bar a;
pressão a jusante (P2):	24 bar a;
vazão em massa:	57 kg/h (0,057 t/h);
fator Cf:	0,74;
ΔP:	7 bar.

Como $\Delta P < 0,5 \cdot C_f^2 \cdot P_1$ ($7 < 8,48$), o fluxo é subcrítico.

Substituindo-se os valores na equação 9.5,

$$Cv \text{ calculado} = 0,2 \text{ (Cv requerido).}$$

Uma válvula para pequenas vazões com $Cv = 0,6$, diâmetro de 1" e característica igual porcentagem deverá operar a uma abertura de aproximadamente 70%, o que é um valor bem razoável.

3. Válvula borboleta para controle de vazão de ar combustível nas seguintes condições:

fluido:	ar de combustão;
diâmetro da tubulação:	8";
temperatura de operação:	40 °C;
pressão a montante (P1):	1,03 bar a;
pressão a jusante (P2):	1,01 bar a;
vazão volumétrica:	3075 m ³ /h;
fator Cf:	0,65;
ΔP:	0,02 bar.

Como $\Delta P < 0,5 C_f^2 \cdot P_1$ ($0,02 < 0,22$), o fluxo é subcrítico.

Substituindo-se os valores na equação 9.3,

$$Cv \text{ calculado} = 913 \text{ (Cv requerido).}$$

Uma válvula borboleta de 8" com $Cv = 1775$ e característica igual porcentagem, deverá operar a uma abertura de aproximadamente 80%.

9.5 ACESSÓRIOS DE VÁLVULAS DE CONTROLE

As válvulas de controle dificilmente são instaladas de forma isolada num processo, mas sim acompanhadas de acessórios cujas funções dependem das necessidades do processo, dos requisitos de transmissão de dados e sinais e das necessidades operacionais, de modo a facilitar o controle e/ou monitoração do processo.

Dentre estes acessórios, seguem os mais comumente utilizados, que são os posicionadores (pneumáticos e eletropneumáticos convencionais e inteligentes), as chaves limite, volantes, as válvulas solenóide e os transmissores de posição.

9.5.1 Posicionadores

O posicionador é um servo-amplificador cuja função é assegurar o correto posicionamento da haste da válvula, de acordo com o sinal de comando correspondente, enviado pelo controlador. Normalmente, o atrito da haste com o sistema de engaxetamento da válvula é o que mais contribui para a denominada histerese, ou seja, uma pequena diferença entre o posicionamento da haste para o mesmo valor do sinal de comando, em instantes diferentes.

Os posicionadores podem ser pneumáticos ou eletropneumáticos, dependendo da malha de controle.

Nas malhas em que o controlador é pneumático, por exemplo com sinal de saída 0,2 – 1,0 kgf/cm², o posicionador recebe este sinal e o converte num sinal pneumático cuja faixa é determinada pela faixa de trabalho do atuador.

Nas malhas em que o controlador é eletrônico, por exemplo com sinal de saída 4-20 mA, o posicionador converte este sinal num sinal pneumático de acordo com o atuador.

Na figura 9.30, anteriormente apresentada, a válvula esfera em questão possui um posicionador eletropneumático acoplado.

O posicionador colabora para melhorar o desempenho não só da válvula como também da malha de controle.

Uma das aplicações mais "nobres" do posicionador é sua utilização na configuração *split-range*, como, por exemplo, em controle de temperatura.

A figura 9.53 mostra duas válvulas sendo comandadas pelo mesmo sinal de controle em faixa dividida.

No controle de temperatura, a válvula de resfriamento trabalha totalmente aberta com 0% de saída do controlador e totalmente fechada a 50%. A válvula de aquecimento começa a abrir a 50% do sinal do controlador, abrindo totalmente quando o sinal atingir 100% do valor. A ação do controlador, neste caso, é inversa, ou seja, quando a temperatura aumenta, o sinal de saída diminui.

Os posicionadores, a exemplo da maioria dos transmissores eletrônicos atuais, são hoje, em sua maioria, inteligentes. São instrumentos baseados em microprocessadores, que apresentam um sinal digital de comunicação superposto ao sinal analógico de transmissão de 4-20 mA CC, permitindo o intercâmbio de informações com a sala de controle, de forma a executar uma série de funções adicionais que um sistema convencional não dispõe.

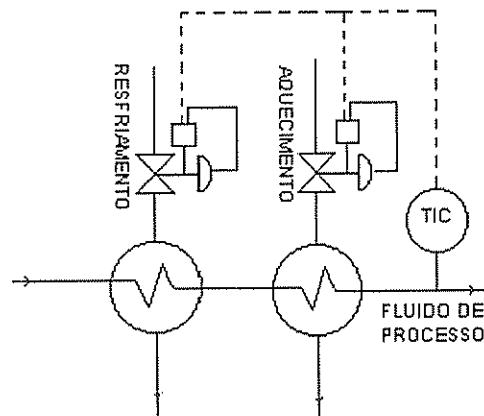


FIGURA 9.53 Controle em faixa dividida.

Assim, os posicionadores inteligentes podem ser interligados em rede, possibilitando calibração remota a partir da Sala de Controle, monitoração da posição da válvula a cada instante, verificação da correspondência da real posição da haste em relação ao sinal proveniente do controlador, diagnósticos de falhas e outras.

9.5.2 Chaves Limite

As chaves limite, ou também denominadas chaves fim de curso, destinam-se a fornecer indicação remota de certas posições da válvula, geralmente se a mesma está totalmente aberta ou totalmente fechada. As chaves limite podem ser instaladas em válvulas de haste com movimento linear ou rotativo, possuindo um ou dois contatos elétricos do tipo SPDT, reversíveis, os quais são interligados a um sistema digital com a finalidade de sinalizar o valor limitado, e/ou utilizar este valor para fins de intertravamento.

A figura 9.54 apresenta chaves limite para instalação em válvula rotativa.

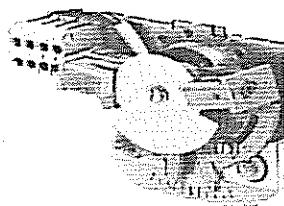


FIGURA 9.54 Chaves limite para válvula rotativa.

Estas chaves, normalmente, são fornecidas em invólucros à prova de tempo ou prova de explosão, de acordo com a classificação da área onde são instaladas.

9.5.3 Volantes

Os volantes são utilizados como acessório que permite a manipulação da válvula de controle, de forma independente do sinal de controle, em caso de emergência. Normalmente, as válvulas de controle são instaladas com um desvio (*bypass*), no qual é instalada uma válvula manual que permite uma regulagem fina da vazão, utilizada quando for necessário remover a válvula de controle por algum motivo. Sem o desvio, é o volante quem permite este ajuste manual.

O volante pode ser instalado no topo da válvula, ou lateralmente, como mostra a figura 9.55.

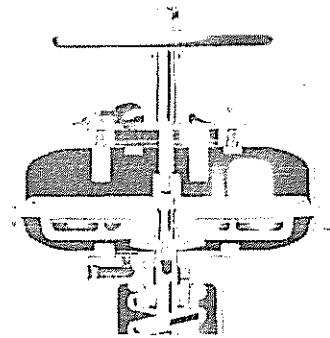


FIGURA 9.55 Volante de topo.

9.5.4 Válvulas Solenóide

As válvulas solenóide, quando utilizadas em conjunto com as válvulas de controle (modulantes ou *on-off*), exercem a função de piloto ou comando, fazendo com que o ar de comando passe para o atuador, ou desvie do atuador para a atmosfera, abrindo ou fechando a válvula de controle.

Tais ações são muito utilizadas em sistemas de intertravamento, nos quais a válvula deva assumir a posição aberta ou fechada, determinada pelo processo em si.

9.5.5 Transmissores de Posição

As válvulas de controle possuem indicadores de posição mecanicamente ligados à haste, de forma a possibilitar a identificação do curso da haste da válvula.

Para indicação remota existem os transmissores de posição que detectam a posição da haste, transformando-a num sinal padronizado (normalmente 4-20 mA) a ser transmitido para um local remoto para indicação.

9.6. VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESSÃO

As válvulas reguladoras de pressão são dispositivos que exercem praticamente a mesma função de uma válvula de controle, quando se trata de controle de pressão, porém, de forma mais simples. As válvulas reguladoras de pressão são auto-operadas e utilizam a energia do próprio fluido para operar, enquanto que as válvulas de controle são atuadas por fonte externa de energia.

As válvulas reguladoras de pressão podem ser de dois tipos: válvulas de operação direta ou válvulas piloto operadas.

A função primordial de uma reguladora de pressão é manter a pressão de entrega do fluido no ponto de consumo, compensando a variação da demanda. Com o aumento da demanda, a tendência da pressão é cair, sendo que a válvula deve abrir, tanto para possibilitar a reposição do fluido, como para restabelecer o valor da pressão (pressão regulada). O inverso ocorre quando a demanda diminui e a pressão aumenta, isto é, a válvula deve fechar para equilibrar a demanda e diminuir a pressão novamente até o ponto de controle (pressão regulada).

9.6.1 Válvulas de Operação Direta

As válvulas de operação direta captam a pressão a jusante internamente, ou através de uma tomada de pressão externa. Esta pressão a jusante se opõe à força de uma mola que movimenta um diafragma e a haste da válvula, de modo a variar a passagem do fluido através do corpo da mesma.

As válvulas de operação direta sempre apresentam um desvio (*offset*) em relação ao valor desejado da pressão.

As válvulas reguladoras de pressão de operação direta possuem três elementos básicos (figura 9.56):

1. um elemento de restrição (obturador/sede);
2. um elemento de medição (diafragma);
3. um elemento de carga (mola).

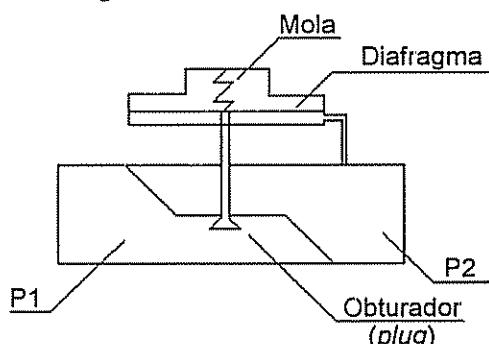


FIGURA 9.56 Válvula reguladora de pressão de operação direta.

A figura 9.57 mostra a curva característica de uma válvula reguladora de operação direta.

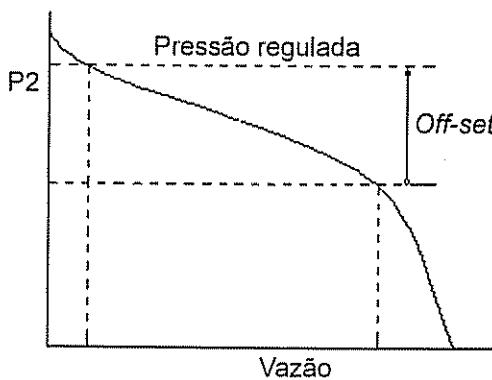


FIGURA 9.57 Curva de variação da pressão regulada em função da variação da vazão.

Como se pode observar, a pressão P_2 diminui com a vazão, ficando abaixo do valor ajustado (pressão regulada), à medida que a vazão aumenta. Ocorre, portanto, no caso das válvulas reguladoras de pressão do tipo operação direta, um desvio denominado *offset*, ou *droop*.

Observa-se, também, que abaixo da vazão mínima de controle, a pressão atinge rapidamente o valor de *shut-off* e, acima da vazão máxima de controle, a pressão cai rapidamente ao mínimo.

9.6.2 Válvulas Piloto Operadas

As válvulas piloto operadas são mais utilizadas do que as de operação direta em casos de alta vazão requerida, ou quando necessita-se de uma maior precisão no controle da pressão. A velocidade de resposta das válvulas piloto operadas é maior do que a das válvulas de operação direta.

Para aumentar a sensibilidade da válvula reguladora de pressão, uma válvula piloto é adicionada ao sistema, de modo a regular a abertura da válvula principal, de acordo com a atuação tanto da pressão a montante como a jusante, sendo que a variação em P_2 é quem comanda a ação do piloto sobre a válvula principal (figura 9.58).

A pressão P_2 (pressão regulada) incide no diafragma da válvula piloto, regulando a passagem do fluido de processo que aciona o diafragma da válvula principal.

Quando a demanda aumenta, a pressão P_2 diminui, fazendo com que a mola do piloto abra a passagem de fluido, reduzindo a pressão P_1 abrindo a válvula principal. Com isso, a vazão aumenta para equilibrar a demanda e, consequentemente, aumentando novamente a pressão P_2 .

Se a demanda cair, o piloto deverá fechar sua passagem, aumentando P1, fechando a válvula principal, diminuindo a vazão e restabelecendo P2.

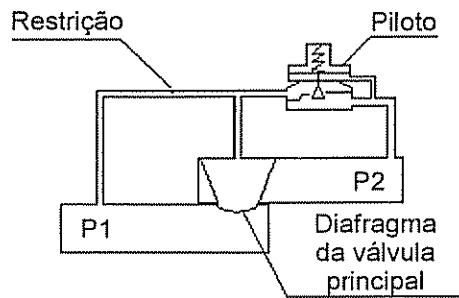


FIGURA 9.58 Esquema de uma válvula reguladora de pressão piloto operada.

A sensibilidade do sistema de redução de pressão pode ser ajustada através de uma restrição, cuja função é alterar a velocidade de variação da pressão P1 e, consequentemente, variar a abertura da válvula principal.

Dessa forma, a precisão de regulagem aumenta, como pode ser visto na figura 9.59.

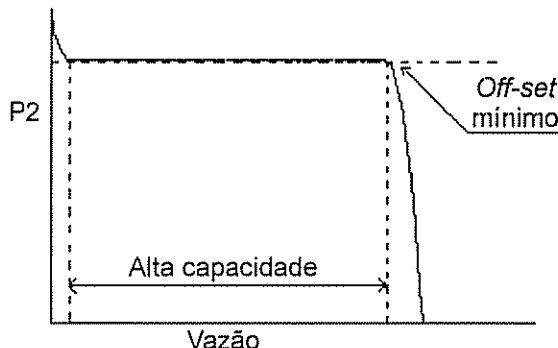


FIGURA 9.59 Curva da pressão regulada em função da vazão - válvula piloto operada.

Observa-se, na curva acima, que praticamente não existe desvio da pressão regulada em relação ao valor desejado. O offset é mínimo, da ordem de 1 a 3%. No caso das válvulas reguladoras de operação direta, o desvio é da ordem de 10 a 20%.

9.6.3 Seleção, Dimensionamento e Especificação de Válvulas Reguladoras de Pressão

Embora também utilizadas com líquidos, as válvulas reguladoras de pressão encontram grande parte de sua aplicação no controle de pressão de gases.

Qualquer que seja a aplicação, entretanto, os seguintes requisitos devem ser considerados na seleção e especificação de válvulas reguladoras de pressão:

1. fluido a ser manipulado;
2. faixa de variação de pressão (mínima e máxima);
3. faixa de variação de temperatura (mínima e máxima);
4. precisão requerida em função da aplicação;
5. valor requerido da pressão a jusante (pressão regulada);
6. densidade do produto manipulado.

O dimensionamento dos reguladores de pressão é efetuado utilizando-se as mesmas equações já apresentadas no item 9.4.2.

No caso de gases, o dimensionamento pode ser efetuado através de equações simplificadas, dependendo se o fluxo é crítico ou subcrítico.

A especificação deve considerar a definição do tipo de válvula (operação direta ou piloto operada), do diâmetro, material do corpo e dos internos, tipo de conexões na tubulação.

Da mesma forma que as válvulas de controle, a apresentação dos dados das reguladoras de pressão é feita numa folha de dados específica.

9.7 RUÍDO EM VÁLVULAS DE CONTROLE

Normalmente, o ruído se constitui num som de intensidade intolerável pelo ouvido humano, principalmente se ultrapassar determinada dimensão por um período de tempo relativamente longo.

A magnitude do som é medida em decibéis (dBA). Existem vários sons ou ruídos de alta intensidade num ambiente industrial e um dos mais comuns é o ruído provocado pelas válvulas de controle operando sob condições de alta queda de pressão.

O governo americano, por exemplo, determinou o valor de 90 dBA como o limite máximo de ruído a que o trabalhador pode ser exposto durante um período de oito horas de trabalho.

As cinco fontes principais de ruído em válvulas de controle são:

1. vibração mecânica;
2. vibração ressonante;
3. instabilidade interna da válvula;
4. ruído hidrodinâmico;
5. ruído aerodinâmico.

Dentre estas fontes, o ruído aerodinâmico é o que se constitui num problema real em válvulas de controle, conduzindo a valores que podem atingir 120 dBA, ou mesmo um valor superior.

O ruído produzido por turbulência em líquidos é praticamente desprezível se comparado àquele gerado em escoamento de gases e vapores em altas velocidades.

O ruído é geralmente função da vazão mássica através da válvula e da relação entre a pressão a montante e a jusante (P_1/P_2).

Válvulas operando com gás ou vapor em condições de ruído alto apresentam vibração, erosão dos internos e instabilidade operacional, reduzindo dramaticamente a vida útil da válvula.

O tratamento do ruído em válvulas de controle é efetuado normalmente de duas formas:

1. tratamento da propagação ou transmissão do ruído;
2. tratamento do ruído na sua fonte.

O tratamento da propagação tem como objetivo atenuar a transmissão do ruído desde a fonte até o receptor, ou seja, o ouvido humano.

Os recursos utilizados, neste caso, podem ser a instalação de tubos com maiores espessuras, instalação de difusores ou silenciadores e aplicação de revestimento acústico.

No caso de tubos de maior espessura, como regra geral, a cada aumento de duas vezes na espessura do tubo, o ruído cai aproximadamente 6 dBA. Este valor, normalmente, aumenta para tubos de maior diâmetro.

Os difusores são normalmente instalados tanto em instalações existentes como novas. Eles auxiliam na atenuação do ruído e são projetados para reduzir a queda de pressão total através da válvula, reduzindo, assim, a capacidade de geração de ruído.

Os silenciadores podem ser utilizados para tratamento em linha, ou descarregando para a atmosfera. São, entretanto de alto custo, sendo um dos métodos menos utilizados.

O método mais utilizado para a redução do ruído é o da isolação acústica. Até mesmo os isolantes térmicos são redutores de ruído, diminuindo de 3 a 5 dBA.

A aplicação de um material acústico apropriado pode provocar a redução do ruído em até 10 dBA.

O tratamento do ruído na fonte consiste, na maioria das vezes, em especificar um conjunto sede/obturador especial, com a função de reduzir a queda de pressão em estágios, diminuir a velocidade do fluido a níveis subsônicos e a redução ou eliminação de ondas de choque.

A redução do ruído, para alguns tipos especiais de internos anti-ruído, pode chegar a 40 dBA (elementos multiestágios).

Cabe ressaltar, para finalizar esta rápida abordagem sobre ruídos, que os programas de cálculo editados pelos principais fabricantes de válvulas de controle calculam automaticamente o nível de ruído, cabendo a quem especifica a válvula de controle pesquisar a melhor solução para atenuação do ruído, caso seu valor ultrapasse o limite recomendado de 85 dBA.

9.8 INTERLIGAÇÃO DE VÁLVULAS EM REDE

As válvulas de controle, como já visto, possuem alguns acessórios que têm a função de auxiliar na monitoração de seu funcionamento, bem como possibilitar a operação segura em caso de falha.

As válvulas de controle (modulantes ou *on-off*) podem ser interligadas para transmitir, remotamente, dados operacionais importantes.

O mais comum atualmente é encontrar instrumentos e acessórios microprocessados, em substituição aos antigos analógicos, cuja capacidade é relativamente limitada.

Os posicionadores analógicos, por exemplo, têm a função de verificar a posição da válvula de controle, compará-la com o valor desejado em função do sinal do controlador, corrigindo a posição por meio de uma intensidade adicional de sinal aplicada.

As chaves limite detectam posições extremas da válvula para monitoração e intertravamento.

As solenóides piloto comandam as válvulas principais através de comandos externos, e os transmissores de posição transmitem o valor do curso da haste da válvula de forma contínua.

Outras funções podem ser condensadas caso sejam utilizados dispositivos inteligentes, baseados em microprocessador, que possuem a capacidade também de gerenciar continuamente a operação da válvula.

Tais funções são normalmente efetuadas simultaneamente e para um conjunto de válvulas, desde que as mesmas sejam interligadas por meio de uma rede de dados, através da qual circule um sinal analógico de 4-20 mA juntamente com um sinal digital (protocolo HART ou *Fieldbus Foundation*). Esta rede gerencia o fluxo das informações, desde que em cada válvula seja instalado um dispositivo inteligente (controlador digital), que efetue também o intercâmbio de informações de forma integrada com o Sistema Digital da Planta.

A rede pode ser ilustrada de forma esquemática pela figura 9.60.

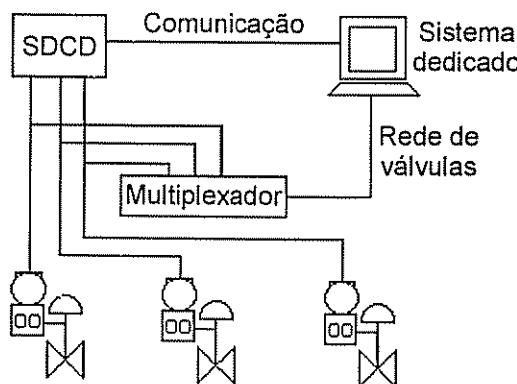


FIGURA 9.60 Rede de válvulas integrada ao Sistema Digital (SDCD).

Estes dispositivos apresentam as seguintes características técnicas:

- classificação elétrica para compor sistemas à prova de explosão e segurança intrínseca;
- sinal de entrada: 4-20 mA e comunicação em HART ou *Fieldbus*;
- sinal de saída: pneumático, compatível com o atuador da válvula;
- alimentação pneumática: máxima 7 kgf/cm²;
- montagem: diretamente no atuador da válvula.

9.9 VÁLVULAS DE CONTROLE × VARIADORES DE VELOCIDADE

9.9.1 Introdução

As válvulas de controle são, indiscutivelmente, os elementos finais mais utilizados em controle de processos, aplicadas tradicionalmente para variar ou manipular o fluxo de material que influí na variável a ser controlada, ou seja, no valor desejado desta variável.

Conforme previamente estudado, para que a vazão possa ser manipulada, a válvula manobra uma perda de carga que lhe é reservada no processo, de acordo com a faixa de operação da mesma.

Este fato, entretanto, determina um consumo adicional de energia, uma vez que as bombas, ventiladores e sopradores, máquinas normalmente utilizadas para impulsionar os fluidos de processo, devem compensar esta perda de pressão introduzida pela válvula.

Tendo em vista a necessidade crescente de economia de energia seja devido à escassez deste recurso como pela necessidade de reduzir custos de produção, que influí diretamente na competitividade, as indústrias de processo têm considerado, de forma cada vez mais crescente, a alternativa de utilizar a variação da velocidade da máquina rotativa em questão, como forma de variar ou manipular a vazão do fluido de processo.

Esta variação de velocidade é obtida através dos acionadores de freqüência variável, inversores de freqüência, acionadores com velocidade variável ou, simplesmente, *variadores de velocidade*.

A aplicação desta tecnologia resulta numa economia significativa de energia elétrica, tendo em vista que grande parte da energia consumida pelos motores CA (corrente alterna) é utilizada na operação dos equipamentos rotativos mencionados. Estima-se que aproximadamente 60% da energia elétrica produzida é utilizada para alimentar motores e que, 70% desses motores, são utilizados para acionar equipamentos rotativos.

As válvulas de controle, devido a sua tradição e operação eficiente são, e continuaram sendo, por muito tempo, aplicadas ao controle de processos. Entretanto, a abordagem que segue sobre os variadores de velocidade é importante não como forma de ressaltar desvantagens das válvulas de controle, mas valorizar as vantagens de uma alternativa que deve ser considerada nos casos em que realmente puder oferecer ganhos operacionais e econômicos.

Para que se possa entender a diferença entre estas duas formas de manipular uma vazão, ou seja, por meio de uma válvula de controle, ou através da variação da rotação de um motor elétrico, vamos considerar os casos a seguir.

9.9.2 Controle de Vazão com Válvula na Descarga

A figura 9.61 abaixo representa uma válvula de controle instalada na descarga de uma bomba centrífuga.

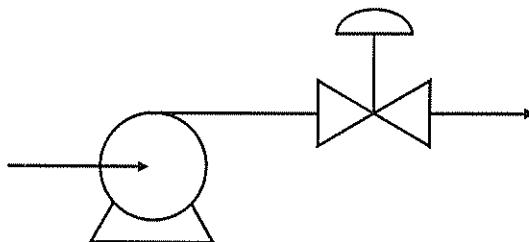


FIGURA 9.61 Válvula de Controle na Descarga de uma Bomba Centrífuga.

Observa-se, neste caso, a alteração da curva do sistema com a variação da vazão, conforme representado na figura 9.62.

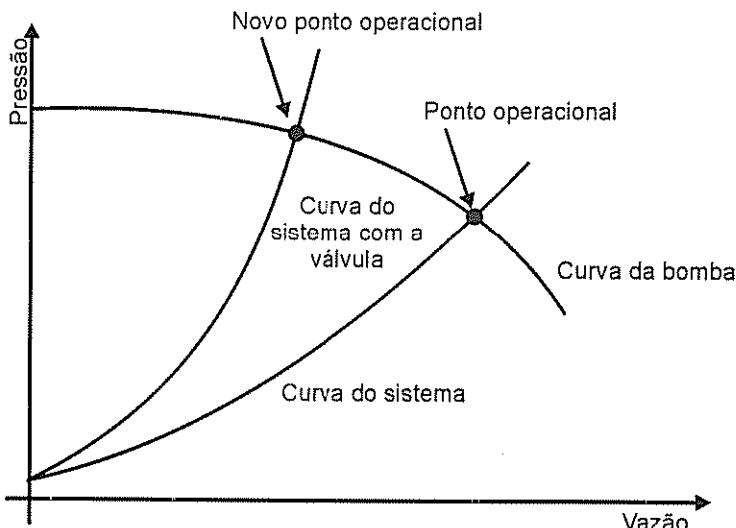


FIGURA 9.62 Alteração na Curva do Sistema com a Instalação de Válvula na Descarga.

Vale destacar que uma válvula totalmente aberta introduz uma perda de pressão de aproximadamente 10% das outras perdas dinâmicas, requerendo, portanto, maior energia proporcionada pela bomba, para compensar esta perda.

Além disso, as válvulas são normalmente dimensionadas para operarem com cerca de 70% a 80% de abertura no ponto de operação, o que aumenta ainda mais o consumo de energia elétrica para vencer perdas ainda maiores.

9.9.3 Controle de Vazão por Meio de Variadores de Velocidade

Ao se utilizar um inversor de frequência para variar a rotação da bomba, a curva da bomba é modificada, conforme esquematizado na figura 9.63.

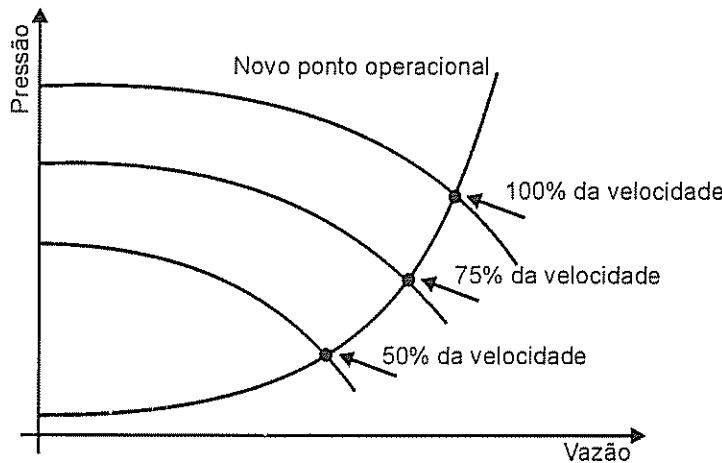


FIGURA 9.63 Efeitos da Variação de Velocidade da Bomba.

O que se observa, é que a curva do sistema não muda, uma vez que não há a restrição adicionada pela válvula de controle. Este fato é que determina, em muitos casos, uma significativa economia de energia.

As chamadas leis de afinidade que regem a operação de máquinas centrífugas é que determinam tal economia. Se considerarmos que, para estas máquinas, a vazão varia linearmente com a velocidade, que o torque varia com o quadrado da velocidade e que a potência é proporcional ao produto do torque pela velocidade, conclui-se que a potência é proporcional ao cubo da velocidade ou vazão. Esta relação pode ser traduzida pela curva da figura 9.64, na qual se observa que a 50% da vazão, somente 13% da potência é necessária, o que justifica a economia de energia mencionada.

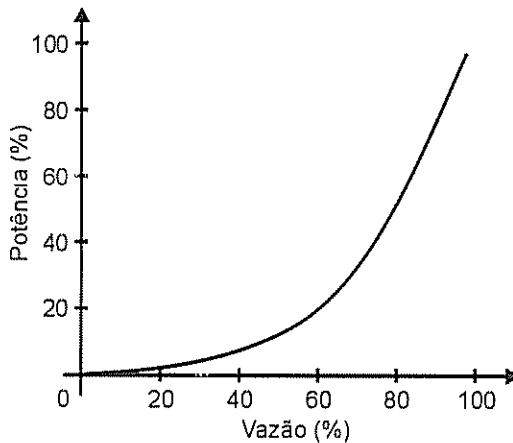


FIGURA 9.64 Variação da Potência com a Vazão em uma Máquina Centrífuga

Os ventiladores centrífugos têm o mesmo comportamento que uma bomba centrífuga quando, por exemplo, deseja-se controlar a vazão na descarga do mesmo, controle este que pode ser efetuado através de um *damper* (elemento final de controle utilizado em casos de ventiladores, sopradores) ou variando-se a velocidade do motor por meio da instalação de um inversor de freqüência.

Com a utilização de *damper*, há um impacto significativo sobre a potência consumida, dada a perda de carga introduzida por este elemento final de controle, tal como uma válvula de controle na descarga de uma bomba.

Utilizando-se um variador de velocidade do motor do equipamento, por sua vez, a curva do mesmo é alterada, em função da velocidade, ou da vazão (figura 9.65).

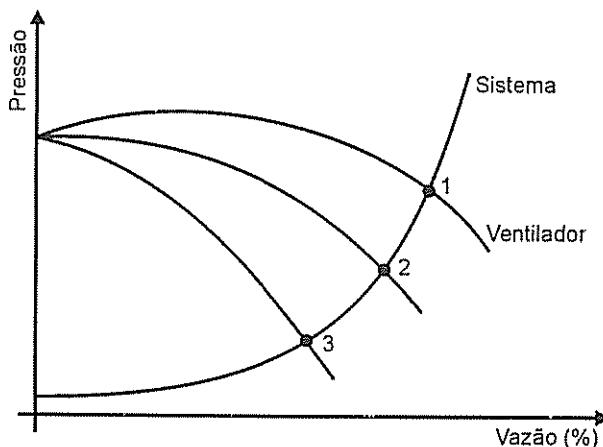


FIGURA 9.65 Curva do Ventilador com a Variação de Velocidade do Motor

Em termos de economia de energia, o variador de velocidade pode trazer vantagens consideráveis: um motor de 100 HP, por exemplo, operando aproximadamente 5.000 horas por ano, a 60% da vazão, pode causar uma redução de até 70% no custo de energia.

Alguns aspectos positivos devem ser considerados, além desta economia, quando da utilização de inversores de freqüência, como por exemplo:

1. simplificação do sistema de tubulações, em função da ausência de *dampers*, válvulas de controle e os acessórios decorrentes tais como válvulas de bloqueio, desvios, drenos, etc.;
2. redução dos efeitos do chamado “martelo hidráulico”, como consequência da alteração súbita da vazão num sistema de tubulações, causando variações bruscas de pressão na linha, danificando os componentes do sistema. Os inversores de freqüência possibilitam a utilização de dispositivos de partida suave, que permitem uma aceleração gradual em conformidade com a vazão desejada;
3. redução da possibilidade de cavitação, ao se evitarem elementos causadores de perdas de carga, ou seja, restrições na tubulações;
4. aumento da vida útil dos equipamentos centrífugos, pela redução do desgaste de partes como selos e mancais, em função da menor exigência dos motores.

Podem ser citados, por outro lado, alguns fatores negativos, que muitas vezes inibem a aplicação de inversores de freqüência:

1. desconhecimento pleno de como operam estes equipamentos, se comparados com a técnica tradicional de controle aplicando válvulas de controle;
2. o custo inicial dos inversores de freqüência, em alguns casos maior do que o das válvulas de controle;
3. resistência quanto à utilização de motores à prova de explosão, especialmente em indústrias de petróleo e petroquímicas;
4. falta de estudos concretos com relação à sintonia dos sistemas de controle que utilizam variadores de velocidade.

Num variador de velocidade, o controle da freqüência é normalmente efetuado por meio da modulação de largura de pulso (*Pulse Width Modulation – PWM*).

Um retificador é utilizado para converter tensão alternada em tensão contínua, pulsante. Um circuito intermediário funciona como filtro, gerando tensão contínua, não pulsante. Finalmente, um inversor é utilizado no circuito de saída, produzindo uma tensão alternada com a freqüência desejada. Uma unidade de controle monitora o funcionamento do inversor de freqüência. (Ver o diagrama de blocos da figura 9.66.)

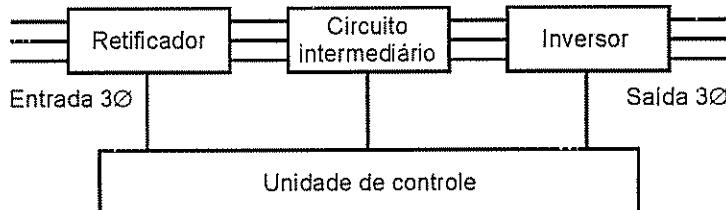


FIGURA 9.66 Diagrama de Blocos Simplificado de um Inversor de Freqüência

Na figura seguinte, a título de ilustração, são mostrados um inversor de freqüência e um motor de indução.



FIGURA 9.67 Motor de Indução e um Inversor de Freqüência (BALDOR)

9.9.4 Estudos Efetuados com Relação à Utilização de Inversores de Freqüência

Os inversores de freqüência são utilizados em sistemas de condicionamento de ar, acionando motores de ventiladores e transportadores em indústrias de cimento e mineração, acionando motores de bombas e misturadores em indústrias químicas, em plantas de geração de energia elétrica e outras.

Uma aplicação típica destes equipamentos numa estação de bombeamento de água aparece no esquema da figura 9.68, em que várias bombas são instaladas em paralelo, com a função de manter a pressão de acordo com a demanda

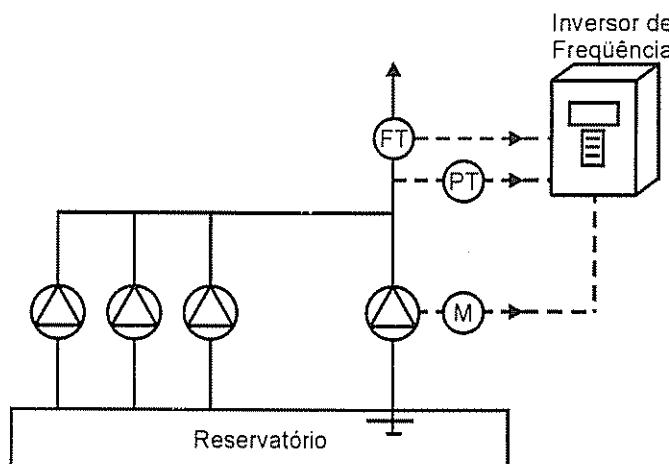


FIGURA 9.68 Controle de Pressão com Inversor de Freqüência

Uma das bombas, com velocidade variável, controla a pressão em função da demanda. Com o aumento do consumo, as outras bombas que operam com velocidade constante entram em operação de forma sequencial, desligando também sequencialmente no processo inverso, em caso de queda na demanda.

Dessa forma, a economia de energia se efetiva em regime normal de trabalho, através de bomba de velocidade variável. Quando do aumento do consumo, as demais bombas complementam o sistema.

No Brasil, existe um projeto que foi iniciado em março de 1994, relacionado a aplicações petroquímicas, com o objetivo de determinar a conservação de energia com a utilização de conversores eletrônicos de freqüência em plantas de processo.

Uma das aplicações foi efetuada no processo de transferência de petróleo bruto entre a estação coletora da produção do campo de Mossoró-Urbano para a estação de mistura de petróleo em Cajazeiras, no Município de Mossoró-RN. São estações interligadas por um oleoduto de 4" de diâmetro e 3 Km de extensão.

A bomba utilizada neste processo de transferência, é acionada por um motor elétrico com potência nominal de 60 CV, 4 pólos, 1775 rpm, tensão nominal 440 V, corrente nominal de 73 A e fator de potência nominal 0,88.

O conversor utilizado na malha de controle tem que ter compatibilidade eletromagnética com os demais equipamentos e instrumentos do sistema, bem como possuir imunidade a interferências eletromagnéticas e eletrostáticas, utilizando-se filtros RFI/EMI.

Foi aplicado um transmissor de pressão com faixa de 0 – 56 bar, saída em 4 – 20 mA, com o valor desejado da pressão ajustado em 24 bar.

A parametrização das funções do equipamento, especialmente do módulo PID, é feita numa interface de operação no frontal do inversor.

9.9.5 Conclusão da Análise Comparativa

O objetivo desta análise comparativa não é, absolutamente, advogar a favor deste ou daquele equipamento, desta ou daquela técnica de controle, mas apresentar uma alternativa de utilização de elementos finais de controle, como é o caso dos inversores de freqüência.

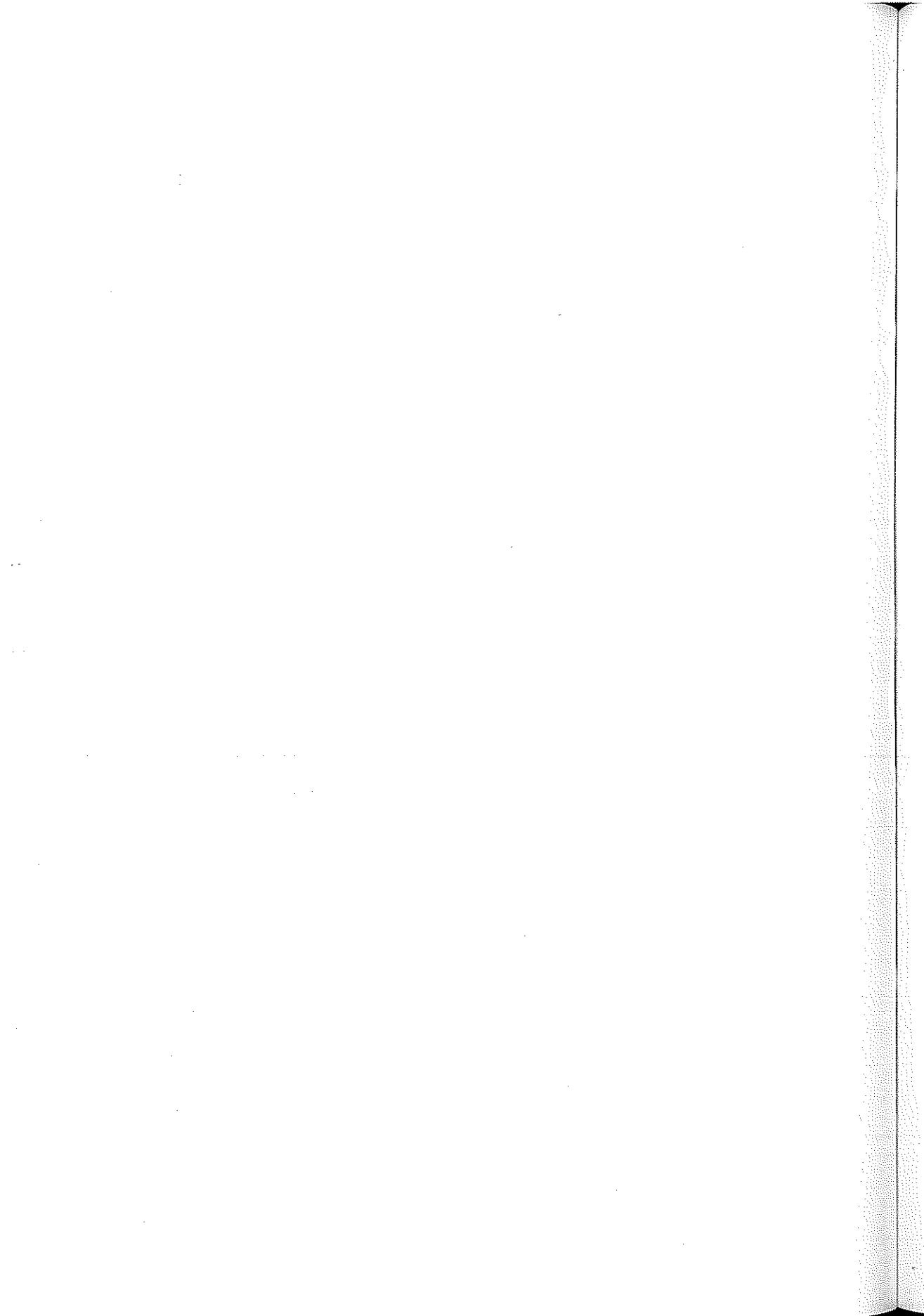
A válvula de controle é o dispositivo tradicionalmente aplicado como elemento final numa malha de controle e certamente continuará sendo durante um bom tempo. Entretanto, os inversores de freqüência, em função da citada economia de energia, certamente ganharão espaço crescente em muitas aplicações industriais em substituição às válvulas.

O que ocorre são resistências normais às mudanças, devido à tradição e principalmente à funcionalidade das válvulas em controle de processos.

Uma comparação válida com relação a este assunto, é a utilização das tradicionais placas de orifício para medição de vazão numa refinaria de petróleo, por exemplo. Existem os elementos primários denominados "Annubar" que também operam pelo princípio de pressão diferencial, que são bastante vantajosos em relação às placas sob o aspecto de perda de carga. Os "Annubar" apresentam perda de carga permanente muito menor do que as placas de orifício, resultando em significativa economia de energia; entretanto, não se tem notícia de nenhuma refinaria que tenha tomado a iniciativa de substituir todas as suas placas de orifício por "Annubar".

9.10 REFERÊNCIAS

- Bela G. Lipták; Kriszta Venczel, Instrument Engineers' Handbook – Control Valves, Chilton Book Company, Radnor Pennsylvania, 1985.
- W. G. Andrew, Applied Instrumentation in the Pocess Industries, Gulf Publishing Co., Houston, 1974.
- Manual para Dimensionamento de Válvulas de Controle – Masoneilan-Dresser, 3^a edição.
- Manual para Dimensionamento de Válvulas de Controle – Masoneilan-Dresser, 3a. Edição.
- Artigo Técnico ISA : Speed Manages Streams – 01 July 2004 by Ian Gibson and Geoff Irvine.
- Artigo Técnico : Utilização de Inversores de Freqüência em Bombas e Ventiladores – Raymond Schmitz.
- Controle e Acionamento Automático de Motobombas na Transferência de Petróleo: Trabalho desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia de Computação e Automação, Centro de Tecnologia – UFRN – Acionamento de Máquinas Elétricas.
- Fotos obtidas a partir dos livros supracitados, catálogo Fisher Controls, JC Válvulas, sites da Internet (VEG, Siemens, Emerson Process, Baldor).



10

TEORIA DE CONTROLE

ENGº RICARDO KOCH

10.1 INTRODUÇÃO

Apesar da contínua modernização dos processos de fabricação e manufatura, a maioria das leis e princípios de medição e controle de processos industriais se conserva intacta até os dias atuais.

Entretanto, tanto os instrumentos que utilizam estes princípios se modernizaram tecnologicamente, como também novas técnicas de medição foram introduzidas, somando-se às já existentes.

Desta maneira, as variáveis de processo podem atualmente ser medidas com precisão incrivelmente maior do que há alguns anos.

Os sinais de transmissão dos valores das variáveis de processo na década de 70 eram essencialmente pneumáticos, bem como os instrumentos receptores de sinais, dos quais os principais representantes se constituem nos controladores (componente central de uma malha de controle).

As funções de uma malha de controle eram efetuadas de forma incrivelmente artesanal, tendo em vista que utilizavam-se vários elementos de cômputo analógico para, em conjunto, determinarem o resultado requerido.

No que se refere ao controlador, as ações por ele executadas eram igualmente artesanais, considerando-se os verdadeiros "elementos de relojoaria" dos controladores pneumáticos utilizados para compor as ações de controle.

A evolução da eletrônica industrial determinou a introdução da instrumentação analógica eletrônica, diminuindo o tamanho dos componentes e a consequente simplificação das salas de controle.

A miniaturização cada vez mais crescente, determinou a introdução dos microprocessadores, que hoje constituem a base de construção da quase totalidade dos instrumentos e sistemas disponíveis no mercado de instrumentação e automação industrial.

Os sistemas de controle digitais surgiram como decorrência desta tecnologia e, atualmente, dominam as aplicações de medição, controle e monitoração nas mais modernas indústrias de processamento.

As funções de monitoração e controle, atualmente, são executadas não mais através da interligação "ponto a ponto" (par de fios) dos instrumentos de cômputo mencionados, mas por meio de cabos de comunicação que efetuam as funções de forma digital (via software).

Este rápido retrospecto da evolução tecnológica dos sistemas de controle visa apenas uma adequação ao tempo (década de 70 até o presente), e para lembrar que, apesar de toda esta evolução, não podemos prescindir dos conhecimentos básicos de medição e controle; por mais modernas que sejam as ferramentas, a teoria básica de controle é fundamental, e dela não se pode abrir mão.

Este capítulo se propõe a uma abordagem prática e intuitiva dos conceitos de controle, e seu estudo independe do estágio atual de desenvolvimento do *hardware* e do *software* disponíveis.

Assim, nosso objetivo é introduzir os conceitos básicos de controle, a partir dos quais o profissional deve apenas escolher a tecnologia mais conveniente para sua implantação.

10.2 OBJETIVOS DO CONTROLE DE PROCESSOS

Controlar um processo industrial, significa, basicamente, manter os valores das variáveis do processo dentro de uma faixa aceitável para sua operação conveniente; mas ainda, buscar dentro de cada faixa, o valor ótimo para cada variável denominado valor desejado, ou *set-point*.

O estudo do controle de processos destina-se a estudantes e profissionais que, de algum modo, se relacionam com instrumentação e controle nos mais diversos setores, ou seja, projeto, operação, manutenção, pesquisa etc.

Numa planta industrial, envolvem-se pesquisa, engenharia básica, projeto detalhado, montagem, comissionamento, pré-operação, partida, operação normal da planta e também sua manutenção.

Todas estas atividades envolvem, além de profissionais de instrumentação, aqueles de setores que estão intimamente relacionados, ou seja, processos, tubulações industriais, equipamentos mecânicos, caldeiraria, eletricidade, gerenciamento.

Assim, o presente capítulo visa possibilitar um entendimento de seus aspectos básicos por todos estes especialistas que, de alguma forma, estão sempre envolvidos numa implantação industrial.

O controle de processos destina-se basicamente a:

- manter os processos em seus pontos operacionais mais eficientes e econômicos;
- prevenir condições instáveis no processo que podem pôr em risco pessoas e/ou equipamentos;

- exibir dados sobre o processo aos operadores da planta, para que se possa conservar o ritmo seguro e eficiente.

Para que estes objetivos possam ser alcançados, envolvem-se:

- gerente da planta, que visa baixos custos, lucratividade e a imagem da companhia;
- engenharia de projetos, que procura conceber um projeto que resulte na produção eficiente, com baixo custo, e mínimas alterações de campo durante sua implantação;
- engenharia de processos, visa aumentar a produtividade dos equipamentos de processo;
- operador da planta, que busca normalmente uma operação estável;
- manutenção, que espera sempre por uma instrumentação e controle confiável e de fácil manutenção.

Para a realização de um controle eficiente, utilizam-se os conceitos básicos, associados à técnicas de controle por realimentação (*feedback*), que se constitui no recurso mais utilizado em controle de processos, complementado por técnicas avançadas, como controle por antecipação (*feedforward*), controle em cascata, controle de razão, controle seletivo e controle em faixa dividida. Serão abordadas, também, estabilidade e sintonia de sistemas de controle, do ponto de vista intuitivo e prático.

10.3 PRINCIPAIS PROBLEMAS PARA O CONTROLE DE PROCESSOS

Para o estudo conveniente do controle de processos, é muito importante o conhecimento das características do processo em si, e devemos sempre considerar que todos os dispositivos e processos têm a capacidade de armazenar energia e também apresentam certa resistência a alterações.

Neste ponto vale efetuar a comparação com os sistemas elétricos que apresentam uma resistência e uma capacitância; o circuito formado por estes componentes em série, têm, sempre, uma distorção de sua saída com relação à entrada, devido a estes parâmetros associados.

Da mesma forma um processo, por exemplo, um tanque que armazena um volume de líquido, quando submetido a uma variação brusca na vazão de entrada (normalmente chamada variação em degrau), tem como resposta uma variação diferente de um degrau (exponencial), devido à resistência e à capacitância do sistema (figura 10.1). Outros sistemas serão apresentados como exemplo para ilustrar estas características.

Como se observa, a resposta do sistema não é também um degrau, como na entrada, em função da resistência e da capacitância do sistema.

Estas distorções na saída, em relação à entrada do sistema, são, na verdade, devidas aos denominados atrasos (*lags*).

Estes atrasos podem ser de três tipos, ou seja:

- 1) atrasos relativos ao próprio processo;
- 2) atrasos na medição das variáveis do processo;
- 3) atrasos na transmissão dos valores das variáveis medidas.

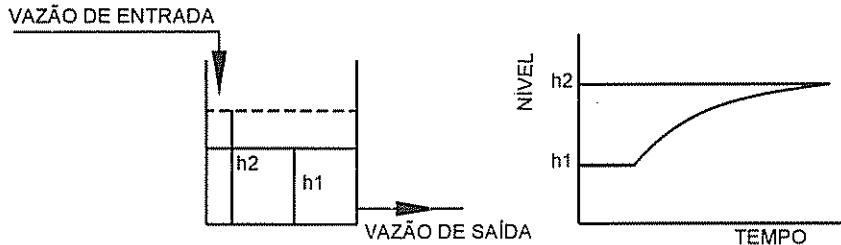


FIGURA 10.1 Resposta do nível de um tanque a uma variação em degrau na vazão de entrada

10.3.1 Atrasos do Processo

Os processos, normalmente, não conseguem absorver ou devolver energia de modo instantâneo, o que provoca um atraso na resposta do sistema a uma dada alteração na entrada.

A figura 10.1 exemplifica este tipo de atraso. Inicialmente, as vazões de entrada e saída são iguais, sendo o nível constante no valor h_1 .

Caso a vazão de entrada aumente, h irá aumentar, até que a pressão da coluna de líquido seja suficiente para aumentar a vazão de saída, a ponto dela se igualar à vazão de entrada, e então estabilizar o nível no valor superior, h_2 .

Um outro exemplo clássico de atraso do processo pode ser ilustrado por um processo de aquecimento, no qual uma variação na vazão de vapor determina uma alteração na temperatura do fluido que está sendo aquecido (figura 10.2).

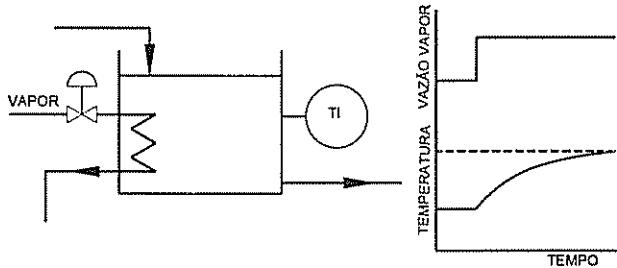


FIGURA 10.2 Resposta da temperatura a uma variação em degrau na vazão de vapor.

Tanto a condução do calor pelas paredes do tubo da serpentina de vapor, como a própria dinâmica de troca térmica pelo volume do líquido no vaso, determinam uma resposta com o perfil mostrado na figura 10.2.

10.3.2 Atrasos na Medição

Em determinados sistemas ocorrem atrasos não só quanto à detecção do valor da variável do processo, como também devido ao armazenamento de energia pelo próprio sistema, como é o caso típico de sistemas de controle de temperatura (num trocador de calor, por exemplo).

Nestes sistemas há sempre um sensor no qual a resposta a uma alteração em degrau na temperatura depende da capacidade térmica do elemento de detecção e da velocidade de transmissão do calor entre o elemento e a superfície de fluido que o circunda. Esta velocidade depende da resistência do elemento à troca térmica e da diferença de temperatura entre o elemento e o fluido de processo.

A capacidade térmica do elemento sensor depende de suas dimensões e do material. A resistência à condução do calor é função do fluido e da sua velocidade. A resistência da camada de fluido ao redor do elemento aumenta com a sua condutividade térmica, calor específico e com a densidade. A figura 10.3 mostra um esquema do sensor e das resistências envolvidas neste processo de detecção de temperatura.

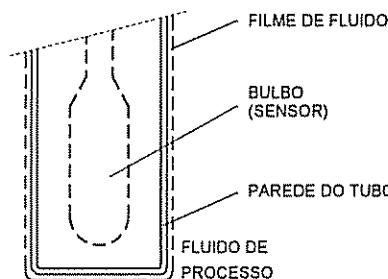


FIGURA 10.3 Bulbo de detecção de temperatura, e as resistências à troca térmica.

A figura 10.4 mostra uma comparação das respostas de um termopar colocado diretamente na corrente de processo, com o mesmo termopar inserido em um poço termométrico de aço inox. Nota-se que o poço de proteção funciona como uma resistência à transferência de calor, retardando a resposta do conjunto de detecção.

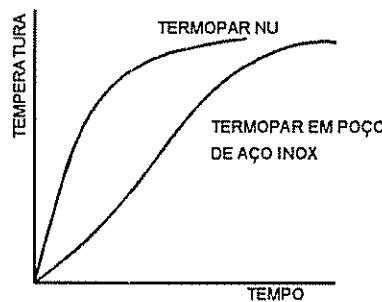


FIGURA 10.4 Resposta de um termopar com e sem poço de proteção.

Para minimizar este tipo de atraso, especialmente presente em sistemas de temperatura, deve-se tomar alguns cuidados na instalação, como, por exemplo, inserção adequada no processo e espessura da parede do poço menor possível.

Além disso, antes de mais nada, deve-se selecionar um sensor que possua a melhor resposta com relação à detecção, o que é conseguido com termopares e termorresistências. Os sistemas térmicos com bulbo e capilar normalmente apresentam maiores atrasos na detecção, em função da maior massa do conjunto (bulbo/fluido de enchimento/capilar).

Outro exemplo comum de atraso na detecção é o denominado atraso distância-velocidade, o qual surge devido à dificuldade de posicionamento do elemento sensor no ponto exato onde a mudança do valor da variável ocorre.

São típicos nos sistemas de medição e controle de temperatura. A figura 10.5 apresenta um sistema de controle no qual o mesmo somente começa a responder após decorrido um certo intervalo de tempo, denominado "tempo morto".

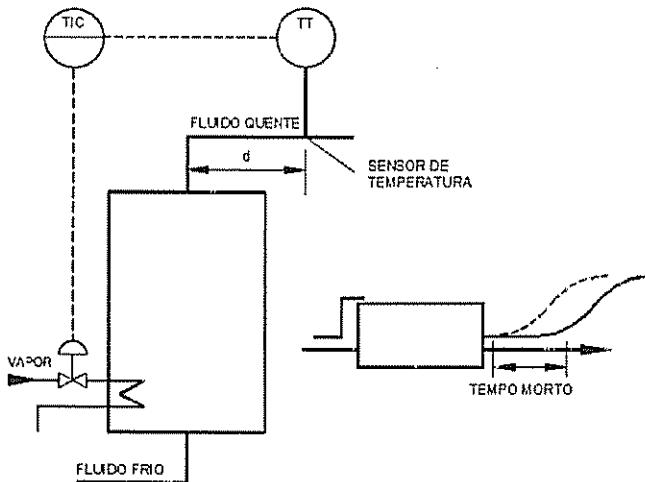


FIGURA 10.5 Sistema de controle de temperatura com tempo morto.

Caso haja um aumento repentino na vazão de vapor (variação em degrau), a temperatura do fluido frio aumenta de acordo com uma dada equação de resposta, dependendo da ordem do sistema. Se o sensor/transmissor de temperatura fosse instalado imediatamente após a saída do trocador de calor, a mudança de temperatura do fluido que circula pelo trocador seria detectada instantaneamente. Como o transmissor foi instalado a uma certa distância "d" com relação à saída do trocador, o início da detecção sofreu um certo atraso, denominado de tempo morto.

Ainda sobre os atrasos na medição das variáveis de processo, podemos observar que as variáveis como vazão, pressão e nível possuem respostas rápidas, com algumas poucas exceções discutidas no estudo específico sobre cada uma.

Algumas medições analíticas, como os cromatógrafos, por exemplo, possuem respostas lentas, e alguns cuidados com relação à instalação devem ser tomados.

10.3.3 Atrasos na Transmissão

Além dos atrasos já analisados devemos considerar, também, os atrasos na transmissão dos valores das variáveis medidas, próprios dos sistemas de transmissão pneumáticos.

Os sistemas eletrônicos praticamente não introduzem atrasos nos sistemas de controle, sendo desprezíveis na maioria das aplicações.

Atualmente, poucos são os sistemas pneumáticos utilizados em aplicações de controle de processos; entretanto, em alguns sistemas existentes, ou mesmo em comandos de válvulas de controle (abordado no item 10.9), os atrasos têm de ser considerados, uma vez que podem influir no comportamento da malha de controle.

Os trechos de comandos pneumáticos utilizados atualmente são pequenos, uma vez que os sinais provenientes dos controladores são eletrônicos, e a conversão para pneumático se dá bem próxima à válvula de controle, seja por meio de conversores I/P ou através de posicionadores eletropneumáticos.

Entretanto, se, por qualquer motivo, alguma aplicação determinar o percurso dos sinal pneumáticos por trechos mais longos (digamos 100 m), algumas precauções devem ser tomadas quanto à especificação do melhor sistema de transmissão para diminuir os efeitos dos atrasos na transmissão.

Normalmente as medidas corretivas tomadas são:

- utilização de tubos de transmissão com maiores diâmetros;
- instalação de reforçadores de sinal (*boosters*) para diminuir o tempo de resposta;
- em caso de sistemas pneumáticos e onde são requeridas respostas muito rápidas, procura-se instalar o controlador o mais próximo possível da válvula de controle, e também do transmissor (eventualmente controlador local).

Um resumo dos três tipos de atrasos aqui abordados pode ser ilustrado no sistema de controle da figura 10.6.

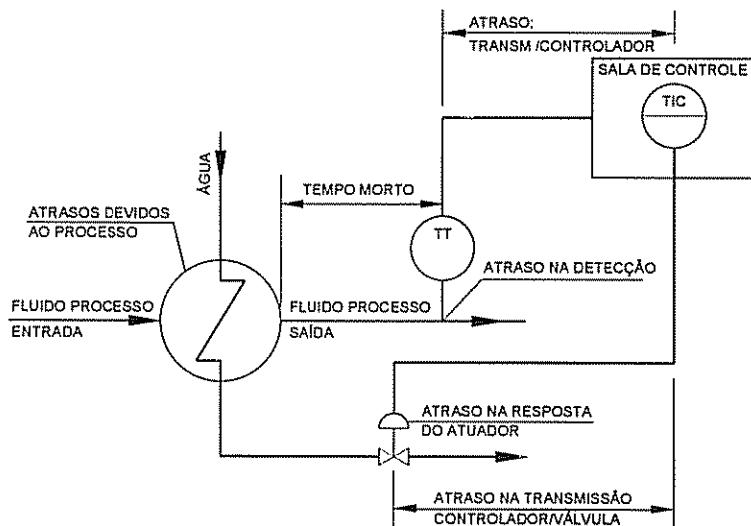


FIGURA 10.6 Trocador de calor - atrasos na detecção, na transmissão e tempo morto.

Na realidade, o controlador, como comandante da malha de controle, deverá se encarregar de compensar estes problemas que, normalmente, influem no comportamento da resposta do sistema de controle, o que na verdade se constitui no segredo de todo o controle de processo, garantindo uma boa sintonia do sistema de controle com o processo em si.

10.4 DEFINIÇÕES BÁSICAS: CONTROLE MANUAL, CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO (*FEEDBACK*), CONTROLE POR ANTECIPAÇÃO (*FEED-FORWARD*), GANHO E ATRASO

Os conceitos básicos necessários para o entendimento do controle de processos já foram tratados no capítulo 1.

Um estudo detalhado da teoria de controle exige a aplicação de ferramentas matemáticas que possibilitam estabelecer um modelo para cada processo. A análise da resposta dos sistemas a determinadas excitações conduz normalmente à resolução de equações diferenciais de primeira ordem ou de ordem superior, dependendo da classificação do sistema.

Este livro, porém, se propõe a uma análise intuitiva do controle de processos que proporcione uma base que possibilite um estudo mais detalhado, caso necessário.

Três termos são fundamentais, os quais estão ligados a qualquer processo:

- 1) **variável controlada** – é a condição que se deseja manter em determinado nível, ou seja, a variável envolvida no processo tal como nível, vazão, pressão, temperatura etc.;
- 2) **valor desejado (*set point*)** – é o valor de referência para cada variável, que se deseja manter;
- 3) **variável manipulada** – é normalmente a vazão de um fluido cuja alteração influencia a variável controlada. Em controles simples, em geral, para cada variável controlada existe uma variável manipulada. Em malhas complexas, entretanto, pode-se ter mais variáveis controladas do que manipuladas.

Além disso, há os distúrbios que tendem a afastar as variáveis controladas do valor desejado. Assim, a função do sistema de controle é ajustar a variável manipulada, de forma a manter a variável controlada no valor desejado, apesar da existência de eventuais distúrbios.

10.4.1 Controle Manual Típico

Abordado no capítulo 1 deste livro, o controle manual, efetuado pelo operador humano, aparece na figura 1.3.

10.4.2 Controle por Realimentação (*Feedback*)

O controle por realimentação utiliza o desvio do valor da variável controlada em relação ao valor desejado (erro) para efetuar a ação corretiva.

Sensores são instalados para medir as variáveis controladas. Estes valores são transmitidos ao *hardware* de controle, que efetua a comparação automática com os valores desejados e calcula, com base no erro, os valores dos sinais que devem ser enviados para ajustarem as variáveis manipuladas, e, consequentemente, a ação dos elementos finais de controle (normalmente válvulas de controle com atuadores pneumáticos).

O ponto forte do controle por realimentação é que não se necessita conhecer antecipadamente os distúrbios que afetam o processo, e também não se estabelecem as relações entre os distúrbios e seus efeitos sobre o processo.

Seja o processo da figura 10.7 a seguir.

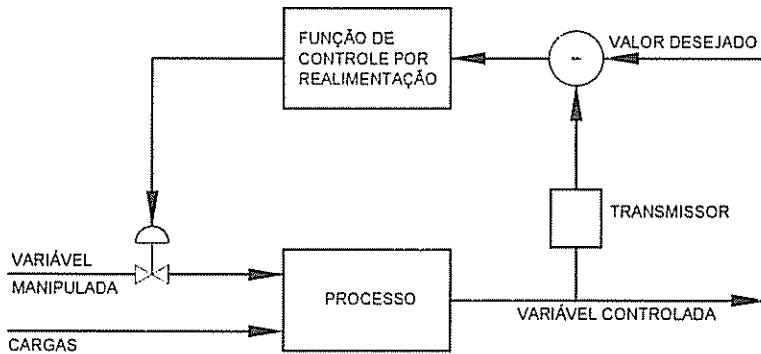


FIGURA 10.7 Controle por realimentação.

O controle por realimentação é o mais comum e o mais utilizado na prática. Sua estrutura aparece na própria figura anterior em forma de diagrama de blocos.

Um transmissor gera continuamente um sinal que representa o valor da variável de processo na saída do mesmo, e este sinal é subtraído do valor desejado (trata-se de uma comparação entre o valor da variável de processo e o valor desejado). Se estes valores forem iguais, a posição da válvula não se altera, havendo um equilíbrio, de modo que a variável se mantém no valor desejado.

Porém, se o valor medido for diferente do valor desejado, o controlador altera sua saída de modo a alterar o valor da variável manipulada (através da válvula de controle), de forma a eliminar o erro. Assim, o controlador resolve o problema de controle na base da tentativa e erros, só tomando a ação corretiva quando um erro for detectado.

10.4.3 Controle por Antecipação (*Feedforward*)

Enquanto o controle por realimentação responde ao efeito de um distúrbio, o controle por antecipação responde diretamente aos distúrbios, proporcionando um controle, como o próprio nome sugere, antecipado. O diagrama de blocos da figura 10.8, ilustra o conceito deste tipo de controle.

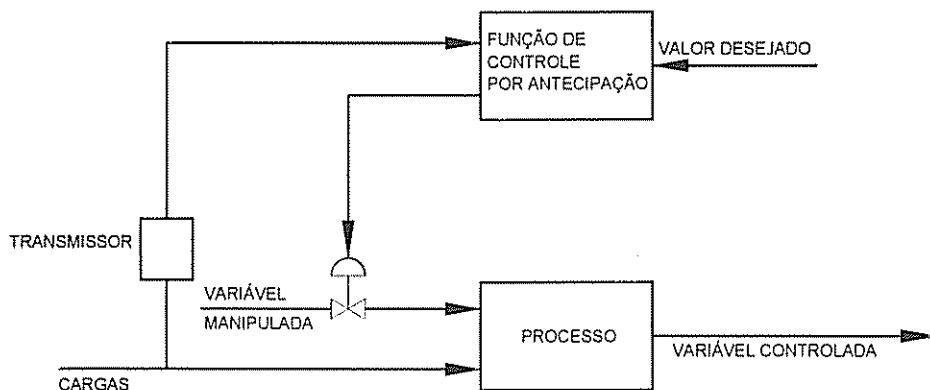


FIGURA 10.8 Sistema de controle por antecipação - diagrama de blocos.

Os transmissores medem os valores dos distúrbios e o controlador calcula o sinal de correção em função das cargas e do valor desejado. Assim, alterações nas condições de entrada do processo causam alteração no sinal de controle antes que haja mudança na variável controlada.

Em geral, esta técnica é mais complexa e mais cara do que a anterior. Requer maior conhecimento sobre o processo, sendo reservada para aplicações mais críticas. Além disso, caso haja qualquer desvio da variável controlada em relação ao valor desejado, o sistema não proporciona correção.

Na prática, o controle por antecipação raramente é utilizado sozinho, e sim, em conjunto com o controle por realimentação.

Apresentamos, na figura 10.9, um exemplo de processo com controle por antecipação.

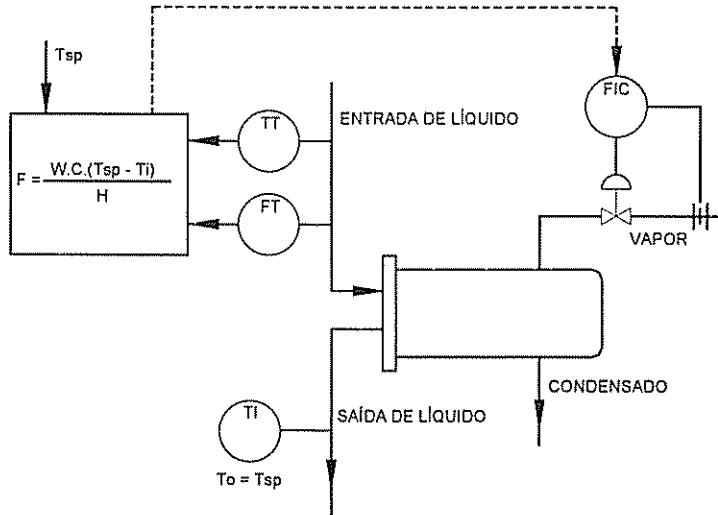


FIGURA 10.9 Controle por antecipação: trocador de calor.

Neste trocador de calor, o líquido é aquecido pelo vapor. A variável controlada é a temperatura na saída do trocador. A variável manipulada é a vazão de vapor que, neste caso, está sendo controlada.

Basicamente, este controle é necessário para calcular o valor desejado da vazão de vapor, de modo a manter a temperatura na saída. Os distúrbios mais significativos neste processo são a temperatura de entrada de líquido e a vazão deste pelo trocador.

Um balanço de energia no estado estacionário, conduz a:

$$W \cdot C \cdot (T_o - T_i) = F \cdot H,$$

onde:

W = vazão de líquido, kg/h;

C = calor específico do líquido, Kcal/kg °C;

T_i = temperatura de entrada, °C;

T_o = temperatura de saída, °C;

F = vazão de vapor, kg/h;

H = calor latente do vapor, Kcal/kg.

A equação acima pode ser resolvida como:

$$F = \frac{W \cdot C \cdot (T_o - T_i)}{H}$$

Se T_o for a temperatura desejada (T_{sp}), então:

$$F = \frac{W \cdot C \cdot (T_{sp} - T_i)}{H}$$

T_i e W são medidos e enviados ao controlador. Os valores de C e H são conhecidos e devem ser informados pelo operador. Com estes valores e o valor de referência T_{sp} , pode-se calcular a vazão F de vapor que mantém a temperatura na saída em T_s .

Este controle requer bastante conhecimento sobre o processo, contrariamente ao controle por realimentação, que aplica os algoritmos P, I, D que estudaremos mais adiante.

10.4.4 Ganho e Atraso

Alguns componentes de uma malha de controle têm comportamento que independe do tempo, ou seja, respondem instantaneamente a uma variação na entrada, sem alterar o perfil da variação na saída.

O diagrama da figura 10.10, mostra que uma variação em degrau na entrada produz uma saída também em degrau, multiplicada por uma constante (K).

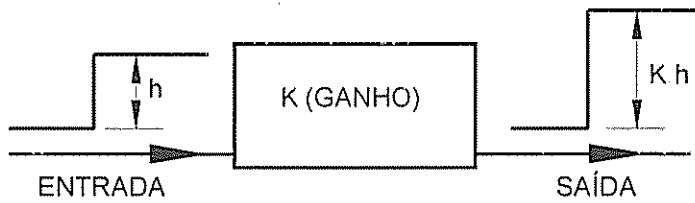


FIGURA 10.10 Ganho ou sensibilidade de um componente numa malha de controle.

Esta constante de proporcionalidade, denominada ganho, é a relação entre a entrada e a saída e traduz a sensibilidade do componente. Mais precisamente, traduz a capacidade de resposta do elemento a uma variação na entrada.

Entretanto, o que realmente ocorre é que os componentes de uma malha de controle apresentam características dinâmicas. A saída sofre uma defasagem em relação à entrada, sendo dependente do tempo, caracterizando um atraso.

Este comportamento é característico não só do processo, como também dos sensores e da válvula de controle.

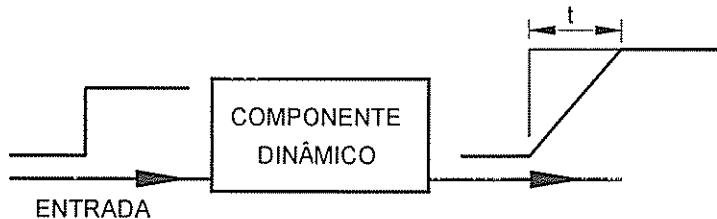


FIGURA 10.11 Atraso: característica dos componentes dinâmicos de uma malha de controle.

Devido ao atraso, os componentes de uma malha de controle, na prática, não respondem instantaneamente a variações na entrada, produzindo uma resposta somente após decorrido um dado intervalo de tempo (t).

10.5 SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM: FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Conforme mencionado anteriormente, o estudo do controle de processos requer, para uma melhor compreensão, algumas ferramentas matemáticas que permitam desenvolver funções de transferência, a partir das quais analisam-se as respostas dos sistemas às perturbações ou excitações mais comuns em controle, que são as perturbações em "degrau" e as perturbações do tipo senoidal, esta última utilizada no estudo da resposta em frequência.

Entretanto, apesar de estarmos conduzindo este estudo de forma intuitiva, será estabelecida a equação de um sistema de primeira ordem, e estudado como o mesmo responde aos dois tipos de perturbação mencionados, partindo-se para a análise gráfica

da equação de resposta. Algumas definições e conclusões importantes serão extraídas desta análise.

Os sistemas ditos de primeira ordem são representados por uma equação diferencial de primeira ordem; para analisar a resposta com relação a uma mudança na entrada, necessita-se resolver a equação diferencial que representa o sistema.

A resolução destas equações pode ser feita pelo método clássico ou utilizando-se o método das Transformadas de Laplace, que conduz a soluções muito mais rápidas, principalmente com relação às equações utilizadas em controle de processos. Será mencionado apenas o encaminhamento da solução de cada expressão resultante e analisados os resultados.

As perturbações mais comuns no estudo do controle de processos são:

10.5.1 Perturbação em Degrau

É representada pela expressão $x(t) = A \cdot U(t)$, onde $U(t)$ é o degrau unitário. A figura 10.12, a seguir, mostra a representação gráfica.

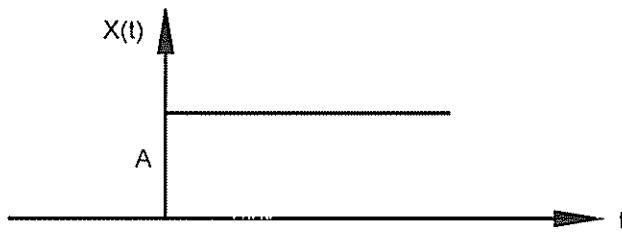


FIGURA 10.12 Perturbação em degrau.

$$x = 0, t < 0;$$

$$x = A, t \geq 0$$

A Transformada de Laplace (no domínio s) é:

$$X(s) = A/s$$

10.5.2 Perturbação Senoidal

É representada pela equação $x(t) = A \cdot \sin w \cdot t, t \geq 0$, onde:

A = amplitude;

w = freqüência em radianos ($w = 2 \cdot \pi \cdot f$).

A transformada de Laplace é:

$$X(s) = \frac{A \cdot w}{s^2 + w^2}$$

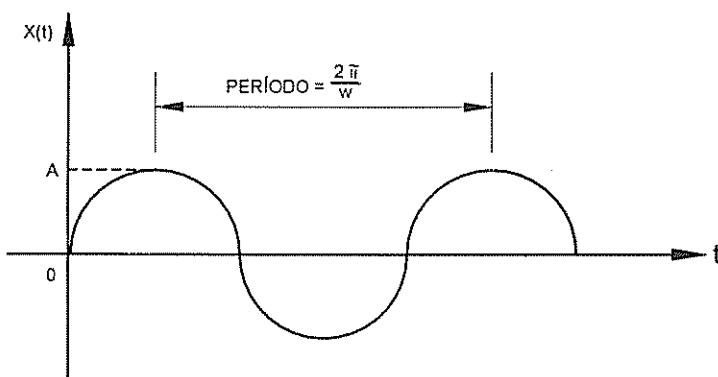


FIGURA 10.13 Perturbação senoidal.

Consideremos um termômetro de mercúrio, para analisar o seu comportamento transitório: a figura 10.14, a seguir, apresenta este termômetro em corte, de modo a ilustrar as resistências envolvidas na transferência de calor entre o processo e o mercúrio no interior do termômetro.

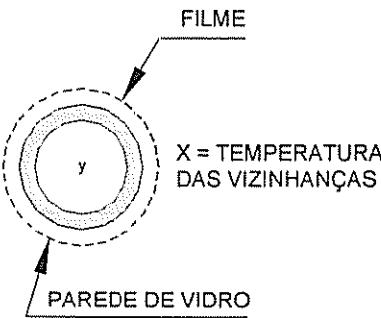


FIGURA 10.14 Termômetro de mercúrio.

Consideremos que o termômetro seja locado numa corrente de fluido cuja temperatura "x" varia com o tempo.

O problema é calcular como varia a leitura do termômetro "y", para uma dada variação em "x".

Sejam as hipóteses:

- 1) a resistência à troca de calor oferecida pela espessura da parede do vidro do termômetro é desprezível;
- 2) toda a capacidade térmica está no mercúrio, que assume uma temperatura uniforme;
- 3) a parede de vidro do termômetro não sofre nenhuma deformação com a temperatura.

Inicialmente o termômetro se encontra no estado estacionário. No instante $t = 0$, o termômetro será submetido a uma variação de temperatura $x(t)$.

No estado transitório: entrada – saída = acumulação

$$h \cdot A \cdot (x - y) - 0 = m \cdot C \cdot dy/dt \quad (10.1)$$

onde:

A = área da superfície do bulbo (m^2);

C = capacidade térmica do mercúrio (Kcal/kg $^{\circ}\text{C}$);

m = massa do mercúrio (kg);

t = tempo (h);

h = coeficiente de transferência do filme (Kcal/h $\cdot m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$).

O calor que é transferido para o mercúrio faz com que este suba através do bulbo, registrando a temperatura correspondente.

A equação 10.1 é uma equação diferencial de primeira ordem. Para o estado estacionário, ela pode ser escrita como:

$$h \cdot A \cdot (x_s - y_s) = 0, t < 0 \quad (10.2)$$

Esta equação nos diz que, no estado estacionário, $y = x$, isto é, a temperatura lida no termômetro é a mesma do banho ou das vizinhanças.

Fazendo-se equação 10.1 – equação 10.2:

$$h \cdot A \cdot [(x - x_s) - (y - y_s)] = m \cdot C \cdot d(y - y_s)/dt, \quad (10.3)$$

$d(y - y_s)/dt = dy/dt$, pois y_s é constante.

Sendo: $X = x - x_s$

$Y = y - y_s$, temos:

$$h \cdot A \cdot (X - Y) = m \cdot C \cdot dY/dt \quad (10.4)$$

Fazendo-se $m \cdot C/h \cdot A = \tau$

$$X - Y = \tau \cdot dy/dt \quad (10.5)$$

Aplicando-se Laplace aos dois termos da equação, obtém-se a chamada Função de Transferência do sistema em análise, no chamado domínio "s".

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1} \quad (10.6)$$

τ é a constante de tempo do sistema;

$1/\tau \cdot s + 1$ é a Função de transferência.

Para qualquer sistema que se analise em controle, objetiva-se obter a função de transferência.

Um sistema é dito de primeira ordem quando a relação entre as transformadas de Laplace da saída e da entrada têm a forma apresentada na equação 10.6.

Em geral, a função de transferência, $G(s)$, relaciona num processo causa e efeito:

$$G(s) = Y(s)/X(s).$$

A figura 10.15 apresenta um bloco representando a função de transferência

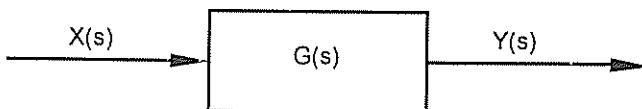


FIGURA 10.15 Função de transferência.

Uma vez estabelecida a função de transferência de um sistema de primeira ordem, pode-se facilmente obter a resposta transiente a qualquer perturbação na entrada.

10.6 RESPOSTA DE UM SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM A UMA PERTURBAÇÃO DEGRAU E SENOIDAL: CONSTANTE DE TEMPO, DEFASAGEM

Será abordado, nesta etapa, como respondem os sistemas de primeira ordem às perturbações mais comuns em controle de processos para delas obter algumas particularidades importantes.

10.6.1 Resposta a um Degrau

Se um degrau de amplitude "A" for introduzido num sistema de primeira ordem:

$$X(s) = A / s$$

$$\text{Como: } \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1}$$

$$\text{Então: } Y(s) = A / s \cdot \frac{1}{\tau \cdot s + 1}$$

Resolvendo-se esta equação por expansão em frações parciais, obtém-se a solução em "t":

$$Y(t) = 0, t < 0$$

$$Y(t) = A \cdot (1 - e^{-t/\tau}), t \geq 0.$$

Graficamente, a resposta é apresentada como na figura 10.16.

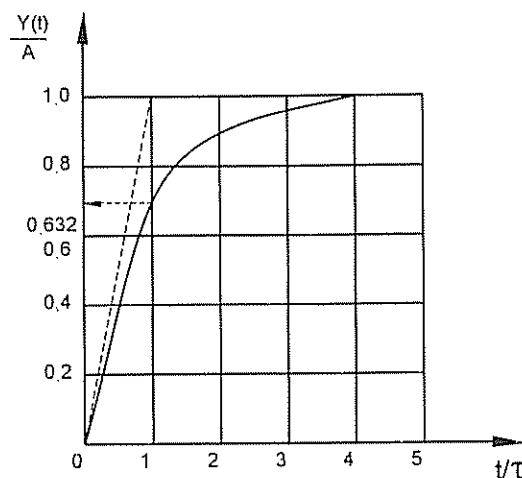


FIGURA 10.16 Resposta de um sistema de primeira ordem a uma perturbação em degrau na entrada.

Algumas características desta resposta devem ser mencionadas:

- 1) o valor de $Y(t)$ atinge 63,2% do valor final, quando $t = \tau$, isto é, após decorrido um tempo igual a uma constante de tempo. Considera-se que a resposta se completa após quatro ou cinco constantes de tempo;
- 2) a inclinação da curva no ponto inicial é igual a 1. Assim, se a velocidade inicial de mudança em $Y(t)$ fosse mantida, a resposta seria completada após decorrido um tempo igual a uma constante de tempo.

10.6.2 Resposta a uma Senóide

Consideremos, novamente, o exemplo do termômetro de mercúrio.

Considere-o em equilíbrio num banho a uma temperatura "xs". No instante $t = 0$, a temperatura do banho começa a variar, de acordo com a seguinte equação:

$$x = xs + A \cdot \sin wt, \quad t > 0,$$

onde:

x = temperatura do banho;

xs = temperatura do banho antes do distúrbio;

A = amplitude de variação de temperatura;

w = frequência, rad/tempo.

X = $x - xs$

$X = A \cdot \sin wt$, e a Transformada de Laplace anteriormente estabelecida é

$$X(s) = \frac{A \cdot w}{s^2 + w^2}$$

Como: $\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1}$

Então: $Y(s) = \frac{A \cdot w}{s^2 + w^2} \cdot \frac{1}{\tau \cdot s + 1}$

Resolvendo-se esta equação obtém-se, no domínio t, a seguinte resposta:

$$Y(t) = \frac{A \cdot w \cdot r}{\tau^2 w^2 + 1} \cdot e^{-t/\tau} + \frac{A}{\sqrt{\tau^2 w^2 + 1}} \cdot \sin(wt + \theta)$$

onde: $\theta = \tan(-w \cdot \tau)$.

Quando $t = \infty$, $Y(t) = \frac{A}{\sqrt{\tau^2 w^2 + 1}} \cdot \sin(wt + \theta)$

Esta é a resposta no estado estacionário, que, comparada com a perturbação senoidal na entrada, leva às seguintes conclusões:

- 1) a resposta é uma senóide com frequência "w" igual à da perturbação de entrada;
- 2) a relação de amplitudes entre a saída e a entrada é $\frac{1}{\sqrt{\tau^2 w^2 + 1}}$ ou seja, sempre menor que 1. Isto significa que a resposta é amortecida;
- 3) a saída se apresenta defasada, em relação à entrada, de um valor θ . Como $\theta < 0$, há um atraso da resposta em relação à entrada.

A figura 10.17 ilustra a resposta em questão.

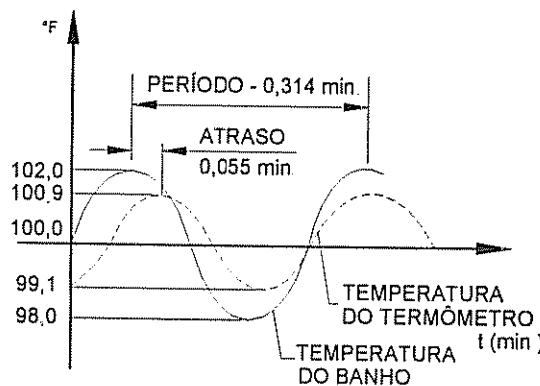


FIGURA 10.17 Resposta de uma sistema de primeira ordem a uma perturbação senoidal.

Esta figura exemplifica a resposta ilustrada com valores de temperatura e o valor da defasagem da resposta em minutos.

Observa-se, no exemplo, que a amplitude da perturbação é de 4 °C, e que a amplitude da resposta é de 1,8 °C.

A defasagem, por sua vez, é de 0,055 min.

10.7 EXEMPLOS FÍSICOS DE SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM: RESISTÊNCIA, CAPACITÂNCIA

Após a caracterização de um sistema de primeira ordem, e como ele responde a uma perturbação do tipo degrau e senoidal, é oportuno apresentar alguns exemplos físicos de sistemas de primeira ordem, e conceituar dois parâmetros muito importantes em controle, que são resistência e capacidade.

Serão considerados dois sistemas: nível de líquido e o circuito RC.

O sistema de primeira ordem mais comum é o nível de líquido, apresentado na figura 10.18.

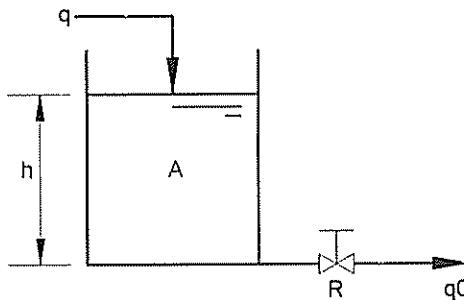


FIGURA 10.18 Nível de líquido.

Como se trata de um sistema de primeira ordem, o gráfico da resposta tem o perfil já apresentado na figura 10.16.

A vazão através da resistência R relaciona-se com h, por:

$$q = h/R$$

Como em toda análise, vamos determinar a função de transferência que relaciona a altura de líquido com a vazão (saída com a entrada).

Sabe-se que massa que entra – massa que sai = massa que acumula.

Sendo ρ a densidade absoluta, e A a área da seção transversal do tanque:

$$\rho \cdot q(t) - \rho \cdot q_0(t) = d(\rho \cdot A \cdot h)/dt$$

$$q(t) - q_0(t) = A \cdot dh/dt$$

$$q - h/R = A \cdot dh/dt$$

No estado estacionário, $q_s = h_s/R$.

Considerando-se o desvio em relação ao estado estacionário e fazendo $q - q_s = Q$ e $h - h_s = H$, chega-se à equação:

$$Q = 1/R \cdot H + A \cdot dH/dt.$$

Aplicando-se a transformada de Laplace chega-se à função de transferência da forma já apresentada anteriormente, ou seja :

$$H(s)/Q(s) = R \cdot \frac{1}{\tau \cdot s + 1}, \text{ sendo } \tau = A \cdot R.$$

Círcuito RC: seja o circuito da figura 10.19.

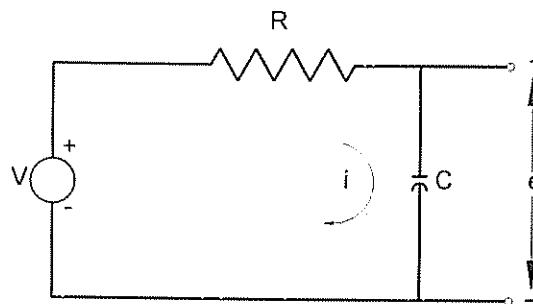


FIGURA 10.19 Circuito elétrico com resistência e capacidade em série.

Inicialmente, não há tensão aplicada ao circuito, ou melhor, a tensão no estado estacionário é v_s e a tensão no capacitor é e_s .

Se, subitamente (como um degrau), for acionada uma chave que possibilite a energização imediata do circuito, o capacitor irá acumular cargas elétricas e a tensão através dele (e) irá aumentar, de acordo com uma curva cujo perfil é também equivalente ao da figura 10.16.

Tal comportamento deve-se ao fato de que este circuito tem resposta, $e(t)$ de primeira ordem com relação a uma perturbação degrau na entrada, $v(t)$.

A função de transferência de primeira ordem deste circuito RC é:

$$E(s)/V(s) = \frac{1}{\tau \cdot s + 1}, \text{ sendo } \tau = R \cdot C.$$

Reportando-se aos três exemplos abordados anteriormente, estabelece-se um pequeno resumo:

- para o termômetro de mercúrio: $\tau = m \cdot C / h \cdot A$;
- para o nível de líquido: $\tau = A \cdot R$;
- para o circuito RC: $\tau = R \cdot C$.

Nos três casos, a constante de tempo τ é o produto da resistência pela capacitância.

A capacidade é definida como a variação na grandeza armazenada por unidade de potencial.

A resistência é a relação entre a força motriz e o fluxo.

10.8 SISTEMAS DE ORDEM SUPERIOR: TEMPO MORTO, SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM EM SÉRIE

Todos os exemplos apresentados são lineares. Entretanto, a maioria dos sistemas físicos de importância prática são **não lineares**.

A caracterização de um sistema dinâmico por uma função de transferência só pode ser feita para sistemas lineares, ou seja, aqueles descritos por equações diferenciais lineares.

A conveniência de se utilizar funções de transferência para análise dinâmica é que justifica a aproximação ou linearização das equações. Tendo em vista que uma variável tem que ser mantida muito próxima ao valor desejado através do controlador, os desvios são normalmente muito pequenos. Assim, a linearização é válida, e só em sistemas complexos é que se utilizam métodos de análise não lineares.

Obviamente, nem todos os processos podem ser caracterizados como sendo de primeira ordem.

É muito frequente encontrar situações nas quais uma perturbação em degrau na entrada produz uma resposta conforme apresentada na figura 10.20:

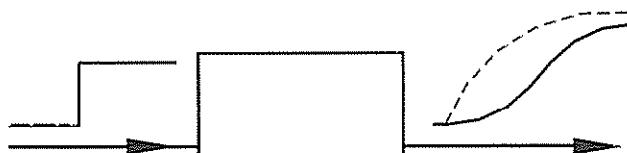


FIGURA 10.20 Resposta de sistemas de ordem superior.

Em comparação com a curva tracejada (sistema de primeira ordem), observa-se que a máxima velocidade de resposta da curva de saída não ocorre no instante em que ocorreu a mudança na entrada do processo e, sim, num instante posterior, o que é característico de um sistema de ordem superior. Tais sistemas podem ser o resultado de diversas situações. Uma das formas mais comuns são os sistemas de primeira ordem em série.

Os sistemas de primeira ordem podem ser associados em série de forma independente ou interativa. A figura 10.21 ilustra as formas de associação:

Cada tanque, separadamente, representa um sistema de primeira ordem. Mas, de acordo com o arranjo, a associação conduz a respostas diferentes.

No primeiro caso, a altura de líquido do segundo tanque não influencia a vazão de saída do primeiro. No segundo caso, entretanto, há esta influência. Quando existe a interação, a resposta resultante será mais suave.

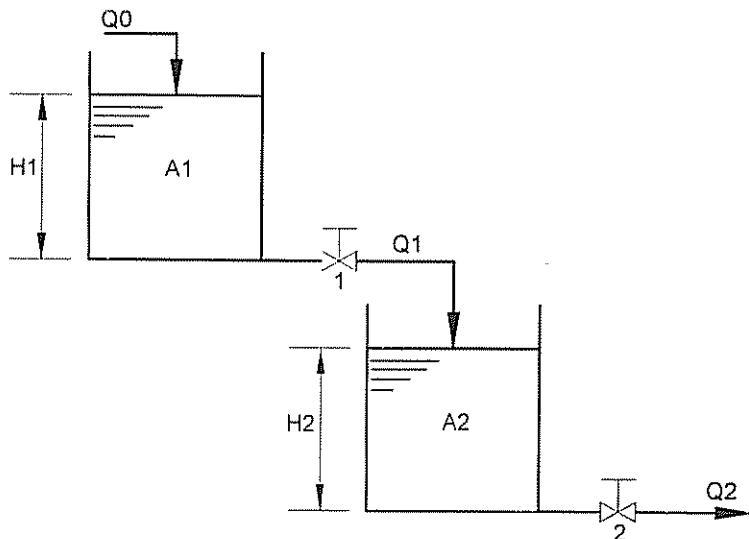


FIGURA 10.21a Sistemas de primeira ordem em série (sem interação).

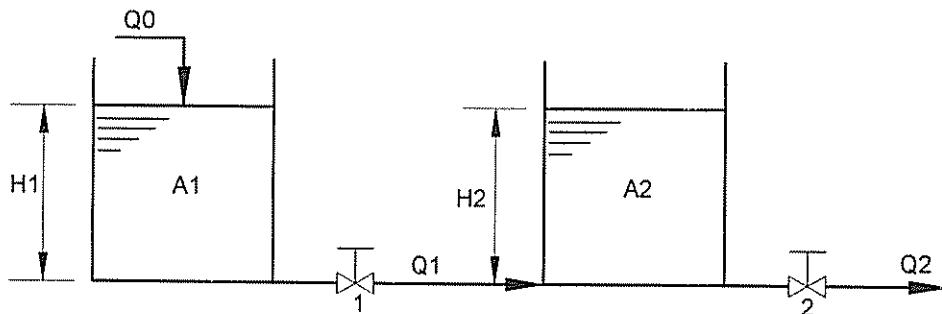


FIGURA 10.21b Sistemas de primeira ordem em série (com interação).

Esta característica é de especial importância em sistemas térmicos, como pode ser visto na figura 10.22.

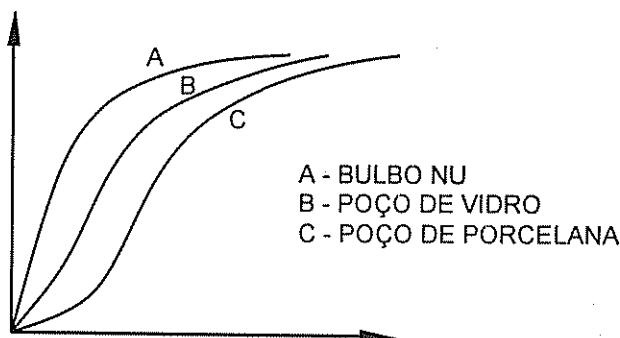


FIGURA 10.22 Resposta de sistemas térmicos, de acordo com a proteção do elemento sensor.

Nos sistemas de ordem superior, a máxima velocidade de resposta não ocorre na origem, e sim num instante posterior. A resposta em forma de "S" se deve à interposição de atrasos no processo, o que dificulta o controle.

Em dinâmica de processos é muito comum o termo "tempo morto", que é normalmente o tempo necessário para um material se deslocar de um local para outro, associado à velocidade com que um fluido percorre um trecho de tubulação, por exemplo, e com a distância em que se efetua a medição de uma temperatura, digamos.

É chamado, também, de atraso de transporte e, normalmente, difícil de controlar.

O tempo morto pode ser definido como o tempo decorrido após a ocorrência de um distúrbio no processo, até que seja notada uma mudança na saída deste processo.

Reportando-se à figura 10.6, nota-se que o sensor/transmissor de temperatura (TT) foi instalado a uma certa distância da saída do trocador (por exemplo, por algum impedimento mecânico). Esta distância causa um certo retardamento na detecção da temperatura, o que somente ocorrerá após um determinado intervalo de tempo (tempo morto). A dificuldade em se controlar o tempo morto é que durante este tempo o sistema não apresenta resposta, não havendo, com isso, informações para se tomar alguma ação corretiva.

Assim, por ocasião do projeto de instalação deve-se observar estes detalhes, para diminuir os problemas de ajustes dos sistemas de controle e facilitar a manutenção da variável no valor desejado.

10.9 OS COMPONENTES DE UM SISTEMA DE CONTROLE

10.9.1 Sensor/Transmissor e Controlador

No capítulo 1 foi abordada a forma segundo a qual se processa o controle de uma variável através de uma malha fechada.

Um sensor detecta o valor da variável de processo, o qual é enviado ao controlador, através do transmissor.

Os detalhes sobre os principais sensores disponíveis, bem como os transmissores das diferentes variáveis de processo, podem ser examinados nos respectivos capítulos deste livro.

A malha de controle tem no controlador o seu elemento principal, no que se refere às tomadas de decisão para corrigir o valor da variável controlada (desvio zero em relação ao valor desejado). Ele recebe, continuamente, o valor da variável do processo, compara com o valor desejado e envia um sinal para a válvula de controle se posicionar de tal modo que mantenha o erro no valor zero.

A forma com que o controlador envia sua saída para o elemento final é função da ação de controle, o que será estudado adiante.

Com relação à dinâmica do sistema de medição, existem sistemas lentos e sistemas que respondem de forma rápida. Esta dinâmica, que é determinada principalmente pelo sensor, pode ser também função do ponto onde está localizada a tomada de processo.

Analizando-se as principais variáveis, têm-se as seguintes considerações:

- **vazão** – a dinâmica é muito rápida, sendo pequenos o tempo morto e a constante de tempo. Existe o problema de influência da turbulência do fluxo no sinal transmitido, o que muitas vezes exige uma filtragem, introduzindo-se um atraso na intensidade adequada;
- **pressão e nível** – como a vazão, são também variáveis rápidas;
- **temperatura** – a detecção de temperatura pode ser relativamente rápida, caso o sensor (termopar, termorresistência, termistor) seja introduzido diretamente no processo. Entretanto, os termoelementos são instalados normalmente dentro de poços de proteção metálicos com a finalidade de proteger o sensor. Isto, na verdade, provoca um atraso na medição, exigindo ações compensatórias por parte do controlador;
- **medidas analíticas** – os analisadores, normalmente, são problemáticos no que se refere aos sistemas de amostragem (responsáveis pelo condicionamento da amostra para poder efetuar a medição de forma conveniente), os quais devem ser cuidadosamente previstos, de modo a diminuir os atrasos na resposta do sistema de análise.

De um modo geral, os problemas com os atrasos e tempos mortos são contornados pelas ações de controle, o que nem sempre garante uma resposta adequada em relação ao real valor da variável controlada. Muitas vezes os sistemas de controle não conseguem fazer com que as variações do processo sejam acompanhadas.

É importante que se tenha sempre em mente que o sistema de medição e o processo em si têm uma ligação dinâmica, sendo que o controlador, quando instalado na malha de controle, é responsável por oferecer sintonia à malha, de modo a manter o processo estável.

A figura 10.23 apresenta um controlador na sua forma convencional, isto é, da forma como o operador sempre esteve acostumado a operar.

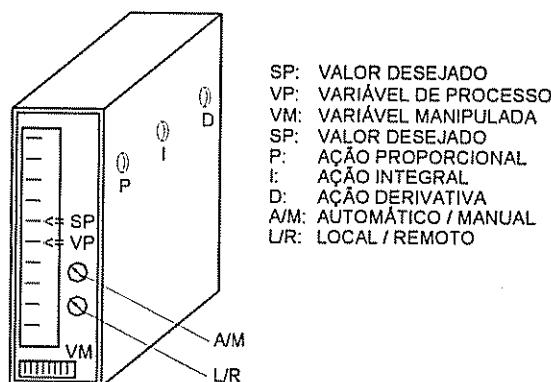


FIGURA 10.23 - Controlador.

Esta última observação é importante nos dias atuais, uma vez que as funções de controle nos sistemas digitais são "configuradas" e então disponíveis ao operador.

Devemos observar as seguintes características básicas num controlador:

- a) escala indicadora da variável do processo, que permite também monitorar o valor desejado. Os dois valores devem coincidir, caso a variável esteja sob controle, ou seja, erro zero;
- b) escala indicadora do sinal de saída para o elemento final de controle, normalmente graduada em 0-100%. É importante para monitorar a abertura do elemento final (válvula de controle);
- c) ajustes frontais de:
 - valor desejado;
 - chave local-remoto, que permite a operação do controlador com ajuste manual do valor desejado, ou ajuste deste último parâmetro de forma remota (automática), sem ação direta do operador. Este modo é normalmente utilizado no controle em cascata (será abordado mais adiante);
 - chave auto-manual, possibilitando operar o controlador tanto em malha fechada como em malha aberta. Esta forma de atuação permite a interferência na ação de controle, executando-a de forma manual, uma vez que o operador pode abrir ou fechar diretamente o elemento final de controle;
- d) ajustes internos à caixa do controlador, dos parâmetros de ajuste, quais sejam:
 - ganho ou Banda Proporcional (K_c ou BP);
 - tempo integral (T_i);
 - tempo derivativo (T_d).

Desde que estes parâmetros sejam ajustados de forma conveniente, é de se esperar, se todos os demais elementos da malha estiverem corretamente escolhidos, que o controlador esteja em "sintonia" com o processo.

10.9.2 Elementos Finais de Controle

Como o próprio nome sugere, o elemento final de controle é o último elemento de uma malha de controle a ser analisado; nem por isso, entretanto, é menos importante do que os outros.

Tal é a sua importância que a análise da malha de controle é sempre iniciada pelo elemento final que, via de regra, é uma válvula de controle.

A função básica de uma válvula de controle é manipular uma vazão de fluido, que influí de maneira direta ou indireta sobre a variável de processo, com a finalidade de mantê-la no valor desejado.

No controle do nível de líquido, por exemplo, a válvula pode manipular a vazão de entrada ou de saída, com a finalidade de manter o nível num dado valor.

Assim, cada valor do sinal de saída do controlador determina uma posição da haste, uma dada abertura da válvula e uma determinada vazão através da mesma. No estado estacionário todos estes valores permanecem invariáveis e a variável de processo está no valor desejado. Qualquer perturbação na entrada do processo provoca uma reação do sistema de controle, no sentido de corrigir o erro decorrente.

A válvula é a responsável por ajustar a vazão correta, de tal modo que isto seja possível.

Para ilustrar o conceito de ganho, a válvula de controle consiste num bom exemplo. O ganho pode ser expresso de duas formas:

- 1) relação entre a vazão e a abertura correspondente, o que determina a chamada curva característica da válvula, tal como ilustra a figura 10.24;
- 2) relação entre a vazão através da válvula e a pressão que incide no atuador da válvula.

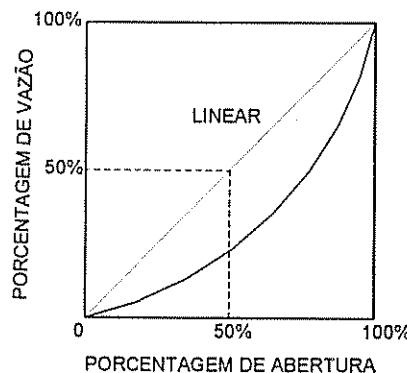


FIGURA 10.24 Característica de vazão de uma válvula de controle.

Como exemplo, seja uma válvula que opere como ar para abrir (falha de ar fecha) e permita passar $100 \text{ m}^3/\text{h}$ quando toda aberta.

Se o atuador trabalhar numa faixa de $0,2$ a $1,0 \text{ kgf/cm}^2$, como é comum, o ganho desta válvula poderá ser expresso como:

$$G = (1,0 - 0,2) \text{ kgf/cm}^2 / (100 - 0) \text{ m}^3/\text{h}$$

$$G = 0,008 \text{ kgf/cm}^2/\text{m}^3/\text{h}$$

Fisicamente, em termos lineares, isto significa que, para cada $0,008 \text{ kgf/cm}^2$ de aumento de pressão, desde $0,2$ até $1,0 \text{ kgf/cm}^2$, a válvula varia sua vazão desde 0 até $100 \text{ m}^3/\text{h}$.

De uma forma mais clara, quando a pressão no atuador for de $0,2 \text{ kgf/cm}^2$, a válvula estará fechada e a vazão através dela será 0 . Com o aumento da pressão no atuador, a válvula irá abrir até que a pressão atinja $1,0 \text{ kgf/cm}^2$. Neste valor de pressão, a válvula estará totalmente aberta e a vazão por ela será de $100 \text{ m}^3/\text{h}$.

É importante ressaltar que o controlador e a válvula devem operar de forma que, em condição de falha de energia, a malha garanta uma condição segura para o processo.

A válvula de controle é o elemento final e é por ela que começa a verificação desta condição, ou seja, ela deve abrir ou fechar, na falta de energia, para garantir que haja ou não fluxo de material através da válvula (o processo é que determina esta condição).

Esta análise determina a ação do controlador (direta ou inversa), de forma que a malha de controle possa operar de forma conveniente e, ao mesmo tempo, levar a válvula à posição segura.

O sistema de controle de temperatura de um reator, através de uma camisa pela qual circula água, permite entender este mecanismo (figura 10.25).

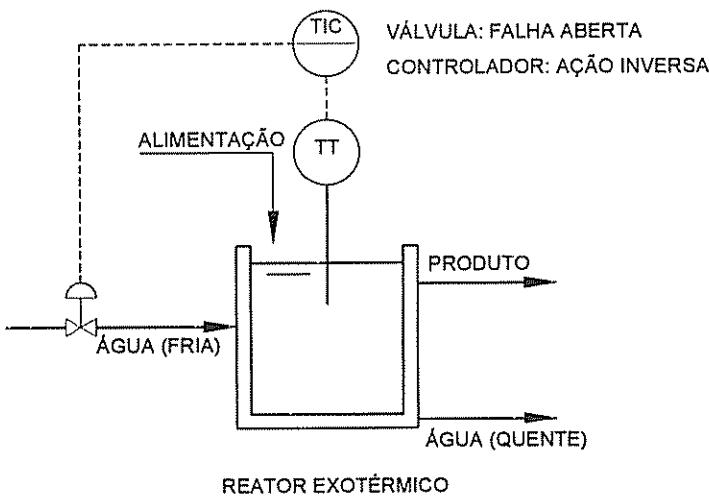


FIGURA 10.25 Controle de temperatura - resfriamento de um reator químico.

Neste caso, a válvula de controle deverá abrir na falta de energia, para que não falte água de resfriamento. Se a temperatura do produto aumentar, a válvula deverá abrir para resfriar o reator, ou seja, a saída do controlador deverá diminuir, para que a válvula abra. O inverso deverá ocorrer caso a temperatura do produto diminua.

Portanto, o controlador deverá ser de ação inversa, isto é, a saída diminui quando a entrada aumenta.

Normalmente, são elaboradas planilhas contendo tanto os valores dos parâmetros de ajuste dos controladores, como também as ações dos mesmos, de acordo com o procedimento do exemplo acima.

10.10 AÇÕES DE CONTROLE LIGA-DESLIGA (ON-OFF), AUTO-OPERADO, PROPORCIONAL, PROPORCIONAL-INTEGRAL, PROPORCIONAL DERIVATIVA, PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVA

No capítulo anterior, estudamos os elementos de uma malha de controle, em seus aspectos funcionais básicos.

Nesta parte do livro, será enfatizado o controlador que é, na verdade, o componente que toma as decisões sobre como o elemento final de controle deverá manipular a variável responsável por manter a variável de processo no valor desejado.

O controlador recebe do transmissor o sinal correspondente à variável de processo. Um mecanismo de comparação computa um eventual desvio em relação ao valor desejado (*Set-Point – SP*), ou seja, um erro, que será designado por $e(t)$.

10.10.1 Controle Liga-Desliga (*on-off*)

Este controle é normalmente empregado em processos que podem admitir certa oscilação contínua da variável de controle em torno do valor desejado.

A saída de um controlador liga-desliga muda de ligada para desligada, ou vice-versa, à medida que o sinal do erro passa pelo zero, ou seja, quando a variável passa pelo ponto de ajuste. O elemento final de controle, neste caso, é normalmente uma válvula solenóide, a qual assume apenas duas posições extremas, aberta ou fechada.

A figura 10.26 ilustra um processo cujo controle da temperatura é feito por um controle liga-desliga.

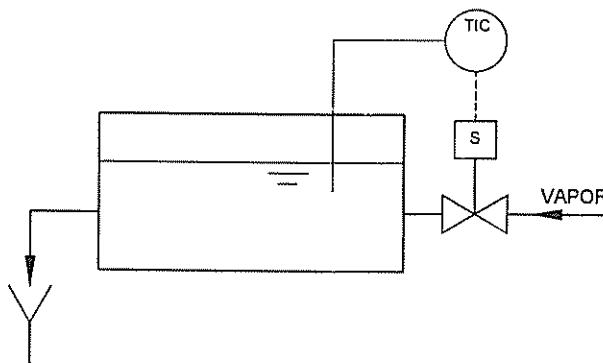


FIGURA 10.26 Controle de temperatura com vapor atuado por válvula solenóide.

Neste sistema, quando a temperatura se afasta do ponto de ajuste, aumentando, a válvula solenóide se encontra fechada e a saída do controlador é 0%. Nesta situação, a temperatura atinge um valor máximo, a partir do qual começa a diminuir até encontrar novamente o ponto de ajuste. Neste instante, a saída do controlador passa para 100%, abrindo a válvula solenóide, que admite vapor no sistema. A partir deste momento, a temperatura atinge um mínimo (devido a inércia do sistema) e começa a aumentar novamente, até atingir de novo o ponto de ajuste.

Observa-se que o controle liga-desliga leva a variável a oscilar em torno do ponto de ajuste. Este mecanismo é mostrado na figura 10.27.

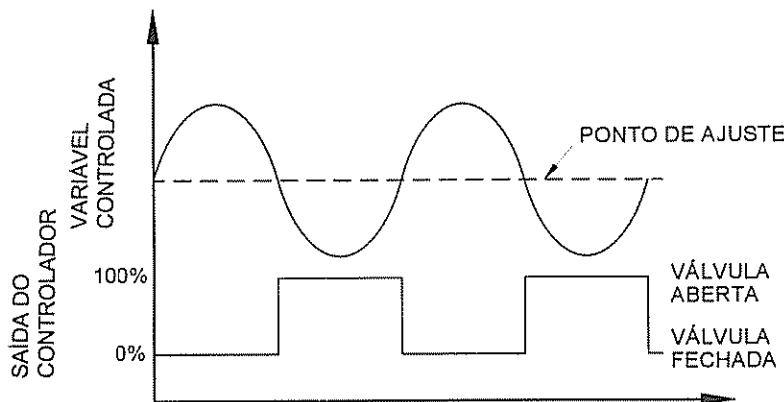


FIGURA 10.27 Resposta de um controle liga-desliga.

Os controladores liga-desliga são largamente utilizados na indústria, especialmente em sistemas de segurança para proteção de equipamentos, e em processos que admitem malhas de menor importância, que permitem, como já mencionado, oscilação da variável de processo.

É comum, nestas aplicações, a adição de uma zona morta (diferencial) ao controlador, o que diminui a frequência de oscilação e também o desgaste do elemento final. A qualidade do controle, entretanto, diminui.

O controladores normalmente utilizados nestas aplicações são os pressostatos, chaves de nível, termostatos, chaves limite, sensores de chama e outros.

10.10.2 Controle Auto-Operado

Neste tipo de controle, o controlador utiliza o próprio fluido de processo para operar o controle.

Um exemplo típico é o controle de pressão numa tubulação de gás através de uma válvula auto-reguladora de pressão, conforme mostra a figura 10.28.

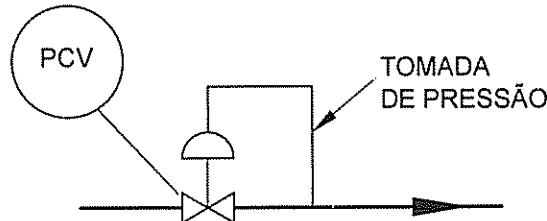


FIGURA 10.28 - Controle de pressão auto-operado.

Uma tomada de pressão é feita na tubulação e conectada ao diafragma do atuador da válvula. A força resultante da aplicação desta pressão se opõe à força de uma mola existente no sistema de atuação da válvula, resultando num equilíbrio de forças que garante a operação do gás a uma pressão predeterminada, ou seja, a pressão de ajuste. Este valor é determinado pelo ajuste da tensão da própria mola da válvula reguladora.

Existem vários tipos de válvulas auto-reguladoras de pressão que não são objeto de análise deste capítulo. É importante ressaltar que este controle não é utilizado em processos propriamente ditos, devido ao fato de que, normalmente, há um determinado desvio em relação ao ponto de ajuste, o que restringe a aplicação a sistemas de redução de pressão.

Outro tipo de controle auto-operado é o controle de nível através de válvulas auto-controladoras operadas pelo próprio nível de líquido dos recipientes nos quais são instaladas. O esquema mais comum, neste caso, ilustrado na figura 10.29, constitui-se de uma bóia que acompanha o nível do líquido com uma haste ligada ao sistema de acionamento de uma válvula. Esta válvula controla, em geral, a entrada de fluido no recipiente, de acordo com o nível detectado pela bóia. Os ajustes são normalmente feitos no mecanismo de atuação do conjunto bóia-válvula.

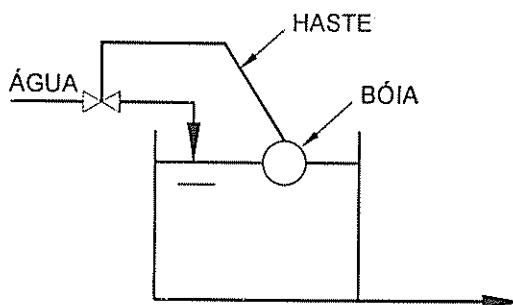


FIGURA 10.29 Válvula auto-controladora de nível.

O sistema é puramente mecânico e adquirido como um conjunto completo (bóia, haste e válvula).

Este sistema de controle de nível auto-operado é utilizado apenas em aplicações simples, em geral nos sistemas de armazenamento de água.

10.10.3 Controle Proporcional

Este controlador fornece uma saída proporcional ao erro $e(t)$. A equação que representa esta ação de controle pode ser escrita como:

$$m(t) = K_c \cdot e(t) + b$$

onde: $m(t)$ = sinal de saída do controlador;

K_c = ganho proporcional;

$e(t)$ = erro (SP – variável medida);

b = constante (saída do controlador quando o erro é zero) ou saída em modo manual do controlador.

A saída em modo manual do controlador pode ser explicada utilizando-se um processo no qual se deseja controlar o nível de um tanque, conforme a figura 10.30.

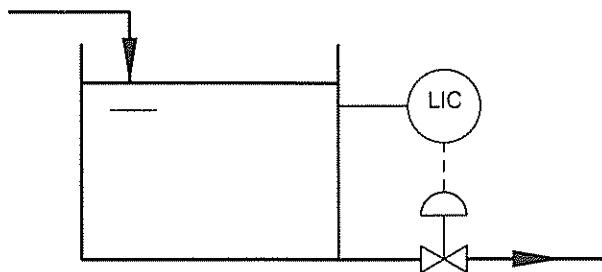


FIGURA 10.30 Controle de nível de um tanque.

Partindo-se do tanque completamente vazio e com a válvula de controle totalmente fechada, considere-se que o nível comece a subir e que o operador comece a abrir manualmente a válvula. Considerando-se o valor desejado do nível, como, por exemplo, 50%, o operador irá manipular a vazão de saída, de modo a torná-la igual à vazão de entrada, assim que o nível atingir 50% da altura do tanque. Neste ponto, a saída do controlador proporcional com o nível em 50% é b, ou seja, saída em modo manual do controlador.

Quando o operador passar o controlador para o modo automático, ele irá alterar sua saída de acordo com o valor do erro, modificação esta que depende do valor do ganho proporcional (K_c) do controlador.

A resposta de um controlador proporcional a uma variação em degrau no erro (sistema em malha aberta), é representada pelo gráfico da figura 10.31.



FIGURA 10.31 Resposta de um controlador proporcional a um degrau de amplitude A .

Na figura acima, no instante $t_0 = 0$, com o sistema em malha aberta, foi introduzido um erro de amplitude A . No modo proporcional, a saída do controlador varia de b para $b + K_c A$ (variação de $K_c A$) no instante em que o erro $e(t)$ muda de zero para A . Nota-se que a saída foi multiplicada por K_c (ganho proporcional do controlador).

A partir deste ponto, a saída do controlador proporcional é constante, uma vez que o erro $e(t)$ se mantém fixo no valor A .

O modo proporcional não apresenta nenhum componente dinâmico, ou seja, sua atuação só depende do valor do erro, independente de sua velocidade ou do tempo de duração deste erro. Assim, a saída do controlador não varia quando o erro está variando.

Os instrumentistas de campo, nas indústrias, estão mais familiarizados com o termo banda proporcional (em vez de ganho), quando se refere ao controle proporcional.

A banda proporcional (BP) é definida como sendo o erro requerido para movimentar a válvula de controle desde totalmente aberta até totalmente fechada. A BP é normalmente expressa em porcentagem da faixa da variável medida. O exemplo que se segue ilustra este conceito.

Um controlador é aplicado ao controle de temperatura, numa faixa de 60 a 100 °C. Regula-se o controlador para que sua saída varie de 4-20 macc, quando a temperatura variar desde 71 a 75 °C. Calcular o ganho proporcional (K_c) e a banda proporcional (BP):

$$K_c = (20-4) \text{ macc}/(75-71) ^\circ\text{C}$$

$$= 4 \text{ macc}/^\circ\text{C}$$

$$BP = (75-71) ^\circ\text{C}/(100-60) ^\circ\text{C} \times 100 (\%)$$

$$= 10 \%$$

A BP e o ganho proporcional mantêm uma relação inversa. Assim, se estreitarmos a faixa de atuação do controlador de modo que o mesmo provoque todo o curso da válvula para um menor intervalo de variação de temperatura, verificamos que o controlador ficou mais sensível, isto é, o ganho ou sensibilidade aumentou. A BP, por sua vez, irá diminuir proporcionalmente.

Pode-se fazer o teste numericamente e ilustrar graficamente esta relação entre as duas grandezas. Se o span de variação de temperatura for reduzido pela metade, ou seja, de 71 a 75 °C (4 °C) para 71 a 73 °C (2 °C), o novo ganho será de $(20-4) \text{ macc}/(73-71) ^\circ\text{C}$, igual a 8 macc/ $^\circ\text{C}$, que é o dobro do anterior.

A BP, por sua vez, será de $(73-71) ^\circ\text{C}/(100-60) ^\circ\text{C}$, igual a 5%, ou seja, a metade da anterior. Verifica-se que o ganho dobrou e a BP foi reduzida à metade. A figura 10.32 ilustra graficamente esta relação entre as duas grandezas.

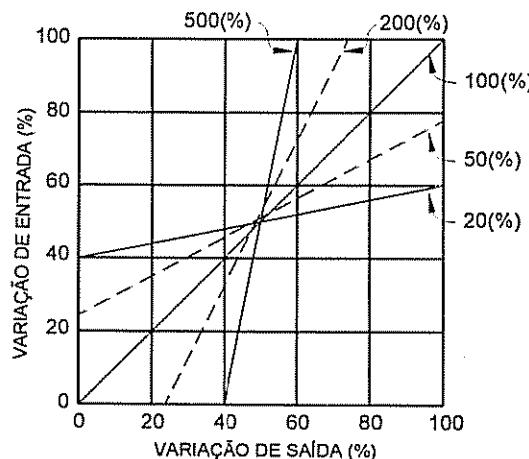


FIGURA 10.32 Relação entre ganho proporcional e banda proporcional.

Considerando-se, agora, um sistema de controle em malha fechada, pode-se mostrar a curva de resposta de um controlador proporcional com diversos valores de ganho proporcional (K_c).

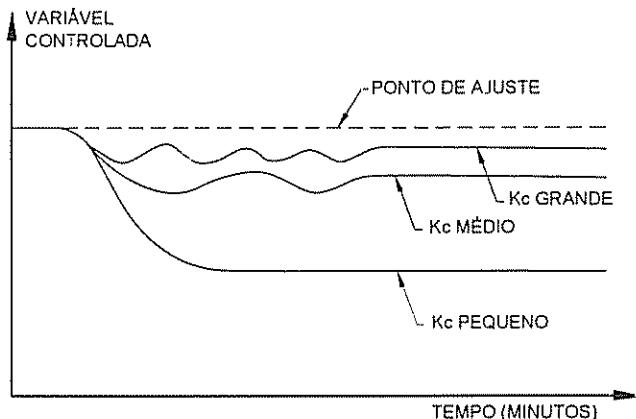


FIGURA 10.33 Resposta de um controlador P para diferentes valores de ganho proporcional.

À medida que se aumenta o ganho proporcional (K_c), o erro diminui e o sistema responde de forma mais rápida. Isto faz concluir que o ganho deve ser ajustado para o maior valor possível. Entretanto, ao mesmo tempo que o erro diminui com o aumento do ganho proporcional, aumentam as oscilações e o tempo para a estabilização da variável. Este fato constitui-se num limitante com relação ao valor do ganho proporcional, uma vez que um valor excessivo de K_c pode instabilizar o processo, ou seja, as oscilações podem adquirir amplitude cada vez maior.

O controlador proporcional permite ajuste do ganho ou da banda proporcional pelo operador, de modo que o erro possa ser compensado. Este reajuste pode ser manual, sendo que alguns controladores permitem o ajuste de forma automática.

A ação proporcional isolada não é suficiente para que a variável do processo retorne ao valor desejado após uma determinada variação de carga. O que ocorre é que a variável estabiliza sempre num valor diferente do desejado. Este afastamento recebe o nome de *offset*.

Com relação a estas duas primeiras ações de controle (liga-desliga e proporcional), cabem os seguintes comentários:

- a ação liga-desliga não consegue fazer com que a variável se mantenha no valor desejado, e somente pode ser utilizada caso o processo admita a oscilação da variável em torno do ponto de ajuste;
- a ação proporcional somente faz com que a variável do processo retorne ao valor desejado.

Como existem muitos processos que não admitem nem *off-set* e nem oscilações em torno do valor desejado, outras ações de controle são, então, utilizadas.

10.10.4 Controle Proporcional-Integral (PI)

Esta ação de controle fornece ao controle proporcional um recurso adicional chamado ação integral, que elimina o erro $e(t)$ de forma automática, uma vez que, enquanto a saída da ação proporcional é proporcional ao erro $e(t)$, a saída da ação integral é função da integral do erro, ou seja, a velocidade de correção é proporcional ao erro $e(t)$.

A ação integral é normalmente utilizada em conjunto com a ação proporcional, pois a velocidade de resposta da ação integral de forma isolada é pequena, sendo muito longo o tempo para a estabilização da variável. Obtém-se, então, o controlador PI cuja equação que a representa é:

$$m(t) = K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + b$$

onde:

- $m(t)$ = sinal de saída do controlador;
- $e(t)$ = erro (SP – variável medida);
- K_c = ganho proporcional;
- τ_i = tempo integral, min;
- b = constante (saída do controlador quando o erro é zero), ou saída em modo manual do controlador.

Foi acrescentado à ação proporcional o termo integral, que é proporcional à integral do erro. Os valores dos parâmetros K_c e τ_i podem ser ajustados no controlador, através de botões de ajuste nos controladores convencionais, ou por programação, nos controladores e sistemas digitais. De qualquer forma, produzem o mesmo efeito sobre a variável do processo, mudando apenas o caminho pelo qual se obtém os ajustes.

Quando $e(t) = 0$, $m(t) = b$.

Quando $e(t) = A$, a equação toma a forma:

$$m(t) = K_c \cdot A + \frac{A \cdot K_c}{\tau_i} \cdot t + b$$

A resposta do controlador assume a forma ilustrada na figura 10.34.

Até o instante $t_0 = 0$, a variável encontra-se no estado estacionário, sendo o desvio $e(t)$ em relação ao valor desejado, igual a zero. O sinal de saída do controlador, nesta condição, assume o valor "b", o que pode facilmente ser visto pela equação da ação PI, fazendo-se $e(t) = 0$. Tem-se, portanto, $m(t) = b$.

Subitamente, porém, o processo é submetido a uma variação em degrau de amplitude A . O controlador ativa seu sinal de saída, que passa instantaneamente do valor "b", para $(b + K_c \cdot A)$.

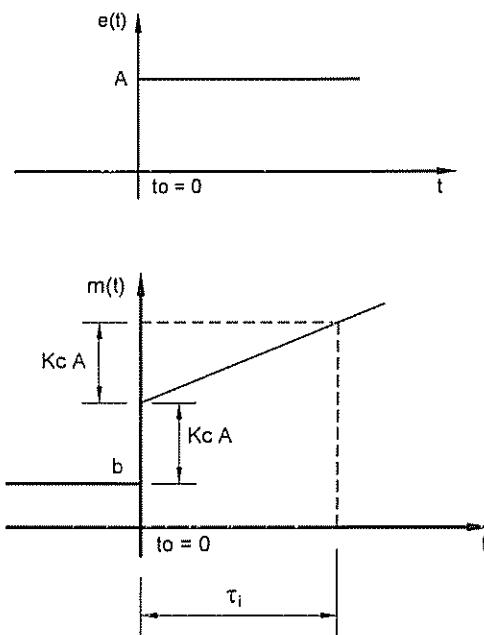


FIGURA 10.34 Resposta de um controlador PI a um degrau de amplitude A .

A partir deste momento, analisando-se a forma da equação do controlador PI para $e(t) = A$ (após o degrau), nota-se que a saída do controlador segue a equação de uma reta, $m(t) = (A \cdot K_c / \tau_i) \cdot t$, variando linearmente a uma velocidade de variação igual a $A \cdot K_c / \tau_i$.

Graficamente, $A \cdot K_c / \tau_i$ representa o coeficiente angular da reta em questão, sendo que sua inclinação pode ser alterada, ou ajustando-se o ganho proporcional K_c , ou alterando-se o parâmetro τ_i (tempo integral). Alterar a inclinação da reta significa variar a velocidade com que o controlador responde em relação ao desvio da variável de processo.

Na prática, utiliza-se o inverso do parâmetro τ_i ($1/\tau_i$), designado como taxa de integração (*reset rate*), expressa como repetições/minuto.

O parâmetro τ_i tem um significado físico que pode ser melhor entendido através do gráfico da resposta do controlador. Se a partir da intersecção da reta com o eixo $m(t)$, neste próprio eixo, for projetado o valor $K_c \cdot A$ como mostrado na figura, verifica-se que este valor é atingido após decorrido um intervalo de tempo igual a τ_i . Isto representa o tempo decorrido para que a ação P seja repetida, até que o desvio seja eliminado.

A ação PI devido à sua característica de variar a saída sempre que houver erro, faz com que se elimine o *offset* quando o processo atingir um estado estável.

A figura 10.35 mostra curvas de resposta em malha fechada de um controlador PI para um valor constante do ganho proporcional (K_c), variando-se o tempo integral τ_i .

Quando o valor de τ_i é grande, a aproximação da variável em relação ao ponto de ajuste é lenta. Quando τ_i é pequeno (excesso de correção), a variável oscila e demora para estabilizar.

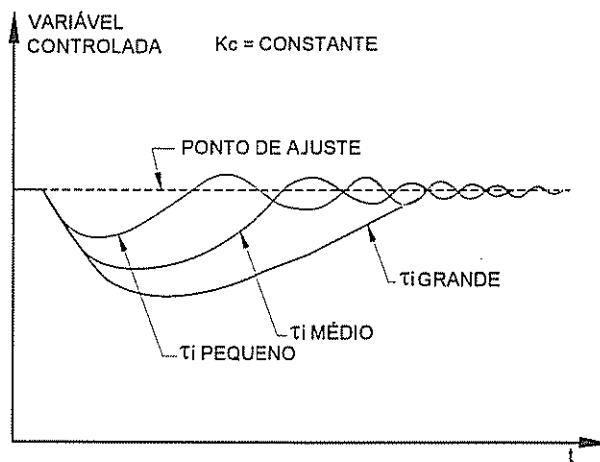


FIGURA 10.35 Resposta de um controlador PI para diferentes valores de t_i

O ajuste ideal do valor de t_i é, na verdade, aquele que elimina o erro num menor tempo possível.

Uma característica interessante da ação integral é a possibilidade de que o controlador continue integrando e alterando sua saída fora da faixa operacional do processo.

Seja, por exemplo, um trocador de calor projetado para aquecer 20 m³/h de fluido de processo de 35 °C para 100 °C, conforme a figura 10.36.

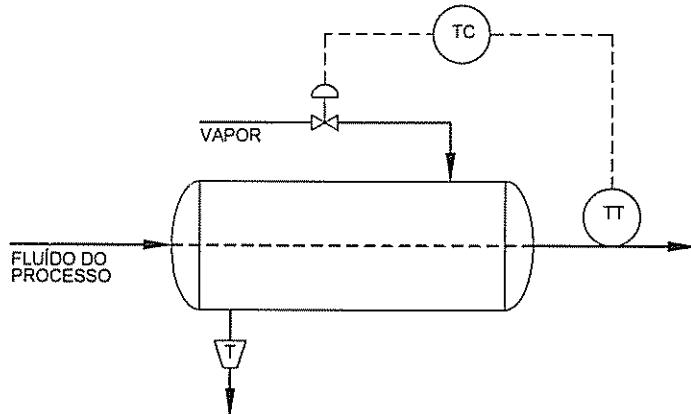


FIGURA 10.36 Trocador de calor.

Se a vazão do processo aumentar para 40 m³/h, pode ser que a vazão de vapor não consiga controlar a temperatura mesmo com a válvula de controle totalmente aberta. O controlador continuará a variar sua saída até atingir a corrente de saturação. Passando dos 20 macc a integração fica sem sentido, uma vez que a válvula está totalmente aberta. A este fenômeno dá-se o nome de saturação pelo modo integral, ou, em inglês, o *reset-wind up*.

Devido a este fenômeno, mesmo que a vazão volte para o valor inicial de $20 \text{ m}^3/\text{h}$, a temperatura deverá ficar acima do valor desejado por um período de tempo até que a saída do controlador passe novamente pelos 20 macc e a válvula comece a fechar. Só a partir deste instante é que a temperatura começará a cair.

Para processos que possam operar temporariamente fora de sua capacidade nominal, recomenda-se a chamada característica *anti-reset wind-up*.

10.10.5 Controle Proporcional-Derivativo (PD)

A ação derivativa, na prática, não pode ser utilizada isoladamente, sendo aplicada normalmente em conjunto com a ação proporcional, resultando na ação PD.

Como já mencionado anteriormente, a saída da ação proporcional é proporcional ao erro $e(t)$. A saída da ação derivativa, entretanto, é função da derivada do erro $e(t)$ em relação ao tempo. A equação que representa a ação derivativa é:

$$m(t) = b + K_c \cdot e(t) + K_c \cdot \tau_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

onde:

$m(t)$ = sinal de saída do controlador;

$e(t)$ = erro (SP – variável medida);

K_c = ganho proporcional;

τ_d = tempo derivativo, min;

b = constante (saída do controlador quando o erro é zero), ou saída em modo manual do controlador.

A análise da chamada ação derivativa é feita normalmente através de uma variação do tipo "rampa" da variável do processo, uma vez que a resposta do controlador neste caso é proporcional à derivada do erro, o que impossibilita a análise através de uma variação em degrau, tendo em vista que a derivada de uma constante é igual a zero.

Considerando-se um desvio em rampa na forma $e(t) = A \cdot t$, a resposta desta ação de controle é representada pela equação:

$$m(t) = b + K_c \cdot A \cdot t + K_c \cdot \tau_d \cdot \frac{dA \cdot t}{dt}$$

Observa-se que foi adicionada ao termo proporcional uma outra parcela, que é proporcional à derivada do erro, ou seja, à sua velocidade de variação.

Esta ação também recebe o nome de ação antecipatória, devido ao seu caráter de realmente iniciar a ação corretiva logo que o erro começa a variar.

A análise da resposta desta ação de controle é feita com base numa variação em rampa do erro em relação ao tempo, como mostra a figura 10.37.

A figura 10.36 considera resposta em malha aberta. A saída da ação proporcional é uma rampa com inclinação $A \cdot K_c$, variando de acordo com a equação $K_c \cdot A \cdot t$. A saída devido a ação derivativa varia de $K_c \cdot A \cdot \tau_d$ no momento em que o erro começa a variar, ficando então constante.

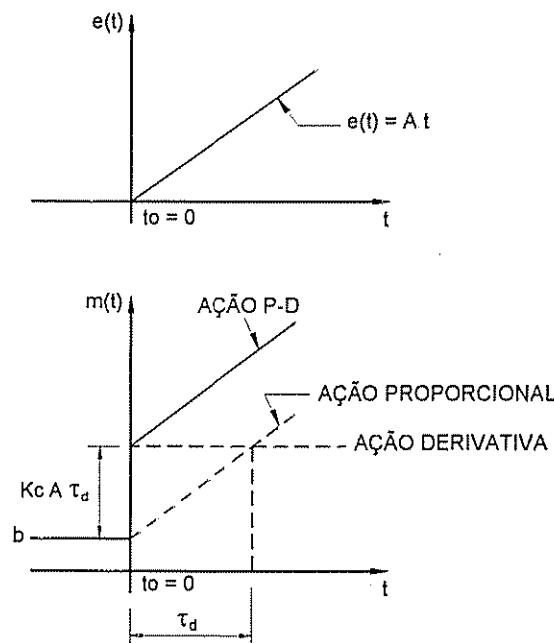


FIGURA 10.37 Resposta de um controlador P-D a uma variação em rampa de inclinação A .

Pode-se observar na figura 10.36, que a saída da ação derivativa se antecipa em relação à ação proporcional, de um valor τ_d , que é chamado de tempo derivativo. Na prática, este tempo derivativo representa o tempo que a saída da ação proporcional leva para atingir a saída do modo derivativo.

Considerando-se o sistema de controle em malha fechada, pode-se constatar, pela figura 10.38, que a aplicação da ação derivativa não elimina o erro, ou seja, tal como a ação proporcional de modo isolado ainda persiste um dado *offset*, ou afastamento da variável do processo em relação ao valor desejado.

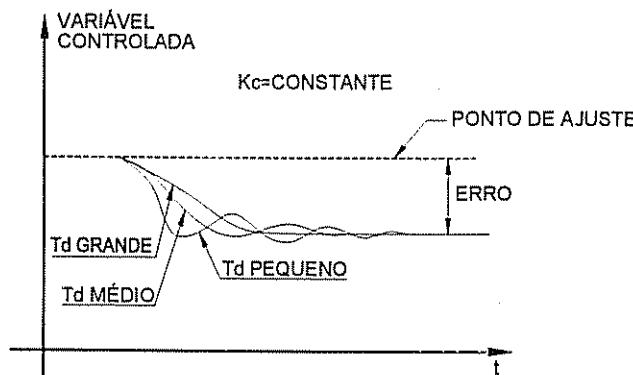


FIGURA 10.38 Resposta de um controlador PD para diferentes valores de τ_d .

O aumento do tempo derivativo T_d melhora a estabilidade do processo, com baixa velocidade de resposta. Pequenos valores de T_d melhoram a velocidade de resposta, mas comprometem a estabilidade, aumentando a oscilação.

Na figura 10.39, a seguir, ilustra-se o ajuste de um controlador PD combinando-se os ajustes do ganho proporcional K_c com os do tempo derivativo T_d .

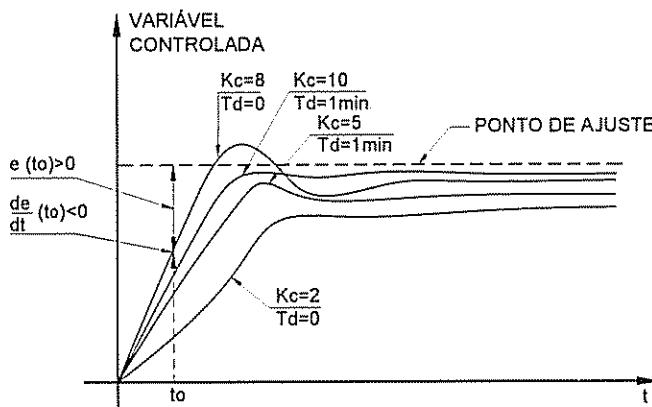


FIGURA 10.39 Ajuste de um controlador PD para combinações de K_c e T_d .

O que se observa, nesta figura, é que o acréscimo da ação derivativa melhora a estabilidade do processo, pela sua característica de antecipação ou oposição às variações.

Observa-se que, com ganho $K_c = 2$ e $T_d = 0$, o erro residual é devido somente à ação proporcional. Ao se aumentar o ganho proporcional para $K_c = 8$, sem a ação derivativa ($T_d = 0$), nota-se que a variável controlada ultrapassa o ponto de ajuste. No caso em que se utilizou a ação derivativa ($T_d = 1$) em conjunto com a proporcional, com alto valor do ganho ($K_c = 10$), verifica-se que a variável controlada não ultrapassou o ponto de ajuste.

A ação derivativa melhora, como se observa, a estabilidade do sistema, sendo que, utilizada em conjunto com a ação proporcional, o ganho pode ser aumentado sem comprometimento da estabilidade.

10.10.6 Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

O controlador proporcional mais integral, mais derivativo, combina as características de estabilidade conferida pelo controle proporcional mais derivativo com as características de eliminação do erro oferecidas pelo controle proporcional mais integral. Estas particularidades são, então, reunidas num único controlador.

A saída de um controlador PID é representada pela equação:

$$m(t) = b + K_c \cdot (e) \cdot t + \frac{K_c}{\tau_i} \int_0^t e(t) + K_c \cdot \tau_d \cdot \frac{dA \cdot t}{dt}$$

Esta ação de controle tem seu ajuste de certo modo dificultado, uma vez que é necessário o acerto de três parâmetros, ou seja, o ganho proporcional (K_c), o tempo integral (t_i) e o tempo derivativo (t_d). Como a ação derivativa torna o controlador mais difícil de sintonizar, o controle de três modos (PID) deverá ser utilizado somente em determinados processos que realmente tenham seu desempenho bastante aumentado, como, por exemplo, os sistemas de controle de temperatura.

A figura 10.40 representa as curvas de resposta das três ações de controle, P, PI, PID, em malha fechada, o que possibilita a análise do efeito de cada ação na resposta do sistema de controle (variável controlada em relação ao tempo).

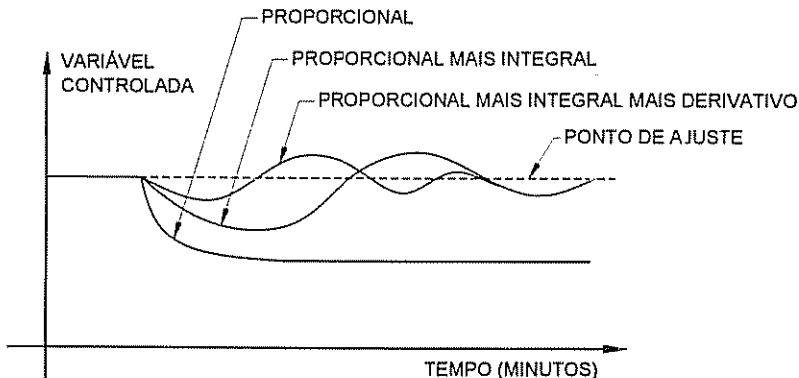


FIGURA 10.40 Resposta de um controlador PID.

A análise do gráfico mostra que a combinação PID produz maiores oscilações no sistema, mas diminui o tempo para a estabilização da variável.

Imagine um trocador de calor no qual haja uma variação em degrau na vazão de vapor na entrada do equipamento. Não havendo controle, a temperatura do fluido na saída irá aumentar até atingir um novo valor estacionário.

Com um controlador, uma ação de controle será tomada de forma a levar a variável de processo até o ponto anterior à mudança de carga.

Com controle proporcional, somente, o controlador tem a capacidade de trazer a variável de processo para um novo valor estacionário. A diferença entre este novo valor e o valor estacionário original, anterior à mudança, é chamado de *offset*, como vimos anteriormente.

A introdução da ação integral, resultando num controle PI, tem a vantagem de eliminar o *offset*, ao mesmo tempo que introduz alguma oscilação no sistema, que nem sempre pode ser tolerada.

A adição da ação derivativa, às ações P e I, torna o controle PID, resolvendo o problema de resposta de uma forma definitiva, uma vez que a variável de processo é trazida para o valor original de uma forma rápida.

Em resumo, a escolha da melhor ação de controle a aplicar é função de uma série de fatores que devem ser analisados por aqueles que conhecem bem o processo e a operação da planta.

Existem algumas proposições que constam dos Critérios de Projeto e Guias de Seleção e Especificação de Instrumentos e Sistemas de Controle, os quais fazem parte da padronização das empresas (indústrias de processo e empresas de engenharia).

Tais proposições são normalmente levadas em conta quando se especificam os controladores como uma primeira aproximação.

A definição das ações de controle e os correspondentes ajustes dos parâmetros dos controladores, entretanto, são sempre objeto de análise um pouco mais criteriosa por parte do pessoal envolvido na operação e engenharia da planta.

A seguir, são estabelecidas algumas sugestões de cunho prático para determinar a ação de controle normalmente utilizada nas situações mais comuns:

Ação de controle	Vazão e pressão de líquido	Pressão de gás	Nível de líquido	Temperatura e pressão de vapor
Proporcional	Essencial	Essencial	Essencial	Essencial
Integral	Essencial	Não necessário	Utilização rara	Importante
Derivativa	Não	Não necessário	Não necessário	Essencial

A seleção apropriada da melhor ação de controle é uma das etapas mais crítica no projeto e instalação de sistemas de controle de processos. Não há o controlador que seja universal e que atenda a todo e qualquer processo, e os seguintes fatores devem ser considerados pelos profissionais da área de controle:

- qualidade do controle;
- custos;
- facilidade de operação.

Para um dado controlador, o custo e a facilidade de operação são geralmente fixados facilmente. A qualidade do controle, porém, varia de processo para processo.

A seguir, são feitos alguns comentários e recomendações úteis sobre cada ação de controle, levando-se em conta as características de cada uma.

Controle Liga-Desliga

Trata-se da técnica de controle que apresenta o menor custo e a de maior simplicidade. Sua aplicação, porém, fica limitada a processos que respondem lentamente aos distúrbios e, normalmente, não são utilizados em sistemas de ordem superior que não possuem constante de tempo ou sistemas com médio ou grande tempo morto. A área de aplicação do controle liga-desliga nas indústrias de processo é limitada.

Controle Proporcional

O controle proporcional puro é normalmente aplicado em muitos processos contendo constante de tempo simples, e responde rapidamente tanto aos distúrbios como

às alterações do ponto de ajuste. Possui, entretanto a característica normalmente indesejável de apresentar um erro residual no estado estacionário (*offset*). A sintonia é relativamente fácil de ser obtida, pelo ajuste de um único parâmetro (K_c).

Controle Proporcional-Integral

É, com certeza, a ação de controle mais utilizada em controle de processos. Não apresenta o *offset* associado ao controle proporcional puro, com a vantagem de aumentar a velocidade de resposta em relação à ação integral isoladamente. Devido à presença da ação integral, a estabilidade da malha de controle diminui. Como já estudado anteriormente, há o risco da saturação pelo modo integral, sendo que, neste caso, o controlador continua integrando o erro, mesmo sem haver correção efetiva, o que prejudica o controle do processo. É muito utilizado no controle de nível, vazão, pressão e outras variáveis que não apresentam atrasos muito grandes.

Controle Proporcional-Derivativo

Trata-se de um controle efetivo quando se tem sistemas com algumas constantes de tempo. Resulta numa resposta mais rápida, como menor *offset* do que o controle proporcional puro, mas ainda assim, este desvio persiste. Em geral, a ação derivativa aumenta a estabilidade da malha de controle. Quando se tem processo rápidos, tais como controle de vazão, não se recomenda a utilização da ação derivativa, a não ser que acompanhada da proporcional e da integral, resultando no controle PID.

Controle Proporcional-Integral-Derivativo

Trata-se, como já estudado, da ação mais complexa dentre as técnicas de controle convencional. Teoricamente, o controle PID resulta num melhor controle do que as ações PI ou PD. Na prática, porém, há a dificuldade de ajuste dos parâmetros de sintonia. Esta ação (PID) é utilizada na indústria em controle de pH, temperatura e outras variáveis analíticas.

10.11 ESTABILIDADE E SINTONIA DE CONTROLADORES – MALHA FECHADA: ZIEGLER E NICHOLS; HARRIOTT – MALHA ABERTA (CURVA DE REAÇÃO DO PROCESSO): ZIEGLER E NICHOLS; COHEN E COON

10.11.1 Estabilidade

Considera-se que um sistema é instável, quando apresenta tendência de oscilação. A estabilidade é normalmente referida como estabilidade em malha aberta ou em malha fechada.

No caso do trocador de calor anteriormente citado, se a vazão de vapor sofrer um aumento súbito (em degrau), a temperatura do fluido na saída irá estabilizar num valor superior, ou seja, é estável em malha aberta.

A estabilidade de um processo pode se alterar dependendo se opera em malha aberta ou malha fechada, e a função do sistema de controle é justamente alterar o comportamento dinâmico do processo, de modo que o mesmo opere satisfatoriamente, com pouca oscilação.

A preocupação é, em última análise, que um processo estável em malha aberta não se torne instável quando colocado em operação em malha fechada.

Vários aspectos influenciam a operação de um processo de modo satisfatório. O projeto do sistema de controle como um todo deve ser analisado, ou seja, a determinação do ganho do transmissor, ganho da válvula de controle e os parâmetros de ajuste do controlador, tais como o ganho (K_c) ou a banda proporcional, o tempo integral (T_i) e o tempo derivativo (T_d). Um elemento bastante indesejável num processo é o tempo morto, uma vez que influi muito no valor de ajuste do ganho, e faz o processo oscilar de modo contínuo.

Durante a especificação dos sistemas de controle, especialmente quando da escolha do posicionamento dos sensores, deve-se reduzir o tempo morto a um mínimo possível.

Num processo estável um aumento em degrau na vazão de vapor leva a variável de processo (temperatura) a atingir um valor finito, após o distúrbio (a temperatura tende a um determinado valor).

Muitos processos são instáveis, como, por exemplo, reatores químicos com operação em ponto próximo de uma explosão; outros processos teoricamente estáveis, são instáveis na prática, em função da operação dos mesmos perto das condições limites de segurança.

É importante analisar a estabilidade em malha aberta e em malha fechada. Alguns processos instáveis em malha aberta são estáveis na planta, uma vez que a função do sistema de controle é alterar o comportamento dinâmico do processo. Assim ocorre, também, com certos processos lentos em malha aberta, que se tornam mais rápidos em malha fechada.

Por outro lado, deve-se garantir que um processo estável em malha aberta não se torne instável em malha fechada.

Será abordada a técnica de sintonia pelo método de Ziegler e Nichols (sintonia em malha fechada), que mostra que existe um valor do ganho proporcional (K_c) para o qual o processo oscila infinitamente, sendo que as oscilações desaparecem depois de algum tempo para valores menores deste ganho. Por estas observações, pode-se conceituar instabilidade como a tendência do sistema oscilar, e o valor do ganho para o qual o sistema oscila de forma contínua é entendido como um indício de estabilidade do sistema.

Cada estratégia de controle exerce uma influência na estabilidade do sistema, e o que se faz normalmente, em teoria de controle, é pesquisar os valores dos parâmetros dos controladores e seus respectivos efeitos.

Da mesma forma que o ganho de um controlador influí na estabilidade, também contribuem para alterar esta estabilidade as variações no ganho do transmissor, da válvula de controle e do processo em si.

Num sistema de controle de vazão, por exemplo, uma válvula com característica de igual porcentagem, que tem seu ganho aumentado com o aumento de abertura, seria a escolhida para neutralizar o efeito de um medidor de vazão por pressão diferencial (placa de orifício), o qual possui um ganho decrescente com o aumento de vazão. Além disso, o processo também contribui, sem dúvida, para a determinação da estabilidade. Um aumento da constante de tempo do processo aumenta a estabilidade, diminuindo suas oscilações.

O tempo morto, conforme já citado, exerce também sua influência na estabilidade, o que pode ser ilustrado pelo clássico sistema de controle de temperatura com o sensor instalado a jusante do tanque, a uma certa distância da saída. O tempo morto influí no valor do ganho, sendo que, à medida que o ganho é aumentado em função do aumento do tempo morto, maiores são os desvios em relação ao valor desejado, e maior o tempo para estabilização da temperatura.

Por este motivo, procura-se sempre minimizar este efeito, o que deve ser conseguido na instalação do sensor/transmissor.

10.11.2 Sintonia de Controladores

Serão estudados os métodos de sintonia baseados na resposta dos sistemas em malha aberta e em malha fechada.

O principal problema que envolve a sintonia de controladores é definir o que é um bom controle, o que difere de processo para processo.

Os métodos de sintonia de controladores utilizam normalmente as seguintes alternativas:

- sintonia baseada na chamada taxa de amortecimento ou razão de decaimento, em inglês *decay ratio*. Procura-se, neste caso, a obtenção de uma taxa de amortecimento igual a $\frac{1}{4}$. Esta taxa constitui-se numa forma de determinar a oscilação da variável controlada em relação ao valor desejado, como mostrado na figura 10.41. A taxa de amortecimento é definida como a relação entre o valores do primeiro e do segundo picos mostrados na curva de resposta, para uma razão igual a $\frac{1}{4}$;

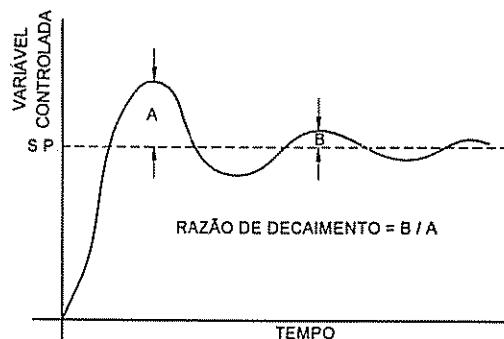


FIGURA 10.41 Taxa de amortecimento.

- sintonia obtendo-se um determinado valor para a porcentagem do desvio em relação ao valor desejado, consistindo também numa medida de oscilação, como mostra a figura 10.42. Esta porcentagem do desvio em relação ao valor desejado, ou seja, a relação entre o primeiro pico mostrado na figura e o próprio valor desejado, é definida como sobrepasso;

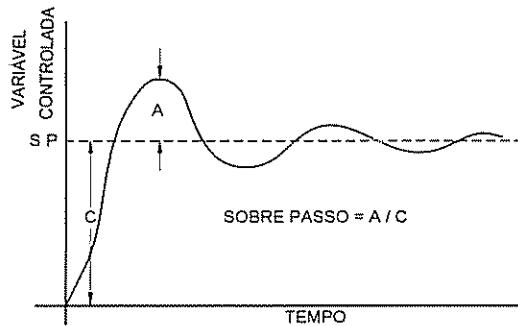


FIGURA 10.42 Sobrepasso ou *overshoot*.

- sintonia pela combinação destes ajustes, procurando a menor área total entre o valor desejado e a variável controlada durante uma alteração do valor desejado ou de carga na entrada do processo. Como procura-se a menor área (integral do valor absoluto do erro), é chamada de IAE, em inglês *Integral of Absolute Error* (figura 10.43).

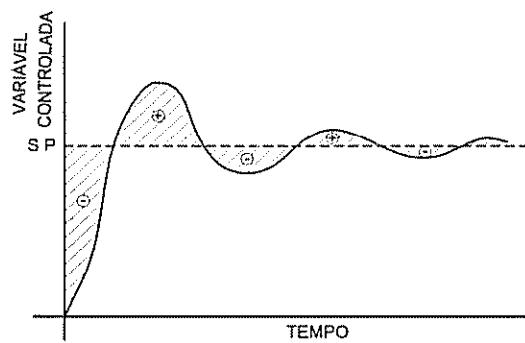


FIGURA 10.43 Integral do erro absoluto (IAE).

10.11.2.1 Sintonia baseada na resposta em malha fechada

Os métodos que se baseiam na resposta em malha fechada foram propostos por Ziegler e Nichols e ligeiramente modificados por Harriott.

Um dos primeiros métodos propostos foi o de Ziegler e Nichols, baseado na determinação do ganho último e do período último. O ganho último (K_u) é o máximo valor do ganho para um controlador com a ação proporcional apenas, para o qual o sistema é estável. O período obtido para este valor determinado do ganho é denominado de período último.

Para se determinar o ganho e o período únicos, procede-se da seguinte forma:

- 1) eliminar a ação integral e derivativa do controlador ($\tau_i = \infty$ e $\tau_d = 0$);
- 2) manter a malha fechada, ou seja, o controlador deve ser mantido em automático;
- 3) ajusta-se o ganho do controlador num valor qualquer e perturba-se o processo, observando-se a resposta. O distúrbio pode ser obtido, por exemplo, alterando-se o valor desejado e depois retornando-o ao valor inicial.

Seja a figura 10.44:

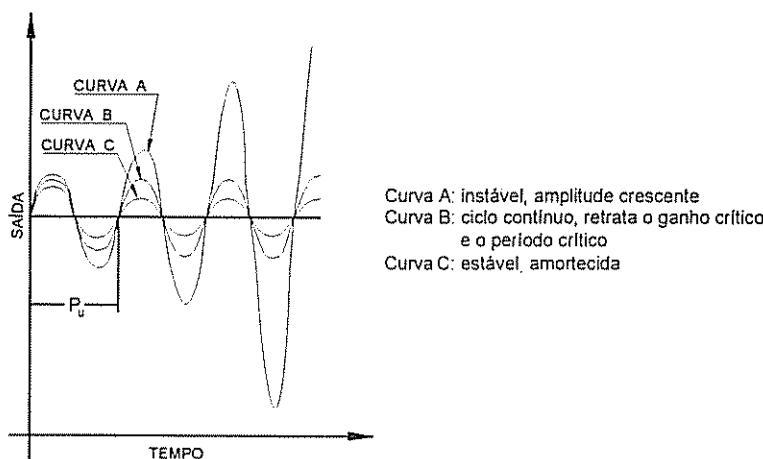


FIGURA 10.44 Respostas obtidas na determinação do ganho último.

- se a resposta não amortecer como na curva A, o ganho é muito alto (ou banda proporcional muito baixa). Assim, o ganho deve ser reduzido e o passo 3 repetido;
- se a resposta do passo 3 amortecer, como na curva C, o ganho é muito baixo (ou banda proporcional muito alta) e o passo 3 repetido;
- caso a resposta seja como mostrado na curva B, ou seja, quando a oscilação for constante, os valores do ganho e do período únicos foram obtidos. Estes valores são, então, utilizados para calcular os ajustes do controlador. Ziegler e Nichols observaram que, no caso dos controladores proporcionais, o valor do ganho proporcional igual à metade do ganho último proporciona, em geral, uma taxa de amortecimento igual a $\frac{1}{4}$. Assim, para o controlador proporcional:
 - $K_c = 0,5 K_u$.

Para os controladores mais complexos, os seguintes valores de ajuste foram propostos:

Proporcional-Integral

- $K_c = 0,45 \text{ Ku}$.
- $\tau_i = P_u/1,2$.

Proporcional-derivativo

- $K_c = 0,6 \text{ Ku}$.
- $\tau_d = P_u/8$.

Proporcional-Integral-Derivativo

- $K_c = 0,6 \text{ Ku}$.
- $\tau_i = P_u/2$.
- $\tau_d = P_u/8$.

Uma pequena modificação do método de Ziegler e Nichols foi proposta por Harriott, levando-se em conta que alguns processos não podem admitir oscilações, não se utilizando, portanto, o ganho último. Trata-se de aplicar o mesmo procedimento do método anterior, porém, procurando-se encontrar um valor de ganho que conduza a uma oscilação amortecida, com uma taxa de amortecimento de $\frac{1}{4}$. Desta forma, considera-se o período P da resposta nestas condições, o qual é utilizado como base para o cálculo dos parâmetros τ_i e τ_d , ou seja:

- $\tau_d = P/6$;
- $\tau_i = P/1,5$.

Os dois métodos em questão apresentam a desvantagem de operar por tentativas e erros para se identificar os valores corretos de ajuste. Tal fato é característico dos métodos de ajuste em malha fechada.

10.11.2.2 Sintonia baseada na resposta em malha aberta

Contrariamente às técnicas de ajuste em malha fechada, a técnica de ajuste em malha aberta necessita de apenas um distúrbio imposto ao processo para determinação dos parâmetros de sintonia do controlador. Neste caso, o controlador não está no processo durante os testes. Estes métodos procuram caracterizar o processo e, então, determinar os ajustes do controlador, com base nas características do processo.

As técnicas de ajuste em malha aberta baseiam-se, normalmente, na curva de reação do processo, ou seja, a reação deste a uma perturbação em degrau na variável manipulada, na saída do controlador. Os seguintes passos são recomendados para se determinar a curva de reação do processo:

- 1) deixar o sistema no estado estacionário, em condições normais de carga;

- 2) colocar o controlador em manual;
- 3) ajustar manualmente a saída do controlador no valor em que estava durante a operação em automático;
- 4) fazer com que o sistema atinja o estado estacionário;
- 5) com o controlador ainda em manual, impor uma variação em degrau na saída do controlador ou seja, no sinal para a válvula;
- 6) registrar a resposta da variável controlada, através de um registrador dedicado;
- 7) retornar a saída do controlador para o valor inicial, e colocá-lo novamente em automático.

Como se percebe, é mais fácil obter a curva de reação do processo do que o ganho último.

A maioria dos métodos de sintonia em malha aberta baseia-se em aproximar a curva de reação do processo à resposta de um sistema mais simples. A forma mais comum de aproximação é aproximar-se a um sistema de primeira ordem mais tempo morto.

A curva da figura 10.45 ilustra este procedimento, considerando-se a curva de reação do processo a um degrau unitário na saída do controlador.

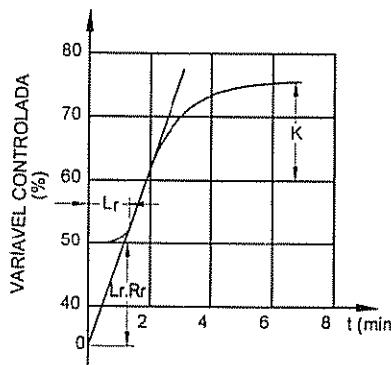


FIGURA 10.45 Curva de reação do processo a um degrau na saída do controlador.

A curva mostra um retardamento inicial na resposta da variável do processo (baixa velocidade de resposta), apresenta um ponto de inflexão, continua aumentando e tende para um valor final (estabilização). Traça-se uma tangente à curva no ponto de inflexão. A inclinação desta linha é denominada de taxa de reação (R_r). A intersecção desta reta com a curva de reação determina o chamado tempo morto (L_r), conforme mostrado na figura. Observa-se também o ganho K do processo.

Um dos primeiros métodos de sintonia baseados na curva de reação do processo foi também proposto por Ziegler e Nichols e modificado por Cohen e Coon.

Para Ziegler e Nichols basta a determinação de R_r e L_r a partir da curva de reação do processo. Os ajustes propostos por Ziegler e Nichols foram:

Controlador proporcional

- $K_c = 1/(L_r \cdot R_r)$.

Controlador Proporcional-Integral

- $K_c = 0,9/(L_r \cdot R_r)$,
- $\tau_i = 3,33 L_r$.

Controlador Proporcional-Integral-Derivativo

- $K_c = 1,2/(L_r \cdot R_r)$,
- $\tau_i = 2,0 \cdot L_r$,
- $\tau_d = 0,5 \cdot L_r$.

Ziegler e Nichols consideraram, em suas equações, processos não auto-reguláveis, ou seja, aqueles cujo valor da variável de processo aumenta indefinidamente para uma dada variação em degrau na entrada.

Cohen e Coon, por sua vez, introduziram um coeficiente denominado índice de auto-regulação, definido como $m = (R_r \cdot L_r)/K$.

Este termo pode também ser obtido a partir da curva de reação do processo. Os parâmetros sugeridos por Cohen e Coon foram, então:

Controlador Proporcional

- $K_c = (1 + \mu/3)/(R_r \cdot L_r)$.

Controlador Proporcional + Integral

- $K_c = 0,9 \cdot (1 + \mu/11)/(R_r \cdot L_r)$,
- $\tau_i = 3,33 L_r \cdot (1 + \mu/11)/(1 + 11 \cdot \mu/5)$.

Controlador Proporcional-Integral-Derivativo

- $K_c = 1,35 \cdot (1 + \mu m/5)/(R_r \cdot L_r)$,
- $\tau_i = 2,5 \cdot L_r \cdot (1 + \mu/5)/(1 + 3\mu/3)$,
- $\tau_d = (0,37 \cdot L_r)/(1 + \mu/5)$.

Os métodos de sintonia de controladores sempre objetivam a obtenção da melhor combinação possível dos parâmetros de ajuste. Deve-se ter em mente, também, que, qualquer que seja o método utilizado, normalmente são necessários reajustes dos parâmetros sempre que algum distúrbio acontece, devido à não linearidade dos processos. São necessários, nestes casos, ajustes não lineares ou adaptativos (sintonia adaptativa automática), o que significa que o sistema de controle percebe seu estado e, automaticamente, se auto-reajusta. Há sistemas que executam esta tarefa de forma automática, o que

não se justifica na grande maioria dos casos. Atualmente, com a utilização dos sistemas digitais de controle, há uma tendência de utilização de técnicas de sintonia automática.

A seguir, algumas considerações sobre os ajustes de cada parâmetro e seus efeitos:

- **ajuste da banda proporcional:** a diminuição da banda proporcional (aumento do ganho proporcional) aumenta a taxa de amortecimento, tornando o sistema menos estável;
- **ajuste da ação integral:** quando o tempo integral aumenta, a taxa de amortecimento diminui, tornando o sistema mais estável;
- **ajuste da ação derivativa:** o efeito desta ação de controle é o mais difícil de se prever. Iniciando-se com um tempo derivativo igual a zero, o aumento de seu valor é normalmente benéfico, havendo, porém, um limite.

10.12 CONTROLE EM CASCATA, CONTROLE DE RAZÃO, CONTROLE SELETIVO, CONTROLE EM RANGE ,DIVIDIDO (*SPLIT RANGE*)

Existem algumas técnicas não convencionais de controle que são utilizadas como recursos adicionais para melhorar o desempenho do processo, no que diz respeito à sua controlabilidade.

Com estas técnicas alternativas faz-se uma interligação entre malhas de controle, de forma que as mesmas interagem, possibilitando manter as variáveis de controle em faixas de valores mais estreitas.

Estes artifícios, entretanto, resultam em custos mais altos da automação do processo, devido à adição de componentes (*hardware* e *software*).

Deve-se, portanto, estudar cada caso, para certificar-se da real necessidade de aplicar técnicas de controle mais avançadas.

10.12.1 Controle em Cascata

Esta estratégia de controle é utilizada em situações em que uma única malha de controle de realimentação negativa não tem a precisão e a qualidade necessárias em determinadas situações, em função da importância do processo que está sendo controlado.

Aplica-se o controle em cascata quando os efeitos dos distúrbios sobre a variável manipulada afetam a variável controlada.

Para explicar o conceito desta técnica de controle, será utilizado o sistema de controle de temperatura da figura 10.46.

Nesta figura, o controlador (TIC) mantém a temperatura na saída do trocador, manipulando a vazão de vapor. Se, por qualquer motivo, a pressão da tubulação de vapor variar, o fluxo de vapor, através da válvula de controle, será afetado e, como consequência, também sofrerá variação a temperatura na saída do processo. Dependendo das características do processo, algum tempo poderá decorrer para que o controlador de temperatura

receba a informação de que a temperatura variou, e outro tempo levará até que o controlador processe a ação corretiva.

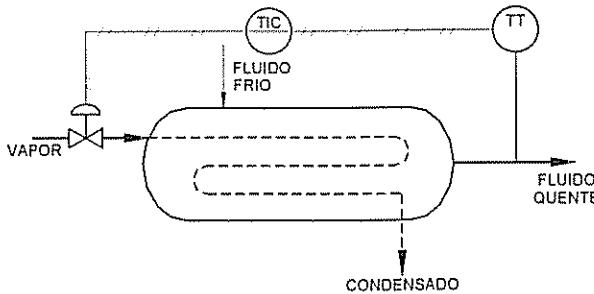


FIGURA 10.46 Controle de temperatura de um trocador de calor.

Somado a estes fatos, se a freqüência com que ocorram as perturbações na variável manipulada for grande, também será grande a freqüência de atuação da válvula de controle, e, por conseguinte, será mais difícil o controle da variável de processo.

O controle em cascata, neste caso, corresponde a instalar uma malha de controle de vazão de vapor, cujo valor desejado seja o ponto de ajuste enviado pelo controlador de temperatura.

A figura 10.47 ilustra o esquema de malhas deste sistema de controle em cascata:

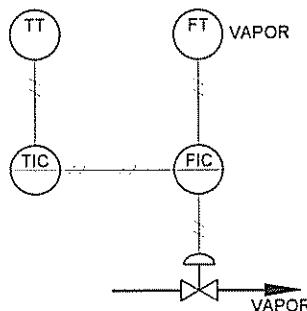


FIGURA 10.47 Esquema de malha do controle em cascata temperatura-vazão.

Neste esquema, cada controlador tem a sua variável medida, mas somente um deles atua sobre a variável manipulada. O sinal de saída do controlador de temperatura (TIC) é o ponto de ajuste do controlador de vazão de vapor (FIC), que, por sua vez, atua na válvula de controle de vapor. Há, desta forma, uma comparação entre o fluxo real de vapor com o fluxo solicitado pelo controlador de temperatura. Nesta configuração em cascata, o controlador de temperatura é chamado de controlador primário (mestre) e o controlador de vazão de vapor é designado como secundário (escravo).

Nesta situação, as variações que eventualmente ocorrem no fluxo de vapor serão detectadas e corrigidas pela malha secundária (malha de vazão), antes que possam afetar a malha principal (malha de temperatura). Outras variações que possam ocorrer

afetando a temperatura, como, por exemplo, a vazão do fluido a ser aquecido, serão corrigidas pela atuação do controlador de temperatura, uma vez que este atuará no ponto de ajuste do FIC, no sentido de manter a temperatura no valor desejado.

A função principal do controle em cascata é compensar os efeitos das perturbações que ocorrem na variável manipulada. Esta estratégia de controle só será efetiva se a velocidade de resposta da malha secundária for maior do que a da malha principal, o que acontece, de fato, em nosso exemplo, pois a malha de controle de vazão de vapor age mais rapidamente que a malha de controle de temperatura.

Um outro exemplo típico, e que ilustra bem esta estratégia de controle em cascata, é o controle de nível por realimentação, com base na manipulação da vazão de saída do tanque (figura 10.48).

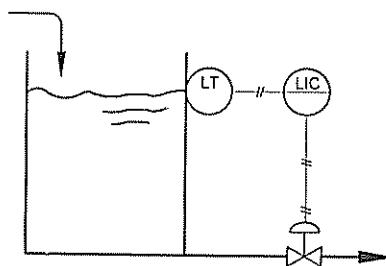


FIGURA 10.48 Controle de nível de um tanque.

Neste tanque, uma mudança na vazão de entrada provocará alteração do nível, fazendo com que o controlador atue sobre a válvula de descarga, até que o nível seja restabelecido (volta ao valor desejado). Se houver um outro distúrbio, como, por exemplo, variação na pressão à saída da linha de descarga, haverá, como consequência, alteração na vazão de descarga e, portanto, afetando o nível do tanque. O controlador responderá corrigindo a posição da válvula de controle, restabelecendo o nível. Este controle, que atende à maioria das aplicações, pode ser melhorado para atender a aplicações específicas que necessitem de um controle mais preciso. Nesta situação (como, por exemplo, o controle de nível do produto de fundo de uma coluna de destilação), o controle em cascata se aplica de forma muito adequada, para melhorar a resposta em caso de distúrbios específicos.

Um sistema de controle em cascata, neste caso, utiliza um controlador de vazão na linha de descarga, com o controlador de nível gerando um ponto de ajuste para o controlador de vazão, como mostrado na figura 10.49.

Para um aumento na vazão de entrada o nível aumentará, bem como a saída do controlador de nível, que será o ponto de ajuste para o controlador de vazão de saída. Desta forma, o controlador de vazão solicita a abertura da válvula de descarga de produto, fazendo com que o nível retorne ao valor desejado. Neste caso, a atuação do sistema de controle em cascata apresenta o mesmo resultado que o controle direto, ou seja, com o controlador de nível atuando diretamente sobre a válvula de saída do tanque.

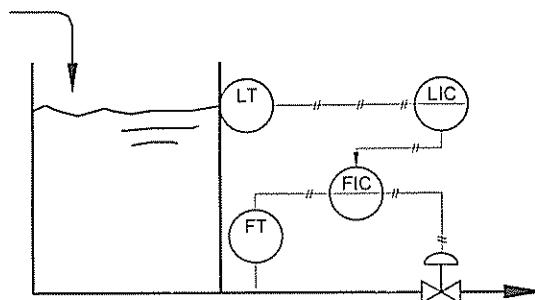


FIGURA 10.49 Controle de nível de um tanque em cascata nível-vazão.

Porém, para uma mudança na pressão a jusante da linha de saída, verifica-se que a atuação do controle em cascata se dá de forma diferente. A mudança da vazão, como consequência da alteração de pressão, fará com que o controlador de vazão ajuste a válvula de saída antes que o nível do tanque seja afetado de forma significativa. Este é o motivo principal para se aplicar o controle em cascata, ou seja, ele cuida dos distúrbios antes que eles afetem a variável principal.

Da mesma forma que no controle de temperatura do trocador de calor, neste controle de nível do tanque em cascata com a vazão de saída do mesmo, caracterizam-se duas malhás de controle, tais como a malha principal (malha de nível-mestre) e a malha secundária (malha de vazão-escrava).

Ainda vale ressaltar que, também neste caso de controle de nível em cascata com a vazão, a malha de controle secundária deve ser mais rápida do que a malha de controle primária. De fato, a velocidade de resposta da malha de controle de vazão é maior do que a velocidade da malha de controle de nível.

10.12.2 Controle de Razão

Alguns processos industriais necessitam manter duas ou mais vazões numa determinada proporção, como, por exemplo, mistura de aditivos à gasolina, mistura proporcional de reagentes num reator químico, mistura de fluidos a diferentes temperaturas para obtenção de uma dada temperatura de mistura e outros.

Um bom exemplo de um processo típico para a utilização de um controle de razão é a adição de chumbo tetraetila à gasolina, para manutenção da octanagem da mesma, uma vez que o índice de octanas é função da razão mantida entre as quantidades de chumbo tetraetila e de gasolina.

O controle de razão constitui-se num caso elementar de controle por antecipação. Uma variação de carga na entrada do sistema (vazão de gasolina), causa uma variação na octanagem, o que pode ser evitado com um controle apropriado da variável manipulada, ou seja, a vazão de aditivo.

O controle de razão encontra aplicação quase que exclusivamente em ajuste de vazões. Considere manter certa razão R de um produto B para um produto A :

$$R = B/A$$

Há duas maneiras de se processar esta razão. O método mais comum considera uma malha de controle que manipula uma vazão cujo valor desejado é dado por $B = R \cdot A$.

A figura 10.50, ilustra este sistema de controle de razão de aditivo (fluído B) à gasolina (fluído A).

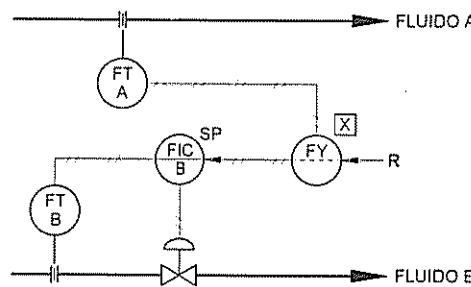


FIGURA 10.50 Controle de razão do fluido B para o fluido A.

Nota-se que a vazão do fluido A é enviada pelo transmissor para um relé que, neste caso, é denominado de estação de razão ou estação de relação. Neste instrumento, introduz-se manualmente o valor R da razão desejada, e é feito o produto $R \times A$. Este produto é o valor desejado do controlador de vazão do fluido B, onde é feita a comparação da vazão do fluido B com o valor $R \cdot A$. A saída do controlador FIC-B manipula a vazão do fluido B, de modo a manter a razão B/A no valor desejado.

O segundo modo de manter a razão entre estas duas variáveis é calcular R por medição individual de cada fluxo, enviando as duas vazões para um relé divisor. A saída deste relé leva a razão a um controlador de razão, cujo ponto de ajuste é fixado como R . Qualquer variação na razão entre as duas vazões é detectada por este controlador, que manipula a vazão de B para manter o valor de R .

A figura 10.51 ilustra este esquema de controle.

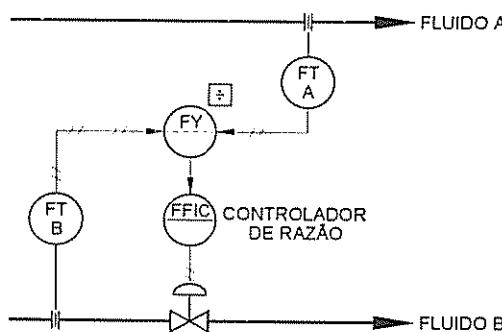


FIGURA 10.51 Controle de razão utilizando um controlador de razão.

Um outro exemplo de controle de razão, utilizando-se o primeiro método ilustrado, é a mistura de dois fluidos frio e quente, para obter-se, na saída, uma determinada

temperatura da mistura. Neste caso, há que se ter uma razão bem determinada entre as vazões dos dois fluidos (Q_f e Q_q), para que se garanta a temperatura desejada da mistura.

O esquema de controle, nesse caso, é mostrado na figura 10.52.

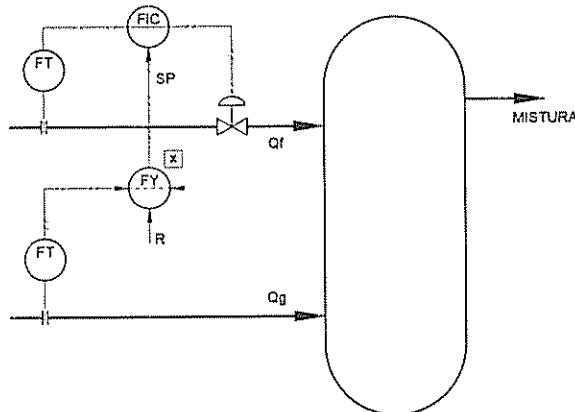


FIGURA 10.52 Controle de razão Q_f/Q_q num processo de mistura.

Um balanço material e de energia para este processo, conduz ao valor da razão necessária para se atingir a temperatura desejada na saída.

10.12.3 Controle Seletivo

Para cada variável controlada num sistema de controle, há pelo menos uma variável manipulada. Em muitos sistemas, porém, a quantidade de variáveis de controle supera a quantidade de variáveis manipuladas. Nestes casos, o sistema deve decidir como compartilhar as variáveis manipuladas, em função das necessidades do processo. Esta comunicação entre as variáveis pode ser efetuada de forma suave por meio de dispositivos denominados seletores de sinal.

Estes seletores escolhem, em geral, o menor e o maior sinal dentre dois ou mais sinais. Estes seletores são disponíveis no mercado tanto em forma de instrumentos analógicos como microprocessados, normalmente utilizados em sistemas digitais. Uma malha de controle que contenha este tipo de lógica é denominada controle seletivo.

São muito comuns na indústria sistemas de controle contendo intertravamentos, para evitar ou eventualmente provocar a parada automática de equipamentos, na existência de condições perigosas que possam pôr em risco o processo.

Normalmente, as paradas de emergência são evitadas, tomando-se ações corretivas antes que ocorram condições extremas. Para estas funções, o controle seletivo exerce importante papel.

São exemplos de condições perigosas que devem ser evitadas:

- 1) **inundação (flooding)** numa coluna de destilação – atua-se, por exemplo, na taxa de alimentação da coluna;

- 2) pressão ou temperatura alta num reator químico – atua-se reduzindo a entrada de calor;
- 3) baixo teor de oxigênio nos gases de saída de uma fornalha – atua-se reduzindo a vazão de combustível;
- 4) alta pressão na linha principal de vapor – atua-se desviando o vapor para uma linha de menor pressão.

Em todas estas situações de anormalidade, o controle normal é sobreposto por um controlador secundário que tem, portanto, prioridade no controle.

Um exemplo de controle seletivo pode ser visto na figura 10.53, na qual o sistema de controle protege um reator contra sobrepressão, reduzindo-se a entrada de calor no sistema.

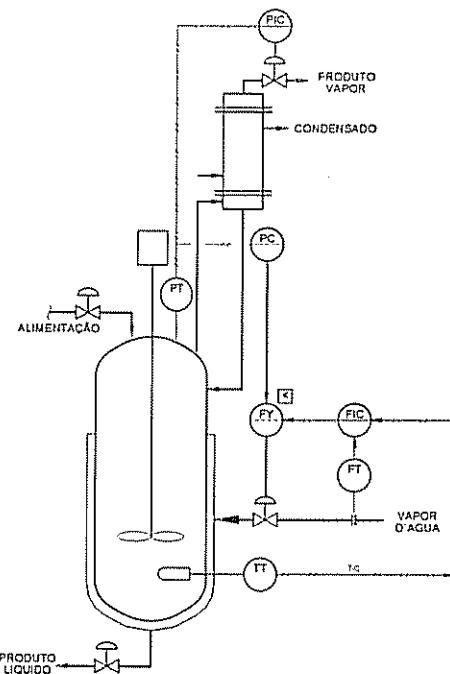


FIGURA 10.53 Controle seletivo: pressão alta comanda o desvio do controle do vapor.

O vapor é normalmente manipulado para controlar a temperatura do reator, mas quando a capacidade de condensar os vapores de topo diminui, causando o aumento da pressão, o controlador de pressão alta (PC) assume o controle da vazão de vapor d'água. Esta lógica é levada a efeito pelo controlador de pressão alta e um seletor de alta.

Outro exemplo característico de controle seletivo é o clássico controle de combustão com limites cruzados, cujo esquema de malhas é visto na figura 10.54.

Reportando-se ao controle de combustão de uma caldeira, um dos métodos de controle da combustão, com a finalidade de gerar vapor, é aquele baseado na medição da pressão do vapor gerado, da vazão de óleo combustível e da vazão de ar de combustão.

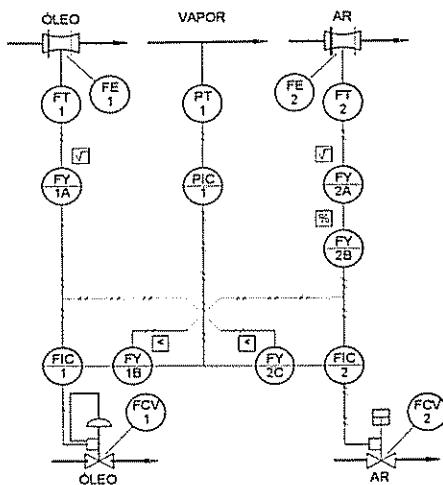


FIGURA 10.54 Controle seletivo: controle de combustão com limites cruzados.

Neste sistema de controle de combustão, a pressão de vapor deve ser mantida num certo valor com o mínimo possível de variação. Este sistema de controle possui dois relés seletores que comandam todo o princípio de funcionamento da malha de controle.

O sistema contém um relé seletor de sinal baixo e um relé seletor de sinal alto, e tem como função comparar os dois sinais que recebem e permitir a passagem de um dos dois. Assim, por exemplo, o seletor de sinal baixo recebe dois sinais e deixa passar o sinal de menor valor.

Para analisar o funcionamento desta malha de controle de combustão com limites cruzados, considera-se que o sistema encontra-se no estado estacionário (em equilíbrio).

O sinal de saída do controlador de pressão de vapor será o ponto de ajuste dos controladores de vazão de óleo combustível e de ar de combustão. Este sinal será selecionado e sua passagem controlada pelos seletores de sinal alto e baixo, sendo enviados aos controladores de vazão de combustível e de ar.

Seja, por exemplo, um aumento de demanda (consumo) de vapor. O transmissor de pressão informará ao controlador que a pressão de vapor diminuiu. Este controlador tem ação inversa, ou seja, se o sinal de entrada diminui, seu sinal de saída aumenta. Deste modo, para a diminuição de pressão, em função do aumento da demanda, a saída do controlador de pressão aumenta. Este sinal de saída do controlador de pressão chega, então, aos dois relés seletores.

No relé seletor de sinal baixo não haverá alteração no seu sinal de saída, prevalecendo o sinal original, ou seja, o sinal do controlador de vazão de ar que continua passando por este seletor e continua comandando a vazão de combustível.

No relé seletor de sinal alto, devido ao aumento do sinal proveniente do controlador de pressão de vapor, sua saída será dada em função deste novo valor, maior

que o sinal original que ele estava recebendo. Este relé seletor de sinal alto deixará passar o sinal do controlador de pressão de vapor, que irá comandar o ajuste do controlador de vazão de ar de combustão, o qual terá seu sinal de vazão aumentado. Como consequência, a vazão de ar de combustão terá seu valor aumentado. Este aumento de vazão de ar, realimentado ao sistema, é enviado também ao seletor de sinal baixo que, como tinha sua saída dada por este sinal, faz a vazão de óleo combustível aumentar até que o sistema encontre novamente o equilíbrio.

Caso haja uma diminuição na demanda de vapor, acontecerá o inverso, isto é, primeiramente haverá uma diminuição da vazão de combustível, seguida pela diminuição da vazão de ar de combustão.

O que se nota, portanto, é que nos aumentos de demanda de vapor a vazão de ar aumenta primeiro, para depois aumentar a vazão de óleo combustível. Na diminuição da demanda, porém, primeiro diminui a vazão de combustível, para depois diminuir a vazão de ar. Verifica-se que nos dois casos (aumento ou diminuição da demanda), é mantido sempre um excesso de ar em relação ao combustível. Esta dinâmica é possível de ser atendida, com a utilização do controle seletivo.

10.12.4 Controle em Faixa Dividida (*Split-range*)

Este tipo de controle envolve normalmente duas válvulas de controle operadas pelo mesmo controlador. O controle em faixa dividida ou, em inglês, chamado *split-range*, aplica-se tanto ao controle de uma dada variável ligada ao processo, propriamente dito, ou em aplicações em que se impõem limites de segurança.

A figura 10.55 mostra um controle de temperatura utilizando dois trocadores de calor instalados em série.

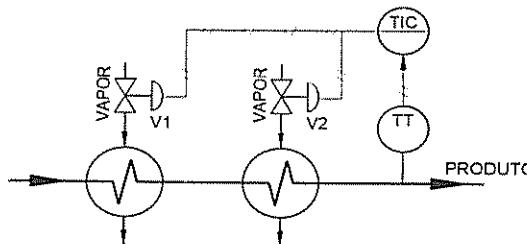


FIGURA 10.55 Controle de temperatura em faixa dividida.

Como a vazão do produto sofre muita variação, utilizam-se dois trocadores de calor. Quando a vazão é baixa, apenas um trocador é suficiente para aquecer o produto, e, quando a vazão for alta, serão utilizados os dois trocadores de calor.

Será assumido que, sob o ponto de vista de segurança do processo, as válvulas devem fechar na falta de ar, ou seja, operam com ar para abrir. Nestas condições, o controlador deverá ser de ação inversa, pois quando a temperatura aumentar, a saída do controlador diminui, e a válvula, com o ar diminuindo, fecha para compensar o aumento de temperatura.

Se a vazão do produto for baixa, a primeira válvula de vapor atuará, com o sinal de saída do controlador atuando entre 50% e 100% (0,6 e 1,0 kgf/cm²), abrindo total-

mente a primeira válvula, à medida em que a vazão for aumentando. A válvula estará totalmente aberta para um sinal de saída igual a $1,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Com o aumento de consumo do produto, o controlador de temperatura diminui a sua saída e, quando tivermos um sinal menor do que 50%, a primeira válvula estará totalmente aberta e, então, a segunda válvula começará a abrir, iniciando a operação do segundo trocador de calor. Com a vazão em seu valor máximo, as duas válvulas estarão totalmente abertas e os dois trocadores estarão operando com o rendimento máximo.

Um outro exemplo típico de aplicação desta técnica de controle em faixa dividida é no controle de pressão de um tanque através da injeção de nitrogênio (N_2), como mostrado na figura 10.56.

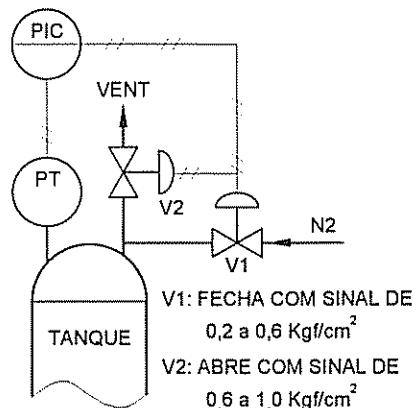


FIGURA 10.56 Controle de pressão em faixa dividida.

O controlador de pressão neste sistema tem ação direta, ou seja, a saída aumenta quando a pressão do tanque aumenta.

Nesse tanque há uma linha de entrada de N_2 , na qual está instalada uma válvula de controle que trabalha aberta, com sinal de $0,2 \text{ kgf/cm}^2$, fechando com aumento da pressão, estando totalmente fechada quando a pressão atingir $0,6 \text{ kgf/cm}^2$.

A outra linha destina-se à saída de N_2 (alívio da pressão), permanecendo fechada desde $0,2$ até $0,6 \text{ kgf/cm}^2$, quando, então, neste último valor de pressão, começa a abrir, estando totalmente aberta com um sinal de $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ no atuador.

Com a pressão do tanque no valor desejado, a válvula de admissão de N_2 deverá estar totalmente aberta, e a válvula de alívio de nitrogênio totalmente fechada, de modo a manter a pressão. Se a pressão do tanque baixar, a válvula de entrada de nitrogênio começa novamente a abrir, injetando N_2 no tanque, no sentido de restabelecer a pressão no mesmo. Se, eventualmente, a pressão no tanque aumentar, de modo a superar o valor desejado com a válvula de admissão totalmente fechada, a válvula de alívio de N_2 , até então fechada, começa a abrir a partir de $0,6 \text{ kgf/cm}^2$, no sentido de fazer a pressão baixar novamente até atingir o valor desejado.

Normalmente na passagem de uma condição limite, até a entrada da segunda válvula (alívio de N_2), é comum operar-se com uma faixa morta de aproximadamente 5%. Esta porcentagem varia de aplicação para aplicação.

10.13 REFERÊNCIAS

- Bela G. Lipták; Kriszta Venczel, *Instrument Engineers' Handbook – Process Control*, Chilton Book Company, Radnor Pennsylvania, 1985.
- Coughanowr & Koppel, *Process Systems Analysis and Control*, International Student Edition, McGraw-Hill Book Co., 1965.
- W G. Andrew, *Applied Instrumentation in the Process Industries*, Gulf Publishing Co., Houston, 1974.
- Robert A. Mollenkamp, *Controle Automático de Processos*, EBRAS – Editora Brasileira, Smar Equipamentos Industriais, 1988.
- Nelson Simões Filho, *Instrumentação para Automatização em Caldeira*, Editora Acadêmica, São Paulo, 1988.
- Egídio A. Bega, *Instrumentação e Controle Aplicado a Caldeiras* – Editora Interciência, Edição 2003.

RECEPTORES

ENGº RICARDO KOCH

11.1 INTRODUÇÃO

Os instrumentos denominados receptores têm, basicamente, a função de processar os sinais recebidos dos elementos detectores das variáveis de processo ou, alternativamente, dos transmissores destas variáveis. De um jeito ou de outro, os receptores possuem circuitos apropriados para receber, condicionar e processar os sinais de entrada, de modo a executar funções auxiliares no controle e monitoração dos processos industriais.

O tipo de sistema de controle a ser adotado para o processo, bem como a filosofia de controle, são itens que devem ser considerados nesta análise. A transição da instrumentação pneumática para a eletrônica analógica, da eletrônica analógica para a digital, e, principalmente, a fase atual dos microprocessadores, têm exercido muita influência no modo de processar os sinais de campo pelos receptores.

Sabemos que, na atualidade, os sistemas pneumáticos restringem-se praticamente às peças de reposição para os sistemas ainda existentes. Entretanto, não se pode deixar de citá-los, ainda que pouco representem quanto às funções de monitoração e controle. Os receptores pneumáticos contêm, basicamente, amplificadores de sinal, foles, ligações mecânicas, constituindo-se de verdadeiros "elementos de relojoaria", como igualmente denominados em nosso estudo de controle.

Os sistemas eletrônicos analógicos, em quantidade bem maior do que os correspondentes pneumáticos, têm suas funções executadas por circuitos eletrônicos compostos de transistores, resistores, diodos etc.

Os sistemas digitais, por sua vez, atualmente cada vez mais presentes nos sistemas de automação, executam as mesmas funções dos receptores convencionais, porém de forma totalmente diferente, ou seja, através de programação (*software*).

A diferença básica, em função do sistema adotado, está na forma de processamento e apresentação dos resultados. Para ilustrar o que estamos afirmando, podemos citar uma função básica de extração de raiz quadrada no caso, por exemplo, de medição de vazão com placa de orifício.

Sabe-se, nesse caso, que o sinal de saída do transmissor representa o quadrado da vazão, sendo necessário extraír a raiz para ter sua apresentação numa escala linear. Num sistema convencional, seja pneumático ou eletrônico, este cômputo é efetuado pelo correspondente mecanismo ou circuito, através de um instrumento dedicado, e que normalmente está localizado no interior de um painel de controle. Num sistema digital, numa das possíveis configurações, o sinal do transmissor é enviado a um cartão de entrada analógica, convertido para um sinal digital e, a seguir, é processado por programação, de modo a executar o cálculo da raiz, ou qualquer outra função como comparação com outro sinal, estabelecer limites de alarmes e intertravamentos, ativando saídas do sistema para comandos externos etc.

A forma com que estas funções de cômputo são executadas, entretanto, não influem nos resultados do controle de processo. O objetivo é destacar os tipos de instrumentos e dispositivos disponíveis para a execução destas funções, sendo enfatizados os instrumentos convencionais.

Neste livro, os sistemas digitais são abordados no capítulo 12 (CLP – Controladores Lógicos Programáveis), capítulo 13 (SDCD – Sistemas Digitais de Controle Distribuído) e capítulo 14 (Intertravamento e Sistemas de Segurança) com a devida profundidade.

11.2 TRANSDUTORES E CONVERSORES

Os transdutores e conversores compreendem uma grande variedade de aparelhos cujo papel, na instrumentação e controle de processo é possibilitar a interligação entre equipamentos eletrônicos e pneumáticos, integrar diferentes níveis de sinais e converter sinais obtidos por sensores em outras formas de sinais mais fáceis de serem transmitidos.

A medida das variáveis de processo é feita, normalmente, por elementos primários que, na maioria dos casos, as transformam em grandezas de outra espécie, como sinais pneumáticos, elétricos, deslocamentos mecânicos e outros, que são mais fáceis de transmitir à distância. Aos elementos que produzem esta transformação dá-se o nome de transdutores. Estes dispositivos estão freqüentemente associados a mecanismos de transmissão, com a finalidade de enviar o sinal aos instrumentos receptores (controladores, indicadores, registradores etc.), para observação pelo operador que monitora o processo. Estes dispositivos são conhecidos como instrumentos auxiliares.

Os termos transdutores e conversores são, de certo modo, utilizados de forma alternativa, dependendo de sua aplicação no processo. Os primeiros tipos de instrumentos auxiliares introduzidos na indústria foram os eletropneumáticos, com o surgimento dos controladores eletrônicos, tendo em vista que os sinais destes controladores, para serem recebidos pelas válvulas de controle, devem ser transformados em sinais pneumáticos. São os instrumentos designados como transdutores I/P que, em geral, são instalados no campo, mas que podem eventualmente ser instalados internamente em painéis, como verdadeiros receptores, transformando sinais provenientes de transmissores eletrônicos que enviam sinais para instrumentos pneumáticos. A maioria dos dispositivos, porém, converte formas ou níveis de sinais eletrônicos em sinais elétricos, ou sinais pneumáticos em sinais eletrônicos, recebem normalmente a designação de conversores.

Atualmente, há uma padronização maior dos tipos e níveis de sinais, diminuindo, assim, a necessidade de instalação destes conversores ou transdutores, fato também devido à presença cada vez maior dos sistemas digitais, que executam as funções equivalentes via programação.

Até algum tempo atrás, entretanto, a diversidade destes instrumentos era maior, disponibilizando conversores 1-5 VCC para 4-20 macc, mV de termopares para 4-20 macc, 0-10 mV para 4-20 macc, W para macc etc.

Outro grupo bem definido de conversores foi introduzido no mercado quando começou a surgir a necessidade de comunicação dos instrumentos eletrônicos com sistemas digitais e computadores propriamente ditos. São os conversores analógicos/digitais e digitais/analogicos.

A figura 11.1 mostra um exemplo de conversor eletrônico para instalação interna em painel.

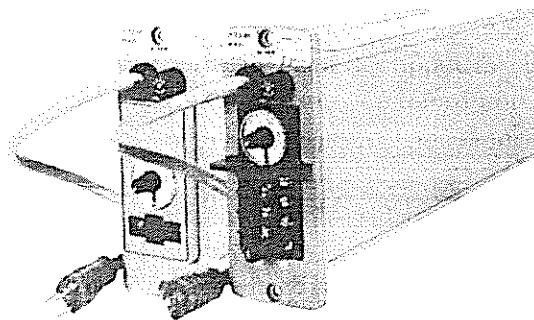


FIGURA 11.1 Conversor eletrônico.

Há casos em que o elemento primário de medição já fornece um sinal elétrico como os termopares, termorresistências, detectores piezoeletricos, eletrodos de pH etc., permitindo-se a transmissão direta do próprio sinal primário. Muitas vezes, porém, nos casos de transmissão à distâncias mais longas ou mesmo por questões de uniformização, estes sinais elétricos primários são transformados em outros níveis padronizados.

A seguir, apresentamos os principais tipos de transdutores/conversores utilizados.

11.2.1 Transdutores de Corrente para Pneumático

O sinal de entrada nestes transdutores (I/P) é normalmente 4 a 20 macc, que circula por uma bobina, criando uma força mecânica. Esta força movimenta um sistema bico palheta que converte este movimento numa pressão de saída correspondente. Estes transdutores possuem uma alimentação pneumática padronizada, normalmente em $1,2 \text{ kgf/cm}^2$. O sinal de saída mais comum de ser encontrado nestes transdutores é de 0,2 a $1,0 \text{ kgf/cm}^2$. Outras faixas podem, entretanto, ser encontradas, dependendo da aplicação.

A maior aplicação destes transdutores está associada ao acionamento de válvulas de controle, seja na entrada de posicionadores pneumáticos, ou diretamente nos atuadores das válvulas.

A figura 11.2 ilustra este tipo de transdutor (I/P).

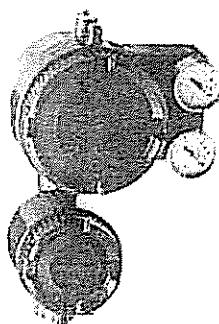


FIGURA 11.2 Transdutor corrente-pneumático (I/P).

11.2.2 Conversores Pneumáticos para Corrente

Os conversores pneumáticos para corrente (P/I) são utilizados quando há a necessidade de converter sinais pneumáticos para eletrônicos. A figura 11.3 mostra este conversor e, também, um esquema de funcionamento do mesmo.

Muitas vezes, numa ampliação ou modificação de uma dada instalação existente, necessita-se instalar controladores eletrônicos ou qualquer sistema eletrônico de aquisição de dados, a partir de transmissores pneumáticos que não se pretende desativar naquele momento. Surge, então, uma aplicação muito comum deste tipo de conversor.

Aplicam-se, também, quando se tem uma instalação pneumática local e os sinais devem ser transmitidos à uma grande distância. A conversão do sinal de pneumático para eletrônico é efetuada, portanto, através de um conversor P/I.

O sinal pneumático de entrada mais comum de ser utilizado é 0,2 a 1,0 kgf/cm², e a saída eletrônica mais comum é padronizada na faixa 4 a 20 macc.

O sinal de pressão de entrada incide numa cápsula com boa precisão ($\pm 0,25\%$), e o movimento é transmitido a um transformador diferencial linear variável (LVDT – em inglês, *Linear Variable Differential Transformer*) que converte o sinal de pressão aplicado à cápsula em sinal de saída eletrônica. As operações efetuadas pelos circuitos eletrônicos são, atualmente, em estado sólido.

A conexão pneumática destes instrumentos é, normalmente, de $\frac{1}{4}$ " NPTF, e a conexão para o sinal eletrônico de $\frac{1}{2}$ " NPTF.

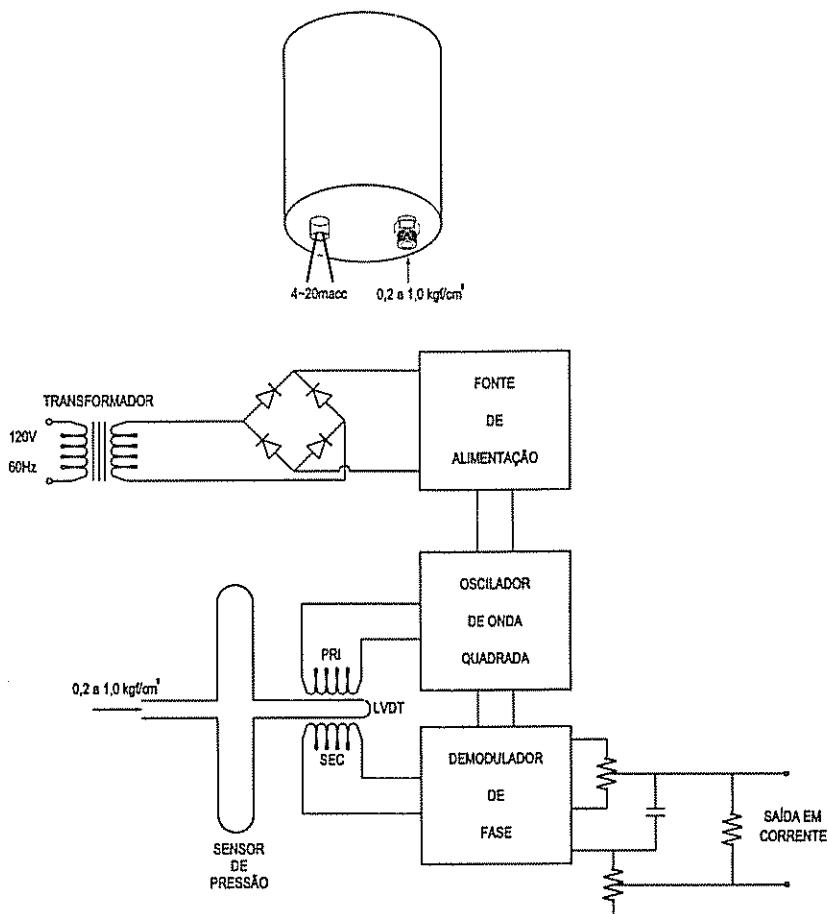


FIGURA 11.3 Conversor pneumático para corrente (P/I).

11.2.3 Conversores de Tensão para Corrente

Os conversores de tensão para corrente (E/I) são largamente utilizados nas indústrias de processo, para converter os sinais de tensão em corrente elétrica. Os sinais de entrada são normalmente em milivolts (mV), provenientes de sensores de temperatura do tipo termopar. A saída em corrente é, normalmente, padronizada na faixa de 4 a 20 macc, podendo, também, obter-se faixas de 10 a 50 macc ou em tensão de 1-5 Vcc.

Analisadores e outros equipamentos podem requerer conversores E/I para alterar suas saídas para transmissão à distância.

Conversores E/I utilizados para sinais de entrada de termopares possuem, normalmente, compensação interna de temperatura e proteção contra ruptura do termopar. A alta impedância de entrada destes conversores permite a utilização de longos percursos dos fios do termopar, sem comprometimento da precisão.

A figura 11.4, ilustra um esquema do circuito de um conversor E/I.

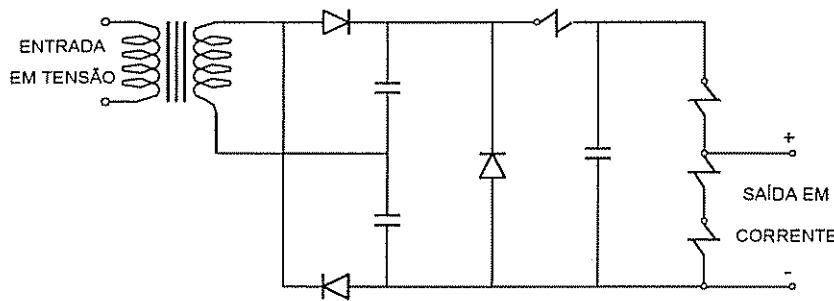


FIGURA 11.4 Esquema do circuito de um conversor E/I.

11.2.4 Conversores de Tensão para Pressão

Este tipo de conversor é utilizado freqüentemente em:

- saídas de termopares;
- saídas de sistemas de cromatografia;
- saídas de *strain gauge*;
- saída de transmissores de velocidade;
- saídas de controladores eletrônicos;
- outras aplicações com saída em tensão.

Um diagrama de blocos deste tipo de conversor é mostrado na figura 11.5 a seguir.

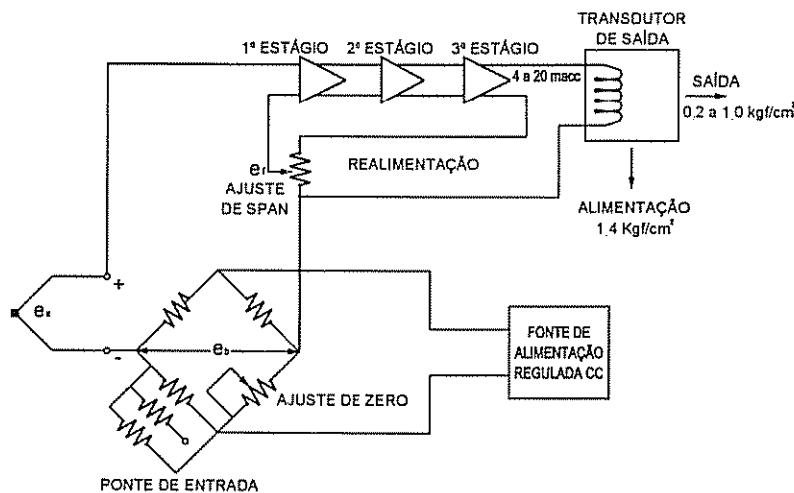


FIGURA 11.5 Diagrama esquemático de um conversor E/P.

A entrada em milivoltos e_x é somada à tensão de saída da ponte de resistores de entrada (e_b) e ao sinal de realimentação negativa e_f . O sinal resultante é amplificado para um sinal de 4 a 20 macc que aciona o transdutor de saída.

A ponte de entrada proporciona elevação ou supressão de zero, para faixas de medição que não começam em 0 mV, e prevê compensação de junta de referência para medições de temperatura.

O sinal de realimentação permite uma operação estável do amplificador e uma impedância de entrada compatível com sinais de termopares e outros sinais de milivolts. O amplificador consiste de um amplificador magnético diferencial de entrada, um amplificador magnético de auto-saturação no segundo estágio e um estágio de saída transistorizado, que aciona o transdutor de saída. Este transdutor, por sua vez, utiliza um sistema bico-palheta para obter o sinal pneumático de saída, normalmente na faixa 0,2 a 1,0 kgf/cm².

11.2.5 Conversores de Corrente para Corrente

Estes conversores de corrente para corrente (I/I) são utilizados para alterar sinais em corrente alternada ou contínua, aumentando-se ou diminuindo-se o nível dos sinais.

Estes conversores encontraram muita aplicação, há algum tempo atrás, na conversão de sinais de 4 a 20 macc em 10 a 50 macc e vice-versa. Atualmente, a maior aplicação é na conversão de sinais de corrente proveniente de transformadores em centros de controle de motores, com o objetivo de transformar o valor desta corrente para um valor mais baixo e compatível com instrumentos de indicação, registro etc.

Quando se deseja efetuar a indicação da corrente de um motor elétrico num painel de controle, utiliza-se, no centro de controle de motores, um transformador de corrente que converte o valor da corrente do motor para, por exemplo, 0 a 5 A. Para que este valor seja transmitido ao painel de controle, utiliza-se um conversor I/I, que transforma a corrente na faixa de 0 a 5 A para 4 a 20 macc, compatível com os instrumentos receptores instalados no painel de controle.

11.3 RELÉS DE COMPUTAÇÃO E RELÉS ELETRÔNICOS DE ALARME

A monitoração e controle de processos requer, muitas vezes, além das conversões de sinais, determinadas operações de cômputo ou computação (será empregado o termo computação).

São instrumentos que recebem, em geral, um ou dois sinais, processam algumas operações matemáticas, obtendo-se saídas modificadas de acordo com estas operações. Embora o termo relé tenha um sentido muito mais amplo, é esta a designação usualmente atribuída a estes instrumentos, ou seja, relés de computação.

A função destes relés de computação é executar operações de soma, subtração, multiplicação e divisão de sinais, operações de comparação de sinais, seleção de valor maior, menor, extração de raiz quadrada e outras operações.

11.3.1 Relés Pneumáticos de Multiplicação e Divisão

A figura 11.6 mostra o esquema de um relé de multiplicação e divisão pneumático, consistindo de um mecanismo de equilíbrio de forças.

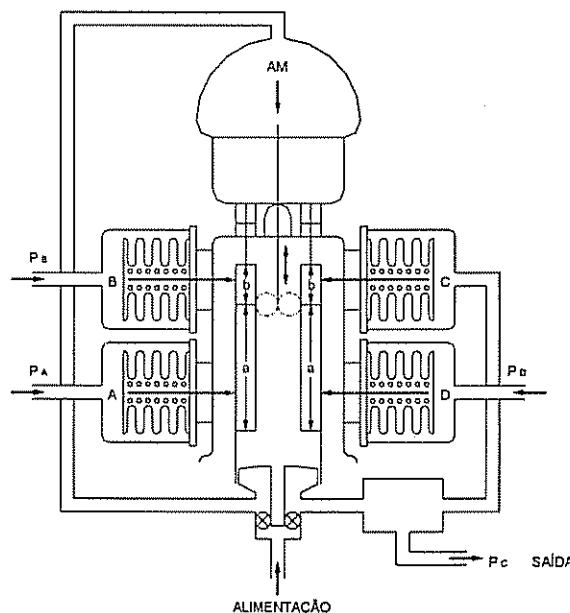


FIGURA 11.6 Relé pneumático de multiplicação e divisão.

Neste dispositivo agem, na entrada, as pressões nos foles A, B e D. A saída é realimentada através do fole C. A ponte formada por este sistema consiste de duas barras apoiadas num ponto de apoio móvel, com cada barra operando uma malha em realimentação separada. Qualquer desequilíbrio no sistema da esquerda causa um movimento do ponto de apoio, até que o equilíbrio seja restabelecido. Um desequilíbrio de forças no sistema da direita causa uma variação na pressão de saída, até que o equilíbrio seja também restaurado.

As equações que traduzem a operação deste sistema são as seguintes:

$$A \times a = B \times b \quad \text{e} \quad D \times a = C \times b$$

A equação se reduz a $A \times C = B \times D$, sendo $C = (B \times D)/A$.

A multiplicação acontece quando as duas variáveis de entrada são conectadas às câmaras B e D. A divisão ocorre quando o dividendo for ligado à câmara B ou D, e o divisor conectado à câmara A. Se as três câmaras A, B e D forem utilizadas, ocorre a multiplicação e a divisão.

11.3.2 Relés Eletrônicos de Multiplicação e Divisão

Na figura 11.7 consta o esquema de um relé eletrônico de multiplicação e divisão. As entradas e_1 e e_2 são multiplicadas na ponte de diodos e a condução da ponte depende do valor das entradas. A saída e_0 é amplificada e filtrada, e sua tensão contínua será proporcional ao produto entre e_1 e e_2 .

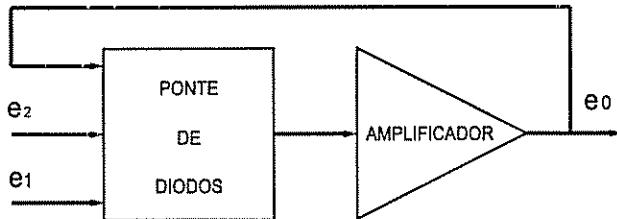


FIGURA 11.7 Relé eletrônico de multiplicação.

Adicionando-se uma outra ponte de diodos, o circuito torna-se um multiplicador e divisor, conforme ilustra a figura 11.8.

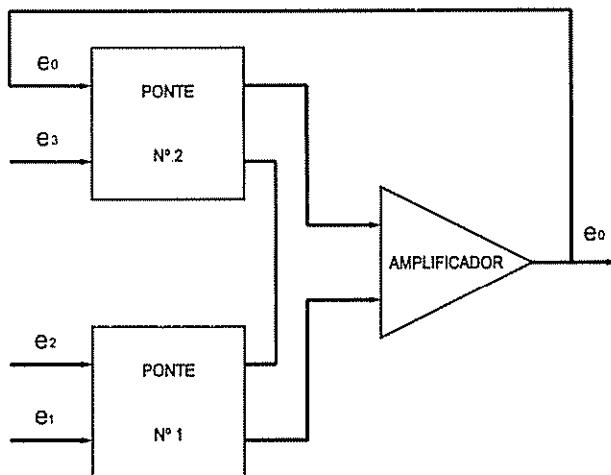


FIGURA 11.8 Relé eletrônico de multiplicação e divisão.

Desta forma, a equação resultante é $e_0 = (e_1 \cdot e_2) / e_3$.

11.3.3 Relés Pneumáticos de Soma e Subtração

A figura 11.9 mostra um relé de cômputo pneumático de soma e subtração. A câmara A aplica uma pressão no diafragma superior, agindo de cima para baixo. Um sinal na câmara B também age para baixo em uma área anular de diafragma, de área unitária. Os sinais nas câmaras C e D agem de forma semelhante para cima, em áreas unitárias. Qualquer desequilíbrio

de forças move o conjunto de diafragmas juntamente com o assento do bocal. Este movimento faz alterar a contrapressão no bocal e, consequentemente a pressão de saída, que é realimentada à câmara D, até que o equilíbrio seja resgatado. A equação básica que representa a operação deste relé é:

$$T = A + B - C \pm K,$$

onde K é a constante da mola e é ajustada normalmente num valor aproximado de 1,2 bar.

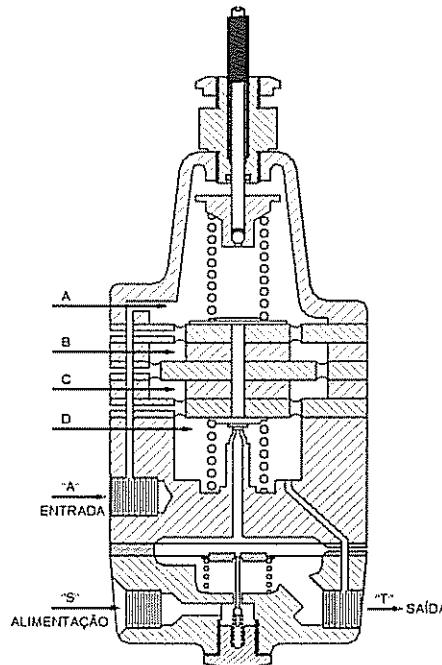


FIGURA 11.9 Relé de cômputo pneumático de soma e subtração.

11.3.4 Relés Eletrônicos de Soma e Subtração

Da mesma forma que os pneumáticos, temos os relés de soma e subtração eletrônicos, obviamente com a mesma função, porém, com as operações efetuadas por circuitos eletrônicos.

Na figura 11.10, as duas tensões de entrada são comparadas num comparador múltiplo que produz uma saída ao amplificador. O trajeto da corrente das duas entradas pode ser o mesmo ou oposto, de modo a configurar a soma ou a subtração dos sinais.

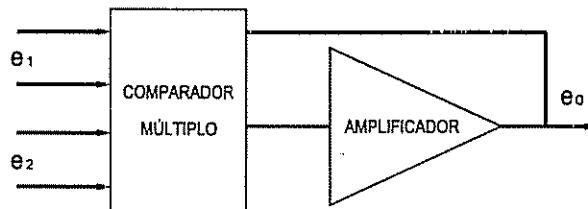


FIGURA 11.10 Esquema simplificado: relé eletrônico de soma e subtração.

11.3.5 Extratores de Raiz Quadrada Eletrônicos

Estes instrumentos auxiliares são bastante utilizados em malhas de controle de vazão onde o elemento primário aplicado é do tipo pressão diferencial, tais como placa de orifício, annubar, venturi, bocal etc. Nestes casos, a saída do transmissor representa o quadrado da vazão, sendo necessário, muitas vezes, extrair a raiz quadrada do sinal, para se obter uma saída linear do transmissor. Esta função pode ser efetivada ou no próprio circuito do transmissor e, então, a saída obtida passa a ser linear, ou o sinal quadrático é transmitido à sala de controle, e a extração da raiz quadrada é efetuada por instrumento dedicado (relé de computação), ou no circuito do instrumento receptor.

O extrator de raiz quadrada, mostrado na figura 11.11, combina um amplificador de corrente contínua com uma rede de realimentação negativa a diodos.

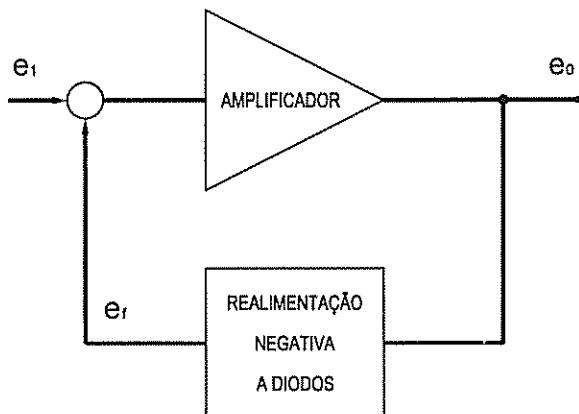


FIGURA 11.11 Extrator de raiz quadrada eletrônico.

À medida que a corrente de entrada do amplificador aumenta, o ganho deste amplificador diminui, devido à redução da resistência de realimentação da rede de diodos. O ganho varia, tipicamente, segundo sete segmentos lineares que aproximam a função quadrática. Obtém-se este efeito empregando-se sete diodos na realimentação. À medida que a entrada aumenta, estes diodos automaticamente entram em paralelo. A saída estabiliza quando a realimentação, através da rede de diodos, equilibra a entrada.

11.3.6 Relé de Computação Seletor do Menor Sinal, Maior Sinal e Limitador de Sinal

A maior das duas entradas positivas, na figura 11.12, provoca um potencial negativo maior no catodo de um dos diodos (CR1 ou CR2).

A polarização direta deste diodo permite a passagem da maior entrada e polariza reversamente o outro diodo, isolando, desta forma, a entrada menor.

Assim, se o sinal e_1 cai abaixo de e_2 , CR2 estará polarizado no sentido direto, permitindo passar o sinal e_2 , e CR1 estará polarizado no sentido reverso, isolando o sinal e_1 .

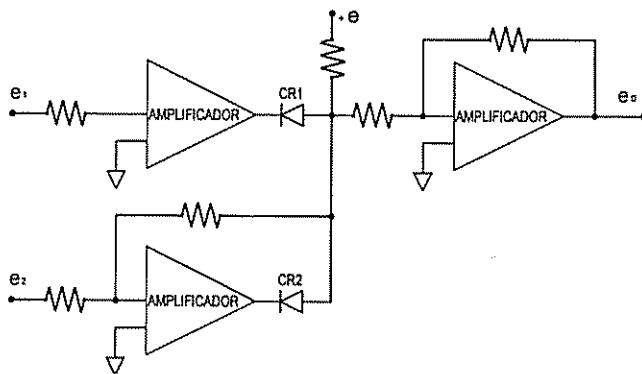


FIGURA 11.12 Relé seletor e limitador eletrônico de sinal.

Todos os amplificadores são inversos de ganho unitário. Substituindo-se uma entrada fixa por uma das variáveis, obtém-se um relé limitador de baixa.

Para se obter um seletor de baixa tensão os diodos são invertidos e é utilizada uma fonte negativa (e). Desta forma, a entrada menos positiva polariza diretamente um dos diodos (pelo potencial menos negativo aplicado aos anodos dos diodos). Isto, automaticamente, polariza reversamente o outro diodo e isola a entrada maior, da saída.

Substituindo-se uma das variáveis por uma entrada fixa, obtém-se um relé limitador de alta.

11.3.7 Relés Pneumáticos e Eletrônicos de Alarme

Uma outra série de instrumentos auxiliares bastante empregados nas malhas de controle são os chamados relés de alarme, os quais podem ser pneumáticos ou eletrônicos.

Estes instrumentos recebem um sinal analógico, dependendo do tipo, nas faixas 0,2 a 1,0 kgf/cm² ou 4 a 20 macc, e comutam um contato de saída cuja função é acionar, normalmente, sistemas de alarme e intertravamentos. Quando pneumáticos, estes relés são dispositivos receptores, cuja entrada é proveniente de um transmissor com saída 0,2 a 1,0 kgf/cm², constituindo-se de um pressostato receptor ajustado para acionar um contato elétrico quando um certo nível de sinal é atingido, correspondente a um valor limite da variável de processo.

Quando eletrônicos, são utilizados com a mesma função, porém, recebendo sinais de transmissores eletrônicos na faixa 4-20 macc, acionando, então, um contato elétrico.

As figuras 11.13 e 11.14 ilustram uma mesma aplicação destes dispositivos, sendo uma malha pneumática e outra eletrônica.

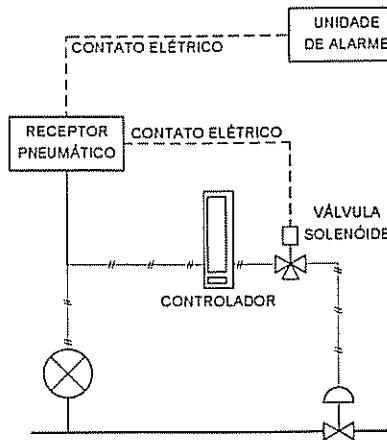


FIGURA 11.13 Malha de controle pneumática com relé de alarme e bloqueio automático de válvula de controle.

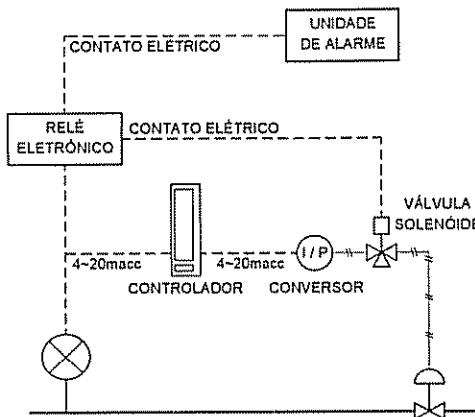


FIGURA 11.14 Malha de controle eletrônica com relé de alarme e bloqueio automático de válvula de controle.

11.4 INDICADORES ANALÓGICOS E INDICADORES DIGITAIS

Os elementos de indicação podem ser de vários tipos. Com relação aos receptores indicadores propriamente ditos, destacam-se os indicadores analógicos e os digitais. Outros elementos receptores de indicação são as lâmpadas de sinalização.

Distinguem-se os indicadores propriamente ditos, das lâmpadas de sinalização, uma vez que os indicadores têm a função de indicar continuamente o valor da variável de processo, ao passo que as lâmpadas de sinalização funcionam como indicadores do estado de um equipamento, motor etc., ou seja, sinalizam se estão ligados ou desligados.

Os indicadores analógicos são constituídos de uma escala graduada e um ponteiro, com o objetivo de possibilitar ao operador a visualização do valor da variável do processo. Isto

se dá de forma comparativa com o total da escala, normalmente graduada de zero, até o chamado fundo da escala (F.E), determinado pelo máximo valor esperado para a variável medida mais uma determinada folga.

As escalas podem ser lineares, quadráticas ou não lineares, dependendo da variável em questão, e a graduação pode ser em porcentagem da variável (0-100%), ou em unidades de engenharia (leitura direta). A figura 11.15 mostra um indicador analógico.

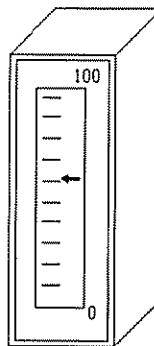


FIGURA 11.15 Indicador analógico.

Em geral, tanto as empresas de engenharia como as indústrias de processo possuem os chamados Critérios de Projeto, cuja finalidade é estabelecer diretrizes para a seleção de instrumentos, constando, também, um capítulo destinado às unidades de medida para as variáveis de medição e controle.

A tabela 11.1 mostra as unidades usualmente utilizadas na medição das principais variáveis.

TABELA 11.1
Unidades de Engenharia Normalmente Empregadas para as Principais Variáveis

Variável	Unidade
Vazão	
• vapor	kg/h
• líquido	m ³ /h
• gás	Nm ³ /h
Nível	% da faixa
Pressão	
• absoluta	Bar
• vácuo/baixas pressões	Pa
• próxima da atm	Pa
• acima da atm	Bar
Temperatura	°C
Temperatura absoluta	K

Os indicadores digitais, por sua vez, apresentam a indicação de forma numérica e, atualmente, praticamente dominam o campo de indicadores em quaisquer setores de atividade, principalmente em controle de processos. Uma vantagem importante dos indicadores digitais é a facilidade de leitura, bem como evitar erros de avaliação que podem ocorrer nos indicadores analógicos.

A variável que mais utiliza os indicadores digitais é a temperatura, se bem que outras variáveis também são indicadas digitalmente. Na figura 11.16 vemos um indicador digital.

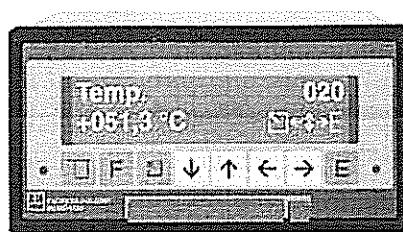


FIGURA 11.16 Indicador digital.

Os indicadores são normalmente individuais, isto é, cada variável possui o seu indicador. Deste modo, se for projetado um painel convencional para o controle e monitoração do processo, teremos tantos indicadores quantos forem os pontos de indicação necessários.

São comuns, entretanto, principalmente em medição de temperatura, os chamados **indicadores multiponto**, que possuem bornes (conexões) disponíveis para várias entradas (vários termoelementos) e um sistema de seleção automática ou manual. Através deste sistema, o operador escolhe o ponto que deseja efetuar a leitura, ou esta seleção pode ser feita de forma automática pelo próprio circuito do instrumento, como ilustra a figura seguinte.

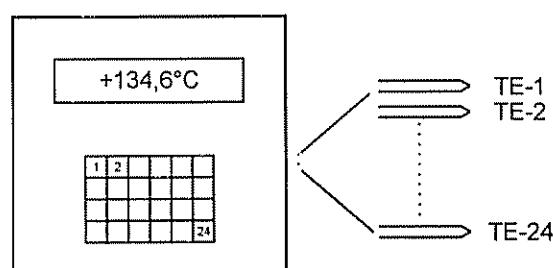


FIGURA 11.17 Indicador multiponto digital de temperatura, com 24 entradas de termopar.

11.5 CONTROLADORES

O controlador, na verdade, já foi estudado no capítulo 10 e considerado como o cérebro da malha de controle, uma vez que atua sobre a variável manipulada, no sentido de corrigir o valor da variável de processo, caso haja desvio em relação ao valor desejado. Este instrumento tem que ser citado, também, no presente capítulo, no que diz respeito aos tipos de controladores disponíveis.

Convém mencionar, novamente, que os sistemas digitais, atualmente, exercem atuação sobre o processo através de um programa (*software*), sendo que, tanto o frontal dos instrumentos como as suas funções e parâmetros, são ajustados pela "Estação de Operação", pelos seus comandos.

Se considerarmos os controladores normalmente instalados em painéis de controle, temos os controladores analógicos e os controladores digitais denominados *multi-loop*.

Um controlador analógico recebe um sinal de entrada, o processa de acordo com as funções especificadas, e envia um sinal de saída para a válvula de controle. Desta forma, cada malha de controle da planta terá um controlador dedicado para efetuar o controle de cada variável. A figura 11.18, seguinte, mostra um controlador analógico.

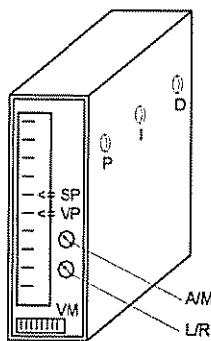


FIGURA 11.18 Controlador convencional.

O controlador *multi-loop*, entretanto, processa mais de uma entrada, executa as funções de controle de forma compartilhada por um microcomputador, bem como funções complementares de comparação, soma, razão, seleção de máxima, mínima etc., funções estas embutidas dentro da capacidade de processamento do instrumento, na forma digital. Trata-se de instrumentos que têm a caixa e o frontal muito semelhantes a um controlador analógico, efetuando, entretanto, as funções de controle e de cômputo, de forma digital, ou seja, através de programação (*software*). A figura 11.19 mostra um exemplo de controlador *multi-loop*.

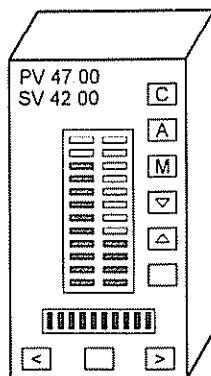


FIGURA 11.19 Controlador *multi-loop*.

11.6 REGISTRADORES

11.6.1 Registradores Analógicos

Os registradores são instrumentos cuja função é registrar o valor das variáveis de processo em função do tempo, em cartas de papel graduadas com escalas iguais às utilizadas pelos indicadores, porém, com uma coordenada adicional, que é o tempo.

As cartas mais utilizadas em registradores são as cartas circulares e as cartas do tipo fita. As cartas circulares são, atualmente, muito pouco utilizadas. Assim, a maioria dos registradores atuais utilizam cartas do tipo fita (em inglês, *strip charts*). Também são encontradas as cartas de rolo.

O registrador possui um motor elétrico que possibilita o acionamento da carta com uma certa velocidade, sendo que o registro da variável do processo é feito por uma pena cuja tinta traça um gráfico do valor da variável em função do tempo.

Os registros assim obtidos são úteis e importantes tanto para o acompanhamento da produção e elaboração de balanços materiais, como também para a detecção de problemas no processo, em função da observação de determinados registros anormais, repetição de valores limites com muita freqüência etc.

A exemplo dos indicadores, os registradores podem ser simples ou múltiplos, ou seja, podem registrar vários valores simultaneamente, diminuindo, assim, o espaço necessário para instalação. A figura 11.20 mostra os tipos de cartas disponíveis para os registradores.

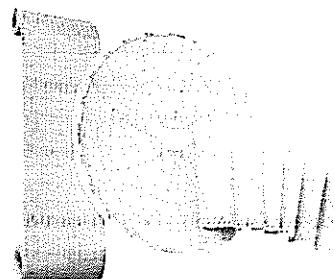


FIGURA 11.20 Exemplos de cartas utilizadas nos registradores analógicos.

11.6.2 Registradores Digitais

Os registradores também sofreram muitas transformações em seus projetos construtivos e, com o estágio atual de desenvolvimento dos microprocessadores, migraram para registradores digitais, apresentando uma capacidade muito maior de registro de dados sobre o processo do que os registradores convencionais.

São equipados, normalmente, com visor (*display*) de cristal líquido, que permite uma alta resolução sob vários ângulos de visualização, sendo possíveis várias formas de apresentação dos dados, tais como registros de tendências, visualização de gráficos de barras (*bar graph*), visualização numérica dos dados e geração de telas de vista geral, todas características próprias de sistemas digitais.

Estes registradores digitais oferecem, também, a possibilidade de transferência de dados neles armazenados para outros locais, através de disquetes, discos etc.

Uma das maiores vantagens destes registradores é a não necessidade de utilização de tinta e cartas de papel para registro dos dados, conferindo flexibilidade operacional e redução de custos. Eles podem, também, ser interligados em rede com outros dispositivos, permitindo intercâmbio de dados, bem como o armazenamento destes dados em outros dispositivos. A figura 11.21 mostra um registrador digital.

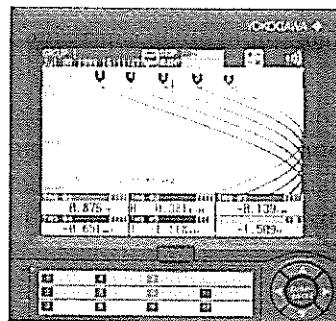


FIGURA 11.21 Registrador digital (cortesia Yokogawa).

Estes registradores são multicanais, permitindo, por exemplo, 30 sinais de entrada que podem ser de sensores de temperatura do tipo termopares, termorresistências, sinais analógicos na faixa de 4 a 20 macc etc.

Vale lembrar, entretanto, que os registradores, mesmo estes avançados registradores digitais, estão sendo cada vez menos utilizados, com a implantação de sistemas digitais de controle. Isto se deve ao fato de que estes sistemas englobam todas as funções dos registradores, permitindo, como mencionado, armazenar informações de forma digital (via programação – *software*), facilitando a manipulação posterior destes dados, a apresentação das informações ao operador das mais diversas formas, além de muitas outras funções de monitoração e controle, conforme pode ser visto no capítulo 13 (SDCD).

11.7 INTEGRADORES E TOTALIZADORES

Integradores são instrumentos que recebem sinais contínuos e, automaticamente, integram estes sinais, de forma a se obter os sinais integrados ou totalizados, representando, assim, valores totais da variável medida.

Estes instrumentos são aplicados principalmente em malhas de monitoração e controle de vazão, e utilizados para contabilidade de transferência de volumes de líquidos e gases, controle de qualidade e elaboração de balanços materiais.

Os integradores possuem função de totalização como parte integrante, além de algumas outras funções, tais como acionamento de contatos elétricos ao se atingir determinado valor, para acionar válvulas, bombas etc.

Os totalizadores podem ser de seis e oito dígitos, podendo ser fornecidos com ou sem reajuste (*reset*). A figura 11.22 mostra um integrador-totalizador de vazão:

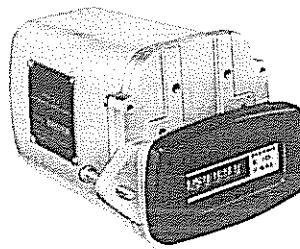


FIGURA 11.22 Integrador-totalizador de vazão.

Um exemplo atual da utilização de integradores-totalizadores de vazão, são os medidores de vazão do tipo turbina para medição de vazão de gás natural. Estes instrumentos destinam-se à transferência de custódia, sendo utilizados em conjunto com computadores de vazão para compensação de pressão e temperatura do valor de vazão de gás.

11.8 FUNÇÕES DE ALARME E SINALIZAÇÃO

As funções de alarme e sinalização, num processo industrial, são importantes na medida em que funcionam como um aviso ao operador de que alguma anormalidade está ocorrendo e, como consequência, algum desligamento de emergência (o chamado *shutdown*) poderá ocorrer.

Normalmente, os instrumentos de medição instalados no campo é que são ajustados para acionar um contato elétrico que abre ou fecha, caso a variável em questão atinja um determinado valor limite.

Num primeiro nível, o operador é avisado de que o valor limite foi alcançado. Há um determinado tempo para que o mesmo tome alguma ação, no sentido de normalizar o problema. Caso isto não seja possível, o valor da variável continua aumentando ou diminuindo, e alguma função de *shutdown* é efetuada, levando o processo a uma condição segura.

Estas funções são iniciadas no campo através de um transmissor, de um pressostato, de uma chave de nível, chave de fluxo, termostato etc., e os sinais destes instrumentos são processados por instrumentos receptores, com a tarefa de sinalizar as condições anormais ou mesmo deflagrarem o processo de *shutdown*. Os sistemas de intertravamento são analisados no capítulo 14 deste livro.

As funções de alarme e *shutdown* compõem os sistemas de intertravamentos, cuja maior ou menor incidência é função do tipo de planta ou processo industrial.

Os Critérios de Projeto, normalmente, definem o modo como são conduzidos os alarmes e desligamentos automáticos.

Muitas companhias não permitem que funções de desligamento automático sejam efetuadas através de transmissores e, sim, por chaves ligadas diretamente ao processo. Recomenda-se que, por questões de segurança operacional, as funções de alarme e intertravamentos sejam efetuadas de forma independente, ou seja, não só através de tomadas de processo diferentes, como também separando-se os sinais de entrada nos sistemas.

Para o operador, na maioria das vezes, é importante a forma como se apresentam os resultados destas operações, e a monitoração é geralmente feita pelos sistemas de alarme, normalmente anunciadores constituídos por lâmpadas de sinalização (janelas), ou mesmo telas de sistemas supervisórios configuradas de forma a apresentar ao operador listas, plaquetas ou outras funções que facilitam a visualização das anormalidades do processo. A figura 11.23 apresenta um anunciador de alarmes convencional.

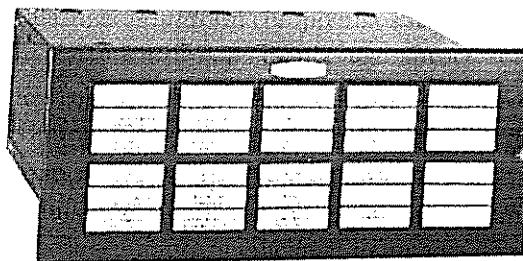


FIGURA 11.23 Anunciador de alarmes.

Da mesma forma que as demais funções de monitoração e controle, as funções de alarme e intertravamento são, atualmente, realizadas por sistemas digitais de controle.

Os sinais são enviados aos cartões de entrada, dispostos nos armários destes sistemas, onde são condicionados e endereçados à lógica contida no programa utilizado pelo sistema. As funções do sistema são configuradas de forma a atender às necessidades do processo.

Os sistemas digitais conferem às funções de alarme e intertravamentos uma flexibilidade muito maior do que aquelas executadas por sistemas convencionais. Nos sistemas convencionais, os sinais de campo são normalmente processados por instrumentos com funções dedicadas, e as operações de computação, comutação de contatos elétricos e

outras são, dependendo da complexidade das operações, efetuadas por uma série de componentes interligados por meio de fios, relés etc., compondo a chamada lógica eletromecânica.

Nos sistemas digitais estas operações constituem parte de uma configuração por meio de recursos que são próprios dos sistemas microprocessados. O programa pode ser facilmente alterado no campo para modificar funções que não estão de acordo com as necessidades operacionais, sem a necessidade de alterações físicas de componentes ou fiação. Uma simples mudança, num determinado passo do programa, pode, por exemplo, alterar um comando, uma sinalização ou outra função.

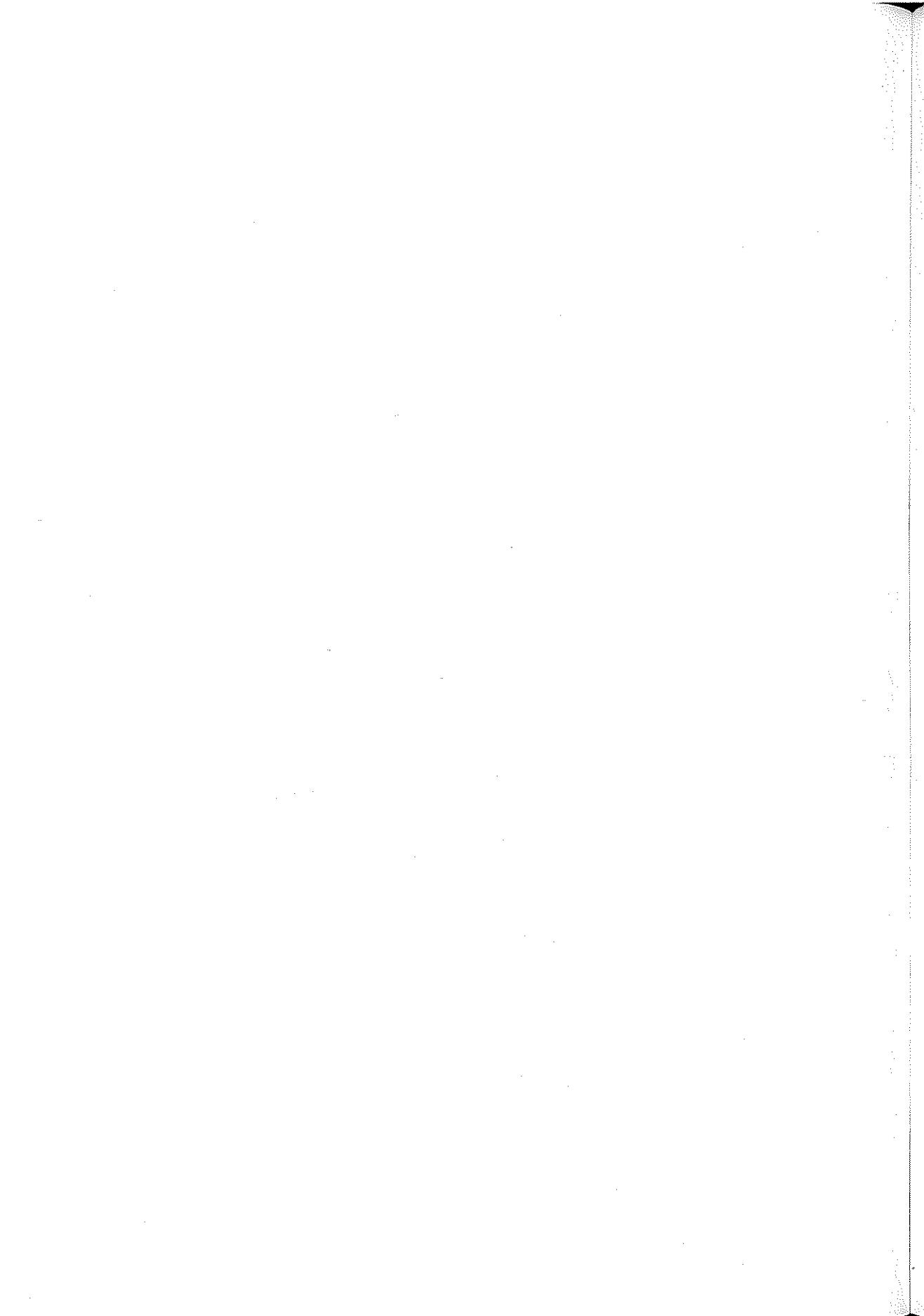
Os sistemas digitais permitem, também, a apresentação dos resultados da atuação dos sistemas de alarmes ou intertravamentos de uma forma mais rápida e conveniente ao operador, permitindo, principalmente, a emissão de relatórios de alarmes e eventos.

Deste modo, o acompanhamento do processo e a antecipação do operador em determinadas situações tornam-se muito mais efetivas.

11.9 REFERÊNCIAS

Bela G. Lipták; Kriszta Venczel. *Instrument Engineers' Handbook* – Chilton Book Company, Radnor Pennsylvania, 1985.

W. G. Andrews. *Applied Instrumentation in the Process Industries*, Gulf Publishing Co Houston, 1974.



12

CLP

ENGº VITOR FINKEL

12.1 INTRODUÇÃO

O Controlador Lógico Programável (CLP ou PLC, do inglês, *Programmable Logic Controller*) é um equipamento de controle industrial microprocessado, criado inicialmente para efetuar especificamente o controle lógico de variáveis discretas, e atualmente usado para praticamente todos os tipos de controle.

12.1.1 A Finalidade

O CLP foi inventado para substituir os relés de um circuito lógico seqüencial ou combinacional para controle industrial. O CLP funciona seqüencialmente, olhando o estado dos dispositivos ligados às suas entradas, operando a lógica de seu programa interno e determinando o estado dos dispositivos ligados às suas saídas. É o usuário quem carrega o programa, geralmente via *software*, que produz os resultados desejados.

12.1.2 A Origem

Foi concebido em 1968, a partir de uma especificação da divisão de hidráulicos da General Motors Co., com o nome de *MODular DIgital CONtroller*, donde derivou o nome MODICON, de seu primeiro fabricante. Sua "invenção" é atribuída a Richard (Dick) Morley (figura 12.1). A função original do CLP era simplesmente substituir os grandes gabinetes de lógica à relés, por alguma coisa menor, mais confiável, e, principalmente, mais flexível, quanto à facilidade de se alterar a programação. Qualquer pessoa que já tenha tido necessidade de modificar um programa feito por meio de interligação dos contatos de relés, sabe a trabalhoira que isso dá, sem contar a dificuldade em se detectar e corrigir prontamente quaisquer erros cometidos durante a execução da tarefa. A principal exigência colocada nos primeiros CLPs era a robustez. Esta exigência de robustez se relacionava a dois atributos principais. O CLP tanto precisava resistir aos ambientes industriais agressi-

vos, (quando comparados a outros ambientes em que "computadores" eram instalados, na época), quanto deveria apresentar uma boa confiabilidade operacional, característica em que os grandes sistemas a relés da época deixavam a desejar.

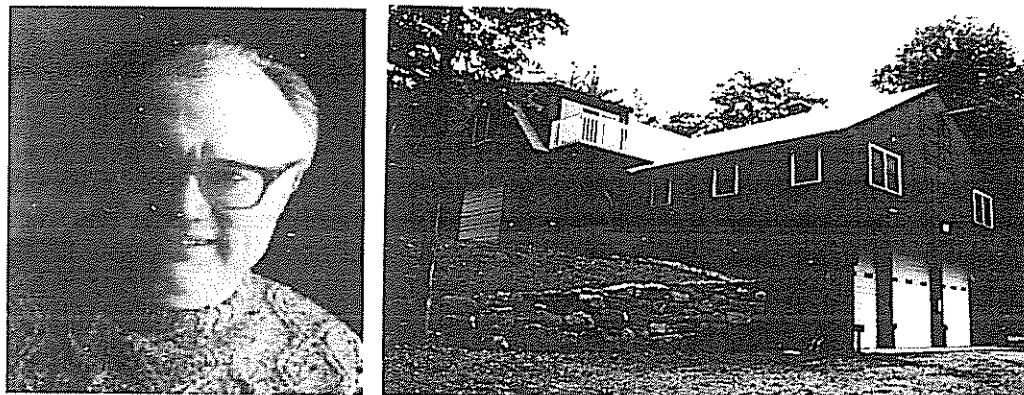


FIGURA 12.1 Dick Morley e seu atual estúdio de trabalho, *The Barn* (O estábulo).

12.1.3 Primeira Aplicação

A primeira aplicação de um CLP foi na G.M., na linha de fabricação de automóveis, em uma giga de testes para cablagem (chicotes) de automóveis.

Quando a aplicação industrial mudava (imagine um novo modelo de carro, com um chicote (cabeação elétrica) diferente do que estava em produção), o "programa" precisava mudar também. Como novos modelos eram introduzidos todo ano, o "programa" do teste de chicotes também era refeito anualmente. A alteração do "programa", através da religação da fiação que interligava os relés, era extremamente trabalhosa, cara e, sobretudo, demorada. Além disso, como os relés eram todos eletromecânicos, sua vida útil era limitada; havia um programa de manutenção periódica e, cada vez que surgia um defeito, era necessário interromper o uso da giga de teste para um procedimento elaborado e difícil de localização e eliminação da falha, sobretudo em aplicações envolvendo centenas ou milhares de relés. Obviamente, os CLPs deveriam ser facilmente reprogramados, usando uma linguagem conhecida pelo pessoal da engenharia e da manutenção elétrica. A vida útil deveria ser grande e as mudanças de programa teriam que ser feitas rapidamente, bem como era necessário incorporar ferramentas de diagnóstico para facilitar e tornar mais ágeis as localizações de defeitos.

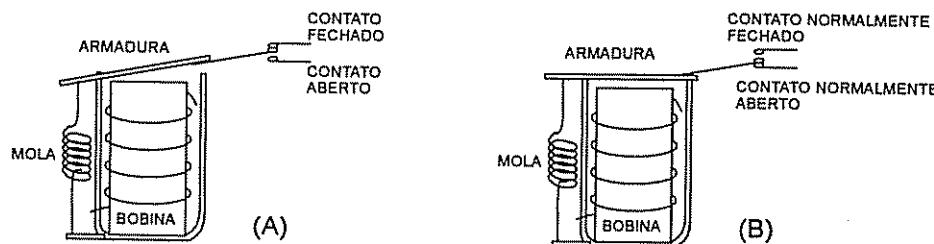


FIGURA 12.2 O relé. (A) Relé eletromecânico; (B) relé eletromecânico energizado.

12.2 OS AVANÇOS TECNOLÓGICOS

12.2.1 Entre 1970 e 1974

As inovações em tecnologia de microprocessadores tiveram um impacto significativo na evolução dos CLPs, dando-lhes muito mais flexibilidade e "inteligência".

A melhoria da interface com o operador, capacidade computacional aritmética, manipulação de dados e comunicação com computadores deram nova dimensão ao papel dos CLPs no chão de fábrica. A adição das funções aritméticas e conjuntos de instruções avançadas expandiram as aplicações dos CLPs permitindo que funcionassem em conjunto com outros instrumentos que forneciam dados numéricos. As tarefas lógicas e seqüenciais, então, poderiam ser ampliadas para acomodar em seu interior cálculos baseados em dados medidos e, a partir destes, tomar medidas corretivas, controle de bateladas por outras variáveis que não apenas o tempo, etc.

12.2.2 De 1975 a 1980

As principais melhorias foram relativas à capacidade de memória, controle sobre entradas e saídas remotas, controle de variáveis analógicas e de posicionamento, incluindo-se aí o controle dos servomecanismos. Estas características tornaram o CLP adequado para uma gama de aplicações ainda maior, e contribuíram muito para a redução de custos de fiação e de instalação. A expansão de memória abriu os horizontes para o armazenamento de programas bem maiores, permitindo não só a lógica e o seqüenciamento, como a aquisição de dados e sua manipulação. Esta flexibilidade eliminou a necessidade de que os operadores parassem o processo para introduzir mudanças de parâmetros de produção, entre bateladas de produtos distintos.

Outro desenvolvimento importante característico deste período foi dos módulos de controle de posição, controlando motores a passos (*step-motors*) na saída e usando realimentação a partir de *encoders* na entrada. A interface de entrada conta os pulsos de um trem vindo de um transdutor externo, e transforma estes num valor numérico que a UCP (Unidade Central de Processamento) usa como verificação da amplitude do movimento pretendido. A partir, então, do comando da UCP, o módulo de saída de controle do motor a passos gera o trem de pulsos que comanda o motor. Posição, velocidade, aceleração, tudo ficou sob controle. Já era possível comandar uma fresa ou torno multiferramentas para executar uma tarefa repetitiva, diretamente a partir do CLP. Foi um passo muito importante para a automação da indústria de manufatura e de peças.

12.3 APLICAÇÕES ATUAIS

Toda esta evolução tecnológica, aliada à expectativa dos clientes, fizeram que o CLP assumisse muitas funções que anteriormente não lhe eram destinadas, como o controle de variáveis analógicas, tráfego de informações do chão-de-fábrica às linhas de comunicação de alta velocidade para disponibilizar dados de produção para outras unida-

des de produção, geração de relatórios, preparação de dados para Interface-Homem-Máquina, e para atingir os níveis hierárquicos superiores dentro da empresa. Apesar de amplamente empregado em processos industriais contínuos, é particularmente importante sua aplicação nos processos em bateladas e onde as formulações da produção precisam ser modificadas com freqüência, bem como nos processos com elevado número de variáveis discretas, tais como se encontra nos segmentos industriais de manufatura. Outra aplicação emergente é no controle dos chamados Prédios Inteligentes (Automação Predial e Residencial), onde seus custos atuais, bastante reduzidos, aliados à elevada confiabilidade, os transformam na peça-chave do controle e supervisão. Raras as indústrias, hoje, que não o utilizam, mesmo entre as que usam controle por SDCD (ver o capítulo pertinente neste livro) ou controladores de malha singela ou multimalhas analógicos e/ou digitais. Hoje em dia, praticamente todas as aplicações que requerem algum tipo de controle elétrico aplicam os CLPs.

12.3.1 Melhorias de Desempenho

Na década de 80 novos avanços na concepção e fabricação dos CLPs afetaram não só a fabricação dos CLPs, como a própria filosofia do projeto do sistema de controle de processos.

Algumas melhorias significativas no *hardware*

- Tempos de varredura menores, usando tecnologia tipo *bit-slice*.
- Pequenos CLPs integrados, de baixo custo, capazes de substituir de 4 a 10 relés, economizando também espaço no interior de painéis.
- Sistemas de entradas e saídas de alta densidade, baixando custos e reduzindo a necessidade de espaço.
- Interfaces de entradas e saídas inteligentes (microprocessadas), permitindo o processamento distribuído em aplicações como: controle PID de variáveis analógicas, comunicação alfanumérica ASCII, posicionamento, comunicação com o computador-mestre, e módulos de linguagem de alto nível, como Basic e similares. Controle por Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*), tanto pela UCP como em módulos de entrada/saída dedicados "inteligentes".
- Interfaces especializadas, como entrada para detetores de proximidade/presença, tipo Namur, termopares e termorresistências, strain-gage e módulos de resposta rápida.

12.4 ARQUITETURAS REDUNDANTES

Hoje em dia há uma tendência a se usar dois tipos predominantes de arquiteturas redundantes.

A primeira é a redundância da UCP, e tem por objetivo aumentar a confiabilidade operacional, ou seja, reduzir as paradas espúrias devido à falhas da UCP.

12.4.1 Redundância de UCP

Nestas arquiteturas usam-se duas UCP, que chamaremos aqui de "atuante" e de "reserva". Enquanto a primeira está ligada diretamente às entradas e saídas, fazendo o serviço normal da UCP do CLP, a outra comunica-se com a primeira, mantendo atualizadas suas informações sobre o processo, estado das entradas e saídas, contagens, temporizações, etc. Se ocorre um diagnóstico de falha da UCP "atuante", a mesma é desligada, enquanto a comunicação entre as entradas e saídas é transferida para a UCP de "reserva", em um tempo relativamente curto, de forma a não interromper o funcionamento do CLP. Este tipo de redundância de UCP é freqüentemente chamado de arquitetura *Hot-stand-by-backup* (ou seja, reserva instalada à quente), e há quem faça algumas restrições a seu uso.

A primeira vem de seu alto custo e relativa complexidade. Devido à necessidade das duas UCPs se manterem atualizadas em relação aos parâmetros e estágios de controle, consuem uma quantidade de memória adicional, módulos adicionais de comunicação, módulos de transferência, racks de instalação para estas UCPs e seus acessórios etc.

A segunda, decorrência da primeira, é que devido ao fato de que nem todas falhas são detectadas, bem como a grande quantidade de módulos acessórios, que aumenta a possibilidade de falhas. A experiência demonstra que nem sempre a transferência desejada ocorre quando realmente é necessário, mesmo quando ao se simular uma falha em testes o sistema opere como desejado. É quase impossível se simular toda e qualquer falha imaginável em uma UCP, bem como ter um diagnóstico que cubra 100% das falhas possíveis.

Devido ao fato de que o uso destas UCPs redundantes nesta arquitetura aumenta a probabilidade da ocorrência de uma falha não detetada, ou de que uma transferência imperfeita possa até levar, em casos extremos, a um "congelamento" do estado das saídas, esta arquitetura deve ser evitada quando se usa o CLP em aplicações vinculadas a funções de segurança. A finalidade original desta arquitetura é manter o processo funcionando, e não garantir seu desligamento em caso de falhas, o que contraria as necessidades das funções de segurança.

12.4.2 Os Sistemas para "Missão Crítica"

Há muitos anos os militares e, posteriormente, os industriais começaram a chamar de "missão crítica" aquelas atividades que não devem se interromper, exceto em casos de força maior, e, ao mesmo tempo, nestes casos fortuitos, têm que ser interrompidas, sem exceções. Em outras palavras, são sistemas tão críticos que, por motivo das falhas triviais em seu controle, não devem ser desligados e, em contrapartida, têm que ser garantidamente desligados em casos reais de emergência, mesmo que haja alguma falha latente em alguns de seus componentes.

Geralmente, para estas "missões críticas" usam-se arquiteturas redundantes múltiplas, tanto em sistemas com "votação 2 de 3", (denominados 2V3), como em sistemas em que existe um "canal de operação" monitorado continuamente por um "canal de diagnóstico" (às vezes chamados 1D). Nesta última, às vezes os canais de operação e de diagnósticos são duplicados, usando-se então a denominação 1D2.

Os comentários que cabe fazer a estas arquiteturas totalmente redundantes, é que exigem diagnósticos automáticos muito abrangentes, e/ou que precisam ser testados manualmente a intervalos relativamente curtos. Como a finalidade da redundância aqui é fazer que não hajam consequências externas da falha no processo, o operador não fica sabendo automaticamente que houve uma falha no CLP, quando esta normalmente deveria ser a causa de uma parada da produção. Para evitar que uma falha encoberta fique "residente" no sistema por muito tempo, é necessário diagnosticar a falha e proceder ao reparo, pois se outra falha ocorrer antes da primeira ser diagnosticada e reparada, a missão crítica pode falhar, e isto de duas maneiras: desligar sem motivo de processo, ou não desligar durante uma emergência real, podendo causar um acidente.

É totalmente impossível garantir 100% que um sistema para "missão crítica" não venha a ter uma "falha redundante", causando seu funcionamento indesejado, seja desligando quando não deveria fazê-lo, ou não desligando quando isto for essencial. Pior ainda, uma chamada falha comum pode atingir mais de um canal, causando o funcionamento errôneo do conjunto. Aqui se trabalha sempre com conceitos estatísticos. Os sistemas são construídos para garantir que a probabilidade de uma falha múltipla, ou de modo comum, seja inferior a um determinado valor estipulado. Estes sistemas são freqüentemente usados para aplicações de segurança, e mais detalhes podem ser encontrados no Capítulo 14 – Intertravamento e Sistemas de Segurança.

12.5 O HARDWARE

12.5.1 Algumas Tendências do *Hardware*

Quanto às suas características físicas, podemos separar os CLPs em dois grandes grupos:

- 1) os tipo caixa única (também chamados de caixa de sapatos), em que se integram em um único invólucro a(s) fonte(s) de alimentação, a CPU e os circuitos de entrada e saída.

Geralmente, estes são os de preço mais acessível, e são de porte pequeno ou médio.

- 2) Os CLPs modulares, onde geralmente se tem um invólucro para a CPU, outro para cada fonte de alimentação, e estruturas onde se instalam os módulos de entrada e saída, além dos módulos de comunicação e outros auxiliares.

Há uma tendência moderna de se instalar os módulos da CPU e da(s) fonte(s) de alimentação na mesma estrutura das entradas e saídas. Geralmente, esta arquitetura é usada em CLPs de porte médio e grande, e onde a modularidade permite uma manutenção mais rápida. São os mais comuns em ambientes industriais, enquanto os CLPs com caixa única prevalecem em ambientes de automação predial, controle de máquinas-ferramentas, e de unidades-pacote como compressores, bombas, filtros etc.

Não há regras bem definidas para quando se deve optar por um ou outro tipo de CLP.

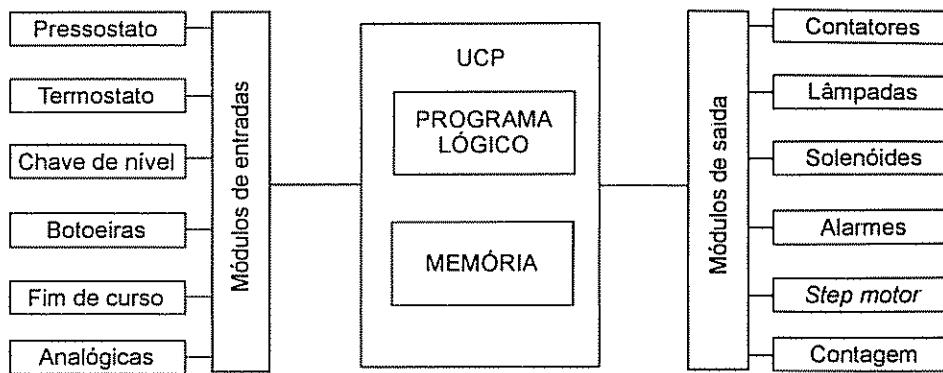


FIGURA 12.3 Os principais componentes de um CLP típico.

Os programas de CLPs também podem ser classificados como de lógica combinacional ou de lógica seqüencial, embora na maioria das aplicações acaba-se misturando ambos os tipos de lógica.

12.6 LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO

12.6.1 A Origem da Linguagem Histograma de Contatos

Dissemos que os primeiros CLPs se destinavam a substituir os grandes armários de lógica a relés, e, por isso, a primeira linguagem de programação desenvolvida, e até hoje largamente empregada nos CLPs, é o chamado Histograma de Contatos, ou Diagrama de Escada (*Ladder Diagram*), semelhante aos esquemas elétricos usados pelos eletricistas que montavam e consertavam os gabinetes de lógica a relés.

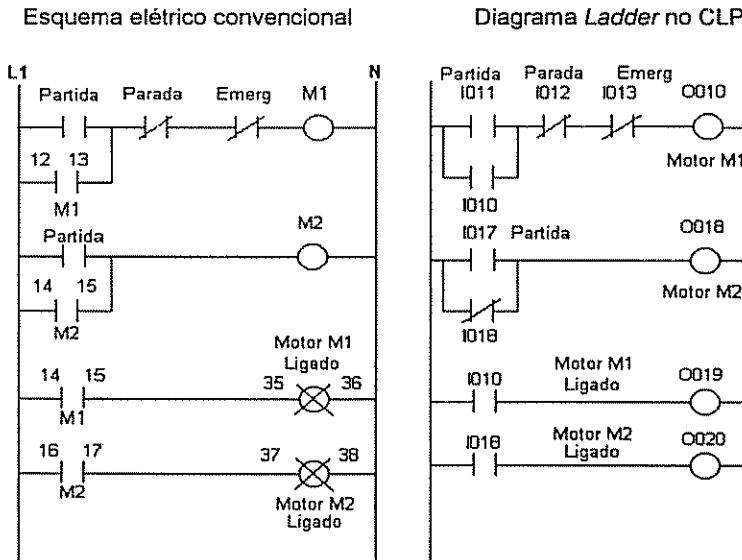


FIGURA 12.4 Um esquema elétrico e seu programa de CLP correspondente.

Observe que no esquema de relés cada contato auxiliar dos contadores M1 e M2 tem seus bornes numerados (12, 13, 14, 15, 16 e 17, no exemplo); já os correspondentes pontos de entrada no CLP correspondem às saídas O010 e O018, que podem ser simplesmente (para a maioria dos CLPs) "interrogadas" quanto a seu estado, como entradas como mesmo endereço físico (I010 e I018). O mesmo endereço, como no exemplo acima, pode ser usado tanto para a retenção do relé quanto para acionar a luz piloto nas linhas mais abaixo, e para outras funções necessárias. Na verdade, como não se trata de uma entrada física, e sim de um *bit* lógico, podemos usá-lo várias vezes ao longo do programa, sempre que quisermos saber o estado de M1 ou M2.

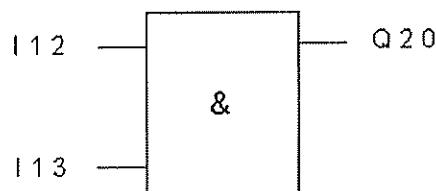
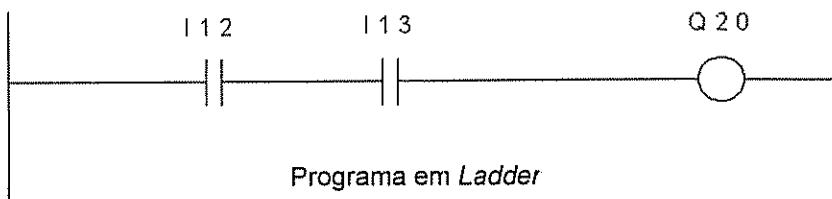
12.6.2 As Outras Linguagens mais Expressivas

As linguagens de programação mais usuais, atualmente, abrangem o Histograma de Contatos (*Ladder*), o diagrama de blocos funcionais, a lista de instruções lógicas, a linguagem estruturada Grafcet, chamada, na América do Norte, SFC (*Sequential function chart*) "C" e suas derivadas. Muitos CLPs aceitam várias destas linguagens, e que um programa único possa ser escrito usando, em trechos diferentes, linguagens diferentes. A Norma IEC-61131-3 abrange várias destas linguagens em uma tentativa de padronização entre os vários fornecedores, para permitir maior portabilidade de programas entre diferentes plataformas.

A norma IEC-61131-3 define um conjunto de linguagens "padronizadas" para os CLPs: Histograma de Contatos (*Ladder Diagram*), Diagrama de Blocos Funcionais (*Functional Block Diagram*), Mapa de Seqüência Funcional (*Sequential function chart*), Texto Estruturado (*Structured Text*) e Lista de Instruções (*Instruction List*). Estas linguagens definem como o usuário programa o CLP. A IEC-61131-3 não detalha como as linguagens são compiladas ou executadas dentro de cada CLP específico, de cada fornecedor.

12.6.3 Traduzindo em Linguagens Diferentes

Observe que nos três casos o programa faz a mesma coisa. É uma função lógica "E" das entradas I 1.2 e I 1.3, cujo resultado comanda a saída Q 2.0 (ver figura 12.5). Os três programas acima, quando compilados em linguagem de máquina podem resultar numa mesma série de instruções para a UCP. Estas "linguagens de programação" em "alto nível" existem apenas para que as pessoas entendam mais facilmente o programa que o CLP executa. Um profissional formado em elétrica provavelmente gostará mais de trabalhar com o *Ladder*, o pessoal de formação eletrônica pode se sentir mais à vontade com o diagrama de blocos funcionais, enquanto que o pessoal de base matemática ou científica pode preferir a Lista de Instruções. Em todos os casos, na "linguagem de máquina", o programa resultante "visto pelo CLP" será exatamente o mesmo.



Programa em diagrama de blocos funcionais

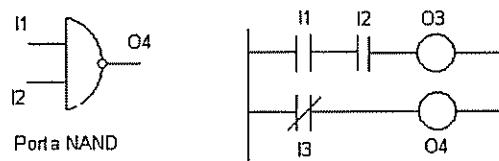
```

: A I 1.2
: A I 1.3
= Q 2.0
: BE

```

Programa em lista de instruções

FIGURA 12.5 Um mesmo programa "traduzido" em três linguagens diferentes.



LD I1
AND NOT I2 Linguagem Booleana
OUT O4

```

100 REM "BEGIN NAND"
200 O4 = 0
300 IF I1 = 0 THEN 500
400 IF I2 = 0 THEN 500
450 GOTO 200
500 O4 = 1
600 GOTO 300

```

Linguagem BASIC

Linguagem Ladder

I1	I2	O4
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1

Tabela Verdade

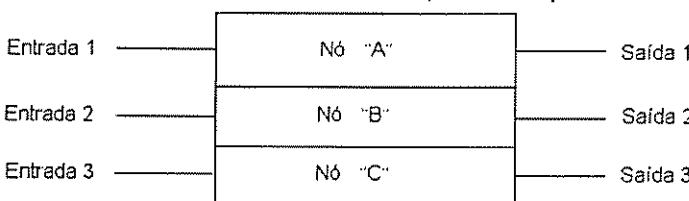
5 versões, 1 só programa

FIGURA 12.6 Várias formas de se visualizar o mesmo programa.

12.6.4 Os Blocos Funcionais

A inclusão de blocos funcionais dentro de um diagrama *ladder* é amplamente usada quando se mistura a lógica seqüencial ou combinacional com funções mais sofisticadas, que o *ladder* só permitiria resolver com programas relativamente extensos. Por exemplo, é possível fazer a contagem de eventos em *ladder*, mas existem blocos contadores e temporizadores em que estas funções ficam bem mais fáceis de se programar e de se acompanhar os valores de contagem e tempo decorrido.

O número de nós, de entradas e de saídas depende da função do bloco



Forma de um Bloco de Função Genérico

FIGURA 12.7 Um bloco funcional típico.

Alguns destes blocos funcionais desenvolvidos para ser inseridos dentro de um programa *ladder* incluem:

- contadores e totalizadores;
- temporizadores (com várias bases de tempo);
- soma;
- subtração;
- multiplicação;
- divisão;
- transferências de dados;
- operações matriciais;
- controle PID para variáveis de processo;
- extratores de raiz quadrada;
- leitura e escrita de mensagens com caracteres ASCII.

Um bloco funcional tipo Contador e um tipo Temporizador são muito semelhantes, ambos contam. Enquanto um conta a quantidade de vezes que um evento ocorre, como, por exemplo, uma chave é fechada quando da passagem de um objeto em uma esteira transportadora, o outro conta o número de pulsos decorridos desde o instante zero, a partir de um trem contínuo de pulsos, gerado por uma base de tempo escolhida dentro das disponíveis no próprio CLP. Assim, um bloco destes tem o seguinte formato genérico:

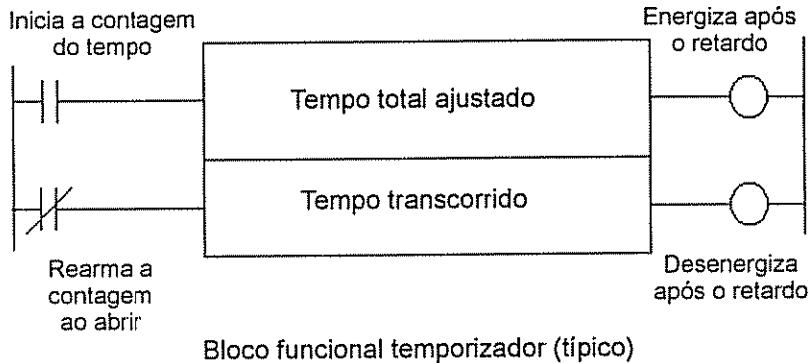
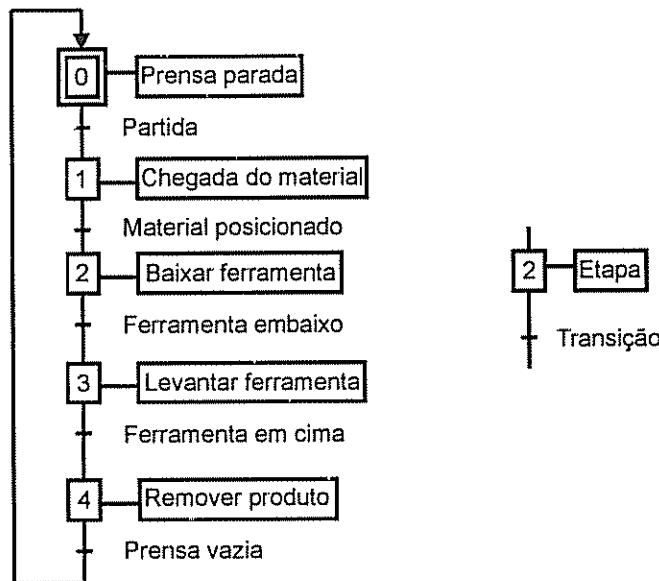


FIGURA 12.8 Blocos tipo Contador e Temporizador.

12.6.5 A Linguagem Estruturada GRAFCET ou SFC

FIGURA 12.9 Mapa de Seqüência Funcional (*Sequency Function Chart*) ou Grafcet simples.

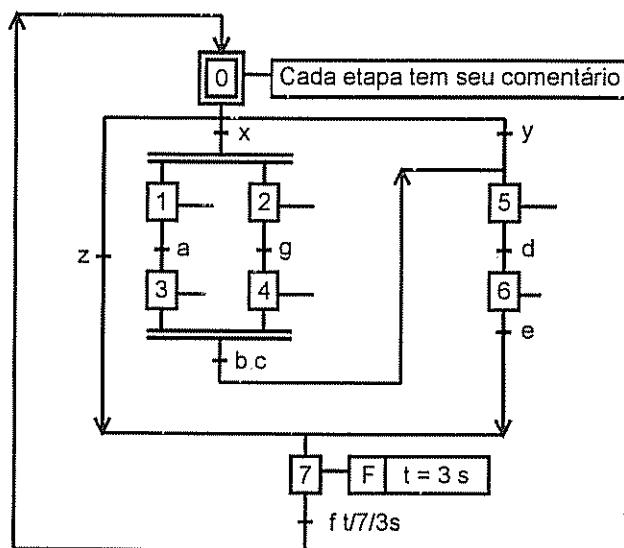


FIGURA 12.10 Mapa de Seqüência Funcional (*Sequency Function Chart*) ou Grafcet mais complexo.

12.7 O USO DE MICROCOMPUTADORES COMO CLPS

Há também várias opções para se substituir um CLP por um micro (PC) usando as mesmas linguagens de programação, e, freqüentemente, os mesmos módulos de entrada e saída fabricados pelos fornecedores de CLP mais tradicionais. Existe, ainda hoje, uma discussão feroz entre os que acham que os PCs substituem os CLPs em qualquer aplicação, com vantagens, e os que não aceitam um PC, mesmo de qualidade industrial, para substituir um CLP. Entre os dois extremos, a opinião mais comum é de que, dependendo da aplicação, pode-se aceitar a substituição, ou onde os riscos são mais elevados, é melhor confiar num CLP. Observe-se que, funcionalmente, não há discussões sobre a possibilidade dos PCs executarem as funções de um CLP. A discussão se concentra geralmente em termos de confiabilidade industrial tanto do *software* como do *hardware*. Usualmente, os profissionais que migraram de uma especialização em informática para a Instrumentação tendem a ser os que defendem mais ardorosamente o uso dos PCs, chegando, por vezes, a vaticinar o fim dos CLPs, como "obsoletos" frente à performance e velocidade dos PCs mais modernos. São os profissionais oriundos de Instrumentação e Controle em Ambiente Industrial que, geralmente, advogam a tese contrária, e não acreditam poder confiar em micros com arquitetura PC, sobretudo quando operando em ambientes tipo Windows, em seus diversos matizes. De qualquer forma, já há um grande número de PCs em aplicações, onde tradicionalmente usar-se-ia um CLP.

12.8 A UNIDADE CENTRAL DE PROCESSAMENTO (UCP) OU DO INGLÊS CPU

O processador, ou UCP, é o coração do CLP. Ele acessa os dispositivos de entrada, executa a lógica conforme o programa armazenado em sua memória, e aciona os dispo-

sitivos de saída. Além destas funções lógicas básicas, a UCP também faz outras funções, como temporização, contagem, retenção, comparação e armazenagem de informações. A maioria dos CLPs também pode somar, subtrair, multiplicar, dividir, executar algoritmos de controle PID e manuseio de dados, como armazenamento e recuperação de mensagens.

12.8.1 A Varredura

O tempo de varredura é o tempo necessário para um CLP completar um ciclo de varredura do estado das entradas, executar a lógica e acionar as saídas correspondentes.

O tempo de varredura é importante em várias aplicações, e tipicamente varia entre dezenas de milissegundos a fração de milissegundo por *kilobyte* de memória consumida pelo programa. O tempo de varredura varia em função do tipo de CPU selecionada, do número de entradas e saídas, da complexidade da lógica executada, da quantidade de memória alocada, e de alguns fatores adicionais, como a sobrecarga das comunicações e de outras funções eventualmente delegadas ao CLP. Como o CLP varre seqüencialmente, quanto mais rápida sua varredura mais rapidamente ele responderá a uma demanda do processo.

O processamento em paralelo é um método usado por muitos fabricantes para reduzir o tempo de varredura. Este método permite que partes diferentes do programa "rodem" simultaneamente em diferentes processadores. Por exemplo, em um CLP com dois processadores, um faz a lógica tradicional e cuida da varredura de entradas e saídas, enquanto o segundo processador faz cálculos matemáticos, manipulação de dados e interface com módulos de entrada e saída de sinais analógicos, que normalmente sobrecarregariam muito, em termos de tempo, o processador lógico.

Como o CLP trabalha por varredura, pode não ter uma resposta veloz o suficiente para acompanhar processos muito rápidos, como, por exemplo, alguns sistemas de manuseio de material. Este tipo de aplicação pode exigir que o CLP tenha a capacidade de "interrupção" que pare seu processamento normal e desvie o processador para atender a uma subrotina específica. Outras estratégias de programação permitem que uma entrada física seja ligada a vários pontos de entrada, de forma que o CLP possa, por exemplo, acompanhar entradas que exijam resposta mais rápida, como a entrada de contadores. Este artifício não pode ser usado em qualquer CLP, pois sua eficácia depende de como o CLP varre as entradas e saídas e executa a lógica.

A maioria dos processadores usa 16 ou 32 *bits*, o que permite que eles executem algumas funções tipicamente destinadas a computadores, como, por exemplo, mover blocos de dados dentro do programa, operações matriciais tais como lógica E e lógica OU, que podem ser usadas para comparação de padrões de *bits on/off*, matemática expandida com operação com algoritmos com vírgula flutuante, e sub-rotinas.

12.8.2 Os Dispositivos de Acesso Frontal nas UCPs

Há alguns dispositivos de "frontal de painel", em UCPs de CLPs, que são praticamente universais, como o acesso a uma "tranca" física, tipo chave, com a qual se assegura a comutação entre os vários modos de operação de CLP, que tipicamente são:

- em funcionamento;
- alterando o programa;
- em teste (sem energizar as saídas).

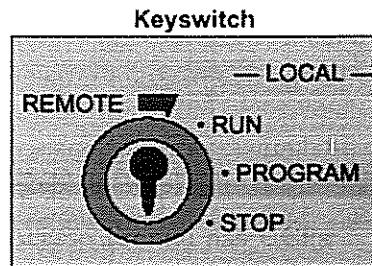


FIGURA 12.11 Exemplo de chave de UCP.

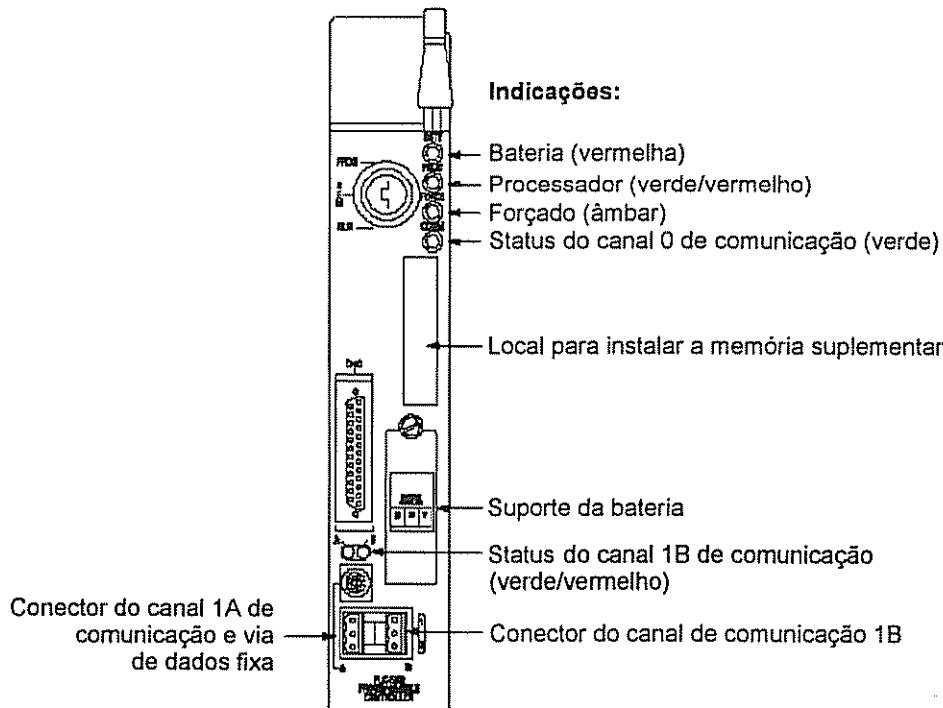


FIGURA 12.12 Exemplo de dispositivos típicos acessíveis pelo frontal das CPUs.

12.9 A MODULARIDADE

Fisicamente, a UCP pode ser uma unidade "autônoma", de montagem independente das estruturas de E/S, ou, mais modernamente, pode ser tipo *plug-in*, montada em uma das ranhuras de uma estrutura de E/S. Normalmente à UCP se associa a uma (ou mais) fonte(s) de alimentação(s), modular, externa à própria UCP, ou integrada à mesma. As tensões mais tradicionais de alimentação das UCPs (via fontes) costumam ser 115 Vca e Vcc, 220 Vca, e está se difundindo cada vez mais 24 Vdc, sendo esta última a forma com que se pode conseguir um suprimento de energia mais confiável quanto às possíveis falhas, mesmo em sistemas redundantes de alimentação, contendo unidades de alimentação de "reserva" instaladas, com transferências automáticas, etc. A confiabilidade do sistema de alimentação, neste caso, não reside tanto na fonte do CLP, e, sim, na maneira de se conseguir suprimentos redundantes e confiáveis para as fontes escolhidas.

12.10 MEMÓRIAS

Em um CLP usam-se vários tipos de memórias distintas, como, aliás, em qualquer sistema computadorizado. Por se tratar de assunto do domínio da informática, não vamos nos deter em analisar mais detalhadamente quais aplicações específicas são adequadas para cada tipo. Memórias são componentes conhecidos por sua elevada taxa de falhas, se comparadas a outros tipos de semicondutores. A principal ênfase dada às memórias de um CLP é sua elevada confiabilidade industrial.

12.11 ENTRADAS E SAÍDAS

Nas instalações de CLPs de médio e grande portes, o custo dos módulos de entrada e saída, sem dúvida, é bem expressivo, se comparado ao custo da UCP. As interfaces de entrada convertem os sinais oriundos de chaves-limite, chaves de processo, pulsos de alta velocidade, entradas tipo sinal TTL (circuitos integrados com nível lógico 1 = 5Vcc e nível lógico 0 = 0 Vcc), e tensões e correntes elétricas em sinais digitais lógicos. As interfaces de saída convertem sinais lógicos em sinais de controle para potências mais elevadas, como em 24 Vcc, 115 Vca, 4 a 20 mAcc, etc. Estes sinais são usados para atuar em uma variedade de dispositivos de campo, como válvulas solenóide, contatores para comando de motores etc. Entradas e saídas analógicas servem para interfacear o CLP com transmissores de variáveis de processo, como temperatura, nível, pressão, vazão e analisadores, bem como controlar a abertura de válvulas de controle, velocidade dos motores acionados por variadores de velocidade, etc.

Os módulos de saída normalmente incorporam fusíveis de proteção contra curtos-circuitos.

Há módulos que têm um fusível para cada saída, e módulos em que um fusível geral deve proteger todas as saídas, bem como módulos em que os fusíveis podem ser trocados com o módulo em operação, enquanto outros necessitam que se remova o módulo fisicamente para se ter acesso ao fusível.

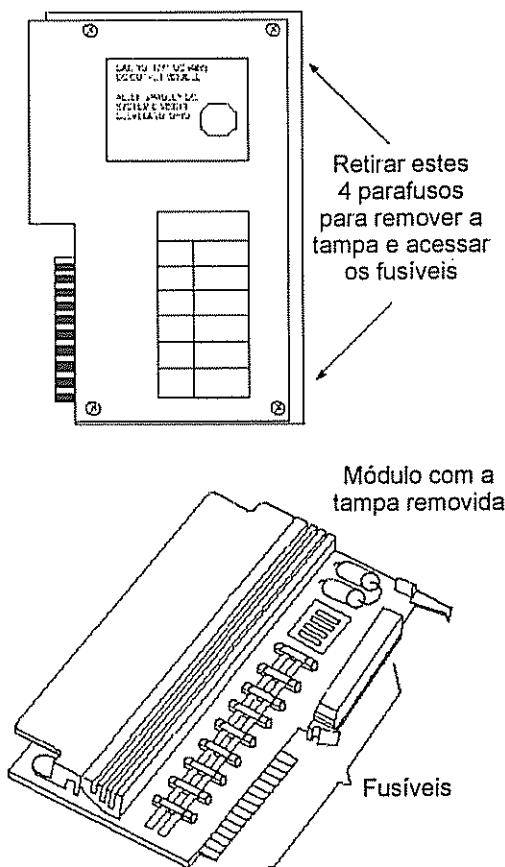


FIGURA 12.13 Módulo de saída em que só é possível trocar fusível removendo o módulo.

Usualmente, nos próprios módulos de saída estão os indicadores de fusível queimado, comumente constituídos por LEDs para os de baixa tensão e lâmpadas neón para os de mais de 115 volts. Cada entrada ou saída deve ter uma lâmpada ou LED de indicação de seu estado, isto é, se há sinal na entrada ou se há tensão na saída respectiva. Infelizmente, nos módulos de entrada geralmente a lâmpada só indica se há tensão aplicada naquela entrada, e não se o CLP reconhece aquele ponto com o estado lógico de "ligado". Na saída, a mesma coisa, um ponto luminoso informa se há tensão nos terminais daquela saída, mas não diz que o estado lógico daquela saída esteja "energizado", e assim não serve para identificar uma saída em curto, nem se a alimentação da saída vem de algum bypass externo ao CLP. Assim, a interpretação dos sinais luminosos nem sempre é diretamente aplicada ao diagnóstico de falha do módulo de entrada ou saída. Raramente se encontra módulos de entrada e/ou saída com duas indicações de estado para cada entrada ou saída, ou seja, se há tensão nos bornes, e se o estado lógico "percebido" pelo CLP na entrada é "ativo", ou se a lógica efetivamente comandou a saída para ligar, e não há simplesmente uma saída em curto, ou comandada externamente em paralelo com o módulo do CLP. Este tipo de indicação pode ajudar bastante na localização de defeitos, quando se pode

comparar o estado "lógico" com o estado real elétrico das entradas e saídas, facilitando a isolação de uma falha do módulo de entrada/saída ou falha do funcionamento da lógica em si.

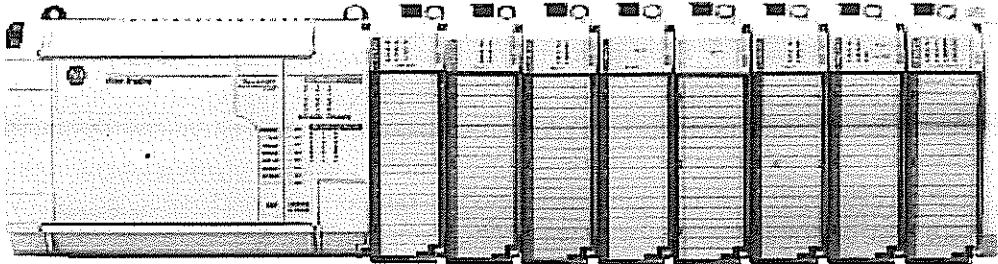


FIGURA 12.14 Grupo de entradas e saídas remotas de um CLP.

Há fabricantes de equipamentos eletrônicos que embora não fabriquem os CLPs, fazem módulos projetados para integrarem a arquitetura de CLPs de terceiros, muitas vezes sendo encaixados diretamente na estrutura de entradas e saídas do CLP, e tendo cor e acabamento idênticos as usadas pelo próprio fabricante do CLP. Usualmente estes fornecedores recebem informações técnicas dos fabricantes do CLP que tornam sua integração nos sistemas viável a baixo custo. Freqüentemente os próprios fabricantes de CLPs compram módulos destes fornecedores para executarem funções específicas de que não dispõem em seus próprios módulos. Geralmente são módulos para aplicações especializadas, que por sua menor escala de produção, ou alta especialização não interessaram ao fabricante de CLP produzir. Exemplos típicos são alguns módulos de comunicação especial, como *wireless* (sem fio, por ondas de rádio) ou de medição de vazão de gás, com compensação de temperatura, composição e densidade, ou de alta velocidade de resposta para controle anti-surge de compressores, etc.

12.11.1 A Isolação das Entradas e Saídas

Um detalhe importante tanto nos módulos de entrada como nos de saída, é a "isolação" do módulo. O vocábulo *isolação* é usado de duas formas distintas e ambíguas. A parte de "sinal do campo", seja em uma entrada ou uma saída, é sempre isolada da alimentação dos circuitos lógicos, para evitar a "contaminação" dos circuitos lógicos pelos transientes de tensão, tão comuns no ambiente industrial. Assim, todos os fabricantes especificam para quase todos os módulos de E/S uma tensão de isolação. Outra coisa chamada de isolação é a existência, ou não, de isolação galvânica entre as diversas saídas (ou entradas) de um módulo entre si. O caso mais clássico de problemas que aparecem no campo quando se usam saídas sem isolação "individual", é quando se conectam a um CLP várias unidades de Centro de Controle de Motor (CCM), cujos módulos têm alimentação independente.

É comum que cada módulo do CCM, correspondendo ao acionamento de um motor tenha seu transformador de alimentação individual. Se ligarmos várias saídas de CLP, não isoladas umas das outras a vários destes módulos, podemos estar ligando em paralelo vários

transformadores de comando, nem todos com a mesma tensão, e nem todos igualmente faseados, e isto pode acarretar na queima inesperada (e, às vezes, "inexplicada") de fusíveis de comando. Pode também ocorrer o funcionamento aparentemente normal do sistema, até o dia em que um eletricista "desliga" o comando de uma gaveta, retirando seu fusível. Qual a sua surpresa (e que situação de risco!) quando o motor entrar em operação, porque sua tensão de comando foi suprida pelo transformador de outra gaveta, via interligação através do módulo de saída do CLP?

Os módulos de entrada e saída que não têm isolação individual são, não só um pouco mais baratos, como perfeitos para aplicações em que um potencial comum não altera o funcionamento do circuito, como, por exemplo, alimentar válvulas solenóide e monitorar chaves de processo (pressostatos, termostatos, etc.) no campo.

12.12 OS ENDEREÇOS

O endereçamento das Entradas e Saídas Num programa aplicativo do CLP é necessário que se tenha uma identificação correta e não ambígua de cada entrada e cada saída.

Embora não haja uma padronização definida para se identificar cada "ponto" de E/S, a maneira que os vários fabricantes usam para "endereçar" cada ponto é praticamente uniforme. O primeiro caracter define se o ponto é uma entrada ou uma saída. Isto é essencial para o programa saber se deve interrogar o estado (ligado ou desligado) da entrada, ou se deve comandar a atuação daquele ponto (ligar ou desligar).

Usualmente a letra "I" (de *Input*) designa uma entrada, enquanto a letra "O" (de *output*) designa uma saída. É bastante comum usar-se o algarismo 1 em lugar da letra I, e o algarismo 0 em vez da letra O, mantendo-se, assim, o código de endereçamento do ponto todo numérico. (Alguns fabricantes alemães usam "Q" em vez de O, ou 0 e "E" em vez de I ou 1.) Em seguida, vem um algarismo que se refere à numeração seqüencial da estrutura (*rack*) em que o ponto está instalado; segue-se a ordem, da esquerda para a direita do módulo de que o ponto faz parte e, finalmente, no módulo, geralmente de cima para baixo, ou da esquerda para a direita, a posição ocupada pelo ponto.

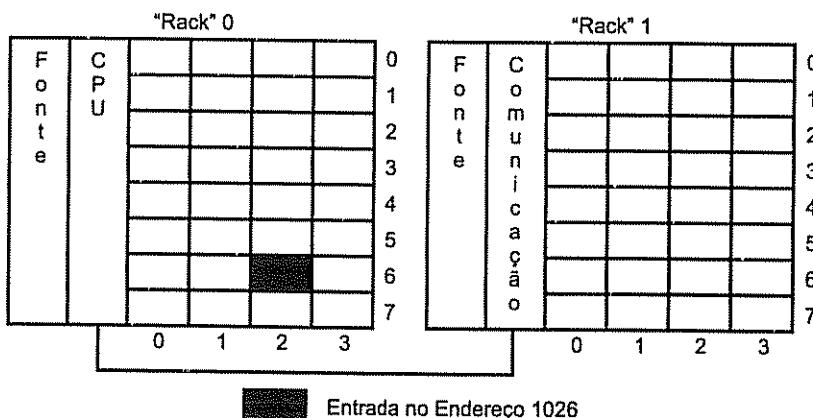


FIGURA 12.15 O "ponto" de endereço 1026.

Observe-se que a numeração geralmente é feita em octal ou hexadecimal, e, assim, a primeira posição de uma sequência de endereços é zero. Em um módulo de E/S de 8 pontos, estes serão usualmente numerados de 0 a 7. Assim, o endereço 1026 se refere a uma entrada, instalada no primeiro rack de E/S (rack nº 0), conectada no módulo inserido na terceira ranhura (a primeira é a de número zero), da esquerda para a direita, e é a sétima entrada, de cima para baixo, neste módulo. Quando o ponto 1026 for interrogado pela UCP, é esta a entrada que responderá se seu estado lógico é "ligada" ou "desligada".

12.13 A PROGRAMAÇÃO

Uma linguagem de programação serve para traduzir instruções em nível de entendimento pelo ser humano em instruções ditas de baixo nível, ou seja, que uma UCP pode executar. Existe uma norma do IEC para padronizar as linguagens de programação geradas por diferentes fabricantes, é a norma IEC-61131-3.

Uma linguagem de programação deve permitir que um usuário possa se comunicar com o CLP via uma unidade ou um software de programação, para programá-lo. Existem cinco tipos principais de linguagens de programação:

- 1) o **Histograma de Contatos (Ladder Diagram)** – esta ainda é uma das mais populares, simbolizando contatos abertos e fechados, e bobinas de relés, que são familiares a engenheiros e técnicos eletricistas e eletrônicos, bem como ao pessoal de manutenção elétrica, há muitos anos. Geralmente há limitações quanto ao número de elementos que se pode associar em uma única linha de lógica, e, às vezes, no número de linhas que podem ser associadas em uma rede. Praticamente todos os CLPs de uso geral adotam esta linguagem, podendo adicionalmente usar outras;
- 2) **linguagem de Álgebra Booleana** – este tipo usa funções booleanas do tipo "E", "OU", "XOU", "NÃO", etc. para relacionar os mesmos endereços de entrada e saída usados pelo Histograma de Contato equivalente. Usualmente, estas funções booleanas vêm inscritas em símbolos lógicos apropriados, enquanto linhas interligam os símbolos entre si e às entradas e saídas. A maioria dos eletricistas de chão de fábrica tem dificuldades em trabalhar com álgebra booleana;
- 3) **descrições computadorizadas** – esta é a que mais se assemelha a uma linguagem de baixo nível, para computador tipo assembler, porém com um conjunto de instruções extremamente simples. Usa termos como E, OU, STO, LDA, etc.;
- 4) **linguagens em alto nível** – como "C", "C++", Basic, e outras;
- 5) a "**linguagem**" **estruturada Grafset** – criada na França e hoje divulgada em todo o mundo, às vezes com aspecto levemente modificado, conhecida na América do Norte como *Sequency function chart*, não é considerada por todos como uma linguagem, já que apenas ordena os blocos de comandos que são executados, por exemplo, em Histograma de Contatos. Muito poderosa quando o programa solicita muitas sub-rotinas opcionais que podem ou não ser chamadas para execu-

ção, dependendo de parâmetros que o próprio programa pode criar ou reconhecer. Como toda linguagem estruturada, pode permitir que equipes diferentes façam partes diferentes de um único programa, e que este funcione a contento depois de reunidas as partes. Ajuda muito na procura de falhas, tanto para os bugs do próprio programa, como para os defeitos de dispositivos de campo, de módulos de entrada, etc.

12.14 O CLP E AS COMUNICAÇÕES

Os CLPs necessitam de se comunicar "internamente", entre módulos de entrada/saída e a UCP, com unidades de programação e outros "acessórios", bem como "externamente" com outros equipamentos microprocessados, como outros CLPs, SDCDs, microcomputadores de interface homem-máquina, instrumentos autônomos microprocessados como analisadores industriais de variáveis de processo e de laboratório, instrumentação em *Fieldbus*, etc.

12.14.1 A Comunicação Interna

Quanto à comunicação interna, os CLPs geralmente têm duas classes de "portas" diferentes de acesso. Existe a comunicação com estruturas de entradas e saídas "locais", geralmente em baixa velocidade e para distâncias da ordem de até 10 metros, e para estruturas remotas, em maior velocidade, com opções tipo cabo coaxial ou fibra ótica, e distâncias de até um a três quilômetros. Alguns fabricantes incluem estas portas de comunicação como padrão na sua própria UCP, outros fornecem como módulos acessórios opcionais para interligação à UCP, ou "residentes fisicamente" nas estruturas de E/S. Às vezes, por questões de carregamento e/ou configuração da comunicação com as entradas e saídas é preciso usar comunicação remota, mesmo com as estruturas de E/S instaladas localmente.

12.14.2 A Comunicação Externa

Quanto à comunicação externa, quase todos os CLPs apresentam pelo menos uma opção de via de dados "proprietária" que permite interligar muitas UCPs do mesmo fabricante. Há fabricantes que têm opção para mais de um tipo de via "proprietária" com características diferentes e até para atender a gerações diferentes de equipamentos, ou UCPs de diferente porte. Há fabricantes de CLPs que têm uma grande quantidade de opções para comunicações, incluindo-se aí módulos "encaixáveis" nas estruturas de E/S, módulos para instalação autônoma, modems e gateways configuráveis para comunicação com diferentes tipos de SDCDs, computadores, e interligação das vias de dados de diferentes gerações de CLPs do mesmo fabricante, conversão de protocolos de comunicação os mais variados, em várias velocidades, com diferentes características de determinismo de tempo de resposta, de diagnóstico, etc. Há CLPs que incluem em sua estrutura de UCP/E/S módulos opcionais de comunicação com instrumentação *Fieldbus* compatíveis com a Fieldbus Foundation, e CLPs que fazem o mesmo em relação ao Profibus. O que normalmente não se encontra são formas simples e eficientes

de se estabelecer comunicação entre CLPs de diferentes fabricantes. O assunto é bem vasto e já tivemos oportunidade de ver propostas de fornecimento em que a comunicação proposta não era a mais eficiente nem a de melhor custo ou maior simplicidade para os objetivos desejados. Até entre profissionais de um mesmo fornecedor de CLP aparecem opiniões às vezes divergentes, sobre qual a maneira mais eficiente de se "montar" a estratégia de comunicação para atingir os objetivos pretendidos, em um sistema de alguma complexidade.

12.15 ARQUITETURA DOS SISTEMAS DE CONTROLE COM CLPS

Embora a versatilidade atualmente encontrada tanto nos CLPs como nos microcomputadores permita que se faça praticamente qualquer função em qualquer máquina, predominam as instalações em que os CLPs controlam diretamente o processo, enquanto os micros a eles interligados fazem a função de interface-homem-máquina, incluindo a aquisição de dados, sua digestão para envio aos computadores de níveis hierárquicos superiores dentro da empresa, carregamento de receitas em processos de batelada com mais de um produto em linha, etc. A tendência moderna é colocar no CLP tudo o que é indispensável para garantir a continuidade operacional, deixando para o PC as atividades que, se interrompidas por curtos períodos, não acarretam prejuízos de quebra de produção.

Existem sistemas chamados Sistemas Híbridos que incluem uma arquitetura de CLP e uma de PC, em uma mesma estrutura de UCP. Há também quem defina Sistema Híbrido como uma mistura funcional de CLP e de SDCD, como mencionado no capítulo 13, item 13.10.1.

12.16 CONFIABILIDADE E DIAGNÓSTICOS

Nos sistemas tradicionais a relés, uma falha de um relé tipicamente afetava uma parte da lógica e uma parte geralmente pequena das saídas do sistema. Uma falha em um CLP pode causar uma parada total, descontrolada. Há muitos processos em que a parada de um equipamento exige uma série de providências para evitar acidentes. Por exemplo, a parada de um reator, sem a ativação de uma refrigeração auxiliar, pode causar um sobreaquecimento que resulte em acidente.

Assim, em muitos casos, uma parada não controlada, como acontece em falhas gerais de um CLP, pode trazer riscos adicionais. Além disso, relés falham de modo conhecido. Uma falha de relé será tipicamente a desenergização inesperada (usualmente pela queima da bobina ou um mau contato), enquanto a falha de uma entrada ou saída de um CLP pode ser tanto na condição energizada como desenergizada. É importante que as falhas de CLPs sejam detectadas e que uma sequência de desligamento programado possa ser efetuada em processos em que esta condição seja crítica.

12.16.1 Técnicas de Diagnóstico

A maioria dos fabricantes de CLP inclui diagnósticos bem mais poderosos em suas UCPs do que normalmente se encontram em microcomputadores de arquitetura aberta. A seguir, algumas das técnicas de diagnóstico empregadas

12.16.2 Temporizador Cão-de-Guarda (*Watch-dog timer*)

Este é um dispositivo que verifica se a varredura do CLP não se interrompeu. Ele consta de um temporizador *hard wired*, isto é, feito com componentes discretos, não programável, e não dependente da UCP, e de uma instrução inserida pelo fabricante do CLP a ser executada após a última linha do programa do usuário. Imagine um temporizador, cuja função é interromper o funcionamento da UCP e desligar todas as saídas do CLP. A tal instrução, inserida pelo fabricante, faz simplesmente que o tempo de ajuste do temporizador volte ao início sempre que o programa do usuário passe pelo final e retome do início. O temporizador, assim, enquanto tudo correr bem, jamais deve chegar ao final de seu ciclo e executar a parada do CLP. Assim, em um ciclo normal, enquanto o programa é executado, o tempo contado pelo temporizador se escoa, porém, antes que acabe, quando o programa chega ao fim, e volta para reiniciar da primeira linha, o tempo decorrido é recomeçado, e o temporizador nunca chega a disparar sua saída. Se, por algum motivo, a varredura for interrompida, ou o programa executar saltos (*jumps*) que o impeçam de passar pela última instrução, o tempo ajustado no temporizador cão-de-guarda se esgotará, e este desligará o CLP.

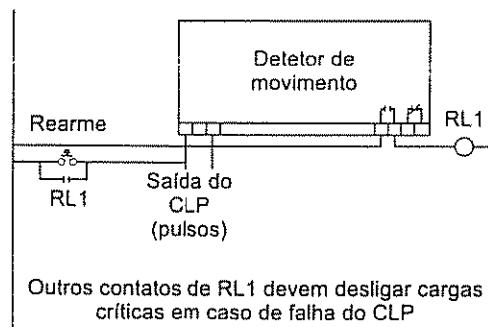


FIGURA 12.16 Temporizador cão-de-guarda.

É possível construir um temporizador cão-de-guarda de funcionamento “independente” do CLP para monitorar a UCP e intertravar algumas cargas mais críticas. No exemplo da figura, usou-se um detector de rotação mecânico, do tipo empregado para verificar se uma correia transportadora está acionada, como detector de pulsos. Se a UCP ou módulo de comunicação parar de mandar impulsos para uma saída determinada, o detector dispara o relé (RL1) de saída, cortando as cargas críticas.

12.16.3 Verificação de Paridade

Acrescentam-se *bits* de paridade a cada palavra. Se alguma palavra aparecer sem a paridade correta, isto indica que ela foi corrompida, seja por uma falha de um *bit* de memória, ou erro no programa.

12.16.4 Soma de Verificação

Faz-se a paridade cruzada para cada palavra (linha de instrução, programa ou dados) e para cada coluna de palavras. A detecção de erros por Soma de Verificação é bem mais eficiente do que por paridade. Além disso, a Soma deteta qual o *bit* que está errado, e assim permite corrigir alguns erros, sem que se precise recuperar a palavra original.

12.17 ALGUMAS LIMITAÇÕES DE APLICAÇÕES PARA CLPS

À medida em que o uso dos CLPs se difunde, os clientes pressionam os fabricantes para aumentar a habilitação dos CLPs, e melhorar sua performance. Assim, para certos tipos de controle, como em bateladas e alguns controles lógicos seqüenciais, onde se exige que certas variáveis analógicas (nível, temperatura, pressão/vácuo e vazão, tipicamente) possam ter seus valores alterados ao longo do tempo ou em função de alguns eventos ou fases da produção, conforme programado, e então seria muito conveniente ter estas variáveis controladas pelo CLP. Na época do controle por relés, estas variáveis só podiam ser controladas por controladores analógicos dedicados. Os CLPs responderam à estas demandas incluindo o algoritmo de controle PID, e modificando sua arquitetura interna de forma a poderem dar conta de executarem este controle analógico mantendo uma performance (e um tempo de resposta) ainda aceitável para as variáveis discretas. Uma das maneiras de controlar estas variáveis analógicas é através dos chamados módulos de controle PID inteligentes, em que o controle PID é efetuado em uma UCP contida no mesmo módulo que funciona como entrada/saída analógica, aliviando assim a UCP principal do CLP da sobrecarga que tal controle lhe imporia. Algumas aplicações específicas ainda impõem ao CLP um regime de trabalho bastante pesado, e, às vezes, impossível de suportar. Uma das limitações é a velocidade da UCP, que embora seja atualmente bastante elevada, não permite, por exemplo, uma resposta suficientemente rápida para, por exemplo controle anti-surge de compressores. Praticamente qualquer "máquina" que funcione segundo um ciclo de trabalho, como o CLP, só será adequado para um trabalho deste tipo se forem empregados artifícios de programação nem sempre disponíveis no CLP, e que, eventualmente, reduzem sua disponibilidade para outras aplicações. Neste tipo de aplicação, ainda é comum se recorrer a controladores digitais dedicados para as variáveis analógicas. Nos casos em que a própria lógica pode demandar uma resposta muito rápida, pode-se optar pela lógica fixa, que, não tendo que respeitar um ciclo de varredura, como o CLP, pode agir tão rapidamente quanto o tempo de resposta de seus circuitos permitam.

Deve-se, também, lembrar que os CLPs não são computadores de uso geral e, portanto, sua capacidade de computação é bem mais limitada, bem como sua memória, e fazê-los executar algoritmos matemáticos pesados, como, por exemplo, a otimização do controle de processo, pode sobreacarregá-los, a ponto de tornar o controle inviável ou antieconômico. É melhor usar um micro para "os cálculos" e associá-lo ao CLP que, então, executa realmente o controle. Pelos mesmos motivos, se a aplicação exigir uma aquisição de dados elevada, é melhor passar os dados do CLP ao micro, onde pode residir até uma planilha eletrônica completa, capaz de "digerir" a massa de dados e calcular os valores de que o usuário precisa já formatados adequadamente para sua aquisição.

12.18 TENDÊNCIAS ATUAIS

A arquitetura das UCPs dos sistemas de controle digitais mais modernos tem sofrido constante evolução, ao ponto de existirem sistemas que fazem indistintamente as funções de CLP e de SDCD. Geralmente estes sistemas são denominados "sistemas híbridos", mas esta nomenclatura também é usada para CLPs com funções simultâneas de CLP e de microcomputadores tipo PC.

Há basicamente duas maneiras de se fazer um "sistema híbrido" CLP + SDCD. A primeira e mais primitiva consistia em se associar uma (ou mais) UCP de CLP com uma (ou mais) UCP de SDCD, que repartem entre si uma memória comum, onde os dados dos dois tipos de UCP são compartilhados, e de onde derivam as comunicações com os sistemas de Informática Industrial de nível mais elevado da planta. A segunda forma passa pelo projeto de UCPs capazes de efetuar as funções de um CLP e de um SDCD, com praticamente a mesma eficiência, de forma que fica difícil designar o equipamento como sendo um CLP ou SDCD, daí a expressão "Sistema Híbrido".

Atualmente a mais importante novidade em relação aos CLPs se refere muito mais à forma de comercializá-los, do que em sua eletrônica. Tradicionalmente vendia-se CLPs como *hardware*, praticamente sem assistência de Engenharia pelo fabricante. Após receber do fabricante algum treinamento em programação, o cliente deveria fazer seu programa, desenvolver ou comprar uma Interface-Homem-Máquina, ou contratar quem o fizesse para ele. Atualmente muitos clientes querem que "alguém" se responsabilize por todo o funcionamento do sistema, isto é: especifique ou forneça o CLP, o(s) micro(s), o(s) programa(s), participe dos testes de aceitação do equipamento, do sistema configurado, lhe dê suporte de treinamento e operação, enfim tome conta de todo o "sistema".

Há fabricantes de CLP que estão habilitados a fazer este escopo, enquanto a maioria prefere usar casas integradoras de sistemas como seus representantes autorizados de venda com "valor agregado", sendo este valor a execução dos serviços mencionados.

Como o valor do hardware de CLPs está sendo reduzido progressivamente, há muitos representantes ou revendedores autorizados de fabricantes que decidiram agregar mais valor aos produtos vendidos, elaborando e fornecendo o projeto da instalação, ou o software do usuário, ou até treinamentos. Isto causou o surgimento de um número maior de novas casas integradoras no mercado.

13

SDCD E REDES DE COMUNICAÇÃO

ENGº VITOR FINKEL

13.1 INTRODUÇÃO

O Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD ou DCS, do inglês *Distributed Control System*) é um sistema de controle industrial microprocessado, criado inicialmente para efetuar especificamente o controle das variáveis analógicas, e foi sendo expandido em suas aplicações até abranger praticamente todas as aplicações de controle usuais, incluindo-se aí as variáveis discretas, o controle de bateladas, controle estatístico de processo, geração de relatórios, etc.

13.1.1 Finalidade e Definições

O SDCD foi desenvolvido para substituir os controladores analógicos dedicados ao controle de processos industriais e, ao mesmo tempo, permitir aos operadores uma melhor visualização da operação da unidade, podendo controlá-la melhor. O SDCD se compõe de três elementos básicos: a interface com o processo, (integrando os controladores e unidades de aquisição de dados), a Interface-Homem-Máquina (I-H-M) e a via de dados (*data highway*) que interliga as primeiras. Existe uma quantidade de definições sobre o que é um SDCD. Algumas das definições mais usuais de SDCD exprimem o fato de que uma "máquina" (dispositivo microprocessado) é responsável pela ação de controle, enquanto outra é responsável pela interface como operador humano. O elemento de ligação entre as duas é a via de dados (*data highway*) do sistema. Há duas definições baseadas nesta distribuição de funções; uma, dita definição por localização, diz que a interface com o processo pode estar no campo, enquanto que a interface com o homem está em uma sala de controle. Já a definição funcional, diz que em um SDCD um "processador" interfaceia o processo industrial, enquanto outro "processador" faz a tarefa de interfacear com o operador. Por esta definição basta que os dois processadores sejam distintos para se ter um SDCD. Os componentes que constituem o SDCD são os mesmos, seja qual for destas duas últimas definições que se considere como correta, e, na continuação deste capítulo, é a um sistema constituído por estes componentes que nos referimos.

13.1.2 A Origem

A concepção original da interface homem-máquina dos SDCDs saiu da Divisão de Sistemas de Gerenciamento da Honeywell no final da década de 1970, como resultado de um estudo sobre as rotinas de uso das salas de controle centralizado. O estudo ficou muito conhecido, e serviu de base a praticamente todos os desenvolvimentos de interfaces de operadores com processo, feitos a partir desta época, por todos os fabricantes. Os autores do estudo conversaram com os operadores, observando suas ações em condições normais e anormais de operação, estudaram o volume de informações que um operador podia receber, entender, processar e agir em consequência delas. Em seguida, estudaram a maneira mais eficiente de condensar e transmitir informações entre homens e máquinas. Para efetuar um controle eficiente, o operador deve poder observar continuamente um número de variáveis chaves, detectar qualquer anomalia no comportamento das mesmas, e tomar medidas corretivas rapidamente, podendo partir, parar e controlar o processo manualmente quando necessário. A rapidez de resposta do operador pode ser essencial, especialmente durante as situações de emergência. Uma necessidade premente era que o operador deveria detectar tão rapidamente quanto possível condições de processo, tendendo a uma anormalidade, podendo antecipar-se a um desvio maior, efetuando correções antes que o desvio atingisse níveis excessivos, que obrigasse a se interromper o processo produtivo, causando prejuízos, aumento de riscos e de probabilidades de acidentes.

Observou-se que o operador precisava de um grande número de informações a serem avaliadas simultaneamente, oriundas de muitos instrumentos espalhados em extensa área do painel, usualmente mais do que um operador humano pode manter sob estreita vigilância por muitas horas seguidas. Descobriu-se que os operadores simplificavam esta tarefa não se fixando nos valores das variáveis, mas apenas no desvio entre elas e o valor desejado ou valor normal típico que apresentavam. Assim, usualmente, apenas as variáveis que apresentavam valores mais longe dos valores normais eram percebidas prontamente pelo olhar experiente do operador. Observou-se, também, que se o operador se afastava do painel o suficiente para ver uma grande quantidade de instrumentos, ele perdia totalmente a noção dos detalhes, e via apenas as malhas que apresentavam maiores desvios do valor medido. Quando ele se aproximava mais, a fim de enxergar os detalhes de que precisava, já não podia ver mais do que uma a três malhas simultaneamente, pois seu ângulo de visão já não podia englobar vários instrumentos. O estudo concluiu que, embora todas variáveis sejam mostradas simultaneamente no painel, o operador apenas conseguia vê-las seqüencialmente. Uma conclusão importante foi que a informação em vez de ficar disponível para que o operador fosse procurá-la quando necessária, deveria chegar ao operador de uma forma agrupada e lógica, de forma que ele pudesse facilmente correlacionar as informações correlatas entre si. Daí a idéia da configuração de telas de grupos de variáveis. Observou-se, também, que a leitura de um número "digital" era mais simples do que a leitura de um valor de escala próximo a um ponteiro de indicação analógica, assim como o uso de informações pictóricas (figuras, barras, ícones, mudanças de cores ou formas) era de mais rápido entendimento do que mensagens escritas.

Outro elemento estudado detalhadamente foi o ponto de alarme. O procedimento tradicional, em que um alarme sonoro chamava a atenção do operador que, afastando-se do painel, verificava qual o ponto luminoso que estava aceso, ao longo de muitos "anunciadores de janelas" para se aproximar e ler a mensagem, e, em seguida, procurar o indicador, ou registrador ou controlador daquela variável, e só aí fazer a leitura do valor da variável, definitivamente não era adequado. Se um alarme já viesse associado ao grupo de instrumentos em que a variável alarmada estivesse contida, o reconhecimento e a atuação do operador seriam bem mais rápidos.

Observou-se que um registro histórico, que permitisse ao operador ver o comportamento da variável nos últimos minutos, horas e dias, desde que disponibilizados para fácil visualização, seria uma ferramenta muito útil para permitir alguns diagnósticos de anomalias e tendências de comportamento do processo. Os tradicionais registradores de papel não permitiam a recuperação das informações com suficiente facilidade pelo operador. Arquivos cheios de registros gráficos eram difíceis de consultar com rapidez para obter dados úteis, e ocupavam um espaço cuja utilidade era difícil de justificar pela sua utilidade.

Finalmente foi observado que uma tela gráfica, em que o processo seria representado pelos equipamentos, linhas e fluidos correlatos, sobre o qual se escrevesse de forma numérica ou pictorial os valores das variáveis, daria ao operador uma interface mais fácil de ser interpretada e visualizada, permitindo uma operação mais ágil e eficaz.

Uma recomendação muito importante foi de que toda a informação que um operador precisasse acessar deveria estar disponível para ele, a partir de sua posição normal de trabalho, sentado. Na época, pensava-se no modelo da cabine do avião, onde um piloto sentado precisava alcançar tudo de que precisasse. Havia painéis tão extensos que, segundo foi relatado (mas não comprovado), os operadores chegaram a usar patins para se deslocar ao longo dos mesmos com velocidade suficiente para poder correlacionar valores de variáveis distintas antes que os mesmos se alterassem.

13.1.3 Primórdios no Brasil

Durante muitos anos, no Brasil, durante a existência de um órgão Federal ligado diretamente à Presidência da República, chamado SEI (Secretaria Especial de Informática) houve quem definisse que um SDCD seria apenas um dos 5 modelos de SDCD cadastrados pela SEI, e portanto com importação/fabricação e comercialização liberadas em todo território nacional. Como esta "definição" tornou-se obsoleta, as outras definições fazem com que até um simples controle feito por um CLP, usando um microcomputador externo ao mesmo apenas para se comunicar com o Operador, (frequentemente chamado de sistema supervisório) seja um SDCD embora de pequeno porte. Esta imagem corresponde também ao SDCD, como abordado neste livro.

13.1.4 A Interface Via Tubos de Raios Catódicos e Teclados

A filosofia do *display*, que foi recomendada no relatório final do estudo, só poderia ser executada na prática, na época, pela união dos Tubos de Raios Catódicos (como uma tela de televisão) e teclados ergometricamente desenhados. O próximo passo a ser aperfeiçoado

foi a substituição parcial das funções do teclado por um dispositivo tipo olho-na-tela, como um *mouse*, *joystick*, *touch-screen*, ou *trackball*. O uso dos TRC em salas de controle não constituiu uma novidade, já que eles eram usados nos computadores dedicados a controle de processos que antecederam os SDCDs. A novidade foi substituir os textos e tabelas que apareciam nos TRCs por imagens gráficas, coloridas, dinâmicas e "auto-explicativas" até onde possível. O pessoal da área de propaganda rapidamente cunhou a frase "uma janela do processo para o operador". A outra novidade foi acoplar o TRC com o teclado, formando, assim, uma interface interativa, diferente do que se usava na época para computadores. Em linguagem de computadores da época, isto transformava uma interface "burra" em uma interface "inteligente". Atualmente, é prática universal apresentar a imagem em "janelas", que mesmo quando não baseadas no Sistema *Windows*, da Microsoft, têm uma aparência e funcionalidade similares. Também se tornou quase universal o uso de *mouse* e/ou *trackball* para comandos, em apoio e/ou substituição da maioria das funções do teclado. O uso de *Touchscreen* não deu resultados muito bons em muitas aplicações, devido a pouca confiabilidade, sujeira em muitos ambientes industriais, inclusive nas mãos/luvas de operadores de campo, e está quase deixando de ser usado. Há um número relativamente alto de relatos em que ao tentar limpar a tela de um *Touchscreen*, uma pessoa desavisada introduziu uma variedade de comandos aleatórios e derrubou a planta ou quase causou um acidente. Antes de se introduzir um *Touchscreen* em um ambiente industrial recomenda-se um pequeno treinamento adicional para o pessoal da limpeza.

13.2 A INTERFACE COM O PROCESSO

Do ponto de vista do controle, um SDCD teria que fazer tudo aquilo que os controladores eletrônicos tradicionais faziam, e, dada a sua natureza digital, permitir uma interface com computadores capazes de ampliar sua capacidade para controle avançado, otimização, aquisição de dados, controle estatístico de processo, troca de receitas em processos para produção em bateladas, etc.

Do ponto de vista da arquitetura do sistema, não havia mais necessidade de que as funções de controle ficassem fisicamente próximas à função interface-homem-máquina. Assim, em muitas instalações os controladores ficam próximos à Estação de Operação apenas por disponibilidade de espaço, enquanto em outras a localização dos controladores e outras interfaces com o processo pode ficar bem mais próximo do campo, enquanto que a localização das Estações de Operação pode ser feita de forma bem mais racional, desprezando-se o critério tradicional de economizar no custo da fiação, já que o SDCD, devido a substituir a tradicional fiação "discreta e individual" entre a "sala de controle" e o campo pelo uso da Via de Dados, permite uma economia substancial no custo da referida fiação.

O primeiro SDCD do mercado foi concebido, projetado, montado, configurado e distribuído pela Honeywell, e chamava-se TDC-2000 (de *Total Distributed Control*).

O TDC-2000 tinha um tipo de controlador capaz de controlar 8 malhas, com entrada de 4 a 20 mA (na verdade 1 a 5 Vdc, sobre um resistor de $250\ \Omega$), e qualquer outro tipo de sinal de entrada, para poder ser usado em malhas de controle, tinha que passar antes por um cartão de circuito impresso para "adaptar" o sinal para 1 a 5 Vdc. Assim, havia uma quantidade de cartões para termopares, termorresistências e outros sensores e transmissores industriais.

Para fazer o registro da variável era necessário que o sinal entrasse em uma "PIU" (*Process Interface Unit*), e, assim, uma variável controlada e que também fosse registrada teria que ser ligada fisicamente à entrada de dois módulos eletrônicos distintos, sendo um controlador, e o outro de aquisição de dados.

13.3 A CONFIGURAÇÃO

Há duas coisas totalmente diferentes que são chamadas genericamente de "configuração". Isto só serve para confundir o usuário, mas já está consagrado pelo uso. A configuração do *hardware* é uma lista do *hardware* necessário para atender a todas as malhas e funções de controle e aquisição de dados necessários, e sua instalação. A configuração do sistema é também o ato de se "programar" as variáveis, seus *tags* e características de controle/aquisição/alarmes para cada uma delas.

Chama-se de carregamento do SDCD a quantidade total de malhas e de funções que um SDCD deve controlar. Para se ter idéia, um SDCD com várias malhas de controle, fazendo um controle proporcional simples, pode estar mais carregado do que um SDCD com muitas malhas fazendo só indicação, alarme e registro, pois estas funções "pesam" menos para o SDCD do que as funções de controle.

13.3.1 Configurando um SDCD

Um SDCD já vem de fábrica com uma série de instruções pré-programadas, relativas às várias funções que um usuário pode precisar que ele execute em sua aplicação específica. Estas "instruções" incluem vários algoritmos de controle, de aquisição de dados, de montagem das telas de visão geral, telas de grupos de malhas e telas de malhas individuais, de alarme, de registro etc. Quando o usuário "instala" no SDCD as instruções relativas à sua aplicação específica, ou seja, introduz o TAG de seus instrumentos, define os endereços de entradas e saídas, quais algoritmos usa para cada malha, os fatores relativos ao ganho proporcional, integral e derivativo, níveis de alarme, para cada malha. Estas informações são armazenadas na estação de controle, em sua base de dados. Por exemplo: se o algoritmo PID de uma malha deve trabalhar em conjunto com outro de outra malha, formando um controle em cascata, a entrada de referência do PID secundário é definida usando-se o endereço de saída do PID primário. Nenhuma ligação física por fios ou cabos precisa ser feita entre os dois dispositivos de controle PID. Eles são interligados por *software*, através da configuração.

Existe outra etapa da configuração que precisa ser realizada, chamada de configuração do sistema. O usuário, ou quem quer que configure o sistema para sua aplicação deve definir dentre as muitas opções existentes, como alarmes, registros, controle, telas gráficas, etc., o que será usado para cada malha pela estação de operação. Assim, se a parte da configuração referente ao tratamento da informação para fins de controle "reside" no controlador da malha, a parte referente à interface com o operador "reside" na estação de operação.

A maneira tradicional de se entrar com os dados da configuração no SDCD é através do preenchimento de "formulários" tipo múltipla escolha e preencher os espaços em branco, com os parâmetros de configuração de cada malha, nas telas de configuração do sistema.

Estes parâmetros incluem o *tag*, endereços de entradas e saídas, escalas, tipos de telas, grupo(s) a que a malha pertence, parâmetros de controle etc. Atualmente, está se popularizando uma forma de configuração "gráfica" em que os blocos de funções que serão usados para cada malha são escolhidos, trazidos para uma tela e interligados de forma semelhante à que se encontra em um trecho do Fluxograma de Engenharia, e nestes blocos são inseridos os *tags*, valores de escala, os parâmetros relativos ao ganho proporcional, integral, derivativo etc. Neste tipo de programa de configuração uma boa quantidade do trabalho se assemelha mais ao trabalho simplificado de um desenhista de CAD numa atividade de desenhar, em computador, a partir de blocos predefinidos, a estratégia de controle desejada. Há uma profusão de ferramentas de auxílio disponível durante a configuração, desde telas de *help* até a validação da maioria dos comandos que, se inseridos de forma inadequada, são rejeitados pelo sistema, que recebe uma realimentação do processador informando qual a inadequação do comando proposto.

13.3.2 A Falta de Padronização entre os Fornecedores

Cada fornecedor organiza seu sistema de uma maneira específica, conforme as necessidades particulares de seu produto, e, assim, usualmente, não há muitas semelhanças entre as maneiras de se configurar sistemas de fornecedores distintos. No entanto, as informações requeridas pelos vários sistemas, de uma forma ou de outra, são praticamente as mesmas.

Em uma configuração física típica os arquivos de controle, da coleta de informações e dos sinais de operação do controle distribuído estão localizados fora do console usado para introduzir a configuração no sistema. Eles se comunicam através da via de dados com o console de operação, e com interfaces com o processo. Cada dispositivo desta via de dados precisa ter um endereço único específico, de forma a poder se comunicar organizadamente com os demais. Assim, cada um recebe um "número de estação". Alguns podem ter um grau de prioridade maior, permitindo uma frequência maior de comunicação do que os outros. Alguns podem ser apenas dispositivos de aquisição de dados, enquanto outros são controladores de processo, que podem até ter protocolos de comunicação distintos. Em alguns sistemas a "numeração" das estações é definida pelo usuário, embora alguns mais modernos o façam de maneira automática e transparente.

As telas de grupo devem ser definidas pelo usuário. Os vários pontos que serão agrupados em uma tela são selecionados e identificados por algum tipo de marca (balisa) que permita ao programa localizar o arquivo adequado com informações sobre o ponto. Um tipo de marca muito comum é o *tag* do ponto. O grupo também recebe um nome, para permitir a localização do arquivo com as informações de formatação da tela do grupo. Um nome típico para um grupo destes seria, por exemplo, "REATOR". Esta tela de grupo receberia, então, as malhas mais significativas para a operação do Reator. Em muitos sistemas o nome do ponto é a própria digitação no teclado da chave, que vai permitir o acesso rápido do operador à tela específica, seguido da tecla "Grupo". Nos sistemas que permitem que uma única malha seja visualizada em diferentes telas de grupo, deve ser definido o grupo principal (*default*, para aquela malha) e os grupos secundários. No exemplo acima, apenas a tela de grupo principal seria visualizada, ao se teclar "REATOR" e "GRUPO". Da mesma maneira, quando um ponto de alarme pertencente àquele grupo for acionado, há sistemas que, automaticamente, passariam à visualização da tela de grupo "REATOR".

Em muitos sistemas é preciso montar "Bibliotecas" com descrições de mensagens, unidades de medida e títulos de telas. Palavras como, por exemplo, *ON*, *OFF*, *START*, *STOP*, *FILL* são exemplos típicos de mensagens, e psi, kgf/cm², gpm, ton, kg/h são unidades típicas de medidas. Em outros sistemas estas bibliotecas já vêm pré-fabricadas do fornecedor, cabendo ao configurador escolher o que vai usar e complementar com o que esteja faltando para sua aplicação específica. Noutros, as mensagens e/ou unidades de medida são simplesmente digitadas na própria tela de configuração da malha, sendo a criação da biblioteca totalmente transparente para quem configura. Em alguns sistemas, as bibliotecas podem incluir mensagens que piscam para chamar a atenção do operador para condições críticas do processo, e outros incluem instruções mais detalhadas de operação, listando ações corretivas sugeridas, informações sobre procedimentos de início ou término de bateladas etc. Todas estas informações são introduzidas como parte do procedimento de configuração.

13.4 AS TELAS DE OPERAÇÃO

13.4.1 Telas que Simulam um Painel de Operação Convencional

Foram as primeiras telas configuradas em todos os SDCD da primeira geração, mas, atualmente, já não têm o mesmo prestígio entre os operadores, havendo até sistemas em que elas não são configuradas rotineiramente.

Atualmente, há uma tendência em se reunir várias destas telas em um só *display*, em ambiente tipo *Windows*.

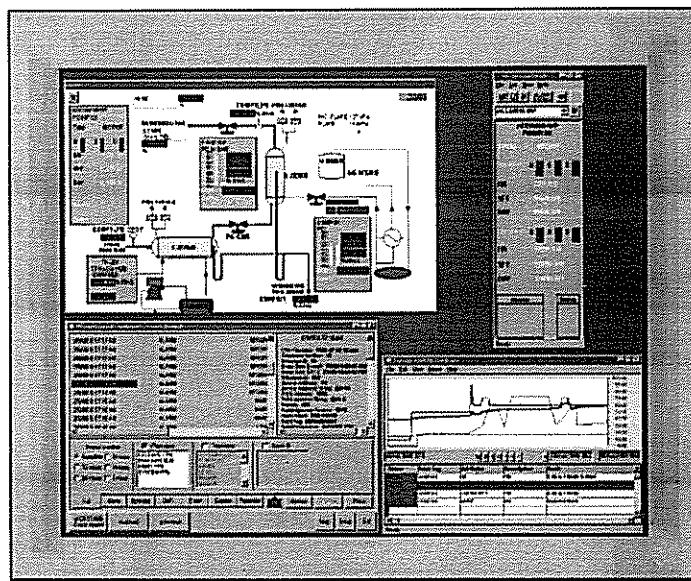


FIGURA 13.1 Vários tipos de telas, exibidas em janelas, em ambiente *Windows*.

13.4.1.1 Telas de visão geral

São as telas em que se tem a visão de um grande número de malhas, porém, com um mínimo de informações para cada uma. Há SDCDs que permitem que se tenha até 1000

malhas em uma única tela. Cada malha é representada por um ponto, cuja cor define se está operando normalmente, em alarme, em controle manual ou em manutenção. Outras mais típicas podem ter, por exemplo, 12 "grupos" de 12 malhas, mostrando 144 malhas, simultaneamente. Nestas telas, já é possível se ver uma barra indicando a diferença entre o valor "normal" e o valor real da variável, e qualquer barrinha maior do que as outras já chama a atenção do operador, muitas vezes antes de atingir a condição de alarme.

13.4.1.2 Telas de grupo

São as telas que apresentam um grupo de instrumentos, geralmente abrangendo entre 6 e 12 malhas, incluindo-se aí pontos discretos, para discriminar motores parados ou em funcionamento, válvulas abertas ou fechadas, etc. Normalmente, o nível de informação destas telas é semelhante ao que o operador obtém frente a um grupo de instrumentos na frente de um painel.

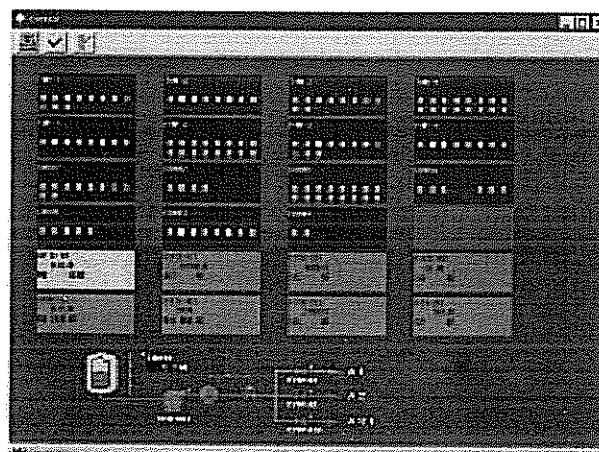


FIGURA 13.2 Uma tela de visão geral.

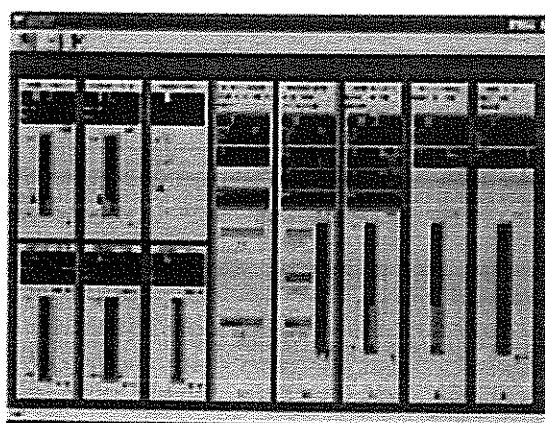


FIGURA 13.3 Uma tela de grupo.

13.4.1.3 Telas de malhas individuais (às vezes chamadas telas de detalhe ou de sintonia)

Nestas telas têm-se, praticamente, todas as informações relativas a uma malha e, freqüentemente, um trecho curto de tela de registro, para auxiliar na sintonia da malha.

13.4.1.4 Telas de registros

Simulam o que se vê em registradores convencionais de papel, porém podem apresentar uma riqueza de informações muito maior. Assim, enquanto um traço representa o valor da variável ao longo do tempo, um cursor pode ser deslocado para qualquer "momento" do registro, enquanto um indicador digital "mede" o valor da variável naquele momento e outro diz, precisamente, qual a data e hora, minuto, etc., em que foi lido aquele valor.

Há dois tipos básicos de telas de registros:

- registro em tempo real;
- registro histórico.

As telas em tempo real geralmente abrangem períodos curtos, como 10 segundos até 24 ou 30 horas, com um tempo de amostragem relativamente curto, enquanto telas de registro histórico costumam abranger de oito horas a uma semana, com amostragem a intervalos maiores do que as de tempo real. Há telas de tendência desde com uma malha por tela até com seis ou mais, sendo as linhas dos gráficos superpostas ou a tela dividida em quadrantes com uma ou mais malhas em cada quadrante.

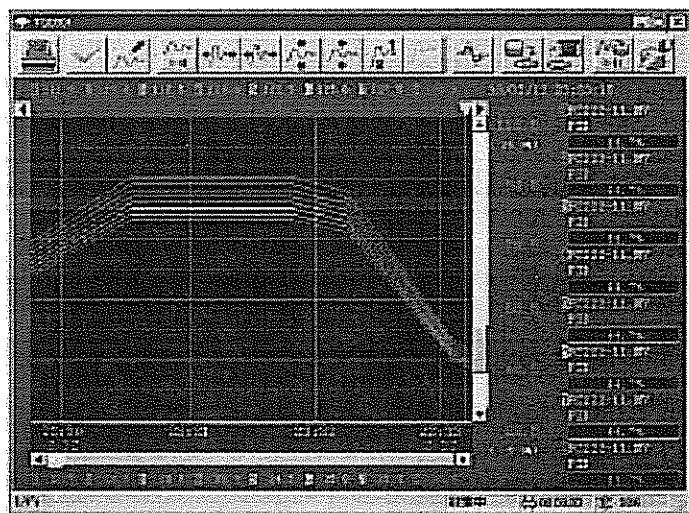


FIGURA 13.4 Tela de gráfico de tendência.

13.4.2 Outros Tipos de Telas de Operação

13.4.2.1 Telas gráficas

As telas gráficas usam uma combinação de linhas, símbolos, desenhos de equipamentos e inscrições alfanuméricas para representar um processo de forma semelhante a um

P&I simplificado, para passar ao operador informações acerca do processo ou de parte deste. Os caracteres alfanuméricos servem para reproduzir palavras, *tags*, valores de variáveis de processo, e outros parâmetros variados. A informação também pode ser representada por uma barra, cuja altura seja, por exemplo, proporcional ao nível dentro do tanque, ou o estado de uma bomba (funcionando ou parada), refletida na mudança da cor do símbolo da bomba. Usualmente, as telas gráficas são interativas, isto é, não só passam informações atualizadas em tempo real ao operador, como permitem ao mesmo controlar o processo através de instruções de comando feitas na própria tela.

Os fornecedores dos SDCDs disponibilizam bibliotecas dos símbolos mais comuns para processo industriais, "pré-fabricados" para facilitar a configuração do sistema pelo usuário. Há símbolos para uma diversidade de vasos e tanques, horizontais, verticais, com fundo e topo chato ou arredondado, teto fixo ou flutuante, agitadores, bombas, compressores, turbinas, caldeiras e fornos, filtros, válvulas, tubulações, etc. A maioria dos sistemas permite selecionar um símbolo, afixá-lo em um ponto da tela, girá-lo em torno de qualquer eixo, ou inverter sua direção, aumentar ou diminuir seu tamanho, movê-lo ou copiá-lo para outro ponto da tela ou para outra tela, alterar sua cor, preencher verticalmente o interior ou uma faixa vertical de um tanque com uma barra que represente o nível de líquido contido, enfim, muitos recursos, de tal forma que, com um mínimo de trabalho, se possa integrar uma imagem representativa de qualquer processo usual. Mas todas as instalações têm alguns componentes especiais, que tornariam uma biblioteca padrão insuficiente, ou tão grande que seria difícil achar o símbolo mais adequado para cada componente. Assim, a maioria dos sistemas permite ao configurador alterar os símbolos pré-fabricados, ou elaborar símbolos novos e adicioná-los à biblioteca para usá-los sempre que necessário.

Observe, na figura 13.6, os ícones no canto esquerdo superior, que permitem passar a outras telas e funções, em ambiente de interface gráfica para usuário (GUI) tipo Windows ou semelhante.

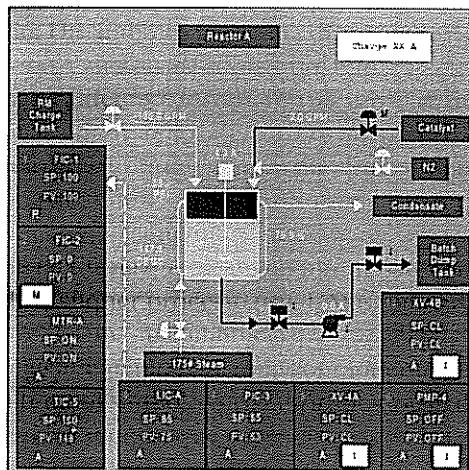


FIGURA 13.5 Tela gráfica mais antiga.

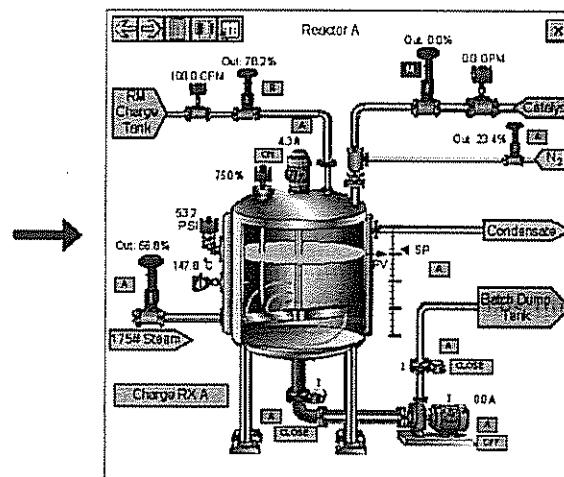


FIGURA 13.6 Mesma tela gráfica, representação mais moderna.

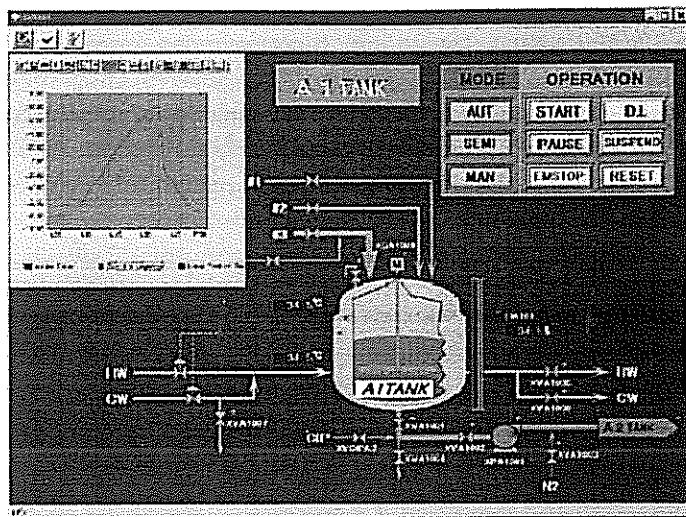


FIGURA 13.7 Tela gráfica combinada com gráfico de tendência e estado de operação.

13.4.2.2 Telas de alarmes

São usualmente as mais tradicionais, onde uma lista de alarmes vai crescendo à medida em que o tempo passa e novas variáveis atingem o ponto ajustado para alarme. Linhas contendo caracteres alfanuméricos indicam o tag da malha em alarme, a data e o tempo em que a variável entrou em alarme, e idem quando voltou à condição normal. O alarme ao surgir geralmente dispara o texto da linha correspondente, que pisca até que o operador tecle a tecla de "reconhecimento" (*acknowledge*) ou a variável volte à sua condição normal. É comum que se configurem grupos de alarmes, de forma que o alarme prioritário, ou o que ocorrer primeiro dentro do grupo, se destaque dos demais, seja pela cor, piscar, ou qualquer outra característica visual óbvia. Por exemplo, é assim que um operador descobre a causa que fez uma caldeira desligar, embora, no instante seguinte, haja uma enxurrada de alarmes. Se o alarme de nível baixo no tubulão superior da caldeira não tivesse qualquer distinção visual dos demais, como poderia o operador saber que todos os demais alarmes, disparados pela própria parada intempestiva da caldeira, o foram em consequência e não como causa da parada? Por exemplo, sempre que a caldeira parar, vai ser acionado o alarme de falha de combustível, ou sua baixa pressão, ventiladores de tiragem forçada ou induzida poderão partir ou parar, o nível do tubulão vai abaixar se o consumo de vapor também não for interrompido, a pressão e a temperatura na caldeira tendem a baixar etc. Como sempre que um operador tiver conhecimento de um alarme ele quererá consultar as telas de grupo ou de detalhe da(s) malha(s) afetada(s), há sistemas em que uma das telas passa automaticamente a representar a malha ou grupo de malhas em alarme. É comum, em vários sistemas, que qualquer novo ponto que entre em alarme gere na tela que estiver sendo visualizada uma linha de mensagem de alarme ou uma referência da tela gráfica em que a malha em alarme pode ser acessada. Geralmente com um ou dois comandos o operador é transportado à esta tela,

onde o alarme e as outras malhas associadas ao processo em alarme são visíveis. Há várias seqüências ou grupos de alarmes e estabelece-se uma hierarquização entre eles, de maneira que, ocorrendo dois ou mais alarmes simultâneos (alarmes que ocorrem antes que o operador possa reconhecer o primeiro deles), os alarmes podem ser listados ou visualizados por ordem de importância, ou cronologicamente, conforme configurado no sistema. As funções de alarme aparecem, também, nas outras telas de operação. Não é necessário que um operador acione uma tela de alarme para tomar conhecimento do alarme de um evento novo.

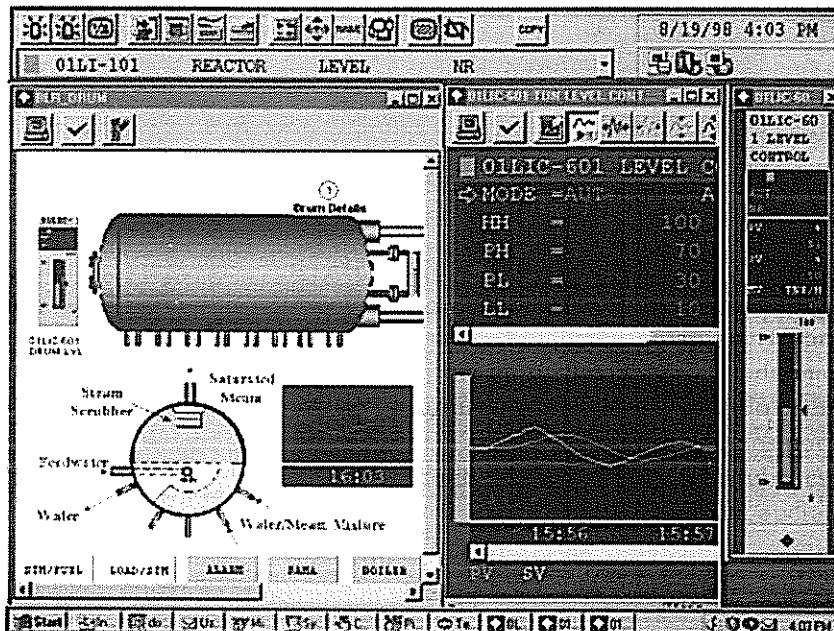


FIGURA 13.8 Tela geral de configuração, com detalhes de malha, tendência e controle.

13.4.2.3 Características das telas para interface-homem-máquina

O maior benefício de se usar telas tipo TRC em vez dos painéis de controle tradicionais está em que o operador pode ver todas as informações de que necessita em dado momento, frente a seus olhos, de uma só vez, sem precisar se deslocar, ou mesmo girar a cabeça. Isto leva a tempos de reação e resposta mínimos, tendendo a evitar muitos desligamentos de emergência desnecessários. Obviamente, o que ele vê em um dado momento é uma fração do total de informações disponíveis sobre o processo mas, nas telas de visão geral, ele pode sentir o processo como um todo, ou ao menos reconhecer as variáveis que estejam fora da margem de controle aceitável.

O estudo da Honeywell sugere que, ergonomicamente, pode-se usar simultaneamente de uma a três telas associadas para cada operador. Assim, pode-se mostrar em uma tela a visão geral, em outra, um grupo ou uma tela gráfica de parte do processo e, na terceira, se existente, uma lista de alarmes.

O propósito disso tudo é aumentar a concentração do operador sobre o que está sendo seu centro de interesse no momento, ter acesso mais fácil à informação procurada, facilidade de manipulação da informação ou da execução de comandos via teclado ou dispositivo tipo olho-na-tela, permitir uma visão geral resumida de todo o processo, ressaltando todas as variáveis que estejam se desviando mais dos valores "normais", a possibilidade de reagir rapidamente às mudanças de comportamento imprevisíveis do processo, antes que estas fiquem incontroláveis, melhoria da performance operacional pelo operador, devido à melhor disponibilidade de informações e de maneira mais adequada, redução de custos, devido a uma padronização de hardware, já que é na configuração que o hardware vai se adaptar a cada processo e aplicação individual. Maior controlabilidade do processo, já que uma quantidade maior de informações e controles pode ser colocada nas mãos de cada operador.

13.5 O CONTROLE PELO SDCD

13.5.1 Os Algoritmos de Controle

Os primeiros SDCDs tinham um elenco de algoritmos de controle, dos quais o configurador podia escolher qual usaria para controlar cada malha. O TDC 2000 tinha 28 algoritmos diferentes. Atualmente, há uma tendência marcante para se usar técnicas de programação estruturada para montar a estratégia de controle e, então, a configuração do SDCD passa pela seleção de blocos de funções, encadeados em seqüência apropriada para montar o controle da malha. Por exemplo, ativando um bloco extrator de raiz quadrada, um de controle PID com um de *setpoint* remoto, pode-se controlar uma malha de vazão em função do valor de uma outra variável medida de vazão, fazendo assim a função "Relação de Vazões". Os blocos mais comuns incluem: Entrada Analógica, Saída Analógica, Entrada Digital, Saída Digital, Estação Manual de Ajuste, PD, PID, Relação, Polarização Ajustável, Seletor de Sinais.

13.5.1.1 Em uma instalação em que o SDCD seja ligado a um computador com funções hierárquicas superiores, as funções podem ser distribuídas assim:

- SDCD – Controle de malhas, Controle Avançado, Alarmes, Registros de Tendência e Histórico, Interface-Homem-Máquina, Geração de Relatórios de Produção;
- computador – Modelagem Matemática, Otimização, Troca de Receitas, Estatística, Controle Estatístico de Processo, etc.

No entanto, na medida em que os SDCDs modernos estão ficando mais poderosos, as fronteiras entre o que usualmente se faz no SDCD e no computador estão ficando cada vez mais difusas, havendo momentos em que o usuário deve optar por quais funções colocar em cada máquina.

13.5.2 As Promessas do que um SDCD Pode Fazer

Um dos principais argumentos de venda do SDCD era possibilitar o controle avançado e a otimização do processo. Embora ambas as vantagens sejam mais facilmente alcançadas com um SDCD do que sem ele, muitos usuários não perceberam, que para usar qualquer destas estratégias, e atingir os benefícios esperados é necessário ter um bom domínio da matemática e do modelo matemático do processo, o que nem sempre é disponibilizado pelas

cedentes de tecnologia do processo. Há várias empresas especializadas nestas técnicas, com *know-how* próprio para cada tipo de processo e cada tecnologia de produção. Estas empresas podem ser contratadas para, por exemplo, implementar e configurar um algoritmo de otimização em um processo específico e, não raro, empresas diferentes obtêm resultados diferentes em uma mesma área de produção. Por exemplo, não é raro que uma refinaria de petróleo use uma tecnologia de controle avançado/otimização para sua área de refino a vácuo e de uma outra cedente de tecnologia para seu refino atmosférico.

13.6 AS ESTAÇÕES E VIAS DE DADOS DE UM SDCD

13.6.1 Funções e Dispositivos nas Redes de Comunicação

13.6.1.1 Na via de dados do SDCD há dois tipos principais de dispositivos ligados: Os primeiros podem ser chamados genericamente de "controladores" e são os responsáveis pela interface entre o SDCD e a instrumentação ligada diretamente ao processo. São conjuntos eletrônicos capazes de tomar decisões conforme um programa, e gerar sinais que são enviados de volta ao processo para fazer as funções de controle das malhas. Cada um destes "controladores" abriga um ou mais microprocessadores, com autonomia para gerenciar o controle das malhas a ele associada, independentemente de sua comunicação com os demais elementos do SDCD. Os controladores podem ser localizados próximos ao operador ou em estações de controle remotas, afastados da sala de controle, onde fica o operador. Seria, talvez, mais apropriado passar a chamá-las sala de monitoração e comando, em vez de salas de controle, mas, devido ao uso, a terminologia consagrada permanece. Cada estação remota pode receber sinais de um punhado e até de muitas centenas de malhas, e cada controlador, dependendo do modelo e fabricante do SDCD pode cuidar desde uma até 512 malhas analógicas e desde poucas até centenas de variáveis discretas.

13.6.1.2 O segundo tipo principal de dispositivo ligado à via de dados de um SDCD é a estação do operador, que mostra ao mesmo tempo os valores das variáveis de controle e monitoramento, recolhidas pelas estações de controle. Estas estações ficam localizadas em um local geralmente centralizado, a partir do qual os operadores podem comandar as ações de controle executadas pelos controladores. A principal finalidade das vias de dados é permitir a interligação das estações de controle com as estações de operação. Há outros dispositivos que podem ser conectados às vias de dados, mas é a existência de estações de controle e de operação ligadas em uma mesma via de dados que define o sistema como sendo um SCDC. Se uma das estações sair de linha, sua falha não interfere com o funcionamento das demais. Se a estação de operação falha, as estações de controle continuam mantendo o processo em operação "desassistida" pelo operador. É esta arquitetura distribuída que faz com que um SDCD seja muito mais confiável do que um sistema de controle computadorizado centralizado.

13.6.1.3 Há uma tendência ao uso de controladores autônomos para quatro a oito malhas, usando processamento em tempo compartilhado, que pode ser configurado para controle e aquisição de dados, e em alguns casos para malhas analógicas e discretas. Algumas instalações usam estes controladores com *displays* digitais locais e elementares como unida-

des autônomas, não ligadas à via de dados, para fazer um controle "local", sem supervisão através da via de dados. Embora estes controladores possam fazer muitas das funções normalmente atribuídas a um SDCD, não pretendemos nos alongar na descrição dos mesmos aqui, por não constituírem parte de SDCDs. No entanto, como estes controladores podem ter portas de comunicação, podem também ser ligados à uma via de dados. Quando estes controladores são ligados à via de dados de um SDCD, aí, sim, passam a integrar um SDCD. A flexibilidade com que estes controladores podem ser usados, tanto dentro como fora de um SDCD é muito grande.

13.6.2 As Vias de Dados

As estações de comunicação ligadas nas vias de dados dos SDCDs são configuradas segundo diferentes padrões de configuração. Existem sistemas nos quais há uma estação mestra que comanda e organiza toda a comunicação entre as demais. Normalmente, nestes sistemas há pelo menos uma estação mestra secundária, ou de reserva, pronta para assumir automaticamente a função da mestra se esta falhar.

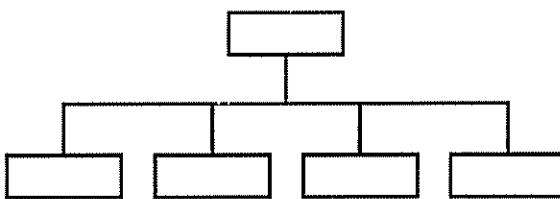


FIGURA 13.9 Estações dispostas hierarquicamente em uma via de dados.

Outras configurações de vias de dados usam estações em *token-pass*, nas quais não há predominância hierárquica entre as várias estações, mas a seqüência é estabelecida e garantida de tal forma que, se uma das estações não estiver se comunicando por qualquer motivo, a próxima entre em seguida.

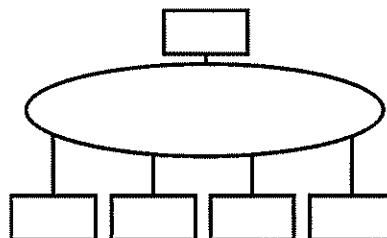


FIGURA 13.10 Estações se comunicando seqüencialmente (*token-pass*).

13.6.2.1 Redundâncias das vias de dados

As vias de dados dos SDCDs podem ser configuradas de forma redundante, isto é, se uma falhar, o processo continua a operar pela outra, sem descontinuidade ou redução de performance notável. Alguns fabricantes permitem que o usuário compre o sistema com ou

sem redundância das vias de dados, mas usualmente a economia é pequena, enquanto que a integridade do sistema geralmente sugere o uso das vias redundantes.

Há vias de dados que usam como meio de transmissão o cabo coaxial, mas a tendência é generalizar-se em fibra ótica, e quase todos os fornecedores podem cotar vias de dados em fibra ótica, ainda que como item opcional. As vantagens dos cabos em fibra ótica passam por sua contínua redução de custos, confiabilidade, capacidade de transmissão de dados, imunidade a ruídos, isolação galvânica intrínseca, reduzindo muitos dos problemas tradicionais de instrumentação causados por aterramentos e blindagens inadequadas ou deficientes em instalações com condições locais adversas. Estas vantagens são tão mais importantes quando as distâncias percorridas pelas linhas de dados aumentam e as mesmas passam por áreas diferentes da produção, com aterramento do equipamento em pontos distintos da planta etc. As desvantagens da fibra ótica podem ser sumarizadas como: a tecnologia para terminação e emendas ainda é mais especializada e crítica do que para os cabos coaxiais, o custo da fibra por metro ainda é maior do que o dos cabos coaxiais, e algumas têm restrições mais severas quanto ao raio mínimo de curvatura, esforços mecânicos durante a instalação, etc.

13.7 A TENDÊNCIA DA EVOLUÇÃO ATUAL

13.7.1 A "Abertura" dos Sistemas

Os primeiros SDCDs eram sistemas proprietários em que todos os componentes eram fornecidos necessariamente pelo vendedor do sistema, e não era possível qualquer intercambiabilidade com os dos demais fornecedores. A primeira unidade dos SDCDs a ser "padronizada" fora desta linha foram as interfaces homem-máquina. Microcomputadores industriais poderosos, como estações de trabalho da linha MicroVax da Digital e, mais modernamente, micros PC compatíveis começaram a ser implementadas como I-H-M de configuração e de operação pelos fabricantes. Atualmente, há quem use como processadores de controle de processo *hardware* padrão feito para finalidades gerais, e use até sistemas operacionais baseados em Microsoft Windows ou derivados do Unix para as I-H-M. As exigências para que fossem usados protocolos de comunicação e *hardware* abertos partiram dos usuários, mas só passaram a ser respeitadas pelos fornecedores à medida em que fatores econômicos obrigaram à uma redução de custos drásticas nos SDCDs.

13.8 AS REDES INDUSTRIAS DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE

13.8.1 A Interconectividade

Devido às necessidades de usuários as mais variadas possíveis, os SDCDs para poder atender à demandas têm sido interligados rotineiramente aos níveis hierárquicos mais elevados da informática industrial e empresarial. Os dados oriundos do campo, a partir dos SDCDs, passam a ser integrados a outros nos bancos de dados de gestão. As técnicas para este uso da informação nas tomadas de decisão com suporte informatizado pertencem ao universo dos MES, (*Manufacturing Execution System*), ERP (*Enterprise Resource Planning*) e similares. O *hardware* para isto inclui uma série de gateways, capazes de adaptar os sinais e protocolos internos do SDCD para padrões de comunicação como a Ethernet, usando protocolo TCP/IP, em ambiente Internet e outros.

Os meios físicos de transmissão destas comunicações abrangem desde os tradicionais cabos coaxiais, as fibras óticas, as conexões via rádio e as linhas telefônicas.

A integração de dados é uma necessidade antiga de sistemas computadorizados. A Internet causou um impacto enorme na vida das pessoas e tornou-se um marco nessa busca de integração. Os sistemas de automação e controle vêm acompanhando essa tendência. Atualmente, o conceito de "ilhas de automação" é substituído pela integração dos diversos núcleos de um mesmo sistema e utilização de controle distribuído.

O uso de protocolos, técnicas e conceitos padronizados é o que viabiliza a evolução e a integração de sistemas diversos. Os exemplos na busca de uma maior padronização são inúmeros, desde níveis de protocolos (TCP/IP, OPC) e sistemas operacionais até o nível de aplicação (XML).

13.8.2 Redes Industriais de Comunicação e de Controle

Em uma indústria moderna coexistem muitos dispositivos e equipamentos destinados ao controle, seja de uma máquina ou de todo um processo industrial. Entre outros, os controladores lógicos programáveis, os Sistemas Digitais de Controle Distribuído, computadores de gerência, de projeto, sensores e transmissores, atuadores, etc.

O desenvolvimento das redes industriais visa unir todos estes dispositivos, de forma a permitir uma interação funcional que aumente o rendimento e permita o surgimento de novas oportunidades de implementação de funções mais avançadas. As vantagens mais típicas são:

- 1) visualização e supervisão do processo de produção;
- 2) aquisição de dados do processo mais eficiente e rápida;
- 3) melhora do rendimento do processo, em geral;
- 4) aumento do intercâmbio de dados de processo entre setores e departamentos distintos, com maior velocidade;
- 5) programação remota, sem necessidade de acesso físico a dispositivos de chão de fábrica.

As vantagens são evidentes, porém é necessário bancar um certo custo, nem sempre fácil de estimar em seu todo.

Em redes industriais coexistem todo tipo de equipamento, instrumento e dispositivo, os quais devem ser segregados hierarquicamente para se estabelecer as conexões mais adequadas a cada área. Assim, é comum se estabelecer quatro níveis em uma implantação de redes industriais. Esta estrutura não é padronizada, havendo indústrias com número maior ou menor de níveis, e a definição dos mesmos também varia de uma indústria à outra.

13.8.3 Classificação das Redes

Em todas as redes os dados trafegam em "pacotes", cujo tamanho, de certa forma, define a finalidade da rede e o tipo de aplicação para a qual ela é mais conveniente. Assim, algumas redes trabalham baseadas em transmissão de *bits*, em nível mais baixo do que as demais, chamadas genericamente de Redes de Sensores, como a Seriplex, a ASI e a Interbus.

Outras, em nível intermediário, visando dispositivos de campo um pouco mais complexos, trabalham transmitindo *bytes* e, usualmente, são chamadas genericamente de Device bus, ou redes de dispositivos, como a Device Net, a SDS, a Profibus DP, a LONworks, a Interbus-S. Finalmente, há redes que trabalham em nível mais elevado, capazes de usar uma variedade de informações maior, derivadas de instrumentos mais complexos, transmitindo blocos de informações, chamadas de *fieldbusses* propriamente ditas, como a IEC/ISA SP-50, da qual derivou a Fieldbuss Foundation, a Profibus PA, e o próprio protocolo Hart.

13.8.4 Os Níveis Funcionais nas Redes

- 1) Nível de administração. Este é o nível mais alto e é responsável pela integração dos níveis mais baixos, e até de várias fábricas. As máquinas usadas aqui são as estações de trabalho que fazem a ponte entre o processo produtivo e a administração, que inclui a supervisão de vendas, o controle de estoques etc. O tipo de rede empregado é a Rede de Área Local (LAN – *Local Area Network*) e a Rede de Área Ampliada (WAN – *Wide Area Network*).
- 2) O nível de controle se encarrega de agrupar e dirigir as distintas áreas de produção. Neste nível ficam as estações de projeto (CAD), controle de qualidade, programação, etc. Usam-se redes tipo LAN neste nível.
- 3) O nível de campo e processo integra pequenas automações, CLPs, multiplexadores de E/S, controladores PID etc. dentro de sub-redes ou ilhas de controle. No nível mais elevado destas redes encontram-se, geralmente, CLPs modulares, agindo como mestres da rede ou mestres flutuantes. É neste nível que se empregam alguns dos barramentos de campo.
- 4) Nível de entradas/saídas é o nível mais próximo do processo. Aqui encontram-se os sensores, transmissores e atuadores encarregados de interfacear o processo de produção e controlar e automatizar o controle e supervisão.

13.8.5 Redes LAN Industriais

São as redes de nível hierárquico mais elevadas. Os padrões e normas mais conhecidos são:

- 1) MAP (*Manufacturers Automation Protocol*). Nasceu dentro da GM como um produto especialmente destinado ao ambiente industrial. Foi normalizado pelo IEEE. Não chega ao nível de barramento de campo, mas inclui pontes e terminais para acessá-los. Permite integração com as WAN.
- 2) Ethernet. Projetada pela Xerox e registrada junto à Digital e Intel, e é compatível com o modelo OSI nos níveis 1, 2 e 3 (este através de pontes). Permite a topologia em barramento ou em árvore, com comunicação semiduplex. As velocidades vão desde 10 a 100 Mbytes da Fast-Ethernet. É um dos padrões de redes cujo uso se propaga mais rapidamente, devido à sua aplicação em sistemas de manufatura automatizada.

13.8.6 Barramentos de Campo

Com o advento dos assim chamados barramentos de campo, os Sistemas Digitais de Controle Distribuído ganharam nova dimensão. Baseados no que se aprendeu com arquiteturas híbridas, como o chamado Protocolo Hart, em que um transmissor microprocessado enviava seu sinal de saída analógica em 4 a 20 mA e superponha a este sinal, na mesma linha, impulsos digitais que transmitiam sinais de diagnóstico, calibração, etc., os modernos Instrumentos Digitais de Campo já não enviam mais sinais em 4 a 20 mA, porém enviam apenas sinais digitais pelo mesmo par de fios que os alimentam. É o primeiro sinal de que o padrão 4 a 20 mA pode vir a ficar obsoleto futuramente. Assim, é possível, em um único par de fios, se alimentar e transferir dados entre vários instrumentos de campo e de sala de controle, "simultaneamente", em tempo real, fazendo a aquisição de dados, o controle da malha, o diagnóstico dos instrumentos e da "rede", a configuração, os alarmes, alterar parâmetros de controle etc. Há vários níveis de barramentos e uma forma de entender isto é observar qual a "unidade" de sinal digital básico com que cada rede trabalha.

O barramento de campo constitui o nível mais simples e próximo do processo, na estrutura das comunicações industriais. Baseia-se em processadores simples, e usa um protocolo mínimo para gerir o enlace entre eles. Os barramentos de campo mais modernos permitem a comunicação com as redes de nível superior e mesmo distribuir o controle entre os diferentes elementos da rede.

Rede AS-i

AS-i (*Actuator Sensor Interface*) é uma rede simples para conexão direta a sensores e atuadores discretos, do nível mais baixo em automação (nível de entradas e saídas) até a comunicação com redes de nível mais alto e dispositivos de controle. Substituindo painéis e cablagem, permite reduzir o tempo de projeto e o custo de instalação e de manutenção. É usada visando a redução de custos. Foi desenvolvida por um grupo de fabricantes do setor de sensores e atuadores discretos e é completamente aberta, independendo do fabricante. A AS-i define os parâmetros para uma ligação direta por cabo, levando sinal e alimentação a sensores e dispositivos não inteligentes, operando via estações tipo mestre-escravo. O controlador central, seja um CLP ou um PC, ou o módulo de acesso à redes hierarquicamente mais elevadas, funciona como estação-mestra. Os sensores e atuadores se ligam às estações escravas que participam de um enlace por meio do cabo AS-i polarizado. O cabo leva à estação mestra e à fonte de alimentação AS-i. Cada escravo AS-i pode comandar oito elementos discretos, sendo quatro de entrada e quatro de saída. A configuração máxima do enlace é de 31 escravos, ou seja, até 248 elementos discretos de automação. Pode-se alcançar até 200 metros com a rede AS-i usando repetidores, em configuração árvore ou barramento. O cabo AS-i contém um par de fios sem blindagem e transporta dados e alimentação, com 24 VDC e até oito ampéres, em lances de até 100 metros contínuos. Cada escravo tem um endereço atribuído pela estação-mestra ou é escolhido manualmente. O tempo de ciclo de acesso é de 5 mS, com 31 escravos, e há uma detecção de erros de comunicação, com correção automática. A AS-i usa o código Manchester, que lhe possibilita uma boa imunidade à interferências e ao transporte tanto de dados como de alimentação no mesmo cabo.

Rede *Bitbus*

Bitbus é uma rede de comunicação em série para aplicações industriais, tipo barramento de campo. Baseia-se numa linha compartilhada tipo RS-485 (várias estações penduradas no mesmo cabo) e está otimizada para a transmissão em tempo real de pequenas mensagens. Modernamente, já se usa também fibra ótica para sua implementação.

Uma rede *bitbus* tem sempre uma estação mestra e uma ou mais escravas. Cada escrava tem seu próprio endereço, o que permite diferenciá-lo e identificá-lo na rede. A mestra controla a rede, selecionando a escrava com quem vai se comunicar. As escravas só podem responder quando requisitadas pela mestra, o que permite uma alta segurança na comunicação, otimizada para aplicações em automação industrial.

Além da estação-mestra e das escravas, pode-se ligar à rede um ou mais repetidores, que se tornam necessários quando se usam mais de 28 escravas em um único lance de cabo.

A experiência tem demonstrado que um bom cabo blindado, aterrado adequadamente, combinado com um sinal diferencial RS-485 é um meio físico excelente, mesmo em ambientes ruidosos, além de apresentar um custo baixo.

O *Bitbus* foi normalizado internacionalmente pelo IEEE como norma IEEE-1118. Esta norma, editada em 1991, mantém toda a funcionalidade básica do Bitbus da Intel e incorpora novas funções. Apesar de ser um barramento antigo, o *Bitbus* emprega um protocolo moderno, baseado no protocolo SDLC, da IBM, empregado também em comunicações tipo Ethernet e ISDN.

A rede *Bitbus* usa um cabo contendo um ou dois pares de fios torcidos e blindados. A blindagem é comum para todos fios do cabo. Usualmente, usa-se um par de fios para a linha de transmissão semiduplex e a outra para transmissão de pulsos de *clock* em modo síncrono, ou para comutação da linha em repetidores em modo *auto-clock*. A impedância característica de cada par de fios é de 120 Ohms, e eles devem ser terminados por uma resistência de 120 ohms para evitar a geração de ondas estacionárias por reflexão dos sinais. Os conectores da rede são tipo sub D-9, e a blindagem segue o mesmo padrão de um conector RS-232.

A rede *Bitbus* pode ser configurada de várias maneiras:

- 1) mestre-escravo;
- 2) em árvore com repetidoras para distâncias maiores, e, neste caso, se considera o barramento como único e operando em *auto-clock*, já que as repetidoras não retransmitem o sinal de *clock*;
- 3) árvore multinível, onde se usam acoplamentos mestre-escravo para formar sub-barramentos em vários níveis. Cada nível pode operar em velocidade independente e tem seus próprios endereços.

Toda rede *Bitbus* se compõe de elementos básicos chamados nós. Um nó é qualquer dispositivo que contenha ao menos uma interface com a rede. Os nós podem ser:

- 1) mestre – em cada nível só pode haver um mestre, mas pode ser usado o conceito de mestre flutuante, embora desaconselhado pela norma. O mestre controla o acesso à uma rede de qualquer nível, mediante um protocolo de comunicação tipo pergunta-resposta;

- 2) **escravo** – é um nó controlado pelo mestre, que só transmite quando o mestre o chama. O escravo pode ser conectado a um mestre ou a um bloco de entradas e saídas;
- 3) **repetidor** – se encarrega de regerar os sinais de dados da rede (mas não o relógio). É empregado para aumentar o comprimento físico da rede;
- 4) **expansão de entradas e saídas** – é qualquer dispositivo de E/S que se conecta à rede ou a um escravo.

A comunicação entre os nós se dá pela transmissão de mensagens. Esta comunicação só acontece quando solicitada pelo mestre, e inclui a solicitação do mestre e a resposta do escravo.

Profibus

A rede Profibus, na verdade inclui ao menos três tipos de redes distintas: o Profibus-DP, o Profibus-PA e o Profibus-FMS. Há muita confusão causada por haver três tipos diferentes de redes, indistintamente chamadas pelo nome comum "Profibus".

O Profibus-DP foi otimizado para alta velocidade e acesso econômico. Seu uso mais difundido é para a transmissão e o controle das variáveis discretas nos sistemas de manufatura, com entradas e saídas distribuídas no campo. Pode substituir transmissões paralelas de sinais de 24 Vcc. Sua configuração é tipo *plug and play*.

O Profibus-PA foi concebido para a automação de processos. Permite que sensores, atuadores e controladores sejam conectados a um barramento comum, mesmo em áreas classificadas com segurança intrínseca. Permite transmissão de dados e de energia de alimentação em um mesmo meio físico, a dois fios, conforme a norma IEC-1158-2. É a única rede Profibus que concorre com o Padrão Fieldbus, da Foundation (ISA SP-50). Sua principal desvantagem é que necessita de controladores dedicados, não usando os próprios transmissores como controladores, como a Foundation permite.

O Profibus-FMS é uma solução geral para comunicações ao nível de controle e supervisão. Os predicados do FMS permitem um amplo espectro de aplicações e grande flexibilidade. É adequado para tarefas de comunicação extensas e complexas.

Permite configurações multimestre.

13.8.6.1 A ambigüidade da denominação Fieldbus

Para evitar ambigüidades com a denominação fieldbus, quando usada para um barramento genérico e Fieldbus, quando usada para o padrão da Fieldbus Foundation ou o ISA-SP-50, escreveremos o primeiro com a letra "f" minúscula, e o último com um "F" maiúsculo.

13.8.6.2 Fieldbus (*Fieldbus Foundation* – ISA SP-50)

O Fieldbus tem sido visto por muitas pessoas como coisas diferentes, e alguns usuários o vêem inadequadamente como mais uma rede de dispositivos de campo. É importante entender as diferenças.

O crescimento da tecnologia de comunicação digital levou a uma grande quantidade de opções de redes de dispositivos de campo que podem ser categorizadas como redes sensor/atuador ou redes de controle. Embora sejam adequadas para controle de variáveis discretas, bem como contagem e seleção, estas redes prescindem de uma camada de usuário, que é necessária para implementar o controle PID e outras tarefas da automação de processos.

O Fieldbus, no entanto, é um sistema de comunicação bidirecional, totalmente digital, serial, que interconecta equipamento de medição e controle, tais como sensores, atuadores, e controladores. Em um nível básico na hierarquia das redes de planta, serve como rede local tipo LAN (*Local Area Network*), para instrumentos usados em aplicações de controle de processos, e automação da manufatura, e tem uma capacidade intrínseca de distribuir a aplicação de controle ao longo da rede. Os dispositivos Fieldbus contêm blocos funcionais que, junto com sua descrição funcional, permitem que os mesmos desempenhem também a função de controlador.

O Fieldbus baseia-se, a nível físico, no padrão Profibus-PA e incorpora, na camada do usuário, os chamados Blocos de Descrições de Dispositivos (*Device Description Blocks*) que permitem que os instrumentos, embora fabricados por diferentes fabricantes, possam ser interligados de maneira simples, harmônica e padronizada, compondo malhas abertas para a aquisição de dados, ou fechadas, para controle, que funcionam de maneira autônoma, independente da sala de controle. É possível continuar a operação de uma unidade mesmo quando a CPU da interface homem-máquina na sala de controle esteja indisponível, embora por motivos de segurança isto seja evitado em algumas aplicações.

Quando se conecta à uma rede Fieldbus um novo dispositivo, este, automaticamente, "anuncia" sua presença na rede, disponibiliza muitas informações a respeito de suas características intrínsecas, e facilita ao operador sua configuração *on-line*, mesmo com o processo em operação.

A tecnologia Fieldbus permite a armazenagem no dispositivo de campo e a comunicação de informações, tais como, o TAG, a descrição, a data de calibração, tipo, modelo e número de série do dispositivo, etc., para ajudar a identificá-lo. O movimento, posição de segurança, limites, sintonia, caracterização de vazão ou curva de compensação de temperatura, podem ser configurados remotamente.

Os dispositivos de campo podem conter a função mestre secundário, que lhes permite assumir a função do mestre, caso este não esteja disponível por qualquer razão, garantindo uma disponibilidade da rede contra a falha individual de seus nós. Diagnósticos avançados permitem ao usuário detectar condições anômalas de funcionamento, antecipando muitas vezes o conhecimento de algumas falhas em seus estágios incipientes, antes de se tornarem catastróficas.

A demanda pela tecnologia Fieldbus é derivada pela demanda dos usuários finais da manufatura que queriam se afastar das limitações impostas pelas antigas arquiteturas de controle centralizado na sala de controle, por controle realmente distribuído no campo. Os usuários finais desejavam dispor de uma tecnologia que permitisse uma interoperabilidade real, entre instrumentos de fabricantes diferentes, um controle no campo e custos de instalação reduzidos. No entanto, ambos, fornecedores de controle e instrumentação e usuários, continuam buscando o ideal de um único padrão internacional de barramento de campo.

Os custos de instalação, quando comparados a um SDCD convencional, apontam para uma redução de 40 a 60% na fiação, caixas de passagem etc. Há uma economia apreciável também na engenharia dos desenhos de diagramas de malhas, funcionais, listas de cabos e de borneiras etc. A mão-de-obra de instalação, bem como os testes funcionais da instalação são reduzidos, e o tempo necessário à calibração e partida também diminuem. A configuração dos blocos funcionais e das suas interconexões em malhas pode ser feita *off-line*, antes mesmo da instalação física dos instrumentos no campo, o que reduz consideravelmente o tempo gasto entre a sua instalação e a partida da unidade.

A principal novidade, para o usuário que surgiu com o padrão Fieldbus, foi que utilizando-se mais plenamente da capacidade dos microprocessadores existentes nestes instrumentos de campo, logo percebeu-se que um instrumento cuja finalidade inicial era transmitir o valor medido de uma variável de processo, poderia também processar o algoritmo de controle, e transmitir diretamente para a válvula de controle o sinal de saída do "controlador". Este novo instrumento, ainda que denominado transmissor, é, na verdade, um transmissor-controlador, eliminando a necessidade de se adquirir e instalar um controlador na sala de controle, e a malha de controle passa a ser fechada no campo, enquanto a sala de controle pode ficar apenas com as funções de interface homem-máquina. Isto representa um salto quântico na arquitetura do SDCD e é uma das tendências mais modernas em instrumentação. Por enquanto, apenas o Fieldbus (Foundation, ou SP-50) tem esta capacidade. Como foi visto, o Fieldbus foi desenvolvido baseado no Profibus PA, e aproveitou muito do desenvolvimento deste, bem como da redução de custos de *chips* digitais, tanto de memórias como de processadores, para estender ao campo a capacidade de fazer também o controle da malha. Em princípio, uma malha de controle que, antigamente, tinha um transmissor, um controlador e uma válvula pode ser feita hoje com dispositivos Fieldbus, apenas com o transmissor e a válvula. A "função" controle pode residir no microprocessador existente no próprio transmissor, na válvula ou em qualquer outro dispositivo ligado à rede, como, por exemplo, num conversor 4 a 20 mA X Fieldbus, num posicionador de válvula de controle, em outro transmissor de outra malha, e até mesmo num controlador ou PLC existente na sala de controle. É difícil se imaginar um sistema de controle mais distribuído ou mais versátil. Vantagens adicionais dos *fieldbusses* incluem a possibilidade de um único transmissor enviar outras variáveis (os chamados transmissores multivariáveis), os sinais de diagnóstico avançado, tanto do dispositivo de campo como da rede de comunicação, os alarmes, o TAG do instrumento, as funções de calibração remota, tais como zero e alcance da faixa, as unidades de engenharia, o range, etc., associados ao dispositivo. Pela mesma rede pode-se configurar o dispositivo de campo, a partir da console de configuração, geralmente a mesma de operação, na qual se instalou o software de configuração da rede e dos dispositivos a ela conectados.

13.9 O USO DE FIBRA ÓTICA EM REDES INDUSTRIAIS

O ambiente industrial se caracteriza por níveis elevados de ruído elétrico e eletromagnético, que podem afetar a instrumentação de controle de processo, causando interferências indesejáveis. Dentre as ferramentas que se pode usar para atenuar a interferência estão os cabos blindados que, às vezes, não são suficientes e, neste caso, pode-se empregar as fibras óticas.

Os sistemas de comunicação via fibra ótica usam impulsos luminosos, em vez de sinais elétricos, para enviar sinais.

O uso de fibra ótica como meio para a propagação do sinal resulta em uma isolação galvânica entre os equipamentos situados nas duas extremidades da fibra. Isto resolve inúmeros problemas de aterramento, além de:

- proporcionar imunidade a ruído magnético, elétrico e eletromagnético;
- imune a transitórios de tensão elétrica;
- não é afetado por diferenças de potencial de terra em diferentes pontos da planta;
- velocidade de transmissão muito superior a que se pode obter com cabos blindados ou coaxiais;
- largura de banda muito grande.

Como é de se supor, nem tudo são vantagens quando se usa fibra ótica. Em geral, os problemas mais comuns são:

- a fibra ótica apresenta uma atenuação inerente ao material empregado em sua fabricação. As distâncias máximas de cada enlace dependem do material de que as fibras são feitas, bem como da qualidade e quantidade dos conectores em cada ramo;
- ainda é uma tecnologia cara;
- precisa de pessoal e ferramentas especializadas para instalação e manutenção.

Os dois primeiros inconvenientes citados estão sendo atenuados cada vez mais, devido ao grande impulso que as fibras óticas estão tendo nas redes de comunicações em todo mundo.

Os cabos de fibra ótica geralmente são constituídos por vários condutores ópticos. Cada condutor tem uma seção muito pequena (alguns micrões) e é formado por:

- um núcleo, de quartzo ou material plástico sintético;
- um revestimento composto de quartzo ou plástico, de índice de refração mais baixo do que o núcleo.

13.9.1 O Uso de Fibra Ótica em Áreas Classificadas

Quanto ao uso de fibras óticas em áreas classificadas, antigamente se acreditava que elas não apresentavam nenhum perigo. Mais recentemente, em ensaios de laboratório muito específicos, ficou comprovado que um feixe de luz coerente, incidindo sobre uma superfície pequena, escura, em um corpo com pouca condutividade térmica, pode causar aumentos de temperatura no ponto de incidência, até atingir o ponto de ignição de misturas de gases combustíveis com oxigênio. Assim, atualmente, enquanto se aguardam as normas que definam como pode ser usada seguramente a fibra ótica em áreas classificadas, recomenda-se evitar passar com a fibra ótica em ambientes potencialmente explosivos, ou passar a tratá-la como a um cabo elétrico normal à prova de explosão, armado, em caixas à prova de explosão, com unidades de selagem, etc.

13.9.2 Os tipos de Fibras Óticas para Aplicações Industriais

Tipicamente, as fibras óticas se excitam com diodos fotoemissores, ou *lasers*, no espectro infravermelho, produzindo um feixe de luz que transporta a informação até a outra extremidade da fibra. A recuperação do sinal elétrico na outra extremidade se dá através de um fotodiodo, ou fototransistor.

No interior da fibra, os feixes de luz viajam com um ângulo máximo de desvio em relação à direção longitudinal da mesma. O feixe viaja livremente através do núcleo, até tocar o revestimento. Neste momento, devido à diferença dos índices de refração, o feixe se reflete totalmente para o interior do núcleo, como se houvesse sido refletido por um espelho, através de reflexões sucessivas alcança a outra extremidade da linha.

Este método, no entanto, apresenta um inconveniente: a velocidade de propagação era maior para um feixe que trafegasse dentro do núcleo do que a de outro feixe que tivesse muitas reflexões ao longo da rota. A solução encontrada foi fabricar fibras com índice de refração variável entre o centro do núcleo e o revestimento, uniformizando a velocidade dos feixes. Devido a esta característica, é necessário ter muito cuidado com as terminações e conexões das fibras óticas, já que qualquer desalinhamento ou acoplamento malfeito pode causar atenuações severas no sinal ótico.

Há, no mercado, vários tipos de fibra disponíveis:

- 1) **plástico** – mais econômico, porém restrito à distâncias mais curtas, por ter mais atenuação;
- 2) **quartzo** – para distâncias maiores (alguns quilômetros).

Além disso, há fibras desenvolvidas para aplicação em ambientes com temperaturas extremas, sujeitas à vibrações excessivas, a vazamentos de compostos de hidrocarbonetos e outras condições ambientais adversas.

Outras classificações de fibra ótica se referem à largura de banda da fibra, associado ao diâmetro do núcleo, etc.

13.10 NOVAS DECISÕES

13.10.1 A "Classificação" dos Sistemas Modernos

Com a evolução da tecnologia digital e informática, já existem vários sistemas cujas características intrínsecas englobam funções de SDCD, de PLC, de SCADA (*Supervisory Control and data Acquisition*), etc. Cada vez mais fica difícil determinar a qual destas "categorias" um determinado equipamento pertence. Muitos podem trabalhar misturando as vias de dados de chão de fábrica com suas funções de controle (SDCD + Fieldbus).

A evolução da tecnologia digital e de instrumentação levou ao surgimento dos chamados Sistemas Híbridos, que também não estão bem definidos em nenhuma norma ou Dicionário técnico.

Os sistemas híbridos mais usuais combinam as características clássicas de um SDCD com as de um CLP, mas há pelo menos duas maneiras de se implementar um sistema destes.

Alguns fabricantes optaram por integrar o hardware de um CLP com o de um SDCD, repartindo uma mesma memória de massa, na qual se “integram” os dados e os disponibilizam para a interface homem-máquina. Outros integraram as funções de CLP e SDCD num mesmo tipo de CPU de controle mais poderosa e mais rápida.

Há também quem chame de sistema híbrido a uma arquitetura de CLP na qual está embutido um micro industrial poderoso, tipo PC compatível.

13.10.2 Decisões na Configuração e Arquitetura

Se por um lado esta nova arquitetura de “sistemas digitais ultradistribuídos” aumentou a versatilidade do sistema, também exigiu que, ao se configurar um sistema se tomem várias decisões adicionais. Anteriormente, estava predecidido que os transmissores ficavam no campo, as válvulas de controle idem e os controladores em um painel de controle. Agora, é preciso definir, por exemplo, em um controlador em cascata, em qual dos dispositivos que integram a malha deverá ficar qual função de controle. Esta decisão implica na confiabilidade desejada para a malha, no tempo de resposta necessário, na necessidade, ou não, de redundância da função controle (qual dispositivo assume o controle da malha, se o seu “controlador” normal falhar), da redundância do controle da rede (se o controlador da comunicação da rede falhar, qual é o reserva que vai substituí-lo), etc. Com o advento destas novas tecnologias, o trabalho do profissional de instrumentação tornou-se mais complexo e as novas ferramentas e tecnologias que, ao mesmo tempo, lhe dão oportunidades e possibilidades de trabalho que antes não havia, lhe atribuem novos encargos, decisões e escolhas que antes também não existiam.

A repartição das tarefas entre os especialistas em Instrumentação e os de Informática Industrial geralmente não está bem definida e causa incertezas em várias empresas, e isto se faz notar usualmente nas de maior porte. Este fenômeno dá ensejo não raro a disputas internas de áreas de responsabilidade entre os departamentos de Instrumentação e de Informática. É crescente o número de profissionais de Instrumentação/Automação que se preocupam em aumentar seus conhecimentos de Informática, bem como o de profissionais de informática que estudam a automação industrial, todos tentando reduzir a lacuna entre os dois domínios de conhecimento tecnológico.

14

INTERTRAVAMENTO E SISTEMAS DE SEGURANÇA

ENGº VITOR FINKEL

14.1 INTRODUÇÃO

Sistemas Instrumentados de Segurança (SIS) ou Sistemas de Intertravamento de Segurança, Sistemas de Desligamento de Emergência (ESD), entre tantos outros nomes dados a eles, são uma classe de sistemas responsáveis pela Segurança Operacional de Unidades e Equipamentos Industriais. Eles causam a Parada de Emergência ou impedem uma Operação Insegura sempre que as condições de processo ultrapassem os limites preestabelecidos como seguros, ou que se estabeleçam condições operacionais perigosas.

Estes mesmos sistemas podem impedir uma Operação Insegura, com o objetivo de evitar acidentes dentro ou fora da fábrica, como incêndios, explosões, danos aos equipamentos de produção, risco de vida ou à saúde do pessoal e os provocados pela descarga de produtos perigosos e/ou poluentes gasosos, líquidos ou particulados (poeira e fumaça) via atmosférica ou pelos esgotos.

14.1.1 A Evolução dos Sistemas de Segurança do Processo Industrial

Os chamados sistemas de *shutdown* para processos industriais têm evoluído bastante nestas últimas décadas, em termos de concepção, projeto e implementação. A evolução não é fruto do acaso, nem apenas do desenvolvimento de uma consciência de que os acidentes podem e devem ser evitados. Infelizmente é a partir da análise de acidentes realmente ocorridos que se tomou conhecimento de que os sistemas de segurança normalmente empregados em instalações industriais deixavam muito a desejar. Lições amargas, com perdas de vidas humanas, de instalações, equipamentos, produção, agressão descontrolada ao meio ambiente, enfim, só após pagarmos o pesado ônus deste aprendizado, estamos pondo em prática algumas novas lições. Estas lições se refletem nas normas nacionais e internacionais, no desenvolvimento de "produtos" específicos para serem usados na montagem dos modernos sistemas de desligamento de emergência, na concepção e arquitetura dos projetos e nas

revamps das instalações existentes. Já existem normas obrigando ao uso de cálculos de probabilidade de falha sob demanda dos sistemas de segurança em instalações industriais triviais, enquanto que, tradicionalmente, estes procedimentos se limitavam às áreas nuclear e aeroespacial. Na medida em que os acidentes ocorrem, as medidas para tentar evitá-los se intensificam. Aparentemente, sempre foi assim, acrescenta-se um fecho de segurança na janela depois da "visita" do ladrão. Muitas regras de segurança em transporte naval foram alteradas e reforçadas depois do naufrágio do Titanic.

14.1.2 Os Modelos Modernos

É comum imaginar as medidas de proteção em um processo industrial como um modelo físico semelhante às camadas de uma cebola. No núcleo, o processo que apresenta um risco inerente, cuja segurança pode até ser "intrínseca", ou seja, por ser de natureza não "perigosa". Em volta deste núcleo a primeira camada pode ser representada pelo próprio controle de processo, que tem também como missão não deixar que as variáveis de processo atinjam condições perigosas. A seguir a camada "operador", que pode intervir manualmente para controlar o processo, evitando que o mesmo passe a um estágio descontrolado e perigoso. Nesta camada costuma-se associar as funções IHM, de indicação de variáveis de processo, de registro e de anunciador de alarme. Cabe ao operador decidir se deve alterar o valor de ajuste dos controladores, passar a controle manual, ou mesmo fazer o desligamento de equipamentos.

Para auxiliar o operador nesta função de supervisão da segurança, existem os sistemas de alarme, que advertem o operador quando uma variável está se aproximando dos limites máximos aceitáveis, para que ele possa intervir a tempo. A próxima camada pode ser, por exemplo, o intertravamento operacional. Se a saída da bomba de óleo lubrificante apresenta baixa pressão, liga-se a bomba auxiliar, para evitar queimar o mancal de uma grande máquina.

Se nada disso funcionar a contento, há muitos dispositivos autônomos que podem impedir o acidente, como discos de ruptura, válvulas de alívio/segurança de pressão (PSVs) e similares. Se todas estas "camadas" não forem suficientes para garantir a operação segura, o Sistema de Desligamento de Emergência deve atuar, desligando os equipamentos, parando a circulação dos fluidos de processo e/ou despressurizando os vasos, de forma a manter a segurança, ainda que às custas de uma parada de produção.

Há quem considere os sistemas de detecção de incêndio, de gases e/ou similares como integrantes destas camadas de proteção. Há quem considere que se eles chegarem a ser usados é porque já ocorreu o acidente, e todas as outras camadas não foram suficientes para evitar a ocorrência, portanto, eles fazem parte da mitigação do acidente e não de sua prevenção.

Hoje em dia não se analisa isoladamente o que uma destas camadas faz e, sim, a proteção global que o conjunto dá a cada área de produção. Calcula-se o risco envolvido, por exemplo, se apenas as duas "camadas" mais internas estiverem presentes. Compara-se este nível de risco com o nível de risco desejado (aceitável) para aquela atividade de produção específica (SIL – Safety Integrity Level). A diferença entre o nível desejado e o previamente

calculado será complementada através dos sistemas de segurança Instrumentados (SIS – *Safety Instrumented Systems*), que deverão ser, então, projetados, instalados, testados e mantidos em condições de atender à redução do risco residual após a atuação (ou falha de atuação) das camadas mais centrais de nosso "modelo-cebola". Este é o conceito moderno de redução do risco, desde o risco inerente ao processo, até um nível de risco aceitável. Risco zero, ou inexistente, infelizmente, só se a planta nunca for construída. A quantidade de acidentes ocorridos em plantas paradas já obsoletou o tradicional conceito de que parar uma unidade aumenta sua segurança. Às vezes, sim, às vezes até aumenta o risco. Acidentes ocorrem com mais freqüência durante a partida e/ou parada de um processo contínuo. Desde os primórdios da aviação, sabe-se que os momentos mais perigosos de um vôo são, respectivamente, o pouso e a decolagem.

14.1.3 Os Paradigmas estão sendo Revisados

Alguns paradigmas foram derrubados por acidentes reais, com perdas elevadas. Na plataforma de Piper Alfa ficou definitivamente provado que não se pode confiar na capacidade de decisão/atuação do ser humano frente ao stress de um acidente grave. Estudos posteriores revelaram que, estatisticamente, quando submetidos a forte fator de *stress*, seres humanos tomam iniciativas erradas em 99% dos casos. Conclusão: sistemas de emergência não podem depender exclusivamente de acionamento manual, têm que ser ativados automaticamente. Em *Three Mile Island* ficou mais uma vez comprovado: se uma indicação estiver errada, o operador pode insistir em acreditar na indicação errada, mesmo quando é possível comprovar, facilmente, por outras indicações, que aquela indicação não pode estar correta. Uma válvula do sistema de segurança que, por um critério de projeto inadequado, tinha sua posição indicada por uma luz alimentada pela tensão de comando, e não por uma chave limite acionada mecanicamente pela própria válvula, indicava a posição válvula-fechada. Embora na sala de controle houvesse indicações de pressão e até de vazão na linha desta válvula, os operadores preferiram acreditar que a válvula estava realmente fechada. Enquanto isso, o líquido refrigerante, imprescindível para a segurança do reator durante a emergência, se perdia pela válvula aberta... b.c.n, a continuação da história saiu nos jornais da época.

O fator mais importante para a ocorrência do acidente, segundo algumas autoridades, é o excesso de autoconfiança, não só entre operadores mas, principalmente, em níveis gerenciais. Para não parar o processo, freqüentemente assumem-se riscos desnecessários, e, freqüentemente, o resultado é o acidente. Depois do acidente de *Three Mile Island*, porém, antes do ocorrido em Chernobil, um primeiro ministro soviético disse textualmente: "Nossos reatores nucleares são tão seguros que poderíamos instalar um aqui na Praça Vermelha, no centro de Moscou".

O excesso de confiança também atinge os próprios sistemas de segurança, que normalmente não são exaustivamente testados com a freqüência necessária para garantir uma probabilidade de falha suficientemente pequena, quando de sua atuação. As normas modernas sugerem cálculos para determinar o período entre testes sucessivos de uma instalação, e isso faz parte do cálculo final do SIL pretendido. O problema surge na hora de testar os elementos finais. A única maneira de saber se uma válvula de *shutdown* realmente está

em boas condições de atuação, e que provavelmente vai fechar mesmo, em caso de necessidade, é comandar a válvula para fechar e aguardar seu fechamento total. Infelizmente, é muito caro fazer isto sem causar (ou aproveitar) uma parada de produção. Resultado estatístico: o elemento menos confiável de um sistema de *shutdown* é a válvula de *shutdown*, que, após longos períodos de inatividade, pode estar emperrada e não funcionar no momento em que é imprescindível para evitar um acidente. Há maneiras de se calcular as taxas de risco do sistema, quando se testa periodicamente a válvula, tanto com atuação total, como com atuação parcial (para evitar a parada).

Melhorar a confiança nos elementos primários e na lógica, usando redundâncias as mais variadas, é relativamente fácil. Há, pelo menos, umas 10 tecnologias diferentes e um sem número de formas de implementá-las. Votação 1 de 2, 2 de 2, 2 de 3, valor intermediário entre três valores analógicos, canal ativo com canal de diagnóstico independente, idem duplicado, uso de falha segura, etc., já são coisas triviais, e há uma variedade de produtos no mercado feitos para implementar estas configurações. Escolher as melhores alternativas para implementar um determinado sistema de segurança é que não é tão trivial. O mais delicado na prática, ainda é garantir a correta atuação do elemento final quando necessário. Este é ainda, sem dúvida, o ponto mais fraco dos sistemas.

Outro paradigma que está caindo é a noção muitas vezes intuitiva de que a segurança em relação à vida humana tem que ser absoluta. Não existe segurança absoluta, o que existe é a redução da probabilidade do acidente. Neste contexto surgiu na Inglaterra e já está bastante disseminado no meio especializado no resto do mundo, o conceito do ALARP (*As Low As Reasonable Practical*). Neste conceito, riscos elevados TEM que ser reduzidos. Riscos pequenos devem ser desprezados, e riscos intermediários devem ser reduzidos, desde que praticamente viável sua redução. Se a redução pretendida for muito difícil ou extremamente cara, pode ser dispensada. Trata-se de uma abordagem tipo custo x benefício aplicada à segurança, o que pareceria heresia para muita gente há pouco tempo.

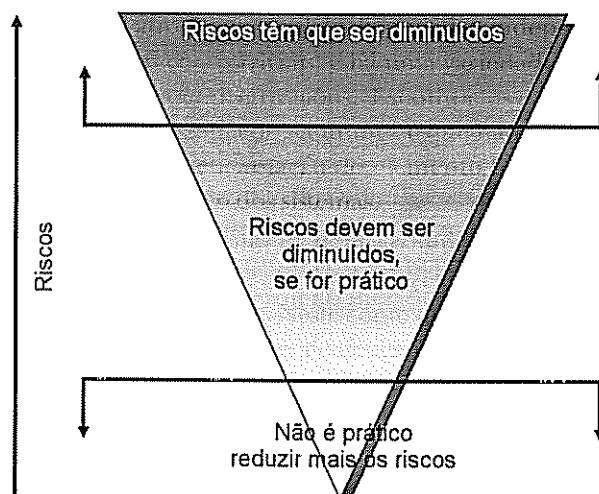


FIGURA 14.1 Tão baixo quanto razoável ALARP - *As Low As Reasonably Practical*.

14.1.4 Formas de Operação

Há duas formas básicas de operação dos SIS. Na primeira, o sistema provoca a parada segura da unidade sempre que valores de variáveis de processo, tais como pressão, temperatura, nível ou vazão ultrapassem limites seguros; geralmente, esta forma de operação é conhecida como intertravamento ativo. Em outra forma de operação, ele impede que equipamentos sejam ligados quando as condições de segurança exigidas não estejam satisfeitas, como, por exemplo, não permitem que uma máquina de grande porte seja acionada antes que o circuito de óleo de lubrificação de seus mancais esteja pressurizado. Esta forma é chamada de intertravamento passivo ou permissivo.

14.1.5 Finalidades

As principais finalidades de se implantar um SIS são as de prover proteção para:

- a) a saúde das pessoas que trabalham na planta industrial;
- b) a saúde das pessoas que habitam, trabalham ou transitam próximo das unidades industriais;
- c) o patrimônio das empresas;
- d) a produção e/ou o produto;
- e) o meio ambiente.

Assim, os SIS devem impedir que unidades industriais sofram incêndios, explosões, emanem gases ou líquidos venenosos ou perigosos, e/ou outras consequências danosas ou fatais para pessoas, equipamentos, para a atmosfera ou a rede de esgotos, rios, reservatórios de água ou de dejetos industriais.

14.1.6 Outros Elementos de Proteção

Os SIS não são os únicos responsáveis por estas proteções, existem, também, equipamentos de proteção individual (óculos, botas, capacetes, máscaras, dosímetros de radiação etc.) e instrumentos autônomos (válvulas de alívio de pressão, discos de ruptura etc.) que também fazem parte da segurança industrial, porém não fazem parte do SIS.

Freqüentemente, ao se projetar um SIS, é necessário levar em conta estes outros elementos de segurança. Por exemplo, se um SIS deve desligar um reator quando a pressão atingir um valor máximo, o mesmo não precisa ter a mesma confiabilidade que seria exigida se não houvesse, também, uma válvula de alívio de pressão, instalada no mesmo reator, com a mesma finalidade. Entra aí o conceito de fator de redução de risco. Os vários fatores de redução de risco, da válvula de alívio, do SIS, etc., se combinam para resultar no fator de redução de risco total para aquela instalação, equipamento ou malha de segurança.

14.2 O CONCEITO DE RISCO

O risco é uma combinação de dois fatores:

- 1) a probabilidade da ocorrência do evento indesejável;
- 2) a consequência da ocorrência.

Assim, um evento desfavorável que ocorra com muita freqüência, porém de consequências mínimas, pode corresponder ao mesmo nível de risco que um evento raríssimo, porém, de consequências catastróficas.

14.2.1 A Redução do Risco

No conceito moderno do projeto dos sistemas de segurança, o objetivo é sempre reduzir o risco a um nível aceitável. Qual o nível aceitável, é objeto de discussões intermináveis, por ser extremamente subjetivo e sujeito à uma infinidade de interpretações.

Por exemplo: o risco de se trabalhar em uma indústria petroquímica deve ser compatível com:

- a) o risco de dirigir um carro em uma estrada?
- b) o risco de se escalar uma montanha?
- c) o risco de fazer uma viagem de avião?
- d) o risco de ficar em casa?

O estudo dos fatores de risco para determinar a necessidade e a confiabilidade necessária para um SIS deve começar pelo próprio processo. O que não existe, não pode vazar, explodir, queimar etc. Assim, se um processo puder usar um de dois fluidos com a mesma finalidade, escolhendo o fluido menos perigoso, já se começa com menor risco do que usando o fluido mais volátil, ou com menor ponto de fulgor, etc. Se em um reator necessita-se queimar hidrogênio, ter próximo ao reator uma unidade que produza o hidrogênio na medida em que o mesmo seja consumido, pode ser bem mais seguro do que ter um imenso reservatório pressurizado com hidrogênio produzido em outro lugar e transportado para este reservatório, por exemplo.

14.2.2 Conceitos em Risco

Há vários conceitos amplamente difundidos, muitos dos quais errôneos, a respeito da atuação dos Sistemas Instrumentados de Segurança. Um deles é que todos os processos vão para o estado mais seguro quando todos os equipamentos são desligados.

Imaginemos um reator, dentro do qual uma reação exotérmica pode provocar uma sobrelevação de temperatura perigosa. O simples desligamento do reator, normalmente feito através do fechamento das válvulas de entrada (opcionalmente, também, as válvulas de saída) do mesmo, não assegura que a reação se interrompa. Pelo contrário, em vários reatores a temperatura vai aumentar mais ainda se a água que é adicionada à reação parar de ser fornecida, ou se o fluido usado para a refrigeração da camisa externa do reator parar de circular. Assim, a simples parada pode se transformar em motivo para um acidente.

Neste exemplo pode ser necessário garantir a circulação do fluido de refrigeração por certo tempo após a "parada", ou um gás ou um líquido inibidor da reação deve ser injetado no reator quando se quer interromper o processo, etc. Outro exemplo clássico é uma caldeira ou forno que, quando desligada, deve ser ventilada internamente para a diluição de gases combustíveis até se atingir um nível de segurança, antes que se possa partir novamente, ou que a eventual concentração de gases quentes junto a algum ponto mais quente dentro da

caldeira possa levar à uma ignição espontânea e extemporânea deste gás. É comum que ventiladores de tiragem forçada ou induzida tenham uma alimentação de emergência para poderem ser acionados, mesmo que uma caldeira pare por perder sua alimentação elétrica normal.

Observa-se, então, que o conceito de que todo processo reverte à uma condição segura quando se corta, por exemplo, a alimentação elétrica geral da planta, pode ser falso em muitas instalações. Normalmente, os sistemas de controle e os SIS são alimentados por fontes alternativas de emergência durante um período de tempo prolongado, até que todo o processo tenha atingido realmente as condições de segurança após uma parada normal ou de emergência. Esta necessidade de manter os sistemas de instrumentação energizados quando falta energia também cobre a necessidade dos operadores saberem o que se passa na planta e como estão suas variáveis durante uma parada.

Quando você tem produtos aprisionados, em estado estacionário, geralmente eles não estão em estado de equilíbrio termodinâmico. A unidade foi projetada para fazer alguma coisa dinamicamente com seus conteúdos. Se você parar a vazão de produto em um aquecedor que funciona com chama, você pode desligar o gás, mas ainda sobreaquecer os tubos, devido à energia residual. Os fluidos em um processo criogênico se aquecerão com o consequente alívio de pressão de vapores, na medida em que o sistema aquece e a pressão aumenta. Isto pode acontecer muito rapidamente quando o fluido em um trocador de calor parar de circular.

De maneira semelhante, ao se despressurizar um vaso, é possível chegar rapidamente a uma temperatura em que o material do casco se torna muito frágil e quebradiço, enquanto ainda há tensões no casco do vaso. Em plataformas de produção, o flare durante um *shutdown* de emergência pode gerar calor à taxa de 10 kW/m^2 , enquanto que, por comparação, o Sol gera $0,7 \text{ kW/m}^2$. Por estes e outros motivos, uma unidade industrial que entra em parada de emergência, inesperadamente, por uma falha do sistema de parada de emergência, na verdade, pode estar em uma condição bem menos segura do que o desejado, até porque, neste momento, o operador estará sobreatarefado e com menos disponibilidade para tomar decisões corretas sobre eventos secundários, que podem vir a ser a causa de um acidente. É sempre mais seguro garantir que o SIS não provocará muitas atuações desnecessárias, mesmo sem levarmos em conta o custo em perdas de produção e/ou qualidade do produto que estas ações geralmente causam.

14.3 DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE INTEGRIDADE DE SEGURANÇA (SIL)

Há muitas maneiras diferentes para se determinar o nível de integridade de segurança para cada função (malha) de segurança:

- a tarefa começa por uma análise dos riscos do processo, ou identificação dos riscos;
- em seguida, é necessário determinar o que é necessário para reduzir o risco a um nível aceitável;
- finalmente, deve ser feita uma verificação se o SIL foi atingido, conferindo-se a probabilidade de falha sob demanda (ou outro parâmetro de avaliação equivalente) desejada para a malha foi realmente atingida.

14.3.1 A Identificação dos Riscos

A primeira etapa, a análise de riscos do processo, atualmente tem sido dada preferência à técnica HAZOP (*Hazard and Operability*), sem dúvida a melhor para identificar riscos, porém, demorada, cansativa e exigindo um grande volume de recursos. Se o processo que estiver sendo analisado for bem conhecido, talvez seja melhor usar a técnica de "listas de verificações" (*check lists*). Se, por outro lado, o processo englobar uma grande quantidade de equipamento mecânico interdependente, pode ser melhor usar a Análise de Modos de Falhas e Seus Efeitos (FMEA). Existe, também, uma técnica preconizada pela API (*American Petroleum Institute*) chamada de "Avaliação de Função de Segurança", (SAFE – *Safety Function Evaluation*), na qual se preenche um mapa Safe. É uma técnica semelhante à FMEA, já que aqui também se usa o modo de falha de cada equipamento. Apesar de ser uma técnica que surgiu para uso em *offshore*, ela é completada por um HAZOP, para garantir que foram lembradas todas as falhas mais importantes.

14.3.2 Escolha do SIL

Para selecionar o SIL de cada função de segurança, a técnica escolhida depende da experiência de quem estiver fazendo a análise. A maioria dos profissionais prefere começar com uma análise qualitativa, tipo Matriz de HAZOP, ou gráfico de risco do IEC. Estes métodos, no entanto, costumam ser abandonados quando se verifica que levam a um SIS muito caro e superdimensionado. Engenheiros mais experientes têm preferido uma técnica semiquantitativa, chamada Análise das Camadas de Proteção, que leva a uma análise quantitativa mais simples da frequência do evento indesejável, comparada às suas consequências, em vários graus de intensidade. Esta técnica é bastante flexível, permitindo que a análise das consequências excursione desde uma categorização por classes até os métodos quantitativos clássicos.

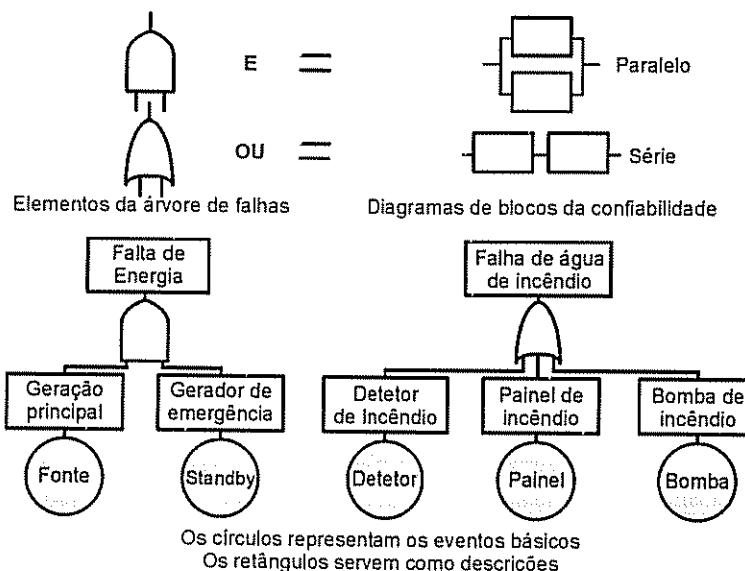


FIGURA 14.2 Exemplos de Árvores de Falhas.

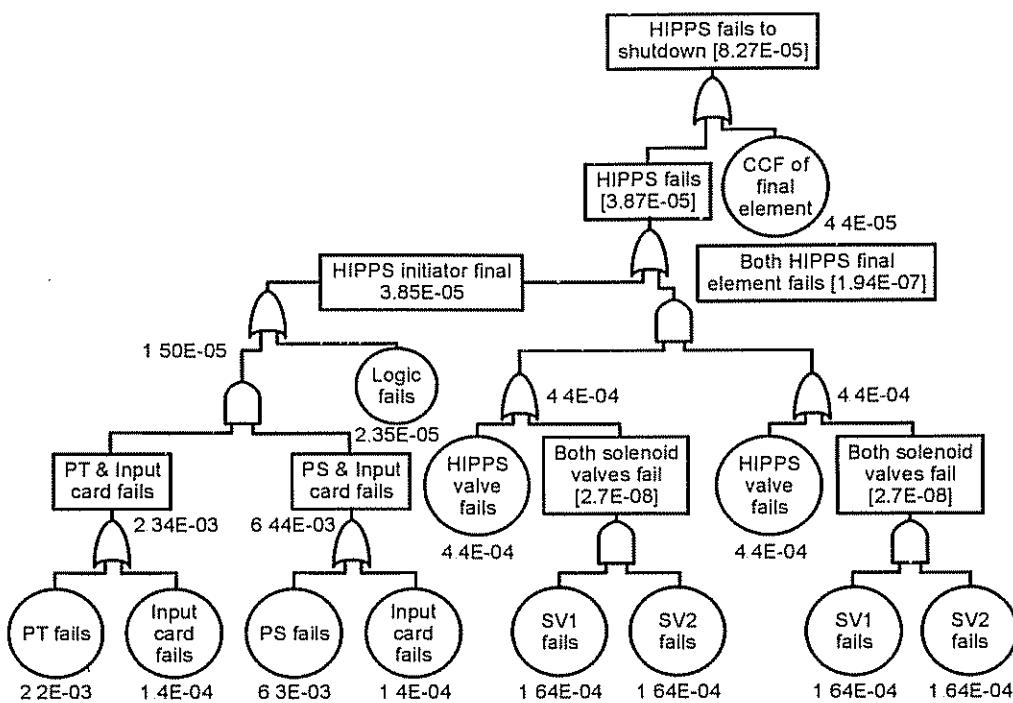


FIGURA 14.3 Análise de Árvore de Falhas de um HIPPS (High Integrity Pressure Protection)

Uma técnica que está se difundindo mais recentemente é a dos diagramas de blocos de Árvores de Falhas. Nesta técnica os eventos possíveis são associados por portas “e” quando se imagina sua ocorrência simultânea e por portas “ou”, quando de ocorrência independente. A aritmética associada a estes blocos é elementar. Para os eventos associados a portas “ou”, somam-se as probabilidade de ocorrências, enquanto para eventos associados a um “e”, multiplicam-se as probabilidades.

Uma análise quantitativa completa é difícil para um analista de risco pouco experiente, e a maioria dos consultores em SIS não consegue fazer uma boa análise quantitativa de consequências. Para este tipo de análise existem firmas especializadas.

14.3.3 Verificação do SIL Atingido

Para verificar se, finalmente, o SIL atingido é compatível com o que foi desejado, também há inúmeras técnicas. Uma das mais perfeitas é pelo uso dos Modelos de Markov dependentes do tempo. É, no entanto, muito complexa, exigindo a participação de um especialista, motivo pelo qual é pouco empregada. A menos que você se dedique exclusivamente à Engenharia de Confiabilidade, é melhor não se envolver com os Modelos (ou Diagramas) de Markov.

Para um simples Engenheiro de Instrumentação e/ou Controle, que, ocasionalmente, vem a se envolver com verificação de SIL, é mais recomendável o uso de equações simplificadas, interligadas por diagramas de blocos de confiabilidade. Há programas de computador que permitem uma simulação adequada desta técnica. As respostas obtidas têm uma

precisão razoável e, de qualquer maneira, como se baseiam em dados freqüentemente estimados, não há porque estressar uma grande precisão nas respostas se as informações básicas para os cálculos já não são precisas. Quando é necessário fazer uma análise em condições onde não haja equações disponíveis, pode-se optar por uma Análise de Árvore de Falhas. Elas são flexíveis e versáteis, mas o cálculo de uma taxa de falhas média pode ser bastante difícil. As normas mais usuais, ANSI/ISA SP84.01 e IEC-61508 e 61511 recomendam usar taxas de falhas médias, enquanto a Análise de Árvore de Falhas dá resultados diretos da taxa de falhas máximas. Para chegar às médias, o usuário precisa resolver a árvore de falhas em vários intervalos de tempo discretos e depois calcular, numericamente, as médias desejadas, o que se torna muito trabalhoso. Há quem use as taxas máximas como se fossem médias, pois isto resulta em maior confiabilidade do que necessário, o que, por sua vez, torna a planta mais segura, embora possa encarecer o SIS.

Embora a FMEA seja um método bom para determinar taxas de falhas, coberturas de diagnóstico e frações de falhas seguras para componentes, não é possível usá-lo diretamente como ferramenta para cálculo de probabilidades de falhas, nem para modelar probabilidades de falhas de "sistemas complexos", como, por exemplo, com redundâncias, onde se faz a votação entre vários elementos.

A Análise de árvore de falhas é de aplicação mais simples e sua aritmética é elementar.

14.4 AS NORMAS MODERNAS PARA OS SIS

Ultimamente, várias normas sobre o desenvolvimento, projeto, e manutenção dos SIS foram editadas. Entre estas estão as do IEC-61508 (voltada para indústrias em geral) e a 61511 (para indústrias de processamento contínuo, líquidos e gases) e a da ISA, a SP-84.01, semelhante à 61511, porém, mais voltada para o SIS propriamente dito, enquanto a 61511 dá ênfase a toda análise de risco e às outras camadas de proteção (mais abrangente).

A característica mais marcante destas normas é que são geralmente normas voltadas para a performance exigida do sistema, e não são normas prescritivas, como eram as normas mais antigas. Isto quer dizer que desde que o usuário (ou projetista) atinja ao nível de segurança desejado (SIL), qualquer tecnologia é aceitável, e o nível de redundância, bem como o intervalo de teste, ficam a critério de quem especifica o sistema, embora ambos estejam intimamente relacionados com o SIL pretendido.

Se, por um lado, isso aumenta a "durabilidade" da norma, fazendo com que ela não precise ser revisada cada vez que uma nova tecnologia comece a ser empregada, por outro lado, não tendo "receitas de bolo" aumenta a responsabilidade de quem as usa. Exceção a este respeito é a Norma da Petrobras N-2595, que é bastante prescritiva, mostrando uma grande preocupação em se classificar cada malha, e depois definindo qual tecnologia aplicar para cada classe de risco. A N-2595 permite que o usuário abra exceções quanto à tecnologia escolhida para cada nível de risco, desde que justifique o porquê frente aos órgãos competentes da Petrobras, o que pode induzir o usuário a evitar os desvios das recomendações da norma, seja por comodidade ou por ampliar sua responsabilidade ao fazê-lo.

Outra divergência entre a N-2595 e as outras normas é que quase todas normas recomendam a total separação entre os sistemas de controle e os SIS, mas a N-2595 recomenda para os níveis de risco menores o uso do próprio SDSD para fazer o papel de SIS, reservando a equipamentos mais especializados e adequados às funções de segurança a proteção das

malhas envolvendo riscos maiores. A natureza prescritiva da N-2595 traz como vantagens uma certa padronização entre sistemas projetados em unidades diferentes com pessoal de formação diferente, ou com vários níveis de entendimento de como projetar um SIS.

Assim, como com toda norma prescritiva, mesmo que um usuário não tenha tanto conhecimento do assunto quanto um outro, seu projeto tende a ser igual e com o mesmo nível de qualidade, já que ele seguiu a mesma "receita" de seu colega, que tem mais conhecimento de causa. O uso do próprio SDCD para os níveis de risco mais moderados, sem dúvida, reduz custos em todas as instalações, já que a grande maioria das malhas costuma ser classificada como de baixo risco.

Existem no entanto algumas limitações no uso de normas prescritivas. É quase impossível que uma única norma prescritiva consiga abranger uma enorme quantidade de cenários Industriais distintos. Assim é previsível que para dar cobertura a cenários muito diferentes dos originalmente contemplados durante a redação da norma, outras normas tenham que ser geradas.

14.5 TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

Os SIS podem ser microprocessados ou não. Podem usar as mais variadas tecnologias em sua implementação, tais como relés eletromagnéticos, sistemas pneumáticos e hidráulicos, circuitos lógicos convencionais ou tipo falha segura com lógica fixa, programáveis, etc. Por serem sistemas em que a confiabilidade de atuação redonda no nível de segurança que podem alcançar, é comum terem componentes redundantes, e, às vezes, usarem mais de uma tecnologia para atingir a um mesmo fim.

14.5.1 Sistema de Segurança e Sistema de Controle

Os sistemas de controle geralmente não exigem uma confiabilidade tão grande, porque logo que uma falha ocorre nos mesmos, os operadores observam, pois suas malhas de controle não funcionam como era esperado, e a manutenção pode ser acionada imediatamente. Nos SIS a situação pode ficar bem mais perigosa, pois muitas falhas do sistema ou de seus componentes podem passar despercebidas por períodos extensos, durante os quais a unidade industrial pode estar passando por riscos que o SIS não pode evitar, por conter defeitos perigosos não detectados.

Na verdade, num Sistema de Controle há duas formas de atuação possíveis. Ou o sistema está bom, funcionando a contento, ou em falha, precisando de reparos. Num SIS há três estados de funcionamento distintos:

- 1) sistema bom – segurança garantida;
- 2) sistema em falha segura – geralmente isto causa um desligamento imediato e prejuízos para a produção, mas, na maioria dos casos, não para a segurança;
- 3) sistema com uma falha "oculta", insegura – tudo parece estar normal, mas se houver necessidade de intervenção do SIS, nada acontecerá e o acidente pode ocorrer. É por causa desta terceira hipótese que é imprescindível que um SIS seja testado periodicamente, ou continuamente, e seus instrumentos sejam recalibrados ou aferidos etc. Em um sistema de controle, as falhas geralmente são percebidas imediatamente, enquanto em um SIS as falhas "encobertas" podem ficar residindo indefinidamente no sistema, expondo a unidade a um risco inaceitável.

É esta distinção entre as características das falhas de um SIS, quando comparadas com as de um sistema de controle, que leva a critérios de projeto e manutenção mais críticos e de custos proporcionalmente mais elevados para os SIS mais sofisticados e de alto nível de responsabilidade do que os sistemas de controle compatíveis.

14.5.2 As Arquiteturas mais Comuns

Embora o projetista do SIS sempre possa adotar, na lógica do sistema, arquiteturas redundantes, usando elementos de instrumentação convencional, normalmente prefere adotar equipamentos especialmente projetados para estes fins, que englobam diferentes filosofias de projetos e são comumente analisados, testados e certificados por entidades competentes, como os TÜV alemães.

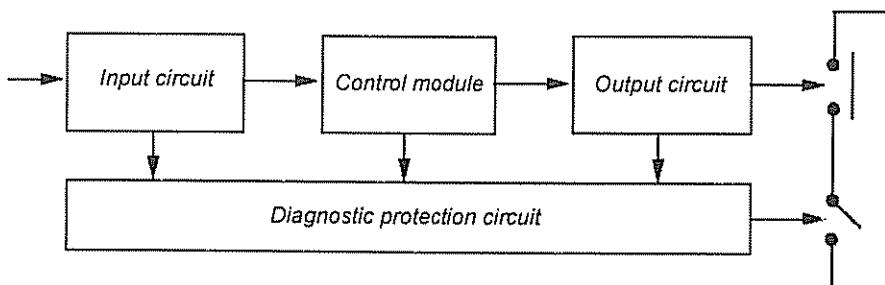


FIGURA 14.4 Arquitetura com um canal de lógica e um canal de diagnóstico.

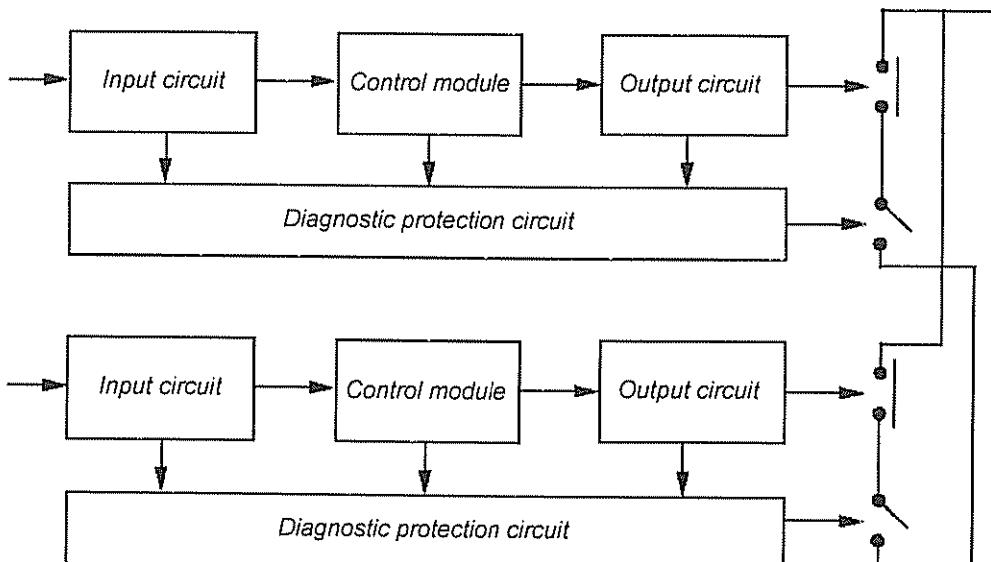


FIGURA 14.5 Arquitetura com dois canais de lógica e dois canais de diagnóstico.

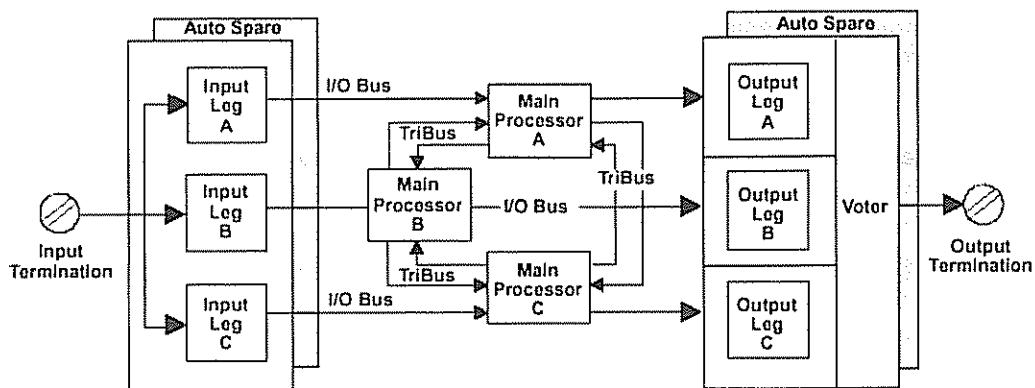


FIGURA 14.6 Arquitetura com três canais em votação dois de três (TMR - *Triple Modular Redundancy*)

14.5.3 Missão Crítica

Existe um outro conceito, o de "missão crítica", termo emprestado das aplicações militares, onde, além de se ter uma segurança elevada, necessita-se evitar até onde possível as paradas espúrias, desnecessárias, seja por estas acarretarem riscos adicionais ou causarem prejuízo elevado para a unidade industrial. Para aplicações deste tipo vários fabricantes desenvolveram equipamentos eletrônicos de lógica de controle redundantes e múltiplos, e são freqüentemente usados em projetos onde o equipamento de campo (sensores, transmissores e até elementos finais de controle) também é freqüentemente empregado de forma redundante. Freqüentemente, conseguem-se as taxas de falhas seguras e taxas de falhas de continuidade operacional, compatíveis com a noção de missão crítica usando arquiteturas com dois canais de lógica e dois canais de diagnóstico, ou com três canais em votação 2 de 3. Quando se necessita de combinar a "missão crítica" com o Nível SIL 4 também é comum se empregar lógica-fixa falha segura, com dois canais em paralelo, para aumento de confiabilidade operacional. Na Europa encontra-se esta configuração com mais freqüência do que na América. Em todos estes casos de largo emprego de redundâncias, recomenda-se um alto nível de diagnósticos automáticos e testes manuais periódicos, para evitar que falhas espúrias ocultas fiquem residentes durante muito tempo no sistema de segurança.

A terminologia usada para as técnicas de redundância de instrumentação industrial é um pouco ambígua e confusa. Por exemplo:

Sistema com votação 1 de 2. Se for um sistema de controle significa que, se um dos dois equipamentos estiver funcionando a contento, este controlará a malha em questão, enquanto o outro pode ser reparado pela manutenção. Se estivermos falando em SIS, há duas interpretações possíveis e irreconciliáveis. Podemos dizer que basta que um equipamento falhe para provocar o desligamento por segurança, ou que, se um equipamento falhar, o outro pode garantir a continuidade operacional em condições seguras. Observe que, nestas duas interpretações, em um caso uma falha única vai para a produção, enquanto na outra vai garantir as condições seguras para a não interrupção da produção.

A origem desta confusão de nomenclatura vem do fato de que, normalmente, as malhas de segurança operam na condição chamada falha-segura, isto é, permanecem energizadas para operar e são desenergizadas para desligar. Assim, se eu raciocino "votando um de dois" para manter energizado, conservo a operação em caso de falha de um dos canais, mas se eu raciocino com "votando um de dois" para causar a parada de emergência, isto quer dizer que, em caso de falha de um dos dois canais ou componentes, devo desenergizar o comando de desligamento do processo, parando a operação.

A técnica de votação 2 de 2 passa pelo mesmo problema de terminologia ambígua. Se digo que estou votando 2 de 2 para causar uma parada, mantenho a produção funcionando quando um componente ou canal falha. Reciprocamente, se digo que voto 2 de 2 para manter a saída energizada, quer dizer que na falha de um canal desligo a produção.

Observe que basta definir uma das técnicas (1 de 1, ou 2 de 2) e a outra já estará definida por exclusão. Se 1 de 1 para a planta, 1 de 2 mantém o funcionamento em caso de falha de um canal, e vice-versa. Na grande maioria dos casos é necessário definir para cada malha se será utilizada tecnologia "singela" (ou votar 1 de 1), ou redundância em 1 de 2 ou 2 de 2. A maioria das aplicações de SIS contém pelo menos algumas malhas em 1 de 2 e outras em 2 de 2. A alternativa usual nas "missões críticas" é a votação 2 de 3, onde a maioria define se a produção deve parar ou continuar. As técnicas 2 de 3 conseguem aliar as vantagens da votação 1 de 2 com as de 2 de 2, pois uma única falha nem desliga a produção desnecessariamente, nem deixa de desligá-la quando isto é necessário. Obviamente, o custo de 2 de 3 é significativamente maior do que de 1 de 2 ou 2 de 2, que, por sua vez, custam mais do que não usar redundância (1 de 1) e correr o risco de que uma falha segura pare a produção "desnecessariamente", ou, pior, mantenha a produção quando as condições para um acidente estejam presentes.

O uso indiscriminado de votação 2 de 3 às vezes leva a um aumento de custo do SIS, freqüentemente dispensável, quando se generaliza na aplicação de uma unidade lógica comum para toda a planta ou para toda a unidade. Na maioria dos casos são poucas as malhas que devem funcionar seguindo o conceito de missão crítica, e a maioria das malhas poderão usar votação 1 de 1, enquanto para outras se recomenda 1 de 2 ou 2 de 2. Como freqüentemente se compra a lógica de um só modelo e de um fabricante, há um grande número de instalações em que a maioria das malhas tem um só sensor (1 de 1) ou dois (1 de 2 ou 2 de 2), embora esta lógica que, normalmente, já é bem mais confiável e segura do que os elementos primários e finais, seja triplicada e votada 2 de 3. Como o elo mais fraco de uma corrente define sua resistência, nestes casos têm-se uma eletrônica e lógica extremamente mais confiáveis do que o que a maioria das malhas realmente necessita.

Outras tecnologias de redundância existem, mas não são usuais nas indústrias mais comuns. Encontram-se, por exemplo, votações 2 de 4, 3 de 4, 4 de 5 e outras em indústrias extremamente críticas, como nuclear, aeroespacial, aplicação militar, em submarinos, etc. Não pretendemos detalhar mais estas formas de redundância aqui.

14.5.4 O Conceito de Probabilidade de Falha e o SIL

Modernamente especifica-se um Sistema Instrumentado de Segurança para se obter uma "performance estatística esperada", ou seja para reduzir a possibilidade de acidentes à uma taxa considerada como aceitável.

Aqui é imperativo classificar os eventos geradores de acidentes em função do "risco aceitável" e estimar adequadamente o "risco inherente" do processo. Através de várias técnicas disponíveis avalia-se o risco envolvido em cada processo e até no funcionamento adequado, ou não, de cada malha de controle.

Se o risco "inherente" ao processo é considerado como aceitável, não há necessidade de se tomar nenhuma providencia para reduzi-lo. Se o risco for considerado maior do que o aceitável, em primeira instância deve-se procurar alterar o processo, ou seu controle, para reduzir o nível de risco ao aceitável. Se nem assim for possível atingir este objetivo, deve-se procurar atingi-lo através do uso de dispositivos de segurança autônomos, como válvulas de alívio de sobrepressão, discos de ruptura e outros, onde aplicáveis.

Se tudo isto não reduzir o risco a níveis aceitáveis, então, será necessário projetar o SIS capaz de reduzir o nível de risco residual obtido com as outras medidas recomendáveis, até que ele fique dentro de níveis aceitáveis. Este estudo de risco e redução do fator de risco (RRF – *Risk Reduction Factor*) antecede à especificação do SIS e deve ser feito para cada Função de Segurança (SIF – *Safety Instrumented Function*).

É comum que em um único vaso haja várias fontes de risco, como sobretemperatura, nível excessivo, sobrepressão etc., e que cada uma destas condições exijam medidas de redução de fator de risco diferentes. Por exemplo, a sobrepressão pode ser evitada com grau de sucesso esperado aceitável (RRF) por uma ou duas válvulas de alívio (PSV), enquanto que o nível excessivo pode ser deixado por conta de uma saída elevada, despejando o excesso de conteúdo em uma canaleta (ladrão). Já a sobretemperatura pode exigir que, além da existência de uma malha de controle de temperatura, o SIS interrompa o processo a uma certa temperatura mais elevada.

Assim, dependendo do processo, dos fluidos e das grandezas das variáveis de processo (controladas ou não) existentes, as atitudes a serem tomadas para garantir que o risco final esteja dentro da faixa aceitável podem variar muito.

Existem várias maneiras de se determinar o SIL – *Safety Integrity Level* (nível de integridade de segurança desejado), mas nenhuma norma controla ou exige um procedimento específico, e esta atividade de determinação do SIL, passo essencial no projeto do controle do processo e do SIS, é fundamental e passa sempre por uma avaliação com componentes subjetivos. Há países em que a legislação exige que se comprove matematicamente que o Processo com seu SIS e outras camadas de proteção atingem o SIL desejado. No entanto, é praticamente impossível exigir que se prove qual o SIL que é realmente adequado a uma unidade industrial.

14.5.5 A Probabilidade de Falha sob Demanda (PFD)

O conceito de disponibilidade é bastante difundido. Assim, se um equipamento tem uma disponibilidade de 99%, isto quer dizer que pode operar durante 99% do tempo disponível durante sua vida útil, e estará inoperante durante o 1% restante.

Para equipamento de produção, este conceito já dá uma idéia quantitativa do que esperar do equipamento. Para o SIS, um conceito mais adequado é o da Probabilidade de Falha sob Demanda, porque muitas falhas não são detectadas imediatamente logo que ocorrem, podendo permanecer dormentes por longos períodos, até que se realize um teste que permita descobri-las e, aí então, proceder a seu reparo.

Observe-se que a PFD não depende da demanda em si, informando apenas qual a probabilidade do equipamento não funcionar adequadamente quando uma demanda ocor-

rer. Partindo do princípio que poderá ocorrer um acidente sempre que houver uma demanda do SIS e ele estiver indisponível, o risco de acontecer um acidente, então, fica dependente da PFD e de frequência da demanda.

A qualidade de um equipamento depende dele intrinsecamente, e não da demanda real de seu funcionamento, e, assim, a PFD permite que se compare o desempenho relativo de diferentes equipamentos ou configurações de equipamentos, independendo da aplicação desejada. É a aplicação, ou melhor, seus riscos, que definem qual a PFD aceitável para o equipamento a ser especificado ou escolhido para aquela aplicação específica.

Podemos, então, dizer que:

$$PFD = 1 - D, \text{ onde } D \text{ é a disponibilidade.}$$

Mas já vimos que há duas maneiras distintas em que um SIS pode falhar. Se usado de forma ativa, isto é, energizado para manter a operação e desenergizado para parar, a falha que acarreta o risco é a falha dormente, tipo manter energizado mesmo quando fosse necessário parar. A outra forma de falhar, isto é, desenergizar desnecessariamente, não é uma falha oculta, e, sim, uma falha descoberta imediatamente pela própria parada da produção.

As normas sobre SIS preocupam-se, usualmente, apenas com a falha encoberta do SIS, e não com sua qualidade industrial óbvia, que é também de não parar desnecessariamente.

A qualidade de um SIS é avaliada inicialmente, então, em função de sua PFD (segura), não levando em conta sua Probabilidade de Falha Segura (causando uma parada desnecessária e indesejável). É assim que se tabulam os SIL.

**TABELA 14.1
SIL em Função de Disponibilidade e Probabilidade de Falha sob Demanda**

Nível de integridade	Disponibilidade (segura) desejada	PFD	RRF
4	> 99,99%	> 0,01%	> 10.000
3	99,90 a 99,99%	0,01 a 0,1%	1.000 a 10.000
2	99,00 a 99,90%	0,1 a 1%	100 a 1.000
1	90,00 a 99,00%	1 a 10%	10 a 100

Observe-se que a norma da ISA (SP-84) em sua edição original (1996) só reconhecia os SIL 1 a 3, enquanto as normas do IEC 61508 e 61511 e a nova edição da ANSI/ISA S-84.01 2004 reconhecem, adicionalmente, um nível mais seguro, o SIL 4.

Disponibilidade: $Ad = 1 - PFD$ (em %) RRF = $1/PFD$.

**TABELA 14.2
Formulário para Configurações**

Configuração	MTBF _{sp}	PFD
1 de 1	$1/\lambda_s$	$\lambda_d(MTIR + TI/2)$
1 de 2	$1/(2\lambda_s)$	$2\lambda_d^2(MTIR + TI/2)^2$
2 de 2	$1/(2\lambda_s^2 \cdot MTIR)$	$2\lambda_d(MTIR + TI/2)$
2 de 3	$1/(6\lambda_s^2 \cdot MTIR)$	$6\lambda_d^2(MTIR + TI/2)^2$

onde:

MTTR = Tempo Médio para Reparo 1 ano = 8760 horas;

TI = Intervalo de Teste;

s = falha segura (iniciação);

d = falha insegura (inibição).

RRF – *Risk Reduction Factor* = Fator de Redução de risco.

PDF – *Probability of Failure on Demand* = Probabilidade de Falha sob Demanda.

Formulário para relacionar as configurações de SIS e os respectivos Tempos Médios entre Falhas Espúrias (MTBF(sp)), Fatores de Redução de Risco (RRFs) e Probabilidade de Falha sob Demanda (PDFs).

Estas fórmulas baseiam-se na suposição de que, para falhas encobertas, $1/MDT > \text{taxa de falha}$, onde MDT (Tempo Médio Indisponível) = $(MTTR + TI/2)$, ou seja, o tempo médio para reparo é desprezível face ao tempo necessário para se detectar a falha.

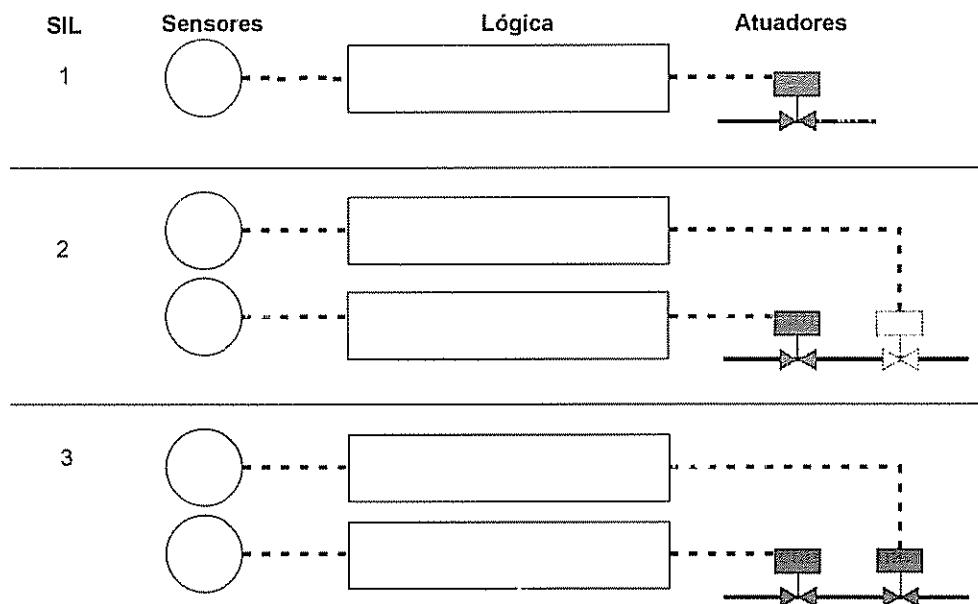


FIGURA 14.7 Arquiteturas típicas para os vários Níveis de Integridade de Segurança (SIL).

14.6 O CICLO DE VIDA DO SIS

O início do projeto de um SIS passa pela definição do SIL de cada malha de segurança. A definição do SIL pode ser feita por várias técnicas quantitativas e qualitativas, e começa por uma análise de riscos do processo, onde se identificam os riscos envolvidos.

Esta análise pode ser feita usando várias técnicas disponíveis e, geralmente, envolve um coordenador da atividade, um "secretário" que anota as atas e conclusões de cada etapa da

análise, um especialista em segurança do processo, pelo menos um engenheiro de projeto, que deve estar bem familiarizado com o processo, e, pelo menos, um operador, também familiarizado com a operação do processo em pauta, e também um técnico em manutenção, familiarizado com a manutenção da unidade analisada.

Nos EUA, pelo menos um "empregado" (não filiado à engenharia ou gerência da empresa) é exigido pela norma da OSHA 1910.119. Além deste, conforme necessário, devem ser requisitadas as presenças de pessoal de engenharia e/ou manutenção de cada tipo de equipamento mecânico (como equipamento rotativo, aquecedores, caldeiras e fornos, trocadores etc.).

Ao final da análise, este grupo deve ter identificado todos os riscos relevantes, as funções de segurança da instrumentação existente e recomendar novas funções de segurança instrumentadas, conforme necessário, e, para cada uma destas funções, deve identificar os eventos inicializadores e as camadas de proteção que devem evitá-los.

A etapa seguinte é aplicar outras camadas de proteção independentes. Aqui se pode usar a técnica conhecida como LOPA (*Layer of Protection Analysis*). Em seguida se verifica se já atingimos o SIL exigido para aquela função de segurança considerada. Se ainda não tiver sido atingido, necessita-se realmente de um SIS, para o qual se define o SIL alvo.

As necessidades de segurança são estabelecidas a seguir, bem como o projeto conceitual do SIS, e seu detalhamento. Enquanto estas etapas são percorridas, os procedimentos de operação e manutenção são estabelecidos, e se faz a instalação e comissionamento do SIS.

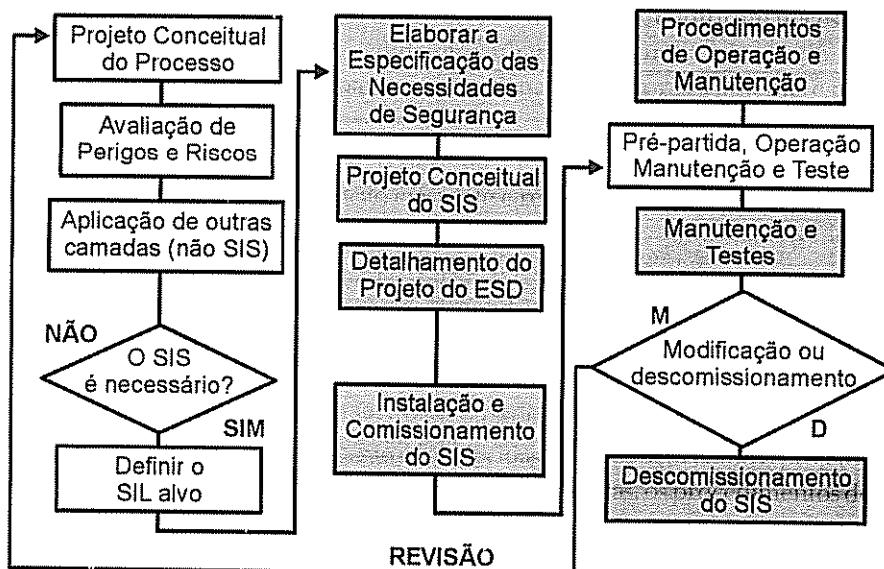


FIGURA 14.8 Ciclo de Vida do Projeto de Segurança.

Na pré-operação e partida começa a vida útil do sistema, que prossegue com atividades de manutenção e testes periódicos, até que se precise de alguma modificação no sistema. Neste momento o ciclo de vida solicita uma reciclagem para incluir nova Avaliação de Riscos, etc. como na figura. Esta reciclagem serve principalmente para impedir que fatores importantes identificados na análise de riscos original do projeto sejam esquecidos.

Ao se descomissionar (aposentar) um sistema instrumentado de segurança, é importante verificar como isto afeta os SIS de outras unidades industriais associadas. É comum que hajam intertravamentos entre unidades industriais diferentes quando fluidos de processo passam de uma unidade à outra. Isto obriga a se fazer um procedimento tipo gerenciamento de mudanças (MOC – *Management of Change*) em todas as unidades afetadas.

Impresso por:



Tel/Fax: (21) 2159 7979
E-mail: edil@edil.com.br

Os processos industriais são variados, englobam diversos tipos de produtos e exigem controlo preciso dos produtos gerados. Usualmente, os maiores usuários de instrumentação são as indústrias que atuam nas áreas de petróleo, química, petroquímica, alimento, cerâmica, siderúrgica, celulose e papel, têxtil, geração de energia elétrica etc.

Em todos esses processos é indispensável se controlar e manter constantes as principais variáveis, tais como pressão, nível, vazão, temperatura, pH, condutividade, velocidade etc. Os instrumentos de medição e controle permitem manter e controlar estas variáveis em condições mais adequadas/precisas do que se elas fossem controladas manualmente por um operador.

Os sistemas de controle mantêm a variável controlada no valor especificado, comparando o valor da variável medida, ou a condição a controlar, com o valor desejado (ponto de ajuste ou *set point*), e fazendo as correções em função do desvio existente entre estes dois valores (erro ou offset), sem a necessidade de intervenção do operador, garantindo que, ao ocorrerem desvios significativos dos parâmetros de operação, o sistema seja desligado, automaticamente, de forma segura e sem acidentes.