

INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

VOLUME I

INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

Segunda Edição

Volume I

Gustavo Vitorino Monteiro da Silva
Escola Superior de Tecnologia de Setúbal

FICHA TÉCNICA

Título

“Instrumentação Industrial – 2ª Edição”

Copyright © 2004 do autor

Autor



Gustavo Vitorino Monteiro da Silva
Engenheiro Electrotécnico
Mestre em Eng^a Electrotécnica e de Computadores
e-mail: gsilva@est.ips.pt

Foto do autor: Rita Caleiro – Gabinete de Promoção e Comunicação da EST

Edição



Escola Superior de Tecnologia de Setúbal
Rua do Vale de Chaves, Estefanilha
2914-508 SETÚBAL – PORTUGAL
Tel: 265 790 000 Fax: 265 721 869
e-mail: rel-ext@est.ips.pt

Comercialização e Capa



FXS, Gestão de Marketing, Lda.
Rua Prof. Mark Athias, 4, 3º Frente
1600-646 LISBOA – PORTUGAL
Tel: 217 524 285 Fax: 217 599 327
www.fxs.pt e-mail: info@fxs.pt

Impressão

Tipografia Peres
R. das Fontainhas, lote 2, Venda Nova
2700-391 AMADORA – PORTUGAL
Tel: 214 996 900 Fax: 214 990 493

ISBN Vol. I: 972-8431-22-8

Vol. II: 972-8431-23-6

Depósito Legal Vol. I: 213 357 / 004
Vol II: 213 358 / 004

Tiragem: 1000 exemplares
Cada exemplar consta de 2 volumes

Setúbal, Julho de 2004

Aos meus filhos

AGRADECIMENTOS

O Capítulo 18, Aquisição de Dados, foi gentilmente escrito pelo colega Vítor Manuel Rodrigues Viegas, Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pelo Instituto Superior Técnico, ramo de Medidas Eléctricas e Instrumentação, que lecciona na EST disciplinas na área científica de Instrumentação e Medida.

Os Capítulos 1, 2, 3 e 17 foram revistos pelo colega Miguel Dias Pereira, Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pelo Instituto Superior Técnico, ramo de Medidas Eléctricas e Instrumentação, que lecciona na EST disciplinas na área científica de Instrumentação e Medida.

Os Capítulos 5, 8 e 16 (pH) foram revistos pelo colega Rui Nuno Vilela Dionísio, Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pelo Instituto Superior Técnico, ramo de Controlo e Robótica e que lecciona na EST disciplinas na área científica de Instrumentação e Medida.

A todos estes colegas expresso os meus sinceros agradecimentos.

PREFÁCIO

A obra do autor surge na sequência de um esforço continuado no sentido de enriquecer o já vasto número de publicações que tem vindo a apresentar nas áreas de Instrumentação e Medida e Controlo e Processos, onde desenvolve a sua actividade como docente do Departamento de Sistemas e Informática da Escola Superior de Tecnologia de Setúbal do Instituto Politécnico de Setúbal.

Das obras já desenvolvidas são de realçar, para além das publicações de carácter pedagógico, efectuadas no âmbito das disciplinas que tem leccionado, os livros de Instrumentação Industrial (1ª edição), Processamento Digital de Sinais e Controlo Não Linear que teve oportunidade de publicar em Junho de 1999, Outubro de 2000 e Julho de 2003, respectivamente.

Nesta 2ª edição do seu livro de Instrumentação Industrial é de realçar não apenas a reformulação de alguns aspectos de organização do texto, mas também a inclusão de um número significativo de novos capítulos. De entre estes, destaco os seguintes: elementos pneumáticos, sensores por infravermelhos, medidas eléctricas, aquisição de dados, instrumentação médica, controlo de processos, válvulas de controlo e metrologia.

Considero como factor determinante de motivação subjacente para concretização das publicações referidas, e particularmente desta 2ª edição deste livro de Instrumentação Industrial, a excepcional preocupação que o autor tem manifestado no desenvolvimento de bibliografia de apoio aos alunos e outros interessados nas matérias que tem leccionado.

Como nota de realce nas publicações apresentadas saliento ainda a capacidade que o autor tem demonstrado em aliar à sua experiência profissional, de cerca de 25 anos na área do projecto em instalações de sistemas de medida e controlo industriais, o rigor técnico-científico na apresentação de temas cuja abordagem nem sempre é fácil. Para isso contribuem de forma bastante positiva os casos de aplicação prática que são sugeridos no decurso da apresentação dos conteúdos teóricos, das matérias apresentadas, bem como o número significativo de problemas resolvidos e propostos em cada capítulo.

Por todos estes motivos e em especial pelo esforço evidenciado no sentido de apoiar os alunos da ESTSetúbal, em particular os do Curso de Automação, Controlo e Instrumentação, felicito o autor manifestando o meu reconhecimento pelo excelente trabalho desenvolvido.

Setúbal, 10 de Junho de 2004

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'D' followed by a series of connected loops and a horizontal tail.

Dias Pereira

PREFÁCIO DA 1ª EDIÇÃO

A instrumentação de medida constitui um dos campos técnico-científicos mais interessantes que conheço, mas que em língua portuguesa não dispõe de literatura suficiente que reúna os conhecimentos básicos existentes. Associando esta circunstância ao gosto que sempre tive pelos sistemas de medida, à experiência de cerca de 25 anos em projecto e instalação de sistemas de medida e de controlo industriais e ao facto de leccionar cadeiras de instrumentação no Instituto Politécnico de Setúbal, ficaram reunidas as condições essenciais para o aparecimento deste livro.

Nesta obra procura fazer-se uma abordagem sistematizada da instrumentação de medida em linha correntemente utilizada na indústria. Os sensores, como são designados na indústria estes instrumentos, são aqui classificados de acordo com o tipo de variável que se pretende medir. Na apresentação de cada um deles dá-se mais ênfase ao princípio utilizado na transdução do que aos circuitos por eles utilizados. Penso que assim se terá uma melhor compreensão dos fenómenos envolvidos.

Esta edição constitui apenas uma parte daquilo que se pretende fazer. Muitos dos tópicos que fazem parte da instrumentação nem sequer aqui estão mencionados, como por exemplo os sensores baseados em análise espectral, a aparelhagem para medida de grandezas eléctricas, as válvulas de controlo, os actuadores eléctricos e pneumáticos, o estudo do ruído e blindagem, os sistemas de aquisição de dados e de controlo distribuído, a instrumentação inteligente, a instrumentação baseada em PCs, a instrumentação virtual, etc. Espero que um segundo volume possa contemplar este temas, tão importantes quanto actuais. Apesar desta falta, penso que a publicação agora efectuada poderá prestar um bom trabalho a quem dela se servir.

Este livro destina-se a um público muito restrito, mas apesar de tudo, diversificado. Tenho em mente todos aqueles que, tendo gosto por estas matérias, não dispõem de tempo ou oportunidade para consultar bibliografia estrangeira; penso também na contribuição que o livro poderá prestar aos instrumentistas das nossas fábricas, que tão bom trabalho vêm desempenhando, apesar da sua acção passar quase sempre despercebida; com alguns deles aprendi muito do que aqui exponho; penso ainda nos engenheiros e técnicos que projectam, instalam e mantêm a instrumentação de medida. Finalmente, a minha atenção vai para os alunos das escolas de engenharia, e em particular para os alunos da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal, que me estimularam no sentido da publicação desta obra.

O livro está dividido em capítulos, quase todos independentes. Cada capítulo é destinado ao estudo da medição de uma grandeza física ou química, ou de grandezas associadas. Quando considerado necessário, começa-se por dar uma muito breve introdução teórica, para lembrar e eventualmente clarificar os conceitos envolvidos; segue-se uma exposição sobre os diversos

métodos de transdução utilizados pelos respectivos sensores. Nalguns casos descrevem-se os circuitos utilizados. Sempre que julgado necessário, apresentam-se recomendações sobre o modo de instalação e os procedimentos utilizados para a calibração. Por vezes apresenta-se um mapa comparativo em que se resume o campo de aplicação, as gamas de medida, as vantagens, inconvenientes e limitações de cada instrumento. Cada capítulo termina com alguns problemas de aplicação, cujo objectivo é concretizar, com valores numéricos do mundo real, a abordagem teórica efectuada. O livro faz uma introdução genérica a cada um dos sensores, não sendo de modo algum uma exposição detalhada sobre os mesmos. Para tal deverão ser consultadas as obras da especialidade indicadas na bibliografia.

Quero agradecer ao meu antigo aluno da EST, Helder António Gomes da Silva a execução de parte das figuras, bem como o empenho e cuidado que pôs na sua execução; ao antigo colega de mestrado e colega da EST Rui Nuno Vilela Dionisio a cuidadosa revisão efectuada aos capítulos 1,2 e a sua contribuição para o capítulo 16; ao meu filho Luís Pedro Monteiro da Silva a disponibilidade para a execução de parte das figuras; finalmente, à minha mulher Maria Teresa Salta Monteiro da Silva, que sempre tem sabido compreender que estas horas de atenção que não lhe dou são dedicadas a uma boa causa.

Espero que este livro aproveite a todos.

Lisboa, Julho de 1997.

O Autor



CONTEÚDO RESUMIDO

<i>Volume I</i>	Pág.
1. A Instrumentação na Indústria	1
2. Condicionadores e Fontes	35
3. Posição, Deformação e Velocidade.....	91
4. Força, Binário, Peso e Aceleração	141
5. Pressão	165
6. Elementos Pneumáticos	195
7. Sensores de Nível.....	217
8. Temperatura	247
9. Caudalímetros	315
10. Sensores de Viscosidade	359

<i>Volume II</i>	Pág.
11. Sensores Ópticos	371
12. Cor, Brancura e Imagem	415
13. Sensores de Fibra Óptica.....	437
14. Sensores por Infravermelhos.....	457
15. Sensores por Radiação	471
16. Ph, Condutividade, Oxigénio	485
17. Medidas Eléctricas	511
18. Aquisição de Dados.....	539
19. Redes de Campo.....	561
20. Instrumentação Médica	589
21. Controlo de Processos	603
22. Válvulas de Controlo.....	639
23. Instrumentação Intrinsecamente Segura.....	667
24. Metrologia	683
25. Constantes, Formulários e Tabelas.....	701
Bibliografia	723
Índice Remissivo.....	725

CONTEÚDO DO VOLUME I

	pág.
1. A INSTRUMENTAÇÃO NA INDÚSTRIA.....	1
1.1. INTRODUÇÃO.....	1
1.2. O PROCESSO INDUSTRIAL.....	3
1.2.1. <i>Processo e variáveis do processo</i>	3
1.2.2. <i>Exemplos de processos</i>	3
1.2.3. <i>Processos contínuos e descontínuos</i>	13
1.2.4. <i>Representação de um processo</i>	13
1.3. SENSORES E CONVERSORES.....	15
1.3.1. <i>Introdução</i>	15
1.3.2. <i>Sensores</i>	16
1.3.3. <i>Conversores analógicos/ digitais</i>	20
1.4. VÁLVULAS, ACTUADORES E CONTROLADORES.....	21
1.5. ESCRITA DOS NÚMEROS E UNIDADES.....	22
1.5.1. <i>Algarismos significativos</i>	22
1.5.2. <i>Notação científica</i>	23
1.5.3. <i>Arredondamentos</i>	24
1.6. SISTEMAS DIGITAIS.....	25
1.6.1. <i>Variáveis e operações booleanas</i>	25
1.6.2. <i>Sistemas sem memória</i>	26
1.6.3. <i>Sistemas com memória</i>	28
1.7. FENÓMENOS PERIÓDICOS.....	30
1.7.1. <i>Representação analítica e gráfica</i>	30
1.7.2. <i>O sinal sinusoidal</i>	31
2. CONDICIONADORES E FONTES.....	35
2.1 INTRODUÇÃO.....	35
2.2 ELEMENTOS DE CIRCUITOS.....	35
2.2.1 <i>Resistência</i>	35
2.2.2 <i>Bobina</i>	38
2.2.3 <i>Condensador</i>	40
2.2.4 <i>Leis de Kirchhoff</i>	41
2.2.4.1 <i>Lei dos nós</i>	41
2.2.4.1 <i>Lei das malhas</i>	41
2.2.5 <i>Díodo</i>	42
2.2.6 <i>Transístor de junção</i>	45
2.2.7 <i>Circuito integrado</i>	50
2.3 AMPLIFICADORES.....	52
2.3.1 <i>Introdução</i>	52
2.3.2 <i>Ganho</i>	52
2.3.3 <i>Linearidade</i>	53
2.3.4 <i>Impedância de entrada</i>	54
2.3.5 <i>Impedância de saída</i>	54
2.3.6 <i>Ligação em cascata</i>	55
2.3.7 <i>Resposta em frequência</i>	55

2.3.8	<i>Amplificador diferencial</i>	57
2.3.9	<i>Ruído do amplificador</i>	58
2.4	AMPLIFICADORES OPERACIONAIS	59
2.4.1	<i>Introdução</i>	59
2.4.2	<i>Amplificador não inversor</i>	59
2.4.3	<i>Amplificador inversor</i>	61
2.4.4	<i>Amplificador somador/subtractor</i>	62
2.4.5	<i>Integrador</i>	63
2.4.6	<i>Diferenciador</i>	64
2.4.7	<i>Conversor corrente/tensão</i>	65
2.4.8	<i>Conversor tensão/corrente</i>	65
2.4.9	<i>Amplificador de carga</i>	66
2.4.10	<i>Amplificador de instrumentação</i>	67
2.5	PONTE DE WHEATSTONE	68
2.5.1	<i>Pontes de medida</i>	68
2.5.2	<i>Ponte de Wheatstone óhmica</i>	68
2.5.3	<i>Ponte de Wheatstone alimentada a tensão constante</i>	69
2.5.4	<i>Ponte de Wheatstone alimentada a corrente constante</i>	71
2.6	FILTROS.....	71
2.6.1	<i>Introdução</i>	71
2.6.2	<i>Filtros analógicos passivos</i>	73
2.6.3	<i>Filtros analógicos activos</i>	74
2.6.4	<i>Filtros digitais</i>	74
2.6.4.1	<i>Média fixa</i>	75
2.6.4.2	<i>Média móvel</i>	75
2.6.4.3	<i>Filtro exponencial</i>	76
2.7	ISOLAMENTO GALVÂNICO	76
2.7.1	<i>Introdução</i>	76
2.7.2	<i>Isolamento por transformador</i>	75
2.7.3	<i>Isolamento óptico</i>	77
2.8	FONTES DE ALIMENTAÇÃO	78
2.8.1	<i>Introdução</i>	78
2.8.2	<i>Pilha</i>	78
2.8.3	<i>Bateria</i>	79
2.8.3.1	<i>Capacidade de uma bateria</i>	80
2.8.4	<i>Fonte de alimentação</i>	80
2.8.5	<i>Alimentação de um transmissor a dois fios</i>	81
2.9	INDICADORES	83
2.10	PROBLEMAS	85
3.	POSIÇÃO, DEFORMAÇÃO E VELOCIDADE	91
3.1	INTRODUÇÃO.....	91
3.2	POSIÇÃO.....	91
3.2.1	<i>Sistemas de coordenadas</i>	91
3.2.2	<i>Potenciómetro</i>	94
3.2.2.1	<i>Introdução. Princípio</i>	94
3.2.2.2	<i>Materiais. Características</i>	95
3.2.3	<i>Transdutor indutivo</i>	96
3.2.4	<i>LVDT</i>	98
3.2.4.1	<i>Princípio</i>	98
3.2.4.2	<i>Características</i>	99

3.2.5	<i>Resolvers</i>	100
3.2.6	<i>Encoder</i>	102
3.2.7	<i>Condensador Variável</i>	104
3.2.7.1	Princípio. Capacidade. Impedância.	104
3.2.7.2	O condensador como transdutor.	105
3.2.8	<i>O efeito de Hall</i>	106
3.3	DEFORMAÇÃO	107
3.3.1	<i>Conceitos de tensão e deformação</i>	107
3.3.2	<i>Lei de Hooke. Módulo de elasticidade</i>	108
3.3.3	<i>Tensão de corte</i>	109
3.3.4	<i>Viga encastrada</i>	110
3.3.5	<i>Membrana circular</i>	111
3.3.6	<i>Extensómetros</i>	112
3.3.6.1	Princípio de funcionamento	112
3.3.6.2	Sensibilidade. Factor do extensómetro	113
3.3.6.3	Circuitos de medida. Compensação de temperatura	115
3.3.7	<i>Outros métodos</i>	118
3.3.7.1	Ultra-sons	118
3.3.7.2	Micro-ondas.....	118
3.3.7.3	Laser	118
3.3.7.4	Fibra óptica.....	118
3.4	VELOCIDADE	119
3.4.1	<i>Velocidade linear e angular</i>	119
3.4.1.1	Movimento de um corpo sólido.....	119
3.4.1.2	Velocidade linear.....	119
3.4.1.3	Velocidade angular e de rotação.....	119
3.4.2	<i>Sensores de Velocidade Angular</i>	120
3.4.2.1	Gerador taquimétrico.....	120
3.4.2.2	Taquímetro digital	121
3.4.2.3	Velocidades muito baixas.....	122
3.4.3	<i>Sensores de Velocidade Linear</i>	122
3.4.3.1	Taquímetro acoplado	122
3.4.3.2	Marcas no tapete.....	123
3.4.3.3	Encoder linear.....	123
3.4.3.4	Correlação.....	123
3.4.4	<i>Velocidade de Fluidos</i>	124
3.4.4.1	Anemómetro de conchas.....	124
3.4.4.2	Molinete.....	124
3.4.4.3	Tubo de Pitot	125
3.4.4.4	Anemómetro de fio quente	127
3.5	PROBLEMAS	128
4.	FORÇA, BINÁRIO, PESO E ACELERAÇÃO	141
4.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	141
4.1.1	<i>Força</i>	141
4.1.2	<i>Momento e binário</i>	142
4.1.3	<i>Aceleração e massa</i>	142
4.1.4	<i>Peso</i>	143
4.1.5	<i>Impulso de uma força</i>	144
4.1.6	<i>Tensão e deformação</i>	144
4.2	DINAMÓMETROS	144

4.2.1	<i>Célula de carga</i>	144
4.2.2	<i>Célula em anel</i>	146
4.2.3	<i>Barra encastrada</i>	147
4.3	SENSORES DE BINÁRIO.....	148
4.3.1	<i>Acoplamento elástico</i>	148
4.3.2	<i>Extensómetros sobre o veio</i>	149
4.4	ACELERÓMETROS.....	149
4.4.1	<i>A piezoelectricidade</i>	150
4.5	BALANÇAS.....	151
4.5.1	<i>Breve Resumo Histórico</i>	151
4.5.2	<i>Métodos de Pesagem</i>	152
4.5.3	<i>Balanças de alavancas</i>	153
4.5.4	<i>Balanças hidráulicas</i>	154
4.5.5	<i>Balanças pneumáticas</i>	155
4.5.6	<i>Balanças com células de deformação</i>	155
4.5.7	<i>Balanças radioactivas</i>	156
4.5.8	<i>Tapetes para Medida em Contínuo</i>	157
4.5.9	<i>Pesagem por Medida Volumétrica</i>	158
4.5.10	<i>Controlo do Alimentador do Tapete</i>	159
4.6	PROBLEMAS.....	161
5.	PRESSÃO	165
5.1.	CONCEITO DE PRESSÃO. UNIDADES.....	165
5.1.1.	<i>Introdução</i>	165
5.1.2.	<i>Definições</i>	165
5.1.3.	<i>Fluidos estáticos</i>	167
5.1.4.	<i>Fluidos dinâmicos</i>	170
5.1.5.	<i>Unidades</i>	170
5.2.	MANÓMETRO DE COLUNA LÍQUIDA.....	171
5.3.	MANÓMETRO DE BOURDON.....	172
5.4.	MANÓMETRO DE DIAFRAGMA.....	174
5.4.1.	<i>Constituição e tipos</i>	174
5.4.2.	<i>Distribuição das tensões mecânicas</i>	174
5.4.2.1.	<i>Medição com extensómetros</i>	175
5.4.2.2.	<i>Medição por variação de capacidade</i>	176
5.4.2.3.	<i>Medição por método piezoresistivo</i>	178
5.4.2.4.	<i>Medição com balança de forças</i>	178
5.4.3.	<i>O diafragma como selante</i>	178
5.5.	MANÓMETROS DE FOLE DE CÁPSULAS E DE CILINDRO.....	178
5.5.1.	<i>Manómetro de fole</i>	180
5.5.2.	<i>Manómetro de cápsulas</i>	180
5.5.3.	<i>Manómetro de cilindro</i>	181
5.6.	SENSORES PIEZOELÉCTRICOS.....	182
5.7.	PRESSÓSTATO.....	182
5.7.1.	<i>Introdução</i>	182
5.7.2.	<i>Princípio de funcionamento</i>	183
5.7.3.	<i>Banda morta ou diferencial</i>	184
5.8.	BLOCOS DE VÁLVULAS.....	184
5.9.	CALIBRAÇÃO.....	186
5.9.1.	<i>Balança de pesos mortos</i>	186
5.9.2.	<i>Calibrador</i>	187

5.10. ESPECIFICAÇÃO E SELECÇÃO	188
5.11. PROBLEMAS RESOLVIDOS	189
5.12. PROBLEMAS PROPOSTOS	193
6. ELEMENTOS PNEUMÁTICOS.....	195
6.1. INTRODUÇÃO	195
6.2. TRANSMISSORES.....	196
6.2.1. Tipos de sinal.....	196
6.2.2. O sistema tubeira-palheta.....	196
6.2.3. O relé pneumático.....	198
6.2.4. A balança de forças	199
6.3. CONTROLADORES	200
6.3.1. Introdução	200
6.3.2. Controlador Proporcional.....	201
6.3.3. Controlador proporcional integral (PI)	202
6.3.4. Controlador proporcional derivativo (PD)	205
6.3.5. Controlador proporcional integral e derivativo (PID).....	205
6.4. OUTROS DISPOSITIVOS.....	206
6.4.1. Conversor I/P	206
6.4.2. Conversor P/I	207
6.4.3. Extractor de raiz quadrada.....	207
6.5. COMPRESSORES	209
6.5.1. Compressor de pistão	209
6.5.2. Compressor de parafusos	210
6.5.3. Compressor de turbina	210
6.5.4. Características.....	211
6.6. PROBLEMAS RESOLVIDOS.....	212
7. SENSORES DE NÍVEL.....	217
7.1. INTRODUÇÃO.....	217
7.2. FUNDAMENTOS DE HIDROSTÁTICA.....	218
7.2.1. Conceito de nível	218
7.2.2. Equações fundamentais	218
7.2.3. Teorema de Arquimedes	219
7.2.3.1. Corpos totalmente mergulhados.....	219
7.2.3.2. Corpos parcialmente mergulhados.....	220
7.3. CLASSIFICAÇÃO DOS SENSORES.....	220
7.4. TUBO DE VISUALIZAÇÃO.....	220
7.5. RESERVATÓRIO COM FLUTUADOR	222
7.6. DISPOSITIVOS DE DESLOCAMENTO VARIÁVEL.....	225
7.7. NÍVEL POR PRESSÃO HIDROSTÁTICA	226
7.7.1. Tubo de borbulhamento.....	226
7.7.1.1. Reservatórios abertos.	226
7.7.1.2. Reservatórios fechados.	227
7.7.2. Nível por transmissor de pressão	227
7.8. SENSORES POR CONDUTIVIDADE.....	229
7.8.1. Medição em contínuo.....	229
7.8.2. Liga/Desliga	232
7.9. SENSORES CAPACITIVOS	232
7.9.1. Princípio de funcionamento.....	232
7.9.2. Líquidos isolantes	233

7.9.3. Líquidos condutores	233
7.10. SENSORES DE ULTRA-SONS	234
7.11. SENSORES RADIOACTIVOS	236
7.12. SENSORES POR RADAR	237
7.12.1. Introdução. História.....	237
7.12.2. Radar CW-FM.....	237
7.12.3. Radar por impulsos	238
7.12.4. Vantagens e inconvenientes da medição por radar.....	240
7.13. OUTROS SENSORES DE NÍVEL	240
7.13.1. Detector gravimétrico	240
7.13.2. Sensor por medição do binário	240
7.13.3. Lâmina vibrante	240
7.14. PROBLEMAS RESOLVIDOS	241
7.15. PROBLEMAS PROPOSTOS	243
8. TEMPERATURA	247
8.1. INTRODUÇÃO	247
8.2. TEMPERATURA, TERMÓMETROS, UNIDADES	248
8.2.1 Conceito de temperatura. Termómetro.	248
8.2.2 A Escala Internacional de Temperaturas.....	249
8.2.3 Unidades.	251
8.3. TERMÓMETROS DE LÍQUIDO, DE PRESSÃO E BIMETÁLICOS	252
8.3.1 Dilatação linear e volumétrica.....	252
8.3.2 Termómetro de líquido.....	253
8.3.3 Termómetro de pressão de gás.....	253
8.3.4 Termómetro de tensão de vapor.....	254
8.3.5 Termómetro bimetalico	254
8.4. TERMO-RESISTÊNCIAS.....	255
8.4.1 Princípio, Materiais, Características.....	255
8.4.2 Sensibilidade.	258
8.4.3 Linearização.....	258
8.4.4 Considerações diversas.....	258
8.4.4.1. Auto-aquecimento	259
8.4.4.2. Sensibilidade à deformação	259
8.4.4.3. Comprimento das ligações.....	259
8.4.4.4. Estabilidade das leituras	260
8.4.4.5. Protecção mecânica e química.....	260
8.4.5 Circuitos de medida.	260
8.4.5.1. Ponte de Wheatstone.	260
8.4.5.2. Ponte de Wheatstone a três fios.....	261
8.4.5.3. Gerador de corrente e medida da tensão.....	261
8.5. TERMISTORES	262
8.5.1 Constituição e características.	262
8.5.2 Sensibilidade.	263
8.5.3 Aspectos práticos.	263
8.5.3.1. Obtenção da temperatura	263
8.5.3.2. Auto-aquecimento	264
8.5.3.3. Construção.....	264
8.5.3.4. Comprimento das ligações.....	265
8.5.4 Precisão e estabilidade	265
8.5.5 Linearização e circuitos condicionadores.....	265

8.6. TERMOPARES	266
8.6.1 <i>Constituição e princípio de funcionamento.</i>	266
8.6.1.1. Efeito de Seebeck ()	267
8.6.1.2. Efeito de Peltier ()	267
8.6.1.3. Efeito de Thompson	268
8.6.1.4. Funcionamento dos termopares	268
8.6.2 <i>Leis de comportamento dos termopares.</i>	269
8.6.2.1. Dois metais, duas junções	269
8.6.2.2. Independência da temperatura do percurso	269
8.6.2.3. Lei dos metais intermédios 1	269
8.6.2.4. Lei dos metais intermédios 2	269
8.6.2.5. Lei das temperaturas sucessivas	270
8.6.2.6. Lei dos metais sucessivos	270
8.6.2.7. Considerações sobre as leis anteriores	271
8.6.3 <i>Sensibilidade.</i>	272
8.6.4 <i>Aspectos diversos.</i>	273
8.6.4.1. Termopares “standard”	273
8.6.4.2. Estabilidade	274
8.6.4.3. Precisão	274
8.6.4.4. Gamas de medida	274
8.6.4.5. Temperatura da junção de referência	274
8.6.4.6. Bainha e diâmetro dos condutores	275
8.6.4.7. Cabos de ligação	276
8.7. TERMÓMETROS DE SEMICONDUTORES	277
8.7.1 <i>A junção P-N como sensor de temperatura.</i>	277
8.7.2 <i>O transistor de junção como sensor de temperatura</i>	278
8.7.3 <i>Sensores de temperatura em circuito integrado</i>	278
8.8. TERMÓMETROS DE QUARTZO	280
8.8.1 <i>Princípio de funcionamento.</i>	280
8.8.2 <i>Constituição.</i>	280
8.8.3 <i>Frequência de oscilação.</i>	281
8.8.4 <i>Sensibilidade.</i>	281
8.8.5 <i>Características.</i>	281
8.8.6 <i>Aplicações.</i>	281
8.9. TERMÓMETROS POR RADIAÇÃO E PIRÓMETROS	282
8.9.1 <i>Introdução.</i>	282
8.9.2 <i>Fundamentos de Radiação.</i>	282
8.9.3 <i>Pirômetros e termômetros por radiação.</i>	284
8.9.3.1. Pirômetros ópticos	285
8.9.3.2. Termômetros de infra-vermelhos	286
8.9.3.3. Detector de fótons	287
8.10. PROPAGAÇÃO DE CALOR, RESPOSTA DINÂMICA	288
8.10.1 <i>Condutância e resistência térmicas.</i>	288
8.10.2 <i>Auto-aquecimento.</i>	290
8.11. CALIBRAÇÃO	291
8.11.1 <i>Introdução.</i>	291
8.11.2 <i>Padrões primários.</i>	291
8.11.2.1. Células para pontos fixos	291
8.11.2.2. Estufas	292
8.11.2.3. Termômetros de precisão	293

8.11.3 Calibradores.....	294
8.12. ESPECIFICAÇÃO E SELECÇÃO.....	295
8.13. INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO	296
8.13.1 Local de instalação dos elementos primários.	296
8.13.2 Ligação do sensor ao processo.	296
8.13.2.1. Ligação roscada.....	297
8.13.2.2. Ligação por aperto.....	297
8.13.2.3. Ligação soldada.....	298
8.13.2.4. Ligação colada.....	299
8.13.2.5. Ligação flangeada.....	299
8.13.3 Local de instalação dos transmissores.....	299
8.13.3.1. Instalação à cabeça	299
8.13.3.2. Instalação em caixa de junção	300
8.13.3.3. Instalação centralizada.....	300
8.13.4 Cabos de ligação.....	300
8.13.5 Identificação do equipamento.	301
8.13.6 Diagramas e esquemas de ligações.....	301
8.13.7 Manutenção.....	301
8.14. PROBLEMAS RESOLVIDOS	301
8.15. PROBLEMAS PROPOSTOS	308
9. CAUDALÍMETROS	315
9.1. INTRODUÇÃO	315
9.2. FUNDAMENTOS DE HIDRODINÂMICA. CAUDAL	316
9.2.1 Nomenclatura.....	316
9.2.2 Equações fundamentais.....	317
9.2.2.1. Equação de Euler.....	317
9.2.2.2. Teorema de Bernoulli	318
9.2.2.3. Equação da continuidade.....	318
9.2.2.4. Potência de um escoamento.....	319
9.3. CLASSIFICAÇÃO DOS CAUDALÍMETROS	319
9.3.1 Classificação baseada no tipo de grandeza primária.	319
9.3.2 Classificação baseada no fenómeno físico interveniente	320
9.4. MEDIÇÃO DE CAUDAIS EM CANAIS ABERTOS	321
9.4.1 Descarregadores.....	321
9.4.1.1. Descarregador de secção rectangular, sem contracção da veia líquida.....	321
9.4.1.2. Descarregador de secção rectangular, com contracção da veia líquida.	322
9.4.1.3. Descarregador de secção trapezoidal (inclinação da parede 4:1):	322
9.4.1.4. Descarregador de secção triangular:.....	322
9.4.1.5. Características dos descarregadores	323
9.4.2 Canais	323
9.4.3 Comportas.....	324
9.5. CAUDALÍMETROS BASEADOS NA VARIAÇÃO DE PRESSÃO	324
9.5.1 Orifício calibrado.....	324
9.5.2 Bocal (“Flow Nozzle”)......	331
9.5.3 Venturi.....	332
9.5.4 Cotovelo (“Elbow”)......	333
9.5.5 Compensação de pressão e temperatura.....	334
9.6. CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO.	334
9.6.1 Princípio de funcionamento.	334
9.6.2 Detalhes construtivos.....	336

9.6.2.1. Corpo	336
9.6.2.2. Revestimento interior.....	336
9.6.2.3. Eléctrodos	336
9.6.2.4. Alimentação das bobinas.	336
9.6.3 <i>Condições de funcionamento</i>	336
9.6.3.1. Temperatura de utilização.....	336
9.6.3.2. Pressão.....	337
9.6.3.3. Condutividade do fluido.....	337
9.6.3.4. Densidade do fluido	337
9.6.3.5. Viscosidade.....	337
9.6.3.6. Gama de medida	338
9.6.3.7. Precisão.....	338
9.6.3.8. Perda de carga.....	338
9.6.3.9. Sentido do fluido.....	338
9.6.4 <i>Escolha de secção do caudalímetro</i>	338
9.6.5 <i>Instalação</i>	341
9.6.6 <i>Transmissor</i>	342
9.6.6.1. Descrição	342
9.6.6.2. Parametrização	343
9.7. CAUDALÍMETROS POR FORÇA DE ARRASTAMENTO.....	344
9.7.1 <i>Princípio de funcionamento</i>	344
9.7.2 <i>Rotâmetro</i>	344
9.7.3 <i>Caudalímetro de alvo (“target”)</i>	346
9.8. CAUDALÍMETROS DE VÓRTICE OU TURBILHÃO.....	346
9.9. CAUDALÍMETRO MÁSSICO DE CORIOLIS.....	348
9.10. PROBLEMAS RESOLVIDOS.....	351
9.11. PROBLEMAS PROPOSTOS.....	356
10. SENSORES DE VISCOSIDADE.....	359
10.1. INTRODUÇÃO.....	359
10.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	359
10.2.1. <i>Conceito de viscosidade. Lei de Newton</i>	359
10.2.2. <i>Outras grandezas</i>	361
10.2.3. <i>Unidades</i>	361
10.2.4. <i>Reogramas. Características reológicas</i>	362
10.2.5. <i>Influência da temperatura e pressão</i>	363
10.2.6. <i>Variação com o tempo</i>	363
10.2.7. <i>Medição da viscosidade</i>	364
10.3. MÉTODOS LABORATORIAIS DE MEDIDA	364
10.3.1. <i>Método do tubo capilar</i>	364
10.3.2. <i>Método esfera em queda</i>	365
10.3.3. <i>Viscosímetro de extrusão</i>	366
10.3.4. <i>Viscosímetros rotacionais</i>	366
10.3.4.1. <i>Viscosímetro de cilindros concêntricos</i>	366
10.3.4.2. <i>Viscosímetro de cone</i>	367
10.3.4.3. <i>Viscosímetro de prato</i>	367
10.4. MÉTODOS INDUSTRIAIS DE MEDIDA	367
10.4.1. <i>Viscosímetro de pressão diferencial</i>	367
10.4.2. <i>Viscosímetro de vibração</i>	368
10.4.3. <i>Viscosímetros rotacionais</i>	369
10.5. PROBLEMAS	370

