

Medição de caudal em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas

Autoria:

José Duarte Henriques

João Carlos Pires da Palma

Álvaro Silva Ribeiro



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



INSTITUTO REGULADOR DE ÁGUAS E RESÍDUOS

MEDIÇÃO DE CAUDAL EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E DE SANEAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS URBANAS

José Duarte Henriques, João Carlos Pires da Palma
e Álvaro Silva Ribeiro

Versão preliminar

FICHA TÉCNICA

TÍTULO:

Medição de caudal em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas

AUTORIA:

José Duarte Henriques, João Carlos Pires da Palma e Álvaro Silva Ribeiro

ACOMPANHAMENTO:

João Almeida e Maria Helena Escudeiro, do Departamento de Estudos e Projectos do IRAR

AGRADECIMENTOS:

Agradece-se a colaboração das entidades gestoras das empresas Águas do Douro e Paiva, S.A. e SANEST – Saneamento da Costa do Estoril, S.A., bem como de outras entidades gestoras que, através dos seus comentários, permitiram melhorar o presente documento.

EDIÇÃO:

Instituto Regulador de Águas e Resíduos

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

DATA:

Dezembro de 2006

ISBN:

...

DEPÓSITO LEGAL:

...

PREFÁCIO DO IRAR

O IRAR, enquanto regulador das entidades gestoras concessionárias de serviços de águas e resíduos em Portugal, tem procurado obter sinergias através de parcerias com as instituições técnicas e científicas mais relevantes do sector. Nesse sentido, foi assinado um protocolo de cooperação técnica e científica formalizando a colaboração com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, no sentido de aproveitar as potencialidades de ambas as partes com vista a desenvolver métodos e instrumentos de apoio à regulação.

No âmbito desse protocolo, que engloba a realização de estudos, de guias técnicos e de acções de formação, foi previsto o apoio do LNEC ao IRAR na elaboração e na edição conjunta de um manual de medição de caudal em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas, para apoio à exploração das entidades prestadoras desses serviços.

Na verdade, uma boa gestão de sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas passa por um adequado conhecimento do seu efectivo funcionamento, nomeadamente no que respeita aos caudais e volumes de água em pontos críticos dos sistemas. Por outro lado, existindo em alguns casos um mercado de transacções entre entidades gestoras em alta e entidades gestoras em baixa, é indispensável que nos pontos de transacção o serviço seja devidamente quantificado, nomeadamente para efeitos de facturação. Essa informação é de grande utilidade para a operação dos sistemas, mas também para o seu planeamento, projecto e manutenção.

O IRAR, de acordo com o disposto na alínea l) do artigo 11.º do Decreto-Lei n.º 362/98, de 18 de Novembro, com as alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 151/2002, de 23 de Maio, tem responsabilidades na sensibilização das entidades gestoras e dos autarcas em geral para as questões da qualidade na concepção, execução, gestão e exploração dos sistemas multimunicipais e municipais. Por outro lado, o LNEC, no seu papel de Laboratório de Estado a quem cabe promover a melhoria de qualidade das actividades no domínio da engenharia, tem vindo a desenvolver ao longo das últimas décadas trabalhos relevantes de investigação e desenvolvimento na área em causa.

O resultado é a presente publicação, intitulada “Guia Técnico 9 – Medição de caudal em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas”, editada conjuntamente pelo IRAR e pelo LNEC, que constitui assim um excelente exemplo de colaboração e criação de sinergias entre entidades de perfil complementar.

Esta edição deve ser vista como mais uma contribuição do IRAR para uma melhor protecção dos interesses dos utilizadores, através da optimização da gestão dos operadores.

O Conselho Directivo
Jaime Melo Baptista (Presidente do Conselho Directivo do IRAR)
Dulce Álvaro Pássaro (Vogal do Conselho Directivo do IRAR)
João Simão Pires (Vogal do Conselho Directivo do IRAR)

PREFÁCIO DO LNEC

A existência de meios apropriados de medição de caudal e de volume de escoamentos em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas, sejam eles intermunicipais ou municipais, é indispensável à gestão e à exploração adequadas desses sistemas. Para além de imprescindíveis na quantificação dos consumos e das entregas de utilizadores e de eventuais transacções (de água ou águas residuais) com outros sistemas, os referidos meios de medição são relevantes na concretização de vários aspectos essenciais da gestão e exploração de um sistema nos dias de hoje, de que se destacam: o cumprimento de disposições legais e requisitos contratuais aplicáveis; a realização do balanço hídrico e o controlo operacional do sistema; a quantificação e o controlo de perdas de água ou a avaliação de infiltrações, fugas e ligações indevidas (consoante o tipo do sistema); a quantificação de diversos indicadores de desempenho da entidade gestora do sistema.

Durante várias décadas, praticamente desde a sua criação em Dezembro de 1948, o actual Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC tem propiciado a aquisição e o aperfeiçoamento de conhecimentos sobre caudalimetria em escoamentos sob pressão e em escoamentos com superfície livre, os quais têm sido utilizados na realização de numerosos trabalhos científicos e técnicos nesse domínio da Hidráulica Aplicada. Conjugando a aptidão daí decorrente com outras aptidões especializadas em Instrumentação, Electrotecnia e Metrologia disponíveis no Centro de Instrumentação Científica do LNEC, foi possível concretizar, ao abrigo do protocolo de cooperação técnica e científica celebrado entre o IRAR e o LNEC, a elaboração e a edição conjunta do presente Guia Técnico.

Trata-se de mais um resultado do referido protocolo de cooperação cuja concretização — decerto profícua não somente para os dois organismos cooperantes, mas sobretudo para as entidades gestoras dos sistemas em causa, que são os seus principais destinatários — muito nos apraz registar.

Este Guia Técnico n.º 9, cujo carácter essencialmente prático é reforçado pelas mais de 130 ilustrações que contém, expressamente concebidas e elaboradas com esse intento, pretende ser um documento de consulta e de resposta a aspectos essenciais que se colocam às entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água ou de saneamento de águas residuais urbanas na selecção, instalação e utilização adequadas de caudalímetros em escoamentos sob pressão e em escoamentos com superfície livre.

Estamos convictos de que esse objectivo será alcançado, o que significará mais um contributo importante para a melhoria dos níveis de qualidade dos serviços de águas e de águas residuais em Portugal.

Carlos Matias Ramos (Presidente do LNEC)

Rafaela de Saldanha Matos (Directora do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC)

ÍNDICES

	Texto	pág.
	PREFÁCIO DO IRAR	i
	PREFÁCIO DO LNEC	ii
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificação	1
1.2	Objectivos	2
1.3	Âmbito de aplicação	2
1.4	Estrutura	3
2	LOCALIZAÇÃO DE CAUDALÍMETROS NOS SISTEMAS	5
2.1	Introdução	5
2.2	Disposições legais	6
2.3	Requisitos contratuais respeitantes a sistemas multimunicipais	7
2.4	Requisitos inerentes à exploração e gestão dos sistemas	8
2.5	Localização típica de caudalímetros em sistemas de abastecimento de água	9
2.6	Localização típica de caudalímetros em sistemas de saneamento de águas residuais urbanas	11
2.7	Bibliografia	12
3	FUNDAMENTOS DE HIDRÁULICA RELEVANTES EM CAUDALIMETRIA	15
3.1	Introdução	15
3.2	Propriedades do líquido que interessam à caudalimetria	16
3.3	Elementos de Hidrostática	19
3.4	Escoamentos	21
3.4.1	Grandezas e conceitos básicos	21
3.4.2	Tipos e regimes dos escoamentos	24
3.4.3	Princípios básicos	29
3.4.4	Escoamentos sob pressão	33
3.4.5	Escoamentos com superfície livre	40
3.5	Simbologia	54
3.6	Bibliografia	56
4	MEDIÇÃO DE CAUDAL EM ESCOAMENTOS SOB PRESSÃO	59
4.1	Introdução	59
4.2	Caudalímetros mais usuais utilizáveis em escoamentos sob pressão	60
4.2.1	Caudalímetros electromagnéticos	60
4.2.2	Caudalímetros ultrassónicos	68
4.2.3	Caudalímetros deprimogéneos	79
4.3	Seleccção do tipo adequado de caudalímetro	83
4.3.1	Símbolos designativos dos diversos tipos de caudalímetros	83

4.3.2	Método expedito de selecção do tipo adequado de caudalímetro	83
4.4	Dimensionamento hidráulico	85
4.4.1	Parâmetros de dimensionamento	85
4.4.2	Regras de dimensionamento	87
4.5	Requisitos hidráulicos de instalação	95
4.5.1	Caudalímetros electromagnéticos	95
4.5.2	Caudalímetros ultrassónicos	99
4.5.3	Caudalímetros deprimogéneos	99
4.6	Manutenção	102
4.6.1	Verificações periódicas e acções correctivas	102
4.6.2	Calibrações	103
4.7	Simbologia	105
4.8	Bibliografia	108
Anexo 4.1	Processo iterativo utilizável no dimensionamento hidráulico do primário de um caudalímetro deprimogéneo	110
Anexo 4.2	Transições concêntricas ASME B16.9 utilizáveis na ligação da conduta principal à conduta de instalação do primário de um caudalímetro	111
5	MEDIÇÃO DE CAUDAL EM ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE	113
5.1	Introdução	113
5.2	Caudalímetros com descarregador de soleira delgada	115
5.2.1	Aplicabilidade, constituição e aspectos genéricos de instalação e funcionamento	115
5.2.2	Descarregador rectangular	117
5.2.3	Descarregador Bazin	120
5.2.4	Descarregador triangular	121
5.2.5	Medição do nível da superfície livre do escoamento	123
5.2.6	Incerteza de medição do caudal	125
5.3	Caudalímetros com caleira	126
5.3.1	Aplicabilidade, constituição e aspectos genéricos de funcionamento	126
5.3.2	Caleira Venturi	127
5.3.3	Caleira Parshall	129
5.3.4	Medição do nível da superfície livre do escoamento	133
5.3.5	Incerteza de medição do caudal	133
5.4	Caudalímetros com multissensorização	134
5.4.1	Introdução	134
5.4.2	Transdução ultrassónica de velocidades de escoamento por efeito Doppler de onda contínua	134
5.4.3	Transdução ultrassónica de velocidades de escoamento por efeito Doppler de onda pulsada	146
5.4.4	Transdução de velocidades de escoamento por radar	153
5.4.5	Transdução de velocidades de escoamento por indução electromagnética	155

5.4.6	Transdução do nível da superfície livre do escoamento com vista à determinação do caudal	156
5.4.7	Exemplos de soluções com multissensorização para medição de caudal	164
5.5	Seleção do tipo adequado de caudalímetro	170
5.5.1	Símbolos designativos dos vários tipos de caudalímetros	170
5.5.2	Método expedito de selecção do tipo adequado de caudalímetro	170
5.5.3	Avaliação qualitativa de métodos de transdução em caudalímetros com multissensorização	171
5.6	Dimensionamento hidráulico	174
5.6.1	Parâmetros de dimensionamento	174
5.6.2	Regras de dimensionamento	175
5.7	Requisitos hidráulicos de instalação	178
5.7.1	Caudalímetros com descarregador de soleira delgada ..	178
5.7.2	Caudalímetros com caleira	179
5.7.3	Caudalímetros com multissensorização	180
5.8	Manutenção	182
5.8.1	Verificações e acções periódicas	182
5.8.2	Calibrações	183
5.9	Simbologia	184
5.10	Bibliografia	187
6	SISTEMAS ELÉCTRICOS DE INSTRUMENTAÇÃO, AUTOMAÇÃO E ENERGIA	191
6.1	Introdução	191
6.2	Cadeias de medição	192
6.2.1	Aspectos gerais, objectivos, preocupações	192
6.2.2	Principais órgãos e sinais nas cadeias de medição de caudal	194
6.2.3	Interfaces e sinais eléctricos	195
6.2.4	Perturbação dos sinais e sua mitigação	199
6.2.5	Soluções recomendáveis em sistemas de medição de caudal	206
6.2.6	Outros tipos de soluções praticadas em sistemas de medição de caudal	210
6.3	Aquisição de dados e automatismos locais	213
6.3.1	Necessidade e requisitos da função de aquisição	213
6.3.2	Necessidade e requisitos da função de automação	216
6.4	Transmissão de dados	219
6.4.1	Aspectos básicos de codificação de dados	219
6.4.2	Aspectos básicos de gestão do tráfego de informação ...	222
6.4.3	Sinais e suportes físicos de comunicação	224
6.4.4	Redes de campo e integração sistémica	227
6.5	Alimentação de energia	231
6.5.1	Requisitos essenciais	231
6.5.2	Estruturação das instalações	233

6.6	Regras de concepção, execução e exploração	234
6.6.1	Princípios gerais	234
6.6.2	Concepção de instalações e selecção de equipamentos	234
6.6.3	Adequação ambiental	235
6.6.4	Medidas para reforço da qualidade dos sinais	237
6.6.5	Exigências quanto a instaladores	239
6.6.6	Testes finais	239
6.6.7	Acompanhamento da execução e dos testes finais	240
6.6.8	Formação para a exploração e manutenção	241
6.7	Simbologia	242
6.8	Bibliografia	242
7	CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO	247
7.1	Introdução	247
7.2	A medição de grandezas físicas	248
7.2.1	A imperfeição da medição	248
7.2.2	Sobre as noções de erro e de incerteza	249
7.2.3	Aspectos da caracterização dos sistemas de medição ..	256
7.3	O Sistema Internacional de Unidades	260
7.3.1	Breve introdução histórica	260
7.3.2	Grandezas e unidades de base, suplementares e derivadas com interesse na medição de caudal	262
7.4	Estrutura do Vocabulário Internacional de Metrologia (ISO-VIM)	266
7.5	A caracterização metrológica de sistemas de medição	269
7.5.1	Introdução	269
7.5.2	Indicação, intervalo de indicação e amplitude	271
7.5.3	Resolução	271
7.5.4	Condições de referência e condições óptimas	272
7.5.5	Sensibilidade estática	273
7.5.6	Limiar de mobilidade	273
7.5.7	Estabilidade do sistema de medição	274
7.5.8	Folga da indicação	274
7.5.9	Deriva	274
7.5.10	Variação por efeito de uma grandeza de influência	275
7.5.11	Repetibilidade	275
7.5.12	Linearidade	276
7.5.13	Reprodutibilidade	276
7.6	Calibração e rastreabilidade	277
7.6.1	Introdução	277
7.6.2	Os conceitos de <i>precisão</i> e de <i>exactidão</i>	277
7.6.3	A calibração e a rastreabilidade	279
7.6.4	O conteúdo do certificado de calibração	282
7.6.5	A aplicação dos resultados da calibração	284
7.7	Avaliação de incertezas de medição	286
7.7.1	Metodologia	286
7.7.2	Incerteza de medição expandida	294

7.7.3	Tabela de cálculo de incertezas	296
7.8	Exemplo de aplicação	297
7.8.1	Introdução	297
7.8.2	As fontes de incerteza	297
7.9	Simbologia	307
7.10	Bibliografia	308
Anexo 7.1	Algumas regras, recomendações e orientações normativas aplicáveis em Metrologia	311
Anexo 7.2	Lei de Propagação de Incertezas	318
8	EXEMPLOS DESCRITIVOS DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE CAUDAL	321
8.1	Introdução	321
8.2	Exemplo de um sistema de medição de caudal de água em escoamento sob pressão	321
8.3	Exemplos de sistemas de medição de caudal de águas residuais em escoamento com superfície livre em conduta	326
8.3.1	Sistema de medição de caudal em colector de DN 400	326
8.3.2	Sistema de medição de caudal em colector de DN 1000	329
8.4	Simbologia	331
8.5	Bibliografia	331
9	TÓPICOS GERAIS PARA A ELABORAÇÃO DE CADERNOS DE ENCARGOS	333
9.1	Introdução	333
9.2	Comentários prévios	334
9.3	Requisitos referentes a caudalímetros para escoamentos sob pressão e sua instalação	334
9.4	Requisitos referentes a caudalímetros para escoamentos com superfície livre e sua instalação	337
9.4.1	Caudalímetros para escoamentos com superfície livre em canal	337
9.4.2	Caudalímetros para escoamentos com superfície livre em conduta	338
9.5	Requisitos referentes a sistemas eléctricos de energia, automação, aquisição e supervisão e sua instalação	340
9.5.1	Sistemas eléctricos de energia	340
9.5.2	Sistemas de automação, aquisição e supervisão	341
9.6	Requisitos referentes a aspectos de construção civil	342
9.7	Requisitos referentes a testes e colocação em serviço	343
9.8	Requisitos referentes à manutenção	343
9.9	Requisitos referentes a acções de formação de pessoal	344
9.10	Requisitos referentes a documentos a fornecer	345
9.11	Requisitos referentes à qualificação das entidades instaladoras e de manutenção e do seu pessoal	346
9.12	Bibliografia	346

Quadros

		pág.
Quadro 3.1	Viscosidades dinâmica e cinemática da água em função da temperatura	18
Quadro 3.2	Pressão de saturação do vapor de água em função da temperatura	19
Quadro 3.3	Valores típicos da rugosidade absoluta de materiais usuais de superfícies interiores de condutas	36
Quadro 3.4	Valores típicos dos coeficientes n de Manning, K_S de Strickler e C de Hazen-Williams referentes a materiais usuais de superfícies interiores de condutas	39
Quadro 3.5	Simbologia utilizada no Capítulo 3	54
Quadro 4.1	Caudalímetros electromagnéticos: valores típicos da incerteza de medição padrão (relativos ao valor medido) para velocidade média do escoamento $\geq 1 \text{ m s}^{-1}$	68
Quadro 4.2	Variação da velocidade do som na água com a temperatura	69
Quadro 4.3	Caudalímetros ultrassónicos: valores típicos da incerteza de medição padrão para velocidade média do escoamento $\geq 1 \text{ m s}^{-1}$	79
Quadro 4.4	Caudalímetros deprimogéneos: valores típicos do coeficiente de vazão de primários para $2 \times 10^5 \leq \text{Re} \leq 2 \times 10^6$	82
Quadro 4.5	Caudalímetros deprimogéneos: valores típicos da incerteza de medição padrão (relativos ao valor medido) para $2 \times 10^5 \leq \text{Re} \leq 2 \times 10^6$	83
Quadro 4.6	Símbolos designativos dos diversos tipos de caudalímetros para escoamentos sob pressão utilizados no método de selecção do tipo adequado de caudalímetro	84
Quadro 4.7	Informação básica para selecção preliminar do(s) tipo(s) adequado(s) de caudalímetro para escoamentos sob pressão	84
Quadro 4.8	Caudalímetros electromagnéticos tubulares: gama recomendável de valores da relação entre diâmetros interiores do primário e da conduta principal para o caudal médio de dimensionamento	88
Quadro 4.9	Caudalímetros electromagnéticos tubulares: correspondências recomendáveis entre velocidades médias do escoamento no primário e na conduta principal (para o caudal médio de dimensionamento) em função das relações entre os respectivos diâmetros interiores	89
Quadro 4.10	Caudalímetros electromagnéticos tubulares: correspondências entre diâmetros nominais do primário e da conduta principal em função das relações entre os respectivos diâmetros interiores	90
Quadro 4.11	Caudalímetros electromagnéticos de inserção: valores típicos do limite máximo da velocidade máxima admissível na conduta de instalação do primário (m s^{-1})	93

Quadro 4.12	Instalação de um diafragma: valores mínimos dos comprimentos rectos de conduta a montante e a jusante (expressos como múltiplos de D_h)	100
Quadro 4.13	Instalação de um bocal: valores mínimos dos comprimentos rectos de conduta a montante e a jusante (expressos como múltiplos de D_h)	100
Quadro 4.14	Instalação de um tubo Venturi: valores mínimos dos comprimentos rectos de conduta a montante (expressos como múltiplos de D_h)	101
Quadro 4.15	Valores indicativos do período de recalibração de caudalímetros tubulares utilizados para facturação	105
Quadro 4.16	Simbologia utilizada no Capítulo 4	105
Quadro 5.1	Descarregador rectangular: valores experimentais dos coeficientes a e a' da Equação (5.2) para diversos valores de b/B	118
Quadro 5.2	Caudalímetros com descarregador de soleira delgada: valores típicos da incerteza relativa associada ao valor do coeficiente de vazão do descarregador (no pressuposto de construção, instalação, operação e manutenção adequadas)	126
Quadro 5.3	Gama completa de caleiras Parshall: tamanho nominal e outras dimensões relevantes	131
Quadro 5.4	Caleiras Parshall: valores dos parâmetros e limites de aplicabilidade da equação de vazão	132
Quadro 5.5	Símbolos designativos dos vários tipos de caudalímetros para escoamentos com superfície livre utilizados no método de selecção do tipo adequado de caudalímetro	170
Quadro 5.6	Informação básica para selecção preliminar dos tipos adequados de caudalímetros para escoamentos com superfície livre	171
Quadro 5.7	Indicações qualitativas genéricas sobre aplicabilidade, desempenho e custo de alguns métodos de transdução de velocidade em escoamentos com superfície livre	172
Quadro 5.8	Indicações qualitativas genéricas sobre aplicabilidade, desempenho e custo de alguns métodos de transdução de nível em escoamentos com superfície livre	173
Quadro 5.9	Dimensionamento hidráulico de caleiras Venturi: valores de b/B em função do número de Froude no canal de alimentação para Q_{max}	177
Quadro 5.10	Simbologia utilizada no Capítulo 5	184
Quadro 6.1	Algumas gamas de sinal analógico com interesse prático	196
Quadro 6.2	Principais entradas (E) e saídas (S) na interface do controlador local	218
Quadro 6.3	Simbologia utilizada no Capítulo 6	242
Quadro 7.1	Estágios associados ao fluxo de informação	259

Quadro 7.2	Estágios suplementares de natureza funcional	260
Quadro 7.3	Algumas definições ISO-VIM (2004) de termos associados ao SI	263
Quadro 7.4	Grandezas e unidades de base do SI	263
Quadro 7.5	Grandezas suplementares e respectivas unidades SI	264
Quadro 7.6	Algumas grandezas derivadas e respectivas unidades SI	264
Quadro 7.7	Algumas distribuições de probabilidade, seus limites de variação e expressões da variância	290
Quadro 7.8	Graus de liberdade e respectivos factores de expansão de acordo com a distribuição t-Student	296
Quadro 7.9	Tabela de balanço de incertezas de medição	296
Quadro 7.10	Fontes de incerteza na medição de caudal usando um caudalímetro electromagnético	298
Quadro 7.11	Balanço de incertezas de medição referente ao primeiro caso	302
Quadro 7.12	Balanço de incertezas de medição referente ao segundo caso	304
Quadro 7.13	Simbologia utilizada no Capítulo 7	307
Quadro 7.1.1	Definições de múltiplos e submúltiplos admitidos no SI ..	315
Quadro 8.1	Primário do caudalímetro electromagnético do sistema de medição de caudal de água: valores da velocidade média do escoamento correspondentes aos caudais de dimensionamento e justificação da adequação do seu diâmetro nominal	322
Quadro 8.2	Simbologia utilizada no Capítulo 8	331

Figuras

		pág.
Figura 2.1	Localização típica de caudalímetros em sistemas de abastecimento de água	10
Figura 2.2	Localização típica de caudalímetros em sistemas de saneamento de águas residuais	12
Figura 3.1	Elementos de definição quantitativa da viscosidade do líquido	17
Figura 3.2	Elementos de definição da lei hidrostática de pressões	19
Figura 3.3	Conceitos de linha de corrente e de trajectória: a – linha de corrente (genérica) no instante t ; b – trajectória (genérica) no intervalo de tempo Δt	22
Figura 3.4	Tubo de corrente: a – perspectiva; b – secção longitudinal planificada	23
Figura 3.5	Exemplos de escoamentos permanentes: a – não-uniforme; b – uniforme	25
Figura 3.6	Perfis de velocidades típicos de um escoamento permanente completamente desenvolvido numa conduta cilíndrica: a – regime laminar; b – regime turbulento	29

Figura 3.7	Elementos de definição da equação de Bernoulli	30
Figura 3.8	Escoamento turbulento uniforme sob pressão: perda de carga contínua na conduta	34
Figura 3.9	Escoamento turbulento permanente em conduta: perda de carga localizada originada por um diafragma	40
Figura 3.10	Escoamento permanente com superfície livre: a – uniforme; b – variado (ou não-uniforme)	42
Figura 3.11	Escoamento uniforme com superfície livre: perda de carga contínua	43
Figura 3.12	Curva de vazão baseada na equação de Manning-Strickler: obtenção da altura do escoamento uniforme	45
Figura 3.13	Escoamento uniforme com superfície livre em conduta de secção circular: curva de vazão da conduta	46
Figura 3.14	Diagrama da energia específica $E = E(h)$	48
Figura 3.15	Diagrama da energia específica $h = h(E)$	49
Figura 3.16	Diagrama $h = h(Q)$ para energia específica constante	50
Figura 3.17	Perda de energia específica num ressalto	52
Figura 3.18	Ocorrência de condições críticas de escoamento na transição de declive fraco para declive forte	52
Figura 3.19	Planta esquemática de uma caleira Venturi	53
Figura 4.1	Constituição de um caudalímetro electromagnético: a – tubular; b – de inserção	62
Figura 4.2	Esquema do primário de um caudalímetro electromagnético tubular: a – perspectiva transparente; b – corte pelo plano dos eléctrodos	63
Figura 4.3	Esquemática do princípio de transdução de um caudalímetro electromagnético tubular	64
Figura 4.4	Diagramas típicos de grandezas envolvidas na transdução electromagnética de caudal	65
Figura 4.5	Esquemática do funcionamento do primário de um caudalímetro electromagnético de inserção	66
Figura 4.6	Constituição de um caudalímetro ultrassónico tubular de trajecto único e transmissão directa	70
Figura 4.7	Esquemática do princípio de transdução de um caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito, de trajecto único e transmissão directa	71
Figura 4.8	Esquemática do princípio de transdução de um caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito, de trajecto único e transmissão por reflexão	73
Figura 4.9	Primário de um caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito com dois pares de transdutores (i. e. de duplo trajecto acústico)	74
Figura 4.10	Par de transdutores ultrassónicos montados sobre a conduta de instalação (vista de cima) em modo de transmissão por reflexão	75

Figura 4.11	Caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito com transdutores sobre a conduta: a – transdutores; b – régua de montagem dos transdutores; c – condicionador de sinal	75
Figura 4.12	Esquematisação do princípio de transdução de um caudalímetro ultrassónico Doppler	77
Figura 4.13	Constituição de um caudalímetro deprimogéneo	80
Figura 4.14	Primários de caudalímetros deprimogéneos: a – diafragma; b – bocal; c – tubo Venturi	80
Figura 4.15	Ábaco de dimensionamento do primário tubular, ou da conduta de instalação do primário, de um caudalímetro ..	91
Figura 4.16	Posições mais usuais de instalação do primário de um caudalímetro electromagnético de inserção na secção de medição: a – par de eléctrodos centrado; b – par de eléctrodos em $D/8$	92
Figura 4.17	Exemplos de instalações adequadas e inadequadas do primário de um caudalímetro electromagnético tubular ...	95
Figura 4.18	Instalação do primário de um caudalímetro electromagnético tubular com utilização unidireccional: comprimentos rectos de conduta a montante e a jusante do primário e transições entre a conduta principal e a conduta de instalação	97
Figura 4.19	Instalação do primário de um caudalímetro electromagnético de inserção: comprimentos rectos de conduta	98
Figura 5.1	Secção recta da soleira dos descarregadores rectangular, Bazin e triangular	116
Figura 5.2	Descarregador rectangular	117
Figura 5.3	Descarregador rectangular: relação funcional de k_b com b/B	119
Figura 5.4	Descarregador Bazin	120
Figura 5.5	Descarregador triangular	121
Figura 5.6	Descarregador triangular com $\phi = 90^\circ$: variação de C com h/d para diversos valores de d/B	122
Figura 5.7	Descarregador triangular funcionando com contracção total: variação de C com ϕ (no intervalo $20^\circ \leq \phi \leq 100^\circ$) ...	123
Figura 5.8	Descarregador triangular funcionando com contracção total: variação de k_b com ϕ (no intervalo $20^\circ \leq \phi \leq 100^\circ$) ..	123
Figura 5.9	Medidor de nível ultrassónico montado sobre um poço de medição cilíndrico	124
Figura 5.10	Caleira Venturi com soleira	127
Figura 5.11	Caleira Parshall	130
Figura 5.12	Esquematisação do princípio básico do efeito Doppler acústico de onda contínua	135
Figura 5.13	Esquematisação do efeito Doppler acústico de onda contínua por reflexão	137
Figura 5.14	Espectro de frequências com a risca correspondente à onda reflectida no alvo em movimento	138

Figura 5.15	Medição de velocidades de vários corpos por efeito Doppler através da emissão de uma onda acústica contínua	138
Figura 5.16	Componente de velocidade na direcção do alinhamento fonte – alvo no caso de o deslocamento ter outra direcção	139
Figura 5.17	Padrão de escoamento com superfície livre numa conduta de secção circular	139
Figura 5.18	Emissor/receptor acústico colocado no fundo da conduta para medição de velocidades de partículas em suspensão no líquido em escoamento por efeito Doppler	140
Figura 5.19	Aspectos do processo de medição de velocidades de partículas em suspensão num escoamento líquido por efeito Doppler de onda contínua	141
Figura 5.20	Corte transversal de uma conduta de secção circular mostrando o afastamento do emissor/receptor relativamente à geratriz inferior da conduta por forma a evitar que fique rapidamente coberto por sedimentos	143
Figura 5.21	Enviesamento do espectro de frequências de ondas reflectidas	144
Figura 5.22	Caso de um escoamento com inversão de sentido das velocidades longitudinais: perfil de componentes longitudinais de velocidade e espectro de frequências das ondas reflectidas	145
Figura 5.23	Deformação do espectro de frequências de ondas reflectidas ocasionada por uma filtragem destinada à rejeição da frequência da onda emitida (f_s)	145
Figura 5.24	Descrição do efeito Doppler de onda pulsada, mostrando o pulso de onda com frequência f_s que é emitido e vai gerando pulsos reflectidos à sua passagem pelos corpos móveis que encontra no seu trajecto	146
Figura 5.25	Diagrama relacionando os tempos de chegada dos pulsos reflectidos e as distâncias a que se encontram do emissor/receptor	147
Figura 5.26	Decomposição em intervalos temporais das ondas reflectidas por um pulso de onda nas partículas em suspensão: a análise de frequências em cada janela temporal permite obter velocidades das partículas na porção correspondente (célula) do feixe emitido	149
Figura 5.27	Distribuição das velocidades médias calculadas nas diferentes células ao longo do feixe	149
Figura 5.28	Orientação de feixes múltiplos (um par e, eventualmente, dois pares) de um medidor ultrassónico de velocidades de escoamento por efeito Doppler de onda pulsada, por forma a cobrir zonas representativas do escoamento	152
Figura 5.29	Efeito Doppler com ondas electromagnéticas emitidas e recebidas numa antena situada num ponto A relativamente a um alvo em movimento a uma velocidade v	153

Figura 5.30	Medição de velocidades superficiais com radar por efeito Doppler	154
Figura 5.31	Transdução electromagnética de velocidades em condutas parcialmente cheias: localização de eléctrodos (e_1 e e_2) apropriada para altura de líquido variável	155
Figura 5.32	Duas formas possíveis de colocação de transdutores ultrassónicos de distância para medir nível de líquido: a – fora do líquido; b – dentro do líquido	157
Figura 5.33	Medição da pressão hidrostática para determinação do nível de líquido	158
Figura 5.34	Esquema de princípio de um transdutor de pressão diferencial com membrana	159
Figura 5.35	Exemplos de formas de colocação dos sensores de pressão no fundo de uma conduta de águas residuais: a – com a membrana em contacto com o líquido pela zona superior do bloco; b – idem através de orifícios na zona inferior do bloco	160
Figura 5.36	Utilização do efeito capacitivo para medir níveis: a – constituição básica de um condensador com armaduras planas paralelas; b – sua incorporação nas paredes de um canal ou reservatório; c, d, e – esquemas do condensador sem líquido e com líquido a vários níveis	162
Figura 5.37	Aspecto construtivo de um sistema de armaduras com geometria compensada para proporcionar variação linear de capacidade com o nível de líquido numa conduta de secção circular	163
Figura 5.38	Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – Doppler ultrassónico por onda pulsada, duplo; nível – ultrassónico por tempo de trânsito, simples	164
Figura 5.39	Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – Doppler ultrassónico por onda pulsada, quádruplo; nível – ultrassónico por tempo de trânsito, simples	165
Figura 5.40	Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – Doppler ultrassónico por onda contínua, simples; nível – ultrassónico por tempo de trânsito, quádruplo, e pressão hidrostática, simples	165
Figura 5.41	Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – Doppler ultrassónico por onda contínua, duplo; nível – ultrassónico por tempo de trânsito, simples, e pressão hidrostática, simples	165
Figura 5.42	Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – Doppler de radar (velocidade superficial), simples; nível – ultrassónico por tempo de trânsito, simples; velocidade – electromagnético pontual (para situações de enchimento total da conduta)	166

Figura 5.43	Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – indução electromagnética, simples; nível – capacitivo, simples	166
Figura 5.44	Duas modalidades de equipamento de condicionamento de sinal e processamento de dados de caudalimetria num sistema de drenagem de águas residuais: a – para instalação em caseta exterior ao ambiente dos colectores; b – para instalação dentro do ambiente dos colectores	168
Figura 5.45	Caudalímetro com multissensorização: exemplo de fixação dos blocos de sensores e dos respectivos cabos no interior de uma conduta por meio de uma cinta ajustável (vista no sentido de jusante)	169
Figura 5.46	Caudalímetro com multissensorização: exemplo de fixação do único bloco de sensores e do respectivo cabo directamente na parede interior de uma conduta por meio de uma chapa de montagem (vista no sentido de jusante)	169
Figura 6.1	Encadeamento das principais etapas do processo de medição a considerar em caudalimetria por meios eléctricos, com alusão à ocorrência de efeitos que prejudicam a qualidade das medições	193
Figura 6.2	Cadeia de medição típica de caudalimetria evidenciando os principais tipos de órgãos e de sinais e assinalando a incidência de efeitos perturbadores sobre as diferentes partes	194
Figura 6.3	Exemplos de interfaces analógicas e de circuitos de ligação entre equipamentos	198
Figura 6.4	Exemplos de interfaces binárias e de circuitos de ligação entre equipamentos	199
Figura 6.5	Mecanismo de acoplamento indutivo entre circuitos: um circuito perturbador percorrido por uma corrente eléctrica i e um circuito de sinal (susceptível)	201
Figura 6.6	Perturbações sobre um circuito de sinal originadas por uma descarga atmosférica: fluxos ligados e f.e.m. ^{es} em modo diferencial e em modo comum	202
Figura 6.7	Perturbações sobre um circuito de sinal originadas por uma descarga atmosférica através de efeito de acoplamento resistivo	203
Figura 6.8	Fenómeno de acoplamento capacitivo: U_p simboliza o potencial de um condutor perturbador; U_a e U_b representam potenciais criados nos condutores do circuito de sinal pela divisão capacitiva $C_1 - C_0$ e $C_2 - C_0$, respectivamente ..	204
Figura 6.9	Arrasamento de uma onda de choque de sobretensão numa sequência de três níveis de supressores	206

Figura 6.10	Ilustração do conjunto de interfaces típicas num condicionador de sinal de um caudalímetro para escoamentos sob pressão	208
Figura 6.11	Estrutura recomendável para uma cadeia de medição em caudalimetria: os órgãos primários e o condicionador de sinal devem ficar tão próximos quanto possível ou residir na mesma unidade	208
Figura 6.12	Exemplo esquemático de uma cadeia de medição de caudal incorporando os princípios recomendados atrás e com a função de aquisição de dados a cargo de um autómato programável	210
Figura 6.13	Exemplos esquemáticos de algumas modalidades de cadeias de medição, veiculando a informação de caudal em sinal analógico e a informação de volume em sinal pulsatório	211
Figura 6.14	Exemplo esquemático de uma cadeia de medição de caudal com medidor mecânico e com a função de aquisição de dados a cargo de um <i>data logger</i>	212
Figura 6.15	Exemplos esquemáticos de cadeias de medição de caudal: a – com medidor de muito baixo consumo energético efectuando a comunicação directamente a partir do medidor; b – idem com aquisição local de dados	213
Figura 6.16	Ilustração de um processo de codificação e descodificação de mensagens na transmissão de dados	221
Figura 6.17	Exemplo esquemático de dois suportes físicos de comunicação em redundância	227
Figura 6.18	Modelo da arquitectura de sistemas integrados aplicável ao caso dos sistemas de abastecimento de água ou de drenagem de águas residuais: os subsistemas podem ser constituídos por simples equipamentos ou por sistemas mais ou menos complexos	228
Figura 6.19	Equipotencialização de massas metálicas por um circuito de terra de sinal confinado a uma parte da instalação servida a 24 Vdc	238
Figura 7.1	Valores de caudal observados num ensaio experimental	251
Figura 7.2	Histograma representando um ensaio envolvendo a medição de caudal	252
Figura 7.3	Curva de probabilidade associada a um ensaio envolvendo a medição de caudal	252
Figura 7.4	Representação dos resultados de medição usando os sistemas A e B	254
Figura 7.5	Representação de um intervalo de confiança de 95%	255
Figura 7.6	Classificação de sinais determinísticos	257
Figura 7.7	Classificação de sinais aleatórios	258
Figura 7.8	Diagrama representativo de um sistema de medição (com controlo)	258

Figura 7.9	Medição da temperatura com um termómetro de dilatação de líquido-em-vidro cuja resolução é superior à divisão de marcação	272
Figura 7.10	Pesagem inicial	274
Figura 7.11	Pesagem final	274
Figura 7.12	Exemplo de precisão com exactidão desconhecida	278
Figura 7.13	Exemplo de precisão com exactidão conhecida	278
Figura 7.14	Diagrama ilustrativo da diferenciação dos conceitos de precisão e de exactidão	279
Figura 7.15	Representação do erro sistemático determinado numa calibração	280
Figura 7.16	Representação típica da sequência numa cadeia de rastreabilidade	281
Figura 7.17	Determinação de uma equação linear de correcção	285
Figura 7.18	Representação de componentes de incerteza num sistema de medição de caudal usando um caudalímetro electromagnético	300
Figura 8.1	Esquema da instalação do caudalímetro electromagnético tubular componente do sistema de medição de caudal de água	322
Figura 8.2	Caudalímetro electromagnético na saída da Estação Elevatória de Seixo Alvo (sistema de abastecimento “em alta” da empresa Águas do Douro e Paiva, S.A.): junta de desmontagem ligada à extremidade de jusante da conduta de instalação do primário (localização correcta)	324
Figura 8.3	Caudalímetro electromagnético de um sistema de abastecimento de água: junta de desmontagem imediatamente a jusante do primário (localização incorrecta)	324
Figura 8.4	Esquema geral da cadeia de medição de caudal de água	325
Figura 8.5	Descrição esquemática da combinação de sensores no sistema de medição 1	327
Figura 8.6	Disposição de montagem dos equipamentos para medição de caudal no sistema de medição 1	328
Figura 8.7	Descrição esquemática da combinação de sensores no sistema de medição 2	329
Figura 8.8	Disposição de montagem dos equipamentos para medição de caudal no sistema de medição 2	330

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificação

Num sistema de abastecimento de água ou de saneamento de águas residuais urbanas, a correcta medição de caudal é questão de grande relevância. Com efeito, dela depende o cabal cumprimento de objectivos de gestão e exploração do sistema em causa orientados não apenas para um elevado nível de qualidade do serviço prestado aos utilizadores, mas também para uma boa situação financeira da empresa concessionária do sistema.

Os **sistemas de medição de caudal** tratados neste Guia Técnico fazem geralmente parte de sistemas de abastecimento de água ou de sistemas de saneamento de águas residuais urbanas. Cada um deles inclui um **caudalímetro** (ou **medidor de caudal**, como também é designado), demais órgãos da cadeia de medição e outros equipamentos e recursos complementares.

Para além de medir caudal instantâneo, um caudalímetro de qualquer dos tipos considerados no presente documento pode, regra geral, fazer a integração temporal dos valores medidos dessa grandeza — isto é, pode também medir o volume de líquido escoado, função que é vulgarmente designada por **contagem**. O mesmo não sucede com um contador mecânico, que mede apenas o volume do líquido que nele se escoou, não podendo ser utilizado para medição do caudal instantâneo. Assim, visto serem medidores de volume, e não de caudal, os contadores não são incluídos neste Guia Técnico.

A abordagem pormenorizada dos referidos sistemas de medição de caudal — mesmo que efectuada com carácter essencialmente prático, como acontece no presente caso — requer conhecimentos em várias disciplinas, designadamente Hidráulica, Instrumentação, Electrotecnia e Metrologia. A escolha da equipa de autores teve o propósito de cobrir todas essas valências.

Dispor de recursos adequados de medição de caudal é indispensável à exploração e ao controlo operacional de um sistema de abastecimento de água ou de um sistema de saneamento de águas residuais urbanas. Por outro lado, a disponibilidade desses recursos é essencial para pôr em prática metodologias de avaliação de perdas de água e de consumos não medidos nas redes de distribuição de água, ou para concretizar estratégias para quantificação de infiltrações e detecção de defeitos e ligações indevidas em sistemas de águas residuais. Acresce ainda que tais recursos são imprescindíveis

díveis à quantificação de diversos indicadores de desempenho de entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água ou de sistemas de águas residuais sujeitas a regulação pelo IRAR.

1.2 Objectivos

O presente Guia Técnico tem os seguintes objectivos principais:

- identificar genericamente a localização típica de caudalímetros em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas;
- estudar os princípios físicos de transdução adoptados sobretudo nas soluções modernas e expeditas de medição contínua de caudal nos referidos sistemas;
- identificar as potencialidades e limitações das soluções técnicas mais relevantes;
- definir os requisitos especiais de energia eléctrica, de instrumentação, de automação e de comunicações para sistemas de medição de caudal, com enfoque na perspectiva do seu enquadramento nas infra-estruturas de telegestão;
- caracterizar metrologicamente as diversas soluções, abrangendo todos os elementos das cadeias de medição, e sensibilizar para a sua importância;
- estabelecer critérios de dimensionamento e selecção, bem como de boas práticas de projecto, execução, instalação, colocação em serviço e manutenção (incluindo a metrológica);
- contribuir para a elaboração de cadernos de encargos.

Procurando corresponder aos propósitos gerais da entidade patrocinadora deste trabalho, foi dada preferência à inclusão de conteúdos bastante informativos, restringindo, tanto quanto possível, o aprofundamento teórico dos mesmos, com vista a alcançar um universo alvo de utilizadores mais alargado.

1.3 Âmbito de aplicação

Os sistemas de medição de caudal aqui abrangidos dizem respeito a escoamentos sob pressão e a escoamentos com superfície livre. Trata-se de subsistemas normalmente integrados em sistemas de abastecimento de água ou em sistemas de saneamento de águas residuais urbanas.

Apesar da identidade própria dos sistemas de caudalimetria, a sua concepção e concretização têm de ser vistas em articulação com outras matérias, nomeadamente o projecto e a exploração de redes, a telegestão, outra instrumentação existente, e os recursos humanos afectos à operação e à manutenção.

Uma parte significativa dos sistemas de medição de caudal beneficia continuamente de inovações tecnológicas, especialmente na vertente instrumental, de aquisição e comunicação de dados. É previsível que alguns tipos de soluções aqui apresentados dêem lugar a melhores opções num futuro próximo, pelo que deve ser dada atenção permanente à evolução nestes domínios, assim como às garantias dos fabricantes e instaladores destes equipamentos.

Como estes recursos são instalados em sistemas de abastecimento de água e em sistemas de águas residuais cujo horizonte temporal de utilização é normalmente bastante alargado, é primordial que o seu projecto e concretização se subordinem a critérios técnicos estritos que permitam encarar a evolução dos próprios métodos de exploração.

1.4 Estrutura

Este Guia Técnico está organizado em nove capítulos, dois dos quais contêm anexos. A exposição dos assuntos procura corresponder a uma sequência lógica respeitante à caudalimetria, iniciando-se com a referência genérica à localização dos caudalímetros nos sistemas em questão, passando depois por noções de Hidráulica, pelas soluções físicas de transdução, pelos equipamentos, sistemas e sinais, e terminando na caracterização metro-lógica. Inclui a alusão a diversas soluções técnicas com importância no contexto das aplicações práticas, evidenciando aquelas que se consideram recomendáveis à luz dos conhecimentos actuais.

O presente capítulo faz a introdução geral, com aspectos de motivação, enquadramento e organização do texto.

No segundo capítulo são identificados os locais onde tipicamente devem ser instalados caudalímetros em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas.

O terceiro capítulo apresenta, de forma sucinta, os fundamentos de Hidráulica que se consideram indispensáveis para o âmbito da caudalimetria aqui em causa.

O quarto capítulo trata dos caudalímetros mais usuais utilizáveis em escoamentos sob pressão: electromagnéticos, ultrassónicos e

deprimogéneos. Princípios de transdução, características, métodos de selecção, regras de dimensionamento hidráulico, requisitos hidráulicos de instalação e aspectos relevantes de manutenção desses caudalímetros são nele apresentados de modo essencialmente prático.

No quinto capítulo é abordada a caudalimetria em escoamentos com superfície livre. Depois da apresentação de questões respeitantes aos caudalímetros mais adequados a escoamentos em canal (caudalímetros com descarregador de soleira delgada e caudalímetros com caleira), incluindo o seu dimensionamento e regras para a sua instalação e operação, são tratados os caudalímetros apropriados a escoamentos em conduta, começando pela problemática da transdução e tratando em seguida das soluções técnicas de multissensorização de que dispõem e das regras para a sua correcta implantação.

No sexto capítulo são abordados os sistemas de medição de caudal do ponto de vista dos sinais, da instrumentação e dos recursos de energia eléctrica, de automação e de comunicação na perspectiva da sua integração sistémica na telegestão.

O sétimo capítulo apresenta conceitos e fundamentos gerais de Metrologia e aplica-os aos sistemas de caudalimetria aqui estudados, nomeadamente no que concerne à avaliação de incertezas de medição e a aspectos de calibração.

No oitavo capítulo são descritos sistemas que traduzem soluções globalmente recomendáveis nas diversas vertentes técnicas em presença: hidráulicas, electrotécnicas e metrológicas.

No nono e último capítulo foram reunidos alguns requisitos técnicos a ter em conta na elaboração de cadernos de encargos para a concepção e a construção dos sistemas de caudalimetria no âmbito do presente Guia Técnico.

No quarto e no sétimo capítulos, assuntos que constituem informação complementar ao respectivo conteúdo principal foram remetidos para anexos (dois em cada um deles).

Ao longo do texto, são feitas referências a documentos normativos e regulamentares e, em cada capítulo (excepto no presente e no oitavo), é listada bibliografia seleccionada, que poderá ser utilizada para clarificação e/ou aprofundamento de assuntos.

2 LOCALIZAÇÃO DE CAUDALÍMETROS NOS SISTEMAS

2.1 Introdução

Num sistema de abastecimento de água ou de saneamento de águas residuais urbanas, a localização apropriada dos seus caudalímetros — devendo muitos deles, ou mesmo a totalidade, dispor da função de contagem referida na secção 1.1 — é uma questão de grande relevância, pois dela depende não apenas a adequada satisfação de disposições legais e requisitos contratuais aplicáveis, mas também o cabal cumprimento de objectivos de exploração e gestão definidos para o sistema em causa.

Qualquer sistema concreto constitui um caso particular, que como tal deve ser concebido e projectado no que se refere à conveniente localização dos seus caudalímetros. O presente capítulo limita-se, por conseguinte, à abordagem genérica dessa localização em cada um dos dois tipos de sistemas em questão.

Na secção 2.2 constam as disposições legais que, à data da conclusão deste Guia Técnico, eram determinantes de alguns locais dos sistemas onde deve ser efectuada a medição de caudal e/ou de volume, enquanto na secção 2.3 são mencionados os requisitos contratuais respeitantes aos sistemas multimunicipais — previstos nos diplomas legais que consagram os regimes jurídicos da concessão da exploração e gestão de tais sistemas — que, explícita ou implicitamente, identificam locais desses sistemas onde a referida medição deve ser realizada.

Na secção 2.4 são apontados alguns requisitos inerentes à exploração e gestão dos sistemas que também condicionam a adequada localização dos caudalímetros.

Nas secções 2.5 e 2.6 são indicadas as localizações típicas de caudalímetros em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas, respectivamente, as quais decorrem do cumprimento das disposições legais e dos demais requisitos aplicáveis antes referidos.

A secção 2.7, que encerra o capítulo, apresenta a lista das referências bibliográficas.

2.2 Disposições legais

No caso de um sistema de abastecimento de água, as disposições legais que, explícita ou implicitamente, determinam locais de medição de caudal e/ou volume são as seguintes:

- i) Artigo 51.º – “Instalação dos medidores” do Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (1995), adiante designado abreviadamente por Regulamento Geral (1995), de acordo com o qual os caudalímetros devem ser instalados:
 - em locais devidamente protegidos, acessíveis e que possibilitem leituras correctas;
 - nos ramais de introdução predial de todos os utilizadores finais¹;
 - na condução de saída de cada reservatório;
 - na condução de saída de cada estação elevatória (EE);
 - noutros locais criteriosamente escolhidos, que permitam melhorar o controlo operacional do sistema;
- ii) Artigo 22.º – “Conteúdo do título de captação” do Decreto-Lei n.º 46/94, de 22 de Fevereiro, que estabelece, na sua alínea g), a obrigatoriedade de instalação de um caudalímetro (com função de contagem) na captação;
- iii) Artigo 9.º – “Volume de água captada” do Decreto-Lei n.º 47/94, de 22 de Fevereiro, de cujo n.º 3 decorre a indispensabilidade de instalação de um caudalímetro (com função de contagem) na captação, caso a licença ou concessão de utilização do domínio hídrico de que o sistema seja titular estabeleça a obrigatoriedade de medição directa do volume de água captada.

Tratando-se de um sistema de saneamento de águas residuais urbanas, as seguintes disposições legais definem, de forma explícita ou implícita, locais de medição de caudal e/ou volume:

- iv) Artigo 186.º – “Localização” (de “medidores e registadores”) do Regulamento Geral (1995), que preconiza a instalação de caudalímetros:

¹ Para além de caudalímetros com função de contagem, o conjunto de medidores necessários para o efeito inclui contadores domésticos e outros.

- imediatamente a jusante de zonas ou instalações industriais;
 - em pontos estratégicos da rede de colectores²;
 - em cada EE;
 - na entrada da estação de tratamento de águas residuais (ETAR);
 - na descarga final no meio receptor;
- v) Artigo 39.º – “Conteúdo da licença” do Decreto-Lei n.º 46/94, de 22 de Fevereiro, cuja alínea d) refere que na licença de rejeição de águas residuais deve constar o “equipamento de controlo para efeitos de inspecção e fiscalização”, sendo presumível que nesse equipamento esteja incluído um caudalímetro (com função de contagem) que fica instalado na conduta de rejeição das águas residuais no domínio público hídrico;
- vi) Artigo 10.º – “Carga poluente rejeitada” do Decreto-Lei n.º 47/94, de 22 de Fevereiro, de cujo n.º 3 decorre a imprescindibilidade de instalação de um caudalímetro (com função de contagem) na conduta de rejeição das águas residuais no domínio público hídrico, se no acto de licenciamento tiver ficado estabelecida a obrigatoriedade de medição directa da carga poluente rejeitada.

2.3 Requisitos contratuais respeitantes a sistemas multimunicipais

Um sistema multimunicipal de abastecimento de água ou de saneamento de águas residuais urbanas é um «sistema em alta» por se situar, respectivamente, a montante de cada sistema municipal de distribuição de água ou a jusante de cada sistema municipal de colecta de águas residuais por ele servido, sendo usual designar qualquer destes por «sistema em baixa».

Dois diplomas legais aplicáveis a sistemas multimunicipais, que são mencionados em seguida, definem requisitos contratuais que determinam concretamente, ou podem prever, locais de instalação de caudalímetros nesses sistemas.

² Esses pontos não são definidos, nem são especificados os objectivos das medições de caudal que neles são realizadas; presume-se, no entanto, que estas se destinem a monitorizar adequadamente a rede de colectores.

No caso de um sistema multimunicipal de abastecimento de água:

- a Base XXXI – “Medição e facturação da água fornecida” constante no Anexo – “Bases do contrato de concessão da exploração e gestão dos sistemas multimunicipais de captação, tratamento e abastecimento de água para consumo público” do Decreto-Lei n.º 319/94, de 24 de Dezembro, requer que seja instalado um caudalímetro (com função de contagem) à entrada do reservatório de chegada a cada sistema em baixa utilizador do sistema multimunicipal;
- o contrato de fornecimento, previsto no Artigo 5.º desse mesmo diploma legal, que é celebrado entre a entidade gestora do sistema multimunicipal e cada município utilizador pode prever locais adicionais de medição de caudal e/ou volume.

Tratando-se de um sistema multimunicipal de saneamento de águas residuais:

- a Base XXIX – “Medição e facturação dos efluentes” constante no Anexo – “Bases do contrato de concessão da exploração e gestão dos sistemas multimunicipais de recolha, tratamento e rejeição de efluentes” do Decreto-Lei n.º 162/96, de 4 de Setembro, dispõe que “os efluentes serão medidos nas circunstâncias e pelos meios definidos no contrato de concessão”, sendo plausível, por conseguinte, a eventualidade de esse documento apontar locais de instalação de caudalímetros;
- locais de medição de caudal e/ou volume podem também ser definidos no contrato de fornecimento, previsto no Artigo 4.º do diploma legal referido na alínea anterior, que é celebrado entre a entidade gestora do sistema em alta e cada município utilizador deste.

2.4 Requisitos inerentes à exploração e gestão dos sistemas

A localização apropriada de caudalímetros nos sistemas de abastecimento de água e nos de saneamento de águas residuais urbanas é também condicionada por diversos requisitos associados à exploração e gestão desses sistemas.

Tais requisitos podem advir da necessidade de implementação de diversas acções, designadamente:

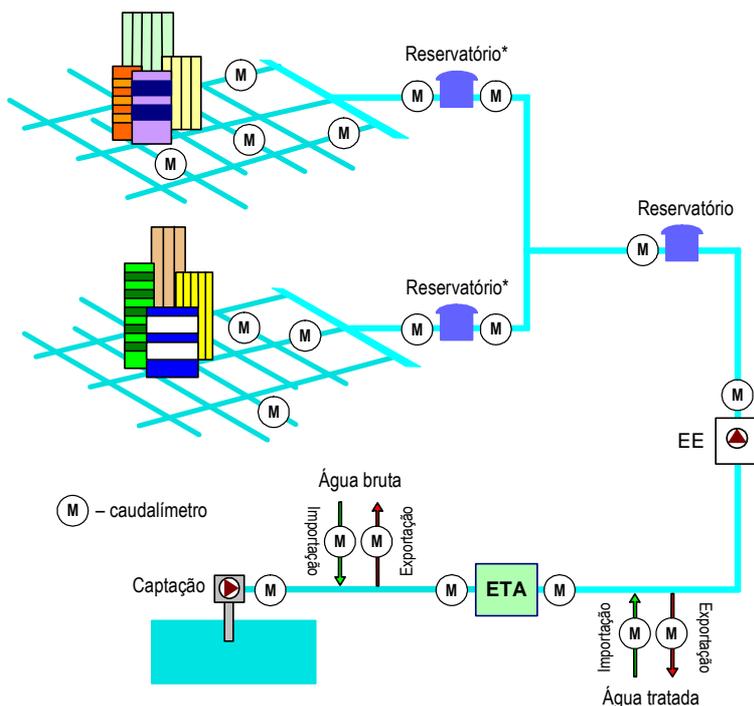
- i) Em sistemas de abastecimento de água:
- controlo operacional;
 - realização do balanço hídrico;
 - avaliação e controlo de perdas de água [Alegre *et al.* (2005)];
 - contabilização de transacções de água bruta ou de água tratada com outros sistemas de abastecimento;
 - quantificação de vários indicadores de desempenho das respectivas entidades gestoras [Alegre *et al.* (2004), LNEC e IRAR (2006)] sujeitas a regulação pelo IRAR;
- ii) Em sistemas de saneamento de águas residuais urbanas:
- controlo operacional;
 - realização do balanço hídrico;
 - quantificação de infiltrações e de fugas;
 - detecção de ligações indevidas;
 - contabilização de transacções de águas residuais brutas ou de águas residuais tratadas com outros sistemas;
 - quantificação de diversos indicadores de desempenho das entidades gestoras dos sistemas [Matos *et al.* (2004), LNEC e IRAR (2006)] que são reguladas pelo IRAR.

2.5 Localização típica de caudalímetros em sistemas de abastecimento de água

Para cumprimento das disposições legais mencionadas nas alíneas i) a iii) da secção 2.2 e dos requisitos aplicáveis referidos nas secções 2.3 e 2.4, os locais onde tipicamente devem ser instalados caudalímetros em sistemas de abastecimento de água são os seguintes, tal como se esquematiza na Figura 2.1:

- saída da captação;
- entrada(s) de água bruta importada;
- saída(s) de água bruta exportada;
- entrada da estação de tratamento de água (ETA);
- saída da ETA;

- entrada(s) de água tratada importada;
- saída(s) de água tratada exportada;
- saída de cada EE;
- saída de cada reservatório;
- todos os pontos de entrega de água a utilizadores;
- diversos pontos da(s) rede(s) de distribuição, criteriosamente seleccionados, que permitam melhorar o controlo operacional do sistema³.



* O caudalímetro instalado na entrada do reservatório só existe se este for o reservatório de chegada de um sistema em baixa utilizador de um sistema multimunicipal.

Figura 2.1 – Localização típica de caudalímetros em sistemas de abastecimento de água

³ Representados pelos vários símbolos de caudalímetro dispersos pelas duas redes de distribuição esquematizadas na Figura 2.1.

2.6 Localização típica de caudalímetros em sistemas de saneamento de águas residuais urbanas

Tratando-se de sistemas de saneamento de águas residuais urbanas, os locais típicos de instalação de caudalímetros que possibilitam o cumprimento das disposições legais referidas nas alíneas iv) a vi) da secção 2.2 e dos requisitos aplicáveis mencionados nas secções 2.3 e 2.4 são os que se encontram esquematicamente identificados na Figura 2.2, designadamente:

- imediatamente a jusante de zonas ou instalações industriais;
- pontos de entrega de sistemas em baixa a um sistema multimunicipal;
- entrada, imediatamente a montante do desvio (*by-pass*), e saída de cada EE;
- saída(s) de águas residuais brutas exportadas;
- entrada(s) de águas residuais brutas importadas;
- entrada da estação de tratamento de águas residuais (ETAR), imediatamente a montante do respectivo desvio;
- desvio à ETAR;
- saída da ETAR;
- saída(s) de águas residuais tratadas exportadas
- entrada(s) de águas residuais tratadas importadas;
- ponto de descarga final no meio receptor;
- saída(s) de descarregador(es) de tempestade (em sistema de drenagem unitário);
- pontos estratégicos da(s) rede(s) de colectores, que possibilitem a conveniente monitorização desta(s) (ver a nota de pé-de-página n.º 2).

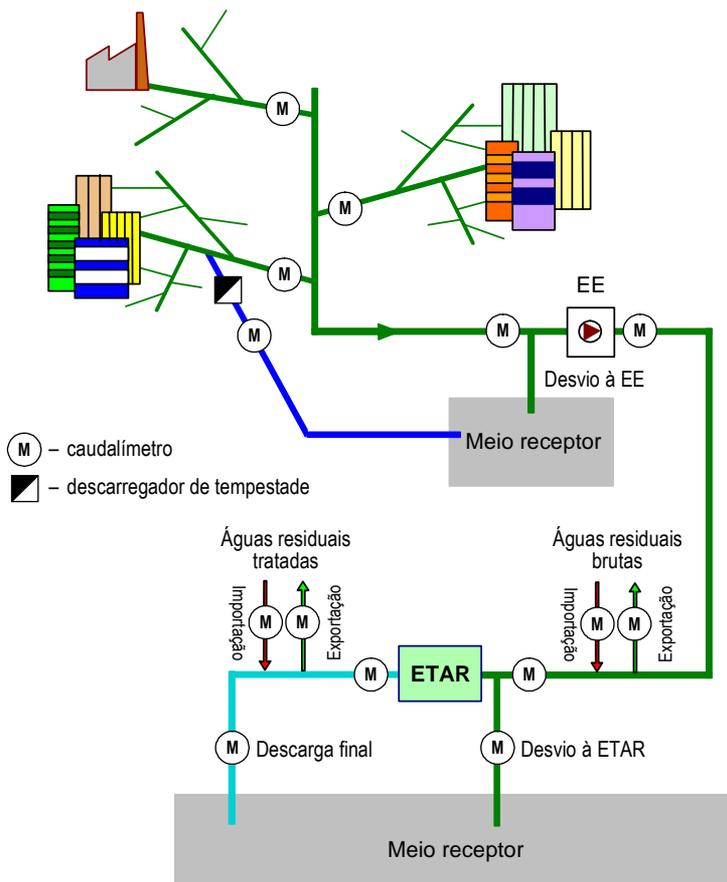


Figura 2.2 – Localização típica de caudalímetros em sistemas de saneamento de águas residuais

2.7 Bibliografia

Alegre, H.; Coelho, S. T.; Almeida, M. C.; Vieira, P. – *Controlo de Perdas em Sistemas Públicos de Adução e Distribuição de Águas*. Série “Guias Técnicos” do IRAR, n.º 3, Lisboa, Instituto Regulador de Águas e Resíduos, Instituto da Água e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2005.

Alegre, H.; Hirner, W.; Baptista, J. M.; Parena, R. – *Indicadores de Desempenho para Serviços de Abastecimento de Água*. Série “Guias Técnicos” do IRAR, n.º 1, Lisboa, Instituto Regulador de Águas e Resíduos e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004.

Decreto-Lei n.º 46/94, publicado no Diário da República n.º 44/94, Série I-A, de 1994-02-22, pág.^s 772 – 789.

Decreto-Lei n.º 47/94, publicado no Diário da República n.º 44/94, Série I-A, de 1994-02-22, pág.^s 789 – 795.

Decreto-Lei n.º 319/94, publicado no Diário da República n.º 296/94, Série I-A, de 1994-12-24, pág.^s 7350 – 7356.

Decreto-Lei n.º 162/96, publicado no Diário da República n.º 205/96, Série I-A, de 1996-09-04, pág.^s 2962 – 2970.

LNEC e IRAR – *Guia de Avaliação da Qualidade dos Serviços de Águas e Resíduos Prestados aos Utilizadores*. Lisboa, Instituto Regulador de Águas e Resíduos e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.

Matos, R.; Cardoso, A.; Ashley, R.; Duarte, P.; Molinari, A.; Schulz, A. – *Indicadores de Desempenho para Serviços de Águas Residuais*. Série “Guias Técnicos” do IRAR, n.º 2, Lisboa, Instituto Regulador de Águas e Resíduos e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004.

Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais, aprovado pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95, publicado no Diário da República n.º 194/95, Série I-A, de 1995-08-23, pág.^s 5284 – 5319.

3 FUNDAMENTOS DE HIDRÁULICA RELEVANTES EM CAUDALIMETRIA

3.1 Introdução

Com a finalidade de simplificar a exposição, água ou água residual urbana designa-se neste capítulo simplesmente por «líquido».

Este terceiro capítulo tem como principal objectivo apresentar, de forma bastante sucinta, os fundamentos de Hidráulica que se consideram estritamente relevantes para o âmbito da caudalimetria que o presente Guia Técnico contempla. Espera-se, por isso, que o seu conteúdo possa contribuir para apoiar, e eventualmente facilitar, a leitura dos capítulos 4 e 5.

Na secção 3.2 apresentam-se as propriedades do líquido que interessam à caudalimetria — massa volúmica, peso volúmico, viscosidade dinâmica e viscosidade cinemática.

Na secção 3.3:

- definem-se as grandezas importantes em Hidrostática (pressão, altura piezométrica e carga piezométrica);
- apresenta-se a lei hidrostática de pressões.

Na secção 3.4:

- definem-se as grandezas relevantes (velocidade pontual, caudal e velocidade média) e apresentam-se os conceitos básicos (linha de corrente, trajectória, campo de velocidades e perfil de velocidades) relacionados com o escoamento do líquido;
- referem-se e caracterizam-se os tipos de escoamento (variável e permanente) e os regimes de escoamento (laminar e turbulento);
- expõem-se os princípios básicos da Hidráulica (princípio da continuidade e teorema de Bernoulli), definem-se as grandezas importantes (altura cinética, altura total, perda de carga e perda de carga unitária) e referem-se os conceitos essenciais (linha piezométrica e linha de energia) que com eles se relacionam;

- apresentam-se os aspectos essenciais dos escoamentos sob pressão e dos escoamentos com superfície livre com interesse especial para a caudalimetria.

A secção 3.5 contém a simbologia utilizada neste capítulo e a secção 3.6, que o finaliza, inclui uma breve lista bibliográfica.

3.2 Propriedades do líquido que interessam à caudalimetria

Em termos práticos, supõe-se que o líquido é incompressível, ou seja, admite-se que a sua massa volúmica é constante a uma dada temperatura.

A **massa volúmica** ρ do líquido é a massa da sua unidade de volume:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

sendo m a massa do volume V do líquido; a sua unidade de medida SI é kg m^{-3} .

Como V é função da temperatura θ a que o líquido se encontra, ρ também dela depende. No caso da água, a massa volúmica pode ser calculada, no intervalo de temperatura $10^\circ\text{C} \leq \theta \leq 30^\circ\text{C}$, pela expressão

$$\rho = -0,005384 \theta^2 + 0,012194 \theta + 1000,2 \quad (3.2)$$

obtida a partir de valores tabelados na norma ISO 4185 (1980). Nas aplicações práticas de Hidráulica, no entanto, admite-se que a massa volúmica da água é independente da temperatura, sendo em geral adoptado o valor aproximado $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$.

Define-se **peso volúmico** γ do líquido como o peso da sua unidade de volume:

$$\gamma = \rho g \quad (3.3)$$

sendo g a aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$); a sua unidade de medida SI é N/m^3 . No caso da água, $9,81 \text{ kN m}^{-3}$ é o valor prático do seu peso volúmico; um valor mais exacto, correspondente a um dado valor de θ situado no intervalo de temperatura acima referido, pode ser calculado conjugando as equações (3.2) e (3.3).

Suponha-se o líquido em escoamento unidireccional. As suas partículas deslocam-se todas na mesma direcção, mas camadas dis-

tintas movimentam-se com diferentes velocidades, visto existir uma resistência ao deslizamento de cada camada sobre as adjacentes decorrente da viscosidade do líquido — a qual pode ser entendida como a resistência deste à deformação.

O movimento relativo entre camadas adjacentes é causado por forças tangenciais (também denominadas forças de corte ou de arrastamento) que actuam na respectiva interface. A Figura 3.1 esquematiza duas camadas paralelas muito próximas, separadas por uma distância infinitesimal δy , entre as quais existe um gradiente de velocidade expresso por $\frac{\delta \bar{u}}{\delta y}$ — ou no limite, quando $\delta y \rightarrow 0$, por $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$. A camada superior, que se supõe ser mais rápida,

tende a arrastar a inferior por acção da força tangencial \vec{F} , enquanto a mais lenta tende simultaneamente a retardar a camada superior por meio de uma força $-\vec{F}$, igual em módulo e directamente oposta àquela, de acordo com a lei de Newton da acção e reacção (3.ª lei da Dinâmica clássica).



Figura 3.1 – Elementos de definição quantitativa da viscosidade do líquido

Postulou também Newton que a tensão tangencial $\vec{\tau}$ — força tangencial por unidade de área — na interface das duas camadas é directamente proporcional ao gradiente de velocidade entre elas; considerando apenas os módulos $\tau = |\vec{\tau}|$ e $u = |\bar{u}|$ das duas grandezas vectoriais intervenientes, essa relação pode-se escrever

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.4)$$

sendo o coeficiente de proporcionalidade μ uma constante característica do líquido a determinada temperatura. Designa-se por **viscosidade dinâmica** (ou simplesmente **viscosidade**) do líquido; a respectiva unidade SI é Pa·s (pascal-segundo). À temperatura de 20°C, a viscosidade da água é praticamente igual a 1 mPa·s.

Visto ter, por hipótese, comportamento de acordo com a Equação (3.4), o líquido diz-se «newtoniano».

Define-se **viscosidade cinemática** ν do líquido como a relação entre as suas viscosidade e massa volúmica:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.5)$$

A sua unidade de medida SI é $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

No Quadro 3.1 apresentam-se os valores da viscosidade dinâmica e da viscosidade cinemática da água para temperaturas entre 10°C e 30°C .

Quadro 3.1 – Viscosidades dinâmica e cinemática da água em função da temperatura

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Viscosidade dinâmica (Pa·s)	Viscosidade cinemática ($10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
10	1,307	1,306
15	1,139	1,139
20	1,002	1,003
25	0,890	0,893
30	0,798	0,800

A pressão p num ponto do líquido é uma grandeza escalar cujo valor é igual ao módulo da força total aplicada por unidade de área centrada nesse ponto. A sua unidade de medida SI é Pa (pascal).

Define-se **pressão de saturação do vapor**⁴ p_v do líquido a uma dada temperatura como a pressão à qual o líquido entra em ebulição a essa temperatura. O Quadro 3.2 contém os valores da pressão de saturação do vapor de água para temperaturas entre 10°C e 30°C ⁵.

⁴ Também designada frequentemente por «tensão de saturação do vapor».

⁵ Como é do conhecimento geral, a temperatura de ebulição da água à pressão atmosférica normal (101,2 kPa) é 100°C ; por outras palavras: a essa temperatura, a pressão de saturação do vapor de água é $p_v = 101,2 \text{ kPa}$.

Quadro 3.2 – Pressão de saturação do vapor de água em função da temperatura

Temperatura (°C)	Pressão de saturação do vapor de água (kPa)
10	1,225
15	1,704
20	2,330
25	3,169
30	4,234

Se em qualquer ponto no interior do líquido a pressão baixar até atingir o valor p_v , ocorrerá aí vaporização do líquido com formação continuada de bolhas ou cavidades de vapor que tendem muito rapidamente a colapsar; trata-se do fenómeno conhecido por **cavitação**.

3.3 Elementos de Hidrostática

Como se esquematiza na Figura 3.2, considere-se o líquido em repouso com a superfície livre em contacto com a atmosfera. Num ponto genérico P do líquido, situado à profundidade h (distância à superfície livre), a **pressão** p é a soma da pressão atmosférica p_a , actuante sobre a superfície livre, e da pressão originada pelo peso da coluna do líquido situada acima do ponto:

$$p = p_a + \gamma h \quad (3.6)$$

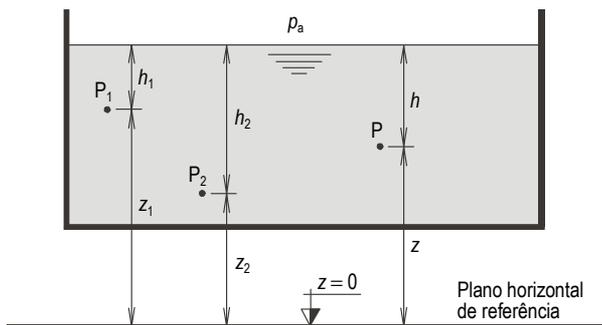


Figura 3.2 – Elementos de definição da lei hidrostática de pressões

Se, como é usual em Hidráulica, a pressão p for «relativa» (ou seja, referida à pressão atmosférica, que, como referência, é então considerada de valor nulo) e não «absoluta» (referida ao vácuo absoluto), convenção que doravante se adoptará, a Equação (3.6) transforma-se na expressão

$$p = \gamma h \quad (3.7)$$

da qual resulta a da altura de líquido correspondente à pressão relativa p (de ora em diante denominada apenas «pressão»):

$$h = \frac{p}{\gamma} \quad (3.8)$$

A prática corrente de associar a um valor de pressão o da altura de líquido correspondente (por exemplo: 100 kPa \leftrightarrow 10,2 m de coluna de água) decorre afinal desta relação.

A grandeza $\frac{p}{\gamma}$ designa-se por **altura piezométrica** no ponto P.

Considerem-se, no líquido em repouso, dois pontos P_1 e P_2 quaisquer, onde as pressões são p_1 e p_2 e cujas cotas em relação a um plano horizontal de referência são z_1 e z_2 , respectivamente (ver a Figura 3.2). Como de imediato se depreende da Equação (3.8), as alturas piezométricas nesses pontos diferem consoante as profundidades a que eles se situam (dependem, por conseguinte, das suas posições); no entanto, é válida a relação

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (3.9)$$

que se designa por **lei hidrostática de pressões**. Aplicada ao ponto genérico P do líquido, pode-se exprimir do seguinte modo:

$$\frac{p}{\gamma} + z = \text{constante} \quad (3.10)$$

sendo z a **cota geométrica** de P em relação ao plano horizontal tomado como referência.

A grandeza $\frac{p}{\gamma} + z$ denomina-se **cota piezométrica** (ou **carga piezométrica**) no ponto P relativamente ao plano de referência;

fisicamente, representa a energia potencial total⁶, referida a esse plano, por unidade de peso do líquido⁷.

A lei hidrostática de pressões pode-se então enunciar do seguinte modo: a cota piezométrica é constante em todos os pontos do líquido em repouso.

3.4 Escoamentos

3.4.1 Grandezas e conceitos básicos

Suponha-se o líquido em escoamento. A posição de uma sua partícula genérica é função do tempo: essa partícula encontra-se num ponto P num determinado instante t e num outro ponto, afastado daquele de $\delta\vec{s}$, no instante $t + \delta t$; a grandeza vectorial $\delta\vec{s}$ — caracterizada, por conseguinte, por uma direcção, um sentido e um módulo δs — é o deslocamento infinitesimal da partícula no intervalo de tempo, também infinitesimal, δt .

A **velocidade** \vec{u} (da partícula) no ponto P e no instante t define-se por

$$\vec{u} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta\vec{s}}{\delta t} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad (3.11)$$

Trata-se, pois, de uma grandeza vectorial que é, em geral, função do tempo. Assim, considerando a totalidade dos pontos do líquido em escoamento, é facilmente concebível a existência neste de um **campo de velocidades**, também ele função do tempo.

Nesse campo vectorial, qualquer linha imaginária que, num dado instante, seja caracterizada pela tangência do vector velocidade em cada um dos seus pontos designa-se por **linha de corrente**⁸ nesse instante. Tal como o campo de velocidades onde é definida, uma linha de corrente é, em geral, função do tempo, alterando-se, por conseguinte, de instante para instante.

Enquanto uma linha de corrente tem definição instantânea, a **trajectória** de uma partícula do líquido em escoamento — que é o

⁶ Energia potencial de pressão + energia potencial gravítica.

⁷ Dado que «peso» = mg , a massa do peso unitário («peso» = 1 N) é numericamente igual ao inverso da aceleração da gravidade ($1/g = 0,102$ kg).

⁸ Também denominada «linha de escoamento» ou «linha de fluxo»; todavia, deve-se evitar esta última denominação, visto «fluxo» ser uma grandeza que se define como «caudal por unidade de tempo».

lugar geométrico dos pontos por onde essa partícula vai passando no decurso do tempo — tem definição temporal; ambas se esquematizam na Figura 3.3.

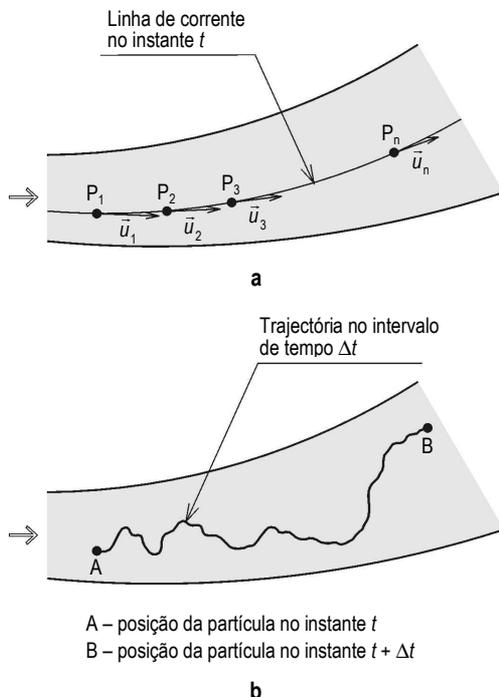


Figura 3.3 – Conceitos de linha de corrente e de trajectória: a – linha de corrente (genérica) no instante t ; b – trajectória (genérica) no intervalo de tempo Δt

Imagine-se, no interior do escoamento, um contorno fechado não coincidente com uma linha de corrente. Em cada um dos pontos desse contorno passa, num determinado instante, uma linha de corrente; como se ilustra na Figura 3.4, o feixe de todas as linhas de corrente que passam nesse instante pelo contorno delimita uma porção de espaço que se designa por **tubo de corrente**⁹.

⁹ Também designado por «tubo de escoamento» ou «tubo de fluxo»; pela razão apresentada na nota de pé-de-página precedente, convém evitar esta última designação.

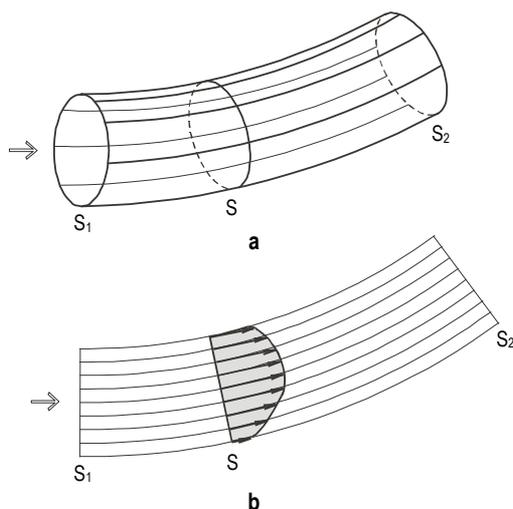


Figura 3.4 – Tubo de corrente: a – perspectiva; b – secção longitudinal planificada

Sendo a superfície de fronteira de um tubo de corrente constituída por linhas de corrente, e atendendo à definição destas, o líquido em escoamento nunca a atravessa. Um vulgar tubo de uma conduta, cuja superfície de fronteira com o escoamento — a sua superfície interior — é sólida, constitui um exemplo concreto de um tubo de corrente; num tal caso, as partículas do líquido adjacentes à superfície interior do tubo não se movimentam, ou seja, têm velocidade nula.

Considere-se, no tubo de corrente que se esquematiza na Figura 3.4, uma secção recta¹⁰ qualquer S. Nela existe um campo de velocidades, ao qual o diagrama vectorial que se apresenta na Figura 3.4-b diz respeito: ele representa esquematicamente as projecções sobre um plano longitudinal relevante do tubo de corrente, tangente à linha de corrente central na secção S, das velocidades na linha de intersecção de S com o referido plano. Um diagrama que, como este, seja representativo da distribuição de velocidades numa secção relevante do campo de velocidades existente numa secção recta de um tubo de corrente designa-se por **perfil de velocidades**.

¹⁰ Uma secção produzida no tubo de corrente por uma superfície que intersecta ortogonalmente todas as linhas de corrente que o constituem denomina-se «secção recta»; se essa superfície for plana, a secção que produz designa-se por «secção transversal».

O **caudal volumétrico** (doravante denominado simplesmente **caudal**) Q que se escoia na secção S no instante considerado define-se pela expressão

$$Q = \int_A \vec{u} \cdot \vec{n} \, dA = \int_A u \, dA \quad (3.12)$$

sendo \vec{u} a velocidade no ponto genérico da secção, \vec{n} o versor (orientado no sentido do escoamento) do elemento infinitesimal de área dA centrado nesse ponto e u o módulo da componente de \vec{u} na direcção do escoamento; a integração estende-se a toda a secção S , cuja área total é A , e $\vec{u} \cdot \vec{n}$ denota o produto escalar¹¹ dos dois vectores. A unidade SI de caudal é $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

A **velocidade média** U do escoamento na secção em causa calcula-se pela expressão

$$U = \frac{Q}{A} \quad (3.13)$$

Se o tubo de corrente for cilíndrico com secção transversal circular de diâmetro D , a Equação (3.13) pode-se escrever

$$U = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (3.14)$$

3.4.2 Tipos e regimes dos escoamentos

Existem apenas dois tipos de escoamento:

- variável;
- permanente.

Suponha-se que, no líquido em escoamento, a velocidade (vectorial) varia de ponto para ponto — ou seja, é função da posição do ponto considerado — e que, em cada ponto, varia com o tempo; trata-se então de um **escoamento variável**.

Se o vector velocidade varia de ponto para ponto do escoamento mas é independente do tempo em qualquer deles, o escoamento diz-se **permanente** (ou **estacionário**). Assim, num escoamento deste tipo as linhas de corrente são invariáveis no tempo, coincidindo, por conseguinte, com as trajectórias.

¹¹ Também chamado «produto interno».

Um escoamento permanente em que o vector velocidade é constante ao longo de cada trajectória designa-se por **uniforme**; trata-se, pois, de um caso particular de escoamento permanente.

A Figura 3.5 mostra dois exemplos de escoamentos permanentes em trechos de condutas com geometria muito usual, e.g. em sistemas de abastecimento de água: um não-uniforme, em conduta com transição tronco-cónica, e o outro uniforme, em conduta com secção circular constante. Note-se que, neste segundo caso, as trajectórias são rectilíneas e paralelas e o perfil de velocidades é invariável ao longo da conduta, o que não sucede no primeiro caso. Atente-se ainda no seguinte pormenor muito importante dos perfis de velocidades: anulam-se na superfície interior da conduta, visto o líquido adjacente a uma fronteira sólida do escoamento permanecer sempre imóvel, como adiante na presente secção se justifica.

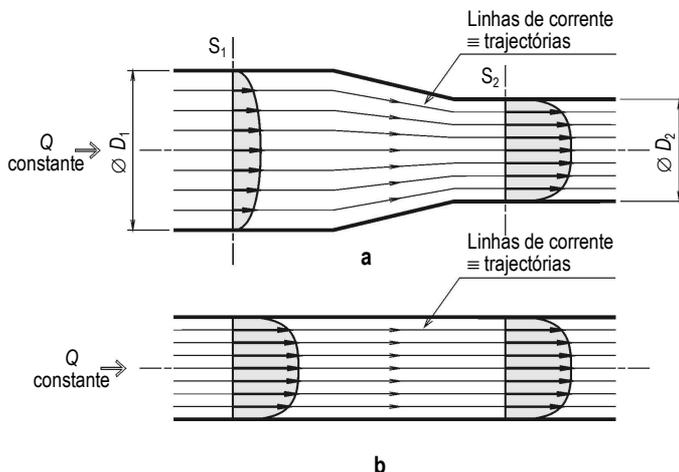


Figura 3.5 – Exemplos de escoamentos permanentes:
a – não-uniforme; b – uniforme

São também apenas dois os regimes (ou modos) de escoamento:

- laminar;
- turbulento.

Num **escoamento laminar**, as partículas do líquido movem-se com velocidades baixas e muito ordenadamente, segundo trajectórias bem definidas que nunca se entrecruzam.

Num **escoamento turbulento**, pelo contrário, as trajectórias das partículas do líquido não apresentam qualquer padrão de regulari-

dade. De facto, cada partícula segue uma trajectória errática, resultante de uma infinidade de pequenos movimentos de agitação extremamente irregular, que se sobrepõem a uma componente de deslocamento com o sentido do escoamento. Assim, num ponto genérico do escoamento e num determinado instante t , a velocidade \vec{u} pode-se considerar igual à soma vectorial de uma velocidade \vec{u}' orientada no sentido efectivo do escoamento com uma outra \vec{u}'' de agitação turbulenta aleatória: $\vec{u} = \vec{u}' + \vec{u}''$. A média temporal de \vec{u} num intervalo de tempo Δt suficientemente longo é

$$\bar{\vec{u}} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \vec{u}' dt \quad (3.15)$$

visto ser nula a média temporal de \vec{u}'' em virtude do carácter aleatório desta componente vectorial da velocidade.

As relações anteriores à Equação (3.15) que contêm \vec{u} são aplicáveis a escoamentos turbulentos mediante substituição desta grandeza vectorial por $\bar{\vec{u}}$.

O escoamento turbulento considera-se **permanente** se $\bar{\vec{u}}$ for independente do tempo e **variável** no caso contrário.

Suponha-se que o líquido se escoar numa conduta cilíndrica rectilínea com secção transversal circular (doravante designada apenas por «conduta cilíndrica» ou, se não der origem a ambiguidade, por «conduta») de diâmetro interior D . Tem sido amplamente demonstrado por via experimental que o regime de um escoamento tubular como este depende do valor do **número de Reynolds** Re do escoamento — parâmetro adimensional cuja relação de definição é

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (3.16)$$

Em geral, o regime estável do escoamento é laminar para valores baixos de Re (inferiores a 2000) e turbulento para valores elevados (superiores a 4000). Em condições usuais, a transição entre os dois regimes pode ocorrer para valores de Re entre 2000 e 4000, aproximadamente. O limite inferior desta gama — $Re_c \approx 2000$ — designa-se habitualmente por **número de Reynolds crítico**; não se trata de uma fronteira exacta entre os dois regimes, devendo antes ser entendido de acordo com o seguinte:

i) Se Re for pouco inferior a Re_c :

- o escoamento laminar à entrada do tubo manter-se-á ao longo deste, independentemente do seu comprimento total;
- o escoamento turbulento à entrada do tubo evoluirá para laminar ao longo do tubo, caso este seja rectilíneo, bastante liso e suficientemente comprido;

ii) Se Re for pouco superior a Re_c :

- o escoamento turbulento à entrada do tubo manter-se-á ao longo deste;
- o escoamento laminar à entrada do tubo tenderá a passar para turbulento ao longo deste, especialmente se for exposto a perturbações.

O valor da velocidade média do escoamento correspondente a $Re_c \approx 2000$ é, em geral, muito pequeno; a título de exemplo, no caso do escoamento de água a 15°C num tubo com $D = 300$ mm, esse valor, calculado pela Equação (3.16), é cerca de 8 mm s^{-1} .

Convém referir duas características fundamentais do escoamento do líquido, quer o seu regime seja laminar quer seja turbulento:

- a velocidade do líquido é nula sobre qualquer superfície sólida — circunstância que se designa por **condição de não-deslizamento**;
- não há descontinuidades na variação de velocidade de ponto para ponto — isto é, ela ocorre sempre de modo contínuo, embora o respectivo gradiente possa ser, nalguns casos, muitíssimo elevado.

Assim, na proximidade de uma superfície sólida (a parede de uma conduta, por exemplo), há sempre uma região do escoamento, que se denomina **camada limite**, onde a velocidade do líquido cresce rapidamente desde zero até ao valor que se verifica no seio do escoamento¹².

O escoamento pode então ser dividido em duas zonas:

- o escoamento na camada limite, onde as tensões viscosas assumem grande importância;

¹² A camada limite poderá ter uma espessura muito pequena (por vezes da ordem de 0,1 mm, por exemplo), podendo então os gradientes de velocidade que nela ocorrem atingir valores muitíssimo elevados e, portanto, as forças tangenciais devidas à viscosidade ser aí muito intensas.

- o escoamento fora da camada limite, que adiante se designa por «escoamento principal», onde os gradientes de velocidade são pequenos e, por conseguinte, o efeito da viscosidade é desprezável.

Dependendo do número de Reynolds respectivo, o escoamento dentro da camada limite pode ser laminar ou turbulento.

Mesmo quando o escoamento principal e o escoamento na camada limite são turbulentos, na vizinhança imediata da superfície sólida existe sempre uma película de líquido com espessura muito reduzida (que pode ser inferior a $1\ \mu\text{m}$) onde as flutuações turbulentas de velocidade são desprezáveis; designa-se por **película** (ou **subcamada**) **viscosa** (ou **laminar**).

Retome-se o exemplo do escoamento do líquido, que se supõe permanente, no interior da conduta cilíndrica. Quer o regime seja laminar ou turbulento, diz-se que se trata de um **escoamento completamente desenvolvido** se o seu perfil de velocidades for invariável ao longo da conduta; significa isso que o escoamento na camada limite se incorporou totalmente no escoamento principal — situação que se traduz em geral pela expressão **camada limite completamente desenvolvida**.

A Figura 3.6 apresenta os perfis de velocidades típicos dos dois regimes do escoamento permanente completamente desenvolvido na secção transversal genérica da conduta. Importa notar que, no caso do regime turbulento, o lugar geométrico dos pontos da secção onde os valores da velocidade igualam o da velocidade média é uma circunferência distante aproximadamente $D/8$ da superfície interior da conduta.

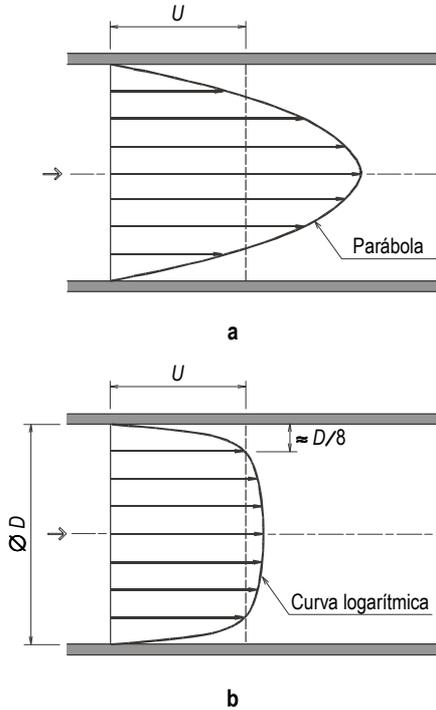


Figura 3.6 – Perfis de velocidades típicos de um escoamento permanente completamente desenvolvido numa conduta cilíndrica:
a – regime laminar; b – regime turbulento

3.4.3 Princípios básicos

Da aplicação do princípio da conservação da matéria (ou princípio da continuidade, como também é denominado) a um trecho de um tubo de corrente delimitado por duas secções rectas S_1 e S_2 , cujas áreas são, respectivamente, A_1 e A_2 , decorre que o caudal tem o mesmo valor em qualquer delas, uma vez que o líquido é incompressível:

$$Q = U_1 A_1 = U_2 A_2 \quad (3.17)$$

sendo U_1 e U_2 as velocidades médias do escoamento em S_1 e S_2 , respectivamente. Designa-se esta relação por **equação da continuidade**.

Aplicando-a, juntamente com a Equação (3.14), ao trecho de conduta que se apresenta na Figura 3.5-a, pode-se concluir que, nesse caso concreto,

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \quad (3.18)$$

ou seja, a velocidade média em cada um dos tubos é inversamente proporcional ao quadrado do respectivo diâmetro interior.

Suponha-se que o escoamento do líquido é permanente, considere-se nele uma linha de corrente e nesta um ponto genérico P, como se mostra na Figura 3.7. A velocidade e a pressão nesse ponto são \bar{u} e p , respectivamente.

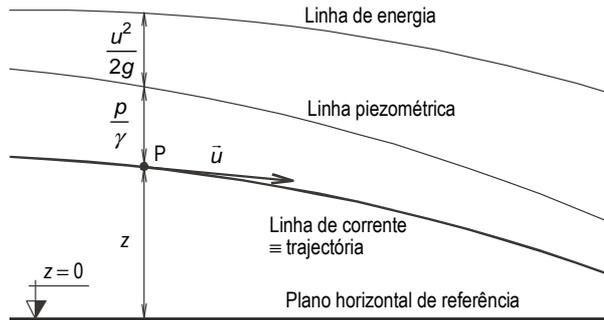


Figura 3.7 – Elementos de definição da equação de Bernoulli

A grandeza $\frac{u^2}{2g}$, que se designa por **altura cinética** em P, representa a energia cinética da unidade de peso do líquido e, como a sua designação denota, tem a dimensão de um comprimento¹³. Adicionando a altura cinética à cota piezométrica em P, obtém-se a **altura total** (ou **carga total**) H nesse ponto da linha de corrente em questão:

¹³ Como «energia cinética» = $\frac{mu^2}{2}$ e «peso» = mg , pode-se escrever «energia cinética» = $\frac{\text{«peso»} \times u^2}{2g}$; considerando «peso» = 1, será então «energia cinética por unidade de peso» = $\frac{u^2}{2g}$, cuja equação das dimensões é

$$\left[\frac{u^2}{2g} \right] = \frac{[u^2]}{[g]} = \frac{L^2 T^{-2}}{L T^{-2}} = L,$$

em que L e T representam, como é usual, as grandezas fundamentais «comprimento» e «tempo», respectivamente.

$$H = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{u^2}{2g} \quad (3.19)$$

Esta grandeza é então a soma da energia potencial total (veja-se o penúltimo parágrafo da secção 3.3) e da energia cinética por unidade de peso do líquido em P, ou seja, a energia mecânica total do peso unitário do líquido nesse ponto da linha de corrente, referida ao plano horizontal considerado.

A partir da linha de corrente, podem-se definir as correspondentes **linha piezométrica** e **linha de energia** (ou **de carga total**) relativamente ao plano horizontal de referência, conforme se ilustra na Figura 3.7. Como aí se pode constatar, a linha de energia é descendente no sentido do escoamento, significando que, ao longo da linha de corrente no escoamento permanente do líquido, a carga total vai decrescendo gradualmente; é essa a consequência do trabalho produzido pelas forças tangenciais resistentes ao escoamento, que são as forças de atrito viscoso.

Assim, o gradiente de carga total ao longo da linha de corrente $\frac{\partial H}{\partial s}$ no ponto P¹⁴ deverá ser igual ao trabalho j das referidas forças resistentes por unidade de peso do líquido e por unidade de percurso s ao longo da linha de corrente, igualdade essa que se exprime pela **equação de Bernoulli**

$$\frac{\partial H}{\partial s} = -j \quad (3.20)$$

ou

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{p}{\gamma} + z + \frac{u^2}{2g} \right) = -j \quad (3.21)$$

em que o sinal – no segundo membro traduz o facto de o referido gradiente ser negativo. Qualquer destas equações é a expressão matemática do **teorema de Bernoulli**.

¹⁴ Importa notar que $\frac{\partial H}{\partial s}$ não é o declive da linha de energia no ponto P; de facto, em qualquer ponto da linha de corrente, esta e a linha de energia têm, em geral, inclinações diferentes em relação ao plano horizontal de referência.

A grandeza j , que é adimensional, designa-se por **perda de carga unitária** no ponto P da linha de corrente em questão no escoamento permanente do líquido.

Integrando a Equação (3.20) entre dois pontos A e B da linha de corrente, estando B situado a jusante de A, obtém-se

$$\Delta H = \int_A^B j \, ds \quad (3.22)$$

em que $\Delta H = H_A - H_B$ é a **perda de carga** entre os dois pontos.

Uma perda de carga corresponde sempre a uma dissipação da energia mecânica do escoamento, ou seja, a uma transformação desta em energia calorífica, que se manifesta pela subida da temperatura do líquido — embora de valor muito baixo, praticamente desprezável, na generalidade dos casos com interesse em caudalimetria.

Para um tubo de corrente em que o escoamento do líquido é permanente, a carga total referente à totalidade da sua secção recta genérica S — onde é válida a lei hidrostática de pressões, expressa pela Equação (3.10) — define-se por

$$H = \frac{p}{\gamma} + z + \alpha \frac{U^2}{2g} \quad (3.23)$$

sendo α o **coeficiente de Coriolis** (ou **coeficiente de correcção da energia cinética**) referente a essa secção, o qual é o quociente entre a energia cinética do escoamento efectiva em S — que depende da distribuição de velocidades de facto aí existente — e a energia cinética correspondente à velocidade média U do escoamento na secção em causa. A sua equação de definição é

$$\alpha = \frac{\int_A u^3 dA}{U^3 A} \quad (3.24)$$

em que A é a área de S. O valor de α depende, pois, do perfil de velocidades na secção: o seu limite mínimo — correspondente a um perfil de velocidades rectangular ideal — é 1 e, para escoamento permanente em conduta rectilínea com secção circular, é 2 em regime laminar e aproximadamente 1,1 em regime turbulento.

A equação de Bernoulli aplicável à referida secção recta genérica do tubo de corrente, onde o escoamento do líquido é permanente, toma então a forma

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{p}{\gamma} + z + \alpha \frac{U^2}{2g} \right) = -j \quad (3.25)$$

sendo s o deslocamento ao longo da linha dos centros de massa das secções rectas do tubo; no caso de um tubo cilíndrico rectilíneo com secção transversal circular, essa linha é o eixo do tubo.

3.4.4 Escoamentos sob pressão

Quando o líquido se escoar numa conduta fechada e a preenche totalmente o escoamento diz-se **sob pressão** (ou **em pressão**, ou ainda **em carga**).

Os escoamentos sob pressão que, no âmbito do presente Guia Técnico, interessam à caudalimetria ocorrem em conduta cilíndrica rectilínea com secção transversal circular (que doravante, neste capítulo, muitas vezes se denomina apenas «conduta») e são sempre:

- turbulentos;
- permanentes, em particular uniformes quando a secção da conduta é constante¹⁵.

Considere-se o líquido em escoamento turbulento uniforme, completamente desenvolvido, numa conduta de diâmetro interior D , como se esquematiza na Figura 3.8. O padrão do perfil de velocidades em qualquer secção da conduta é o que se apresenta na Figura 3.5-b, a linha de energia é rectilínea e, visto a altura cinética $\alpha \frac{U^2}{2g}$ ser constante ao longo da conduta, paralela à linha piezométrica.

Da Equação (3.25) resulta então que a perda de carga unitária se pode exprimir por

$$j = - \frac{d \left(\frac{p}{\gamma} + z \right)}{ds} \quad (3.26)$$

¹⁵ Como sucede aquando da medição de caudal por meio de caudalímetros electro-magnéticos e ultrassónicos, conforme se verá nas secções 4.2.1 e 4.2.2, razão pela qual o escoamento turbulento uniforme assume especial relevância.

ou seja, é igual à variação da cota piezométrica do escoamento por unidade de comprimento da conduta. Como a linha piezométrica é rectilínea, a perda de carga unitária é constante ao longo da conduta; assim, sendo $\Delta H = H_A - H_B$ a perda de carga total entre as secções genéricas da conduta A (a montante) e B à distância L uma da outra, tem-se

$$j = \frac{\Delta H}{L} = \frac{\left| \Delta \left(\frac{p}{\gamma} + z \right) \right|}{L} \quad (3.27)$$

Esta perda de carga — que ocorre continuamente ao longo da conduta, designando-se, por isso, **perda de carga contínua** na conduta — traduz, como anteriormente se mencionou, a dissipação da energia mecânica da unidade de peso do líquido causada por atrito turbulento interno ao escoamento, na qual a rugosidade da superfície interior da conduta pode ter importante influência, como adiante se verá.

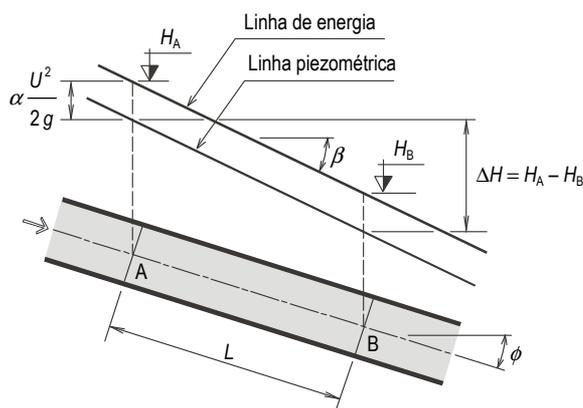


Figura 3.8 – Escoamento turbulento uniforme sob pressão: perda de carga contínua na conduta

A perda de carga contínua entre as referidas secções genéricas da conduta pode-se exprimir pela **fórmula de Darcy-Weisbach**

$$\Delta H = f \frac{L U^2}{D 2g} \quad (3.28)$$

sendo f o **factor de resistência** (ou **factor de atrito**). A expressão da correspondente perda de carga unitária na conduta é então

$$j = \frac{f U^2}{D 2g} \quad (3.29)$$

O factor de resistência, que é um coeficiente adimensional, depende essencialmente da **rugosidade relativa equivalente** $\frac{k}{D}$ da conduta e, eventualmente, do número de Reynolds do escoamento.

A rugosidade relativa equivalente define-se como o quociente entre a **rugosidade absoluta equivalente**¹⁶ k — que hidráulicamente equivale àquela de facto existente na superfície interior da conduta — e o diâmetro interior da conduta.

De agora em diante, nesta secção, abreviam-se as designações completas das duas rugosidades — relativa e absoluta — retirando-lhes o termo «equivalente».

No Quadro 3.3 apresentam-se valores típicos, obtidos experimentalmente, de rugosidades absolutas de materiais de superfícies interiores de condutas que frequentemente se encontram em sistemas de abastecimento de água e em sistemas de drenagem de águas residuais urbanas.

Para um dado escoamento turbulento, a conduta comporta-se como **hidraulicamente lisa** quando f depende apenas de Re , dizendo-se então que o escoamento ocorre em **regime turbulento liso**. Nessa circunstância, as saliências da superfície interior da conduta estão totalmente inseridas na película viscosa a ela adjacente, não havendo, por conseguinte, qualquer influência da rugosidade no escoamento.

¹⁶ Corresponde à rugosidade artificialmente uniforme constituída por grãos de areia de igual tamanho, aproximadamente esféricos com diâmetro k , justapostos e homogeneamente distribuídos na superfície interior da conduta, tal como a realizada nos tubos de secção circular utilizados por Nikuradse, no início da década de 1930, para os seus importantíssimos ensaios hidráulicos com escoamentos sob pressão (ver, por exemplo, Massey (2002), páginas 368 a 371).

Quadro 3.3 – Valores típicos da rugosidade absoluta de materiais usuais de superfícies interiores de condutas

Material	Estado / acabamento superficial	Rugosidade absoluta k (mm)
Aço	Novo, sem soldaduras salientes e sem revestimento	0,03
	Galvanizado	0,13
	Pintado ou revestido com betume	0,05
Argamassa de cimento	Muito bem alisada	0,1
	Alisada	0,2
	Aplicada por centrifugação	0,1
	Reboco ordinário	1,0
Betão	Acabamento resultante de cofragem metálica	0,2
	Acabamento resultante de cofragem de madeira	0,6
	Centrifugado	0,3
Ferro fundido	Novo, sem revestimento	0,3
	Com cerca de 10 anos de serviço	1,0
	Com cerca de 20 anos de serviço	1,5
Ferro fundido dúctil	Com revestimento	0,1
	Sem revestimento	0,2
Fibrocimento	Bom estado	0,02
Grés	Bom estado	0,2
Termoplástico (PEAD, PVC, etc.)	Bom estado	0,02

A espessura da película viscosa, embora muito pequena, diminui à medida que o número de Reynolds do escoamento aumenta. A partir de certo valor suficientemente elevado de Re , a espessura da película viscosa é desprezável em comparação com a altura das saliências da parede da conduta, ficando estas, por isso, totalmente fora daquela película; em torno de cada uma dessas saliências, o escoamento turbulento gera permanentemente uma esteira de vórtices, os quais têm influência preponderante na perda de carga contínua ao longo da conduta. O factor de resistência passa a ser independente do número de Reynolds e a depender exclusivamente da rugosidade relativa; a conduta comporta-se então como **hidraulicamente rugosa** e diz-se que o

regime de escoamento é **turbulento rugoso** (ou **puramente turbulento**).

Pode ainda existir um terceiro regime de escoamento turbulento na conduta, que se verifica para valores de Re aos quais corresponde uma película viscosa de onde emergem parcialmente as asperezas da superfície interior da conduta, sendo f , por esse motivo, função do número de Reynolds e também da rugosidade relativa; designa-se por **regime turbulento de transição**.

A **fórmula de Colebrook-White**, que se apresenta em seguida, é válida para qualquer dos três regimes de escoamento turbulento na conduta:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{k}{3,7D} \right) \quad (3.30)$$

O **diagrama de Moody** — que se pode consultar, por exemplo, em Hwang e Hita (1987) — página 69, Lencastre (1983) — página 458-a, Massey (2002)¹⁷ — página 373 e Quintela (1996) — página 142 — é a tradução gráfica da Equação (3.30).

Outra expressão também aplicável aos três regimes de escoamento turbulento é a **fórmula de Haaland**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{k}{3,71D} \right)^{1,11} \right] \quad (3.31)$$

Um problema prático corrente é o da determinação da perda de carga unitária no escoamento turbulento na conduta, dispondo dos valores de U , D e k como dados; os passos sucessivos para a sua resolução são os seguintes:

- cálculo do número de Reynolds do escoamento — Equação (3.16);
- cálculo da rugosidade relativa da conduta;
- determinação de f — Equação (3.30) ou Equação (3.31) ou diagrama de Moody;
- cálculo de j — Equação (3.29).

¹⁷ Importa chamar a atenção para o facto de o factor de resistência aí adoptado ser igual a ¼ do que se utiliza no presente documento.

Existem diversas equações empíricas aplicáveis ao escoamento turbulento rugoso na conduta. Uma das que se utilizam mais frequentemente é a **equação de Manning-Strickler**, que se pode escrever

$$U = \frac{0,904}{n} D^{2/3} j^{1/2} \quad (3.32)$$

sendo n um coeficiente que depende da rugosidade da superfície interior da conduta e cujo valor é tanto mais elevado quanto maior ela for; designa-se usualmente por «coeficiente de rugosidade de Manning» e a sua unidade de medida SI é $m^{-1/3} s$. Substituindo $1/n$ por K_S — o «coeficiente de lisura de Strickler» (ou apenas «coeficiente de Strickler»), como habitualmente se denomina — na Equação (3.32) obtém-se

$$U = 0,904 K_S D^{2/3} j^{1/2} \quad (3.33)$$

Outra equação empírica que se utiliza frequentemente é a **equação de Hazen-Williams**

$$U = 0,756 C D^{0,63} j^{0,54} \quad (3.34)$$

sendo C um coeficiente que traduz a lisura da superfície interior da conduta; a sua unidade de medida SI é $m^{0,37} s^{-1}$.

O Quadro 3.4 contém valores típicos dos coeficientes n , K_S e C respeitantes aos mesmos materiais que se referem no Quadro 3.3.

Qualquer singularidade inserida na conduta que imponha uma alteração súbita, em grandeza e/ou direcção, da velocidade do escoamento produz uma turbulência adicional no escoamento e uma conseqüente dissipação da energia mecânica deste, ou seja, causa uma perda de carga. Como essa perturbação tem geralmente origem num trecho relativamente curto do escoamento situado na vizinhança da singularidade (embora a turbulência aí gerada possa prevalecer a uma distância considerável a jusante da perturbação), a referida perda de carga denomina-se **localizada** (ou **singular**).

Quadro 3.4 – Valores típicos dos coeficientes n de Manning, K_S de Strickler e C de Hazen-Williams referentes a materiais usuais de superfícies interiores de condutas

Material	Estado / acabamento superficial	n ($m^{-1/3} s$)	K_S ($m^{1/3} s^{-1}$)	C ($m^{0,37} s^{-1}$)
Aço	Novo, sem soldaduras salientes e sem revestimento	0,010 – 0,014	71 – 100	110 – 150
	Galvanizado	0,013 – 0,017	59 – 77	90 – 120
	Pintado ou revestido com betume	0,012 – 0,015	67 – 83	105 – 130
Argamassa de cimento	Muito bem alisada	0,010 – 0,011	90 – 100	140 – 150
	Alisada	0,012 – 0,014	71 – 83	110 – 130
	Reboco ordinário	0,015 – 0,017	58 – 67	90 – 105
Betão	Acabamento resultante de cofragem metálica	0,011 – 0,013	77 – 91	120 – 140
	Acabamento resultante de cofragem de madeira	0,015 – 0,018	55 – 67	85 – 105
	Centrifugado	0,012 – 0,014	71 – 83	110 – 130
Ferro fundido	Novo, sem revestimento	0,011 – 0,013	77 – 91	120 – 140
	Com cerca de 10 anos de serviço	0,013 – 0,015	67 – 77	105 – 120
	Com cerca de 20 anos de serviço	0,014 – 0,018	56 – 71	89 – 110
Ferro fundido dúctil	Com revestimento	0,010 – 0,014	71 – 100	110 – 150
	Sem revestimento	0,012 – 0,016	63 – 83	110 – 130
Fibrocimento	Bom estado	0,010 – 0,013	77 – 100	120 – 150
Grés	Bom estado	0,011 – 0,013	77 – 91	120 – 140
Termoplástico (PEAD, PVC, etc.)	Bom estado	0,009 – 0,010	100 – 110	150 – 155

Na proximidade da singularidade, a montante e a jusante desta, o andamento rectilíneo da linha de energia do escoamento, característico da perda de carga contínua, modifica-se em consequência da perda de carga localizada. Embora essa modificação ocorra, de facto, numa certa extensão do escoamento, é hábito considerar, por mera convenção, que a perda de carga localizada se concentra numa secção da singularidade que a origina. É isso que, a título de exemplo, se mostra na Figura 3.9, onde se esquematiza a perturbação do escoamento na conduta causada por um diafragma — com formação de regiões de escoamento turbilhonar a montante e, principalmente, a jusante dele — e a consequente perda de carga localizada.

Porque será de novo mencionada na secção 4.2.3, refira-se que a mínima secção transversal do escoamento contraído a jusante do diafragma se denomina “**vena contracta**”. Repare-se ainda que a perda de carga ao longo de toda a conduta é a soma da perda de carga contínua com a perda de carga localizada.

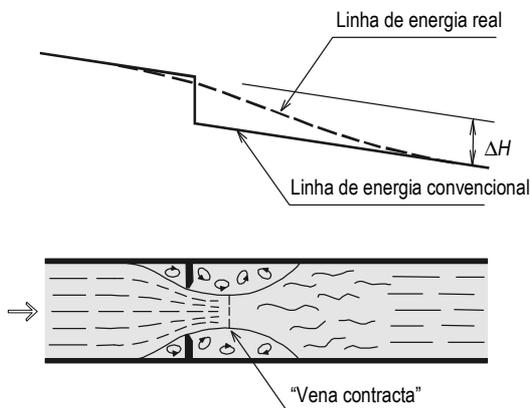


Figura 3.9 – Escoamento turbulento permanente em conduta: perda de carga localizada originada por um diafragma

Desde há muito tempo que se tem constatado, por via experimental, que as perdas de carga localizadas se podem genericamente exprimir pela relação

$$\Delta H = K \frac{U^2}{2g} \quad (3.35)$$

em que U é uma velocidade média tomada como referência (não necessariamente a velocidade média do escoamento na conduta) e K é um coeficiente dependente da geometria da singularidade e, eventualmente, do número de Reynolds e de certas características do escoamento. Para valores suficientemente elevados de Re , K é praticamente independente desse parâmetro.

3.4.5 Escoamentos com superfície livre

Um escoamento com superfície livre, que doravante nesta secção frequentemente se designa apenas por «escoamento», tem como fronteira superior a superfície livre do próprio líquido, que contacta com a atmosfera ou outro meio gasoso; a secção recta do escoamento, que é costume designar por **secção molhada**, deixa então de ser totalmente determinada por uma fronteira sólida.

O escoamento, que em todos os casos com interesse prático se considera sempre puramente turbulento, pode ocorrer em canal, cuja secção recta é aberta, ficando limitado pelo leito e pelas paredes laterais deste, ou em conduta que, embora de secção fechada, não se encontre totalmente preenchida pelo líquido. Em qualquer dos casos, a linha piezométrica do escoamento coincide com o perfil da superfície livre.

O lugar geométrico dos pontos de cota mínima das secções do canal ou da conduta em questão designa-se por **linha de fundo**; o **perfil longitudinal do fundo** é a linha de fundo planificada.

O **declive** i do canal ou da conduta define-se como a tangente trigonométrica do ângulo ϕ entre o respectivo perfil longitudinal do fundo e um plano horizontal de referência:

$$i = \operatorname{tg} \phi \quad (3.36)$$

No escoamento permanente, o caudal e a velocidade média são constantes no tempo em cada secção, podendo diferir, no entanto, de uma secção para outra. Um tal escoamento pode ser:

- **uniforme**, se a sua secção molhada, o caudal e a velocidade média são constantes ao longo do percurso do escoamento; tal como sucede com o escoamento uniforme sob pressão, as linhas de corrente, coincidentes com as trajectórias, são rectilíneas e paralelas;
- **gradualmente variado**, que também se denomina **regolfo**, se as linhas de corrente, não sendo já estritamente rectilíneas, têm pequena curvatura e mantêm aproximadamente o paralelismo; assim, a secção molhada pouco varia ao longo do percurso do escoamento, podendo-se então admitir que nela existe distribuição hidrostática de pressões;
- **rapidamente variado**, se as linhas de corrente apresentam curvatura acentuada, variando a secção molhada bruscamente ao longo do percurso do escoamento, circunstância em que a lei hidrostática de pressões não é válida.

Os dois tipos de escoamento permanente — uniforme e variado (ou não-uniforme) — apresentam-se esquematicamente na Figura 3.10.

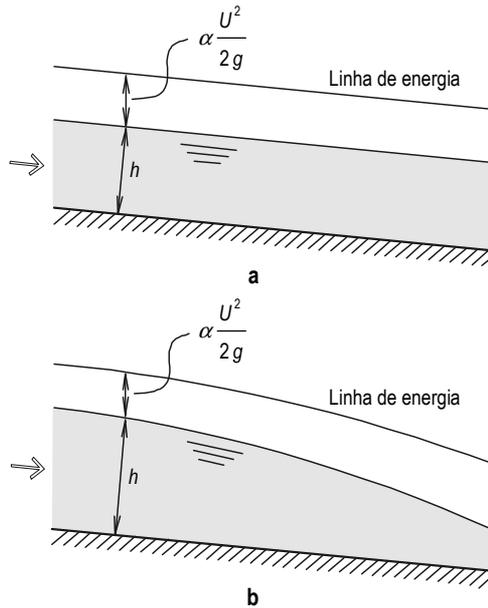


Figura 3.10 – Escoamento permanente com superfície livre:
a – uniforme; b – variado (ou não-uniforme)

No caso do escoamento permanente uniforme, a altura (ou profundidade) do escoamento h não varia ao longo do perfil longitudinal do fundo (que tem de ser necessariamente rectilíneo), e existe paralelismo entre este, o perfil da superfície livre (coincidente com a linha piezométrica, como acima se referiu) e a linha de energia; tal não sucede no caso do escoamento permanente variado.

O escoamento uniforme só pode ocorrer em canal ou conduta de geometria prismática ou cilíndrica — ou seja, com secção transversal invariável ao longo do percurso longitudinal — com rugosidade constante ao longo de cada geratriz, necessitando ainda, para se estabelecer completamente, de um trecho com comprimento suficientemente extenso.

Num escoamento uniforme, considerem-se duas secções molhadas A (a montante) e B à distância L uma da outra, como se ilustra na Figura 3.11.

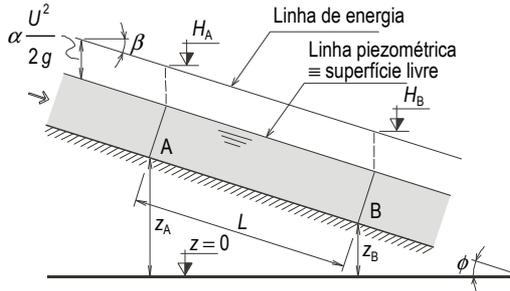


Figura 3.11 – Escoamento uniforme com superfície livre: perda de carga contínua

A perda de carga unitária no trecho compreendido entre essas secções é

$$j = \frac{H_A - H_B}{L} = \text{sen } \beta = \text{sen } \phi = \frac{Z_A - Z_B}{L} \quad (3.37)$$

sendo β o ângulo de inclinação da linha de energia em relação ao plano horizontal de referência (que, neste caso, é igual a ϕ).

Para valores pequenos do ângulo de inclinação do perfil longitudinal do fundo, $\text{sen } \phi \approx \text{tg } \phi^{18}$ e, por conseguinte, $j \approx i$ — hipótese que, como é usual quando se trata de escoamentos com superfície livre, se adota doravante na presente secção.

No caso do escoamento uniforme, uma outra hipótese que também se admite habitualmente é a de que a distribuição de velocidades na secção molhada é aproximadamente uniforme, ou seja, o coeficiente de Coriolis é $\alpha = 1$.

A fórmula de Colebrook-White [Equação (3.30)] e a fórmula de Haaland [Equação (3.31)] somente se podem aplicar a um escoamento uniforme com superfície livre se, em qualquer delas, D for substituído pelo **diâmetro hidráulico** da secção molhada D_h , que se define como

$$D_h = 4 R_h \quad (3.38)$$

sendo R_h o **raio hidráulico** dessa secção que, por seu turno, se define como o quociente entre a área A e o perímetro P da referida secção, que habitualmente se denominam, por isso, **área molhada** e **perímetro molhado**:

¹⁸ Para $\phi = 5^\circ$, por exemplo, é $\text{sen } \phi = 0,08716$ e $\text{tg } \phi = 0,08749$.

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (3.39)$$

Importa referir que P é o comprimento apenas da parte da linha de contorno da secção molhada que fica em contacto com a parede do canal ou da conduta, não se incluindo nele, portanto, a largura da superfície livre.

A equação de Manning-Strickler aplicável a um escoamento uniforme não é a Equação (3.33) (ou a Equação (3.32), que lhe é equivalente), sendo antes

$$U = K_S R_h^{2/3} i^{1/2} \quad (3.40)$$

Desta resulta

$$Q = K_S A R_h^{2/3} i^{1/2} \quad (3.41)$$

que se pode reescrever do seguinte modo:

$$\frac{Q}{\sqrt{i}} = K_S A R_h^{2/3} \quad (3.42)$$

Também a equação de Hazen-Williams aplicável ao mesmo tipo de escoamento não deverá ser expressa em função de D , como na Equação (3.34), mas sim em função de R_h :

$$U = 0,849 C R_h^{0,63} i^{0,54} \quad (3.43)$$

Desta decorre a seguinte expressão:

$$\frac{Q}{i^{0,54}} = 0,849 C A R_h^{0,63} \quad (3.44)$$

Para determinar a **altura do escoamento uniforme** h_u a partir da equação de Manning-Strickler ou da equação de Hazen-Williams — nas quais ela não intervém de forma explícita — é necessário utilizar um processo iterativo, facilmente resolúvel (utilizando, por exemplo, a aplicação informática Microsoft Excel), ou então recorrer a um gráfico $h = h(K_S A R_h^{2/3})$ ou $h = h(0,849 C R_h^{0,63})$, consoante o caso, que se designa por **curva de capacidade de vazão** (ou simplesmente **curva de vazão**) do canal ou da conduta. Na Figura 3.12 esquematiza-se um gráfico genérico desse tipo baseado na equação de Manning-Strickler e mostra-se como, entrando nele com o valor de Q/\sqrt{i} no eixo das abcissas, se

obtem, de acordo com a Equação (3.42), o correspondente valor de $h = h_u$.

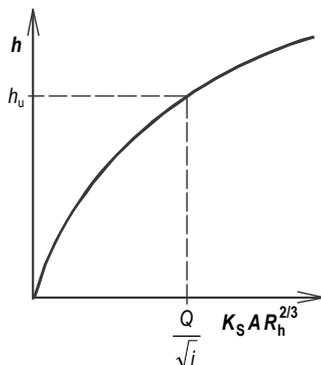


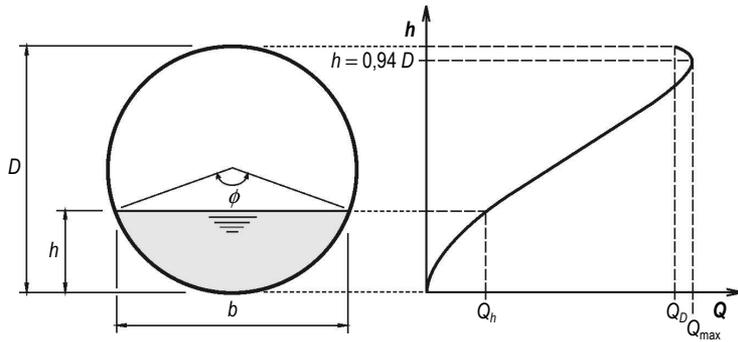
Figura 3.12 – Curva de vazão baseada na equação de Manning-Strickler: obtenção da altura do escoamento uniforme

Se a curva de vazão for baseada na equação de Hazen-Williams, o valor da abcissa que corresponde à ordenada h_u é, em conformidade com a Equação (3.44), $Q/i^{0,54}$.

A curva da Figura 3.12, a menos do factor de escala \sqrt{i} do eixo das abcissas¹⁹, representa a variação da altura do escoamento uniforme com o caudal; uma curva de vazão pode-se exprimir, por conseguinte, como $h_u = h_u(Q)$.

Na Figura 3.13 apresenta-se a curva de vazão de uma conduta de secção circular (onde h se deverá entender como h_u).

¹⁹ Esse factor de escala seria $i^{0,54}$ caso a curva se baseasse na equação de Hazen-Williams.



Q_D – caudal com a condução cheia (quando a linha piezométrica coincide com a geratriz superior)
 Q_h – caudal correspondente à altura h
 Q_{\max} – caudal máximo

Figura 3.13 – escoamento uniforme com superfície livre em condução de seção circular: curva de vazão da condução

A seção molhada pode-se definir geometricamente pelas seguintes relações:

$$h = \frac{D}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (3.45)$$

$$A = \frac{D^2}{8} (\phi - \text{sen } \phi) \quad (3.46)$$

$$P = \frac{D \phi}{2} \quad (3.47)$$

$$R_h = D \left(\frac{\phi - \text{sen } \phi}{4 \phi} \right) \quad (3.48)$$

$$b = D \text{sen} \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad (3.49)$$

sendo ϕ o ângulo que se indica na Figura 3.13, expresso em radianos, e b a largura da superfície livre do escoamento.

Constata-se que:

- o valor máximo do caudal Q_{\max} , superior ao valor Q_D que se verifica com a condução cheia (no limite de passagem para escoamento sob pressão, quando a linha piezométrica coincide com a geratriz superior)

trica coincide com a geratriz superior da conduta), ocorre para $h = 0,94 D$;

■ $Q_D = 0,93 Q_{\max}$.

Considere-se um escoamento uniforme ou um regolfo em canal ou conduta cujo declive é pequeno. Aplicada a qualquer deles, a equação de Bernoulli [Equação (3.25)] pode tomar a forma

$$\frac{d}{ds} \left(h + \frac{U^2}{2g} \right) = i - j \quad (3.50)$$

sendo s o percurso ao longo do canal ou da conduta. Introduzindo nesta expressão a grandeza

$$E = h + \frac{U^2}{2g} \quad (3.51)$$

que se designa por **energia específica** do escoamento na secção molhada genérica, e que fisicamente significa a energia mecânica da unidade de peso do líquido em escoamento referida ao fundo do canal ou da conduta nessa secção, a Equação (3.50) pode-se então escrever

$$\frac{dE}{ds} = i - j \quad (3.52)$$

sendo o seu significado energético o seguinte: por unidade de percurso a partir de uma secção molhada genérica, a variação da energia específica é igual à diferença entre o trabalho das forças gravíticas (motrizes do escoamento) e o das forças resistentes por unidade de peso do líquido²⁰.

No caso do escoamento uniforme, ao contrário do que sucede com o regolfo, é $i = j$, o que implica, a partir da Equação (3.52), que a energia específica é constante ao longo do escoamento. No entanto, num canal ou numa conduta rectilíneos e de secção transversal constante, um regolfo tende para uma situação de equilíbrio que é o escoamento uniforme.

Reescrevendo a Equação (3.51) na forma

²⁰ O significado energético da perda de carga unitária já anteriormente se mencionou a propósito da Equação (3.20): trabalho das forças resistentes ao escoamento por unidade de peso do líquido e por unidade de percurso.

$$E = h + \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad (3.53)$$

torna-se ainda mais evidente que a energia específica é simultaneamente função do caudal e da altura do escoamento: $E = E(Q, h)$.

Para um valor constante do caudal ($Q = Q_0$), a energia específica passa então a ser função apenas de h : $E = E(h)$. Apresenta-se na Figura 3.14 um exemplo genérico da representação gráfica desta relação, que se designa por **diagrama da energia específica** respeitante à secção molhada em causa.

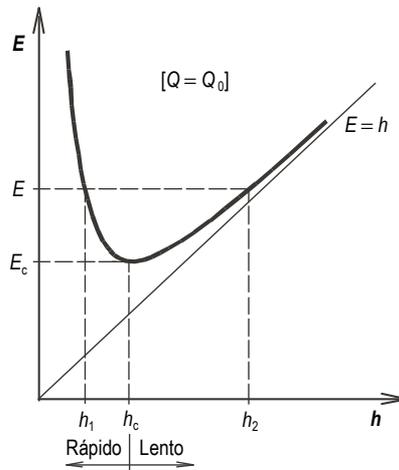


Figura 3.14 – Diagrama da energia específica $E = E(h)$

Trata-se de uma curva com duas assíntotas — o eixo das ordenadas (quando $h \rightarrow 0$) e a semi-recta $E = h$ (quando $h \rightarrow \infty$) — cujo mínimo corresponde ao menor valor da energia específica com que o caudal Q_0 se pode escoar na referida secção. Nesta circunstância, diz-se que o regime do escoamento é **crítico** (ou que o escoamento ocorre em **condições críticas**), denotando-se e designando-se os valores da energia específica, da altura e da velocidade média do escoamento por, respectivamente:

- E_c – energia específica crítica;
- h_c – altura crítica (ou profundidade crítica);
- U_c – velocidade média crítica.

Para qualquer valor da energia específica $E \neq E_c$, ou seja, quando Q_0 não se escoar em condições críticas, existem duas alturas possíveis de escoamento, que se designam por **alturas (ou profundidades) alternativas**, como se pode ver na Figura 3.14: $h_1 < h_c$ e $h_2 > h_c$, condições que definem, respectivamente, o **regime rápido** e o **regime lento** do escoamento. Na mesma figura pode-se ainda observar que no escoamento rápido a energia específica diminui quando a altura aumenta, sucedendo o inverso no escoamento lento.

Na maioria das aplicações práticas, é preferível utilizar o diagrama da energia específica na forma $h = h(E)$, que se apresenta na Figura 3.15.

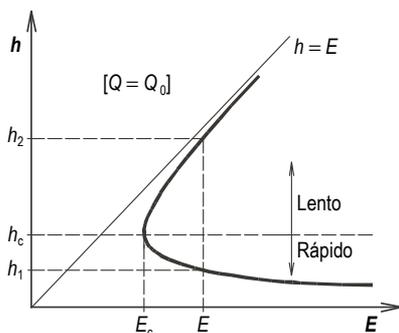


Figura 3.15 – Diagrama da energia específica $h = h(E)$

Se o valor da energia específica do escoamento for constante ($E = E_0$), deduz-se da Equação (3.53) que, nesse caso, a altura do escoamento é função apenas do caudal: $h = h(Q)$. Representando graficamente essa relação, obtém-se uma curva como a que se apresenta na Figura 3.16.

Para aquele valor constante da energia específica, verifica-se que:

- existe um valor máximo do caudal Q_{max} , que ocorre precisamente quando a altura do escoamento é crítica;
- duas alturas alternativas de escoamento, uma respeitante ao regime rápido e a outra ao regime lento, correspondem a qualquer outro valor do caudal.

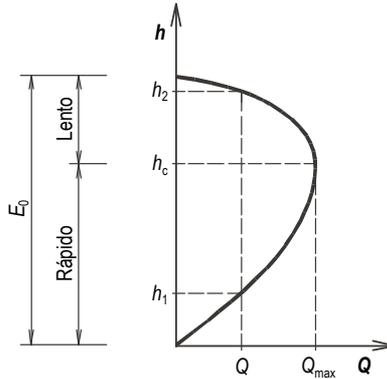


Figura 3.16 – Diagrama $h = h(Q)$ para energia específica constante

Importa mencionar que, se o caudal transportado num canal ou numa conduta for o máximo possível, existem decerto condições críticas de escoamento algures nesse canal ou nessa conduta; tais condições impõem, portanto, um limite de vazão no canal ou na conduta em questão.

Numa secção molhada qualquer, a velocidade média crítica é dada por

$$U_c = \sqrt{g\bar{h}} \quad (3.54)$$

sendo $\bar{h} = \frac{A}{b}$ — quociente entre a área molhada e a largura da superfície livre b — a **altura** (ou **profundidade**) **média** da secção molhada.

A grandeza $\sqrt{g\bar{h}}$ é também igual à velocidade de propagação de uma pequena onda de superfície relativamente ao líquido não perturbado, podendo suceder o seguinte a uma pequena perturbação como essa:

- se $U = U_c$ (escoamento crítico), não se desloca, comportando-se como onda estacionária²¹;
- se $U < U_c$ (escoamento lento), consegue propagar-se para montante (e também para jusante), o que significa haver a possibilidade de o comportamento do líquido a montante da secção em causa ser influenciado (ou controlado,

²¹ O aparecimento de pequenas ondas estacionárias na superfície livre de um escoamento denota que este ocorre em condições críticas.

como é usual dizer-se) por condições ou ocorrências a jusante desta;

- se $U > U_c$ (escoamento rápido), só pode propagar-se para jusante, ou seja, as condições do escoamento a jusante da secção de referência são controladas apenas pelas condições a montante desta.

O **número de Froude** Fr do escoamento numa dada secção molhada define-se pela expressão

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (3.55)$$

É um parâmetro adimensional que se pode considerar como a relação entre a velocidade média e a velocidade média crítica do escoamento nessa secção. Assim, a classificação do regime do escoamento pode-se também fazer recorrendo a este parâmetro: $Fr = 1$ – regime crítico; $Fr > 1$ – regime rápido; $Fr < 1$ – regime lento.

Define-se **declive crítico** i_c de um canal ou de uma conduta para um dado caudal como o declive da respectiva linha longitudinal do fundo para o qual o escoamento desse caudal é uniforme crítico. A partir da equação de Manning-Strickler [Equação (3.40)] obtém-se a seguinte expressão para o declive crítico:

$$i_c = \frac{\bar{gh}}{K_S^2 R_h^{4/3}} \quad (3.56)$$

Para o caudal em questão, o declive i diz-se **forte** se $i > i_c$ e **fraco** se $i < i_c$; dão origem, respectivamente, a escoamento uniforme rápido e a escoamento uniforme lento desse caudal.

Um **ressalto hidráulico** (ou apenas **ressalto**) é uma onda de translacção positiva²² estacionária que realiza a transição brusca de escoamento rápido (sempre a montante) para escoamento lento; essa transição nunca pode ocorrer gradualmente, sendo o ressalto, por conseguinte, um tipo de escoamento rapidamente variado.

²² Uma onda diz-se positiva quando, no sentido do escoamento, lhe corresponde um aumento da profundidade deste.

O ressalto origina a formação de muitos turbilhões, que ocasionam uma considerável dissipação localizada da energia mecânica do escoamento. É isso que se ilustra na Figura 3.17.

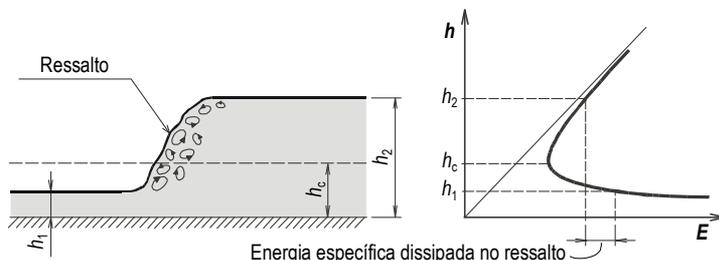


Figura 3.17 – Perda de energia específica num ressalto

Como anteriormente se referiu, as condições críticas de escoamento impõem um limite de vazão num canal ou numa conduta; por isso, forçar ou confirmar a sua ocorrência é geralmente importante.

É expectável a ocorrência de condições críticas numa secção onde o escoamento passa de regime lento, num trecho comprido de um canal com declive fraco, a regime rápido, num outro trecho também comprido mas com declive forte, como sucede no exemplo que se apresenta na Figura 3.18. Entre esses dois trechos com escoamento uniforme existe um regolfo; o perfil da respectiva superfície livre denomina-se **curva de regolfo**²³.

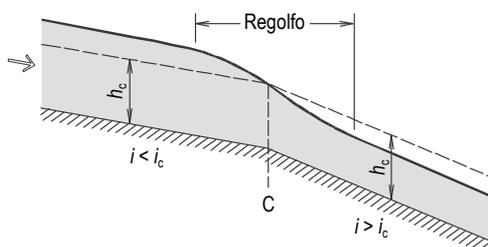


Figura 3.18 – Ocorrência de condições críticas de escoamento na transição de declive fraco para declive forte

Na proximidade da secção molhada C, onde se dá a mudança de declive, a altura do escoamento passa pelo valor crítico.

²³ Existem 12 tipos diferentes de curvas de regolfo; para conhecê-las, o leitor interessado poderá consultar qualquer das referências bibliográficas que se mencionam na secção 3.6.

Para que o escoamento crítico ocorra não é necessário haver alteração do declive da linha de fundo do canal. De facto, pode ocorrer escoamento crítico num canal com declive fraco constante se nele houver uma adequada sobrelevação do fundo ou uma diminuição de largura. Neste último caso, é o que sucede numa **caleira Venturi de fundo plano** (ou **sem soleira**, como também é designada) — dispositivo utilizável para medição de caudal, que novamente se referirá na secção 5.3.2 — de que se apresenta uma planta esquemática na Figura 3.19.

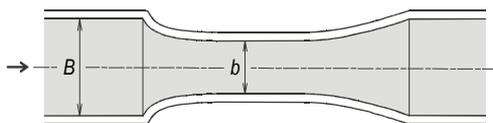


Figura 3.19 – Planta esquemática de uma caleira Venturi

A secção mais estreita, de largura b , designa-se por **colo** da caleira Venturi. Se a altura do escoamento a jusante não for demasiadamente elevada, o escoamento no colo é crítico, dizendo-se que a caleira funciona então em condições de **descarga livre** (ou **não-afogada**). Nessas circunstâncias, supondo que a secção transversal do canal é rectangular²⁴ e que a da caleira também o é, verifica-se que, para qualquer valor do caudal, a relação $s = h_2 / h_1$ entre a altura do escoamento no canal a jusante da caleira h_2 e a altura do escoamento no canal a montante h_1 — que se designa por **relação de submersão** da caleira — é constante; por medição apenas de h_1 , pode-se então determinar o caudal pela relação

$$Q = \sqrt{g} b s^{3/2} h_1^{3/2} \quad (3.57)$$

Esse valor constante da relação de submersão da caleira pode-se calcular pela expressão

$$s = \frac{1}{0,5 + \cos \left[\frac{2}{3} \arcsin \left(\frac{b}{B} \right) \right]} \quad (3.58)$$

sendo B a largura do canal onde a caleira Venturi está inserida — adiante designado por **canal de instalação** da caleira.

²⁴ Este é o termo vulgarmente utilizado; no entanto, visto o canal ser aberto, a forma geométrica da sua secção transversal não é, de facto, um rectângulo, pois falta-lhe o lado superior.

A Equação (3.57) ignora a influência, que se verifica desde a entrada da caleira até ao colo, não apenas da perda de carga por atrito, que é pequena, mas também da curvatura das linhas de corrente; de modo a tê-la em consideração, é necessário afectar o segundo membro dessa equação de um **coeficiente de descarga** C_d , cujo valor está em geral compreendido entre 0,95 e 0,99, ficando então

$$Q = C_d \sqrt{gb} s^{3/2} h_1^{3/2} \quad (3.59)$$

No trecho de saída da caleira, logo a jusante do colo, o escoamento é geralmente rápido. Se as condições no canal de instalação a jusante da caleira forem propícias à manutenção do escoamento rápido, a altura deste tenderá gradualmente para a altura uniforme; mas se, pelo contrário, essas condições forem adequadas à ocorrência de escoamento lento, a transição para este far-se-á, como já se disse, por um ressalto.

Se a altura do escoamento lento a jusante da caleira for demasiadamente elevada (em geral superior a $1,8 h_1$), o escoamento no colo não chega a ser crítico, dizendo-se que a caleira se encontra então **afogada**; a relação de submersão da caleira deixa de ser constante, o que impede a determinação de Q a partir apenas do valor de h_1 , sendo necessário medir também h_2 .

Regra geral, uma caleira Venturi deve ser dimensionada de modo a funcionar em condições de descarga livre para toda a gama de valores do caudal a medir. Se essa gama for muito larga, será conveniente optar pela utilização de uma **caleira Venturi com soleira**, como a que a Figura 5.10 apresenta, que pode funcionar não-afogada para valores mais elevados da altura do escoamento a jusante.

3.5 Simbologia

Quadro 3.5 – Simbologia utilizada no Capítulo 3

Símbolo	Grandeza	Unidade de medida SI
A	Área; área molhada	m^2
b	Largura da superfície livre de um escoamento; largura do colo de uma caleira Venturi	m
B	Largura de um canal	m
C	Coefficiente de lisura de Hazen-Williams	$m^{0,37} s^{-1}$

C_d	Coefficiente de descarga de uma caleira Venturi	–
D	Diâmetro interior (de tubo, de conduta)	m
D_h	Diâmetro hidráulico	m
E	Energia específica	m
f	Factor de resistência	–
F	Força	N
Fr	Número de Froude	–
g	Aceleração da gravidade	$m\ s^{-2}$
h	Altura de líquido ou de escoamento; profundidade	m
\bar{h}	Altura média de uma secção molhada	m
h_c	Altura crítica de um escoamento com superfície livre	m
h_u	Altura de um escoamento uniforme com superfície livre	m
h_1	Altura do escoamento no canal a montante de uma caleira Venturi	m
h_2	Altura do escoamento no canal a jusante de uma caleira Venturi	m
H	Carga total	m
i	Declive da linha longitudinal do fundo de um canal ou de uma conduta	–
i_c	Declive crítico	–
j	Perda de carga unitária	–
k	Rugosidade absoluta equivalente	m
K	Coefficiente de perda de carga	–
K_s	Coefficiente de lisura de Strickler	$m^{1/3}\ s^{-1}$
L	Distância	m
m	Massa	kg
n	Coefficiente de rugosidade de Manning	$m^{-1/3}\ s$
p	Pressão	Pa
P	Perímetro molhado	m
p_a	Pressão atmosférica	Pa
p_v	Pressão de saturação do vapor	Pa
Q	Caudal	$m^3\ s^{-1}$
Q_D	Caudal numa conduta cilíndrica de secção circular quando totalmente cheia, no limite de transição de escoamento com superfície livre para escoamento sob pressão	$m^3\ s^{-1}$

Q_{\max}	Caudal máximo	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Re	Número de Reynolds	–
Re_c	Número de Reynolds crítico	–
R_h	Raio hidráulico	m
s	Deslocamento	m
s	Relação de submersão de uma caleira Venturi	–
t	Tempo	s
u	Velocidade pontual	m s^{-1}
U	Velocidade média	m s^{-1}
U_c	Velocidade média crítica	m s^{-1}
V	Volume	m^3
y	Distância	m
z	Cota geométrica relativa a um plano horizontal de referência	m
α	Coefficiente de Coriolis	–
β	Ângulo	rad
ΔH	Perda de carga	m
δs	Deslocamento infinitesimal	m
δt	Intervalo de tempo infinitesimal	s
Δt	Intervalo de tempo	s
ϕ	Ângulo	rad
γ	Peso volúmico	N m^{-3}
μ	Viscosidade dinâmica	Pa s
ν	Viscosidade cinemática	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
θ	Temperatura	K
ρ	Massa volúmica	kg m^{-3}
τ	Tensão tangencial	Pa

3.6 Bibliografia

Hwang, N. H. C.; Hita, C. E. – *Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems*. Englewood Cliffs, New Jersey (EUA), Prentice-Hall, 1987.

ISO 4185 – *Measurement of liquid flow in closed conduits – Weighing method*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1980.

Lencastre, A. – *Hidráulica Geral*. Lisboa, Hidroprojecto, 1983.

Massey, B. S. – *Mecânica dos Fluidos*. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

Quintela, A. C. – *Hidráulica*. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 5.^a Edição, 1996.

4 MEDIÇÃO DE CAUDAL EM ESCOAMENTOS SOB PRESSÃO

4.1 Introdução

A finalidade principal deste capítulo é, por um lado, apresentar sucintamente os caudalímetros mais comuns utilizáveis em escoamentos sob pressão de água ou de águas residuais urbanas — aquela e estas doravante designadas genericamente por «líquido», a exemplo do que foi feito na Capítulo 3 — e, por outro lado, referir procedimentos, essencialmente práticos, de selecção, dimensionamento e instalação (apenas quanto a aspectos hidráulicos, em qualquer destes dois casos) e manutenção desses instrumentos de medição de caudal.

No âmbito do presente Guia Técnico, pressupõe-se que o trecho de condução onde o caudal do escoamento sob pressão será medido é cilíndrico e tem secção transversal circular.

Na secção 4.2 apresentam-se os três tipos de caudalímetros — electromagnéticos, ultrassónicos e deprimogéneos — que mais frequentemente são utilizados em escoamentos sob pressão e, para cada um deles, referem-se os seguintes tópicos:

- constituição;
- princípio de transdução;
- equação de medição;
- valores típicos das incertezas de medição padrão²⁵.

Na secção 4.3 apresenta-se um método expedito de selecção do tipo adequado de caudalímetro para uma determinada aplicação, sendo nele considerados os seguintes parâmetros:

- tipo do líquido em escoamento;
- carácter temporal da utilização do caudalímetro;
- incerteza de medição padrão;
- condicionamentos de instalação e operacionais.

²⁵ A incerteza de medição padrão está definida na quarta das sete notas adicionais que encerram a secção 7.4.

A secção 4.4 contém regras expeditas para dimensionamento hidráulico do primário do caudalímetro cujo tipo foi entretanto seleccionado, as quais utilizam os seguintes dados:

- valores mínimo, médio e máximo do caudal a medir;
- diâmetro interior da conduta onde a medição de caudal será efectuada.

Na secção 4.5 discriminam-se os requisitos hidráulicos cuja satisfação é determinante da adequada instalação do primário de cada um dos referidos caudalímetros, os quais incidem sobre os seguintes aspectos:

- orientação da conduta de instalação;
- posição de montagem;
- trechos de escoamento não perturbado a montante e a jusante;
- transições entre a conduta de instalação e a conduta principal, onde aquela se insere.

Na secção 4.6 referem-se aspectos importantes relativos à manutenção dos caudalímetros em questão, respeitantes quer às verificações periódicas quer às calibrações.

A simbologia utilizada neste capítulo consta na secção 4.7 e uma breve lista bibliográfica é apresentada na secção 4.8.

Dois anexos finalizam o capítulo: o Anexo 4.1, onde é sucintamente descrito um processo iterativo utilizável no dimensionamento hidráulico do primário de um caudalímetro deprimogéneo, e o Anexo 4.2, onde são identificadas transições concêntricas normalizadas que poderão ser usadas na ligação da conduta principal à conduta de instalação do primário de um caudalímetro.

4.2 Caudalímetros mais usuais utilizáveis em escoamentos sob pressão

4.2.1 Caudalímetros electromagnéticos

Um caudalímetro electromagnético utilizável num escoamento sob pressão é constituído pelos seguintes componentes:

- um **elemento primário** (ou **transdutor de caudal**), doravante designado apenas por **primário**, que cria um campo magnético através do qual se escoam o líquido, necessa-

riamente condutor eléctrico²⁶, cujo caudal se pretende medir, e que possui eléctrodos (normalmente dois) em contacto com o líquido, entre os quais surge uma diferença de potencial eléctrico (ou força electromotriz) induzida proporcional à velocidade média do escoamento e, por conseguinte, ao caudal;

- um **elemento secundário** (ou **condicionador de sinal**) construído com meios electrónicos, doravante designado apenas por **secundário**, que, para além de controlar a excitação do primário (ou seja, a criação do campo magnético), extrai o sinal de tensão induzido nos eléctrodos, amplificando-o e processando-o por forma a convertê-lo num sinal de saída normalizado proporcional ao caudal.

Existem dois tipos de caudalímetro electromagnético, que são denominados de acordo com o tipo do respectivo primário:

- **tubular**;
- **de inserção** (no escoamento).

A Figura 4.1 ilustra a constituição de cada um deles.

Um caudalímetro electromagnético tubular é utilizado muito mais vulgarmente do que um de inserção, pelo que, neste capítulo e noutros subsequentes, é também designado apenas por «caudalímetro electromagnético», quando isso não suscite dúvidas de interpretação.

Como se esquematiza na Figura 4.2, um primário tubular compreende essencialmente:

- um tubo cilíndrico de material não-magnético (que, se for metálico, terá de ser não-ferromagnético e possuir um revestimento interno electricamente isolador), no qual se escoo o líquido — o **tubo de medição**;
- um **electromagneto**, que gera o referido campo magnético, sendo a direcção deste perpendicular ao eixo do tubo de medição e, portanto, à direcção do escoamento;
- dois **eléctrodos**, que captam a diferença de potencial induzida, montados no tubo de medição em posições

²⁶ Actualmente, é vulgar um caudalímetro electromagnético requerer que o valor mínimo da condutividade eléctrica do líquido seja da ordem de $5 \mu\text{S cm}^{-1}$, valor que é pouco restritivo em sistemas de abastecimento de água e em sistemas de saneamento de águas residuais urbanas.

diametralmente opostas, aflorando à superfície interna deste²⁷ e com o respectivo eixo perpendicular à direcção do campo magnético.

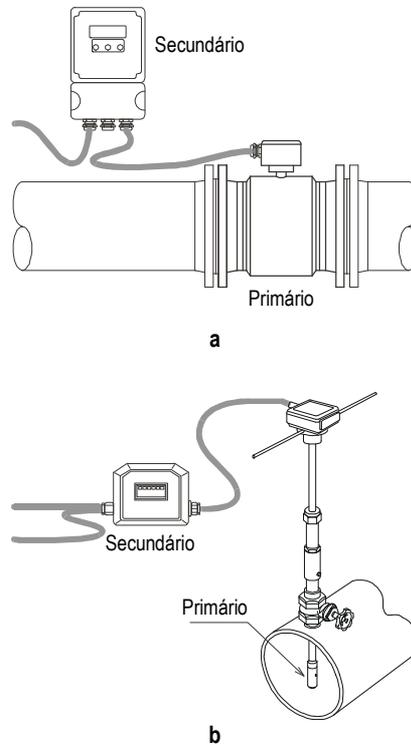
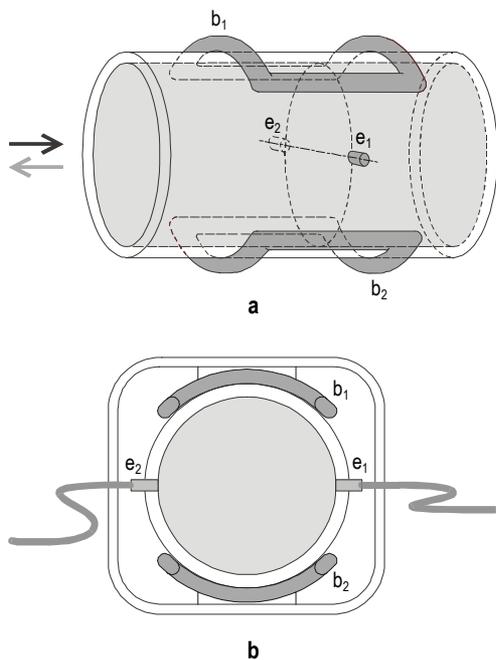


Figura 4.1 – Constituição de um caudalímetro electromagnético:
a – tubular; b – de inserção

O plano perpendicular à direcção do escoamento que contém o par de eléctrodos, que se designa por **plano dos eléctrodos**, é um importante plano de referência para a correcta instalação hidráulica do primário, como se refere na secção 4.5.

²⁷ No caso de o tubo de medição ser metálico, o seu revestimento interno isolador impede a ocorrência de curto-circuitos entre o material do tubo e os eléctrodos através do líquido.



b_1, b_2 – enrolamentos do electromagneto
 e_1, e_2 – eléctrodos

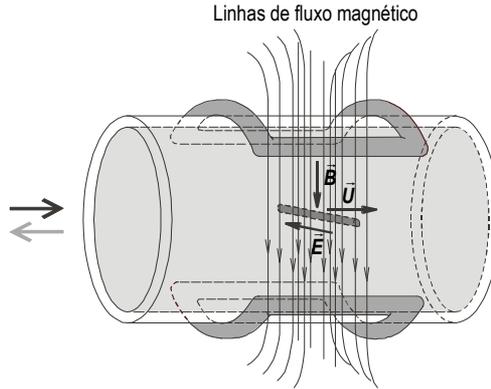
Figura 4.2 – Esquema do primário de um caudalímetro electromagnético tubular:
 a – perspectiva transparente; b – corte pelo plano dos eléctrodos

O princípio de transdução de um caudalímetro electromagnético baseia-se na lei de Faraday da indução electromagnética. Na Figura 4.3 esquematiza-se esse princípio no caso de um caudalímetro tubular.

De acordo com a referida lei, entre os dois eléctrodos surge uma força electromotriz \vec{E} induzida pelo escoamento do líquido no campo magnético, cujo módulo E é directamente proporcional à distância entre os eléctrodos e à velocidade média do escoamento U no tubo de medição, o que se pode traduzir pela expressão simplificada

$$E = k B D U \quad (4.1)$$

sendo k uma constante adimensional, B a densidade do fluxo magnético e D o diâmetro interior do tubo de medição (igual à distância entre os eléctrodos).



- \vec{B} – densidade do fluxo magnético
- \vec{E} – força electromotriz induzida entre os eléctrodos
- \vec{U} – velocidade média do escoamento

Figura 4.3 – Esquemática do princípio de transdução de um caudalímetro electromagnético tubular

Combinando a Equação (4.1) com a Equação (3.14), que relaciona U com o caudal Q , obtém-se a expressão

$$Q = \frac{\pi D E}{4 k B} \quad (4.2)$$

da qual resulta

$$Q = K \left(\frac{E}{B} \right) \quad (4.3)$$

sendo K a **constante do primário**, válida para qualquer líquido condutor e em toda a gama de medição do caudalímetro. O seu valor determina-se por ensaio de calibração com água, em conformidade com as normas ISO 6817 (1992) e ISO 9104 (1991), sendo sempre fornecido pelo fabricante do caudalímetro.

Para a concretização prática deste princípio de medição não se utiliza simplesmente um campo magnético constante. Com efeito, para um dado sentido de escoamento do líquido, essa situação contribuiria para a polarização dos eléctrodos e não permitiria rejeitar derivas de zero²⁸ e parcelas de força electromotriz de natureza electroquímica.

²⁸ A definição de «deriva» encontra-se no primeiro parágrafo da secção 7.5.9.

A solução preferível consiste na aplicação sucessiva de patamares de campo magnético alternados, o que se consegue com o controlo automático da intensidade da corrente de excitação, criando uma evolução temporal alternada aproximadamente trapezoidal; a Figura 4.4 ilustra estes detalhes.

Face à geometria e à natureza dos materiais em presença, a densidade do fluxo magnético B em cada ponto do volume de medição é proporcional à intensidade da corrente de excitação i_{exc} injectada nos enrolamentos do electromagneto do primário.

As tensões induzidas entre os eléctrodos e_a , e_b e e_c , correspondentes, respectivamente, a diferentes velocidades médias de escoamento U_a , U_b e U_c (com $U_a < U_b < U_c$), apresentam evoluções típicas como as que se apresentam na Figura 4.4.

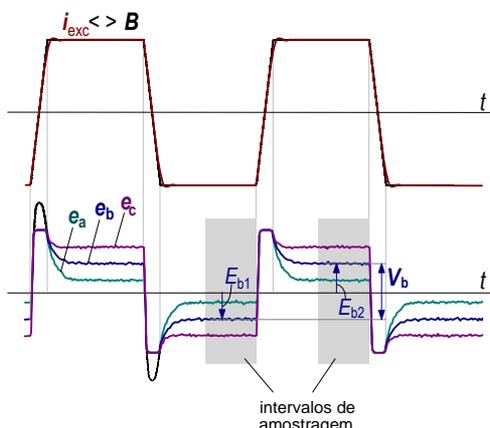


Figura 4.4 – Diagramas típicos de grandezas envolvidas na transdução electromagnética de caudal

Durante e algum tempo após as transições, existem fenómenos transitórios que afectam a tensão induzida entre os eléctrodos. Para que desta grandeza seja extraída informação sobre a velocidade média do escoamento é necessário, em cada patamar de excitação, esperar pela extinção do regime transitório. Por esse motivo, os intervalos de amostragem são restringidos à parte final desses patamares, como se mostra na Figura 4.4.

As diferenças entre valores de força electromotriz medidos em patamares inversos consecutivos (por exemplo $V_b = E_{b2} - E_{b1}$) permitem rejeitar componentes de deriva de zero e forças electromotrizs perturbadoras de modo comum.

sua exactidão de medição depende muito não apenas do rigor com que a sonda é posicionada, como também do valor da relação entre aquelas duas velocidades que na prática for adoptado.

Embora não permita alcançar tão boas exactidões como um caudalímetro electromagnético tubular, este tipo de aparelho pode trabalhar com frequências mais elevadas e consome muito menos energia no processo de excitação gerador do campo magnético.

As funções do secundário de qualquer caudalímetro electromagnético consistem em:

- estabelecer o campo magnético no primário com a evolução adequada, através de uma regulação muito apurada da intensidade da corrente de excitação, superando diversos efeitos perturbadores, como os devidos a flutuações na alimentação de energia eléctrica e a variações de resistência dos enrolamentos de excitação;
- amplificar e processar o sinal proveniente dos eléctrodos de modo a produzir um sinal limpo e robusto proporcional ao caudal.

A fim de tornar estes aparelhos compatíveis com outros equipamentos aos quais se podem ligar (por exemplo para afixação de leituras, para aquisição de dados, etc.), o secundário possui, em geral, uma ou várias saídas de sinal de tipos comuns, como sejam:

- saída analógica de corrente de acordo com a norma IEC 60381-1 (1982);
- saída analógica de tensão de acordo com a norma IEC 60381-2 (1978);
- saída de frequência pulsatória.

Os caudalímetros electromagnéticos modernos possuem unidades de processamento digital que lhes conferem ainda outras capacidades, tais como afixação de leituras em mostrador digital, meios de parametrização, auto-diagnóstico de estado e interface digital para comunicação de dados.

Um caudalímetro electromagnético pode medir em qualquer dos dois sentidos de escoamento, dado que a mudança do sentido de escoamento inverte a polaridade do sinal de caudal mas não lhe altera a amplitude. A forma de apresentar a gama bidireccional de caudais nos sinais de saída pode consistir na adopção de:

- sinal analógico bidireccional (de -10V a $+10\text{V}$ ou -20mA a $+20\text{mA}$, por exemplo);
- duas saídas de sinal pulsatório em frequência, uma para cada sentido de escoamento;
- uma saída pulsatória para a amplitude e uma saída binária para o sentido.

Mencionam-se no Quadro 4.1, para os dois tipos de caudalímetros electromagnéticos já referidos, valores típicos das incertezas de medição padrão do caudal especificadas pelos fabricantes. Importa chamar a atenção para o facto de esses valores crescerem consideravelmente para valores baixos da velocidade média do escoamento (inferiores a $0,5\text{ m s}^{-1}$).

Quadro 4.1 – Caudalímetros electromagnéticos: valores típicos da incerteza de medição padrão (relativos ao valor medido) para velocidade média do escoamento $\geq 1\text{ m s}^{-1}$

Tipo de caudalímetro electromagnético	Modo de excitação do primário	Incerteza de medição padrão (%)
Tubular	Tensão alternada compensada	$\pm 0,5$ a ± 1
	Corrente pulsatória regulada de baixa frequência	$\pm 0,2$ a $\pm 0,4$
De inserção	Corrente pulsatória regulada	± 2 a ± 4

4.2.2 Caudalímetros ultrassónicos

Essencialmente, um caudalímetro ultrassónico utilizável num escoamento sob pressão emite **ondas ultrassónicas** — podendo ser **contínuas** ou **pulsadas** (ou seja, constituídas por uma sequência de **pulsos de onda** com duração temporal muito curta) — que se propagam através do líquido, recebe-as depois de terem sofrido a influência do escoamento e usa o resultado dessa influência para medir o caudal.

Uma onda acústica cuja frequência é superior a 20 kHz — valor limite da frequência sonora perceptível pelo aparelho auditivo humano — designa-se por onda ultrassónica. Quer seja audível ou ultrassónica (isto é, independentemente da sua frequência), uma onda acústica proveniente de um emissor fixo propaga-se num dado meio (sólido, líquido ou gasoso), também em repouso, com uma velocidade que é a de propagação do som nesse meio.

Essa velocidade de propagação do som (ou apenas **velocidade do som**, como também se diz abreviadamente) é específica do

meio em causa e dependente da temperatura. Os valores contidos no Quadro 4.2 exemplificam essa dependência no caso da água; tratando-se de uma água residual urbana, pode-se admitir que esses mesmos valores lhe são aproximadamente aplicáveis.

Quadro 4.2 – Variação da velocidade do som na água com a temperatura

Temperatura (°C)	Velocidade do som na água (m s ⁻¹)
5	1426
10	1447
15	1466
20	1482
25	1497
30	1509

O líquido é o único meio de propagação das ondas utilizadas em caudalimetria ultrassónica considerado na presente secção. Para qualquer uma delas que se propague no líquido em repouso (situação de caudal nulo), entre a sua frequência f — cujo valor se situa tipicamente na gama de 1 a 5 MHz — e o seu comprimento de onda λ existe a relação

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (4.4)$$

sendo c a velocidade do som no líquido.

A Figura 4.6 esquematiza um tipo usual de caudalímetro ultrassónico utilizável em escoamentos sob pressão, cujos componentes são os seguintes:

- um par de **transdutores ultrassónicos** idênticos, orientados em oposição (isto é, com faces frente-a-frente), alinhados e em contacto com o líquido, dispondo cada um deles de um elemento piezoeléctrico que funciona alternadamente como emissor e receptor de ondas ultrassónicas²⁹;

²⁹ Um tal elemento — geralmente uma fina lâmina de cristal de quartzo ou de um material cerâmico apropriado — vibra com uma dada frequência ultrassónica quando lhe é aplicada, entre as duas faces, uma tensão eléctrica alternada com essa mesma frequência (ou seja, quando é submetido a excitação eléctrica, como também se diz) gerando então ondas ultrassónicas; inversamente, ondas

- um **tubo de medição** onde o par de transdutores ultrasónicos está montado, com o eixo deste situado num plano longitudinal daquele e inclinado em relação ao seu eixo, constituindo esse conjunto o **primário** do caudalímetro;
- um **condicionador de sinal** (ou **secundário**) que, para além de excitar o elemento piezoeléctrico do transdutor emissor, realiza o processamento digital dos sinais ultrasónicos intervenientes na transdução, convertendo-os em sinais de saída normalizados³⁰ proporcionais à velocidade média do escoamento e, por conseguinte, ao caudal.

Trata-se de um **caudalímetro ultrasónico tubular**³¹, assim designado em virtude do tipo de primário que possui, **de trajecto acústico** (ou simplesmente **trajecto**) **único**, visto possuir apenas um par de transdutores, e **de transmissão directa** das ondas ultrasónicas entre os dois transdutores.

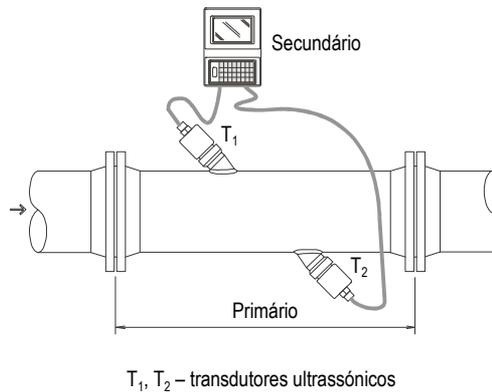


Figura 4.6 – Constituição de um caudalímetro ultrasónico tubular de trajecto único e transmissão directa

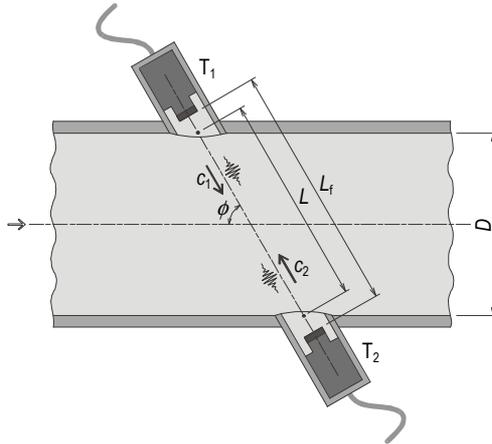
O respectivo princípio de transdução, que se esquematiza na Figura 4.7, baseia-se na diferença entre o **tempo de trânsito** (ou **tempo de propagação**) — ou seja, a duração temporal do percurso entre o transdutor emissor e o transdutor receptor — de um

ultrasónicas nele incidentes são convertidas em sinais eléctricos de tensão de igual frequência. Chama-se **efeito piezoeléctrico** a este fenómeno reversível.

³⁰ Sinais analógicos de corrente e de tensão e sinais de frequência pulsatória, como os referidos na secção precedente a propósito do secundário de um caudalímetro electromagnético.

³¹ Designado por *spool ultrasonic flowmeter* na literatura da especialidade em língua inglesa.

pulso de onda que se propaga para montante no líquido em escoamento e o tempo de trânsito de outro pulso de onda que se propaga para jusante, sendo por isso denominado também **caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito**. Assim, a designação completa do caudalímetro em questão é a seguinte: caudalímetro ultrassónico tubular de tempo de trânsito, de trajecto único e transmissão directa.



T₁ – transdutor ultrassónico emissor / receptor
 T₂ – transdutor ultrassónico receptor / emissor

Figura 4.7 – Esquemática do princípio de transdução de um caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito, de trajecto único e transmissão directa

No esquema desta figura, L_f representa o comprimento do percurso total de um pulso de onda entre os dois transdutores, igual à distância entre as faces destes; L — que por vezes se designa por **comprimento de interrogação** do caudalímetro ultrassónico — é a parte de L_f situada no interior do tubo de medição, sendo dado por

$$L = \frac{D}{\text{sen } \phi} \tag{4.5}$$

em que ϕ é o ângulo de inclinação do eixo do par de transdutores relativamente ao eixo do tubo de medição.

Em cada uma das duas zonas de reentrância das faces dos transdutores em relação à superfície interior do tubo de medição, onde o comprimento do percurso acústico é $(L_f - L)/2$, o pulso de onda propaga-se com a velocidade c , supondo que o líquido se encontra aí em repouso. No percurso L , no entanto, as velocidades de

propagação do pulso de onda para jusante c_1 (no sentido $T_1 \rightarrow T_2$) e para montante c_2 (no sentido $T_2 \rightarrow T_1$) sofrem a influência do escoamento, sendo

$$c_1 = c + U_p \cos \phi \quad (4.6)$$

$$c_2 = c - U_p \cos \phi \quad (4.7)$$

em que U_p é a velocidade média do escoamento ao longo do referido percurso.

Os correspondentes tempos de trânsito t_1 e t_2 são então dados pelas expressões

$$t_1 = \frac{L}{c + U_p \cos \phi} \quad (4.8)$$

$$t_2 = \frac{L}{c - U_p \cos \phi} \quad (4.9)$$

das quais resulta

$$U_p = \frac{L}{2 \cos \phi} \frac{\Delta t}{t_1 t_2} \quad (4.10)$$

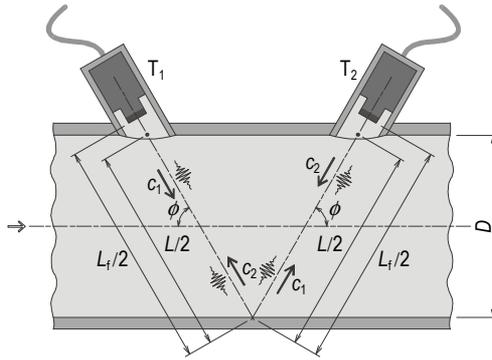
sendo $\Delta t = t_2 - t_1$.

Na situação de caudal nulo, $U_p = 0$ e o tempo de trânsito t_0 é o mesmo nos dois sentidos de propagação do pulso acústico, sendo então a velocidade do som no líquido determinada pelo caudalímetro de acordo com a seguinte relação, que decorre da conjugação das equações (4.5) e (4.8) ou (4.9), na qual a mensuranda é t_0 :

$$c = \frac{D}{t_0 \sin \phi} \quad (4.11)$$

Num caudalímetro de tempo de trânsito, de trajecto único mas de **transmissão por reflexão**³², os dois transdutores encontram-se instalados do mesmo lado do tubo de medição, como se mostra na Figura 4.8, o que possibilita a duplicação do comprimento de interrogação e, conseqüentemente, a redução da incerteza de medição relativamente à do caudalímetro antes referido.

³² A reflexão dos pulsos ultrassónicos ocorre na superfície interior do tubo de medição (ou da conduta de instalação, no caso de um caudalímetro com transdutores sobre a conduta que é mencionado um pouco mais adiante).



T_1 – transdutor ultrassónico emissor / receptor
 T_2 – transdutor ultrassónico receptor / emissor

Figura 4.8 – Esquemática do princípio de transdução de um caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito, de trajecto único e transmissão por reflexão

Em qualquer das configurações, transmissão directa ou transmissão por reflexão, um caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito e trajecto único mede indirectamente a velocidade média ao longo do percurso acústico, e não a velocidade média do escoamento U necessária para calcular o caudal. Para a determinação desta, o valor de U_p é multiplicado por um factor de correcção da distribuição de velocidades k_p , dependente do número de Reynolds³³ do escoamento no primário do caudalímetro, que pode ser calculado aproximadamente pela fórmula

$$k_p = \frac{1}{1,12 - 0,011 \log Re} \quad (4.12)$$

ficando então, a partir da Equação (4.10),

$$U = k_p \frac{L}{2 \cos \phi} \frac{\Delta t}{t_1 t_2} \quad (4.13)$$

Caudalímetros de tempo de trânsito com dois ou mais trajectos acústicos — em número igual ao de pares de transdutores — utilizam técnicas de integração adequadas para determinação de U a partir dos diversos valores de U_p , reduzindo assim as incertezas associadas a essa determinação decorrentes de varrimentos discretos do campo de velocidades do escoamento.

³³ Definido pela Equação (3.16).

Em caudalimetria com interesse no âmbito do presente Guia Técnico não se justifica a utilização de caudalímetros ultrassónicos de tempo de trânsito com mais de dois trajectos acústicos. Na Figura 4.9 mostra-se o primário de um caudalímetro desse tipo com dois pares de transdutores³⁴.

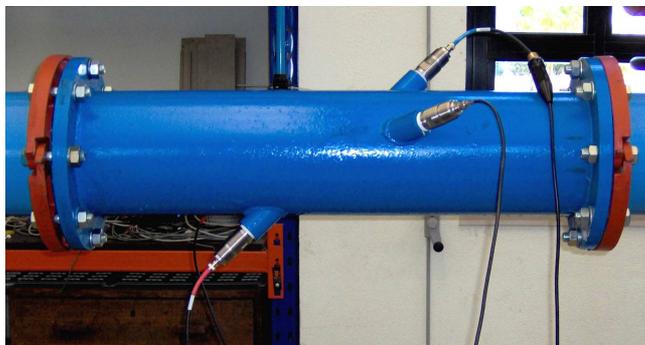


Figura 4.9 – Primário de um caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito com dois pares de transdutores (i. e. de duplo trajecto acústico)

Os transdutores de cada par podem ser excitados simultânea ou alternadamente, com uma ou várias transmissões de pulsos ultrassónicos em cada sentido; por outro lado, os dois pares podem ser operados independentemente ou de modo multiplexado.

Um outro tipo de caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito possui transdutores que, em lugar de contactarem o líquido, são montados na superfície exterior da própria conduta onde se pretende medir o caudal (que, nesse contexto, se denomina «conduta de instalação»), como no exemplo esquematizado na Figura 4.10. Um caudalímetro desse tipo, que pode ser designado por **caudalímetro com transdutores sobre a conduta**³⁵, apresenta-se na Figura 4.11.

³⁴ O transdutor que forma par com o do primeiro plano da fotografia não é visível por se encontrar no lado posterior do tubo de medição.

³⁵ É denominado *clamp-on ultrasonic flowmeter* na literatura da especialidade em inglês.

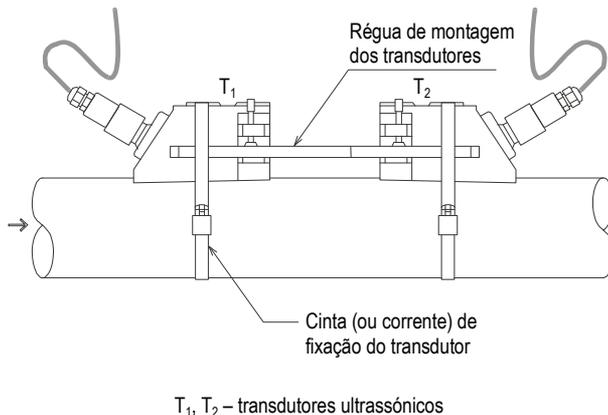


Figura 4.10 – Par de transdutores ultrassônicos montados sobre a conduta de instalação (vista de cima) em modo de transmissão por reflexão

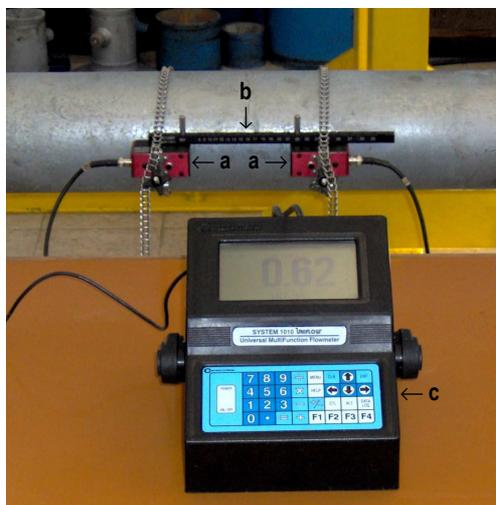


Figura 4.11 – Caudalímetro ultrassônico de tempo de trânsito com transdutores sobre a conduta: a – transdutores; b – régua de montagem dos transdutores; c – condicionador de sinal

Num caudalímetro com transdutores sobre a conduta, estes devem ser montados na zona média da superfície lateral da conduta de instalação, de um lado ou do outro, e não na parte superior desta, onde ar ou outro gás presente no escoamento se pode acumular; daí a indicação “(vista de cima)” na legenda da Figura 4.10. Por outro lado, é muito importante garantir, aquando da montagem, um bom acoplamento acústico entre as faces dos transdutores e a superfície da conduta, devendo para o efeito ser

utilizado um gel de montagem apropriado, geralmente fornecido pelo fabricante do caudalímetro.

A programação inicial de um caudalímetro de tempo de trânsito com transdutores sobre a conduta necessita de diversos dados operativos referentes ao líquido — tipo de líquido e sua temperatura — e à conduta de instalação — material, revestimentos, diâmetro interior e espessura de parede — com os quais o condicionador de sinal calcula o afastamento adequado dos transdutores; a régua de montagem destes permite então, de modo muito expedito, posicioná-los correctamente.

Qualquer material homogéneo que seja condutor sónico é adequado para a conduta de instalação; é o caso da maioria dos metais (aço carbono, aço inoxidável, ferro fundido, ferro fundido dúctil, etc.) e dos termoplásticos correntes; o mesmo não sucede com materiais não-homogéneos como o betão, o fibrocimento e alguns materiais compósitos (PRV³⁶, por exemplo). Qualquer revestimento adequado da conduta de instalação terá também de ser condutor sónico homogéneo e estar muito bem ligado à superfície da conduta.

O **caudalímetro ultrassónico Doppler** é um outro tipo de caudalímetro utilizável em escoamentos sob pressão, mas somente quando o líquido contém adequadas concentrações de descontinuidades acústicas — bolhas gasosas ou partículas sólidas em suspensão, por exemplo — que funcionem como reflectores das ondas ultrassónicas³⁷; a sua designação decorre de um efeito com o mesmo nome, no qual o respectivo princípio de transdução se fundamenta.

Aplicado a fenómenos acústicos, o **efeito Doppler** pode ser descrito sucintamente do seguinte modo³⁸: seja f a frequência de uma onda acústica incidente num receptor fixo e emitida por uma fonte também em repouso; se houver movimento relativo entre a fonte e o receptor, a frequência incidente neste difere de f , sendo-lhe

³⁶ Plástico (geralmente resina epoxídica) reforçado com fibra de vidro.

³⁷ Como regra prática, pode-se considerar que, para haver condições de reflexão das ondas, ou dos pulsos de onda, adequadas ao funcionamento de um caudalímetro ultrassónico Doppler, as concentrações e os tamanhos médios das descontinuidades acústicas presentes no líquido não devem ter valores inferiores aos seguintes: 100 a 200 ppm de bolhas gasosas com diâmetro médio entre 75 e 150 μm aproximadamente; 80 a 100 ppm de partículas sólidas com tamanho médio de cerca de 75 μm .

³⁸ Descrições mais pormenorizadas do efeito Doppler de onda contínua e de onda pulsada são apresentadas nas secções 5.4.2 e 5.4.3, respectivamente.

superior ou inferior consoante esse movimento for, respectivamente, de aproximação ou de afastamento. É nessa variação de frequência que o referido efeito consiste.

A Figura 4.12 esquematiza o princípio de transdução de um caudalímetro ultrassónico Doppler com um só transdutor (o que é usual) sobre a conduta; cada um dos dois elementos piezoeléctricos do transdutor funciona, em geral, alternadamente como emissor e como receptor das ondas ultrassónicas.

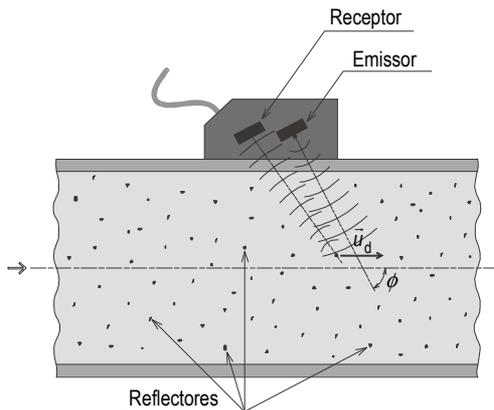


Figura 4.12 – Esquemática do princípio de transdução de um caudalímetro ultrassónico Doppler

Seja f_1 a frequência de emissão da onda ultrassónica, f_2 a frequência com que ela, depois de reflectida na descontinuidade acústica genérica que se desloca com velocidade \vec{u}_d , incide no receptor e ϕ o ângulo do eixo de cada um dos elementos piezoeléctricos (paralelos entre si) com o eixo da conduta de instalação, a relação entre essas duas frequências pode-se exprimir por

$$f_2 = \frac{c f_1}{c - 2 u_d \cos \phi} \quad (4.14)$$

donde resulta

$$\Delta f = \frac{2 f_1 u_d \cos \phi}{c - 2 u_d \cos \phi} \quad (4.15)$$

sendo $\Delta f = |f_2 - f_1|$ o módulo da diferença de frequências associada ao efeito Doppler.

Por ser u_d muito inferior a c , da Equação (4.15) obtém-se a relação

$$u_d \approx \frac{c}{2f_1 \cos \phi} \Delta f \quad (4.16)$$

que traduz a proporcionalidade directa aproximada entre a velocidade de cada descontinuidade acústica reflectora e a diferença de frequências em questão.

Mediante integração da Equação (4.16), um caudalímetro ultrasónico Doppler mede a velocidade média U_d dos reflectores acústicos arrastados pelo escoamento (e não a velocidade média U deste), a qual é então aproximadamente proporcional ao valor médio $\overline{\Delta f}$ das diferenças de frequências associadas ao efeito Doppler:

$$U_d \approx k \overline{\Delta f} \quad (4.17)$$

sendo $k = \frac{c}{2f_1 \cos \phi}$ a constante de proporcionalidade.

Um caudalímetro ultrasónico Doppler não dispõe, em geral, de mais do que dois transdutores. Se tiver um par de transdutores, cada um deles possui apenas um elemento piezoeléctrico — e não dois, como no exemplo de transdutor único apresentado na Figura 4.12. O(s) transdutor(es) pode(m) contactar com o líquido, fazendo parte de um primário tubular, ou estar montado(s) sobre a conduta de instalação, como no caso da referida figura.

Para os diversos tipos de caudalímetros ultrasónicos mencionados, o Quadro 4.3 apresenta valores típicos das incertezas de medição padrão da velocidade média do escoamento especificadas pelos fabricantes. Para valores baixos dessa mensuranda (inferiores a $0,5 \text{ m s}^{-1}$), as incertezas de medição padrão poderão ter valores bastante superiores aos que constam no quadro.

Quadro 4.3 – Caudalímetros ultrassónicos: valores típicos da incerteza de medição padrão para velocidade média do escoamento $\geq 1 \text{ m s}^{-1}$

Tipo de caudalímetro ultrassónico	Modo de transmissão das ondas ultrassónicas*	Incerteza de medição padrão (%)	
		Relativa ao valor medido	Relativa ao fim-de-escala**
De tempo de trânsito, tubular, com um par de transdutores	Directa	$\pm 1,5$	–
	Reflexão na superfície interior do tubo de medição	$\pm 1 \text{ a } \pm 1,5$	–
De tempo de trânsito, tubular, com dois pares de transdutores	Directa	$\pm 0,7 \text{ a } \pm 1$	–
	Reflexão na superfície interior do tubo de medição	$\pm 0,5 \text{ a } \pm 1$	–
De tempo de trânsito, com um par de transdutores sobre a conduta	Directa	$\pm 2 \text{ a } \pm 5$	–
	Reflexão na superfície interior da conduta de instalação	$\pm 1,5 \text{ a } \pm 2$	–
Doppler, com um transdutor sobre a conduta	Reflexão em descontinuidades acústicas existentes no escoamento	–	$\pm 1 \text{ a } \pm 5$

* Entre transdutores de um par ou entre elementos piezoeléctricos de um transdutor (caso usual do caudalímetro Doppler).

** O valor de 10 m s^{-1} é típico da velocidade média do escoamento correspondente ao fim-de-escala.

4.2.3 Caudalímetros deprimogéneos

Como se mostra na Figura 4.13, um caudalímetro deprimogéneo, também denominado caudalímetro de pressão diferencial, utilizável em escoamentos sob pressão é constituído pelos seguintes componentes:

- um **primário**, que é inserido na conduta de instalação, o qual introduz um estreitamento no escoamento de que resulta um aumento de energia cinética e um conseqüente decréscimo da altura piezométrica — e, portanto, uma diminuição de pressão — entre duas secções molhadas próximas do estreitamento, uma a montante e outra a jusante, sendo essa depressão função do quadrado do caudal;
- um **secundário**, que é basicamente um manómetro diferencial dotado de meios de cálculo do caudal.

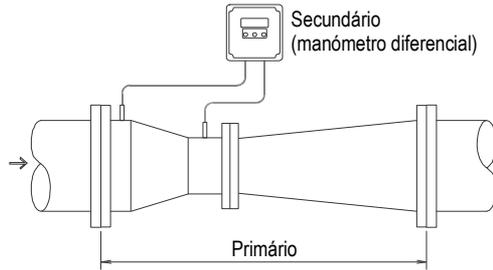
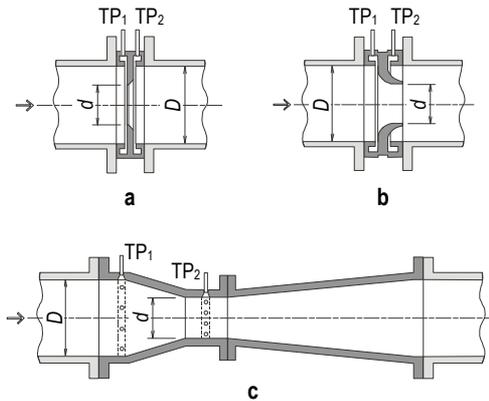


Figura 4.13 – Constituição de um caudalímetro deprimogéneo

Os três tipos de caudalímetro deprimogéneo mais usuais, cada um deles denominado de acordo com o tipo do respectivo primário, são os seguintes:

- caudalímetro de diafragma;
- caudalímetro de bocal³⁹;
- caudalímetro de tubo Venturi.

Os seus primários são objecto, respectivamente, das partes 2, 3 e 4 da norma ISO 5167 (2003). Exemplos típicos deles, representados em corte longitudinal, estão esquematizados na Figura 4.14. Podem ser utilizados apenas em escoamentos unidireccionais.



TP₁ – tomada de pressão de montante
 TP₂ – tomada de pressão de jusante

Figura 4.14 – Primários de caudalímetros deprimogéneos: a – diafragma; b – bocal; c – tubo Venturi

³⁹ O bocal ISA 1932 é um dos mais usuais; ISA 1932 é uma norma produzida pela ISA – International Federation of the National Standardizing Associations, à qual sucedeu a ISO – International Organization for Standardization em 1946.

No escoamento onde um qualquer desses primários esteja inserido, considerem-se as secções molhadas S_1 , situada a montante e próxima do estreitamento, e S_2 , localizada no estreitamento ou imediatamente a jusante dele, nas quais se supõe que a distribuição de pressões é aproximadamente hidrostática; as suas áreas são $A_1 = \frac{\pi D^2}{4}$ e $A_2 = \frac{\pi d^2}{4}$, sendo D o diâmetro interior da conduta de instalação e d o diâmetro do estreitamento.

Designando por h_{pi} a cota piezométrica $\frac{p_i}{\gamma} + z_i$ em S_i ($i = 1, 2$), sendo p_i a pressão e z_i a cota geométrica respeitantes ao centro de S_i , de acordo com o teorema de Bernoulli, expresso pela Equação (3.25), e admitindo que, para o caudal Q , a perda de carga entre as duas secções é proporcional ao quadrado deste⁴⁰, pode-se escrever

$$\left(h_{p1} + \alpha_1 \frac{Q^2}{2gA_1^2} \right) - \left(h_{p2} + \alpha_2 \frac{Q^2}{2gA_2^2} \right) = k \frac{Q^2}{2gA_1^2} \quad (4.18)$$

sendo α_i o coeficiente de Coriolis em S_i , g a aceleração da gravidade e k um factor constante. A partir da Equação (4.18), a diferença de cotas piezométricas entre as duas secções $\Delta h_p = h_{p1} - h_{p2}$ pode-se exprimir por

$$\Delta h_p = \left[(k - \alpha_1) \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 + \alpha_2 \right] \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad (4.19)$$

donde resulta

$$Q = \xi \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2g\Delta h_p} \quad (4.20)$$

sendo ξ o **coeficiente de escoamento** do primário.

É usual considerar o coeficiente de escoamento como o produto do **coeficiente de vazão** C — que, na totalidade dos casos que interessam no âmbito do presente Guia Técnico, compensa o efeito aumentativo da “vena contracta”⁴¹ sobre Δh_p , sendo, por isso, sempre inferior a 1 — e do **coeficiente de velocidade de**

⁴⁰ Atente-se nas equações (3.28) e (3.35).

⁴¹ Ver o penúltimo parágrafo da secção 3.4.4.

aproximação $\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$, em que $\beta = \frac{d}{D}$. A Equação (4.20)

pode-se então escrever

$$Q = C\varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2g\Delta h_p} \quad (4.21)$$

expressão que, se o primário estiver instalado horizontalmente ($z_1 = z_2$), se transforma em

$$Q = C\varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4.22)$$

sendo Δp a diferença de pressão entre S_1 e S_2 e ρ a massa volúmica do líquido.

Para um dado primário inserido na respectiva conduta de instalação, a relação de diâmetros β é constante — o mesmo sucedendo, portanto, ao factor ε — e o coeficiente de vazão é função apenas do número de Reynolds do escoamento na conduta de instalação Re^{42} . O fabricante do caudalímetro deve fornecer a equação dessa função (casos do diafragma e do bocal) ou os valores de C para certos intervalos de Re (caso do tubo Venturi), geralmente obtidos por calibração do primário; informação do mesmo teor consta na parte da norma ISO 5167 (2003) — 2, 3 ou 4 — aplicável ao primário em causa.

Valores típicos do coeficiente de vazão dos três tipos de primários referidos encontram-se no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Caudalímetros deprimogéneos: valores típicos do coeficiente de vazão de primários para $2 \times 10^5 \leq Re \leq 2 \times 10^6$

Tipo de primário	Diâmetro da conduta de instalação D (mm)	Relação de diâmetros β (-)	Coeficiente de vazão C (-)
Diafragma	100 a 1000	0,20 a 0,75	0,595 a 0,600
Bocal	50 a 500	0,30 a 0,75	0,987 a 0,992
Tubo Venturi	200 a 800	0,30 a 0,75	0,985 a 0,995

⁴² Definido pela Equação (3.16).

Sendo conhecida a relação $C = C(Re)$, a Equação (4.21) ou (4.22) permite a determinação do caudal a partir dos valores de Δh_p ou Δp medidos pelo caudalímetro.

Para os três tipos de caudalímetros deprimogéneos em questão, apresentam-se no Quadro 4.5 valores típicos da incerteza de medição padrão baseados em informação que consta na norma ISO 5167 (2003).

Quadro 4.5 – Caudalímetros deprimogéneos: valores típicos da incerteza de medição padrão (relativos ao valor medido) para $2 \times 10^5 \leq Re \leq 2 \times 10^6$

Tipo de caudalímetro deprimogéneo	Incerteza de medição padrão (%)
Caudalímetro de diafragma	$\pm 1,5$ a ± 2
Caudalímetro de bocal	± 2 a ± 3
Caudalímetro de tubo Venturi	$\pm 1,5$ a ± 2

4.3 Selecção do tipo adequado de caudalímetro

4.3.1 Símbolos designativos dos diversos tipos de caudalímetros

Para simplificar a exposição e facilitar a leitura do método de selecção do tipo adequado de caudalímetro que se apresenta na secção seguinte, são utilizados os símbolos que constam no Quadro 4.6 para designar os diversos tipos de caudalímetros tratados nas secções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 que se consideram mais relevantes no âmbito do presente Guia Técnico.

4.3.2 Método expedito de selecção do tipo adequado de caudalímetro

No Quadro 4.7 discriminam-se os parâmetros e os requisitos a eles associados que, em geral, são considerados importantes aquando da selecção de um tipo adequado de caudalímetro para uma certa aplicação e identificam-se os tipos de caudalímetros que, genericamente, satisfazem cada um desses requisitos. Assim, uma vez estabelecidos os requisitos para uma dada situação concreta de medição de caudal num escoamento sob pressão, o recurso à informação contida no quadro constitui um método expedito de selecção preliminar do(s) tipo(s) de caudalímetro apropriado(s) para o efeito.

Quadro 4.6 – Símbolos designativos dos diversos tipos de caudalímetros para escoamentos sob pressão utilizados no método de selecção do tipo adequado de caudalímetro

Caudalímetro		Símbolo designativo
Tipo	Subtipo	
Caudalímetro electromagnético tubular	–	E ₁
Caudalímetro electromagnético de inserção	–	E ₂
Caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito, tubular, com um par de transdutores	–	U ₁
	Transmissão directa	U ₁₁
	Transmissão por reflexão	U ₁₂
Caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito, tubular, com dois pares de transdutores	–	U ₂
	Transmissão directa	U ₂₁
	Transmissão por reflexão	U ₂₂
Caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito com um par de transdutores sobre a conduta	Transmissão directa	U ₃₁
	Transmissão por reflexão	U ₃₂
Caudalímetro ultrassónico Doppler	–	U ₄
Caudalímetro deprimogéneo de diafragma	–	D ₁
Caudalímetro deprimogéneo de bocal	–	D ₂
Caudalímetro deprimogéneo de tubo Venturi	–	D ₃

Quadro 4.7 – Informação básica para selecção preliminar do(s) tipo(s) adequado(s) de caudalímetro para escoamentos sob pressão

Dados para selecção		Tipos de caudalímetros adequados
Parâmetro	Requisito	
Tipo do líquido em escoamento	Água	E ₁ , E ₂ , U ₁ , U ₂ , U ₃ , D ₁ , D ₂ , D ₃
	Água residual urbana	E ₁ , U ₁ , U ₂ , U ₃ , U ₄
Carácter temporal da utilização do caudalímetro	Permanente	E ₁ , E ₂ , U ₁ , U ₂ , U ₃ , U ₄ , D ₁ , D ₂ , D ₃
	Temporária	E ₂ , U ₃ , U ₄
Versatilidade operativa	Funcionamento bidireccional	E ₁ , E ₂ , U ₁ , U ₂ , U ₃ , U ₄
Incerteza de medição padrão relativa (% do valor medido) para $U = 1 \text{ m s}^{-1}$	$< \pm 0,5$	E ₁ **
	$\geq \pm 0,5$ e $< \pm 1,0$	E ₁ *, U ₂₁ , U ₂₂
	$\geq \pm 1,0$ e $< \pm 2,0$	U ₁₁ , U ₁₂ , U ₃₂ , D ₁ , D ₃
	$\geq \pm 2,0$ e $< \pm 5,0$	E ₂ , U ₃₁ , D ₂
	$\geq \pm 5,0$	U ₄

* Com excitação do primário por tensão alternada compensada (ver o Quadro 4.1).

** Com excitação do primário por corrente pulsatória regulada de baixa frequência (idem).

Requisitos complementares aos apresentados no Quadro 4.7 que porventura seja necessário adoptar poderão eventualmente contribuir para aumentar a convergência do método de selecção do tipo de caudalímetro mais conveniente para a situação em causa. São exemplos de tais requisitos os seguintes:

- limites máximos dos comprimentos rectos de conduta a montante e a jusante do primário;
- amplitude mínima de medição;
- limites máximos dos custos de aquisição e de instalação.

4.4 Dimensionamento hidráulico

4.4.1 Parâmetros de dimensionamento

Caudalímetros electromagnéticos

O dimensionamento hidráulico do primário de um caudalímetro electromagnético tubular resume-se à determinação do valor mais adequado do seu diâmetro nominal. Tal como sucede com os tubos comerciais componentes de condutas, o valor numérico do diâmetro nominal do primário nunca é igual ao valor do seu diâmetro interior D expresso em milímetros — que varia com a marca e o modelo do primário, com a classificação de pressão (PN) das suas flanges de ligação e, eventualmente, com o tipo de revestimento interno do respectivo tubo de medição — mas, em geral, pouco difere dele⁴³.

A conduta onde o primário fica instalado — adiante denominada **conduta de instalação** — deve ter um diâmetro nominal igual ao

⁴³ Com efeito, o primário de um caudalímetro electromagnético tubular de certa marca e determinado modelo com, por exemplo, diâmetro nominal DN 500 tem, de acordo com informação do fabricante, os seguintes valores do diâmetro interior (que não dependem do material de revestimento do tubo de medição, o que pode não acontecer noutras marcas):

Classe de pressão das flanges	Diâmetro interior (mm)
PN 10	489
PN 16	489
PN 25	487

Por outro lado, tubos comerciais de aço de DN 500, com 508 mm de diâmetro exterior e, por exemplo, 11 mm de espessura de parede, têm diâmetro interior igual a 486 mm.

do próprio primário⁴⁴ e, como se verá na secção 4.4.2, inferior ao diâmetro nominal da **conduta principal**, na qual a conduta de instalação está inserida⁴⁵.

Os dados necessários para o referido dimensionamento são os seguintes:

- valor médio Q , limite superior Q_{\max} e limite inferior Q_{\min} da gama de valores previstos do caudal a medir — que se designam por **caudal médio**, **caudal máximo** e **caudal mínimo de dimensionamento**, respectivamente;
- diâmetro interior D_c da conduta principal, eventualmente⁴⁶.

No caso de um caudalímetro electromagnético de inserção, somente a conduta de instalação tem de ser objecto de dimensionamento, que consiste simplesmente na determinação do valor conveniente do seu diâmetro nominal. O dado mais relevante necessário para o efeito é Q_{\max} ; Q e Q_{\min} poderão eventualmente ser utilizados para avaliar as correspondentes condições operativas do caudalímetro.

Caudalímetros ultrassónicos

No caso de um caudalímetro ultrassónico, de tempo de trânsito ou Doppler, o dimensionamento hidráulico do seu primário tubular ou da conduta de instalação do(s) seu(s) transdutor(es) consiste na determinação do valor mais adequado do respectivo diâmetro nominal, sendo em tudo semelhante ao dimensionamento do primário de um caudalímetro electromagnético tubular acabado de referir. Os parâmetros necessários para o efeito são, por conseguinte, os mesmos.

Caudalímetros deprimogéneos

Uma vez seleccionado o seu tipo, o primário deprimogéneo a instalar numa dada conduta terá de ser objecto de dimensionamento

⁴⁴ Sempre que seja praticamente exequível, e não havendo outras recomendações do fabricante do caudalímetro, o diâmetro interior da conduta de instalação, de acordo com as normas ISO 6817 (1992) e ISO 9104 (1991), não deve ser inferior ao diâmetro interior do primário nem excedê-lo em mais do que 3%. Não seria esse o caso de uma conduta constituída por tubos com as características dimensionais dos referidos na nota precedente, na qual ficasse instalado um primário de DN 500 como o que também aí é mencionado.

⁴⁵ A Figura 4.18, na secção 4.5.1, ilustra estas definições de «conduta de instalação» e de «conduta principal».

⁴⁶ Se for usada a regra de dimensionamento que se baseia na utilização do ábaco da Figura 4.15, o parâmetro D_c é irrelevante.

hidráulico, que visa a determinação da respectiva relação de diâmetros β mais adequada à medição de caudal que se pretende efectuar. Os dados que o dimensionamento requer são os seguintes:

- Q_{\max} ;
- pressão p^* , para caudal igual a Q_{\max} , numa secção molhada da conduta imediatamente a montante da posição onde o primário ficará instalado;
- valor máximo previsto para a temperatura do líquido θ_{\max} ;
- pressão de saturação do vapor do líquido $(p_v)_{\max}$ à temperatura θ_{\max} ⁴⁷.

4.4.2 Regras de dimensionamento

Caudalímetros electromagnéticos

A optimização do custo de aquisição e do desempenho metrológico de um caudalímetro electromagnético tubular decorre do correcto dimensionamento hidráulico do seu primário. Num primeiro passo, este deve ser dimensionado de modo que a velocidade média U correspondente ao caudal médio de dimensionamento Q tenha, sempre que possível, valores entre 4 e 5 m s⁻¹ aproximadamente.

De acordo com o princípio da continuidade, Q é o mesmo no primário e na conduta principal. Assim, conjugando as equações (3.14) e (3.17), pode-se escrever

$$U \frac{\pi D^2}{4} = U_c \frac{\pi D_c^2}{4} \quad (4.23)$$

sendo U_c a velocidade média do escoamento na conduta principal correspondente a Q .

Conclui-se então que

$$\frac{D}{D_c} = \sqrt{\frac{U_c}{U}} \quad (4.24)$$

Apresentam-se no Quadro 4.8, para valores de U_c usuais em condutas de sistemas de abastecimento de água, ou de sistemas de

⁴⁷ Ver a secção 3.2 e o Quadro 3.2.

saneamento de águas residuais urbanas, e supondo $U = 4,5 \text{ m s}^{-1}$ (que é o valor médio do intervalo acima mencionado), os correspondentes valores da relação de diâmetros expressa pela Equação (4.24), cuja gama se considera recomendável.

Quadro 4.8 – Caudalímetros electromagnéticos tubulares: gama recomendável de valores da relação entre diâmetros interiores do primário e da conduta principal para o caudal médio de dimensionamento

Velocidade média do escoamento na conduta principal U_c (m s^{-1})	Relação entre as velocidades médias do escoamento na conduta principal e no primário*	Relação entre os diâmetros interiores do primário e da conduta principal $\frac{D}{D_c}$
1,0	0,22	0,47
1,1	0,24	0,49
1,2	0,27	0,52
1,3	0,29	0,54
1,4	0,31	0,56
1,5	0,33	0,58
1,6	0,36	0,60
1,7	0,38	0,61
1,8	0,40	0,63
1,9	0,42	0,65
2,0	0,44	0,67

* Supondo que a velocidade média do escoamento no primário do caudalímetro electromagnético é $U = 4,5 \text{ m s}^{-1}$.

Correspondentes aos mesmos valores de U_c e a quatro valores de $\frac{D}{D_c}$ — 0,50, 0,55, 0,60 e 0,65 — contidos na referida gama recomendável, encontram-se no Quadro 4.9 os valores de U , estando assinalados os que se consideram aceitáveis. Com base nestes e em função de U_c , pode-se seleccionar, de entre aqueles quatro valores de $\frac{D}{D_c}$, o que for mais conveniente em cada caso.

Uma vez escolhido o valor adequado de $\frac{D}{D_c}$, o Quadro 4.10 possibilita o dimensionamento expedito do primário do caudalímetro electromagnético, mediante selecção do seu diâmetro nominal em função do diâmetro nominal da conduta principal.

Quadro 4.9 – Caudalímetros electromagnéticos tubulares: correspondências recomendáveis entre velocidades médias do escoamento no primário e na conduta principal (para o caudal médio de dimensionamento) em função das relações entre os respectivos diâmetros interiores

Velocidade média do escoamento na conduta principal U_c ($m\ s^{-1}$)	Velocidade média do escoamento no primário U ($m\ s^{-1}$)			
	$\frac{D}{D_c} = 0,50$	$\frac{D}{D_c} = 0,55$	$\frac{D}{D_c} = 0,60$	$\frac{D}{D_c} = 0,65$
1,0	4,0	3,3	2,8	2,4
1,1	4,4	3,6	3,1	2,6
1,2	4,8	4,0	3,3	2,8
1,3	5,2	4,3	3,6	3,1
1,4	5,6	4,6	3,9	3,3
1,5	6,0	5,0	4,2	3,6
1,6	6,4	5,3	4,4	3,8
1,7	6,8	5,6	4,7	4,0
1,8	7,2	6,0	5,0	4,3
1,9	7,6	6,3	5,3	4,5
2,0	8,0	6,6	5,6	4,7

NOTA: Os valores recomendáveis da velocidade média do escoamento no primário estão contidos nas células sombreadas a cinzento mais escuro.

Uma regra alternativa para dimensionamento do primário de um caudalímetro electromagnético tubular — mais simples e mais versátil do que a anterior, sendo, por conseguinte, preferível — baseia-se na utilização do ábaco da Figura 4.15, cujos eixos têm escalas logarítmicas. Entrando nele com o valor do caudal médio de dimensionamento e com o respectivo valor conveniente de U (entre 4 e 5 $m\ s^{-1}$, como antes se referiu⁴⁸), respectivamente como ordenada e como abcissa, fica definido o ponto de selecção do diâmetro nominal adequado para o primário: ele será o que corresponde ao segmento de recta do qual o ponto ficar mais próximo.

⁴⁸ A correspondente faixa útil do ábaco está nele sombreada.

Quadro 4.10 – Caudalímetros electromagnéticos tubulares: correspondências entre diâmetros nominais do primário e da conduta principal em função das relações entre os respectivos diâmetros interiores

Diâmetro nominal da conduta principal	Diâmetro nominal do primário			
	$\frac{D}{D_c} = 0,50$	$\frac{D}{D_c} = 0,55$	$\frac{D}{D_c} = 0,60$	$\frac{D}{D_c} = 0,65$
DN 50	DN 25	DN 25	DN 32	DN 32
DN 65	DN 32	DN 32	DN 40	DN 40
DN 80	DN 40	DN 40	DN 50	DN 50
DN 100	DN 50	DN 50	DN 65	DN 65
DN 125	DN 65	DN 65	DN 80	DN 80
DN 150	DN 80	DN 80	DN 80 ou DN 100	DN 100
DN 200	DN 100	DN 100	DN 125	DN 125
DN 250	DN 125	DN 125 ou DN 150	DN 150	DN 150
DN 300	DN 150	DN 150	DN 200	DN 200
DN 350	DN 200	DN 200	DN 200	DN 250
DN 400	DN 200	DN 200	DN 250	DN 250
DN 500	DN 250	DN 300	DN 300	DN 300 ou DN 350
DN 600	DN 300	DN 350	DN 350	DN 400
DN 700	DN 350	DN 400	DN 400	DN 500
DN 800	DN 400	DN 400	DN 500	DN 500
DN 900	DN 500	DN 500	DN 500	DN 600
DN 1000	DN 500	DN 500 ou DN 600	DN 600	DN 600 ou DN 700
DN 1200	DN 600	DN 700	DN 700	DN 800
DN 1400	DN 700	DN 800	DN 800	DN 900
DN 1600	DN 800	DN 900	DN 1000	DN 1000
DN 1800	DN 900	DN 1000	DN 1100	DN 1200
DN 2000	DN 1000	DN 1000 ou DN 1200	DN 1200	DN 1200 ou DN 1400

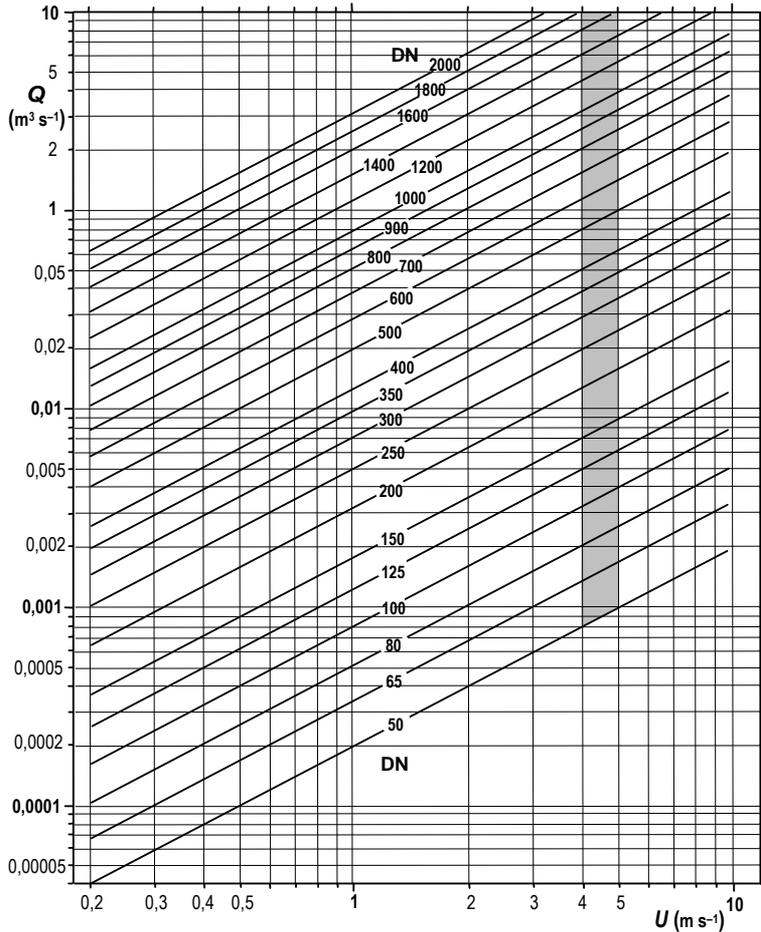


Figura 4.15 – Ábaco de dimensionamento do primário tubular, ou da conduta de instalação do primário, de um caudalímetro

O segundo passo do dimensionamento consiste em verificar se o valor U_{\max} da velocidade média do escoamento no primário correspondente a Q_{\max} é demasiadamente elevado⁴⁹; se for esse o caso, o diâmetro nominal do primário deve ser aumentado para que tal circunstância não ocorra.

Por último, deve-se verificar se, para o diâmetro nominal entretanto seleccionado, o valor U_{\min} da velocidade média do escoamento no primário correspondente a Q_{\min} é inferior a $0,5 \text{ m s}^{-1}$ —

⁴⁹ Superior a cerca de 6 m s^{-1} , por exemplo; no entanto, a condição “ U_{\max} demasiadamente elevada” deverá ser definida em cada situação concreta.

situação que, pelas razões aduzidas na secção 4.2.1 a propósito do Quadro 4.1, convém evitar.

Em suma, o resultado do dimensionamento do primário de um caudalímetro electromagnético tubular deve ser um diâmetro nominal que, tanto quanto possível, possibilite a satisfação conjunta das seguintes condições de escoamento no primário:

- $U \approx 4$ a 5 m s^{-1} ;
- $U_{\text{max}} \leq 6 \text{ m s}^{-1}$;
- $U_{\text{min}} \geq 0,5 \text{ m s}^{-1}$.

No caso de um caudalímetro electromagnético de inserção, é a conduta de instalação, como se referiu na secção 4.4.1, que tem de ser dimensionada: o seu diâmetro interior deve ser tal que o valor U_{max} da velocidade média do escoamento correspondente a Q_{max} não exceda o limite superior admissível U_{Max} recomendado pelo fabricante do caudalímetro, o qual depende da posição de instalação do primário na secção de medição.

A Figura 4.16 apresenta as duas posições mais usuais de instalação do primário na secção de medição e o Quadro 4.11 contém, para cada uma delas, valores típicos de U_{Max} para valores do diâmetro nominal da conduta de instalação entre DN 200 e DN 1400. Em cada caso concreto de dimensionamento, as recomendações do fabricante do caudalímetro devem prevalecer sobre os valores de U_{Max} que constam nesse quadro.

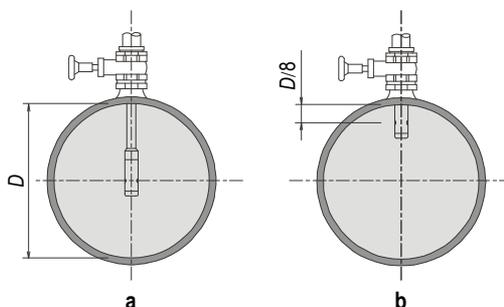


Figura 4.16 – Posições mais usuais de instalação do primário de um caudalímetro electromagnético de inserção na secção de medição: a – par de electrodos centrado; b – par de electrodos em $D/8$

Quadro 4.11 – Caudalímetros electromagnéticos de inserção: valores típicos do limite máximo da velocidade máxima admissível na conduta de instalação do primário (m s⁻¹)

Diâmetro nominal da conduta de instalação	Posição de instalação do primário*	
	a	b
DN 200	5,0	5,0
DN 250		
DN 300		
DN 350		
DN 400		
DN 500		
DN 600	4,0	
DN 700	3,5	
DN 800	3,0	
DN 900	2,5	
DN 1000	2,2	
DN 1200	1,5	
DN 1400	1,3	

* Ver a Figura 4.16.

Entrando com a abcissa U_{Max} e com a ordenada Q_{max} no ábaco da Figura 4.15, determina-se o menor diâmetro nominal da conduta de instalação que permite cumprir a condição $U_{max} < U_{Max}$. Se não for conhecido o diâmetro interior D correspondente a esse diâmetro nominal, o cálculo aproximado de U_{max} pode ser efectuado admitindo que $D = D_n$, sendo D_n um diâmetro interior fictício que, expresso em milímetros, é numericamente igual ao valor do diâmetro nominal⁵⁰.

Os valores de U e U_{min} , calculados a partir de Q e Q_{min} para aquele diâmetro nominal da conduta de instalação, permitirão concluir se as correspondentes condições operativas do caudalímetro são satisfatórias do ponto de vista metrológico. Essas condições podem ser assim classificadas se $U \geq 1 \text{ m s}^{-1}$ e $U_{min} \geq 0,5 \text{ m s}^{-1}$, havendo sempre conveniência em que os respectivos valores sejam tão elevados quanto possível.

Caudalímetros ultrassónicos

Qualquer das duas regras, acima descritas, para dimensionar o primário de um caudalímetro electromagnético tubular — mas pre-

⁵⁰ Este procedimento é geralmente adoptado para, utilizando a Equação (3.14), calcular aproximadamente o valor de qualquer velocidade média do escoamento numa conduta de diâmetro nominal conhecido.

ferentemente a baseada na utilização do ábaco da Figura 4.15 — é aplicável ao dimensionamento hidráulico do primário tubular ou da conduta de instalação do(s) transdutor(es) de um caudalímetro ultrassónico, seja de tempo de trânsito ou Doppler.

As condições de escoamento proporcionadas pelo diâmetro nominal resultante do dimensionamento deverão ser, na medida do possível, as mesmas que se referiram para U , U_{\max} e U_{\min} no caso do primário tubular de um caudalímetro electromagnético, com a ressalva relativamente a U_{\max} que consta na nota de pé-de-página n.º 49.

Caudalímetros deprimogéneos

Qualquer que seja o tipo de primário deprimogéneo escolhido, ele deve ser dimensionado por forma a que ao diâmetro d do respectivo estreitamento — e, por conseguinte, à respectiva relação de diâmetros β — corresponda, para Q_{\max} e em conformidade com a Equação (4.22), uma depressão Δp inferior a $p^* - (\rho_v)_{\max}$, isto é, de modo a que não ocorra cavitação a jusante do estreitamento. Porém, o coeficiente de vazão é também uma incógnita na referida equação, visto ser função de β e de Re^{51} , pelo que o cálculo de β terá de ser efectuado por iteração; é então conveniente reescrever a Equação (4.22) de forma adequada para o efeito:

$$\frac{C\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} = \frac{4Q_{\max}}{\pi D^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}} \quad (4.25)$$

ou

$$\frac{C\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} = \frac{\rho \mu Re_{\max}}{D\sqrt{2\Delta p}} \quad (4.26)$$

em que no segundo membro, que é o invariante no processo iterativo, μ é a viscosidade dinâmica do líquido⁵² à temperatura θ_{\max} e Re_{\max} o número de Reynolds do escoamento na conduta de instalação do primário para Q_{\max} . O Anexo 4.1 apresenta, de forma sucinta, um processo iterativo rapidamente convergente utilizável para resolver a Equação (4.26).

⁵¹ As partes 2 e 3 da norma ISO 5167 (2003) apresentam as equações de $C = C(\beta, Re)$ referentes ao diafragma e ao bocal, respectivamente, e a parte 4 dessa norma quantifica C para certos intervalos de D , β e Re no caso do tubo Venturi.

⁵² Ver a secção 3.2 e o Quadro 3.1.

4.5 Requisitos hidráulicos de instalação

4.5.1 Caudalímetros electromagnéticos

Quando em funcionamento, um caudalímetro electromagnético tubular deve ter sempre o tubo de medição do primário completamente cheio de líquido, visto a existência de ar ou de outro gás no líquido poder afectar o seu desempenho metrológico.

Se a fase gasosa existir sob a forma de bolhas muito pequenas, constituindo uma dispersão mais ou menos homogénea no líquido, o caudalímetro funciona normalmente, mas mede o caudal da mistura líquido-gás que é maior do que o caudal do líquido; mas se estiver presente sob a forma de bolhas com tamanho igual ou superior ao diâmetro dos eléctrodos, o sinal de caudal torna-se ruidoso, podendo mesmo anular-se.

Por outro lado, o gás existente no escoamento pode acumular-se no primário se a localização deste na conduta de instalação ou a orientação desta não obstarem a essa eventualidade. Alguns exemplos de instalações adequadas e inadequadas do primário de um caudalímetro electromagnético tubular são esquematizados na Figura 4.17.

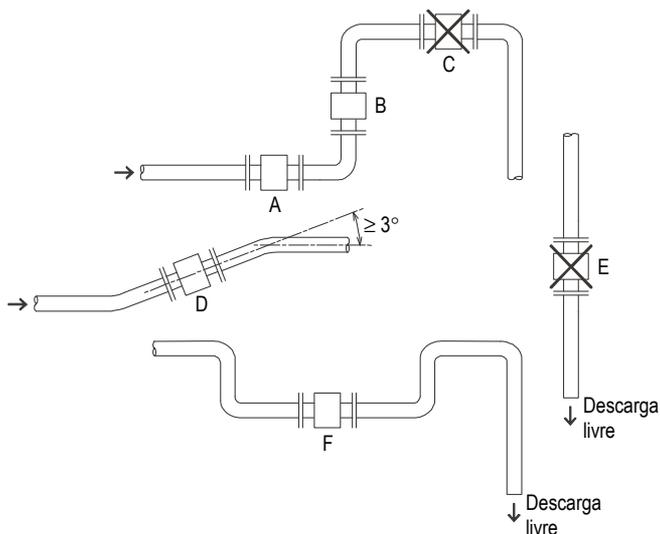


Figura 4.17 – Exemplos de instalações adequadas e inadequadas do primário de um caudalímetro electromagnético tubular

A melhor orientação para a conduta de instalação é a vertical, com o escoamento ascendente (exemplo B); porém, nem sempre isso é exequível, sendo então conveniente que ela seja inclinada no

sentido ascendente do escoamento, com ângulo de inclinação $\geq 3^\circ$ (exemplo D).

A instalação do primário em conduta horizontal é aceitável desde que esta se localize a cota inferior à da conduta principal (exemplos A e F). As localizações do primário correspondentes aos exemplos C e E são inadequadas, a primeira por propiciar a acumulação de gás porventura existente no escoamento, a segunda porque a conduta de instalação e o próprio primário poderão não ficar completamente cheios de líquido, em especial para valores baixos do caudal.

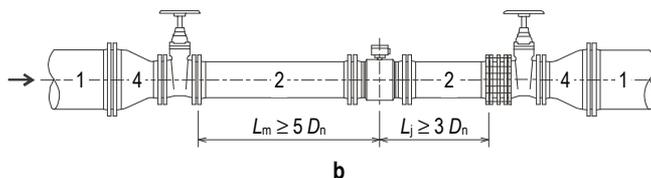
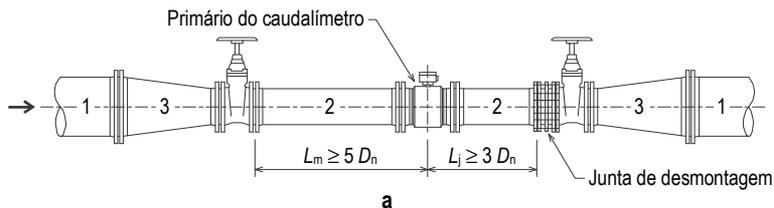
No caso de instalação do primário em conduta inclinada ou horizontal, o eixo dos eléctrodos deve ficar horizontal.

O perfil de velocidades do escoamento na conduta de instalação⁵³, especialmente a montante mas também a jusante do primário, não deve ser perturbado por componentes ou singularidades nela existentes; se o for, o desempenho metrológico do caudalímetro pode ser significativamente afectado. Para obviar a que tal suceda, o primário deve ser instalado de modo a ficar com comprimentos rectos de conduta, a montante e a jusante, não inferiores a determinados valores mínimos.

Define-se **comprimento recto de conduta** — não apenas neste contexto, mas em qualquer caso de instalação do primário de um caudalímetro de qualquer tipo — como a extensão axial, medida a partir de determinada referência no primário, de um trecho rectilíneo da conduta de instalação, cuja secção transversal se supõe constante.

No caso vertente do primário de um caudalímetro electromagnético tubular, os comprimentos rectos de conduta a montante L_m e a jusante L_j , que são medidos a partir do plano dos eléctrodos, não devem ser inferiores aos especificados pelo fabricante, com mínimos absolutos de, respectivamente, $5 D_n$ e $3 D_n$, referindo-se D_n ao primário (e também à conduta de instalação, que tem o mesmo diâmetro nominal, conforme foi referido na secção 4.4.1), tal como a Figura 4.18 ilustra.

⁵³ Na conduta de instalação, o escoamento deverá ser uniforme turbulento completamente desenvolvido, com perfil de velocidades semelhante ao apresentado na Figura 3.6-b.



- 1 – Conduto principal
- 2 – Conduto de instalação do primário
- 3 – Transição cônica
- 4 – Transição concêntrica ASME B16.9

Figura 4.18 – Instalação do primário de um caudalímetro electromagnético tubular com utilização unidireccional: comprimentos rectos de conduta a montante e a jusante do primário e transições entre a conduta principal e a conduta de instalação

Para que esse importante requisito de instalação seja respeitado, uma junta de desmontagem — contrariando uma prática que é algo frequente — não deve ser ligada directamente ao primário, devendo antes ficar situada a jusante deste após um comprimento recto de conduta de pelo menos $3 D_n$. Se o caudalímetro tiver utilização bidireccional, qualquer dos comprimentos rectos deve ser igual ou superior a $5 D_n$.

As válvulas de seccionamento da conduta de instalação, a montante e a jusante, devem ser de passagem plena quando totalmente abertas (válvulas de cunha elástica, por exemplo).

Quando o diâmetro nominal da conduta de instalação for inferior ao da conduta principal, situação que ocorre quase sempre (ver a secção 4.4.2), a transição entre as duas condutas, tanto a montante como a jusante, deve ser de um dos dois tipos seguintes, que a Figura 4.18 apresenta esquematicamente:

- cone com ângulo de abertura total não superior a 15° (Figura 4.18-a);
- transição concêntrica segundo a norma ASME B16.9-2003 (2004) (Figura 4.18-b).

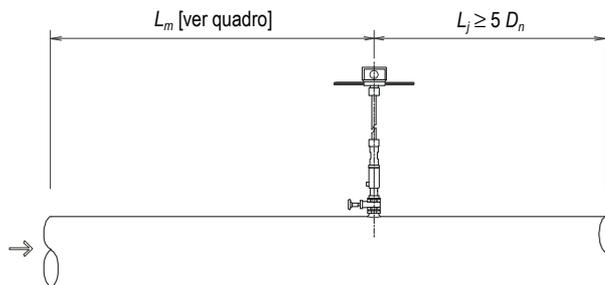
Em relação ao cone correspondente, a transição concêntrica apresenta, em geral, as seguintes vantagens:

- atravancamento bastante menor, visto ser mais curta;
- geometria hidrodinâmica;
- disponibilidade no mercado;
- custo expectável inferior.

As transições concêntricas utilizáveis na ligação entre a conduta principal (com diâmetro nominal entre DN 50 e DN 900) e a conduta de instalação do primário de qualquer caudalímetro estão identificadas no Anexo 4.2 por meio dos seus tamanhos nominais (expressos em polegadas, como na norma, e também como diâmetros nominais).

No caso de um caudalímetro electromagnético de inserção, o primário fica geralmente instalado na secção de medição numa ou noutra das duas posições apresentadas na Figura 4.16. Com o primário na posição “par de eléctrodos centrado”, o caudalímetro mede um valor local da velocidade que, em princípio, pouco difere do valor máximo na secção molhada; o condicionador de sinal utiliza então a relação entre esse valor medido da velocidade do escoamento e a velocidade média U para, a partir desta, calcular o caudal. Com o primário na posição “par de eléctrodos em $D/8$ ”, o valor local da velocidade do escoamento medido pelo caudalímetro é supostamente igual a U , conforme foi referido no último parágrafo da secção 3.4.2 e ilustrado na Figura 3.6.

Os comprimentos rectos de conduta a adoptar na instalação do primário de um caudalímetro electromagnético de inserção devem ser os especificados pelo fabricante, cujos valores não são geralmente inferiores aos que se apresentam na Figura 4.19.



Posição do primário na secção de medição	L_m
“Par de eléctrodos centrado”	$\geq 30 D_n$
“Par de eléctrodos em $D/8$ ”	$\geq 10 D_n$

Figura 4.19 – Instalação do primário de um caudalímetro electromagnético de inserção: comprimentos rectos de conduta

4.5.2 Caudalímetros ultrassónicos

Os exemplos de instalações adequadas e inadequadas do primário de um caudalímetro electromagnético apresentados na Figura 4.17 são inteiramente aplicáveis ao primário, ou ao(s) transdutor(es) montado(s) sobre a conduta, de um caudalímetro ultrassónico de tempo de trânsito ou Doppler; o mesmo sucede quanto ao que foi dito, nos dois parágrafos subsequentes à referida figura, relativamente às situações de instalação adequada (exemplos B, D, A e F) e às de instalação inadequada (exemplos C e E).

A instalação do primário, ou do(s) transdutor(es) montado(s) sobre a conduta, de qualquer caudalímetro ultrassónico deve ser efectuada de modo que os comprimentos rectos de conduta sejam $L_m \geq 10 D_n$ e $L_j \geq 5 D_n$, referindo-se D_n à conduta de instalação; cada um deles é medido, consoante o caso, a partir da extremidade do primário, ou da face do transdutor, situada do lado respectivo — montante para L_m e jusante para L_j .

As transições entre a conduta de instalação e a conduta principal devem ser de um dos dois tipos apresentados na Figura 4.18 e identificados no terceiro parágrafo a ela subsequente.

4.5.3 Caudalímetros deprimogéneos

A instalação do primário de qualquer caudalímetro deprimogéneo deve ser realizada de modo que, quando em operação, sejam cumpridos os seguintes requisitos:

- conduta de instalação e primário completamente cheios do líquido;
- escoamento turbulento uniforme completamente desenvolvido e irrotacional imediatamente a montante do primário.

Os valores mínimos de L_m e L_j dependem do tipo do primário. Para um diafragma e um bocal, esses valores são apresentados, respectivamente, nos quadros 4.12 e 4.13 para diversos valores da relação de diâmetros β e em dois casos de singularidades vulgarmente existentes a montante na conduta de instalação:

- curva a 90°;

- válvula de seccionamento de passagem plena quando totalmente aberta⁵⁴.

Quadro 4.12 – Instalação de um diafragma: valores mínimos dos comprimentos rectos de conduta a montante e a jusante (expressos como múltiplos de D_n)^{*}

Relação de diâmetros β (-)	Comprimento recto a montante L_m ($\times D_n$)				Comprimento recto a jusante L_j ($\times D_n$)			
	Desde curva a 90°		Desde válvula totalmente aberta		A		B	
	A	B	A	B				
$\leq 0,20$	6	3	12	6	4	2		
0,40	16	3	12	6	6	3		
0,50	22	9	12	6	6	3		
0,60	42	13	14	7	7	3,5		
0,67	44	20	18	9	7	3,5		
0,75	44	20	24	12	8	4		

* Valores nas colunas A: não implicam acréscimo da incerteza de medição padrão; valores nas colunas B: implicam um acréscimo de $\pm 0,5\%$ na incerteza de medição padrão.

Quadro 4.13 – Instalação de um bocal: valores mínimos dos comprimentos rectos de conduta a montante e a jusante (expressos como múltiplos de D_n)^{*}

Relação de diâmetros β (-)	Comprimento recto a montante L_m ($\times D_n$)				Comprimento recto a jusante L_j ($\times D_n$)			
	Desde curva a 90°		Desde válvula totalmente aberta		A		B	
	A	B	A	B				
0,20	10	6	12	6	4	2		
0,30	10	6	12	6	5	2,5		
0,40	14	7	12	6	6	3		
0,50	14	7	12	6	6	3		
0,60	18	9	14	7	7	3,5		
0,70	28	14	20	10	7	3,5		
0,80	46	23	30	15	8	4		

* Valores nas colunas A: não implicam acréscimo da incerteza de medição padrão; valores nas colunas B: implicam um acréscimo de $\pm 0,5\%$ na incerteza de medição padrão.

⁵⁴ Designada apenas por «válvula» nos quadros 4.12, 4.13 e 4.14; trata-se de uma válvula de cunha ou de uma válvula de obturador esférico, por exemplo, mas não de uma válvula de borboleta.

Para outras singularidades a montante, porventura menos usuais, os valores mínimos de L_m podem ser obtidos nas partes 2 e 3 da norma ISO 5167 (2003), continuando os de L_j a ser os que constam nos referidos quadros.

No caso de um tubo Venturi, os valores mínimos de L_m , também correspondentes às duas singularidades consideradas nos dois quadros anteriores, são apresentados no Quadro 4.14; quanto ao comprimento recto a jusante, independentemente do valor de β e das especificidades da instalação, nunca deve ser inferior ao quádruplo do diâmetro do respectivo estreitamento: $L_j \geq 4 d$.

Para outras singularidades existentes na condução de instalação a montante de um tubo Venturi, os correspondentes valores mínimos de L_m podem ser consultados na parte 4 da norma ISO 5167 (2003).

Quadro 4.14 – Instalação de um tubo Venturi: valores mínimos dos comprimentos rectos de condução a montante (expressos como múltiplos de D_n)*

Relação de diâmetros β (-)	Comprimento recto a montante			
	L_m ($\times D_n$)			
	Desde curva a 90°		Desde válvula totalmente aberta	
	A	B	A	B
0,30	8	3	2,5	–
0,40	8	3	2,5	–
0,50	9	3	3,5	2,5
0,60	10	3	4,5	2,5
0,70	14	3	5,5	3,5
0,75	16	8	5,5	3,5

* Valores nas colunas A: não implicam acréscimo da incerteza de medição padrão; valores nas colunas B: implicam um acréscimo de $\pm 0,5\%$ na incerteza de medição padrão.

Seja qual for o tipo do primário deprimogéneo, L_m e L_j devem ser medidos a partir, respectivamente, do plano da tomada de pressão de montante e do plano da tomada de pressão de jusante (ver a Figura 4.14).

A utilização de um condicionador de escoamento⁵⁵, instalado suficientemente a montante de qualquer dos primários deprimogéneos

⁵⁵ A sua finalidade é tornar o escoamento tanto quanto possível irrotacional e estabilizar o seu perfil de velocidades; no Anexo C da parte 1 da norma ISO 5167 (2003) são apresentados exemplos de condicionadores de escoamento apropriados.

(a partir de cuja extremidade de jusante passa então L_m a ser medido), possibilita a diminuição dos valores mínimos de L_m que constam nas colunas A dos três quadros precedentes sem que a incerteza de medição padrão do respectivo caudalímetro seja afectada.

4.6 Manutenção

4.6.1 Verificações periódicas e acções correctivas

As recomendações do fabricante relativamente a verificações⁵⁶ periódicas de manutenção preventiva a efectuar sobre o primário e o secundário de um dado caudalímetro devem ser escrupulosamente seguidas. Se essas recomendações não existirem, deve ser elaborado um plano de realização dessas verificações periódicas, adequadamente conjugadas com outras de índole semelhante a executar sobre os sistemas electrotécnicos associados ao caudalímetro, sendo muito importante que nesse plano sejam consideradas pelo menos as seguintes:

- verificação das condições de instalação, com o objectivo de averiguar a existência de alguma alteração relativamente às originais;
- verificação do estado das ligações entre o primário e o secundário;
- verificação da correcta parametrização (ou programação) do secundário;
- verificação operacional do caudalímetro, que se baseia na realização de diagnósticos de funcionamento do primário e do secundário, recorrendo a aparelhos simuladores de um e outro desses elementos, que são geralmente produzidos ou comercializados pelo fabricante do caudalímetro⁵⁷.

A periodicidade de cada uma dessas verificações não deve ser superior a seis meses, especialmente quando os valores medidos pelo caudalímetro são usados para facturação.

⁵⁶ A acepção do termo «verificação» neste contexto é diferente daquela que tem no âmbito da metrologia legal.

⁵⁷ Por vezes, a verificação operacional do caudalímetro é impropriamente designada por «calibração a seco».

Qualquer anomalia observada durante as verificações periódicas deve ficar anotada em folha de registo, ou em base de dados informática, apropriada para esse efeito; por outro lado, é muito conveniente que, sempre que possível, seja solucionada de imediato, devendo a correspondente acção correctiva ser também apontada no mesmo suporte para registo de ocorrências.

Se for diagnosticada uma avaria no caudalímetro cuja reparação não seja exequível *in situ* e/ou se preveja demorada, a solução preferível poderá ser a substituição temporária do caudalímetro avariado por outro, porventura portátil. Uma vez reparado, o caudalímetro deve ser submetido a calibração antes de ser reinstalado.

4.6.2 Calibrações

Qualquer caudalímetro utilizável em escoamentos sob pressão nos sistemas que interessam ao presente Guia Técnico deve ter sido submetido pelo fabricante, ou por entidade habilitada para o efeito por ele designada, a uma primeira calibração, de preferência realizada com cinco patamares de caudal — vulgarmente designada por **calibração de cinco pontos** — ou com maior número destes. Assim, aquando do seu fornecimento ao adquirente, um caudalímetro deve ser acompanhado pelo certificado dessa calibração, cujo conteúdo deve estar de acordo com o que a secção 7.6.4 refere.

Após a entrada em serviço, cada caudalímetro deve ser periodicamente recalibrado mediante ensaio hidráulico de comparação com outro caudalímetro, ou sistema de medição de caudal em conformidade, por exemplo, com a norma ISO 4185 (1980) ou ISO 8316 (1987), utilizado como referência, cuja incerteza de medição não deve ser superior a 1/3 da incerteza de medição do caudalímetro em causa determinada na calibração precedente.

Cada recalibração do caudalímetro deve ser:

- de cinco pontos (pelo menos), devendo o respectivo certificado conter a informação discriminada na secção 7.6.4, a que acima se aludiu;

- efectuada por laboratório de ensaios hidráulicos habilitado para o efeito, de preferência acreditado, e possuindo rastreabilidade metrológica⁵⁸ apropriada.

A definição da periodicidade de recalibração de um dado caudalímetro — que incumbe à entidade que o detém e utiliza — deve depender da análise prévia de diversas questões respeitantes ao caudalímetro, designadamente as seguintes:

- requisitos de incerteza de medição do caudal estabelecidos por essa entidade;
- depreciação do desempenho metrológico do caudalímetro no decurso do tempo — caracterizada, por exemplo, pela deriva média;
- diâmetro nominal do primário⁵⁹;
- finalidade da utilização do caudalímetro — facturação ou monitorização — e inconvenientes resultantes do seu uso fora do intervalo de incertezas de medição estabelecido;
- historial de calibrações e de acções de manutenção em serviço;
- formação e treino do pessoal interveniente na operação e manutenção do caudalímetro;
- existência e localização geográfica de laboratório(s) de ensaios hidráulicos habilitado(s) a realizar calibrações;
- custos inerentes a cada calibração e às operações complementares que lhe estão associadas — desmontagem, transporte e montagem do caudalímetro.

Relativamente a caudalímetros tubulares — em geral os mais relevantes tanto em sistemas de abastecimento de água como em sistemas de saneamento de águas residuais urbanas — cujos valores medidos, ou totalizados por integração, se destinam essencialmente a facturação, apresentam-se no Quadro 4.15, para duas gamas do diâmetro nominal do primário — $< \text{DN } 400$ e $\geq \text{DN } 400$ — valores indicativos do respectivo período de recalibração.

Se os caudalímetros em causa servirem apenas para controlo operacional do sistema de que fazem parte, os valores do período

⁵⁸ Ver a secção 7.6.3.

⁵⁹ No caso de um caudalímetro deprimogéneo, o diâmetro nominal do primário é o da conduta de instalação.

de recalibração que constam no Quadro 4.15 podem ser acrescidos de 6 meses.

Quadro 4.15 – Valores indicativos do período de recalibração de caudalímetros tubulares utilizados para facturação

Tipo de caudalímetro tubular	Período de recalibração (mês)	
	DN do primário < DN 400	DN do primário ≥ DN 400
Electromagnético	18	24
Ultrassónico de tempo de trânsito	18	24
Ultrassónico Doppler	12	18
Deprimogéneo	18	24

Quanto a caudalímetros geralmente portáteis — tais como o electromagnético de inserção e o ultrassónico, de tempo de trânsito ou Doppler, com transdutor(es) sobre a conduta — que tenham utilização temporária mas muito frequente, o que é vulgar, é recomendável que o respectivo período de recalibração seja de aproximadamente 12 meses.

A periodicidade de recalibração de um caudalímetro deve ser revista periodicamente, podendo ser reajustada — diminuída ou aumentada — no decurso do tempo com base na experiência e em informação normativa e técnico-científica fidedigna.

4.7 Simbologia

Quadro 4.16 – Simbologia utilizada no Capítulo 4

Símbolo	Grandeza	Unidade de medida SI
B	Densidade de fluxo magnético	T
c	Velocidade de propagação do som	m s^{-1}
C	Coefficiente de vazão do primário de um caudalímetro deprimogéneo	–
d	Diâmetro do estreitamento do primário de um caudalímetro deprimogéneo	m
D	Diâmetro interior (do primário tubular de um caudalímetro; de uma conduta)	m

D_n	Diâmetro interior fictício (do primário tubular de um caudalímetro; de uma conduta) que, expresso em milímetros, é numericamente igual ao valor do diâmetro nominal	m
E	Força electromotriz (ou tensão eléctrica) induzida	V
f	Frequência de uma onda ultrassónica	Hz
g	Aceleração da gravidade	$m\ s^{-2}$
h_p	Cota piezométrica relativa a um plano horizontal de referência	m
i_{exc}	Intensidade da corrente de excitação do primário de um caudalímetro electromagnético	A
k	Constante de proporcionalidade	*
K	Constante do primário de um caudalímetro electromagnético	m
k_p	Factor de correcção do perfil de velocidades do escoamento ao longo do percurso de um pulso ultrassónico	-
L	Comprimento de interrogação de um caudalímetro ultrassónico	m
L_j	Comprimento recto de conduta a jusante do primário de um caudalímetro	m
L_t	Comprimento do percurso total de um pulso ultrassónico no interior do líquido; distância entre faces de dois transdutores ultrassónicos	m
L_m	Comprimento recto de conduta a montante do primário de um caudalímetro	m
p	Pressão	Pa
p^*	Pressão, para caudal igual a Q_{max} , numa secção imediatamente a montante do estreitamento do primário de um caudalímetro deprimogéneo	Pa
p_v	Pressão de saturação do vapor do líquido	Pa
$(p_v)_{max}$	Pressão de saturação do vapor do líquido à temperatura θ_{max}	Pa
Q	Caudal; caudal médio de dimensionamento (do primário de um caudalímetro; da conduta de instalação do primário de um caudalímetro)	$m^3\ s^{-1}$
Q_{max}	Caudal máximo de dimensionamento (do primário de um caudalímetro; da conduta de instalação do primário de um caudalímetro)	$m^3\ s^{-1}$
Q_{min}	Caudal mínimo de dimensionamento (do primário de um caudalímetro; da conduta de instalação do primário de um caudalímetro)	$m^3\ s^{-1}$

Re	Número de Reynolds do escoamento numa conduta	–
Re_{max}	Número de Reynolds do escoamento numa conduta para caudal igual a Q_{max}	–
t	Tempo de trânsito de um pulso ultrassónico	s
t_0	Tempo de trânsito de um pulso ultrassónico na situação de caudal nulo	s
U	Velocidade média do escoamento; velocidade média do escoamento correspondente ao caudal médio de dimensionamento Q (no primário de um caudalímetro; na conduta de instalação do primário de um caudalímetro)	$m\ s^{-1}$
u_d	Velocidade de uma descontinuidade acústica existente no líquido em escoamento	$m\ s^{-1}$
U_d	Velocidade média das descontinuidades acústicas existentes no líquido em escoamento	$m\ s^{-1}$
U_{max}	Velocidade média do escoamento correspondente ao caudal máximo de dimensionamento Q_{max} (no primário de um caudalímetro; na conduta de instalação do primário de um caudalímetro)	$m\ s^{-1}$
U_{Max}	Valor máximo admissível da velocidade média do escoamento na conduta de instalação do primário de um caudalímetro electromagnético de inserção	$m\ s^{-1}$
U_{min}	Velocidade média do escoamento correspondente ao caudal mínimo de dimensionamento Q_{min} (no primário de um caudalímetro; na conduta de instalação do primário de um caudalímetro)	$m\ s^{-1}$
U_p	Velocidade média do escoamento ao longo do percurso de um pulso ultrassónico	$m\ s^{-1}$
V	Tensão eléctrica produzida pelo secundário de um caudalímetro electromagnético a partir do sinal de caudal recolhido do primário	V
X	Variável de iteração utilizável no dimensionamento hidráulico do primário de um caudalímetro de-primogéneo	–
z	Cota geométrica relativa a um plano horizontal de referência	m
α	Coefficiente de Coriolis	–
β	Relação de diâmetros d/D	–
Δh_p	Diferença de cotas piezométricas	m
Δf	Módulo da diferença de frequências de uma onda acústica medida por um caudalímetro ultrassónico Doppler	Hz

$\overline{\Delta f}$	Média de valores de Δf	Hz
Δt	Diferença de tempos de trânsito de um pulso ultrassônico	s
ε	Coefficiente da velocidade de aproximação do primário de um caudalímetro deprimogéneo	–
θ_{\max}	Valor máximo previsto para a temperatura do líquido	K
λ	Comprimento de onda de uma onda ultrassônica	m
μ	Viscosidade dinâmica do líquido	Pa·s
ξ	Coefficiente de escoamento do primário de um caudalímetro deprimogéneo	–
ρ	Massa volúmica do líquido	kg m ⁻³
ϕ	Ângulo	rad

* Dependente das grandezas intervenientes na relação de proporcionalidade.

4.8 Bibliografia

ASME BS16.9-2003 – *Factory-made wrought butt welding fittings*. New York, NY (EUA), The American Society of Mechanical Engineers, 2004.

IEC 60381-1 – *Analogue signals for process control systems – Part 1: Direct current signals*. Genève (Suíça), International Electrotechnical Commission, 1982.

IEC 60381-2 – *Analogue signals for process control systems – Part 2: Direct voltage signals*. Genève (Suíça), International Electrotechnical Commission, 1978.

ISO 4185 – *Measurement of liquid flow in closed conduits – Weighing method*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1980.

ISO 5167-1 – *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 2003.

ISO 5167-2 – *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 2: Orifice plates*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 2003.

ISO 5167-3 – *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 3: Nozzles and Venturi nozzles*. Genève (Suiça), International Organization for Standardization, 2003.

ISO 5167-4 – *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 4: Venturi tubes*. Genève (Suiça), International Organization for Standardization, 2003.

ISO 6817 – *Measurement of conductive liquid flow in closed conduits – Method using electromagnetic flowmeters*. Genève (Suiça), International Organization for Standardization, 1992.

ISO 8316 – *Measurement of liquid flow in closed conduits – Method by collection of the liquid in a volumetric tank*. Genève (Suiça), International Organization for Standardization, 1987.

ISO 9104 – *Measurement of fluid flow in closed conduits – Methods of evaluating the performance of electromagnetic flow-meters for liquids*. Genève (Suiça), International Organization for Standardization, 1991.

Lencastre, A. – *Hidráulica Geral*. Lisboa, Hidroprojecto, 1983.

Omega – *Transactions in Measurement and Control. Vol. 4 – Flow and Level Measurement*. Stamford, Connecticut (EUA), Omega Engineering, Inc., 1998.

[Disponível em <https://www.omega.com/literature/litdownload.html>]

Polo, J.; Pallas-Areny, R.; Martin-Vide, J. P. – “Analog signal processing in an ac electromagnetic flowmeter”, *Proc. of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference – Budapest, May 21 – 23, 2001*, pág.^s 2136 – 2139.

Quintela, A. C. – *Hidráulica*. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 5.^a Edição, 1996.

U.S. Water Resources Research Laboratory – *Water Measurement Manual*. Denver, Colorado (EUA), U.S. Bureau of Reclamation/ Water Resources Research Laboratory, 3rd Edition (revised), 2001.

[Disponível em

http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/wmm/index.htm]

Anexo 4.1 Processo iterativo utilizável no dimensionamento hidráulico do primário de um caudalímetro deprimogéneo

A Equação (4.26) é utilizada como equação de iteração. Sendo

$$X = \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}}$$
 a variável de iteração que figura no seu primeiro

membro e representando por I o invariante que constitui o seu segundo membro, ela pode ser reescrita na forma

$$X = \frac{I}{C} \quad (4.1.1)$$

em que C , para o número de Reynolds do escoamento na conduta de instalação igual a Re_{max} , é função apenas de β ; os seus valores podem ser calculados, nos casos de um diafragma e de um bocal, pelas equações de $C = C(\beta, Re)$ apresentadas nas partes 2 e 3 da norma ISO 5167 (2003), respectivamente, e podem ser obtidos, no caso de um tubo Venturi, na parte 4 dessa norma, onde C é quantificado para certos intervalos de D , β e Re .

Sejam β_i , X_i e C_i os valores das respectivas grandezas e δ_i a diferença $X_i - \frac{I}{C_i}$ referentes ao passo número i da iteração ($i = 1, 2, \dots, n$). De acordo com a parte 1 da norma ISO 5167 (2003), o processo iterativo inicia-se com $C_1 = 0,606$, para um diafragma, ou $C_1 = 1$, para um bocal ou tubo Venturi, recorrendo-se, a partir de $i = 3$, ao algoritmo linear rapidamente convergente

$$X_i = X_{i-1} - \delta_{i-1} \frac{X_{i-1} - X_{i-2}}{\delta_{i-1} - \delta_{i-2}} \quad (4.1.2)$$

até que o valor X_n seja considerado praticamente igual a X_{n-1} .

A relação de diâmetros será então dada por

$$\beta = \beta_n = \left(\frac{X_n^2}{1 + X_n^2} \right)^{1/4} \quad (4.1.3)$$

Anexo 4.2 Transições concêntricas ASME B16.9 utilizáveis na ligação da conduta principal à conduta de instalação do primário de um caudalímetro

Diâmetro nominal da conduta principal	Tamanho nominal das transições utilizáveis	
	(")	Diâmetros nominais
DN 50	2 × 1; 2 × 1¼	DN 50 × DN 25 DN 50 × DN 32
DN 65	2½ × 1¼; 2½ × 1½	DN 65 × DN 32 DN 65 × DN 40
DN 80	3 × 1½; 3 × 2	DN 80 × DN 40 DN 80 × DN 50
DN 100	4 × 2; 4 × 2½	DN 100 × DN 50 DN 100 × DN 65
DN 125	5 × 2½; 5 × 3	DN 125 × DN 65 DN 125 × DN 80
DN 150	6 × 3; 6 × 4	DN 150 × DN 80 DN 150 × DN 100
DN 200	8 × 4; 8 × 5	DN 200 × DN 100 DN 200 × DN 125
DN 250	10 × 5; 10 × 6	DN 250 × DN 125 DN 250 × DN 150
DN 300	12 × 6; 12 × 8	DN 300 × DN 150 DN 300 × DN 200
DN 350	14 × 8; 14 × 10	DN 350 × DN 200 DN 350 × DN 250
DN 400	16 × 8; 16 × 10	DN 400 × DN 200 DN 400 × DN 250
DN 500	20 × 12; 20 × 14	DN 500 × DN 300 DN 500 × DN 350
DN 600	24 × 16	DN 600 × DN 400
DN 700	28 × 20	DN 700 × DN 500
DN 800	—	—
DN 900	36 × 24	DN 900 × DN 600

Estas transições concêntricas são um subconjunto da gama completa definida pela norma ASME B16.9-2003 (2004).

5 MEDIÇÃO DE CAUDAL EM ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE

5.1 Introdução

No presente capítulo, tal como já sucedeu nos dois precedentes, o termo «líquido» designa genericamente água ou água residual urbana.

De acordo com o que foi referido no segundo parágrafo da secção 3.4.5, são dois os tipos de fronteiras sólidas (ou de suporte) de um escoamento com superfície livre aqui considerados:

- **canal** — cuja secção transversal é aberta, que neste capítulo se supõe ser sempre rectangular;
- **conduta** — com secção transversal fechada, que, no entanto, não é totalmente preenchida pelo líquido.

O objectivo principal deste quinto capítulo consiste em:

- apresentar, de forma sucinta, os caudalímetros mais comuns utilizáveis em escoamentos do líquido com superfície livre;
- expor regras práticas de selecção, dimensionamento e instalação — atendendo, nestes dois casos, principalmente a aspectos hidráulicos — e manutenção desses medidores de caudal.

A medição de caudal em escoamentos com superfície livre, em especial quando estes ocorrem em conduta, pode ser significativamente mais complexa do que em escoamentos sob pressão. Por isso, exceptuando os métodos clássicos de caudalimetria em canal que recorrem a descarregadores ou a caleiras, o grande número de soluções existentes para medição de caudal por transdução para sinais eléctricos não permite eleger inequivocamente um pequeno conjunto de “soluções consagradas”, como sucede com aquelas que foram objecto do capítulo precedente. Por essa razão, o presente capítulo tem uma estrutura ligeiramente diferente da do anterior.

Nas secções 5.2 e 5.3 apresentam-se dois tipos de caudalímetros vulgarmente utilizados em escoamentos com superfície livre em canal, a saber:

- **caudalímetros com descarregador de soleira delgada** (rectangular, Bazin e triangular);
- **caudalímetros com caleira** (Venturi e Parshall).

Referem-se os seguintes aspectos respeitantes a cada um desses caudalímetros:

- constituição;
- equação de vazão hidráulica e respectivas condições de aplicabilidade (correspondentes a limitações operacionais do caudalímetro);
- medição do nível da superfície livre do escoamento necessária à determinação do caudal;
- principais contribuições para a incerteza de medição do caudal e seus valores típicos.

A secção 5.4 trata de um terceiro tipo de caudalímetros que se baseiam em soluções de multissensorização, os quais adiante se designam **caudalímetros com multissensorização**, aplicáveis a escoamentos em canal ou em conduta — assumindo especial relevância, no entanto, neste último caso. Qualquer dessas soluções recorre a transduções combinadas, e frequentemente redundantes, de **velocidades** do escoamento e de **níveis** da superfície livre (ou de **alturas** do escoamento) correspondentes, sendo os respectivos valores do caudal calculados a partir dos valores dessas grandezas.

Nessa secção descrevem-se sucintamente diversos métodos de transdução, que se consideram os mais importantes nas aplicações correntes, apresentam-se as equações relevantes para quantificação das grandezas envolvidas e referem-se as potencialidades e limitações desses métodos. Também aí se incluem vários exemplos de soluções com multissensorização para medição de caudal em escoamentos com superfície livre (sobretudo em condutas), abordando-se os seguintes tópicos:

- combinações típicas de sensores;
- unidades de condicionamento de sinal e processamento de dados;
- aspectos construtivos e de montagem.

Na secção 5.5 apresentam-se critérios de selecção do tipo de caudalímetro mais conveniente para uma dada aplicação.

A secção 5.6 contém regras de dimensionamento hidráulico dos caudalímetros.

Na secção 5.7 discriminam-se os requisitos hidráulicos de instalação dos caudalímetros em questão, cujo cumprimento é determinante do seu bom desempenho.

Na secção 5.8 referem-se diversos aspectos de manutenção dos caudalímetros para escoamentos com superfície livre, abrangendo quer as verificações e acções periódicas quer as calibrações.

A simbologia utilizada neste capítulo encontra-se na secção 5.9 e uma breve lista bibliográfica apresenta-se na secção 5.10.

5.2 Caudalímetros com descarregador de soleira delgada

5.2.1 Aplicabilidade, constituição e aspectos genéricos de instalação e funcionamento

A medição de caudal em escoamentos do líquido (isento, ou com baixa concentração, de sólidos em suspensão) em canal é frequentemente realizada com um caudalímetro constituído por:

- um **descarregador de soleira delgada**;
- um medidor do nível da superfície livre do escoamento, doravante designado abreviadamente por **medidor de nível**.

Trata-se de um **caudalímetro com descarregador de soleira delgada**.

A soleira de um descarregador diz-se delgada quando é executada numa chapa de pequena espessura — que constitui o **corpo** do descarregador — de modo que fique formado um bordo — designado por **crista** da soleira — com largura constante entre 1 e 2 mm, com o qual o jacto descarregado contacta.

Quando a espessura do corpo do descarregador é maior do que a largura da crista, o que sucede quase sempre, existe um chanfro (ou bisel) na soleira. Na Figura 5.1 está representada a secção recta de uma soleira delgada com ângulo de chanfro $\geq 45^\circ$, a qual é comum aos três tipos de descarregador que são considerados adiante nesta secção:

- descarregador rectangular;

- descarregador Bazin;
- descarregador triangular.

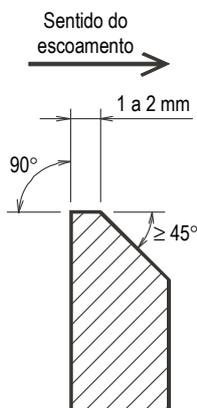


Figura 5.1 – Secção recta da soleira dos descarregadores rectangular, Bazin e triangular

Qualquer um desses descarregadores deve ficar com o corpo em posição vertical e perpendicular às paredes do respectivo **canal de alimentação**, que é o trecho rectilíneo do canal onde está inserido o descarregador — por vezes chamado **canal de instalação** — situado imediatamente a montante deste. O canal de alimentação deve ter:

- fundo plano e horizontal;
- paredes verticais e paralelas;
- comprimento suficiente para que o escoamento, eventualmente condicionado por meio de dispositivos de tranquilização e/ou regularização instalados a montante da sua secção inicial, seja uniforme.

Todo o corpo do descarregador, ou pelo menos uma faixa da soleira com largura não inferior a 5 cm, deve ser de metal resistente à corrosão pelo líquido (latão, bronze ou aço inoxidável, por exemplo); por outro lado, é essencial que tanto a crista como a face de montante da referida faixa da soleira tenham acabamento superficial liso muito bem executado, para que a capacidade de vazão do descarregador não seja afectada pela diminuição da velocidade do escoamento descarregado que resultaria da existência de rugosidades ou imperfeições nessas superfícies.

Num trecho não muito extenso do escoamento no canal de alimentação, imediatamente a montante de qualquer dos descarregadores em questão, ocorre um abaixamento da superfície livre — ou seja, um regolfo descendente — originado pelo aumento da velocidade do escoamento, o qual é habitualmente designado por **efeito de chamada**.

Há **contração lateral** do jacto descarregado quando a largura superficial deste, medida no plano vertical de montante da soleira do descarregador, é inferior à largura do canal de alimentação. Nesse caso, toda a extensão molhada da crista da soleira se encontra afastada das paredes do canal de alimentação, dizendo-se então que se trata de um **descarregador com contração lateral**.

5.2.2 Descarregador rectangular

A geometria e o funcionamento de um **descarregador rectangular**, assim chamado devido à forma geométrica da sua crista, estão esquematizados na Figura 5.2. É um descarregador com contração lateral cujo plano de simetria coincide com o plano longitudinal do canal de alimentação, pelo que o lado inferior da sua crista é horizontal e os outros dois lados são verticais.

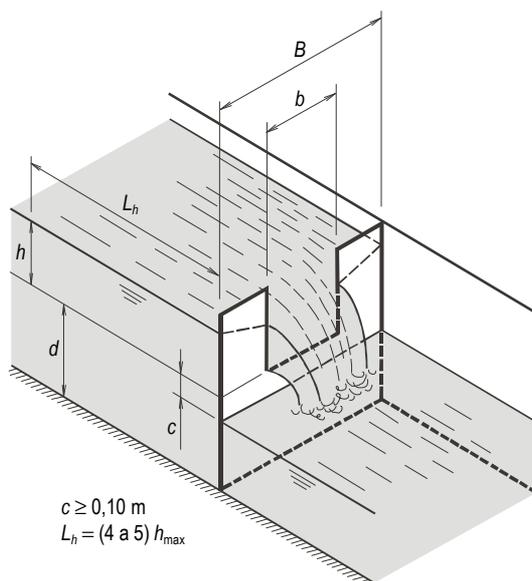


Figura 5.2 – Descarregador rectangular

O funcionamento de um descarregador rectangular pode ser descrito pela equação de Kindsvater-Carter

$$Q = \frac{2}{3} C \sqrt{2g} (b + k_b)(h + k_h)^{3/2} \quad (5.1)$$

cujos símbolos têm os seguintes significados: Q – caudal; C – coeficiente de vazão; g – aceleração da gravidade; b – largura da crista (ver a Figura 5.2); k_b – parcela correctiva de b ; h – altura piezométrica do escoamento em relação ao lado horizontal da crista (medida em secção molhada suficientemente a montante do descarregador, onde ainda não haja efeito de chamada — ver a Figura 5.2); k_h – parcela correctiva de h .

O coeficiente de vazão é função linear do quociente h/d , sendo d a cota do lado horizontal da crista em relação ao fundo do canal de alimentação (ver a Figura 5.2):

$$C = a + a' \left(\frac{h}{d} \right) \quad (5.2)$$

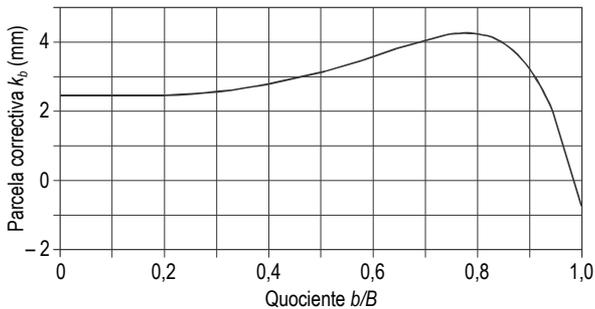
em que os coeficientes a e a' são dependentes do quociente b/B , sendo B a largura do canal de alimentação. O Quadro 5.1 contém os valores desses coeficientes, determinados experimentalmente, correspondentes a diversos valores de b/B ; para valores deste quociente diferentes dos que constam no quadro, os respectivos valores de C podem ser satisfatoriamente determinados por interpolação.

Quadro 5.1 – Descarregador rectangular: valores experimentais dos coeficientes a e a' da Equação (5.2) para diversos valores de b/B

b/B	a	a'
0,2	0,589	-0,0018
0,4	0,591	0,0058
0,5	0,592	0,010
0,6	0,593	0,018
0,7	0,594	0,030
0,8	0,596	0,045
0,9	0,598	0,064

As parcelas correctivas k_b e k_h destinam-se a compensar os efeitos combinados da viscosidade e da tensão superficial do líquido

sobre o coeficiente de vazão. A primeira pode ser quantificada a partir do gráfico da Figura 5.3, que representa a relação funcional de k_b com b/B obtida experimentalmente; quanto à parcela correctiva de h , foi reconhecido, também por via experimental, que tem o valor constante $k_h = 0,001$ m para descarregadores rectangulares construídos em estrita conformidade com as especificações da norma ISO 1438-1 (1980) ou BS 3680-4A (1981).



b/B	k_b (mm)
0	2,4
0,2	2,4
0,4	2,7
0,6	3,6
0,8	4,2
1,0	-0,9

Figura 5.3 – Descarregador rectangular: relação funcional de k_b com b/B

As condições de aplicabilidade da Equação (5.1), que correspondem a limitações práticas de operação de um descarregador rectangular, são as seguintes:

- $h/d \leq 2,5$;
- $h \geq 0,03$ m;
- $b \geq 0,15$ m;
- $d \geq 0,15$ m;
- $(B - b)/2 \geq 0,10$.

A secção do escoamento no canal de alimentação onde a altura piezométrica h é medida deve estar situada, como anteriormente se referiu, a montante do trecho onde há efeito de chamada; a sua distância L_h ao descarregador (ver a Figura 5.2) deve ser $4 h_{\max} \leq$

$L_h \leq 5 h_{\max}$ [BS 3680-4A (1981)], em que h_{\max} é o valor de h correspondente ao valor máximo Q_{\max} do caudal a medir.

5.2.3 Descarregador Bazin

Um **descarregador Bazin** está representado esquematicamente na Figura 5.4. Tem crista horizontal e largura b igual à do canal de instalação, sendo, por conseguinte, um descarregador sem contracção lateral.

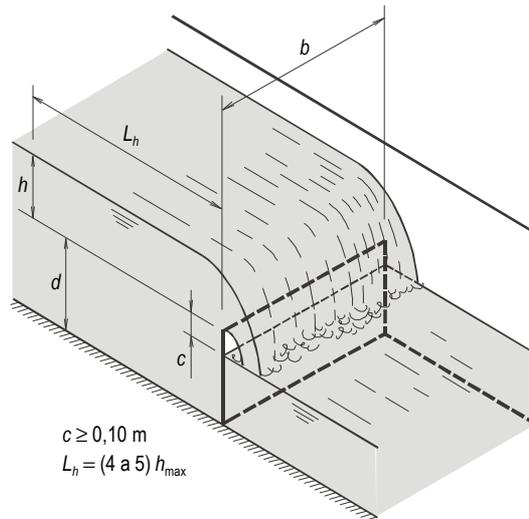


Figura 5.4 – Descarregador Bazin

No espaço sob o jacto imediatamente a jusante do descarregador existe ar que deve estar sempre à pressão atmosférica. Para obviar a que nesse espaço possa haver depressão em consequência do arrastamento de algum ar pelo jacto, o que perturbaria o funcionamento normal do descarregador, é necessário efectuar o seu arejamento por meio de tubos que o ligam à atmosfera.

Um descarregador Bazin é geralmente considerado um caso particular, caracterizado por $b = B$, de um descarregador rectangular. Assim, o seu funcionamento pode ser traduzido pela Equação (5.1), aplicável nas condições mencionadas na secção precedente (exceptuando a última, visto ser $B - b = 0$), com o coeficiente de vazão calculado pela fórmula

$$C = 0,602 + 0,075 \frac{h}{d} \quad (5.3)$$

A distância entre a secção onde é feita a medição de h e um descarregador Bazin é igual à que foi referida para um descarregador rectangular: $4 h_{\max} \leq L_n \leq 5 h_{\max}$ [BS 3680-4A (1981)].

5.2.4 Descarregador triangular

Na Figura 5.5 está esquematizado um **descarregador triangular**. Tem crista angular cuja bissetriz é vertical e equidistante das paredes do canal de alimentação, ou seja, o plano longitudinal deste coincide com o plano de simetria do descarregador.

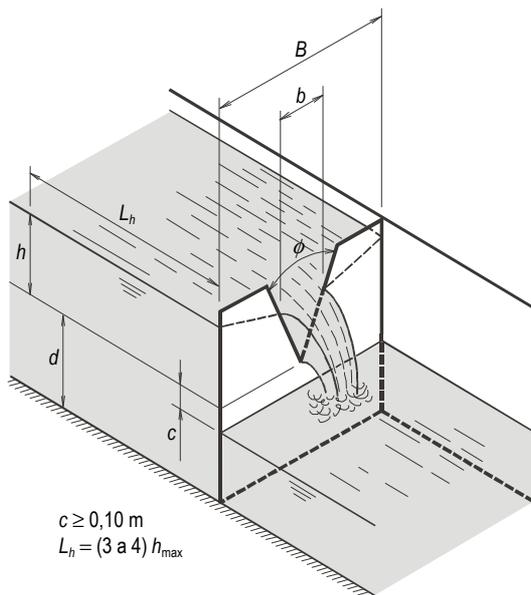


Figura 5.5 – Descarregador triangular

Trata-se de um descarregador com contracção lateral cujo funcionamento pode ser descrito pela equação de Kindsvater-Shen:

$$Q = \frac{8}{15} C \operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right) \sqrt{2g} (h + k_n)^{5/2} \quad (5.4)$$

em que ϕ é o ângulo da crista. O coeficiente de vazão C é função de h/d , d/B e ϕ , sendo d a cota do vértice da crista em relação ao fundo do canal de alimentação (ver a Figura 5.5).

No caso de um descarregador triangular com $\phi = 90^\circ$, a variação de C com h/d (no intervalo $0,1 \leq h/d \leq 2,0$) para diversos valores

discretos de b/B (desde 0,1 a 1,0, com acréscimo de 0,1), obtida a partir de dados experimentais, é expressa pela família de curvas apresentada na Figura 5.6. Nessas mesmas condições, pode-se considerar que a parcela correctiva k_h tem um valor constante de 0,00085 m [ISO 1438-1 (1980), BS 3680-4A (1981)].

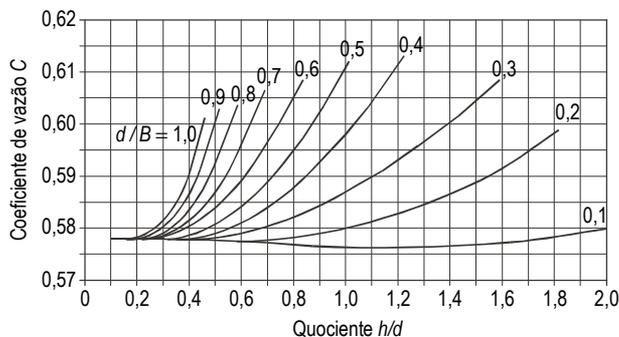


Figura 5.6 – Descarregador triangular com $\phi = 90^\circ$: variação de C com h/d para diversos valores de d/B

Para $\phi \neq 90^\circ$ não existe quantidade suficiente de dados experimentais que possibilite a definição geral da função $C = C(h/d, d/B, \phi)$. No entanto, quando a secção transversal do jacto sobre a crista do descarregador triangular é muito menor do que a secção molhada do escoamento no canal de alimentação (sendo então desprezáveis quer a velocidade do escoamento no canal de alimentação quer os efeitos de h/d e d/B sobre C), as relações funcionais de C e de k_h com ϕ (no intervalo $20^\circ \leq \phi \leq 100^\circ$) são, respectivamente, aquelas que os gráficos das figuras 5.7 e 5.8 representam; diz-se que, nessas circunstâncias, o descarregador triangular funciona com **contração total**, situação que se pode definir pelas seguintes condições: $h/d \leq 0,35$; $h/B \leq 0,2$; $0,06 \text{ m} \leq h \leq 0,38 \text{ m}$; $d \geq 0,45 \text{ m}$; $B \geq 0,90 \text{ m}$.

As condições de aplicabilidade da Equação (5.4), correspondentes a limitações práticas de operação de qualquer descarregador triangular, são as seguintes:

- $20^\circ \leq \phi \leq 100^\circ$;
- $0,1 \leq h/d \leq 2,0$ para $\phi = 90^\circ$ e $h/d \leq 0,35$ para $\phi \neq 90^\circ$;
- $0,1 \leq d/B \leq 1,0$ para $\phi = 90^\circ$ e $0,1 \leq d/B \leq 1,5$ para $\phi \neq 90^\circ$;
- $h \geq 0,06 \text{ m}$;
- $d \geq 0,14 \text{ m}$.

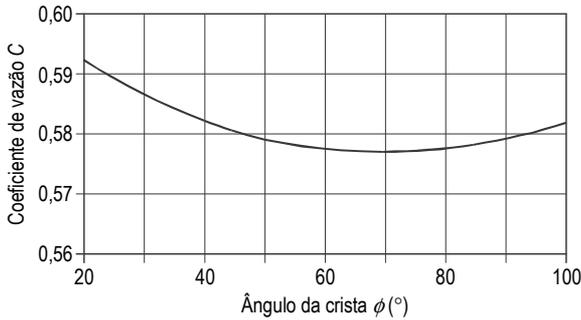


Figura 5.7 – Descarregador triangular funcionando com contracção total: variação de C com ϕ (no intervalo $20^\circ \leq \phi \leq 100^\circ$)

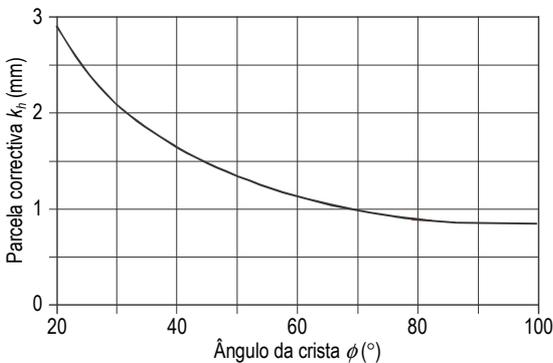


Figura 5.8 – Descarregador triangular funcionando com contracção total: variação de k_r com ϕ (no intervalo $20^\circ \leq \phi \leq 100^\circ$)

A distância L_h da secção de medição de h a um descarregador triangular deve ser $3 h_{\max} \leq L_h \leq 4 h_{\max}$ [ISO 1438-1 (1980)].

5.2.5 Medição do nível da superfície livre do escoamento

A medição de h na secção apropriada do escoamento no canal de alimentação de qualquer dos descarregadores tratados nas secções 5.2.2 a 5.2.4 deve ser efectuada, de preferência, num poço de medição do nível da superfície livre do escoamento, adiante designado abreviadamente por **poço de medição de nível**. Instrumentos de medição adequados para o efeito são, por exemplo, os seguintes:

- medidor de nível por radar, com transdução por tempo de trânsito fora do líquido — de montagem emersa, por conseguinte (ver o primeiro parágrafo da secção 5.4.4);
- medidor de nível ultrassónico de tempo de trânsito — de montagem emersa (ver a secção 5.4.6);
- medidor de pressão hidrostática — de montagem imersa (ver também a secção 5.4.6).

A secção transversal do poço de medição de nível pode ser circular (como é o caso daquele que se mostra na Figura 5.9) ou ter outra forma geométrica, mas deve ter dimensões adequadas ao correcto funcionamento do medidor de nível componente do caudalímetro.



Figura 5.9 – Medidor de nível ultrassónico montado sobre um poço de medição cilíndrico

O poço de medição de nível deve ser ligado ao canal de alimentação do descarregador por meio de um tubo munido de uma válvula de seccionamento (de passagem plena quando totalmente aberta) e que satisfaça os seguintes requisitos:

- área da secção transversal suficientemente grande para que não haja atraso temporal significativo na resposta do poço de medição de nível às variações do nível da super-

fície livre do escoamento na correspondente secção de medição de h ;

- boca à face da parede do canal de alimentação e com eixo perpendicular à direcção do escoamento.

5.2.6 Incerteza de medição do caudal

Quando se utiliza um caudalímetro com descarregador de soleira delgada, as principais contribuições para a incerteza de medição do caudal provêm das incertezas associadas:

- ao valor do coeficiente de vazão do descarregador;
- à medição de h ;
- à medição de b — no caso de um caudalímetro com descarregador rectangular ou com descarregador Bazin — ou à medição de ϕ — se se tratar de um caudalímetro com descarregador triangular;
- às imperfeições geométricas resultantes de construção ou instalação deficiente, ou de deposição de impurezas quer na crista do descarregador quer numa faixa da superfície de montante da sua soleira com cerca de 5 cm de largura (ver a secção 5.8.1).

Se os requisitos de construção, instalação e operação do descarregador definidos na norma ISO 1438-1 (1980) ou BS 3680-4A (1981) forem estritamente cumpridos, os valores da incerteza relativa (ver a secção 7.7.1) associada ao valor do coeficiente de vazão, de acordo com qualquer das referidas normas, não excedem geralmente os que são apresentados no Quadro 5.2.

A incerteza associada ao valor do caudal medido por qualquer dos três caudalímetros em questão é calculada por aplicação da Lei de Propagação de Incertezas (ver a secção 7.7 e o Anexo 7.2) à equação de vazão do respectivo descarregador — Equação (5.1) ou (5.4).

Quadro 5.2 – Caudalímetros com descarregador de soleira delgada: valores típicos da incerteza relativa associada ao valor do coeficiente de vazão do descarregador (no pressuposto de construção, instalação, operação e manutenção adequadas)

Tipo de descarregador componente do caudalímetro	Incerteza relativa de C (%)	Requisitos de operação
Rectangular	$\pm 0,75$	$h/d < 1,0$ + limitações práticas de operação referentes a h , b , d e $(B - b)/2$
	$\pm 1,0$	$1,0 \leq h/d < 1,5$ + idem
	$\pm 1,5$	$1,5 \leq h/d \leq 2,5$ + idem
Bazin	$\pm 0,75$	$h/d < 1,0$ + limitações práticas de operação referentes a h , b e d
	$\pm 1,0$	$1,0 \leq h/d < 1,5$ + idem
	$\pm 1,5$	$1,5 \leq h/d \leq 2,5$ + idem
Triangular	$\pm 0,5$	Limitações práticas de operação correspondentes às condições de aplicabilidade da Equação (5.4)

5.3 Caudalímetros com caleira

5.3.1 Aplicabilidade, constituição e aspectos genéricos de funcionamento

Para medir o caudal em escoamentos do líquido (sem ou com sólidos em suspensão) em canal é vulgar a utilização de um caudalímetro constituído por:

- uma **caleira de medição** (doravante designada abreviadamente por «caleira»);
- um medidor de nível.

Trata-se de um **caudalímetro com caleira**.

Por meio de um estreitamento que introduz no canal onde é inserida (denominado **canal de instalação**), conjugado com uma sobrelevação porventura existente no seu fundo (a **soleira**), a caleira do caudalímetro força o escoamento, obrigatoriamente lento a montante dela, a passar com altura crítica numa determinada secção transversal do seu **colo** — o trecho da caleira com menor largura, já anteriormente referido na secção 3.4.5⁶⁰. Diz-se que a caleira funciona então **em descarga livre**, ou **não-afogada**, situação em que o caudal é função apenas da altura do escoamento no **canal de alimentação** — que é um trecho do canal de instalação,

⁶⁰ No parágrafo imediatamente a seguir à Figura 3.19.

com um determinado comprimento que é definido na secção 5.7.2, situado imediatamente a montante da caleira.

São dois os tipos mais usuais de caleira componente do caudalímetro em questão:

- caleira Venturi;
- caleira Parshall.

5.3.2 Caleira Venturi

Uma caleira Venturi diz-se **sem soleira** quando tem o fundo plano. O seu funcionamento hidráulico encontra-se genericamente descrito nos últimos sete parágrafos da secção 3.4.5, sendo a Equação (3.59) uma expressão possível da sua equação de vazão.

A Figura 3.19 apresenta uma sua planta esquemática, que é idêntica à de uma caleira Venturi **com soleira**. A geometria e o funcionamento hidráulico desta são ilustrados na Figura 5.10, designando os símbolos h_c e H_c que nela constam, respectivamente, a altura crítica e a energia crítica do escoamento referidas à face superior da soleira, que tem de ser plana e horizontal.

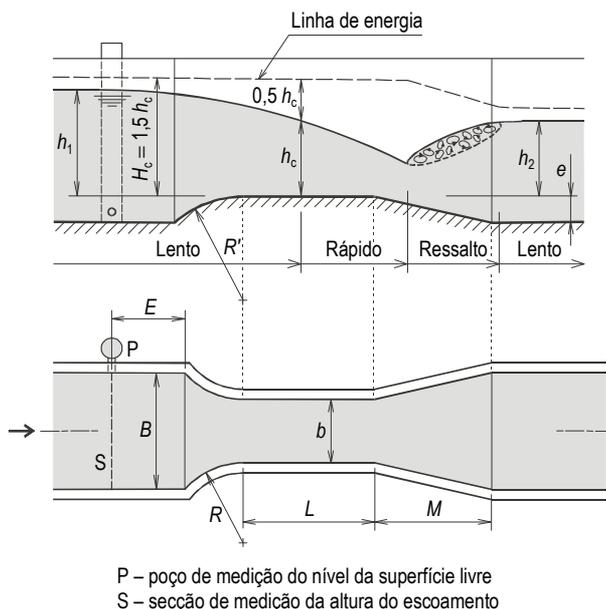


Figura 5.10 – Caleira Venturi com soleira

Qualquer caleira Venturi deve ficar inserida no canal de instalação de modo que o seu plano longitudinal de simetria e o deste coincidam. E o seu colo deve ter paredes verticais e paralelas, sendo a sua largura b constante, por conseguinte.

No caso de uma caleira Venturi sem soleira, o comprimento do colo L , o comprimento do divergente de saída M e o raio de curvatura das paredes do convergente de entrada R devem satisfazer as seguintes condições, de acordo com a norma ISO 1438 (1975):

- $L \geq 1,5 (h_1)_{\max}$, sendo $(h_1)_{\max}$ o valor máximo da altura do escoamento h_1 na secção S referida ao fundo do canal de alimentação;
- $M = 3 (B - b)$, sendo B a largura do canal de alimentação;
- $R = 2 (B - b)$.

Tratando-se de uma caleira Venturi com soleira, a estes requisitos dimensionais — em que a altura do escoamento h_1 passa a ser referida à face superior da soleira — acresce o seguinte relativamente ao raio de curvatura da superfície de montante da soleira: $R' = 4e$, sendo e a altura da soleira (ver a Figura 5.10).

Em qualquer dos dois casos, a distância E entre a secção S de medição de h_1 e a entrada da caleira deve ser $3(h_1)_{\max} \leq E \leq 4(h_1)_{\max}$.

Para evitar perturbações no escoamento na vizinhança imediata da secção S, contribuindo assim para que a medição de h_1 seja efectuada em condições convenientes, o fundo do canal de alimentação deve ser plano e horizontal desde a entrada da caleira até pelo menos 1,25 m a montante da referida secção.

De acordo com a norma ISO 1438 (1975), o funcionamento hidráulico de uma caleira Venturi, com ou sem soleira, pode-se exprimir pela equação geral de vazão

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} C_e C_v \sqrt{g} b h_1^{3/2} \quad (5.5)$$

sendo C_e o **coeficiente de vazão**, que depende das perdas de carga devidas ao atrito e à turbulência, e C_v o **coeficiente de velocidade de aproximação**, que depende da velocidade média do escoamento no canal de alimentação.

Comparando as equações (5.5) e (3.59), conclui-se que são idênticas se se supuser que

$$\left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} C_e C_v = C_d s^{3/2} \quad (5.6)$$

sendo C_d o coeficiente de descarga que consta na Equação (3.59) e s a relação de submersão da caleira⁶¹, que também nela inter-vém.

O coeficiente de vazão da Equação (5.5) pode ser calculado pela fórmula

$$C_e = \left(\frac{b}{b+0,004L}\right)^{3/2} \left(\frac{h_1 - 0,003L}{h_1}\right)^{3/2} \quad (5.7)$$

e o coeficiente de velocidade de aproximação pode ser determi-nado a partir da equação

$$\left(\frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{b}{B}\right)^2 \left(\frac{h_1}{h_1 + e}\right)^2 C_v^2 - C_v^{2/3} + 1 = 0 \quad (5.8)$$

que, no caso de uma caleira Venturi sem soleira, se transforma em

$$\left(\frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{b}{B}\right)^2 C_v^2 - C_v^{2/3} + 1 = 0 \quad (5.9)$$

As condições de aplicabilidade da Equação (5.5), que correspon-dem a limitações dimensionais e operacionais de qualquer caleira Venturi, são as seguintes:

- $b \geq 0,09$ m;
- $(b/B)[h_1/(h_1 + e)] \leq 0,7$;
- $h_1/b \leq 3$;
- $0,05$ m $\leq h_1 \leq 1,8$ m.

5.3.3 Caleira Parshall

Uma caleira Parshall, da qual a Figura 5.11 ilustra genericamente a geometria e o funcionamento, é uma variante da caleira Venturi com soleira, sendo fácil distingui-la visualmente desta pelo facto de ter paredes e soleira que apresentam concordâncias angulosas

⁶¹ Está definida na secção 3.4.5, no primeiro parágrafo imediatamente após a Figura 3.19.

— o que, como se pode constatar na Figura 5.10, não sucede numa caleira Venturi. A sua denominação actual decorre do apelido do engenheiro hidráulico norte-americano Ralph L. Parshall que a inventou em 1922⁶².

Qualquer caleira Parshall é identificada pelo respectivo tamanho nominal, quantificado pela largura b do seu colo expressa geralmente em polegadas (") ou em pés (')⁶³, e tem dimensões normalizadas. A gama completa deste tipo de caleiras, que está definida dimensionalmente no Quadro 5.3⁶⁴, compreende 22 valores distintos do tamanho nominal, desde 1" até 50'.

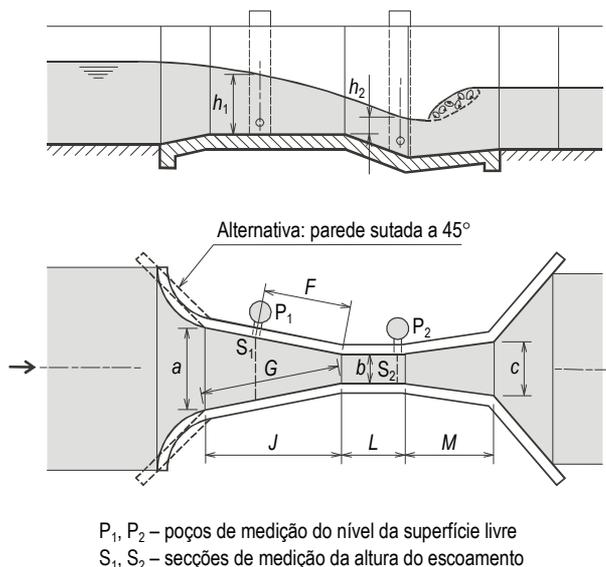


Figura 5.11 – Caleira Parshall

A equação de vazão das caleiras Parshall, estabelecida em 1953 a partir dos resultados de grande número de ensaios de calibração, é

$$Q = K h_1^w \quad (5.10)$$

⁶² Foi inicialmente designada por “caleira Venturi aperfeiçoada”.

⁶³ 1" = 25,4 mm; 1' = 12" = 304,8 mm.

⁶⁴ São quantificadas apenas as dimensões indicadas na Figura 5.11. O leitor interessado em conhecer a definição dimensional completa das caleiras Parshall poderá consultar, por exemplo, Lencastre (1983) – página 629, ou Hwang e Hita (1987) – página 320.

em que:

- K e w são parâmetros característicos da caleira em causa, cujos valores se encontram no Quadro 5.4;
- h_1 é a altura do escoamento na secção transversal S_1 do convergente de entrada da caleira identificada pela cota F que está referida na Figura 5.11 e cujos valores são apresentados no Quadro 5.3⁶⁵.

Quadro 5.3 – Gama completa de caleiras Parshall: tamanho nominal e outras dimensões relevantes

Tamanho nominal b		Outras dimensões relevantes* (mm)						
(") , (')	(mm)	a	c	F	G	J	L	M
1"	25,4	167	93	242	363	356	76	203
2"	50,8	214	135	276	414	406	114	254
3"	76,2	259	178	311	467	457	152	305
6"	152,4	397	394	414	621	610	305	610
9"	228,6	575	381	587	879	864	305	457
1'	304,8	845	610	914	1373	1343	610	914
1½'	457,2	1026	762	965	1448	1419	610	914
2'	609,6	1206	914	1016	1524	1495	610	914
3'	914,4	1572	1219	1118	1676	1645	610	914
4'	1219,2	1937	1524	1219	1829	1794	610	914
5'	1524,0	2302	1829	1321	1981	1943	610	914
6'	1828,8	2667	2134	1422	2134	2092	610	914
7'	2133,6	3032	2438	1524	2286	2242	610	914
8'	2438,4	3397	2743	1626	2438	2391	610	914
10'	3048	4756	3658	1829	–	4267	914	1829
12'	3658	5607	4470	2032	–	4877	914	2438
15'	4572	7620	5588	2337	–	7620	1219	3048
20'	6096	9144	7315	2845	–	7620	1829	3658
25'	7620	10668	8941	3353	–	7620	1829	3962
30'	9144	12313	10566	3861	–	7925	1829	4267
40'	12192	15481	13818	4877	–	8230	1829	4877
50'	15240	18529	17272	5893	–	8230	1829	6096

* Ver a Figura 5.11.

⁶⁵ Para tamanho nominal $b \leq 8''$ é $F = 2/3 G$, estando a cota G definida na Figura 5.11, sendo $F = b/3 + 0,813$ m para $b \geq 10'$.

Quadro 5.4 – Caleiras Parshall: valores dos parâmetros e limites de aplicabilidade da equação de vazão

Tamanho nominal <i>b</i>		Parâmetros da equação de vazão		Limites de aplicabilidade da equação de vazão				
				Limites de h_1 (m)		Limites de Q ($m^3 s^{-1}$)		Valor máximo de s'
("), (')	(mm)	<i>K</i>	<i>w</i>	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
1"	25,4	0,0604	1,55	0,015	0,21	0,00009	0,0054	0,50
2"	50,8	0,1207	1,55	0,015	0,24	0,00018	0,0132	0,50
3"	76,2	0,1771	1,55	0,030	0,33	0,00077	0,0321	0,50
6"	152,4	0,3812	1,58	0,030	0,45	0,00150	0,111	0,60
9"	228,6	0,5354	1,53	0,030	0,61	0,00250	0,251	0,60
1'	304,8	0,6909	1,522	0,030	0,76	0,00332	0,457	0,70
1½'	457,2	1,056	1,538	0,030	0,76	0,00480	0,695	0,70
2'	609,6	1,428	1,550	0,046	0,76	0,0121	0,937	0,70
3'	914,4	2,184	1,566	0,046	0,76	0,0176	1,427	0,70
4'	1219,2	2,953	1,578	0,060	0,76	0,0358	1,923	0,70
5'	1524,0	3,732	1,587	0,060	0,76	0,0441	2,424	0,70
6'	1828,8	4,519	1,595	0,076	0,76	0,0741	2,929	0,70
7'	2133,6	5,312	1,601	0,076	0,76	0,0858	3,438	0,70
8'	2438,4	6,112	1,607	0,076	0,76	0,0972	3,949	0,70
10'	3048	7,463	1,60	0,090	1,07	0,16	8,28	0,80
12'	3658	8,859	1,60	0,090	1,37	0,19	14,68	0,80
15'	4572	10,96	1,60	0,090	1,67	0,23	25,04	0,80
20'	6096	14,45	1,60	0,090	1,83	0,31	37,97	0,80
25'	7620	17,94	1,60	0,090	1,83	0,38	47,14	0,80
30'	9144	21,44	1,60	0,090	1,83	0,46	56,33	0,80
40'	12192	28,43	1,60	0,090	1,83	0,60	74,70	0,80
50'	15240	35,41	1,60	0,090	1,83	0,75	93,04	0,80

O Quadro 5.4 contém também os valores máximos e mínimos de Q e de h_1 e os valores máximos da **relação de submersão**

$s' = \frac{h_2}{h_1}$, sendo h_2 a altura do escoamento na seção S_2 do colo

da caleira⁶⁶ tal como se mostra na Figura 5.11, os quais definem as condições de validade da Equação (5.10).

⁶⁶ Na definição da relação de submersão de uma caleira Venturi, h_2 é a altura do escoamento no canal imediatamente a jusante da caleira.

Para valores da relação de submersão superiores aos apresentados no Quadro 5.4 a caleira Parshall deixa de operar em condições de descarga livre, ficando então afogada, situação que não deverá suceder com uma caleira adequadamente dimensionada (ver a secção 5.6.2). Nessas circunstâncias, não recomendáveis visto agravarem as incertezas de medição do caudalímetro, o caudal escoado na caleira tem valor inferior ao fornecido pela Equação (5.10)⁶⁷.

5.3.4 Medição do nível da superfície livre do escoamento

Seja qual for o tipo de caleira — Venturi ou Parshall — que faz parte do caudalímetro, a altura do escoamento h_1 deve ser medida preferentemente num poço de medição de nível ligado à secção relevante do escoamento (identificada por S na Figura 5.10 ou por S_1 na Figura 5.11) e com as características já mencionadas na secção 5.2.5 (porém devidamente adaptadas no que se refere ao tubo de ligação a S_1 no caso de uma caleira Parshall⁶⁸).

Os instrumentos de medição apresentados como exemplos nessa mesma secção 5.2.5 são igualmente apropriados para medir h_1 nestes caudalímetros com caleira.

5.3.5 Incerteza de medição do caudal

Quando é utilizado um caudalímetro com caleira Venturi construída, instalada e operada em estrita conformidade com os requisitos da norma ISO 1438 (1975), as principais contribuições para a incerteza de medição do caudal são as seguintes:

- incerteza associada ao valor de C_e ;
- incerteza associada ao valor de C_v ;
- incerteza de medição de h_1 .

De acordo com a referida norma, os valores típicos das incertezas relativas associadas tanto a C_e como a C_v são $\pm 1\%$ para $C_e \geq 0,950$ e $\pm 2\%$ para $C_e < 0,950$.

⁶⁷ Os valores correctivos do caudal calculado pela Equação (5.10) podem ser obtidos, por exemplo, em Lencastre (1983) – páginas 631 a 633, ou em U. S. Water Resources Research Laboratory (2001) – Capítulo 8, Secção 10.

⁶⁸ Relativamente à parede do convergente de entrada da caleira, a boca do tubo de ligação deve ficar-lhe à face e o seu eixo deve ser-lhe perpendicular.

No caso de um caudalímetro com caleira Parshall, a incerteza de medição do caudal resulta das contribuições — em conformidade com a Lei de Propagação de Incertezas (ver a secção 7.7 e o Anexo 7.2) aplicada à Equação (5.11) — da incerteza associada ao coeficiente K da caleira, cujos valores relativos estão tipicamente compreendidos entre $\pm 1,5\%$ e $\pm 2,5\%$, e da incerteza de medição de h_1 .

Convém ter presente que as imperfeições geométricas originadas por deficiente construção ou instalação da caleira, ou por acumulação de detritos resultante de manutenção inadequada (ver a secção 5.8.1), são fontes de incerteza que devem ser consideradas na avaliação da incerteza associada ao caudal medido por qualquer dos dois caudalímetros em questão.

5.4 Caudalímetros com multissensorização

5.4.1 Introdução

Nesta secção é feita uma descrição de métodos de transdução de velocidades e de níveis da superfície livre de escoamentos que, na prática, são utilizados de forma combinada para a medição do caudal desses escoamentos. Referem-se apenas alguns que se consideram fundamentais, mas alerta-se para o facto de existir uma grande diversidade de métodos [Jones (2002)], já em utilização ou com possibilidade de virem a ser utilizados, em aplicações neste domínio.

5.4.2 Transdução ultrassónica de velocidades de escoamento por efeito Doppler de onda contínua

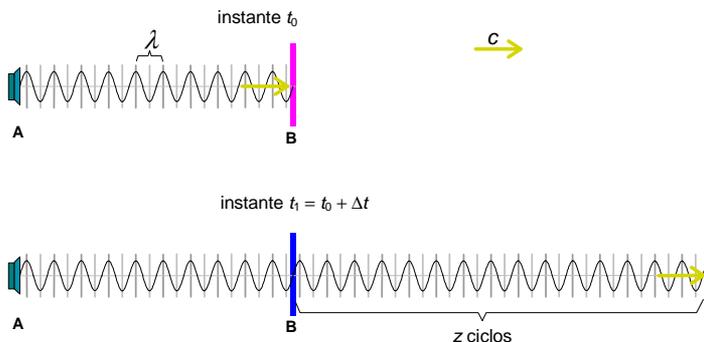
Inicia-se esta descrição de métodos ultrassónicos para a transdução de velocidades de escoamento com uma recapitulação dos princípios físicos envolvidos.

Princípio básico do efeito Doppler de onda contínua

Considere-se um emissor acústico no ponto A da Figura 5.12-a, emitindo uma onda monocromática de frequência f_s , e um observador situado no ponto B. O observador parado recebe a onda sonora com a mesma frequência f_s com que foi emitida, ou seja, recebe z ciclos num intervalo de tempo Δt .

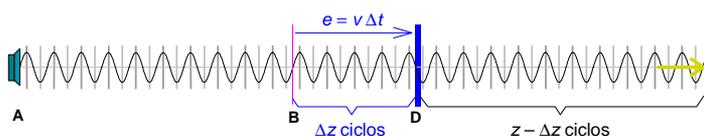
Considere-se agora o observador a deslocar-se com uma velocidade constante de afastamento v (cf. a Figura 5.12-b): durante um mesmo intervalo de tempo Δt receberá $z - \Delta z$ ciclos.

Se o observador se deslocar no sentido de A com uma velocidade constante v , durante o intervalo de tempo Δt , receberá $z + \Delta z$ ciclos (cf. a Figura 5.12-c).



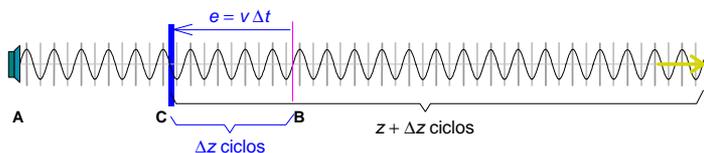
a – Emissão de uma onda acústica por uma fonte situada num ponto A sentida por um observador situado num ponto B durante um intervalo de tempo Δt

instante $t_1 = t_0 + \Delta t$



b – Durante o intervalo Δt o observador desloca-se, à velocidade constante v , do ponto B em sentido oposto ao da fonte

instante $t_1 = t_0 + \Delta t$



c – Durante o intervalo Δt o observador desloca-se, à velocidade constante v , do ponto B no sentido da fonte

Figura 5.12 – Esquemática do princípio básico do efeito Doppler acústico de onda contínua

A **velocidade de propagação** acústica, simbolizada por c , depende do meio onde se dá essa propagação e da temperatura, tendo, a 20°C , um valor de 1482 m s^{-1} na água (ver o Quadro 4.2) e muito próximo de 343 m s^{-1} no ar.

O **comprimento de onda** do sinal acústico emitido exprime-se por

$$\lambda = \frac{c}{f_S} \quad (5.11)$$

Como $f_S = \frac{z}{\Delta t}$, pode escrever-se

$$\lambda = \frac{c \Delta t}{z}$$

A frequência medida pelo observador no caso da Figura 5.12-c vale

$$f_D = \frac{z + \Delta z}{\Delta t}$$

Uma vez que $\Delta z = \frac{e}{\lambda} = \frac{v \Delta t}{\lambda}$, resulta

$$f_D = \frac{z + v \frac{\Delta t}{\lambda}}{\Delta t} \quad (5.12)$$

A grandeza fundamental que se irá considerar é o **desvio de frequência**, diferença entre aquela que é sentida pelo observador e a que é emitida pela fonte:

$$\Delta f = f_D - f_S = \frac{z + v \frac{\Delta t}{\lambda}}{\Delta t} - \frac{z}{\Delta t}$$

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{c} f_S \quad (5.13)$$

Se fosse medido o desvio de frequência no observador poderia calcular-se a velocidade de deslocação deste em relação à fonte simplesmente por

$$v = \frac{c}{f_S} \Delta f \quad (5.14)$$

Todavia, ainda não é este o processo que mais interessa.

Efeito Doppler acústico de onda contínua por reflexão

Considere-se agora o emissor no ponto A e um alvo a afastar-se com uma velocidade constante v (ver a Figura 5.13).

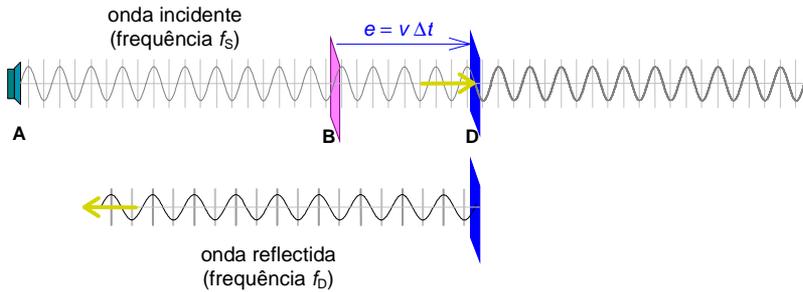


Figura 5.13 – Esquematização do efeito Doppler acústico de onda contínua por reflexão

Após incidir no alvo, a onda sonora dá origem a outra onda reflectida, de sentido oposto, com frequência f_D . Esta frequência e o seu desvio em relação a f_S podem exprimir-se pelas relações anteriores.

A origem da onda reflectida é o alvo. Note-se que, para esta onda com origem no alvo, o ponto A está a afastar-se com velocidade v (velocidade relativa). Por isso a onda reflectida é recebida em A com novo desvio na frequência, ou seja, com um desvio total em relação à frequência f_S da onda original dado por

$$\Delta f = \left(f_S + f_S \frac{v}{c} \right) \frac{v}{c} + f_S \frac{v}{c}, \quad \Delta f \approx 2 f_S \frac{v}{c} \quad (5.15)$$

A última aproximação é válida desde que $v \ll c$. Medindo este desvio de frequência (também chamado **frequência Doppler**) da onda reflectida que chega a A pode calcular-se a velocidade de deslocação do alvo em relação ao emissor/receptor. Há que admitir que a velocidade de propagação acústica no meio é constante e conhecida com exactidão.

Um medidor de velocidade por efeito Doppler incorpora no dispositivo emissor também a função de receptor. Através do receptor é obtido o desvio de frequência da onda reflectida em relação à frequência da onda emitida (uma única risca no espectro de frequências) e, a partir desse valor, é calculado o valor da velocidade do alvo em movimento:

$$v \approx \frac{c}{2 f_S} \Delta f \quad (5.16)$$

A Figura 5.14 ilustra o espectro de frequências de Doppler com uma única risca. O desvio de frequência em relação a f_S corresponde à velocidade de deslocamento do alvo.

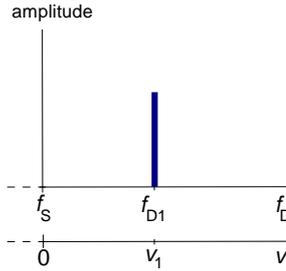
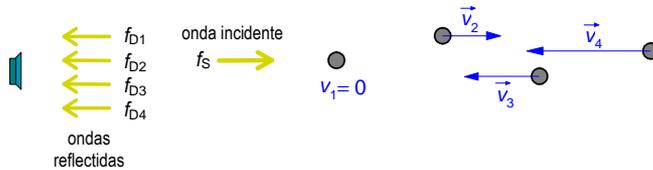
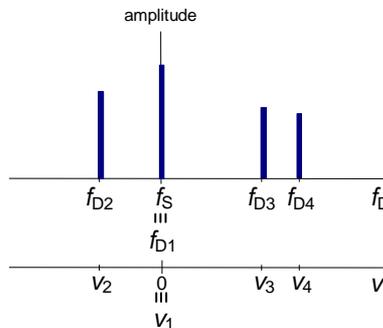


Figura 5.14 – Espectro de frequências com a risca correspondente à onda reflectida no alvo em movimento

Considere-se o emissor no ponto A e vários alvos a afastarem-se com velocidades diferentes (cf. a Figura 5.15-a). A resposta de um medidor de velocidade por efeito Doppler de onda contínua neste caso traduz-se em várias riscas de um espectro de frequências, a que correspondem os valores de velocidades calculadas pelo processo visto atrás (cf. a Figura 5.15-b).



a – Esquema de ondas acústicas incidente e reflectidas por vários alvos em movimento a velocidades diversas



b – Espectro de frequências de Doppler das ondas recebidas no receptor e correspondentes velocidades

Figura 5.15 – Medição de velocidades de vários corpos por efeito Doppler através da emissão de uma onda acústica contínua

Velocidades no sentido de A originam frequências f_{D_i} maiores do que f_S , ao passo que velocidades no sentido oposto originam frequências f_{D_i} menores do que f_S .

As amplitudes das ondas reflectidas dependem da dimensão dos alvos e das atenuações produzidas pelo meio onde se propagam.

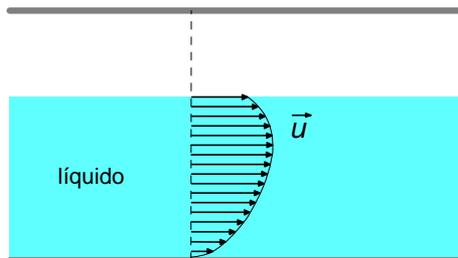
Se um alvo estiver a deslocar-se em direcção diferente do alinhamento entre ele e a fonte, para efeito de onda reflectida para a mesma fonte apenas contribui a sua componente de velocidade nessa direcção, conforme indicado na Figura 5.16.



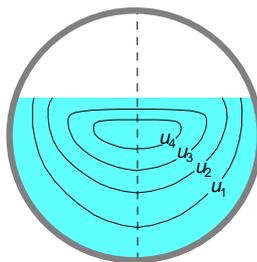
Figura 5.16 – Componente de velocidade na direcção do alinhamento fonte – alvo no caso de o deslocamento ter outra direcção

Aplicação do efeito Doppler de onda contínua à medição de velocidades num escoamento

Considere-se um escoamento com superfície livre em conduta, com um campo de velocidades cuja distribuição é a representada na Figura 5.17.



a – Perfil de velocidades segundo o sentido longitudinal do escoamento num plano axial vertical



b – Padrão da distribuição do campo de velocidades numa secção recta, mostrando isotáquias (linhas de igual velocidade)

Figura 5.17 – Padrão de escoamento com superfície livre numa conduta de secção circular

Admite-se que a velocidade de escoamento em cada ponto tem a direcção longitudinal do escoamento.

Suponha-se que existem pequenas partículas em suspensão que se deslocam com velocidade igual à do líquido na sua vizinhança. Seja um sistema de medição por efeito Doppler com emissão de onda contínua segundo uma direcção inclinada em relação à do escoamento, conforme se apresenta na Figura 5.18.

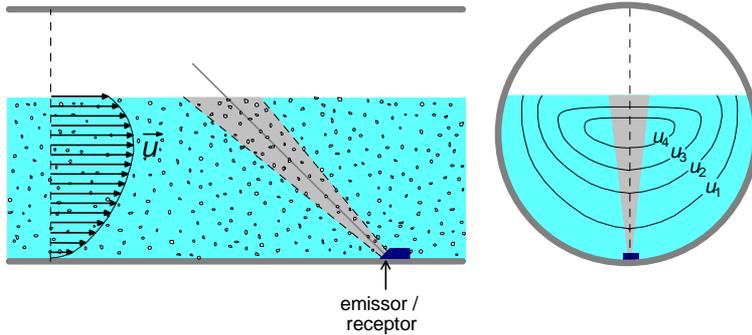


Figura 5.18 – Emissor/receptor acústico colocado no fundo da conduta para medição de velocidades de partículas em suspensão no líquido em escoamento por efeito Doppler

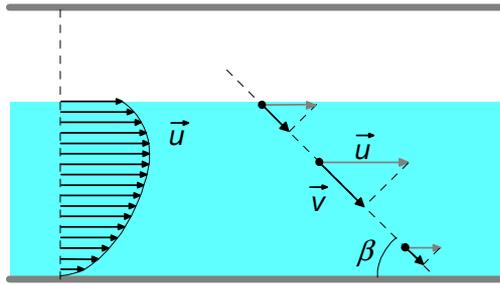
Uma dada partícula tem velocidade longitudinal \bar{u} , mas a onda por ela reflectida na direcção do emissor/receptor é provocada pela sua componente \bar{v} segundo essa direcção (cf. a Figura 5.19-a), ou seja, o desvio de frequência na onda reflectida obtém-se por

$$\Delta f = 2 \frac{f_s}{c} u \sin \beta \quad (5.17)$$

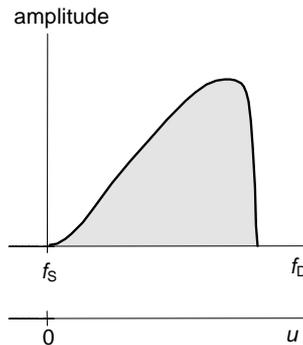
Conhecido Δf , calcula-se u através de

$$u = \frac{c}{2f_s \sin \beta} \Delta f \quad (5.18)$$

Neste caso, as ondas reflectidas nas partículas são em grande número. O espectro de frequências, embora discreto, tem grande concentração de riscas, pelo que se representa simplificada por uma curva contínua na Figura 5.19-b. Está-se a admitir que não existe atenuação na propagação das ondas ultrassónicas e que, por isso, a distribuição espectral corresponde efectivamente ao teor de velocidades presentes no feixe.



a – Componentes das velocidades das partículas em suspensão na direção do emissor/receptor



b – Espectro de frequências de ondas reflectidas por partículas ao longo do feixe acústico

Figura 5.19 – Aspectos do processo de medição de velocidades de partículas em suspensão num escoamento líquido por efeito Doppler de onda contínua

Para obter uma velocidade média do escoamento haveria que efectuar cálculos com a distribuição de velocidades obtida, baseados no conhecimento do padrão espacial de escoamento. Pode p.ex. considerar-se a **velocidade média** do espectro multiplicada por um factor a determinar empiricamente (calibração) [Huhta *et al.* (2005)]. Também é habitual tomar a **velocidade máxima** para multiplicar por outro factor adequado.

Tais factores dependem do padrão de escoamento e da geometria da secção molhada, variando, por conseguinte, com a altura de líquido na conduta.

Salienta-se que a aplicação que aqui interessa, em última instância, é a **determinação do caudal**, em que o valor da velocidade média obtida se multiplica pelo valor obtido da área molhada.

As ondas acústicas emitidas são normalmente ultrassons com frequências bastante acima da gama audível, tipicamente na ordem de 1 a 5 MHz.

Esta modalidade de transdução interessa sobretudo para pequenas alturas de água (tipicamente diâmetros de conduta inferiores a 1 m).

Dificuldades e limitações desta técnica

Recorde-se que este método obtém um valor representativo (médio, máximo, ou outro) retirado da distribuição de velocidades segundo um dado plano longitudinal, geralmente vertical, a partir do qual se infere um resultado global para o escoamento. A **mudança no padrão de escoamento** (entenda-se distribuição de velocidades) para o qual o aparelho em causa tenha sido calibrado constitui uma causa de erro. Para a contrariar haveria vantagem em efectuar a calibração em condições reais de utilização, para vários níveis de escoamento. Como isso é geralmente difícil de conseguir, os aparelhos têm de ser parametrizados em fábrica (ou calibrados em laboratório) em condições típicas, nomeadamente quanto à forma da secção das condutas e à sua inclinação; a cobertura de diferentes situações é disponibilizada ao utilizador em tabela ou por fórmulas de cálculo.

Convém, portanto, que os aparelhos sejam colocados em trechos de conduta rectilíneos, com homogeneidade de secção interior e longe da influência de descontinuidades.

A medição exige a presença de partículas em suspensão no escoamento, pressupondo que elas são arrastadas à velocidade do líquido que as envolve. Esta hipótese afigura-se plausível com pequenas partículas, mas deixa de o ser com **corpos sólidos**, ou com **bolhas, de dimensões consideráveis** arrastados no escoamento. Isso sucede, por vezes, em sistemas de drenagem de águas residuais urbanas. Uma solução para reduzir o efeito dessas ocorrências consiste em utilizar, por exemplo, dois feixes apontados para diferentes direcções.

A **acumulação de sedimentos** sobre o emissor/receptor é uma causa de atenuação que afecta seriamente o resultado da medição. Habitualmente prefere-se colocar este dispositivo um pouco desviado da linha de fundo do escoamento (cf. a Figura 5.20), mas é importante que o fabricante especifique qual a correcção a efectuar sobre os resultados que isso implica.

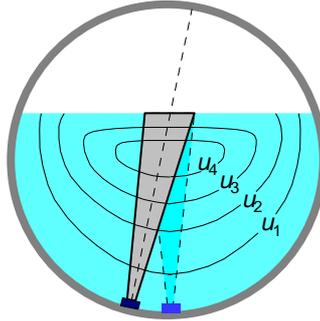


Figura 5.20 – Corte transversal de uma condução de secção circular mostrando o afastamento do emissor/receptor relativamente à geratriz inferior da condução por forma a evitar que fique rapidamente coberto por sedimentos

O **alinhamento incorrecto do feixe** (face à indicação dada pelo fabricante) prejudica o resultado da medição de caudal.

O **enviesamento do espectro** é um dos aspectos a ter em conta na utilização deste método de transdução para determinar caudais de escoamentos [Edelhauser (1999)].

Com efeito, as frequências das ondas reflectidas que chegam ao receptor correspondem fielmente às velocidades das partículas em movimento em cada ponto do feixe acústico. Mas as amplitudes com que essas ondas são recebidas variam com o afastamento dos pontos atingidos, devido à atenuação que sofrem no meio de propagação.

Assim, os pontos mais próximos vêem o seu contributo para a amplitude do espectro reforçado face aos mais afastados, cujo contributo fica reduzido. No exemplo visto nas figuras 5.18 e 5.19 os pontos mais afastados correspondem a velocidades elevadas e os mais próximos a velocidades que tendem para zero. O reforço das frequências próximas de zero face à redução em frequências elevadas traduz-se num efeito de enviesamento ilustrado na Figura 5.21.

Este efeito vem retirar importância às velocidades medidas em pontos mais à superfície, que são geralmente as velocidades dominantes no escoamento, sendo tanto mais acentuado quanto mais longo for o feixe acústico.

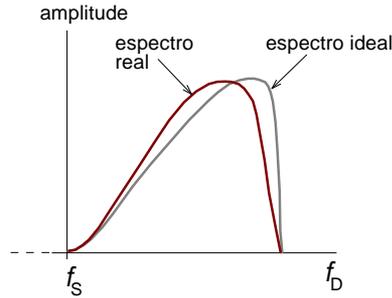


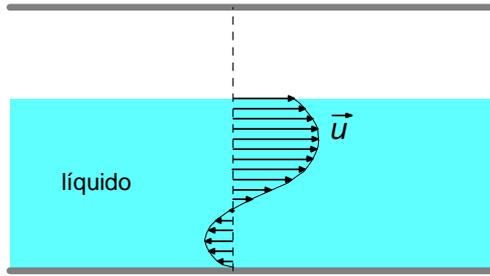
Figura 5.21 – Enviesamento do espectro de frequências de ondas reflectidas

O sinal em onda contínua é emitido com potência relativamente baixa e o efeito referido acaba por limitar a aplicação desta técnica a alturas de água tipicamente na ordem dos decímetros (ou seja, diâmetros de conduta abaixo de 1 m).

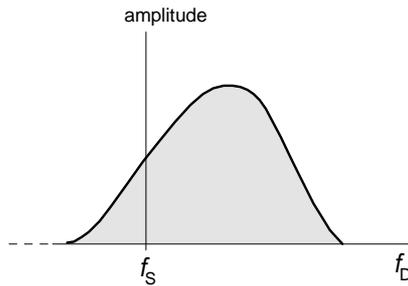
Como o emissor tem de enviar continuamente uma onda à frequência f_s , esta mesma frequência é habitualmente eliminada no sinal recolhido pelo receptor, o que se consegue p.ex. com um filtro sintonizado. Por essa razão, este método não é adequado para a medição de **velocidades nulas ou muito baixas**.

Em escoamentos com perfis de velocidades análogos ao das figuras 5.18 e 5.19-a o problema não será grave, visto que o contributo das baixas velocidades para o caudal não é preponderante, excepto se forem escoamentos globalmente lentos (com velocidades tipicamente abaixo da dezena de cm s^{-1}) em que deixa de ser utilizável.

O problema também existe em escoamentos com inversão de sentido, como ilustrado na Figura 5.22. Em consequência da filtragem para eliminação da frequência f_s , o espectro passa a ter uma lacuna (cf. a Figura 5.23) às baixas velocidades.



a – Perfil de componentes longitudinais de velocidade no plano vertical axial da conduta



b – Espectro de frequências das ondas reflectidas

Figura 5.22 – Caso de um escoamento com inversão de sentido das velocidades longitudinais: perfil de componentes longitudinais de velocidade e espectro de frequências das ondas reflectidas

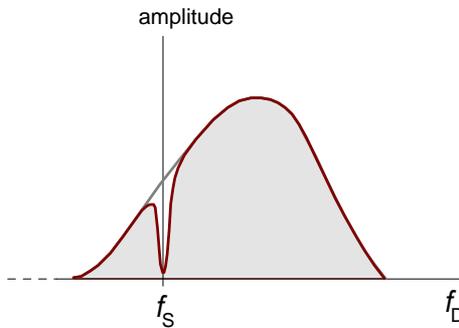


Figura 5.23 – Deformação do espectro de frequências de ondas reflectidas ocasionada por uma filtragem destinada à rejeição da frequência da onda emitida (f_s)

5.4.3 Transdução ultrassónica de velocidades de escoamento por efeito Doppler de onda pulsada

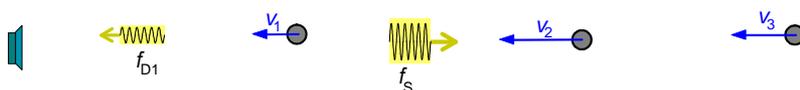
Princípio básico do efeito Doppler de onda pulsada

Considerem-se vários corpos em movimento, como representado na Figura 5.24, a velocidades muito inferiores à da propagação de ondas acústicas. Um emissor/receptor envia uma onda acústica de frequência f_s durante um intervalo de tempo muito curto (um **pulso de onda**). Analise-se, recorrendo à Figura 5.24, a evolução dos fenómenos de reflexão. Consideram-se aqui apenas as ondas resultantes de primeira reflexão nos alvos.

instante t_1



instante t_2



instante t_3



instante t_4



Figura 5.24 – Descrição do efeito Doppler de onda pulsada, mostrando o pulso de onda com frequência f_s que é emitido e vai gerando pulsos reflectidos à sua passagem pelos corpos móveis que encontra no seu trajecto

Em t_1 o pulso de onda acaba de ser emitido; em t_2 já passou o primeiro corpo, tendo originado uma reflexão com frequência f_{D1} ; em t_3 o pulso emitido ultrapassou o segundo corpo, originando uma reflexão com frequência f_{D2} , enquanto a primeira reflexão já passou o emissor/receptor; em t_4 já ultrapassou o terceiro corpo, ha-

vendo duas reflexões ainda em trânsito na direcção do emissor/receptor.

A evolução no tempo das ondas emitida e recebidas no emissor/receptor revela que os instantes t_i de chegada dos pulsos de ondas reflectidos são proporcionais às distâncias x_i a que se situam os alvos que as causaram (cf. a Figura 5.25), isto é,

$$t_i = 2 \frac{x_i}{c} \tag{5.19}$$

em que c representa a velocidade de propagação do som (ondas acústicas) no meio em questão.

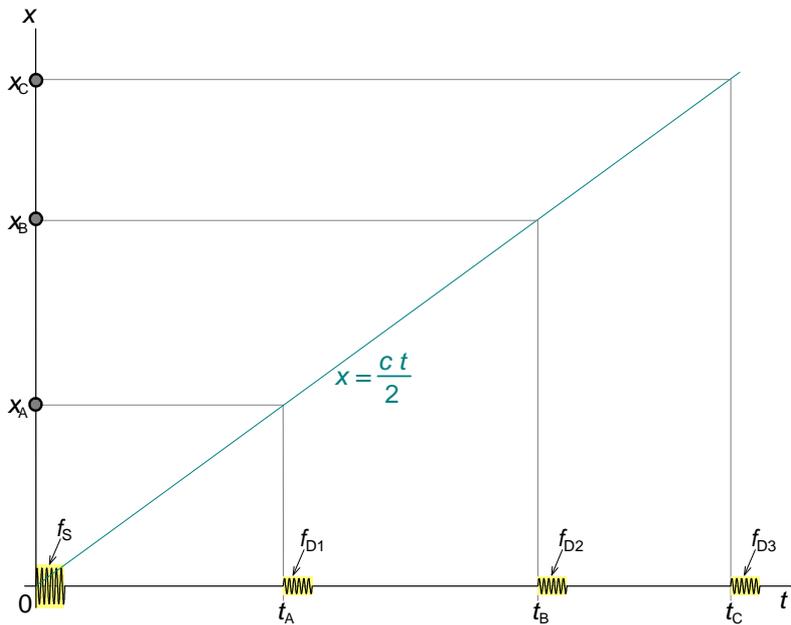


Figura 5.25 – Diagrama relacionando os tempos de chegada dos pulsos reflectidos e as distâncias a que se encontram do emissor/receptor

Com um sistema de medição que determine os tempos de chegada dos pulsos reflectidos e a frequência dos mesmos é possível obter:

- as distâncias dos objectos ao ponto de emissão/recepção;
- as respectivas velocidades.

Se a emissão de pulsos de onda for repetida no tempo permitirá determinar a evolução temporal das grandezas anteriores.

Para efectuar todo este conjunto de medições requerem-se instrumentos com grande capacidade de aquisição de dados e de cálculo. A obtenção dos espectros é feita com algoritmos de transformada rápida de Fourier (p.ex. FFT – *fast Fourier transform*).

Para que os resultados sejam satisfatórios é necessário que a velocidade dos alvos móveis seja muito inferior à da propagação acústica no meio, que a duração dos pulsos de onda seja muito inferior aos tempos de propagação em causa e que a frequência f_s seja suficientemente elevada por forma a proporcionar alguns ciclos em cada pulso de onda que permitam o reconhecimento da sua frequência.

Aplicação do efeito Doppler de onda pulsada à medição de velocidades de escoamento

Este princípio é utilizado para determinar velocidades de escoamento em pequenas regiões do mesmo ao longo do feixe de emissão acústica. Para o efeito pode utilizar-se um sistema emissor/receptor num mesmo dispositivo, tal como no caso do efeito Doppler de onda contínua, mas agora emitindo uma sequência de pulsos. Para recolher a informação das ondas reflectidas por cada pulso emitido é feita uma subdivisão do tempo em intervalos curtos, por forma a criar janelas temporais correspondentes a pequenos troços (tipicamente de 5 cm cada) ao longo do feixe.

O diagrama da Figura 5.26 mostra os detalhes do processo, evidenciando como a decomposição em intervalos temporais para análise espectral de ondas reflectidas permite obter as velocidades de deslocamento de partículas situadas num dado troço do feixe acústico. Como se trata de pequenos volumes, hipoteticamente com pouca dispersão de velocidades das partículas, a velocidade média obtida para esse processo pode ser considerada como representativa da pequena região (ou célula) em análise.

Procedendo do mesmo modo para todas as células (ou, por outras palavras, para todos os intervalos de tempo) determina-se uma distribuição de velocidades ao longo do feixe, conforme se mostra na Figura 5.27.

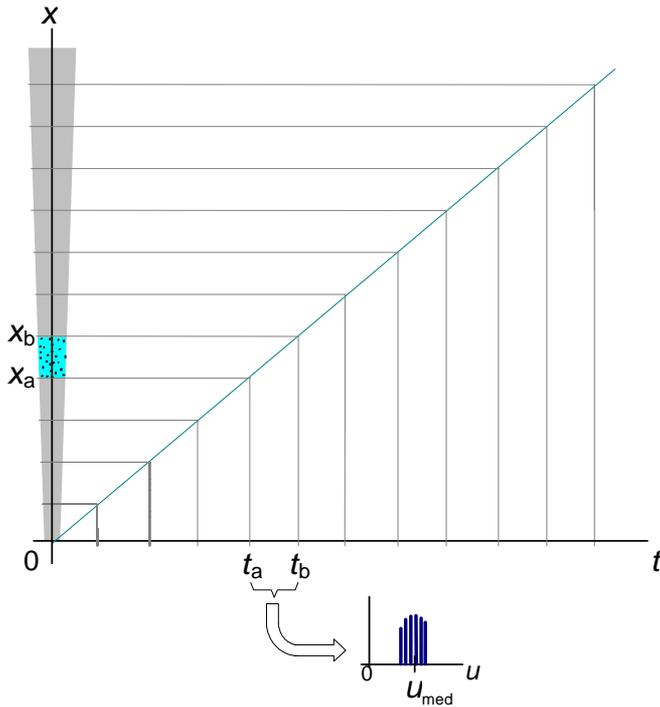


Figura 5.26 – Decomposição em intervalos temporais das ondas reflectidas por um pulso de onda nas partículas em suspensão: a análise de frequências em cada janela temporal permite obter velocidades das partículas na porção correspondente (célula) do feixe emitido

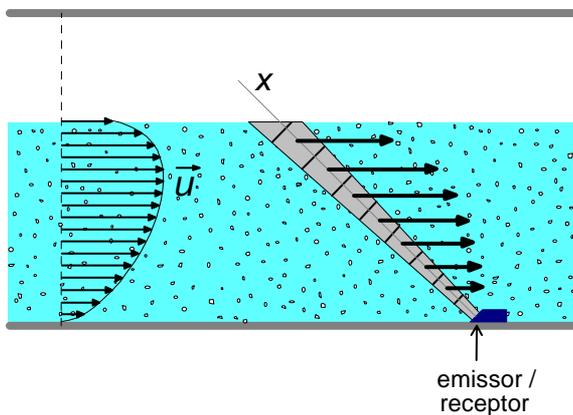


Figura 5.27 – Distribuição das velocidades médias calculadas nas diferentes células ao longo do feixe

Os ultrassons utilizados nas ondas emitidas têm frequências tipicamente na ordem de 1 a 5 MHz. Baseiam-se geralmente na tecnologia de cerâmicas piezoelétricas, em que um só dispositivo realiza as funções de emissor e receptor: quando excitado por sinal elétrico vibra emitindo as ondas e, uma vez agitado por ondas recebidas, desenvolve sinais elétricos que são depois tratados.

Com um levantamento de velocidades feito deste modo reconhece-se melhor o padrão de escoamento, tornando-se mais fácil obter uma velocidade média do mesmo para efeito de determinação do caudal. Para chegar a este último há que obter o valor da área molhada, geralmente através da medição de nível⁶⁹.

Como a emissão de pulsos é diferida da recepção de ondas reflectidas não existe qualquer dificuldade em detectar ondas reflectidas com frequência f_s , ou seja, reflexões em partículas com velocidade nula. Assim, em cada célula podem ser medidas velocidades de valor positivo, negativo ou nulo, característica que pode interessar, nomeadamente em escoamentos com distribuições de velocidades irregulares.

Dificuldades desta técnica

A transdução ultrassónica de velocidades de escoamento por efeito Doppler de onda pulsada exige grande capacidade de processamento, bem como grande rapidez na emissão de pulsos, na estabilização do dispositivo emissor/receptor, na recepção das ondas reflectidas e na aquisição de dados, o que contribui para que um sistema de medição baseado nesta técnica seja mais dispendioso do que um de onda contínua [Edelhauser (1999)].

Os pulsos emitidos, embora breves, têm de ser bastante mais potentes do que uma onda contínua. O tempo de estabilização do dispositivo imediatamente após a emissão dum pulso não é desprezável, sendo muito maior do que no caso da recepção das ondas reflectidas. Por essa razão existe um **período morto inicial** que se pode estender por um ou mais intervalos (uma ou mais células) que, deste modo, não proporcionam medições.

Na prática, as primeiras células (numa extensão de cerca de 5 a 10 cm) não podem ser usadas, pelo que este método só encontra aplicação quando as alturas do escoamento são, no mínimo, de várias dezenas de centímetros. Isto tipicamente corresponderá a diâ-

⁶⁹ Ver as equações (3.45) e (3.46).

metros de conduta não inferiores a 1 m. Com o aperfeiçoamento tecnológico dos equipamentos em questão, é previsível que este limite venha a diminuir.

Este método consegue medir valores mais representativos da distribuição de velocidades segundo o plano longitudinal em que se aplica do que os obtidos pelo método de onda contínua, o que é vantajoso para inferir o resultado global para o escoamento. Por conseguinte, a mudança no padrão de escoamento passará a ter uma influência menos significativa do que no caso anterior. No entanto, esse efeito não pode ser desprezado, devendo os aparelhos ficar colocados em trechos de conduta rectilíneos, com homogeneidade de secção interior e longe da influência de discontinuidades. A acumulação de detritos nas imediações do aparelho (nomeadamente nos seus acessórios de fixação) também se torna prejudicial deste ponto de vista.

O dispositivo deve ter forma hidrodinâmica e saliência reduzida, para que ele próprio, colocado no fundo da conduta, não crie perturbação ao escoamento nem contribua para alterar a área molhada efectiva na zona de medição.

O **alinhamento incorrecto do feixe** também pode ser causa de erro no resultado da medição de caudal.

A presença de **bolhas** ou de **corpos sólidos de dimensões consideráveis** arrastados no escoamento será, também aqui, problemática, tal como a **acumulação de sedimentos** sobre o dispositivo emissor/receptor. Conforme já foi referido para o método de onda contínua, é boa prática colocar este dispositivo um pouco desviado da linha de fundo da conduta (cf. a Figura 5.20). Mas nesse caso, para efeito de determinação do caudal, convém avaliar, ou obter do fabricante, o teor da correcção a efectuar sobre os resultados. É também indispensável uma limpeza regular do aparelho instalado na conduta.

A velocidade de propagação das ondas acústicas depende da temperatura a que se encontra o meio onde se propagam. Embora o tempo de propagação não seja a grandeza directa de transdução, é importante para localizar espacialmente as células a que se referem os intervalos de tempo de amostragem. Por essa razão, os sistemas de medição baseados neste princípio devem possuir uma compensação da variação de velocidade com a temperatura do líquido.

Os sensores utilizados na prática têm de resistir a **condições ambientais exigentes**, com destaque para a imersão permanente, mas também têm de suportar acções mecânicas mais ou menos intensas e acções químicas. Em geral, colocam-se apenas os dispositivos primários de transdução nestas condições adversas, ligando-os por cabos apropriados aos aparelhos secundários que fazem a excitação, o condicionamento de sinal e, eventualmente, a aquisição de dados, os quais ficam colocados em local mais protegido.

Levantamento multidireccional

A medição conjunta de perfis de velocidade em várias direcções, a partir de um mesmo aparelho, é uma hipótese que abre a possibilidade de estender o método ao levantamento de valores de velocidade num número ainda maior de pontos do escoamento. Esse tipo de solução multissensorizada permite chegar a valores mais exactos da velocidade média e, por conseguinte, do caudal.

O dispositivo emissor/receptor múltiplo é colocado no fundo do escoamento (eventualmente um pouco afastado do ponto de cota mais baixa da secção de instalação, pelas razões antes referidas), ficando com os vários feixes apontados em direcções distintas. A Figura 5.28 ilustra esta solução para o caso de um par de canais emissor/receptor no mesmo aparelho, apontados segundo direcções diferentes. A mesma figura mostra a possibilidade de utilização de dois pares de feixes ultrassónicos, inclinados para lados opostos, dotando a montagem de maior redundância para permitir reduzir ainda mais a incerteza das medições.

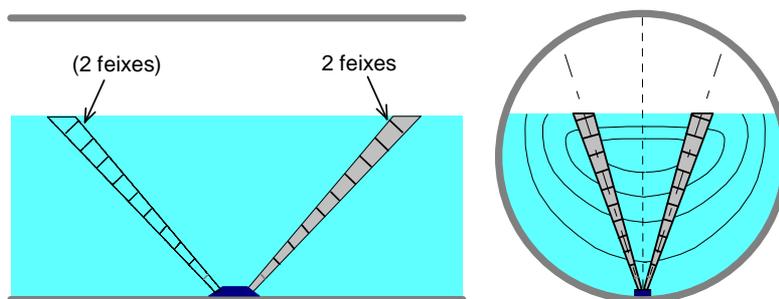


Figura 5.28 – Orientação de feixes múltiplos (um par e, eventualmente, dois pares) de um medidor ultrassónico de velocidades de escoamento por efeito Doppler de onda pulsada, por forma a cobrir zonas representativas do escoamento

5.4.4 Transdução de velocidades de escoamento por radar

Em vez de ondas elásticas (acústicas), podem ser utilizadas ondas electromagnéticas — que estão sujeitas a fenómenos análogos de reflexão e também ao efeito Doppler — para transdução de velocidades de escoamento. Esta técnica, conhecida por **radar** (*radio detection and ranging*), começou por ser desenvolvida para a detecção de objectos a distância através das ondas por eles reflectidas. O mesmo princípio, com medição do tempo de trânsito, também é utilizado na determinação de níveis de líquidos em poços ou furos muito estreitos, casos que são muitas vezes insuperáveis pela transdução ultrassónica, cujo feixe não é suficientemente colimado.

Por outro lado, o efeito Doppler também permite realizar a medição de velocidades de alvos móveis à distância com sistemas de radar (cf. a Figura 5.29). Para tal utilizam-se ondas electromagnéticas na gama espectral das microondas, com frequências na ordem das dezenas de GHz (comprimento de onda de poucos centímetros). Essas ondas podem ser emitidas e recebidas numa antena de muito pequenas dimensões.

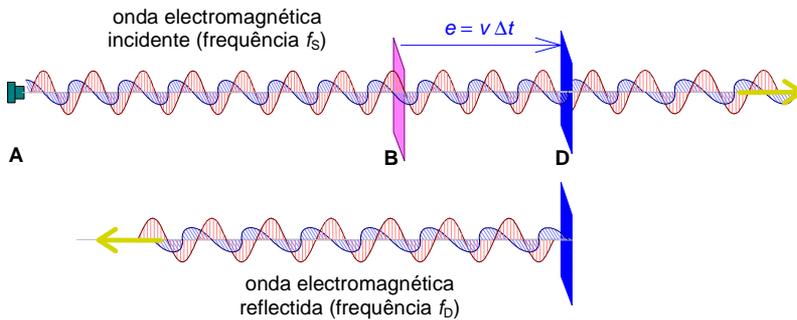


Figura 5.29 – Efeito Doppler com ondas electromagnéticas emitidas e recebidas numa antena situada num ponto A relativamente a um alvo em movimento a uma velocidade v

A velocidade do alvo determina-se através do desvio de frequências, também chamado **frequência Doppler** ($\Delta f = f_D - f_S$), conforme já foi visto na secção 5.4.2:

$$v = \frac{c}{2f_S} \Delta f \quad (5.20)$$

em que c simboliza agora a velocidade de propagação do campo electromagnético no meio em causa.

Este princípio, utilizando um feixe inclinado relativamente à superfície livre de um escoamento, permite extrair um espectro das projecções \vec{v} segundo o feixe, a partir do qual se determinam as velocidades horizontais \vec{u} nos pontos da superfície livre do escoamento onde se dá a incidência do feixe (cf. a Figura 5.30):

$$u = \frac{v}{\cos \beta} \quad (5.21)$$

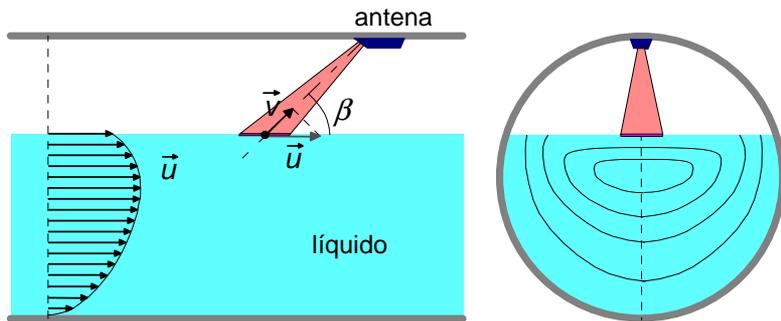


Figura 5.30 – Medição de velocidades superficiais com radar por efeito Doppler

Considerando que o padrão do escoamento (distribuição de velocidades numa secção de referência) é invariável, para cada valor da altura do escoamento é possível inferir o valor da velocidade média deste a partir do espectro de velocidades recolhido das ondas reflectidas numa mancha na zona superficial do escoamento (com poucos milímetros de espessura). Assim, uma vez calibrado, o aparelho de radar baseado no efeito Doppler, complementado por outro aparelho transdutor de nível, permite inferir o valor da velocidade média do escoamento bem como o valor do caudal [Marsh-McBirney (2005)].

Os méritos desta técnica residem na sua imunidade à variação de temperatura e à agitação do ar; aplicados a escoamentos em canal, os aparelhos de radar podem ficar colocados totalmente fora do líquido e livres do depósito de sedimentos. No entanto, são sensíveis a alterações no padrão de escoamento previsto (ou de calibração), que podem ocorrer designadamente por alteração do material sólido transportado, ou de espuma, ou por afastamento da geometria do local face às condições de calibração. Por outro lado, as dimensões da antena são superiores às dos dispositivos piezoeléctricos utilizados como emissores/receptores de ultras-

sons, pelo que os aparelhos se tornam relativamente volumosos para utilizar dentro de condutas de drenagem de águas residuais de pequena dimensão (p.ex. com menos de 1 m de diâmetro).

5.4.5 Transdução de velocidades de escoamento por indução electromagnética

Medição transversal

Seria desejável que o princípio de indução electromagnética, que tem muito bom desempenho na medição da velocidade média de escoamentos sob pressão, também fosse estendido a aplicações em escoamentos com superfície livre. A localização dos eléctrodos é, todavia, problemática quando se admitem alturas de líquido variáveis na conduta. No entanto, têm surgido soluções para ultrapassar essa dificuldade, merecendo destaque uma que se baseia na colocação de um par de eléctrodos a um nível tão baixo quanto seja praticável, sem comprometer seriamente o desempenho metrológico do sistema nem o nível mínimo requerido para a sua operação. A configuração dos electromagnetos de excitação também é modificada por forma a intensificar o campo magnético na zona entre os eléctrodos.

Esse nível mínimo é proposto a cerca de 10% do diâmetro interior em equipamento comercializado, tendo o elemento primário uma geometria tubular semelhante à dos modelos que se destinam a escoamentos sob pressão (cf. a Figura 5.31).

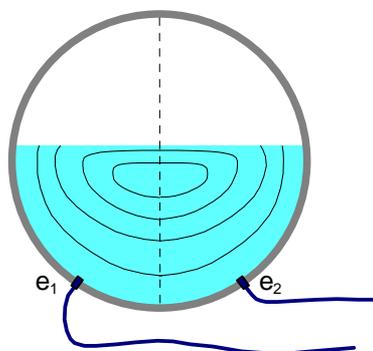


Figura 5.31 – Transdução electromagnética de velocidades em condutas parcialmente cheias: localização de eléctrodos (e_1 e e_2) apropriada para altura de líquido variável

A força electromotriz induzida corresponde a uma velocidade média numa linha entre os eléctrodos. A **constante do primário** a

utilizar para obter valores da velocidade média do escoamento varia com o nível do líquido. Um conjunto considerável desses valores tem de ser estabelecido por calibração para utilização posterior. Contudo, com esta modalidade de transdução não são de esperar exactidões tão boas como as que se conseguem com os medidores electromagnéticos para escoamentos sob pressão.

A posição dos eléctrodos ainda um pouco afastada relativamente ao ponto inferior da correspondente secção de medição permite salvaguardá-los da deposição de sedimentos. No entanto, esta solução é particularmente sensível à inclinação do elemento primário (quer do seu eixo longitudinal quer da linha que une os eléctrodos) relativamente ao plano horizontal.

Este tipo de medidor requer a ligação do seu elemento primário tubular à conduta, pelo que esta tem de ser preparada para esse efeito.

Medição pontual

As soluções de medição electromagnética de velocidade com sensores de inserção também se utilizam em escoamentos com superfície livre. Podem medir a velocidade do escoamento num só ponto, a partir de cujo valor se infere o da velocidade média. Também podem consistir na medição em vários pontos, sendo então possível obter melhores estimativas desse valor médio a partir dos diversos valores pontuais medidos. Nesta modalidade encontram-se quer soluções pouco intrusivas (p.ex. sensores localizados em dois ou mais pontos periféricos) quer muito intrusivas (p.ex. sensores em pontos situados ao longo de uma haste vertical). Estas últimas proporcionam menor incerteza ao inferir velocidades médias, mas são menos viáveis, ficando geralmente relegadas para levantamentos ocasionais.

5.4.6 Transdução do nível da superfície livre do escoamento com vista à determinação do caudal

A medição da altura a que se situa a superfície livre de um líquido costuma ser designada por **medição de nível**, sendo os aparelhos que a realizam conhecidos por **medidores de nível**. Descrevem-se resumidamente alguns métodos de transdução de nível que são utilizados em sistemas multissensorizados para determinação do caudal em escoamentos com superfície livre.

Transdução ultrassónica de nível por tempo de trânsito (eco ultrassónico)

A tecnologia dos dispositivos emissores/receptores de ondas acústicas, p. ex. baseados em cerâmicas piezoeléctricas, permite determinar a distância x até à fronteira com um objecto ou à zona de interface ar/líquido através da medição do intervalo de tempo Δt de ida e retorno (que é vulgarmente designado por **tempo de trânsito**):

$$x = \frac{c\Delta t}{2} \quad (5.22)$$

em que c representa a velocidade de propagação das ondas acústicas no meio em questão. As funções de emissor e receptor são geralmente realizadas por um mesmo dispositivo, de efeito reversível, ou por dispositivos distintos associados num mesmo bloco.

Se o sensor (emissor/receptor) se encontrar emerso poderá medir a distância a que se encontra do líquido ($x = d$); caso se encontre imerso, no ponto mais profundo, poderá medir directamente a altura do líquido ($x = h$), conforme fica ilustrado na Figura 5.32.

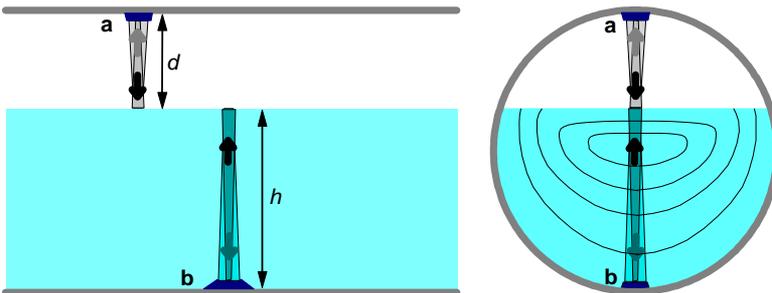


Figura 5.32 – Duas formas possíveis de colocação de transdutores ultrassónicos de distância para medir nível de líquido: a – fora do líquido; b – dentro do líquido

Trata-se de um método bastante sensível à **variação de temperatura** do meio (o líquido ou o meio gasoso em contacto com este), dada a influência que essa grandeza tem na velocidade de propagação. Para corrigir este efeito, os medidores de nível baseados neste método de transdução devem medir igualmente a temperatura ou incorporar outros mecanismos de compensação efectivos (p.ex. incluírem alvo fixo de referência).

A condição ideal para aplicação do método corresponde a uma superfície de líquido lisa. A **irregularidade da superfície** do líquido (p.ex. devida a agitação, a espuma, etc.) prejudica a exac-

tidão das medições, podendo mesmo impedir a aplicação do método [Stevens *et al.* (2004)].

Uma forma de tornar este método mais robusto e de contribuir para a diminuição da incerteza de medição consiste em adoptar **redundância de sensores**, chegando a ser utilizada a sua quadruplicação.

A colocação dos sensores no fundo requer a sua imersão permanente e não resulta com alturas de líquido muito baixas. A colocação no ponto mais elevado da secção da conduta não obriga a imersão permanente, mas esta ainda poderá ocorrer durante períodos mais ou menos longos em que a conduta encha; por outro lado, com a conduta quase cheia deixam de medir correctamente.

Quando se pretende efectuar medição de caudal é por vezes preferida a colocação no mesmo ponto de um conjunto integrado com todos os sensores de velocidade e de nível, para maior facilidade de montagem (fixação e cablagens).

Transdução de nível por medição de pressão hidrostática

Uma forma clássica de medir nível consiste na utilização de sensores de pressão colocados no fundo de um reservatório ou canal ou de uma conduta parcialmente cheia, como ilustrado na Figura 5.33.

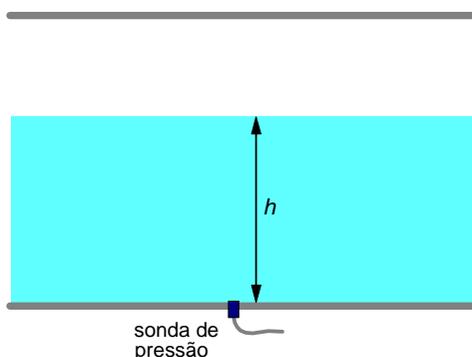


Figura 5.33 – Medição da pressão hidrostática para determinação do nível de líquido

A altura de líquido h determina-se por

$$h = \frac{p}{\rho g} \quad (5.23)$$

onde p simboliza a pressão relativa (acima da pressão atmosférica no local), ρ a massa volúmica do líquido e g a aceleração da gravidade⁷⁰.

Os transdutores de pressão mais comuns possuem uma membrana que é deformada pela diferença entre a pressão de um lado e do outro (cf. a Figura 5.34) e cuja deformação se transforma em sinal eléctrico através de extensómetros metálicos ou de semicondutor. Estes dispositivos medem, na realidade, a diferença de pressões entre o lado da membrana que contacta com o líquido e o lado da câmara interior. A pressão imposta nesta última depende da aplicação, nomeadamente:

- pressão atmosférica no ambiente do local (medição **relativa**⁷¹);
- pressão atmosférica padrão (medição **relativa padrão**⁷²);
- pressão nula (medição **absoluta**);
- pressão de outro fluido ou ambiente (medição **diferencial** propriamente dita).

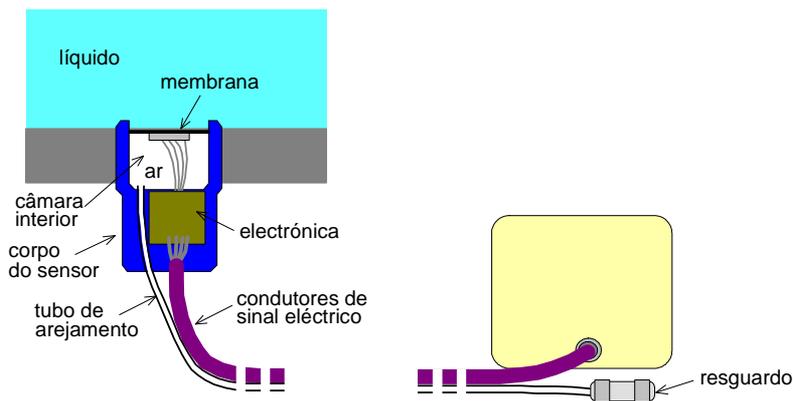


Figura 5.34 – Esquema de princípio de um transdutor de pressão diferencial com membrana

Se o dispositivo incorporar electrónica adequada para produzir um sinal normalizado em tensão ou em corrente (p.ex. 0 – 10 V, ou 4 – 20 mA) costuma receber a designação de **transmissor de pressão**. Mas por vezes contém apenas elementos passivos e a

⁷⁰ A Equação (5.23) resulta da conjugação das equações (3.3) e (3.8).

⁷¹ Designada por *gauge* em inglês.

⁷² Designada por *sealed gauge* em inglês.

transdução só se completa na unidade de condicionamento de sinal a que tem de ser ligado.

Para a determinação do nível de líquido numa conduta ou canal é conveniente efectuar uma medição referida à pressão atmosférica no local. Para o efeito, os sensores estão munidos de um fino tubo que acompanha o cabo de sinal⁷³, recebendo o ar atmosférico junto do ponto onde são feitas as ligações eléctricas do cabo. Nesse lado o tubo deve ser munido de um **resguardo** bastante permeável ao ar, mas que impeça a entrada de pequenos corpos ou poeiras, eventualmente contendo material exsicador para evitar a presença de humidade que possa condensar-se dentro do tubo e prejudicar a uniformização da pressão ao longo deste.

Os sensores deste tipo utilizados em sistemas de medição de caudal têm normalmente dimensões reduzidas, podendo por isso ser incorporados em blocos juntamente com outros sensores. A sua colocação deve resguardá-los, tanto quanto possível, da acumulação de sedimentos e/ou da interposição de bolhas entre o líquido e a membrana. Esta condição é geralmente difícil de assegurar, embora existam diversas formas de colocar o sensor com esse objectivo (cf. a Figura 5.35).

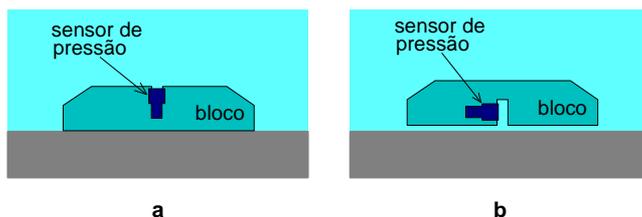


Figura 5.35 – Exemplos de formas de colocação dos sensores de pressão no fundo de uma conduta de águas residuais: a – com a membrana em contacto com o líquido pela zona superior do bloco; b – idem através de orifícios na zona inferior do bloco

Os medidores de nível deste tipo são normalmente sensíveis à variação de temperatura, devendo existir meios para compensação desse efeito na electrónica dos próprios dispositivos, se forem transmissores, ou noutra unidade que faça o respectivo condicionamento de sinal.

O método é adequado para líquidos em escoamento razoavelmente estacionário. Na presença de **agitação**, os valores medidos

⁷³ Tem um diâmetro interior com pouco mais de 1 mm e fica geralmente integrado no próprio cabo.

deixam de representar fielmente a altura da coluna de líquido acima do ponto de medição da pressão. Para conseguir então obter resultados de medições com significado de valores médios (isentos de grande tremor) pode-se efectuar filtragem electrónica; a instalação do transdutor de pressão dentro de um resguardo de tranquilização do líquido seria uma alternativa, mas que não se aplica a pequenos colectores porque causaria excessiva obstrução ao escoamento.

Outro método de medição do nível da superfície livre (ou da altura) de um escoamento, no qual se baseia o **medidor de nível bolha-a-bolha**, consiste em borbulhar ar comprimido no líquido, por meio de um tubo de diâmetro muito pequeno cuja extremidade é colocada a cota conhecida em relação ao fundo do escoamento, e em medir a pressão relativa desse ar (referida à pressão da atmosfera em contacto com a superfície livre do escoamento) necessária à introdução de bolhas no líquido (a uma cadência de uma bolha por segundo, aproximadamente). A altura do escoamento será então a soma da altura calculada pela Equação (5.23) correspondente àquela pressão relativa (que é igual à pressão hidrostática exercida na extremidade do tubo) com a referida cota em relação ao fundo.

Para obstar ao entupimento do tubo de introdução das bolhas de ar por sólidos em suspensão no líquido, mais provável quando se trata de águas residuais, o medidor de nível bolha-a-bolha efectua automaticamente descargas periódicas de ar comprimido nesse tubo para o limpar de resíduos.

Transdução de nível por efeito capacitivo

O medidor de nível capacitivo baseia-se na variação de capacidade de um condensador provocada pelo preenchimento parcial do espaço entre armaduras (condutores) por um líquido condutor ou de constante dieléctrica bastante diferente da do ar. A Figura 5.36 ilustra este princípio de transdução utilizando um par de armaduras planas paralelas (Figura 5.36-a). A capacidade C do condensador, supondo que as armaduras são extensas e o campo eléctrico lhes é normal, exprime-se por

$$C = k \frac{A}{d} \quad (5.24)$$

onde A representa a área útil de cada armadura, d a distância entre elas e k uma constante dielétrica que depende do material isolante interposto (dielétrico).

As duas armaduras do condensador podem ser incorporadas nas paredes de um canal ou reservatório, p.ex. como o ilustrado na Figura 5.36-b, desde que devidamente revestidas por material isolante que impeça o seu contacto eléctrico com o líquido. Os esquemas apresentados nas figuras 5.36-c a 5.36-e mostram a capacidade C entre armaduras em várias situações; nos casos extremos tem-se:

- $C = C_0$ (só com a presença de ar);
- $C = C_a$ (só com a presença de líquido, para além das finas camadas de dielétricos isolantes).

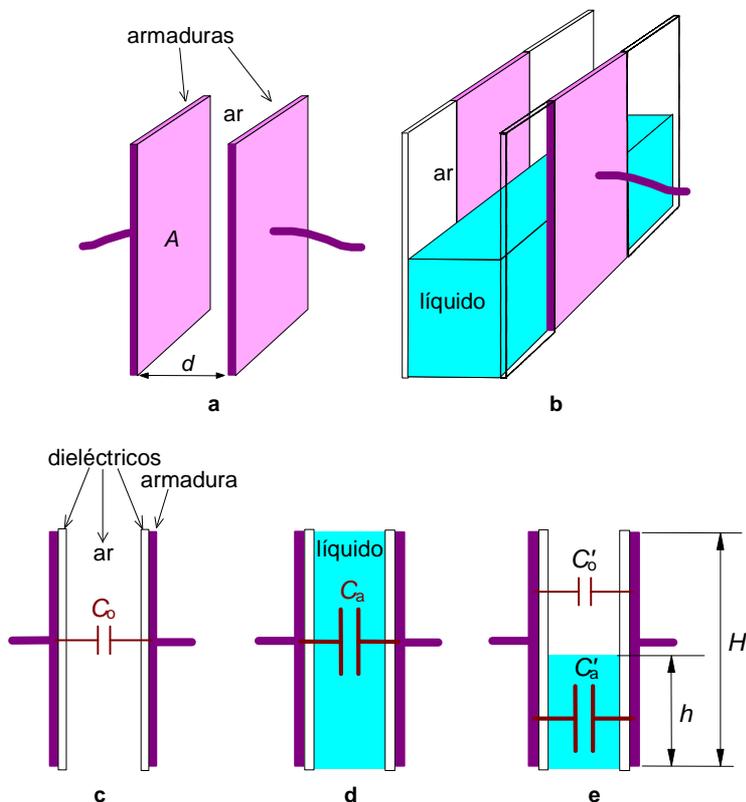


Figura 5.36 – Utilização do efeito capacitivo para medir níveis: a – constituição básica de um condensador com armaduras planas paralelas; b – sua incorporação nas paredes de um canal ou reservatório; c, d, e – esquemas do condensador sem líquido e com líquido a vários níveis

Sendo o líquido condutor eléctrico, resulta $C_a \gg C_o$. Com o líquido até ao nível h (para uma altura de armaduras H), a capacidade entre armaduras resulta num valor de proporção entre os extremos acima referidos:

$$C = C_o + \frac{h}{H}(C_a - C_o) \quad (5.25)$$

A utilização deste princípio em condutas de secção circular torna-se mais complexa, pois a geometria do condensador, com armaduras em banda, não proporciona a variação linear anterior. No entanto, este efeito pode ser compensado por cálculo correctivo, ou por modificação da forma das armaduras estabelecida de modo a satisfazer uma equação de variação linear como a anterior (cf. a Figura 5.37). As armaduras são colocadas pelo lado exterior de um tubo de medição construído com material isolante.

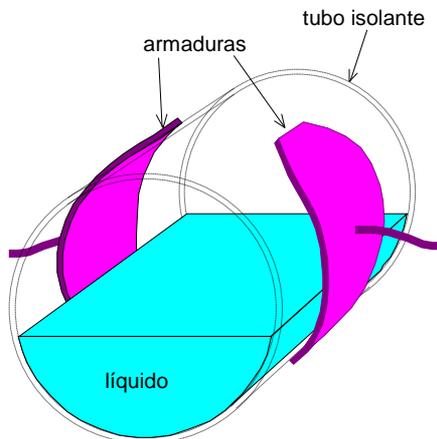


Figura 5.37 – Aspecto construtivo de um sistema de armaduras com geometria compensada para proporcionar variação linear de capacidade com o nível de líquido numa conduta de secção circular

A constante dieléctrica do líquido, quando este não seja bom condutor eléctrico, pode ser afectada pela sua composição e temperatura, factores que podem condicionar a exactidão da medição. Para obter a necessária exactidão com este tipo de transdutor torna-se necessário inserir um tubo de medição na conduta; por isso ele surge combinado com a transdução electromagnética de velocidade em alguns caudalímetros para escoamentos com superfície livre.

5.4.7 Exemplos de soluções com multissensorização para medição de caudal

Combinações típicas de sensores

Encontram-se comercialmente disponíveis diversos tipos de equipamentos para medição de caudal em escoamentos com superfície livre que combinam vários dos métodos de transdução anteriormente referidos. O mesmo se passa quanto ao grau de redundância de sensores. Existe a tendência de agrupar os sensores num único bloco, nuns casos para instalar na parte superior da conduta e noutros na parte inferior; mas também se encontram soluções com dois blocos, um para a parte superior e outro para a inferior.

Contudo, não existe presentemente, em todo este panorama de possibilidades, uma solução ou modalidade que se possa considerar consagrada.

No domínio de aplicação dos sistemas de drenagem de águas residuais urbanas predominam actualmente os sistemas integrados com medição ultrassónica de velocidades e de níveis e, eventualmente, com medição de pressão. É menos frequente ver combinações que envolvam transdução de velocidades por radar ou por indução electromagnética, embora essas soluções existam no mercado.

Nas figuras 5.38 a 5.43 estão esquematicamente representadas algumas combinações de multissensorização encontradas em sistemas comercializados. Certos fabricantes permitem ainda, com um dado secundário (condicionador de sinal), opções de configuração com diferentes sensores, e/ou graus de redundância, para nível e para velocidade.

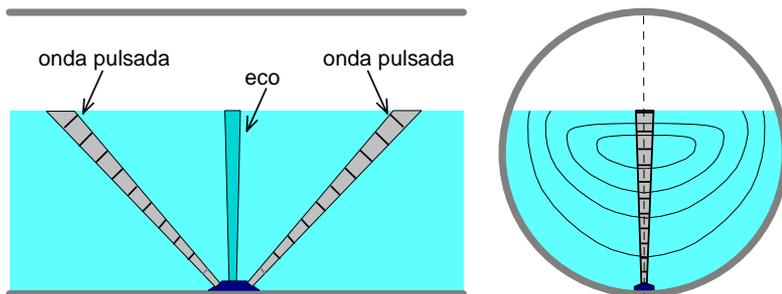


Figura 5.38 – Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – Doppler ultrassónico por onda pulsada, duplo; nível – ultrassónico por tempo de trânsito, simples

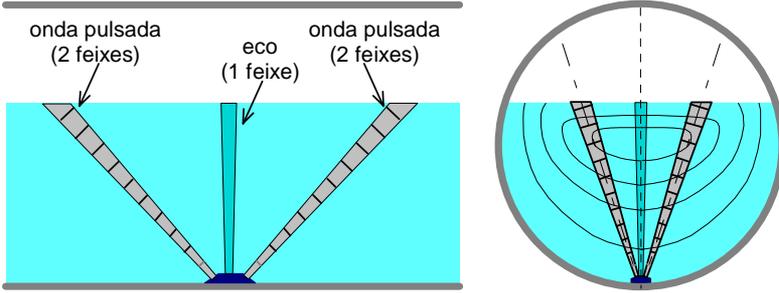


Figura 5.39 – Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – Doppler ultrassônico por onda pulsada, quádruplo; nível – ultrassônico por tempo de trânsito, simples

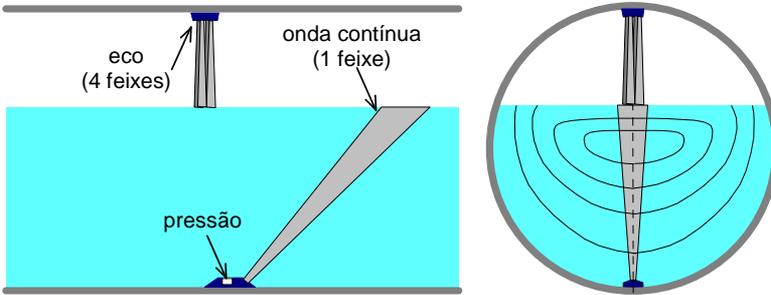


Figura 5.40 – Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – Doppler ultrassônico por onda contínua, simples; nível – ultrassônico por tempo de trânsito, quádruplo, e pressão hidrostática, simples

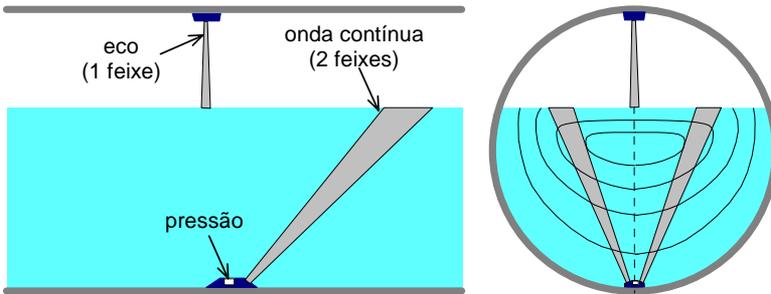


Figura 5.41 – Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – Doppler ultrassônico por onda contínua, duplo; nível – ultrassônico por tempo de trânsito, simples, e pressão hidrostática, simples

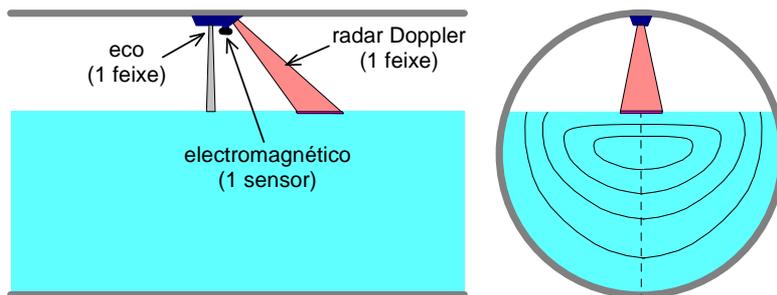
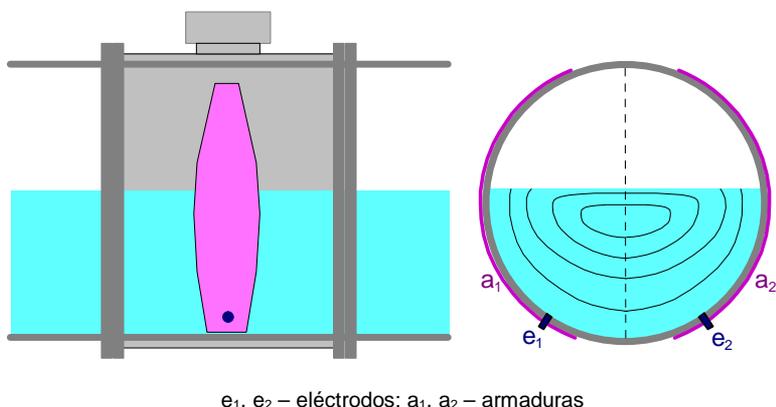


Figura 5.42 – Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – Doppler de radar (velocidade superficial), simples; nível – ultrassónico por tempo de trânsito, simples; velocidade – electromagnético pontual (para situações de enchimento total da condução)



e_1, e_2 – eléctrodos; a_1, a_2 – armaduras

Figura 5.43 – Sistema de medição de caudal baseado na seguinte solução de transdução: velocidade – indução electromagnética, simples; nível – capacitivo, simples

Unidades de condicionamento de sinal e processamento de dados

Neste tipo de medidores de caudal, o **condicionamento de sinal** e o **processamento de dados** são tarefas geralmente muito exigentes ficando a cargo de unidades que, frequentemente, também realizam a função de **aquisição de dados**, entendida como memorização destes.

Estas unidades, quando instaladas em compartimentos (casetas) exteriores ao ambiente dos colectores de águas residuais podem

incluir mostradores para exibição permanente de valores medidos e botões de selecção/parametrização (cf. a Figura 5.44-a). Nessas casetas com ambiente preservado podem, caso seja viável, existir alimentações de energia a partir da rede pública, ou com fonte alternativa (p.ex. fotovoltaica) ou apenas com acumuladores. Podem também incluir equipamentos para transmissão de dados a distância.

Quando instaladas no ambiente dos colectores de águas residuais (cf. a Figura 5.44-b), as referidas unidades são geralmente herméticas e não dispõem de mostradores exteriormente visíveis. Possuem bateria de acumuladores e têm de realizar a armazenagem de dados; por vezes, mesmo nessas condições, ainda é possível incluírem a transmissão de dados por rede celular. Este tipo de solução é menos versátil do que a anterior e geralmente mais cara e de difícil acesso, mas é a única a que se pode recorrer quando não for viável dispor de casetas junto dos locais de medição.

Aspectos construtivos e de montagem

Pelas razões assinaladas no Capítulo 6, convém que as cablagens de ligação entre as unidades de condicionamento de sinal e processamento de dados e os blocos de sensores sejam tão curtas quanto possível.

O ambiente dos sistemas de drenagem de águas residuais urbanas (colectores e câmaras de visita) é permanentemente húmido/molhado, sendo mesmo inundável em quase todos os pontos, sujeito a acções mecânicas intensas, e considerado ambiente com risco de explosão. Enquanto os primeiros riscos exigem soluções herméticas e robustas para as instalações e equipamentos que aí fiquem colocados, o último tem implicações importantes não só nestes aspectos mas também quanto aos sinais eléctricos veiculados nos circuitos (é inviável, p.ex., providenciar alimentações a 230 V).

A fixação de blocos de sensores na parte interior dos colectores de águas residuais requer cuidados especiais de fixação por forma a que eles, com a respectiva cablagem, resistam aos esforços a que ficam sujeitos com a passagem do líquido em todas as situações previsíveis (normais e de enchimento total).

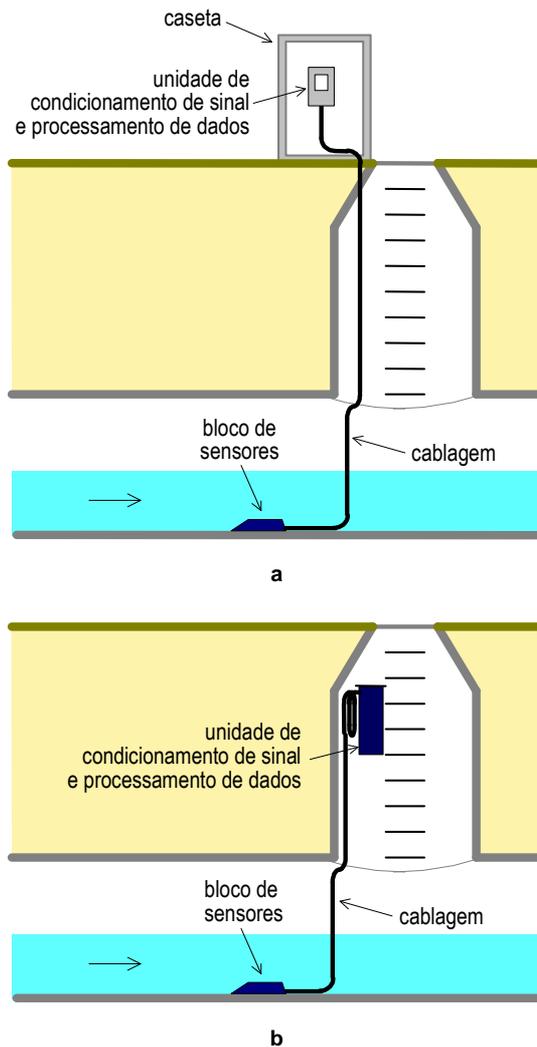


Figura 5.44 – Duas modalidades de equipamento de condicionamento de sinal e processamento de dados de caudalimetria num sistema de drenagem de águas residuais: a – para instalação em caseta exterior ao ambiente dos colectores; b – para instalação dentro do ambiente dos colectores

A forma expedita de fixação destes dispositivos dentro de condutas de pequeno ou médio diâmetro (tipicamente inferior a 1 m) consiste na utilização de anéis ou cintas de chapa de aço inoxidável ajustáveis, tal como se exemplifica na Figura 5.45.

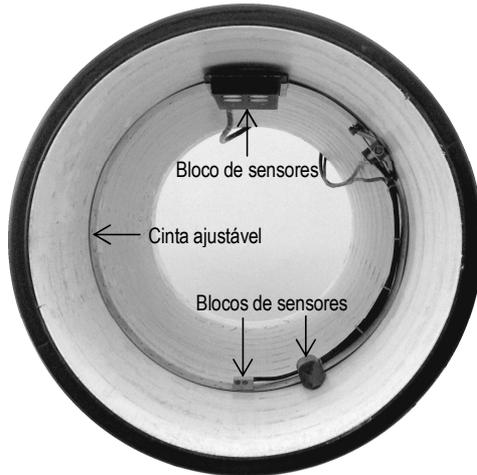


Figura 5.45 – Caudalímetro com multissensorização: exemplo de fixação dos blocos de sensores e dos respectivos cabos no interior de uma conduta por meio de uma cinta ajustável (vista no sentido de jusante)

Em condutas de maior diâmetro já se torna praticável a fixação dos dispositivos e cabos à parede interior, de forma robusta, sem recurso a cintas ajustáveis, como se mostra na Figura 5.46⁷⁴.



Figura 5.46 – Caudalímetro com multissensorização: exemplo de fixação do único bloco de sensores e do respectivo cabo directamente na parede interior de uma conduta por meio de uma chapa de montagem (vista no sentido de jusante)

⁷⁴ Note-se que nos exemplos ilustrados nas figuras 5.45 e 5.46 alguns troços dos cabos não estão bem fixados à parede interior da conduta, o que revela uma deficiente execução das montagens.

5.5 Selecção do tipo adequado de caudalímetro

5.5.1 Símbolos designativos dos vários tipos de caudalímetros

Com o intuito de simplificar a exposição e a leitura do método expedito de selecção do tipo adequado de caudalímetro que é apresentado na secção seguinte, são nele utilizados os símbolos que constam no Quadro 5.5 como designativos dos vários tipos de caudalímetros que foram tratados nas secções 5.2, 5.3 e 5.4.

Quadro 5.5 – Símbolos designativos dos vários tipos de caudalímetros para escoamentos com superfície livre utilizados no método de selecção do tipo adequado de caudalímetro

Caudalímetro			Símbolo designativo	
Grupo	Tipo	Subtipo		
Caudalímetro com descarregador de soleira delgada	Caudalímetro com descarregador rectangular	–	D ₁	
	Caudalímetro com descarregador Bazin	–	D ₂	
	Caudalímetro com descarregador triangular	–	D ₃	
Caudalímetro com caleira	Caudalímetro com caleira Venturi	–	C ₁	
	Caudalímetro com caleira Parshall	–	C ₂	
Caudalímetro com multissensorização	Caudalímetro com transdução ultrassónica de velocidades por efeito Doppler de onda contínua	–	M ₁	
	Caudalímetro com transdução ultrassónica de velocidades por efeito Doppler de onda pulsada	–	M ₂	
	Caudalímetro com transdução de velocidades (superficiais) por radar por efeito Doppler	–	M ₃	
	Caudalímetro com transdução de velocidades por indução electromagnética	Com primário tubular		M ₄₁
		Com primário de inserção		M ₄₂

5.5.2 Método expedito de selecção do tipo adequado de caudalímetro

No Quadro 5.6 estão listados os parâmetros e os respectivos requisitos que são geralmente considerados relevantes para a selecção de um tipo de caudalímetro apropriado para uma dada apli-

cação; também aí são identificados — utilizando os símbolos que constam no Quadro 5.5 — os vários tipos de caudalímetros que satisfazem genericamente cada um dos referidos requisitos.

Sendo conhecidos os diversos requisitos aplicáveis a uma determinada situação concreta de medição de caudal num escoamento com superfície livre, um método expedito de selecção preliminar dos tipos de caudalímetros adequados para o efeito consiste na utilização da informação contida no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – Informação básica para selecção preliminar dos tipos adequados de caudalímetros para escoamentos com superfície livre

Dados para selecção		Tipos de caudalímetros adequados
Parâmetro	Requisito	
Suporte do escoamento	Canal	D ₁ , D ₂ , D ₃ , C ₁ , C ₂ , M ₁ , M ₂ , M ₃ , M ₄₂
	Conduta	M ₁ , M ₂ , M ₃ , M ₄₁
Tipo do líquido em escoamento	Água	D ₁ , D ₂ , D ₃ , C ₁ , C ₂ , M ₃ , M ₄₁ , M ₄₂
	Água residual urbana	C ₁ , C ₂ , M ₁ , M ₂ , M ₃ , M ₄₁ , M ₄₂
Carácter temporal da utilização do caudalímetro	Permanente	D ₁ , D ₂ , D ₃ , C ₁ , C ₂ , M ₁ , M ₂ , M ₃ , M ₄₁
	Temporária	M ₁ , M ₂ , M ₃ , M ₄₂
Versatilidade de utilização	Adequação a diversas dimensões do suporte do escoamento	M ₁ , M ₂ , M ₃ , M ₄₂

A satisfação de requisitos adicionais aos discriminados no quadro precedente — como, por exemplo, os que são apresentados na secção seguinte relativamente aos métodos de transdução de velocidade e de nível (ou altura) de escoamentos com superfície livre — poderão decerto contribuir para o refinamento (e, por conseguinte, para o aumento de convergência) do método de selecção do caudalímetro mais apropriado para a aplicação concreta em questão.

5.5.3 Avaliação qualitativa de métodos de transdução em caudalímetros com multissensorização

Os quadros 5.7 e 5.8 apresentam, de forma resumida e bastante genérica, apreciações qualitativas da aplicabilidade e do desempenho de alguns dos métodos de transdução de velocidade e de nível aplicáveis em soluções multissensorizadas de medição de caudal

em escoamentos com superfície livre. Conforme já foi referido, não existem soluções preferenciais consagradas para este problema, pelo que se apontam os méritos e os deméritos dos métodos de transdução de cada grandeza requerida pela medição do caudal, e não à multiplicidade de combinações possíveis desses métodos.

Quadro 5.7 – Indicações qualitativas genéricas sobre aplicabilidade, desempenho e custo de alguns métodos de transdução de velocidade em escoamentos com superfície livre

Requisito	Transdução de velocidade						
	Ultrassónica por efeito Doppler				Por radar por efeito Doppler	Por indução electromagnética	
	Onda contínua		Onda pulsada			Tubular	Pontual
	1 feixe	≥ 2 feixes	1 feixe	≥ 2 feixes			
Pequena perturbação do escoamento	+	+	+	+	++	++	~
Miniaturização dos sensores	+	+	+	+	~	na	+
Versatilidade de utilização	++	++	++	++	++	--	++
Operação com altura de escoamento baixa	~	~	-	-	~	-	~
Operação com conduta totalmente cheia	+	+	++	++	na	+	~
Utilização em conduta com diâmetro nominal entre DN 200 e DN 1000	~	+	na	-	-	~	~
Utilização em conduta com diâmetro nominal superior a DN 1000	~	-/-	~	+	~	~	-
Compatibilidade com líquido a temperatura elevada	--	--	--	--	++	+/~	-/--
Compatibilidade com líquido corrosivo	--	--	--	--	++	+/~	--
Rastreabilidade metrológica	~	+	+	+	-	+	-
Custo moderado	+	+	~	~	~	--	+

Legenda

++: muito bom; +: bom; ~: razoável; -: pouco aconselhável ou medíocre; --: desaconselhável ou mau; na: não aplicável.

Em complemento do método expedito de selecção do tipo adequado de caudalímetro apresentado na secção precedente, as referidas apreciações qualitativas poderão contribuir para a escolha de combinações adequadas de sensores num caudalímetro com multissensorização.

Quadro 5.8 – Indicações qualitativas genéricas sobre aplicabilidade, desempenho e custo de alguns métodos de transdução de nível em escoamentos com superfície livre

Requisito	Transdução de nível da superfície livre (ou da altura) do escoamento				
	Ultrassónica por tempo de propagação		Capacitiva (tubular)	Medição de pressão hidrostática	
	No líquido	Fora do líquido		Com membrana	Bolha-a- bolha
Instalação permanente	++	+	+	-	+
Instalação temporária	+	+	na	+	+
Pequena perturbação do escoamento	+	++	++	+	+
Miniaturização dos senso- res	+	+	na	+	+
Versatilidade de utilização	+	++	--	+	-
Operação com altura de escoamento muito baixa	--	~	--/-	+	--
Operação com conduta to- talmente cheia	+	-	-	+	+
Utilização em canal	++	++	--	+	++
Utilização em conduta com diâmetro nominal entre DN 200 e DN 1000	-	~	+	~	+
Utilização em conduta com diâmetro nominal su- perior a DN 1000	+	+	~	+	+
Compatibilidade com líqui- do a temperatura elevada	--	++	+	-/-	+
Compatibilidade com líqui- do corrosivo	--	++	+	na	+
Rastreabilidade metroló- gica	~	~	~	-	~
Custo moderado	-	-	--	~	-

Legenda

++: muito bom; +: bom; ~: razoável; -: pouco aconselhável ou medíocre; --: desaconselhável ou mau; na: não aplicável.

Nestes quadros também não está considerado o efeito da redundância de sensores que, de um modo geral, beneficia globalmente o desempenho dos respectivos sistemas de medição de caudal. As apreciações que neles constam têm carácter essencialmente indicativo para a abordagem do problema.

A selecção de equipamentos para casos concretos requer uma análise comparativa mais aprofundada entre soluções que, após uma primeira triagem, se afigurem promissoras. Para a tomada final de decisões devem ser ponderados dados adicionais a obter dos fabricantes, nomeadamente as características de desempenho em condições semelhantes às da aplicação (com certificação dessas características e quantificação de incertezas de medição) e os custos efectivos (de investimento e de manutenção).

5.6 Dimensionamento hidráulico

5.6.1 Parâmetros de dimensionamento

Caudalímetros com descarregador de soleira delgada

O dimensionamento hidráulico de qualquer dos três tipos de caudalímetros com descarregador de soleira delgada que foram tratados na secção 5.2 necessita dos seguintes dados:

- largura do canal de alimentação do descarregador B ;
- limites da gama de valores previstos do caudal a medir — ou seja, os valores máximo Q_{\max} e mínimo Q_{\min} , designados por **caudal máximo** e **caudal mínimo de dimensionamento**, respectivamente.

Caudalímetros com caleira

Os parâmetros de dimensionamento hidráulico de um caudalímetro com caleira Venturi ou com caleira Parshall são os seguintes:

- largura do canal de alimentação da caleira B ;
- Q_{\max} e, somente no caso de um caudalímetro com caleira Parshall, Q_{\min} .

Caudalímetros com multissensorização

Os sensores componentes de um caudalímetro com multissensorização não são, regra geral, objecto de dimensionamento hidráulico. No entanto, a escolha dos vários tipos de sensores e da sua adequada combinação a utilizar numa solução multissensorizada para uma dada aplicação concreta de caudalimetria deve ser baseada em alguns parâmetros de natureza hidráulica, designadamente:

- tipo de suporte do escoamento — canal ou conduta;
- altura mínima do escoamento;
- altura máxima do escoamento (incluindo a eventualidade de enchimento total no caso de uma conduta);
- diâmetro interior (ou diâmetro nominal) da conduta.

5.6.2 Regras de dimensionamento

Caudalímetros com descarregador de soleira delgada

O dimensionamento hidráulico de qualquer dos caudalímetros com descarregador de soleira delgada anteriormente considerados consiste na determinação da cota d (ver as figuras 5.2, 5.4 e 5.5) que possibilite a satisfação das condições de aplicabilidade da respectiva equação de vazão (discriminadas no penúltimo parágrafo da secção 5.2.2, se o descarregador for rectangular ou Bazin, ou 5.2.4, no caso de um descarregador triangular) para Q_{\max} e também para Q_{\min} — e, por conseguinte, para qualquer valor previsível do caudal a medir.

Caudalímetros com caleira

No caso de um caudalímetro com caleira Venturi, o seu dimensionamento hidráulico resume-se à determinação do valor apropriado da relação b/B , entre a largura do colo da caleira b e a do canal de alimentação, que garanta o funcionamento da caleira em condições de descarga livre para qualquer valor da gama de medição do caudal.

Um método expedito para esse fim, sugerido na norma ISO 1438 (1975), consiste na seguinte sequência de passos:

- i) Uma vez definida a altura do escoamento h_j no canal de instalação a jusante da caleira para Q_{\max} , considerar que a correspondente altura do escoamento h_m no canal de alimentação é $h_m = 1,2 h_j$ (se $b/B > 0,35$) ou $h_m = 1,3 h_j$ (se $b/B \leq 0,35$);
- ii) Determinar o número de Froude do escoamento no canal de alimentação correspondente a Q_{\max} :

$$Fr = \frac{Q_{\max}}{B\sqrt{gh_m^{3/2}}} \quad (5.26)$$

que tem necessariamente de ser inferior a 1 porque esse escoamento é lento;

- iii) Recorrendo ao Quadro 5.9, seleccionar o valor de b/B correspondente àquele número de Froude e, a partir dele, determinar a largura do colo da caleira apropriada para a aplicação concreta em causa.

Tratando-se de um caudalímetro com caleira Parshall, o seu dimensionamento hidráulico consiste simplesmente na selecção do tamanho nominal da caleira b por forma a que, para Q_{\max} e para Q_{\min} , ela funcione em condições de descarga livre e dentro dos limites de Q e de h_1 que estão definidos no Quadro 5.4.

Caudalímetros com multissensorização

Para a escolha dos tipos de sensores a combinar numa solução multissensorizada para uma determinada aplicação foram dadas indicações qualitativas nos quadros 5.7 e 5.8 da secção 5.5.3.

Os caudalímetros com transdução electromagnética de velocidades do escoamento e com primário tubular próprio para intercalar numa conduta não proporcionam versatilidade para adaptação a diferentes diâmetros de conduta. Em sistemas de drenagem de águas residuais, ao invés do que é recomendável em escoamentos sob pressão típicos dos sistemas de abastecimento de água, os primários destes caudalímetros devem ter, geralmente, um diâmetro nominal igual ao da conduta principal. Caso se proponham reduções de diâmetro para alcançar melhores exactidões de medição com caudais baixos, tais reduções não devem pôr em causa a capacidade de drenagem na situação extrema de conduta completamente cheia.

Quadro 5.9 – Dimensionamento hidráulico de caleiras Venturi: valores de b/B em função do número de Froude no canal de alimentação para Q_{\max}

Número de Froude no canal de alimentação para Q_{\max} Fr	Relação entre as larguras do colo da caleira e do canal de alimentação b/B
0,055	0,10
0,066	0,12
0,077	0,14
0,088	0,16
0,099	0,18
0,110	0,20
0,121	0,22
0,132	0,24
0,143	0,26
0,154	0,28
0,166	0,30
0,178	0,32
0,190	0,34
0,202	0,36
0,214	0,38
0,226	0,40
0,238	0,42
0,250	0,44
0,263	0,46
0,276	0,48
0,289	0,50
0,303	0,52
0,317	0,54
0,331	0,56
0,345	0,58
0,359	0,60
0,374	0,62
0,389	0,64
0,405	0,66
0,421	0,68
0,437	0,70
0,455	0,72
0,473	0,74
0,491	0,76
0,511	0,78
0,531	0,80

Os caudalímetros com sensores que podem ser fixados no interior de condutas constituem soluções de medição bastante versáteis: um mesmo dispositivo ou conjunto de dispositivos com sensores serve para diversas geometrias e para uma gama bastante alargada de dimensões de conduta (embora com limites) mediante uma adequada parametrização, por *software*, das respectivas unidades de condicionamento de sinal e processamento de dados (ou «elementos secundários», como também são designadas). De um modo geral, os fabricantes oferecem um único modelo de cada tipo de sensor, variando eventualmente nos elementos secundários e nas combinações possíveis de sensores. Esta particularidade evita ter de se proceder a um dimensionamento físico dos transdutores, havendo apenas que proceder a uma adequada selecção do seu tipo baseada nas características de várias soluções elegíveis (cf. a secção 5.4.7).

Estes sensores são geralmente fixados na parede interior da conduta por meio de uma cinta metálica ajustável ou de outro dispositivo (ver as figuras 5.45 e 5.46), existindo uma certa diversidade destes acessórios a seleccionar em função da forma geométrica e das dimensões da secção da conduta no local de instalação. Se necessário, o dispositivo de fixação pode ser facilmente retirado para reinstalação noutra local.

Por outro lado, os blocos de sensores — com espessuras que podem variar tipicamente entre 2 e 7 cm — e o respectivo dispositivo de fixação reduzem a secção de medição, podendo deixar de ser desprezável o seu efeito sobre alturas de escoamento baixas. Assim, não são adequados, em geral, para alturas de escoamento inferiores a 5 cm nem para instalação em condutas de diâmetro nominal inferior ou igual a DN 200.

5.7 Requisitos hidráulicos de instalação

5.7.1 Caudalímetros com descarregador de soleira delgada

O canal de alimentação de qualquer descarregador de soleira delgada deve satisfazer os seguintes requisitos essenciais:

- ser rectilíneo;
- ter fundo plano e horizontal;
- ter secção transversal rectangular com largura B constante (sendo as suas paredes, por conseguinte, verticais e paralelas) num comprimento não inferior a dez vezes a

largura superficial do jacto vertido pelo descarregador correspondente ao valor máximo h_{\max} da altura piezométrica h (ver as figuras 5.2, 5.4 e 5.5), o qual ocorre para Q_{\max} .

Como facilmente se depreende dessas mesmas figuras, a referida largura superficial do jacto descarregado é igual à própria largura de um descarregador rectangular ou Bazin (b ou B , respectivamente), se de um ou outro se tratar, e igual ao valor máximo da cota b inscrita na Figura 5.5 no caso de um descarregador triangular.

Seja qual for o tipo de descarregador componente do caudalímetro, ele deve ser instalado de modo que o seu corpo fique vertical e perpendicular às paredes do canal de alimentação.

De modo a reduzir a incerteza de medição do caudalímetro, é conveniente que, imediatamente a montante do canal de alimentação, sejam instalados dispositivos apropriados para tranquilização e regularização do escoamento⁷⁵.

5.7.2 Caudalímetros com caleira

O canal de alimentação de uma caleira Venturi ou Parshall deve ser rectilíneo, ter fundo plano e horizontal e possuir secção transversal rectangular com largura B constante num comprimento não inferior a $20 B$. Por outro lado, o escoamento nesse canal tem necessariamente de ser lento, ou seja, a sua velocidade média U , de acordo com a Equação (3.54), tem de satisfazer a desigualdade

$$U < \sqrt{gh} \quad (5.27)$$

em que $h = \frac{A}{B}$ é a profundidade média do escoamento no referido canal, sendo A a área molhada numa sua secção genérica; ou, por

⁷⁵ Dispositivos simples e eficientes são, por exemplo, os seguintes:

- uma grade de ripas de madeira com largura pouco inferior a B , presa por cabos flexíveis às paredes do canal por forma a que possa flutuar à superfície do escoamento para qualquer nível desta, permite tranquilizar a agitação superficial do escoamento;
- um murete vertical de tijolos furados, com os eixos dos furos paralelos ao eixo do canal, possibilita uma adequada tranquilização do escoamento, caso este seja de água ou de água residual com baixa concentração de sólidos em suspensão.

outras palavras, o número de Froude do escoamento em questão⁷⁶ tem de ser sempre inferior a 1.

A caleira (Venturi ou Parshall) do caudalímetro deve ficar instalada com o seu plano longitudinal de simetria coincidente com o do canal de alimentação e de modo que a face superior da sua soleira — que no caso de uma caleira Parshall constitui o fundo do seu convergente de entrada (ver a Figura 5.11) — fique horizontal.

Os dispositivos de tranquilização e regularização do escoamento mencionados na secção precedente são também passíveis de utilização imediatamente a montante do canal de alimentação de qualquer das caleiras.

5.7.3 Caudalímetros com multissensorização

Os sensores de velocidade e de nível devem ser instalados num troço recto pouco inclinado para garantir condições de escoamento uniforme. Devem ficar afastados de zonas de alteração de secção, tais como cotovelos, junções, estreitamentos, alargamentos e imperfeições de construção. Tenha-se presente que as indicações contidas no cadastro nem sempre estão correctas ou actualizadas, pelo que é sempre necessária uma verificação local das condições efectivamente existentes.

Existem sensores que, dadas as suas dimensões, não podem ser instalados no interior de um colector de águas residuais em virtude de o diâmetro deste ser para tal insuficiente. Para essas situações, os fabricantes aconselham, por vezes, a sua colocação no exterior do colector, por exemplo no interior de uma câmara de visita. Este tipo de solução não é, em geral, desejável, devendo ser ponderada face às condições hidráulicas para as diversas alturas de escoamento. A secção altera-se, em geral, na transição do colector para a câmara de visita, havendo com frequência estreitamentos ou alargamentos.

A fixação dos sensores deve ser efectuada a partir da câmara de visita no colector de montante. A instalação de cintas de montagem de sensores deve ser, tanto quanto possível, afastada da transição do colector para a câmara de visita de uma distância não inferior a três vezes o diâmetro interior da conduta. Deve também ficar com um troço uniforme (sem descontinuidades) de conduta a

⁷⁶ Ver a Equação (3.55).

montante com uma extensão mínima de cerca de cinco vezes o diâmetro.

Esta solução de instalação requer ainda cuidados especiais para fixar — e assegurar de forma estável ao longo do tempo — os alinhamentos rigorosos dos feixes ultrassónicos, ou de radar, em sensores de velocidade por efeito Doppler ou de nível por tempo de trânsito.

As cablagens devem ser devidamente fixadas à parede interior da conduta, bem como à cinta ou placa de montagem, evitando pontos de acumulação de detritos sólidos e perturbações do escoamento na zona de medição. Se o transporte de sedimentos for muito elevado poderá haver problemas sérios de obstrução que, em casos mais graves, poderá conduzir ao arrastamento e à destruição dos sensores. Convém ainda que os blocos a colocar na parte inferior de uma conduta fiquem um pouco desviados da linha de fundo desta, por forma a evitar que sejam submergidos por sedimentos arrastados no escoamento (cf. a secção 5.4.2. na parte intitulada “Dificuldades e limitações desta técnica”).

Um caudalímetro com órgão primário de transdução tubular⁷⁷, a intercalar na conduta, deve ser instalado de modo que os comprimentos rectos de conduta a montante e a jusante do primário (ver a secção 4.5.1) não sejam inferiores a, respectivamente, $5 D_n$ e $3 D_n$, sendo D_n um diâmetro interior fictício do primário (ou da conduta, visto ter o mesmo diâmetro nominal) que, expresso em milímetros, é numericamente igual ao valor do seu diâmetro nominal; por outro lado, o declive da conduta não deve, em geral, exceder 1%. Caudalímetros desse tipo requerem uma intervenção construtiva especial e necessitam de condições de acesso pelo lado exterior da conduta. Tais soluções são de encarar, eventualmente, na fase de projecto dos colectores, à saída de estações de tratamento ou de estações elevatórias, ou quando as condutas não fiquem enteradas. Em sistemas já construídos preferem-se geralmente as modalidades com sensores fixos no interior das condutas.

⁷⁷ Geralmente baseado na transdução electromagnética de velocidade e, por exemplo, na transdução capacitiva de nível.

5.8 Manutenção

5.8.1 Verificações e acções periódicas

Qualquer caudalímetro utilizável em escoamentos com superfície livre deve ser objecto de verificações e acções periódicas de manutenção, em conformidade com um plano apropriado de realização que não pode deixar de incluir, caso existam, recomendações específicas do fabricante (eventualmente referentes apenas a parte dos componentes do medidor de caudal — como sucede, por exemplo, com um caudalímetro com descarregador de soleira delgada ou com caleira, em que somente para o medidor de nível se dispõe, em geral, de recomendações de manutenção facultadas pelo fabricante).

A periodicidade de cada uma dessas verificações e acções de manutenção não deve exceder seis meses, em especial quando os valores medidos pelo caudalímetro são utilizados para facturação.

No que se refere às anomalias porventura observadas durante as verificações e acções periódicas de manutenção e às suas eventuais correcções (inclusive reparações de avarias), tudo o que foi exposto nos dois últimos parágrafos da secção 4.6.1 é também genericamente aplicável a caudalímetros para escoamentos com superfície livre.

Em qualquer caudalímetro com descarregador de soleira delgada, tendo em vista manter seu bom desempenho metrológico, devem ser periodicamente realizadas as seguintes limpezas:

- da crista do descarregador e de uma faixa da superfície de montante da sua soleira com largura não inferior a 5 cm, visto o coeficiente de vazão do descarregador ser afectado por impurezas aí depositadas, as quais causam uma diminuição local da velocidade do escoamento descarregado;
- do poço de medição de nível.

No caso de um caudalímetro com caleira, a sua exactidão de medição pode ser mantida mediante limpezas periódicas do interior da caleira e do poço de medição.

Os caudalímetros com multissensorização baseados em sensores que são instalados no interior de condutas (fixados quer inferior quer superiormente), bem como os seus acessórios, têm de ser vigiados periodicamente para inspecção visual do seu estado e para limpeza de detritos acumulados sobre eles. Convém que estas operações sejam levadas a cabo em ocasiões favoráveis (desig-

nadamente quando os caudais são reduzidos), por pessoal especializado e, em particular no caso de sistemas de drenagem de águas residuais urbanas, com as medidas de segurança que o ambiente e o trabalho em causa exigem.

5.8.2 Calibrações

O medidor de nível componente de qualquer caudalímetro com descarregador de soleira delgada ou com caleira deve ter sido submetido pelo fabricante a uma primeira calibração de pelo menos cinco pontos. O certificado dessa calibração deve conter os elementos informativos relevantes que se encontram discriminados na secção 7.6.4.

A partir da altura em que caudalímetro entra em serviço, o medidor de nível deve ser objecto de calibração periódica (anual, por exemplo), também de cinco ou mais pontos, a realizar por entidade devidamente habilitada para tal, de preferência possuidora de acreditação.

Um caudalímetro com multissensorização novo deve ser fornecido ao adquirente com certificado da primeira calibração, efectuada pelo fabricante para cinco ou mais valores do nível da superfície livre do escoamento, distribuídos de forma aproximadamente uniforme na gama de medição nominal do caudalímetro, e recorrendo, se tal for exequível, a um suporte do escoamento geométrica e hidraulicamente semelhante àquele em que o caudalímetro irá ser utilizado (em especial se esse suporte for uma conduta).

Durante a sua vida útil, é necessário submeter qualquer caudalímetro com multissensorização a recalibração periódica, que deve ser:

- pelo menos de cinco pontos, devendo o conteúdo do respectivo certificado estar de acordo com o que é exposto na secção 7.6.4;
- realizada por laboratório de ensaios hidráulicos habilitado para o efeito, de preferência acreditado, e possuindo rastreabilidade metrológica⁷⁸ adequada.

Quanto à definição da periodicidade de recalibração de um caudalímetro com multissensorização, o que sobre esse assunto foi referido na secção 4.6.2 relativamente a caudalímetros para escoamento livre,

⁷⁸ Ver a secção 7.6.3.

mentos sob pressão tem, após óbvias adaptações de pormenor, inteira validade.

A título meramente indicativo, refira-se que cerca de 18 meses para o período de recalibração de um caudalímetro com multissensorização utilizado essencialmente para facturação — supondo que este é sistematicamente objecto de acções periódicas de manutenção — pode ser considerado um valor razoável. Caso o caudalímetro sirva apenas para controlo operacional do sistema onde está inserido, o respectivo período de recalibração poderá eventualmente ser aumentado para 24 meses.

5.9 Simbologia

Quadro 5.10 – Simbologia utilizada no Capítulo 5

Simbolo	Grandeza	Unidade de medida SI
a	Largura da boca do convergente de entrada de uma caleira Parshall (ver a Figura 5.11)	m
A	Área molhada; área útil de armadura de condensador eléctrico (ver a Figura 5.36)	m ²
b	Largura da soleira de um descarregador rectangular; largura superficial do jacto vertido por um descarregador triangular medida na crista deste; largura do colo de uma caleira	m
B	Largura de um canal	m
c	Desnível entre a soleira de um descarregador rectangular ou Bazin, ou entre o vértice de um descarregador triangular, e a superfície livre do escoamento no canal imediatamente a jusante (ver as figuras 5.2, 5.4 e 5.5); largura da extremidade de jusante do divergente de saída de uma caleira Parshall (ver a Figura 5.11)	m
c	Velocidade de propagação de onda (acústica ou electromagnética)	m s ⁻¹
C	Coefficiente de vazão de um descarregador	–
C	Capacidade de um condensador eléctrico	F
C_a	Capacidade de um condensador eléctrico preenchido com líquido num sistema de medição de nível por efeito capacitivo (ver a Figura 5.36)	F
C_d	Coefficiente de descarga de uma caleira Venturi	–
C_e	Coefficiente de vazão de uma caleira Venturi — Equação (5.5)	–

C_o	Capacidade de um condensador eléctrico preenchido com ar num sistema de medição de nível (ver a Figura 5.36)	F
C_v	Coefficiente de velocidade de aproximação de uma caleira Venturi — Equação (5.5)	–
d	Cota da crista de um descarregador rectangular ou Bazin, ou do vértice de um descarregador triangular, em relação ao fundo do respectivo canal de alimentação (ver as figuras 5.2, 5.4 e 5.5); largura da boca do convergente de entrada de uma caleira Parshall; distância entre ponto de medição superior e superfície livre do líquido (ver a Figura 5.32); distância entre armaduras de um condensador eléctrico (ver a Figura 5.36)	m
D_n	Diâmetro interior fictício (do primário tubular de um caudalímetro; de uma conduta) que, expresso em milímetros, é numericamente igual ao valor do diâmetro nominal	m
e	Altura da soleira de uma caleira Venturi; espaço percorrido por um alvo móvel na medição de velocidades por efeito Doppler de onda contínua (ver as figuras 5.12 e 5.13)	m
E	Distância entre a secção de medição de h_1 e a entrada de uma caleira Venturi (ver a Figura 5.10)	m
f_b	Frequência de onda reflectida na medição de velocidades por efeito Doppler	Hz
f_s	Frequência de onda emitida para medição de velocidades por efeito Doppler	Hz
F	Distância, medida ao longo da parede do convergente de entrada, entre a secção de medição de h_1 e o colo de uma caleira Parshall (ver a Figura 5.11)	m
Fr	Número de Froude	–
g	Aceleração da gravidade	$m\ s^{-2}$
G	Comprimento da parede do convergente de entrada de uma caleira Parshall (ver a Figura 5.11)	m
h	Altura do líquido ou do escoamento; altura piezométrica em relação ao lado horizontal da crista de um descarregador rectangular, à crista de um descarregador Bazin ou ao vértice de um descarregador triangular	m
h_c	Altura crítica de um escoamento	m
h_{max}	Valor máximo de h	m
h_1	Altura do escoamento a montante do colo de uma caleira (ver as figuras 5.10 e 5.11)	m

h_2	Altura do escoamento no canal de instalação a jusante de uma caleira Venturi; altura do escoamento na secção S_2 do colo de uma caleira Parshall (ver a Figura 5.11)	m
$(h_1)_{\max}$	Valor máximo de h_1	m
H	Altura máxima do líquido; altura das armaduras usadas na medição de nível por efeito capacitivo (ver a Figura 5.36)	m
H_c	Carga total crítica	m
J	Comprimento do convergente de entrada de uma caleira Parshall (ver a Figura 5.11)	m
k	Constante dielétrica	$F m^{-1}$
K	Coefficiente da equação de vazão de caleiras Parshall – Equação (5.10)	–
L	Comprimento do colo de uma caleira	m
L_h	Distância entre um descarregador e a secção de medição de h (ver as figuras 5.2, 5.4 e 5.5)	m
M	Comprimento do divergente de saída de uma caleira	m
ρ	Pressão hidrostática	Pa
Q	Caudal	$m^3 s^{-1}$
Q_{\max}	Caudal máximo de dimensionamento	$m^3 s^{-1}$
Q_{\min}	Caudal mínimo de dimensionamento	$m^3 s^{-1}$
R	Raio de curvatura das paredes do convergente de entrada de uma caleira Venturi (ver a Figura 5.10)	m
R'	Raio de curvatura da superfície de montante da soleira de uma caleira Venturi (ver a Figura 5.10)	m
s	Relação de submersão de uma caleira Venturi	–
s'	Relação de submersão de uma caleira Parshall	–
t	Instante de tempo	s
t_a, t_b	Instantes de tempo extremos que definem uma célula genérica de medição de velocidades por efeito Doppler de onda pulsada (ver a Figura 5.26)	s
$t_A, t_B, \dots,$ t_1, t_2, \dots	Instantes de tempo na medição de velocidades por efeito Doppler de onda pulsada (ver as figuras 5.24 e 5.25)	s
u	Velocidade pontual num escoamento; sua componente longitudinal (ver a Figura 5.19)	$m s^{-1}$
U	Velocidade média de um escoamento	$m s^{-1}$

v	Velocidade de um alvo móvel numa medição de velocidades por efeito Doppler (ver as figuras 5.12 e 5.13)	$m s^{-1}$
v_1, v_2, \dots	Velocidades de alvos móveis sujeitos a medição de velocidades por efeito Doppler (ver as figuras 5.15 e 5.24)	$m s^{-1}$
w	Expoente de h_1 na equação de vazão de caleiras Parshall – Equação (5.10)	–
x	Distância	m
x_a, x_b	Distâncias entre sensor e extremos de uma célula genérica de medição de velocidades por efeito Doppler de onda pulsada (ver a Figura 5.26)	m
x_A, x_B, \dots	Distâncias entre sensor e alvos móveis (ver a Figura 5.25)	m
z	Número de ciclos de onda recebidos num alvo na medição de velocidades por efeito Doppler de onda contínua (ver a Figura 5.12)	–
β	Ângulo de inclinação de um feixe acústico ou de radar na medição de velocidades por efeito Doppler (ver as figuras 5.19 e 5.30)	rad
Δf	Desvio de frequência na medição de velocidades por efeito Doppler, ou frequência Doppler – Equação (5.13)	Hz
Δt	Intervalo de tempo	s
Δz	Acréscimo do número de ciclos de onda recebidos num alvo na medição de velocidades por efeito Doppler de onda contínua, num intervalo de tempo Δt (ver as figuras 5.12 a 5.14)	–
ϕ	Ângulo	rad
λ	Comprimento de onda (acústica ou electromagnética) – Equação (5.11)	m
ρ	Massa volúmica do líquido	$kg m^{-3}$

5.10 Bibliografia

BS 3680-4A – *Methods of measurement of liquid flow in open channels – Part 4A: Thin-plate weirs*. Londres, British Standards Institution, 1981.

Foti, J.; Ward, C.S. – “Selecting a suitable open channel flowmeter”, *Proc. of 62nd Annual Victorian Water Industry, Engineers and Operators Conference – Wodonga, September 8 – 9, 1999*, pág.^s 83 – 90.

Huhta, C.; Ward, C. – “Flow measurements using an upward-looking Argonaut-SW Doppler current meter”, *Proc. of the IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology – San Diego, California, March 10 – 13, 2003*, pág.^s 35 – 39.

Hwang, N. H. C.; Hita, C. E. – *Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems*. Englewood Cliffs, New Jersey (EUA), Prentice-Hall, 1987.

ISO 1438 – *Liquid flow measurement in open channels using weirs and Venturi flumes*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1975.

ISO 1438-1 – *Water flow measurement in open channels using weirs and Venturi flumes – Part 1: Thin-plate weirs*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1980.

Jones, W. R. – “A method for comparing the performance of open channel velocity-area flow meters and critical depth flow meters”, *Flow Measurement and Instrumentation*, n.º 13, 2002, pág.^s 285 – 289.

Lencastre, A. – *Hidráulica Geral*. Lisboa, Hidroprojecto, 1983.

Quintela, A. C. – *Hidráulica*. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 5.^a Edição, 1996.

Stevens, P. L.; Kimbrough, H.; Enfinger, K. – “Be wary of weally wough waves: identifying and quantifying the impact of standing waves on flow measurement”, *Proc. of WEF Collection Systems 2004 – Milwaukee, Wisconsin, August 8 – 11, 2004*.

U.S. Water Resources Research Laboratory – *Water Measurement Manual*. Denver, Colorado (EUA), U.S. Bureau of Reclamation/Water Resources Research Laboratory, 3rd Edition (revised), 2001.

[Disponível em

http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/wmm/index.htm]

Documentação técnica de fabricantes

Arkon – *ChannelMag PM2 Magnetic Flowmeter for Full & Partially Full Pipes*. Altrincham (Reino Unido), Arkon Flow Systems, s.d.

Edelhauser, M. – *A Comparison of Continuous Wave Doppler vs Pulsed Doppler Profiling Technology*. San Diego, Califórnia (EUA), MGD Technologies, Inc., 1999.

Hach – *Sigma 980 Flow Meter Instrument Manual*. Publicação ref.^a 97000-18, Loveland, Colorado (EUA), Hach Company, 2003.

Isco – *Open Channel Flow Measurement Using the Area-Velocity Method and Doppler Technology*. Lincoln, Nebraska (EUA), Isco, Inc., 1998.

Isco – *Isco 4100 Series Flow Loggers*. Lincoln, Nebraska (EUA), Isco, Inc., s.d.

Krohne – *Tidalflex 4110 PF Electromagnetic Flowmeter for Partially Filled Pipelines*. Publicação ref.^a 7.02354.25.00, Duisburg (Alemanha), Krohne-Messtechnik GmbH & Co. KG, 2005.

Marsh-McBirney – *Open Channel Velocity Profiling*. Frederick, Maryland (EUA), Marsh-McBirney, Inc., 2001.

Marsh-McBirney – *Understanding the Flo-Dar Flow Measuring System*. Frederick, Maryland (EUA), Marsh-McBirney, Inc., 2005.

Marsh-McBirney – *Flo-Dar Open Channel Flow Meter*. Frederick, Maryland (EUA), Marsh-McBirney, Inc., s.d.

MGD Technologies – *ADFM Velocity Profiler (ADFM) Model Pro-20*. San Diego, Califórnia (EUA), MGD Technologies, Inc., s.d.

Unidata – *StarFlow Ultrasonic Doppler Instrument with MicroLogger Model 6526B*. User Manual 6241 (Revision F), Perth (Austrália), Unidata Australia, 2000.

Greyline – *Area-Velocity Flow Meter for Open Channels and Pipes*. Massena, New York (EUA), Greyline Instruments Inc., s.d.

6 SISTEMAS ELÉCTRICOS DE INSTRUMENTAÇÃO, AUTOMAÇÃO E ENERGIA

6.1 Introdução

A transdução para sinais eléctricos passou a ser o caminho mais procurado na caudalimetria, como em muitos outros domínios de instrumentação, beneficiando do progresso nas tecnologias usadas na elaboração, transformação e transmissão de sinais eléctricos, especialmente na microelectrónica. Deste modo foi possível alcançar melhores características metrológicas dos instrumentos, incorporar processadores digitais que conferem capacidades acrescidas aos sistemas de medição (nomeadamente, parametrização, autodiagnóstico, auto-ajuste de gamas, etc.), implementar métodos de medição mais complexos (p.ex. por multissensorização) e conseguir a integração com outros sistemas de automação e de transmissão de dados a distância.

Por estas razões, a concretização de sistemas de caudalimetria, quer em escoamentos sob pressão quer com superfície livre, requer um importante envolvimento de engenharia electrotécnica. Neste capítulo são abordados os sistemas de medição de caudal do ponto de vista dos sinais, dos órgãos e das interfaces, bem como dos recursos de energia eléctrica, de automação e de comunicação; procura-se evidenciar os principais problemas envolvidos e apresentar soluções para os mesmos. Embora a concretização prática dos sistemas requeira a participação de especialistas, na exposição que se segue predomina a componente informativa em detrimento do tratamento matemático, por forma a tornar os assuntos mais acessíveis a um universo alargado.

A instrumentação de caudalimetria propriamente dita difere sensivelmente entre as aplicações em escoamentos sob pressão e em escoamentos com superfície livre. Todavia, os sistemas de medição completos enquadram-se num mesmo tipo de estrutura que é aqui tratada indistintamente, excepto quando exista indicação em contrário.

6.2 Cadeias de medição

6.2.1 Aspectos gerais, objectivos, preocupações

A medição de caudal de líquido, quando realizada com o auxílio de meios eléctricos⁷⁹, pode ser decomposta nas várias etapas como as indicadas na Figura 6.1. Começa na **transdução** das grandezas a medir para grandezas eléctricas, estas com a designação genérica de *sinais*. Passa pelo **condicionamento** de sinais e a **aquisição** de resultados de medição. Entenda-se *aquisição* como transformação dos sinais eléctricos representativos das medições para informação digital (*dados*) e seu registo. Os dados recolhidos são, na generalidade dos casos, transmitidos à distância para locais de utilização.

Esta estrutura corresponde a múltiplas possibilidades quanto à concretização de cada uma das etapas, quer em termos de métodos quer de soluções tecnológicas. Em todas elas surgem diversos órgãos com funções específicas, encadeados não só através dos sinais eléctricos mas também formando uma sequência associada ao fluxo de informação, sequência esta que aqui se designa por **cadeia de medição**. A cadeia de medição, em conjunto com outros órgãos e recursos complementares (não participando directamente no fluxo de informação) formam o **sistema de medição**.

Mas os sistemas de medição não constituem entidades totalmente delimitadas do ponto de vista físico. Na realidade interagem com o ambiente em que estão inseridas, recebendo quase sempre influências perturbadoras por parte deste. Tais efeitos, ocasionados por agentes físicos, acabam por ser excepcionalmente importantes nas realizações práticas do ponto de vista electrotécnico, em acréscimo às imperfeições intrínsecas dos equipamentos utilizados.

⁷⁹ Inclui os electrónicos como caso particular em que os órgãos são constituídos por dispositivos semicondutores.

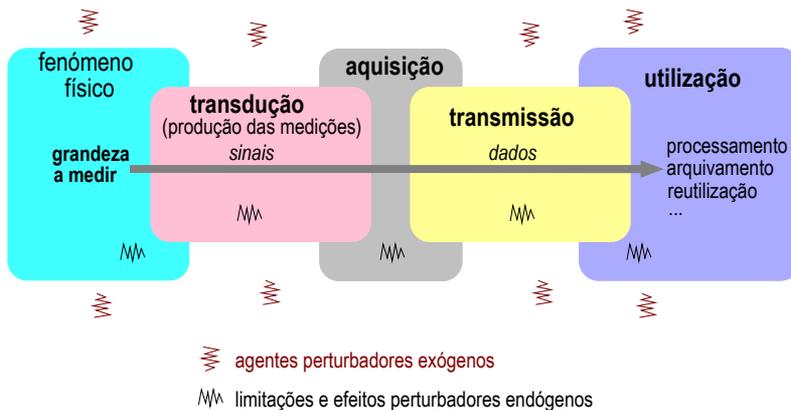


Figura 6.1 – Encadeamento das principais etapas do processo de medição a considerar em caudalimetria por meios eléctricos, com alusão à ocorrência de efeitos que prejudicam a qualidade das medições

Antes de avançar para detalhes técnicos recapitulam-se os principais objectivos globais a alcançar com os sistemas de medição de caudal. Em cada realização concreta pretende-se assegurar simultaneamente vários objectivos de desempenho e de exploração, com destaque para:

- elevada **qualidade** dos resultados de medição, que é um objectivo metrológico caracterizado por múltiplos aspectos, de entre os quais se assinalam: elevada resolução, baixa incerteza associada, elevada estabilidade ao longo do tempo;
- **rapidez** e **ritmo** de obtenção e transmissão de resultados adequados para os fins em vista;
- grande **fiabilidade** do sistema, isto é, funcionamento tanto quanto possível sem falhas;
- facilidade de **manutenção** e de **calibração**.

Por outro lado, nas soluções concretas é forçoso assegurar **custos** de investimento e de exploração aceitáveis, o que, na prática, obriga a estabelecer compromissos relativamente à satisfação do conjunto de todos estes objectivos.

6.2.2 Principais órgãos e sinais nas cadeias de medição de caudal

Nos sistemas de caudalimetria por meios eléctricos encontram-se normalmente soluções com um ou mais **órgãos primários de transdução** interligados a **condicionadores de sinal**; estes últimos são responsáveis pela excitação dos anteriores e pela primeira fase de transformação (filtragem, conversão, amplificação) dos sinais directamente resultantes do processo de transdução. Normalmente o condicionador também possui dispositivos de afiçamento local de resultados de medição.

Uma vez produzidos sinais eléctricos *robustos*, estes são aplicados a **órgãos de aquisição** que os transformam em dados digitalizados e procedem ao seu registo (arquivamento temporário). A partir daí é feita a **transmissão** dos dados até aos locais de utilização. Interpostos nos circuitos de sinal são por vezes incluídos mais dispositivos acessórios de conversão, amplificação, isolamento, protecção, etc.

A Figura 6.2 ilustra a sequência de órgãos e sinais intervenientes numa cadeia de medição típica de caudalimetria. Nela também se assinala a incidência de efeitos perturbadores.

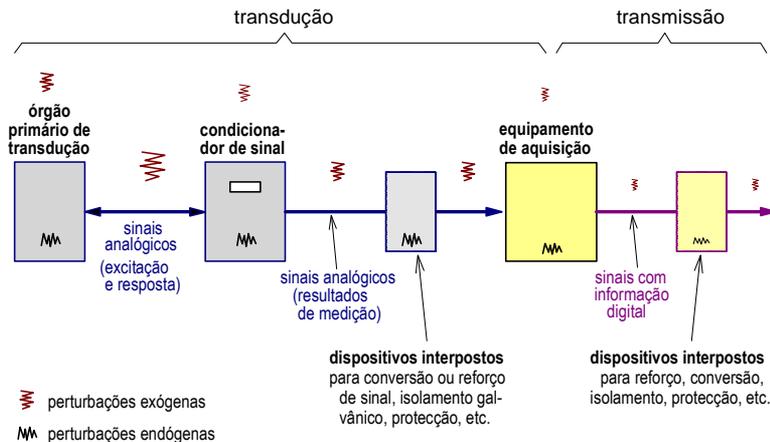


Figura 6.2 – Cadeia de medição típica de caudalimetria evidenciando os principais tipos de órgãos e de sinais e assinalando a incidência de efeitos perturbadores sobre as diferentes partes

Existem partes especialmente vulneráveis a perturbações de origem externa, que são essencialmente as zonas da cadeia que vão até à “produção” de dados na forma digital codificada, ou seja, as zonas de sinal analógico.

A jusante da conversão para esses dados codificados os efeitos perturbadores deixam de ter relevância na qualidade das medições, porque eventuais alterações passam a ser detectáveis por técnicas de *controlo de erros* adoptadas na transmissão. Nessas etapas subsequentes os agentes perturbadores podem afectar essencialmente as condições de transmissão implicando, por exemplo, atrasos e necessidade de retransmissões.

As partes mais expostas ou susceptíveis a agentes perturbadores externos devem ficar, tanto quanto possível, restringidas em extensão e ser objecto de cuidados de imunização. Na zona analógica deve evitar-se a interposição de elementos que não sejam absolutamente indispensáveis, pois cada um deles contribui intrinsecamente para a depreciação dos sinais de medição.

Deste ponto de vista o tipo de solução desejável teria um número mínimo de órgãos interpostos na parte da cadeia que opera com sinais analógicos; esses órgãos ficariam colocados a distâncias muito curtas entre si ou, se possível, integrados em unidades comuns. No entanto existem ainda outras preocupações de concepção e os equipamentos comercializados não favorecem inteiramente este aspecto.

6.2.3 Interfaces e sinais eléctricos

As **interfaces** são as partes de fronteira dos equipamentos com o ambiente circundante através das quais é veiculada informação ou energia. Merecem especial destaque a interface com os operadores e a interface eléctrica.

Os meios para disponibilizar informação aos operadores e para receber comandos da parte destes constituem a chamada **interface humano-máquina**, conhecida pela sigla HMI (*human-machine interface*). Nalguns aparelhos não existe; noutros consiste em simples mostradores e botões, como acontece na maioria dos caudalímetros; em sistemas e equipamentos complexos pode incluir, por exemplo, ecrãs, teclados, apontadores, *joysticks*.

A **interface eléctrica** tem a função de adaptar os sinais para interligação com outros equipamentos por forma a adequá-los às características de ambos; também deve proporcionar condições para realizar as ligações físicas necessárias ao estabelecimento dos circuitos eléctricos. No que diz respeito aos sinais eléctricos existe um sentido associado que leva a designar por **saídas** as ligações no

lado de onde provém a informação ou comando e por **entradas** as ligações no lado que recebe essa informação ou comando.

Para poder interligar equipamentos tem de ser assegurada plena compatibilidade quanto à natureza dos sinais envolvidos, à sua gama e a qualquer codificação adoptada. Nesse sentido, dentro da infinidade de opções possíveis, impuseram-se e, nalguns casos, foram normalizadas, algumas que se tornaram preferenciais e que se passam a referir.

Para veicular comandos ou informação de estado em dois níveis lógicos (p.ex. 0 e 1) adoptam-se **sinais binários**. Em aplicações de automação industrial usa-se predominantemente a tensão contínua de 24 Vdc, mas também se utilizam tensões alternadas (p.ex. 230 Vac ou 400 Vac); no âmbito dos circuitos electrónicos de um mesmo aparelho é frequente usar 5 Vdc. Adiante é feita referência aos sinais usados em comunicação digital de dados.

Os **sinais analógicos** são bastante utilizados para representar, por relação linear, grandezas de gama contínua e de evolução temporal contínua. Os sinais eléctricos mais utilizados para representação analógica são estabelecidos **em tensão** ou **em corrente**. Dentro da infinidade de hipóteses de sinais existentes na prática, deve ser dada preferência às gamas previstas na norma IEC 60381 (parte 1 – sinais em corrente; parte 2 – sinais em tensão), como as referidas no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Algumas gamas de sinal analógico com interesse prático

Gama	Aplicação
- 10 V a +10 V	Para representar grandezas com valores positivos e negativos
- 20 mA a +20 mA	
0 a 10 V	Para representar grandezas unidireccionais (com valores positivos ou nulos)
4 a 20 mA	

Os sinais em corrente são impostos nas respectivas interfaces de saída, por dispositivos electrónicos de controlo em cadeia fechada, que medem a corrente em circulação e corrigem o efeito de amplificação por forma a manter essa corrente com o valor desejado, mesmo perante perturbações no circuito, tais como forças electromotrizes induzidas e variações de impedância de carga. Este facto torna-os geralmente mais robustos para ligação a distância do que os sinais em tensão. De entre as gamas de sinal em corrente ganhou especial destaque a de **4 a 20 mA**, em que o limite inferior de 4 mA se faz corresponder ao valor mínimo da grandeza

representada (normalmente zero) e o limite de 20 mA se faz corresponder ao valor máximo da grandeza representada. O seu interesse prático advém de dois aspectos principais, a saber:

- a capacidade que proporciona, no lado da recepção do sinal, para diagnosticar falhas e interrupção do circuito por simples detecção de corrente nula;
- a possibilidade de veicular simultaneamente energia suficiente para o funcionamento de dispositivos electrónicos (p.ex. sensores, detectores) que consumam menos do que 4 mA.

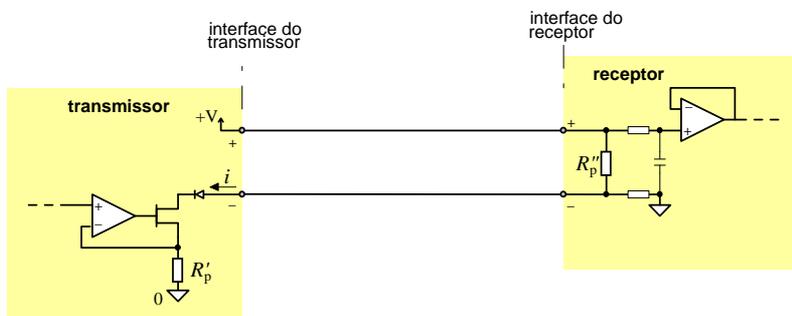
Os aparelhos medidores realizam geralmente uma primeira transdução para sinais eléctricos em gamas inadequadas para a transmissão a outros equipamentos, muitas vezes por terem muito baixa amplitude e potência; nesses casos costumam ser designados por **sensores** e necessitam de ser ligados a outros equipamentos que realizem a amplificação e condicionamento de sinal. Quando esses aparelhos medidores incorporam já a electrónica destinada a esse reforço de sinal, com saídas em gamas robustas de tensão ou corrente, passam a ser designados por **transmissores**.

A utilização de **sinais pulsatórios**, ou **em frequência**, é outra modalidade seguida na prática, proporcionando ainda maior imunidade do que os sinais analógicos. Podem ser realizados em baixa frequência (p.ex. até dezenas ou centenas de hertz), ou em alta frequência (tipicamente até dezenas de kilohertz). A saída em alta frequência presta-se à conversão para valores numéricos com elevada resolução simplesmente por contagem de impulsos em intervalos de tempo curtos (p.ex. 1s); a saída em baixa frequência pode ser convertida em valores numéricos por medição do período. A representação por sinal pulsatório (ou pulsado) também pode ser útil para a integração ou totalização ao longo do tempo.

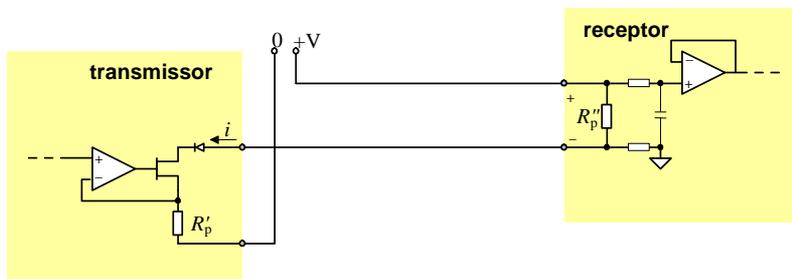
Os sinais pulsatórios adequam-se excepcionalmente bem ao isolamento galvânico (por acoplamento óptico nas frequências elevadas, ou por relé nas baixas), sem os problemas que afectam o isolamento galvânico de sinais analógicos⁸⁰ (nomeadamente de linearidade e de influência de temperatura).

⁸⁰ Uma solução comum para isolamento de sinais analógicos consiste em fazer uma sequência de três etapas: conversão analógico-pulsado, isolamento óptico do sinal pulsado e conversão pulsatório-analógico.

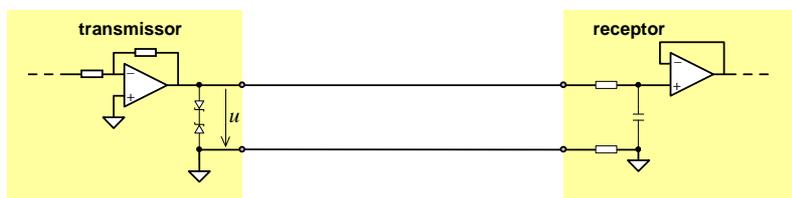
A Figura 6.3 ilustra esquematicamente alguns tipos de ligações analógicas entre equipamentos, mostrando alguns detalhes simplificados da electrónica de interface.



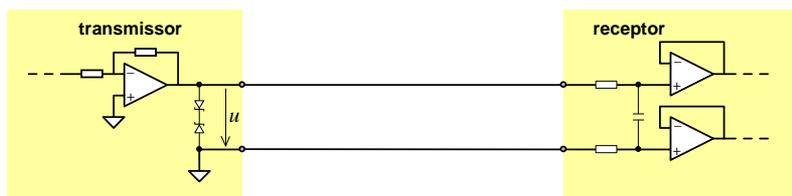
a – ligação analógica por sinal em corrente e alimentação a partir do transmissor



b – ligação analógica por sinal em corrente e alimentação por fonte externa



c – ligação analógica por sinal em tensão com entrada *single ended*



d – ligação analógica por sinal em tensão com entrada em modo *diferencial*

Figura 6.3 – Exemplos de interfaces analógicas e de circuitos de ligação entre equipamentos

A Figura 6.4 exemplifica alguns tipos de ligações binárias entre equipamentos.

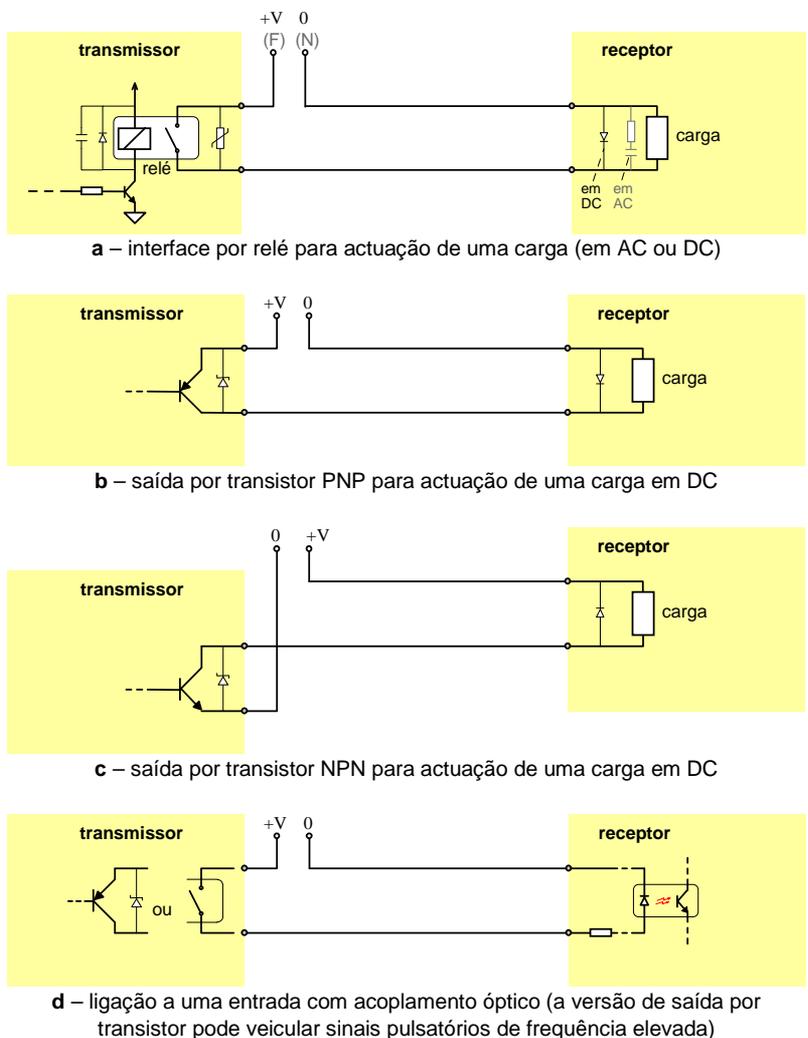


Figura 6.4 – Exemplos de interfaces binárias e de circuitos de ligação entre equipamentos

6.2.4 Perturbação dos sinais e sua mitigação

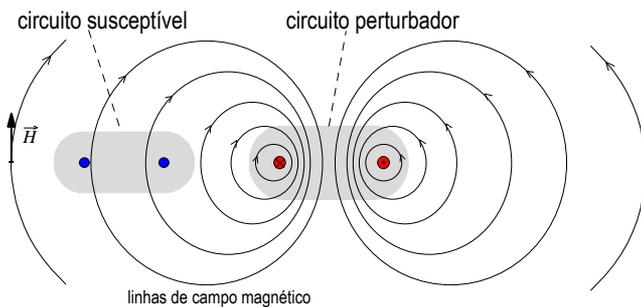
Os principais efeitos perturbadores sobre os circuitos de sinal eléctrico resultam da acção de campos magnéticos variáveis, de

campos eléctricos e de diferenças no potencial de referência entre pontos distintos dos circuitos. Este tipo de acções processam-se geralmente sem contacto físico, segundo mecanismos ditos de **acoplamento** [Balcels *et al.* (1992)]: **acoplamento indutivo** no primeiro caso, **acoplamento capacitivo** no segundo e, no terceiro, **acoplamento resistivo**.

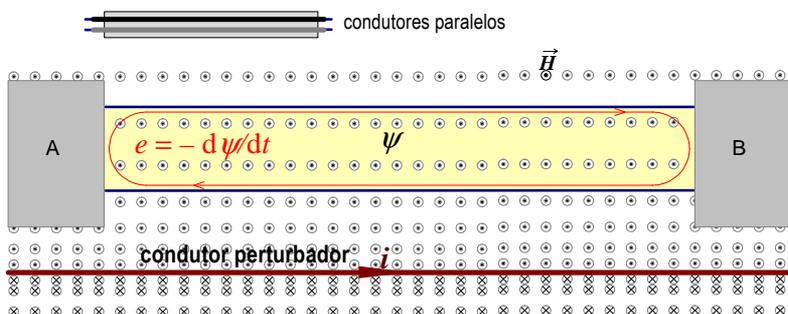
A Figura 6.5 ilustra, de modo muito simplificado, o importante mecanismo de acoplamento indutivo entre um circuito perturbador (que cria um campo magnético \vec{H} variável) e um circuito susceptível.

Deste acoplamento só resulta perturbação se o *fluxo magnético ligado* ψ variar, ou seja, se a corrente i no circuito perturbador for variável no tempo. Neste caso surgirá no circuito susceptível uma força electromotriz (f.e.m.) induzida e proporcional à derivada do fluxo ligado em ordem ao tempo: $e = -d\psi/dt = K di/dt$. A constante de proporcionalidade K depende da geometria dos circuitos em presença.

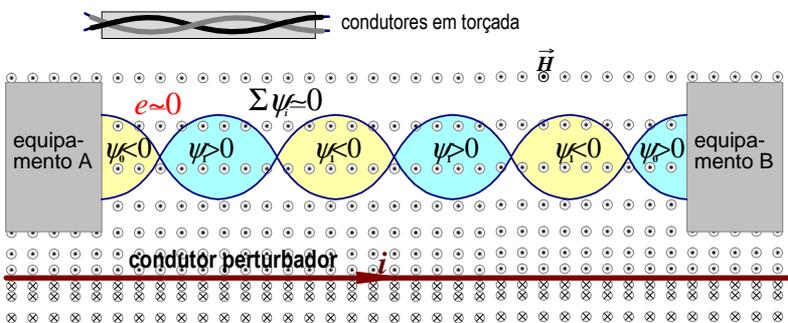
Os condutores de ida e retorno de um circuito são geralmente integrados em cabos, ficando a curta distância entre si e, por conseguinte, com uma pequena área de acoplamento. A mitigação do efeito consegue-se usando, para além disso, no circuito susceptível, os **condutores cableados em torçada** (cf. Figura 6.5-c), e nunca condutores paralelos; deste modo existem sucessivas porções de circuito com fluxo ligado de sinal oposto, de tal modo que o fluxo ligado global é muito baixo, o mesmo acontecendo com a f.e.m. induzida pela sua variação.



a – linhas de campo magnético (H) criadas pela passagem de corrente eléctrica i nos condutores do circuito perturbador na presença de condutores de um circuito de sinal



b – fluxo magnético ligado (ψ) e f.e.m. induzida (e) no circuito susceptível no caso de os seus condutores serem paralelos



c – parcelas do fluxo ligado de sinal contrário, no caso de os condutores de sinal serem *em torçada*

Figura 6.5 – Mecanismo de acoplamento indutivo entre circuitos: um circuito perturbador percorrido por uma corrente eléctrica i e um circuito de sinal (susceptível)

O mesmo tipo de fenómeno regista-se, de forma geralmente muito intensa, quando ocorrem descargas atmosféricas na vizinhança de circuitos de sinal, como se mostra na Figura 6.6. Se os condutores não formarem troçada podem ser sede de f.e.m.^{es} intensas em virtude da elevadíssima taxa de variação das correntes de descarga. Neste exemplo assinala-se ainda a ocorrência de dois tipos de f.e.m. de perturbação: em **modo diferencial**, e_d , e em **modo comum**, e_c . A primeira surge no circuito envolvendo os dois condutores, ao passo que a segunda se regista na malha fechada pelo cabo (ambos os condutores em paralelo) e pela terra.

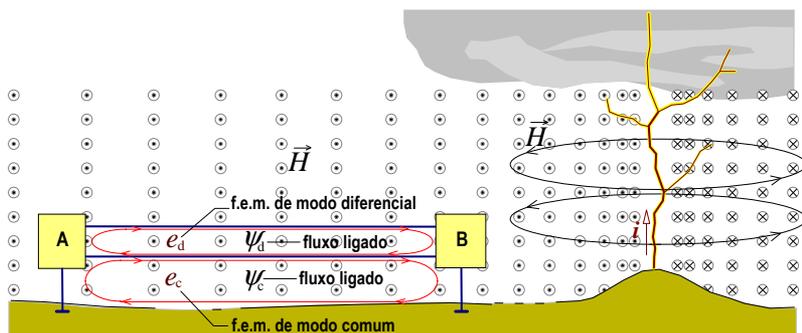
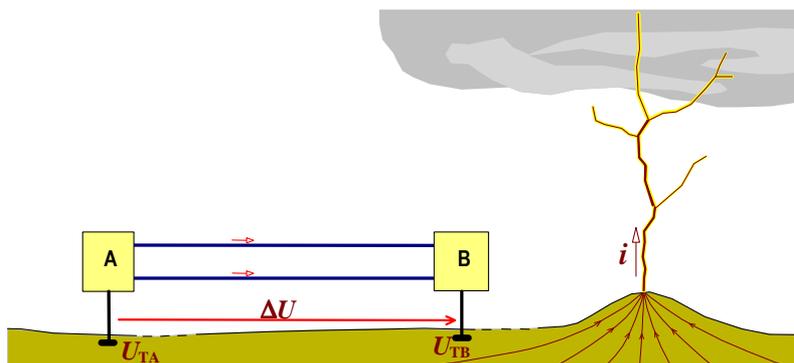
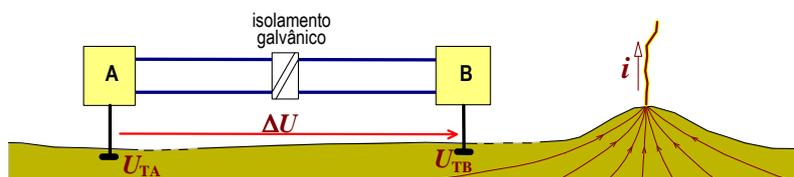


Figura 6.6 – Perturbações sobre um circuito de sinal originadas por uma descarga atmosférica: fluxos ligados e f.e.m.^{es} em modo diferencial e em modo comum

O mesmo fenómeno também serve para ilustrar outro efeito chamado **acoplamento resistivo**. O mesmo resulta da passagem de corrente eléctrica de descarga através do solo que causa diferenças de potencial entre diferentes pontos, como sejam aqueles onde estão ligados à terra equipamentos distintos, conforme se assinala na Figura 6.7-a pelos potenciais U_{TB} e U_{TA} , em que $U_{TB} \gg U_{TA}$. Este efeito pode ser evitado com a interposição de dispositivos de **isolamento galvânico** que suportem tensões elevadas (cf. Figura 6.7-b). Por vezes as barreiras de isolamento são integradas nas próprias interfaces (cf. p.ex. Figura 6.4-d).



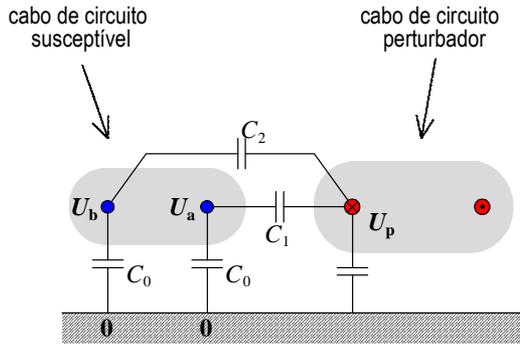
a – ocorrência de diferenças de potencial de terra entre dois equipamentos interligados por um circuito de sinal



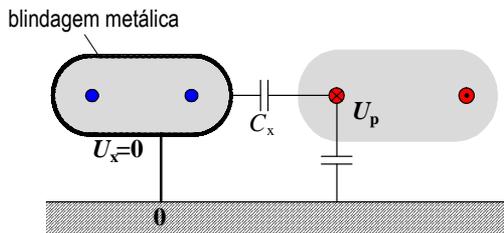
b – eliminação das correntes de circulação em modo comum por interposição de um dispositivo de isolamento galvânico

Figura 6.7 – Perturbações sobre um circuito de sinal originadas por uma descarga atmosférica através de efeito de acoplamento resistivo

O chamado **acoplamento capacitivo** resulta da presença de condutores dos circuitos susceptíveis sujeitos a campos eléctricos criados por outros circuitos ou fenómenos perturbadores. O mecanismo pode ser explicado pelas capacidades parasitas entre os condutores em presença, conforme se pode observar na Figura 6.8. A principal solução de mitigação deste tipo de fenómeno consiste na utilização de ecrãs de **blindagem metálica** nos cabos de sinal.



a – explicação básica através de capacidades parasitas entre condutores



b – mitigação através de ecrãs metálicos de blindagem nos cabos e sua ligação à terra

Figura 6.8 – Fenômeno de acoplamento capacitivo: U_p simboliza o potencial de um condutor perturbador; U_a e U_b representam potenciais criados nos condutores do circuito de sinal pela divisão capacitiva C_1-C_0 e C_2-C_0 , respectivamente

Os sinais analógicos são os mais susceptíveis às diversas perturbações de natureza electromagnética atrás referidas. Acresce que os dispositivos interpostos nos circuitos de sinal analógico (designadamente para isolamento, amplificação ou filtragem), usados para mitigar alguns daqueles efeitos perturbadores, também afectam a qualidade dos sinais (p.ex. por deficiência de linearidade). A própria conversão de sinal analógico para representação digital (A/D), ou no sentido contrário (D/A), também causam alguma depreciação de qualidade para fins metrológicos.

Os sinais na forma binária (incluindo os sinais em frequência e os sinais digitais) são os mais robustos relativamente aos efeitos perturbadores de origem electromagnética, aceitando, sem depreciação, a interposição de dispositivos de reforço ou de isolamento. Sempre que possível devem ser preferidos relativamente aos sinais analógicos.

A finalizar esta breve alusão a perturbações sobre sinais eléctricos recupera-se o problema das descargas atmosféricas. Estas, para além dos efeitos perturbadores sobre a qualidade dos sinais, ocasionam **sobretensões**, em modo comum e em modo diferencial, que podem destruir isolamentos e órgãos electrónicos de interface. A protecção dos sistemas quanto a sobretensões deve ser procurada através de dispositivos supressores adequados [Balcells *et al.* (1992)].

Os **supressores de sobretensões** devem ser colocados normalmente na vizinhança de interfaces em circuitos provenientes de locais mais expostos e em circuitos extensos. Este tipo de protecção não se destina a salvaguardar os sistemas no caso da incidência directa de descargas atmosféricas, que seriam extremamente destrutivas. Serve apenas para limitar os efeitos das sobretensões originadas por descargas incidentes noutros locais, que é a situação frequente.

Existem vários tipos de supressores de sobretensões, diferindo na capacidade de absorção de energia e de limitação da tensão: os que têm maior capacidade dissipativa (p.ex. descarregadores de estado sólido, descarregadores de arco em gás e varistores) são mais lentos e mais grosseiros na atenuação das ondas de tensão, ao passo que os mais rápidos e exactos no arrasamento da tensão (construídos com semicondutores) têm pouca capacidade de absorção de energia. Por vezes são combinados em dois, ou mesmo em três níveis, entre a zona exposta do circuito e as interfaces dos equipamentos, conforme se ilustra na Figura 6.9: os primeiros a colocar no caminho de penetração da onda de choque de sobretensão são os mais dissipativos, ficando os de semicondutor junto da interface. Entre supressores de níveis diferentes deve existir uma porção de circuito considerável (na ordem da dezena de metros) para acomodar a q.d.t. (queda de tensão) na passagem da onda, ou então pequenas autoinducções alojadas nos módulos de supressão.

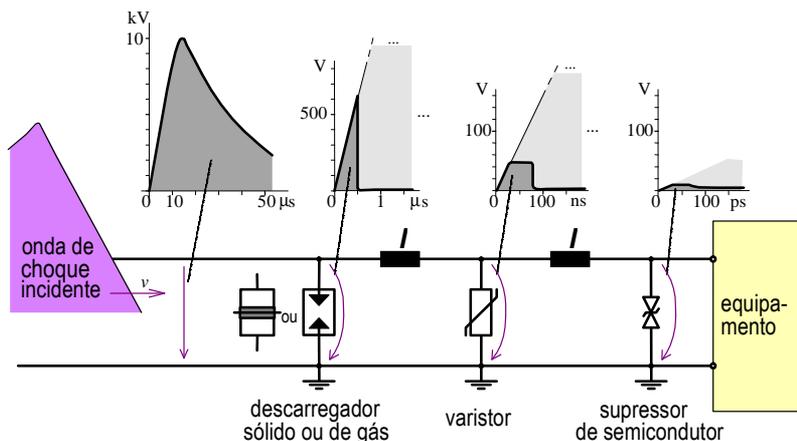


Figura 6.9 – Arrasamento de uma onda de choque de sobretensão numa sequência de três níveis de supressores

Em entradas de energia eléctrica proveniente de distribuição aérea é habitual a inserção de protecções contra sobretensões no primeiro quadro eléctrico. Para este caso é recomendável a utilização de protecções de estado sólido com grande capacidade dissipativa munidas de saída binária para aviso de destruição. A eficácia destas protecções depende também da existência de electrodos de terra de baixa impedância.

Em circuitos de sinal não muito extensos usa-se geralmente apenas um ou dois níveis de supressão, mas terminando sempre na limitação por semicondutor junto da interface a proteger. A protecção contra sobretensões deve ser feita em ambas as extremidades de um cabo ou circuito que interliga dois equipamentos. O nível final de arrasamento deve situar-se um pouco acima da tensão nominal, mas nitidamente abaixo da tensão máxima admissível na interface do equipamento.

6.2.5 Soluções recomendáveis em sistemas de medição de caudal

Na sequência das considerações feitas na secção 6.1.2, as estruturas dos sistemas de medição de caudal devem contemplar os seguintes princípios:

- restringir a extensão das ligações (circuitos) mais susceptíveis, que são as ligações entre os órgãos primários de transdução e os condicionadores de sinal;

- restringir a extensão das restantes ligações por sinal analógico ao longo da cadeia, se não puderem ser evitadas;
- reforçar as medidas de imunização das partes mais susceptíveis (blindagens, ligações de massa, equipotencializações, separação dos circuitos de sinal analógico relativamente a circuitos de energia, a circuitos de comando e de comunicação, afastamento dos equipamentos perturbadores);
- reduzir o número de órgãos interpostos nas cadeias de sinal analógico (para reforço, isolamento, protecção, afixação de valores, etc.) aos considerados absolutamente indispensáveis;
- realizar a transmissão de informação a distância, tanto quanto possível, na forma digital codificada, em desfavor da transmissão por sinal analógico;
- procurar redundância de vias para melhorar a fiabilidade do sistema.

Os condicionadores de sinal de caudalímetros modernos, praticamente sem excepção, já realizam a conversão para sinais digitais e providenciam interfaces físicas de comunicação digital série com protocolos de comunicação adequados. Mantêm contudo a disponibilidade de interfaces analógicas para também poderem ser utilizados nas metodologias convencionais, bem como saídas em frequência e por relé (cf. Figura 6.10). Para além destes aspectos possuem capacidade de processamento, de autodiagnóstico, de parametrização e de “auto-calibração”, que são funcionalidades importantes para a manutenção e a exploração. Possuem também dispositivos de interface humano-máquina (HMI) que consistem geralmente em botões e mostrador alfanumérico.

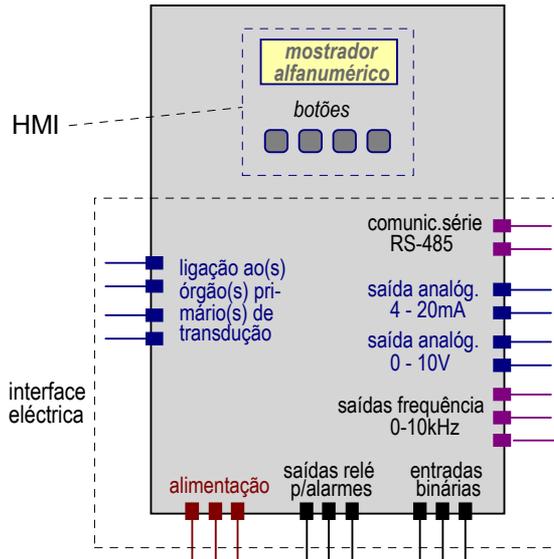


Figura 6.10 – Ilustração do conjunto de interfaces típicas num condicionador de sinal de um caudalímetro para escoamentos sob pressão

Com este tipo de equipamentos torna-se possível restringir drasticamente a extensão da cadeia de sinais analógicos (sequência de circuitos e de órgãos interpostos) bem como realizar um tipo de estrutura recomendável para os sistemas de medição de caudal, como aquele que está esquematizado na Figura 6.11.

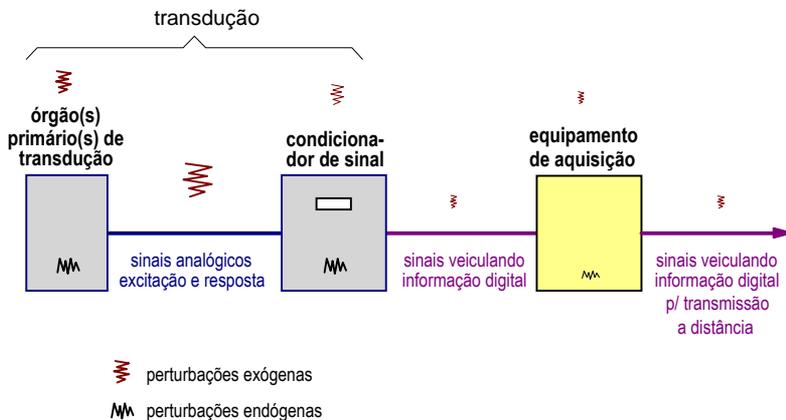


Figura 6.11 – Estrutura recomendável para uma cadeia de medição em caudalimetria: os órgãos primários e o condicionador de sinal devem ficar tão próximos quanto possível ou residir na mesma unidade

Existem soluções de fabrico em que os órgãos de transdução e de condicionamento estão alojados numa mesma unidade física. Pelas razões atrás apontadas essa modalidade pode constituir uma solução preferencial. No entanto, também existem outras razões plausíveis que justificam a construção de órgãos primários e condicionadores separados: p.ex. para deixar apenas os primários colocados nos locais inundáveis, pois são mais fáceis de construir com graus de protecção contra a imersão; ou simplesmente para evitar associar blocos com electrónica, mostradores, etc., a órgãos muito pesados e sujeitos a ficarem em posições pouco acessíveis. Como estes aspectos são muitas vezes determinantes, adoptam-se equipamentos separados, mas procurando reduzir as distâncias e tomando cuidados de imunização (discutidos na secção 6.1.4).

O condicionador de sinal possui geralmente um mostrador digital para exibir valores de caudal (e de volume) e para a função de HMI de parametrização. Mas em instalações caudalimétricas é habitual dispor ainda de outros indicadores locais de caudal e/ou de volume, com o objectivo de assegurar redundância e de proporcionar melhor visibilidade ou acessibilidade. É provável, contudo, que as leituras exibidas no mostrador do próprio medidor ofereçam menor incerteza.

Sendo as interfaces eléctricas, quer analógicas quer digitais, pontos vulneráveis a falhas provocadas por agentes externos ou internos (p.ex. sobretensões, flutuações de potencial de massa, deficiências de contacto eléctrico), é prudente efectuar ligações redundantes entre os condicionadores de sinal e os equipamentos de aquisição.

Estes últimos aspectos estão na origem da estrutura que se ilustra na Figura 6.12. Os detalhes referentes à transmissão de dados para os locais de utilização serão abordados na secção 6.3.

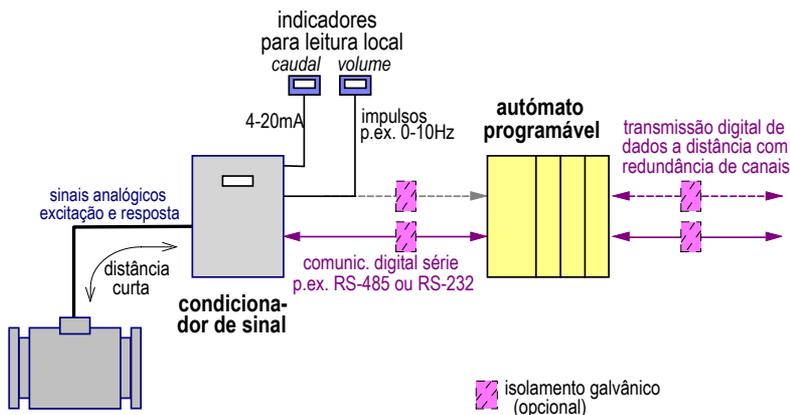


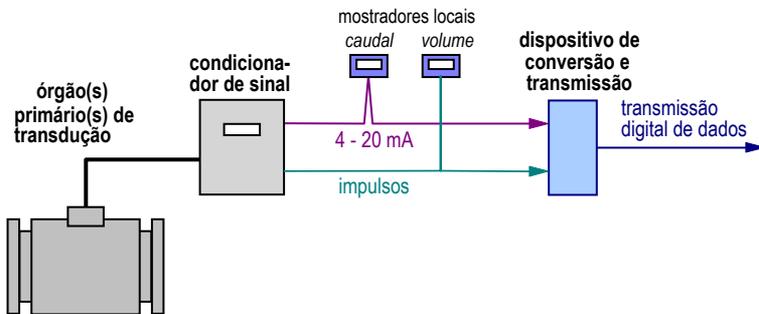
Figura 6.12 – Exemplo esquemático de uma cadeia de medição de caudal incorporando os princípios recomendados atrás e com a função de aquisição de dados a cargo de um autômato programável

Este tipo de estrutura é aplicável mesmo com transduções primárias múltiplas, como acontece, tipicamente, em medidores de caudal para escoamentos com superfície livre que medem, por exemplo, altura ou nível de água e velocidade (eventualmente com mais do que uma tecnologia de sensor para cada grandeza), mas que possuem um único condicionador de sinal.

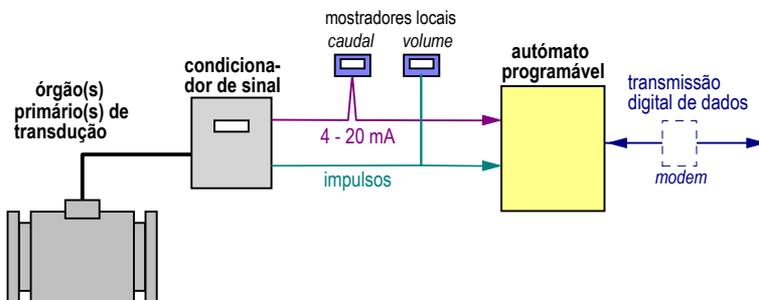
6.2.6 Outros tipos de soluções praticadas em sistemas de medição de caudal

Em sistemas com transdução eléctrica mas um pouco mais antigos é habitual encontrar a informação de caudal representada por sinal analógico e a de volume por totalização de impulsos (contagem); esses sinais são então ligados a órgãos que efectuem a conversão para valores numéricos (digitais). Estes últimos podem proceder ao envio imediato da informação codificada a distância, sem arquivamento local de dados, como fica ilustrado na Figura 6.13-a; mas também pode existir aquisição local de dados (cf. Figura 6.13-b). Quando a ligação entre o condicionador de sinal do caudalímetro e o sistema de aquisição for extensa, neste tipo de solução técnica deve haver lugar à interposição de dispositivos de reforço (amplificação) de sinal ou de isolamento galvânico, ou com ambas as funções (cf. Figura 6.13-c) a fim de reduzir os efeitos dos agentes perturbadores electromagnéticos, mas não esquecen-

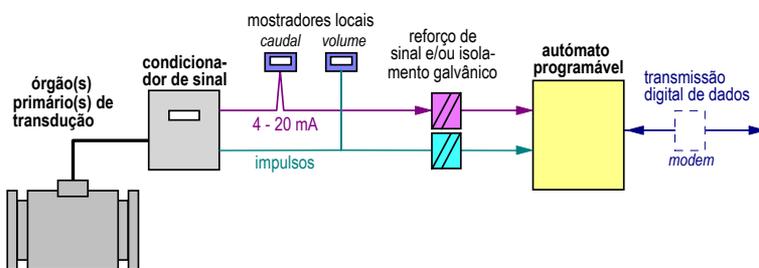
do que, em sinais analógicos, a presença desses dispositivos também contribui para aumentar a incerteza associada à grandeza medida.



a – solução sem aquisição local de dados, com órgão de conversão para digital e transmissão imediata



b – idêntico ao caso **a** mas com a função de aquisição de dados a cargo de um autômato programável



c – idêntico ao caso **b** mas com o equipamento de aquisição afastado e inserção de dispositivos de reforço de sinal e/ou isolamento galvânico

Figura 6.13 – Exemplos esquemáticos de algumas modalidades de cadeias de medição, veiculando a informação de caudal em sinal analógico e a informação de volume em sinal pulsatório

Embora não se trate de soluções recomendáveis para sistemas novos, merecem referência por se encontrarem em serviço em numerosas instalações existentes.

Nos exemplos ilustrados a aquisição de dados é feita por autómatos programáveis, que são equipamentos com meios para realizar também funções de comando local, mas pode simplesmente ficar a cargo de aparelhos exclusivamente de aquisição (*logging*) de dados.

Quando são utilizados medidores mecânicos volumétricos (*contadores*) a parte da cadeia que envolve sinais eléctricos torna-se mais curta. Existe uma conversão do movimento da água para a rotação de dispositivos mecânicos de totalização do medidor; a partir daí obtêm-se impulsos eléctricos por detecção de passagem de peças rotativas na proximidade de relés *reed* ou de detectores indutivos. Os sinais nesta forma ficam em condições de ser lidos por um aparelho com a função de aquisição de dados. Se o sistema de medição não dispuser de recursos de energia eléctrica e dispensar requisitos de automação local poderá ser munido de um aparelho simples de aquisição de muito baixo consumo, do tipo *data logger*, servido por acumuladores ou pilhas, como se mostra na Figura 6.14. Não se trata de uma solução ao melhor nível de exactidão, em virtude das limitações metrológicas dos medidores mecânicos, mas ainda se encontra com alguma frequência. Pode até permitir a obtenção de valores de caudal em tempo real se a detecção de partes móveis proporcionar um número considerável de impulsos por unidade de volume.

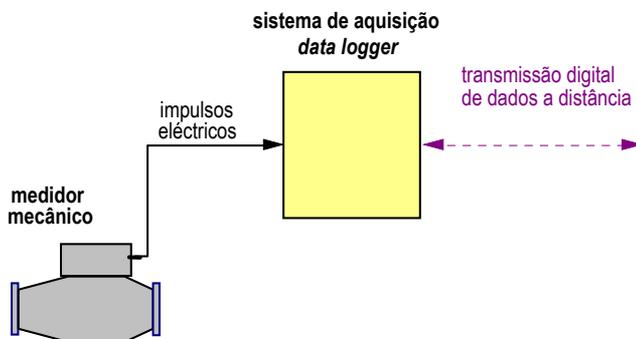


Figura 6.14 – Exemplo esquemático de uma cadeia de medição de caudal com medidor mecânico e com a função de aquisição de dados a cargo de um *data logger*

Para as situações de grande dificuldade na obtenção de alimentação de energia eléctrica também existem soluções de medidores intrusivos de baixo consumo, incorporando pilhas ou acumuladores, embora proporcionem piores características metrológicas do que os medidores electromagnéticos convencionais. Podem ser explorados com ou sem aquisição local de dados (cf. Figura 6.15).

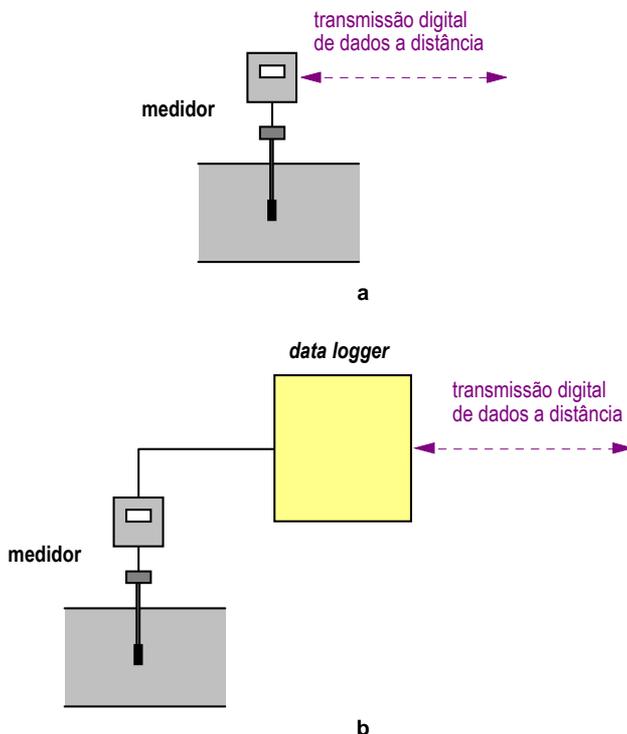


Figura 6.15 – Exemplos esquemáticos de cadeias de medição de caudal:
a – com medidor de muito baixo consumo energético efectuando a comunicação directamente a partir do medidor;
b – idem com aquisição local de dados

6.3 Aquisição de dados e automatismos locais

6.3.1 Necessidade e requisitos da função de aquisição

Entende-se por *aquisição de dados* a recolha de informação (resultados de medição) na forma digitalizada e seu armazenamento em condições de fácil recuperação posterior. Nos sistemas moder-

nos a recolha, conversão e armazenamento são feitos por meios electrónicos programáveis.

Idealmente poderia dispensar-se o arquivamento local de dados de caudal desde que se procedesse ao seu envio sistemático e imediato a distância para os pontos de utilização. Porém, a exigência de fiabilidade do sistema torna conveniente dispor da **função de aquisição de dados** para fazer face à eventualidade de perda de comunicação a distância. De facto, se existir um registo local de resultados de medições, após a recuperação do funcionamento das comunicações, os dados armazenados podem ser então enviados para os pontos de utilização, em tempo diferido, mas ainda com utilidade para facturação, para estatística e mesmo para a gestão do sistema hidráulico (quer se trate de sistema de abastecimento de água ou de sistema de saneamento de águas residuais urbanas).

Normalmente existe também a necessidade de assegurar **funções de automação** de tarefas relativas às instalações e recursos de medição de caudal, tais como: envio de comandos e detecção de falhas em equipamentos, detecção de intrusão ou de ocorrências perigosas para pessoas e/ou bens; desencadeamento de acções de salvaguarda e de aviso, etc.

A combinação das duas funções acima resulta frequentemente na opção por **controladores lógicos programáveis (PLC – *programmable logic controller*)** de tipo industrial, também designados por **autómatos programáveis** [Mandado (2005)]. Trata-se de equipamentos com mecanismos robustos de encerramento e reinício perante interrupções na alimentação de energia, com meios automáticos de recuperação do tipo *watch-dog* face a erros nas sequências de instruções (originados p.ex. por perturbações electromagnéticas ou por microcortes na alimentação eléctrica).

Em casos em que a função de automação seja dispensável e que não exista disponibilidade para alimentação de energia eléctrica é usual recorrer a sistemas de aquisição do tipo ***data logger***. Estes aparelhos, que se adequam bem a aplicações com ritmos de aquisição moderados, têm muito baixo consumo de energia e possuem bateria de acumulador que lhes confere autonomia para várias semanas ou meses. A transferência dos dados arquivados pode ser feita no local, por descarga para computador portátil, ou, preferencialmente, através de comunicação com ou sem fios (p.ex. por rede telefónica celular).

Como a função de aquisição é eminentemente metrológica os equipamentos de aquisição têm de estar munidos do *hardware* de conversão e processamento de sinal e ainda das interfaces adequadas para satisfazer os requisitos que se colocam nesta vertente.

A contagem de impulsos e a medição de frequências de sinais pulsatórios pode realizar-se na prática com elevada exactidão, facto que se junta à grande robustez electromagnética que se consegue com este tipo de sinais.

A aquisição a partir de sinais analógicos é bem mais delicada sendo os respectivos circuitos também mais perturbáveis do que os de sinal binário. A conversão de sinal analógico para valor digital (**conversão A/D**), bem como no sentido contrário (**conversão D/A**), originam sempre alguma depreciação de qualidade para fins metrológicos. Um aspecto importante a ter em conta é a **resolução** da representação digital, em bits, embora existam ainda outros aspectos que contribuem para a incerteza dos valores representados, como seja a linearidade e a variação com a temperatura. Para as situações comuns de aquisição de valores de caudal a resolução nunca deve ser inferior a 12 bit. Nos casos de ligação por sinal analógico em tensão as interfaces com entradas em *modo diferencial* oferecem melhores características metrológicas.

Na exploração das redes de distribuição de água os **ritmos de aquisição** são baixos, aceitando-se intervalos entre registos consecutivos na ordem do minuto. Nas de drenagem de águas residuais esse intervalo pode ser ligeiramente alargado.

A **capacidade de memória** deve permitir o armazenamento de dados correspondentes a pelo menos um dia de exploração quando existam meios fiáveis de transmissão imediata de dados a distância. Nos casos em que não existam meios para transmissão regular essa capacidade deve suprir pelo menos um mês de exploração.

A aquisição de dados não tem necessariamente que memorizar todas as medições efectuadas ao ritmo normal de leitura. A concepção de soluções de armazenamento de dados deve tirar partido de **funções estatísticas**, nomeadamente, médias, valores extremos e parâmetros de dispersão, por forma a permitir uma gestão racional dos recursos de memória, bem como maior facilidade na disponibilização posterior dessa informação e na sua rele-

vância para objectivos metrológicos. São de considerar também hipóteses de memorização a **ritmos variáveis** em função da taxa de variação das próprias grandezas; a mesma estratégia pode ser muito útil para moderar a cadência na transmissão dos dados.

Os sistemas de aquisição têm de incorporar relógio/calendário de tempo real, que deve estar devidamente articulado com as mudanças de hora legais. No armazenamento de dados de caudal e/ou de contagem é indispensável incluir uma **horodatação** rigorosa, destinada à posterior sincronização de dados de diferentes proveniências.

6.3.2 Necessidade e requisitos da função de automação

Na maioria das instalações de medição de caudal em sistemas de abastecimento de água e em sistemas de drenagem de águas residuais é conveniente dispor de recursos para assegurar certos automatismos locais e, em particular, os procedimentos específicos de operação em modo autónomo em caso de falha na comunicação com níveis hierárquicos superiores [Ecob *et al.* (1995)].

Pressupõe-se que exista, no caso mais geral, uma infra-estrutura de automação alargada a todo um sistema de abastecimento ou de drenagem, da qual os automatismos locais (em estações de tratamento, de bombagem, de medição/contagem, etc.) são subsistemas. Esse sistema global inclui unidades de controlo, recursos de transmissão de dados e postos de supervisão [Ackerman e Block (1992), Daneels e Salter (1999)]. Como as comunicações nestes sistemas são geralmente feitas a distâncias consideráveis a supervisão convencional recebe aqui o nome de **telegestão**. A simples recolha de dados provenientes de pontos de medição remotos é conhecida por *telemetria* ao passo que a tarefa de envio de comandos a distância é designada por *telecomando* ou *teleacção*.

Os **automatismos locais** têm a seu cargo tarefas de detecção de estados e de ocorrências, para além da condução das tarefas de medição e de transmissão realizadas por outros equipamentos. Fazer o diagnóstico do estado dos sistemas e dá-lo a conhecer ao nível da telegestão é uma função vital. A detecção atempada de falhas nos equipamentos e instalações e de ocorrências exógenas indesejáveis pode diminuir a gravidade dos seus efeitos, uma vez que contribui para maior rapidez na intervenção de pessoal técnico ou de meios para a segurança pública.

Como já foi assinalado, os controladores habitualmente preferidos para realizar esta função são os **autómatos programáveis** (PLC) que, naturalmente, também suportam a tarefa de aquisição de dados. Esta preferência decorre também de objectivos de uniformidade de soluções com outros tipos de instalações que as entidades gestoras exploram (estações de bombagem, postos de comando de válvulas, reservatórios, estações de cloragem, etc.) e onde este tipo de controladores industriais é aconselhável.

Concebidos para ambientes industriais, os autómatos apresentam considerável robustez contra perturbações externas, capacidade de recuperação após falhas de energia ou erros nas sequências de instruções, determinismo no comportamento das entradas e saídas nessas situações, bem como um conjunto muito diversificado de interfaces [Mandado *et al.* (2005)]. São apresentados comercialmente em várias gamas quanto à complexidade das funções que podem realizar e ao número e tipo de interfaces. As versões modernas são modulares e configuráveis para obter soluções relativamente económicas.

A norma IEC 61131-3 conseguiu, com algum sucesso, uma aproximação das linguagens de programação para este tipo de equipamentos, apesar da diversidade de fabricantes existentes [Lewis (1997)]. Embora não se consiga assegurar a portabilidade de *software* entre eles, na óptica do utilizador considera-se vantajoso exigir a conformidade com essa norma.

Existem outros tipos de controladores que podem ser utilizados nos sistemas de medição de caudal com bom desempenho. Todavia, não permitem obter soluções abertas e vulgarizadas como os anteriores.

O Quadro 6.2 mostra uma lista indicativa com os principais tipos de variáveis de entrada e saída para o controlador local numa instalação típica de medição de caudais.

Quadro 6.2 – Principais entradas (E) e saídas (S) na interface do controlador local

Tipo de E/S	Função
<p style="text-align: center;">EB (entradas binárias)</p>	<p>Intrusão Abertura de armário Inundação Falta de energia de rede Alarmes do caudalímetro (fora de limites, conduta vazia, etc.) Estado do carregador de bateria Estado da UPS Estado do descarregador de sobretensões Estado de outros sistemas de medição existentes no local (p.ex. de qualidade da água) Impulsos de contagem (a baixa frequência) Valor de caudal em sinal pulsado (EB para alta frequência)</p>
<p style="text-align: center;">SB (saídas binárias)</p>	<p>Activação de bomba(s) de drenagem Activação de ventilador(es) Alarme de intrusão Seleccção de gama de medição no condicionador de sinal do caudalímetro Activação de outros sistemas de medição existentes no local (p.ex. de qualidade da água)</p>
<p style="text-align: center;">EA (entradas analógicas)</p>	<p>Valor de caudal (p.ex. como opção alternativa ou redundante a COM e a EB de alta frequência) Valores de outras grandezas recolhidas no mesmo local (p.ex. pressão, parâmetros de qualidade da água, etc.)</p>
<p style="text-align: center;">COM (interfaces de comunicação digital)</p>	<p>Comunicação bidireccional com medidor de caudal Comunicação bidireccional com <i>modem</i>(s) para transmissão a distância Comunicação bidireccional em rede de campo (numerosas opções)</p>

No que concerne aos sistemas de aquisição e automação, especialmente quando são motivo de fornecimento externo, é indispensável tomar algumas precauções em sede de caderno de encargos, a saber:

- dar preferência a soluções normalizadas de equipamentos e linguagens de programação;
- exigir documentação esquemática da parte de *hardware* na forma final, abrangendo alimentações, protecções, circuitos de energia e de sinal, ligações de massa, equipotencializações;

- exigir documentação detalhada dos programas elaborados, na forma final, bem como todos os seus ficheiros em suporte informático;
- ponderar a exigência de fornecimento dos próprios recursos (i.e. programas, unidades portáteis, etc.) necessários para a programação dos controladores e/ou sistemas de aquisição, bem como de outros equipamentos programáveis ou parametrizáveis da instalação, face à contratação da manutenção dos referidos sistemas a longo prazo;
- exigir acções de formação específica de pessoal de operação para utilização dos sistemas em causa.

No que respeita à exploração dos sistemas deve ser fixada uma disciplina exigente de utilização dos meios de programação e de parametrização, com definição criteriosa de prerrogativas de acesso e de responsabilidades.

6.4 Transmissão de dados

6.4.1 Aspectos básicos de codificação de dados

Normalmente um sistema de medição de caudal não se destina a permanecer isolado e a produzir medições exclusivamente para indicação no local. A experiência tem mostrado que, mesmo quando é essa a condição inicial de serviço, frequentemente acaba por ser necessário adicionar novos meios para envio de dados a distância. Em sistemas de medição de caudal e de volume a transmissão de dados deve ser encarada cada vez mais como uma funcionalidade imprescindível.

A transmissão de informação digital entre equipamentos requer a existência de:

- Ligação física — meios de comunicação (i.e. órgãos transmissores e receptores nos equipamentos intervenientes e canal ou suporte físico de transmissão), em que um mesmo suporte físico é frequentemente partilhado por diversos equipamentos;
- Ligação lógica
 - soluções de controlo de erros que assegurem a integridade da informação transmitida;

- regras de gestão das iniciativas de transmissão entre os equipamentos para impedir que as mesmas surjam sobrepostas e se inviabilizem mutuamente.

Os aspectos relativos à ligação física serão abordados na secção 6.4.2.

Para preservar a integridade da informação digital transmitida utilizam-se técnicas ditas de **controlo de erros**. Estas últimas consistem basicamente em acrescentar alguma informação redundante aos conteúdos úteis a transmitir, obedecendo a regras matemáticas de **codificação** pré-estabelecidas. Na recepção as mesmas regras são utilizadas para validar a informação recebida: quando são detectados erros a informação é rejeitada, superando-se a situação à custa de mecanismos de retransmissão⁸¹ até obter sucesso ou até esgotar um número máximo de tentativas, findo o qual se conclui não haver condições para a comunicação.

Existem diversas metodologias de codificação para a detecção de erros. A mais simples consiste no acréscimo do *bit de paridade*, bastante limitado por só detectar erros num bit, ou num número ímpar de bits, em cada palavra de código. Assumem especial importância neste domínio de aplicações a técnicas que se baseiam em *códigos cíclicos polinomiais* [Palma (2004)]. De entre estes são bem conhecidos os que se baseiam em:

- *teste longitudinal* (BCC – *block checksum*) que consiste no acréscimo, a cada mensagem constituída por vários bytes, de um byte adicional obtido pela soma módulo 2 (“OU exclusivo”) dos bytes que formam a mensagem; na recepção, se a soma módulo 2 de todos os bytes resultar nula aceita-se a mensagem como válida, caso contrário é rejeitada;
- *teste de redundância cíclica* (CRC – *cyclic redundancy check*) que consiste no acréscimo, a cada mensagem com n bits, de um bloco redundante com r bits, obtidos como resto de uma divisão da mensagem original (estendida a mais r zeros) por um conteúdo de $r+1$ bits especialmente

⁸¹ Existem também técnicas com redundâncias ainda maiores, capazes de permitir regenerar a informação correcta, perante certos tipos de erros, sem necessidade de qualquer retransmissão: recebem o nome de métodos de *correção* de erros. As modalidades que interessam ao presente tipo de aplicação utilizam retransmissão quando necessário, sendo designadas por métodos de *detecção* de erros.

escolhido; este valor, que serve de “chave”, é conhecido por *gerador* do código.

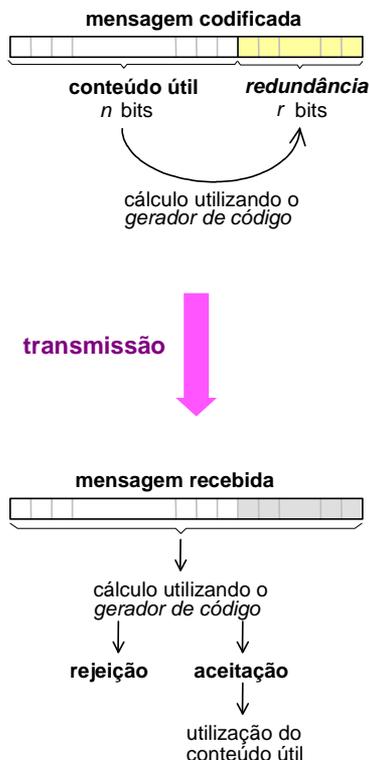


Figura 6.16 – Ilustração de um processo de codificação e descodificação de mensagens na transmissão de dados

Uma codificação adequada permite detectar erros numa proporção extraordinariamente elevada do conjunto de todos os erros possíveis na transmissão, o que torna aceitável a utilização destes códigos não só para envio de dados mas também para aplicações de comando de sistemas automáticos de grande responsabilidade. Por exemplo, com CRC de 16 bit é possível detectar 99,9958% dos erros possíveis em mensagens com comprimentos até 65536 bits; com CRC de 32 bit a cobertura de detecção passa para 99,999999977%; acresce que em condições aceitáveis de serviço não acontecem perturbações em todas as mensagens e ainda que uma parte das perturbações indetectáveis pelo teste de recepção conduziria a conteúdos reconhecíveis no contexto da aplicação.

É pelas razões que se acabam de expor muito simplificada-mente que se considera que os dados, uma vez digitalizados e codificados, não irão sofrer alterações na cadeia de transmissão. É este facto que sustenta a conveniência da transmissão digital de dados relativamente à transmissão analógica e do encurtamento da parte analógica das cadeias de medição.

Entretanto recorda-se o papel essencial dos mecanismos lógicos de retransmissão e da escolha de procedimentos que não conduzem à acumulação de erros, com o exemplo da telemetria de volumes de água: se for feita a transmissão de uma mensagem por cada impulso de contagem as perturbações podem dar lugar à acumulação de erros na totalização, caso não exista confirmação da recepção de cada mensagem e as repetições necessárias. A solução adequada consistirá antes na transmissão de valores totais a cada momento: assim, a perda de um dado não afecta a exactidão dos resultados com a chegada dos dados seguintes.

6.4.2 Aspectos básicos de gestão do tráfego de informação

Outro conceito importante na gestão da transmissão digital de dados em rede (i.e. utilizando um meio de comunicação partilhado pelos equipamentos intervenientes) diz respeito ao chamado **controlo de acesso ao meio** de comunicação [Palma (2004)]. Trata-se de disciplinar as iniciativas de transmissão por parte dos equipamentos (nós de rede) para viabilizar o funcionamento do sistema. A título de exemplo referem-se duas modalidades muito comuns.

Segundo a regra de acesso conhecida por *master/slave* existe um único nó com a prerrogativa de transmitir para a rede (o *mestre*); qualquer um dos outros nós (*escravos*) é permanentemente receptor das mensagens, podendo apenas transmitir (i.e. responder) se tal lhe for solicitado explicitamente pelo mestre.

Outra metodologia bem diferente consiste no *acesso espontâneo*: qualquer nó, após verificar que a rede está inactiva, pode tomar a iniciativa de enviar uma mensagem; é conhecida pela sigla CSMA (*carrier-sense multiple access*). Esta modalidade não exclui a hipótese de ocorrerem iniciativas de transmissão simultâneas por parte dos nós. No entanto, providencia métodos para resolver essas colisões, tais como, por exemplo: a suspensão da transmissão com geração aleatória de tempos de espera para novas tentativas de transmissão, conhecida por CSMA-CD (*collision detec-*

tion); a chamada arbitragem bit-a-bit, CSMA-BA (*bitwise arbitration*) conduzindo ao prosseguimento apenas por parte do nó com o endereço mais baixo.

A transferência de dados por comunicação digital entre os vários locais ou estações (não só de medição de caudal mas também de bombagem, tratamento, armazenagem, válvulas, etc.) e os sistemas centralizados de telegestão processam-se normalmente por troca de mensagens. Com um número elevado de postos facilmente se excedem as capacidades do meio de comunicação utilizado, tornando-se indispensável moderar o tráfego de informação. Uma forma de o conseguir consiste em diminuir o ritmo de actualização (ou amostragem) de variáveis na rede num processo de interrogação cíclica. Outras formas mais criteriosas de resolver o problema consistem em utilizar:

- **ritmos fixos diferenciados** — algumas variáveis necessitam de cadências de actualização maiores do que outras (p.ex. o alarme de disparo de um grupo de bombagem ser interrogado com maior frequência do que o nível num reservatório);
- **transmissão espontânea desencadeada pela variação de estado** — os postos remotos tomam a iniciativa de enviar novos valores de variáveis apenas quando estas tenha sofrido variações percentuais ou absolutas superiores a limites fixados previamente;
- **combinação de chamada cíclica e transmissão espontânea** — esta metodologia, mista das anteriores, consiste em estabelecer ritmos fixos, mas baixos, de interrogação cíclica dos equipamentos, em combinação com mecanismos de envio espontâneo por parte dos equipamentos baseados na variação de estado das variáveis.

A última modalidade é particularmente interessante, visto permitir operar normalmente com ritmos baixos, mas admitir a transmissão rápida de alarmes ou outras ocorrências de estado prioritárias, bem como de grandezas contínuas cuja variação exceda limites pré-definidos. A interrogação cíclica não só se justifica para actualizar variáveis que não tenham evolução significativa, como é mesmo essencial para detectar a saída de serviço, avaria ou perda de comunicação de equipamentos.

6.4.3 Sinais e suportes físicos de comunicação

O tipo de ligação física clássico de transmissão de informação digital consiste na utilização de sinais eléctricos em **cabos** com condutores metálicos isolados. Esta modalidade tem muitas variantes, quanto ao tipo de sinais e de cabos, mas apresenta algumas limitações sérias, especialmente na transmissão a longas distâncias: é relativamente susceptível a perturbações electromagnéticas, veicula facilmente sobretensões causadas por descargas atmosféricas, apresenta limitações no compromisso entre distância alcançada e débito máximo admissível. O seu custo de instalação cresce com a distância e as condições de implantação, podendo reduzir-se se a instalação for coordenada p.ex. com a montagem de condutas.

As rede telefónicas, na parte de interligação aos utilizadores, também são feitas em cabo metálico e podem ser utilizadas como meio de transmissão de dados, com custos de investimento menores. Geralmente, para além de serviços com linhas comutadas (partilhadas pelos utentes a cada momento), os operadores telefónicos também oferecem a possibilidade de contratação de ligações dedicadas.

Nas grandes distâncias os cabos de **fibra óptica** (de tipo *mono-modal*) proporcionam débitos bastante superiores aos cabos metálicos, sendo totalmente imunes às perturbações electromagnéticas nomeadamente aos efeitos das descargas atmosféricas. O seu custo (material e montagem) é idêntico ao dos cabos metálicos; só as interfaces dos equipamentos para fibra óptica poderão ser um pouco mais caras. Trata-se de um meio com grande largura de banda (bastantes Mbit/s) que permite veicular não só dados mas também informação de voz (telefone) e até de imagem (vídeo) que podem ser de grande utilidade na exploração dos sistemas⁸². Em conclusão, nas instalações novas é preferível a montagem de cabos de fibras ópticas para a comunicação a distância relativamente aos cabos tradicionais. A adopção de redundância de vias e/ou emalhamento na topologia da rede podem constituir vantagens muito significativas na disponibilidade deste recurso.

A infra-estrutura de condutas/colectores interliga as diferentes estações remotas nos sistemas de abastecimento/drenagem, podendo ficar acompanhada por uma rede de cabos que acedam a todos os pontos de interesse. Porém, os custos da implantação de

⁸² A transmissão de imagem pode permitir p.ex. a televigilância de postos remotos.

cablagens são consideráveis (especialmente se não for feita aquando da construção daquela infra-estrutura) e os mesmos ficam sujeitos a danos por acções externas (principalmente escavações que rompam cabos enterrados). Estes aspectos têm motivado o interesse por soluções de **transmissão sem fios**.

A comunicação digital por **rádio** pode concretizar-se em modalidades muito simples de transmissão ponto-a-ponto, com um dispositivo do tipo *modem* (modulador/demodulador) em cada extremidade. Existem também soluções sofisticadas (p.ex. do tipo *trunking*) constituídas por estruturas emalhadas de ligações ponto-a-ponto, com sistemas automáticos de encaminhamento do tráfego de comunicações que proporcionam elevada disponibilidade, mesmo face à perda de algumas ligações, tirando partido da redundância de vias; conseguem geralmente débitos de pico na ordem das centenas de kbit/s, chegando mesmo aos Mbit/s.

A comunicação por rádio está sujeita a restrições impostas pelas autoridades⁸³ que gerem a utilização do espectro electromagnético, quanto a frequências e a potências de emissão. Existem algumas faixas isentas de licenciamento, destinadas a usos industriais, científicos e médicos, mas muitas vezes revelam-se bastante limitadas quanto ao alcance. Por outro lado, as licenças para soluções de âmbito mais vasto (para cobrir dezenas de km) nem sempre se conseguem obter.

As redes de **comunicação celular** (GSM ou UMTS) podem ser uma alternativa viável de transmissão sem fios. Na transmissão por **GSM** (*Global System for Mobile communications*) podem atingir-se débitos sustentados até à centena de kbit/s com serviço **GPRS** (*General Packet Radio Service*) e até mais de três centenas de kbit/s na modalidade **EDGE** (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*). Nas versões de banda larga **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunications System*) são oferecidos ritmos até 2 Mbit/s. Porém, o suporte físico celular apresenta, por vezes, limitações de fiabilidade e nem sempre existe cobertura dos locais por parte dos fornecedores deste tipo de serviços.

Reflecta-se ainda no facto de os meios de comunicação poderem ser **dedicados** ou **partilhados**. As soluções dedicadas representam geralmente um custo maior para a entidade que os instala ou

⁸³ Em Portugal essa competência cabe à ANACOM – Autoridade Nacional de Comunicações.

contrata, mas normalmente apresentam maior fiabilidade. As soluções partilhadas (rede telefónica pública, redes celulares), podem apresentar um custo de instalação quase nulo, mas têm despesas de utilização significativas requerendo estratégias de moderação do tráfego de informação.

A tudo o que ficou exposto falta acrescentar as **soluções combinadas** visando, simultaneamente, aumentar a fiabilidade e racionalizar os custos de exploração. Tanto quanto possível convém dispor de um meio de comunicação principal, com capacidade para suportar todo o tráfego de informação previsível, para funcionar em permanência. A este meio principal convém acrescentar outro redundante para o caso de falha do primeiro; o segundo poderá ter uma capacidade inferior e ser utilizado para transmitir apenas informações prioritárias, ou resumidas, prescindindo eventualmente da transmissão em tempo real. Neste último caso os sistemas de aquisição e automatismo local devem efectuar arquivamento de dados que não possam ser transferidos de imediato, bem como realizar procedimentos estudados de funcionamento autónomo.

Como exemplos de combinação de meios de comunicação citam-se os seguintes, por ordem decrescente de fiabilidade:

- linhas privadas (se possível de fibra óptica) em conjugação com linhas telefónicas comutadas (PSTN – *Public Switch Telephone Network*) — vide ilustração na Figura 6.17;
- linhas privadas em conjugação com rede celular;
- ligações dedicadas contratadas da rede telefónica pública em conjugação com rede celular;
- rede telefónica comutada em conjugação com rede celular.

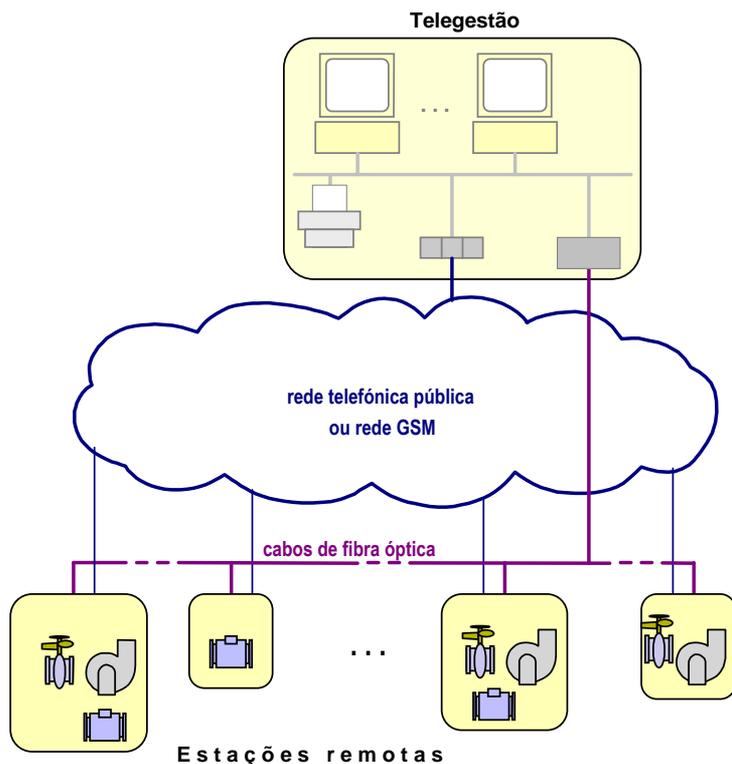


Figura 6.17 – Exemplo esquemático de dois suportes físicos de comunicação em redundância

Quer em sistemas de abastecimento de água quer de drenagem de águas residuais é importante planear atempadamente estratégias de transmissão de informação, prevendo alcançar todos os locais de medição, quando for mais oportuna a implantação da infra-estrutura de comunicações. Naturalmente, será conveniente prever a montagem de tubagens para encaminhamento de cabos de comunicação na fase de construção das condutas ou dos colectores. Nas opções técnicas deve ser encarado igualmente o problema do crescimento futuro dos sistemas.

6.4.4 Redes de campo e integração sistémica

Os sistemas de medição de caudal são apenas parte do conjunto mais vasto de equipamentos e sistemas que devem ficar interligados, constituindo uma estrutura de automação hierarquizada que

tem no topo o sistema central de telegestão, sendo as ligações funcionais feitas na forma de comunicação de dados.

A estrutura de comunicação em rede é vocacionada para este efeito, em que as funções de automação ficam hierarquizadas em dois níveis: controlo local e supervisão. Dentro de certos subsistemas mais complexos (como é o caso das estações de tratamento) existem arquitecturas de automação semelhantes. Esta articulação funcional de subsistemas, esquematizada na Figura 6.18, constitui a chamada **integração sistémica**.

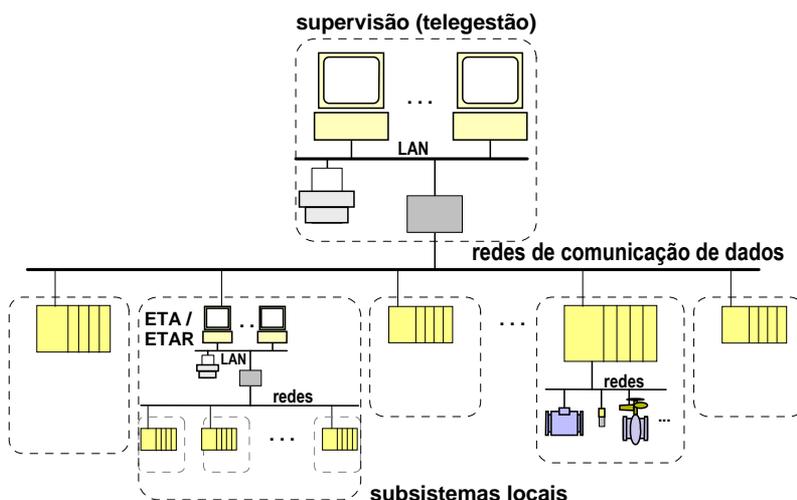


Figura 6.18 – Modelo da arquitectura de sistemas integrados aplicável ao caso dos sistemas de abastecimento de água ou de drenagem de águas residuais: os subsistemas podem ser constituídos por simples equipamentos ou por sistemas mais ou menos complexos

O estabelecimento de uma estrutura de transmissão de dados não se resume a escolher um ou mais meios de comunicação e regras de gestão do tráfego de informações. Necessita também de compatibilizar o conjunto de equipamentos que participam na troca de informações, geralmente provenientes de fabricantes diversos e com finalidade e complexidade de funcionamento muito distintas entre si.

A ISO (*International Organization for Standardization*) estabeleceu em 1978 um modelo de especificação dos sistemas de comunicação, designado por modelo de referência **OSI** (*Open Systems Interconnection*), para facilitar a criação de protocolos abertos que viabilizassem a comunicação entre equipamentos ou sistemas de proveniências diversas. Trata-se de um modelo relativamente com-

plexo, estruturado em sete camadas, tratando de aspectos que vão desde a ligação *física* (camada 1) e ligação *lógica* (camada 2) às funções de *aplicação* (camada 7). A sua utilização plena justifica-se para as comunicações através de grandes redes, como aquelas em que assenta o funcionamento da *Internet*.

Em sistemas de automação industrial utilizam-se redes de comunicação de dados chamadas genericamente **redes de campo**. Estas visam alcançar débitos altos em transferências de pequenas quantidades de dados, essencialmente com um único meio físico, e com protocolos e regras de acesso relativamente simples. Por razões de optimização de desempenho, as especificações das redes de campo geralmente só cobrem funções das camadas 1, 2 e 7 do modelo OSI [Jordan (1995), Mahlik (2003), Palma (2004), Thomesse (2005)].

A integração de estações remotas em sistemas de abastecimento ou em sistemas de drenagem pode ser efectivamente concretizada com recurso a redes de campo. A dificuldade surge quando se procura escolher uma solução concreta entre as muitas existentes, mas não compatíveis entre si.

Infelizmente não foi concretizada uma norma de redes de campo que estipulasse condições para a compatibilidade de comunicação entre equipamentos, ou seja, para a chamada **interoperabilidade**; não seria obviamente generalizada a tudo, mas poderia contribuir para esse propósito p.ex. em classes de aplicações. A tentativa feita nesse sentido pela Comissão Electrotécnica Internacional, com a normalização IEC 61158, falhou e aquilo que actualmente subsiste são numerosas soluções desenvolvidas e patenteadas pelos fabricantes de automação, conhecidas por *soluções com proprietário* (*proprietary solutions*). Citam-se algumas a título ilustrativo: Profibus, WorldFip, Foundation Fieldbus, ControlNet, Interbus-S, CAN, CANopen, SDS, HART, Seriplex, Genius I/O, Fipway, Sercos, P-Net, Swiftnet, As-i, LIN, M-bus, etc.

Os passos actuais no sentido da interoperabilidade de equipamentos a integrar em redes de campo resumem-se a:

- inclusão na norma IEC 61158 de especificações de oito redes existentes (Profibus, WorldFip, ControlNet, Foundation Fieldbus H1, Foundation Fieldbus HSE, P-Net, Interbus-S e Swiftnet);

- inclusão avulsa de algumas das redes em normas europeias, tais como EN50170 (inclui Profibus, WorldFip, P-Net, Foundation Fieldbus e ControlNet), EN50254 (inclui Interbus-S, Profibus-DP, FIPIO), EN50295 (inclui AS-i), EN50325 (cobre DeviceNet, SDS, CANopen);
- criação de alguns consórcios “abertos” à participação de empresas que pretendam fabricar equipamentos compatíveis com a rede de campo que representam.

As soluções baseadas nas redes locais (*Ethernet*, normas da série IEEE 802.3) têm vindo a assumir alguma importância também na comunicação de dados em aplicações de automação industrial, e podem constituir alternativas viáveis para comunicação com estações remotas, especialmente através de cabos de fibra óptica.

Não se antevendo uma evolução que estenda significativamente e a curto prazo o âmbito da interoperabilidade de equipamentos e sistemas, i.e. que permita criar sistemas verdadeiramente abertos⁸⁴, há que optar entre as múltiplas soluções disponíveis para redes de campo. A dificuldade aumenta quando já existam equipamentos e sistemas correspondentes a soluções dispersas (devidas p.ex. a falta de uma perspectiva de integração em fases anteriores, ou a grandes desfasamentos temporais na construção que acaba por fazer coexistir sistemas de várias gerações construtivas).

De um modo geral as estações remotas de um sistema de abastecimento de água ou de drenagem de águas residuais são equipadas com automatismos possuindo, pelo menos, um controlador local (geralmente um *autómato programável*) deixando, a esse nível, a integração das estações em rede de campo um pouco mais facilitada. Na União Europeia afigura-se recomendável optar por uma rede de campo que esteja a coberto de alguma norma da CENELEC, surgindo a EN 50170 como a mais vocacionada para este nível de aplicações. Mesmo nesse caso subsistem várias alternativas, impondo-se sempre uma escolha que pode ser baseada em minimização do custo.

No caso da caudalimetria, a interligação directa entre a telegestão e os sistemas de medição de caudal e/ou volume (i.e. por uma via separada das ligações aos controladores locais) também constitui

⁸⁴ Tais que permitam dispor de material compatível produzido por numerosos fabricantes.

uma solução com potencialidades interessantes, pelo facto de permitir interrogar directamente os sistemas de medição, parametrizá-los e obter informações de estado, tarefas que não sendo impossíveis com controladores locais interpostos, se complicam bastante nesse caso. Para esta hipótese as ligações por fibra óptica baseadas em rede Ethernet, p.ex. com recurso ao protocolo TCP/IP, são bastante promissoras.

6.5 Alimentação de energia

6.5.1 Requisitos essenciais

Cada sistema/instalação de medição de caudal deve possuir uma instalação de utilização de energia eléctrica, convenientemente concebida, dimensionada e protegida, que satisfaça:

- todos os requisitos regulamentares de segurança;
- requisitos especiais inerentes a esta aplicação, designadamente quanto a:
 - disponibilidade de energia eléctrica em regime não interruptível para os equipamentos prioritários;
 - sistema de terras com qualidade acrescida a fim de proporcionar ambientes de baixo ruído electromagnético para os sistemas de instrumentação, de automação e de comunicação;
 - soluções de implantação da infra-estrutura de energia eléctrica, relativamente aos sistemas atrás citados, que contribuam para atenuar efeitos perturbadores sobre eles.

Em geral, os sistemas caudalimétricos devem ser providos de **autonomia energética** por forma a assegurar a alimentação eléctrica em regime não interruptível aos elementos integrantes da cadeia de transdução, aquisição e comunicação de dados, bem como do controlador programável local, que se consideram equipamentos prioritários. Para o efeito podem ser adoptadas baterias de acumuladores, com carregadores automáticos, disponibilizando tensão contínua para utilização directa, ou então fontes estáticas de alimentação do tipo UPS (*uninterruptible power supply*), com saída alternada monofásica (ou, em casos especiais, trifásica) de 230 V (400 V, respectivamente), a 50 Hz.

No caso do recurso exclusivo a uma tensão contínua para os equipamentos prioritários, conseguida com um sistema de acumuladores com equipamento automático de carga, é recomendável a opção pelo nível de tensão contínua de 24 V. Esta modalidade permite um confinamento de zonas de equipotencialização de massa para melhor coordenação com protecções contra sobretensões (cf. secção 6.6.4).

A autonomia do sistema de alimentação não interruptível não deve ser inferior a 12 horas à carga nominal dos sistemas prioritários (que serão os únicos servidos pela fonte não interruptível), excepto quando a instalação já beneficia da existência de alguma fonte de socorro a montante, com maior autonomia; em qualquer caso nunca deve ser inferior a 30 min. Devem possuir saídas de comando binárias, com isolamento galvânico, para sinalização de estado, designadamente, avisos de funcionamento, de avaria, de falta de alimentação e de descarga da bateria, destinados a serem monitorizados pelo controlador programável local que as dará a conhecer ao sistema de telegestão em que se integra.

Estas unidades devem possuir sistema automático de carga e monitorização de estado dos acumuladores e ser autoprotégidas contra curto-circuitos e sobrecargas ao nível do sistema de controlo do ondulador. No caso das unidades UPS destinadas à alimentação a tensão alternada, devem originar um baixo factor de distorção harmónica total na tensão elaborada (recomenda-se inferior a 3%). Devem ainda, por si só, ou por acréscimo de filtros de linha adequados, satisfazer a norma europeia EN 50091-1 no que respeita à emissão de rádio-interferências conduzidas.

A qualidade dos **sistemas de terras** e das soluções de **equipotencialização**, para além da sua função regulamentar de protecção de pessoas contra contactos indirectos, é de grande importância para o bom desempenho dos sistemas de caudalimetria que envolvam transdução para sinais eléctricos.

Nos casos em que as instalações se integrem em estações mais complexas, possuindo posto(s) de transformação, tem vindo a ser recomendada a opção de **regime de neutro TN-S**, com um eléctrodo geral de terra (de resistência não superior a 1 ohm), ao qual são ligados o neutro de baixa tensão (terra de serviço) e os condutores de terra da instalação (terra de protecção e de sinal); essa ligação comum é feita num único ponto, no quadro geral de baixa tensão, a partir do qual divergem circuitos separados de neutro e de terra [Stokes (1994), Palma (1997)].

Nos casos mais simples, em que a alimentação chega por ramal de baixa tensão a partir da rede pública, deve ser previsto eléctrodo de terra reforçado (obrigatoriamente abaixo de 20 ohm, mas preferencialmente não excedendo 5 ohm), embora mantendo o regime TT (terras separadas).

6.5.2 Estruturação das instalações

A instalação de alimentação de energia deve ser organizada em circuitos separados e individualmente protegidos, nomeadamente (mas não exclusivamente) para:

- unidade(s) de alimentação não interruptível;
- força motriz, se necessária (p.ex. para bombas de drenagem);
- iluminação;
- tomadas (duas no mínimo, que podem ficar dentro de armário);
- alimentação de outros equipamentos fixos não prioritários;
- saídas de reserva não equipadas.

Deve ser providenciado espaço próprio e com condições de acessibilidade para a contagem de energia eléctrica.

Nas instalações mais simples o quadro eléctrico, as fontes de alimentação, os carregadores, os órgãos de protecção e manobra podem ficar alojados num mesmo armário em que também residam equipamentos de automação e aquisição e sistemas de condicionamento de sinal, desde que estes últimos fiquem em compartimento ou espaço separado dos primeiros. Os acumuladores eléctricos, por seu lado, devem ocupar um compartimento distinto ou ficar noutra armário; em qualquer dos casos esse espaço deve ser adequado para o efeito, nomeadamente quanto à necessidade de ventilação e ao risco de corrosão. O espaço onde estão alojadas as fontes de alimentação e unidades UPS devem ser dotado de meios de ventilação⁸⁵.

⁸⁵ Quando for possível, a convecção natural será vantajosa para fazer face às situações de falha na alimentação principal, em que o sistema de ventilação forçada terá de ser servido pela própria UPS.

6.6 Regras de concepção, execução e exploração

6.6.1 Princípios gerais

A definição de soluções para estes sistemas e a escolha de equipamentos e materiais deve nortear-se por alguns princípios estratégicos globais, a saber:

- **uniformidade** de equipamentos para a mesma função, procurando moderar a diversidade dos mesmos quanto a fabricantes e a modelos, no âmbito de uma mesma entidade operadora; este princípio deve ser ponderado face à conveniência de soluções abertas;
- **modularidade** na estruturação dos sistemas, conferindo maior versatilidade aos subsistemas e contribuindo para uma melhor gestão de recursos de exploração e de manutenção e para facilitar a reparação e reutilização de partes e a possibilidade de expansão futura;
- **interoperabilidade** dos equipamentos que seja possível e vantajoso integrar em redes de dados; trata-se de uma extensão do conceito de compatibilidade, abrangendo não só o nível físico mas também as especificações de protocolo;
- **sistemas abertos**, privilegiando, dentro do possível e em compromisso com o objectivo de uniformidade, soluções que permitam a substituição de equipamentos por outros equivalentes de fabricantes distintos; este princípio, naqueles equipamentos e materiais em que possa ser aplicado, confere vantagens na manutenção e expansão futura, conjugando-se bem com a concepção modular.

6.6.2 Concepção de instalações e selecção de equipamentos

A diversidade de equipamentos e sistemas que podem estar envolvidos em projectos de sistemas de medição de caudal é bastante considerável, muitos dos quais estão especificamente tratados neste Guia em secções próprias. Procurando sintetizar um elenco de aspectos essenciais a ter em conta na especificação de cada equipamento ou órgão, em fase de projecto, assinalam-se os seguintes:

- **exigências de serviço** (dimensionamento físico e funcional);

- **requisitos metrológicos** (nos equipamentos em que sejam aplicáveis, directa ou indirectamente);
- objectivos de **fiabilidade** e necessidades de **manutenção**;
- compromisso **técnico-económico**;
- **adequação ambiental**;
- conformidade com **normas** internacionais e nacionais e **certificação** dos fabricantes.

As soluções construtivas e de montagem devem ser concebidas salvaguardando:

- as disposições regulamentares;
- a segurança de pessoas, animais, bens e ambiente;
- a facilidade de manutenção e de expansão futura;
- as condições para teste e colocação em serviço.

6.6.3 Adequação ambiental

Os equipamentos, tal como os circuitos eléctricos de energia e de sinal, devem adequar-se aos **ambientes dos locais** que frequentemente apresentam riscos especiais, tais como:

- inundações;
- descargas atmosféricas;
- acções mecânicas intensas (p.ex. em locais acessíveis);
- acções térmicas (p.ex. por exposição solar);
- radiação ultravioleta (também decorrente da exposição solar directa);
- acção de roedores, especialmente sobre cablagens.

Deve ser prevista a salvaguarda de equipamentos e instalações em relação a **inundações** através de medidas passivas e activas. A adopção generalizada de graus de protecção contra a imersão prolongada dos equipamentos e sistemas de natureza eléctrica não se afigura viável. Por conseguinte, na fase de concepção devem ser previstos sistemas de drenagem adequados, colocando nos locais com maior risco de inundação apenas os órgãos indis-

pensáveis, nomeadamente os elementos primários de transdução, aplicando-lhes as maiores exigências quanto àquele grau de protecção, nomeadamente nos seus dispositivos para passagem e ligação de cablagens. Os restantes equipamentos e sistemas eléctricos e electrónicos (incluindo cablagens) devem ser colocados em locais com baixo risco de inundação.

De um modo geral os equipamentos montados em locais expostos devem ter invólucros com índice de protecção [segundo IEC 60529 (2001)] não inferior a IP 66; se estiverem sujeitos a imersão temporária o referido índice não poderá ser inferior a IP 67. Note-se que estes requisitos ultrapassam as especificações de catálogo dos equipamentos e abrangem o pormenor da estanquidade na zona da passagem de cabos. Este último aspecto é muito vulnerável e dependente de preceitos de montagem bastante rigorosos.

Em acréscimo a estas medidas passivas devem ser previstos sistemas de bombagem de operação automatizada, que sejam fiáveis e abrangidos por uma manutenção preventiva exigente.

Em instalações de caudalimetria que possam ficar particularmente expostas a **descargas atmosféricas** directas ou aos efeitos destas a distância, a protecção dos equipamentos contra sobretensões deve ser feita, não só no lado dos circuitos de energia, mas também nas interfaces dos circuitos de sinal. Nos casos de maior risco de incidência cerâmica devem escalonar-se, pelo menos, dois níveis de supressão. No caso dos circuitos de alimentação os dispositivos supressores de sobretensões devem ficar inseridos em quadros eléctricos; no caso dos circuitos de sinal expostos a essas perturbações, devem localizar-se junto das interfaces dos aparelhos, de ambos os lados dos cabos.

Os edifícios onde ficam instalados os sistemas aqui tratados devem ser eficazmente protegidos contra descargas atmosféricas directas. A solução envolve a escolha e instalação correcta de captores (pára-raios) adequados, bem como dos respectivos sistemas de condutores e eléctrodos de terra [DGE (1992)].

A protecção contra **acções mecânicas intensas** (p.ex. vandalismo) requer limitações de acessibilidade aos equipamentos e instalações, ou acondicionamento em armários com índice de protecção não inferior a IK 07 (segundo a EN 50102).

A protecção contra **acções térmicas** e contra os efeitos da **radiação ultravioleta** recomenda a instalação dos equipamentos e instalações em locais protegidos da radiação solar directa (ou com

resguardos com características reforçadas) e fora de ambientes com temperaturas elevadas.

A estanquidade dos armários e invólucros dos equipamentos (incluindo pontos de ligação de cablagens) é fundamental para impedir a penetração de insectos e outros pequenos animais, dado que este tipo de sistemas fica frequentemente instalado ao nível do solo, ou mesmo no subsolo. Pela mesma razão, a acção de roedores, nomeadamente sobre cablagens, deve ser acautelada nos encaminhamentos de cabos e, se possível, na adopção de blindagens metálicas nos mesmos.

6.6.4 Medidas para reforço da qualidade dos sinais

O reforço dos **sistemas de terras** e de **equipotencialização** são considerados contributos importantes para alcançar, e para manter ao longo do tempo, as melhores características metrológicas e o bom desempenho dos sistemas de automação, aquisição e de transmissão de dados.

Aos primeiros já foi feita alusão na secção 6.5.1. A equipotencialização de peças metálicas vizinhas dos equipamentos e cablagens deve ser feita nas condições regulamentares, que permitam assegurar a protecção de pessoas relativamente aos contactos indirectos com os condutores activos da instalação eléctrica de energia. Para além disso, o procedimento deve ser estendido às zonas vizinhas de circuitos de sinal por forma a contribuir para atenuar os efeitos de ruído electromagnético.

Merece especial referência a equipotencialização entre as condutas metálicas (ou peças metálicas das mesmas) adjacentes aos órgãos primários de transdução dos caudalímetros electromagnéticos e o corpo destes últimos, a executar em conformidade com as indicações dos fabricantes.

Nos circuitos de interligação de sinal dos equipamentos de instrumentação e dos órgãos de aquisição e automação devem ser previstas **barreiras de isolamento** capazes de suportar desníveis de tensão, pelo menos, de 2 kV, quer para os sinais analógicos, quer para os sinais binários, quer para os sinais de comunicação digital série. Esta exigência aplica-se necessariamente aos casos em que os equipamentos interligados estejam fisicamente afastados, mas é recomendável para todos os casos. A barreira de isolamento pode ficar assegurada nas especificações de interface dos

próprios equipamentos de medição ou de aquisição/automação ou então ser alcançada através de dispositivos adequados interpostos.

A utilização de uma tensão reduzida, normalmente de 24 Vdc, com baterias de acumuladores e respectivo carregador, permite estabelecer uma **terra de sinal** separada da terra de protecção da instalação. A terra de sinal já pode ser equipotencializada às massas metálicas de condutas e de transdutores primários e ao potencial de referência do terminal negativo da tensão de alimentação (- 24 Vdc). A Figura 6.19 ilustra este tipo de solução, a qual deve ser munida de isolamentos galvânicos nas interfaces de todas as ligações de entrada/saída do autómato, bem como de limitadores de sobretensões nas ligações ao exterior.

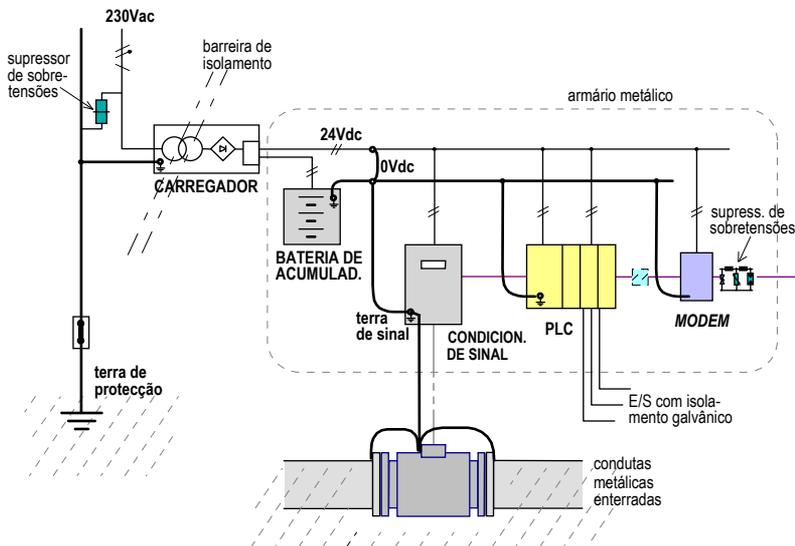


Figura 6.19 – Equipotencialização de massas metálicas por um circuito de terra de sinal confinado a uma parte da instalação servida a 24 Vdc

Em acréscimo às recomendações anteriores devem prever-se sempre **cabos blindados** de boa qualidade para veicular sinais analógicos, de comunicação e de comando.

É igualmente recomendada a segregação (passagem separada) entre cabos de sinal e cabos de energia, especialmente nos percursos em paralelo e quando estes últimos sirvam equipamentos fortemente perturbadores, como sejam os equipamentos de electrónica de potência e de força motriz. O mesmo se aplica quanto à

proximidade de cabos de alta tensão e de postos de transformação.

Deve procurar-se que os equipamentos de instrumentação, automação e comunicação, bem como os respectivos circuitos eléctricos de sinal, fiquem fisicamente afastados de todos aqueles equipamentos e sistemas de potência previsivelmente perturbadores. São particularmente susceptíveis às perturbações electromagnéticas os órgãos primários de transdução e os circuitos que os interligam aos respectivos condicionadores de sinal (quando não estão ambos incorporados numa mesma unidade física).

6.6.5 Exigências quanto a instaladores

Em sede de Caderno de Encargos, para além de aspectos técnicos de construção, devem ficar contempladas exigências genéricas de competência dos instaladores e exigências relativas a aspectos de exploração e manutenção, tais como:

- **certificação** da qualidade do instalador e requisitos de competência técnica do seu quadro de pessoal, com opções explícitas quanto à possibilidade de subempreitadas;
- propostas para **manutenção** logo na fase de concurso para construção, por razões de vantagem comercial;
- **planos de manutenção**, devidamente articulados entre aspectos globais e aspectos inerentes a cada equipamento ou subsistema;
- **planos de formação** de pessoal operador.

6.6.6 Testes finais

Deve ser exigido ao instalador, em sede de Caderno de Encargos, a elaboração e concretização de um **plano de testes finais** aos sistemas de energia, instrumentação e automação. O plano, sujeito à aprovação da entidade gestora, deve conter procedimentos, critérios de aceitação e prazos. Deve ficar definida a responsabilidade do instalador em mobilizar os recursos necessários para a realização desses testes finais, salvo nos aspectos que dependam da intervenção da entidade gestora. Os testes finais devem acontecer com os sistemas já instalados e prontos para

serviço, após uma fase preliminar de verificações e afinações a realizar pelo instalador. Na sequência da execução dos testes finais o instalador fará entrega de documento com os resultados evidenciando o cumprimento dos critérios.

Os planos de testes finais dos sistemas de natureza electrotécnica aqui tratados devem contemplar, designadamente (mas não exclusivamente):

- verificações de funcionamento dos órgãos do sistema eléctrico;
- medição de resistência de eléctrodos de terra e de resistências de isolamento;
- verificações de funcionamento das cadeias de transdução e aquisição;
- testes de automatismos:
 - verificações cobrindo as funcionalidades em situações normais;
 - transições entre modos de comando local/remoto (se essas situações estiverem previstas);
 - testes de perda de recursos como, por exemplo, falta de energia de regime normal, falta de energia de regime não interruptível, falha na interface medidor – equipamento de aquisição, falha nas comunicações, falha na alimentação dos medidores, falha na alimentação de dispositivos de isolamento e de reforço de sinal, interrupção de sinais; nestes casos os critérios a satisfazer devem abranger não só o comportamento durante essas situações, mas também após o retorno das mesmas para as condições normais;
 - verificação de outras situações anormais (p.ex. simulação de inundações, intrusão).

6.6.7 Acompanhamento da execução e dos testes finais

É de toda a conveniência que a entidade gestora faça regularmente o acompanhamento da execução por pessoal ao melhor nível de competência técnica. Este acompanhamento directo deve

ser encarado suplementarmente ao trabalho que eventualmente esteja atribuído a uma entidade fiscalizadora.

Recomendam-se cuidados acrescidos quando se tratar de transporte, acondicionamento e montagem de equipamentos de instrumentação (especialmente órgãos sensores e condicionadores). Entenda-se esta precaução não só relativamente a medidores de caudal mas também a outros medidores, quando existam, nomeadamente os medidores de pressão por serem relativamente delicados e exigentes quanto aos preceitos de montagem mecânica.

A entidade operadora deve assegurar o acompanhamento presencial dos testes finais, através de pessoal ao melhor nível de competência técnica, sem prejuízo da apreciação que vier a efectuar aos resultados documentais desses testes apresentados pelo instalador (vide secção 6.6.6).

6.6.8 Formação para a exploração e manutenção

Devem ser previstos planos de formação e de reciclagem de pessoal técnico vocacionada para a exploração e a manutenção dos equipamentos e instalações.

Cada acção de formação deve ser planeada explicitando claramente as competências a alcançar, os meios didácticos e os tempos a envolver, o nível dos formadores e a forma de avaliação dos resultados da formação. É essencial assegurar a adequação das acções aos requisitos (nomeadamente conhecimentos) prévios dos formandos.

É reconhecidamente valiosa a articulação entre funções de operação de telegestão e funções de actuação técnica em campo. A própria rotatividade entre ambas as tarefas tem sido apontada como um contributo para melhorar a eficácia global da exploração, como forma efectiva de generalizar, por um lado, o conhecimento das condições locais e, por outro, a percepção das capacidades e limitações da infra-estrutura de supervisão.

Deve ser promovida uma disciplina rigorosa quanto às prerrogativas de acesso e às responsabilidades de parametrização e programação de equipamentos, bem como as boas práticas no registo de intervenções e na documentação de alterações.

6.7 Simbologia

Quadro 6.3 – Simbologia utilizada no Capítulo 6

Símbolo	Grandeza	Unidade de medida SI
e	Força electromotriz (f.e.m.) induzida	V
E_c	F.e.m. induzida em modo comum	V
e_d	F.e.m. induzida em modo diferencial	V
H	Intensidade de campo magnético num ponto (vector)	A/m
U_a, U_b, U_p	Potenciais de condutores em relação à terra	V
U_{TB}, U_{TA}	Potenciais de eléctrodos de terra em relação à terra	V
U_x	Potencial de uma blindagem metálica em relação à terra	V
ψ	Fluxo ligado com um circuito	Wb
C_o	Capacidade entre um condutor de sinal e a terra	F
C_1, C_2	Capacidades entre um condutor perturbador e condutores de um cabo de sinal	F
C_x	Capacidades entre um condutor perturbador e a blindagem de um cabo de sinal	F

6.8 Bibliografia

Ackerman, W.; Block, W. – “Understanding Supervisory Systems”, *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 5, Issue 4, Out. 1992.

Balcels, J.; Daura, F.; Esparza, R.; Pallas, R. – *Interferências Electromagnéticas en Sistemas Electrónicos*. Barcelona, Marcombo, 1992.

Daneels, A.; Salter, W. – “What is Scada?”, *Proc. of International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*, Trieste, 1999.

DGE – *Guia Técnico de Pára-Raios*. Lisboa, Direcção-Geral de Energia, 1992.

Ecob, D.; Williamson, J.; Hughes, G.; Davis, J. – “PLC's and SCADA – A water industry experience”, *IEE Colloquium on Application of Advanced PLC (Programmable Logic Controller) Systems with Specific Experiences from Water Treatment*, Digest No. 1995/112, 1995.

EN 50091 – *Uninterruptible power systems (UPS) – Part 1-1: General and safety requirements for UPS used in operator access areas; Part 1-2: General and safety requirements for UPS used in restricted access locations*. Bruxelas, CENELEC – European Committee for Electrotechnical Standardization, 1996/1998.

EN 50102 – *Degrees of protection provided by enclosures for electrical equipment against external mechanical impacts (IK code)*, Bruxelas, CENELEC – European Committee for Electrotechnical Standardization, 1995/1998.

EN 50170 – *General purpose field communication system*. Bruxelas, CENELEC – European Committee for Electrotechnical Standardization, 1996/2002.

EN 50254 – *High efficiency communication subsystem for small data packages*. Bruxelas, CENELEC – European Committee for Electrotechnical Standardization, 1998.

EN 50295 – *Low-voltage switchgear and controlgear – Controller and device interface systems – Actuator Sensor interface (AS-i)*. Bruxelas, CENELEC – European Committee for Electrotechnical Standardization, 1999.

EN 50325 – *Industrial communications subsystem based on ISO 11898 (CAN) for controller-device interfaces*. Bruxelas, CENELEC – European Committee for Electrotechnical Standardization, 2001-2002.

IEC 60381-1 – *Analogue signals for process control systems – Part 1: Direct current signals*. Genève (Suiça), International Electrotechnical Commission, 1982.

IEC 60381-2 – *Analogue signals for process control systems – Part 2: Direct voltage signals*. Genève (Suiça), International Electrotechnical Commission, 1978.

IEC 60529 – *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*. Genève (Suiça), International Electrotechnical Commission, 2001.

IEC 61131-3 – *Programmable controllers. Part 3: Programming languages*. Genève (Suiça), International Electrotechnical Commission, 2003.

IEC 61158 – *Digital data communications for measurement and control - Fieldbus for use in industrial control systems*. Genève (Suíça), International Electrotechnical Commission, 2003.

IEEE 802.3 – *IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications*. New York, NY (EUA), Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002.

ISO 6817 – *Measurement of conductive liquid flow in closed conduits – Method using electromagnetic flowmeters*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1992.

Jordan, J. – *Serial Networked Field Instrumentation*. Wiley, 1995.

Lewis, J. – *Programming Industrial Control Systems Using IEC 1131-3*. Londres, IEE – Institution of Electrical Engineers, 1997.

Mahalik, N. (ed.) – *Fieldbus Technology: Industrial Network Standards for Real-Time Distributed Control*. Springer, 2003.

Mandado Pérez, H.; Marcos Acevedo, J.; Pérez Lopes, S.; Fernández Silva, C.; Armesto Quiroga, J. – *Automatas Programables, entorno y aplicaciones*. Thomson-Siemens, 2005.

Menéndez, A.; Biscarri, F.; Gomez, A. – “Estimation de Mesures de Débit et Detection d’Anomalies dans un Reseau d’Alimentation d’Eau”, *Proc. of the 2nd Mediterranean Conference on Electronics and Automatic Control*, Marrakesh 1998, pág.^s 270 – 272.

NP 4360 – *Contadores de água potável fria. Caudalímetros eletromagnéticos. Terminologia, definições, características tecnológicas e características metrológicas*. Monte de Caparica, Instituto Português da Qualidade, 1999.

Palma, J. – “Automação, Instrumentação e Aspectos Energéticos em Sistemas de Abastecimento de Água”, *Actas do Seminário sobre Qualidade de Sistemas de Abastecimento de Água*, Lisboa, LNEC, 1997, pág.^s 19.1 – 19.12.

Palma, J. – *Introdução às Redes de Campo de Automação*. Texto didático, Lisboa, ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2004.

Regulamento de Segurança de Instalações de Utilização de Energia Eléctrica, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 740/74, publicado no Diário da República n.º 299/74, Série I – 1.º Suplemento, de 1974-12-26, pág.^s 1622-(1) – 1622-(108).

[Este documento legal irá ser substituído pelas novas *Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão*, aprovadas pela Portaria n.º 949-A/2006, publicada no Diário da República n.º 175, Série I – 1.º Suplemento, de 2006-09-11, pág.^s 6682-(2) – 6682-(191)].

Stokes, G. – *A Practical Guide to the Wiring Regulations*. Blackwell Science, 1994.

Thomesse, J. – “Fieldbus Technology in Industrial Automation”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 93, N.º 6, 2005, pág.^s 1073 – 1101.

7 CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

7.1 Introdução

O sétimo capítulo possui como objectivo principal a introdução de conceitos e fundamentos de base de Metrologia, entendida, na actualidade, como um ramo da ciência que, de acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia [ISO-VIM (1994)], publicado pela ISO⁸⁶, corresponde à “Ciência da medição” e “compreende todos os aspectos, tanto teóricos como práticos, relativos à medição, quaisquer que sejam a sua incerteza e o domínio da ciência e da tecnologia a que se referem”.

Esta vertente de medição, incorporada na actividade desenvolvida no âmbito dos sistemas hidráulicos e da caudalimetria, constitui um elemento de estudo e de aplicação cuja relevância se torna evidente ao se observar o seu reflexo no resultado prático da mesma.

No sentido de procurar facilitar a compreensão dos aspectos que se encontram relacionados com a natureza dos sistemas de medição descritos no presente Guia Técnico e, simultaneamente, fornecer conhecimentos considerados úteis para a melhoria da exactidão associada às medições de caudal descreve-se, de seguida, o conteúdo das diferentes secções deste capítulo.

Na secção 7.2 introduzem-se alguns dos conceitos fundamentais da medição, como o de erro e de incerteza, são apontadas interpretações de alguns desses conceitos — como o de exactidão ou de intervalo de confiança — e são fornecidos elementos relativos à caracterização dos sistemas de medição nalgumas das suas vertentes preponderantes.

Na secção 7.3 é apresentado o Sistema Internacional de Unidades e algumas das suas principais definições, sendo este um elemento que, necessariamente, deve ser conhecido e integrado no processo de medição.

Na secção 7.4 são apresentadas a estrutura, as orientações e as definições incorporadas no *International Vocabulary of Basic and*

⁸⁶ International Organization for Standardization.

General Terms in Metrology [ISO-VIM (1994)], adoptado como documento de referência internacional.

Na secção 7.5 descrevem-se as diferentes perspectivas de avaliação que podem ser integradas num processo de caracterização metrológica de sistemas de medição.

Na secção 7.6 procura-se efectuar uma descrição ilustrada do significado e da importância da calibração dos sistemas de medição e do estabelecimento de relações de rastreabilidade. Esta secção encontra-se interligada com conceitos apresentados na secção 7.2, uma vez que traduzem a concretização prática de conceitos apresentados nessa secção.

Na secção 7.7 encontra-se a descrição e um procedimento de avaliação de incertezas de medição suportado no *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Guia para a Expressão de Incertezas de Medição)* [ISO-GUM (1995)] publicado pela ISO sobre esta matéria, o qual constitui o documento de referência internacional. Esta apresentação é complementada com a apresentação de exemplos em determinados aspectos do procedimento, procurando ilustrar a sua forma de aplicação.

A secção 7.8 contém um exemplo de aplicação prático envolvendo a medição de caudal utilizando um sistema de medição que incorpora um caudalímetro instalado numa conduta fechada. Neste, é descrito o resultado do levantamento de fontes de incerteza, a atribuição de funções de probabilidade e a quantificação das contribuições para a incerteza de medição e, finalmente, são determinadas as incertezas de medição padrão e expandida, conforme requisito para a expressão dos resultados da medição.

A secção 7.9 contém a simbologia utilizada neste capítulo e a secção 7.10 apresenta uma breve lista bibliográfica.

Refira-se, como nota adicional do interesse deste capítulo, o facto da integração deste tipo de análise aplicável aos resultados da medição constituir um dos requisitos da acreditação no âmbito de sistemas de qualidade.

7.2 A medição de grandezas físicas

7.2.1 A imperfeição da medição

A medição de grandezas físicas (também designadas por “grandezas mensuráveis”, isto é, “que se podem medir”) é uma tarefa cuja

realização prática é imperfeita. Esse facto deve-se a várias razões como, por exemplo:

- o modelo real não realizar de forma perfeita o modelo conceptual (por exemplo, o modelo conceptual de uma conduta possui uma circularidade perfeita, sem qualquer tipo de imperfeição que perturbe o escoamento, o que não se observa na sua realização);
- os instrumentos e sistemas de medição possuem limitações intrínsecas como a sua resolução finita;
- no decorrer de um processo de medição, efectuado num determinado período de tempo, ocorre a variação das condições ambientais (temperatura, humidade relativa, pressão atmosférica, etc.) ou de outras “grandezas de influência”, que podem afectar o resultado dessa medição.

Estes são alguns dos factores que conduzem a um dos princípios fundamentais da Teoria da Medição: o **“valor verdadeiro” de uma grandeza mensurável não se pode atingir através da medição.**

7.2.2 Sobre as noções de erro e de incerteza

A concepção clássica da medição foi desenvolvida numa base de sustentação cujo elemento fundamental é o “erro de medição” ao qual se associa a característica qualitativa designada por “exactidão”.

De acordo com a definição encontrada no ISO-VIM (2004), o “erro de medição” representa “a diferença entre o valor obtido pela medição e o valor verdadeiro da grandeza”. Como se depreende, esta definição, considerando o princípio enunciado na secção anterior (da impossibilidade de se obter esse valor verdadeiro da grandeza) conduz a uma situação inatingível.

Da mesma forma, o conceito de exactidão, por se definir a partir do conceito de “erro” (aproximação ou concordância entre o valor resultante da medição e o valor verdadeiro da mensuranda — grandeza a medir), contém idêntica dificuldade de concretização prática.

Na actualidade entende-se que a medição possui como objectivos a obtenção da melhor estimativa da grandeza a medir e a maximi-

zação do seu nível de confiança impondo, necessariamente, a minimização da sua incerteza.

A dificuldade associada a este objectivo pode ser ilustrada através de um exemplo prático:

Considerem-se dois sistemas de medição de caudal, A e B, a efectuar medições. Em determinado instante, o equipamento A indica um caudal de $15,1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e o equipamento B indica $17 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Admitindo que o “valor verdadeiro” do caudal é desconhecido, estamos perante dados cuja informação – resultado da medição – não é completa, uma vez que só por si, essa informação não permite concluir sobre qual dos dois resultados obtidos é o mais próximo do valor da grandeza.

A forma de ultrapassar esta dúvida resulta de se efectuar a calibração dos sistemas. Com efeito, realizando previamente esta operação, é possível determinar os respectivos “desvios de calibração” — as diferenças entre os valores indicados pelos sistemas A e B e o valor de referência.

A validade da calibração tem pressupostos: de utilização de padrões de melhor qualidade metrológica que os sistemas A e B a calibrar; e de realização das comparações em condições de referência. Nessas circunstâncias, pode-se garantir que a incerteza de medição associada aos padrões de referência é inferior aquela que resulta da calibração dos sistemas de medição.

Desta forma, a dificuldade associada ao desconhecimento do “valor verdadeiro” da grandeza é ultrapassada, pela medição da diferença relativamente aos valores de referência, obtendo-se o que se designa por **valor convencionalmente verdadeiro** da grandeza.

No exemplo em causa, a operação de calibração permite a correcção dos valores indicados pelos sistemas de medição A e B, aproximando-os dos valores convencionalmente verdadeiros pretendidos.

Assim, supondo que o sistema A tem um desvio de calibração de $+0,8 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no patamar de medição,

$$\tilde{Q}_{v,A} = (15,1 + 0,8) \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 15,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

e que o sistema B tem um desvio de calibração de $-1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no mesmo patamar de medição,

$$\tilde{Q}_{v,B} = (17 - 1) \text{ dm}^3\text{s}^{-1} = 16 \text{ dm}^3\text{s}^{-1}$$

A realização das correcções permite aproximar os resultados das estimativas mas não permite concluir, ainda, sobre qual dos dois resultados corresponde ao valor mais correcto.

De facto, por o “valor verdadeiro” da grandeza ser inatingível, é necessário introduzir um outro parâmetro que atribui a cada um dos resultados um intervalo de valores, no qual, com determinado grau de confiança, se encontra esse “valor verdadeiro” da grandeza. Esse parâmetro designa-se por: “incerteza de medição”.

Para se proceder a uma descrição deste parâmetro revela-se útil efectuar a análise deste problema no contexto da Estatística e da Teoria das Probabilidades utilizando o exemplo anterior.

Admitindo a realização de medições sucessivas usando esses sistemas de medição, as observações efectuadas possuem um comportamento de natureza aleatória — condicionado por fenómenos de natureza imprevisível — requerendo, por isso, a utilização de ferramentas estatísticas e probabilísticas para os interpretar.

Das medições — quando o instrumento de medição possui sensibilidade adequada — resultam valores distintos entre si. No caso do exemplo, supondo que um observador utiliza o equipamento B e repete a medição 12 vezes, isto é, constitui uma amostra de 12 elementos (x_1, x_2, \dots, x_{12}) e os representa numa forma gráfica, poderia obter a seguinte figura:

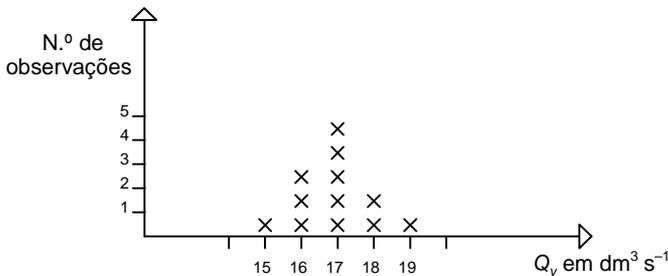


Figura 7.1 – Valores de caudal observados num ensaio experimental

Esta representação poder-se-ia reproduzir num histograma, onde cada classe é constituída por um valor discreto (Figura 7.2), mos-

trando uma “distribuição” característica de valores designada por distribuição de probabilidade⁸⁷ (Figura 7.3).

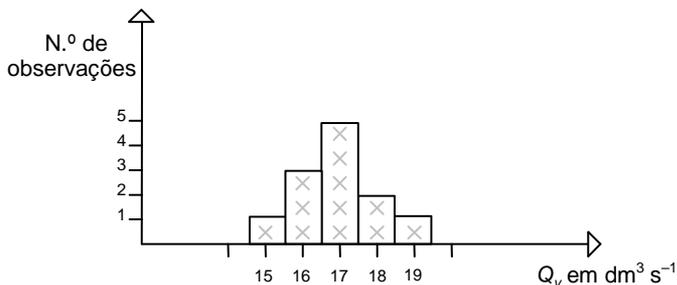


Figura 7.2 – Histograma representando um ensaio envolvendo a medição de caudal

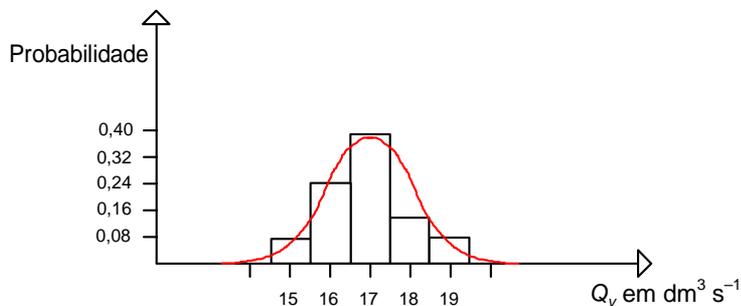


Figura 7.3 – Curva de probabilidade associada a um ensaio envolvendo a medição de caudal

Nesta figura, em particular, observa-se a sobreposição de uma curva que representa uma função densidade de probabilidade, denominada normal ou gaussiana, a qual, reflecte a “dispersão” dos valores obtidos determinada pela existência do erro na medição.

A informação que se obtém desta representação é importante. Ela permite, por exemplo, calcular a sua média, correspondente a $17 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$, o que constitui o valor mais provável (“melhor estimativa”)

⁸⁷ Nessa representação, a probabilidade de cada uma das “classes” é obtida pelo quociente entre o número de observações de cada valor e o número total de observações. Por exemplo, o número de observações do valor 17 é igual a 5 e o número total de observações é igual a 12, logo, a estimativa da probabilidade é igual a $5/12 \approx 0,4$. O mesmo procedimento pode ser adoptado para a obtenção dos restantes valores.

da grandeza mensurável; e verificar que uma parte significativa dos valores obtidos encontram-se compreendidos entre $15 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ e $19 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$, ou seja, entre $(17 \pm 2) \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$.

Esta noção de dispersão dos valores tem uma expressão estatística formal designada por desvio padrão experimental da amostra e a sua expressão (7.1) resulta, em regra, da determinação prévia da variância (7.2).

$$s(x) = \sqrt{\text{var}(x)} \quad (7.1)$$

$$\text{var}(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (7.2)$$

onde n representa a dimensão da amostra.

Considerando, ainda, a amostra de 12 valores, o valor médio calculado é:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{(1 \times 15 + 3 \times 16 + 5 \times 17 + 2 \times 18 + 1 \times 19)}{12} \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1} \approx \\ &\approx 16,916 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1} \approx 17 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

e o respectivo desvio-padrão experimental da amostra, $s(x)$, é obtido pela forma seguinte:

$$\begin{aligned} \text{var}(x) &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{12-1} [(15-17)^2 + \dots + (19-17)^2] \approx \\ &\approx 1,18 (\text{dm}^3 \text{ s}^{-1})^2 \\ s(x) &= \sqrt{1,18} \approx 1,09 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

A determinação do desvio padrão experimental da amostra é um primeiro passo para o entendimento do conceito de incerteza, uma vez que ele representa uma das suas parcelas (decorrente da manifestação do carácter aleatório exibido na amostragem de valores) que convencionalmente se designa por **repetibilidade**.

A **incerteza de medição** resulta das contribuições de diversas componentes aleatórias do erro — entre as quais a referida “repetibilidade” — definindo-se como o “parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores da grandeza que se podem atribuir à mensuranda, com base na informação utilizada”.

Destaca-se, desde logo, uma diferença entre o **valor médio** — **único** — correspondendo à melhor estimativa da grandeza a

medir e a **incerteza — intervalo de valores** no qual se admite que o “valor verdadeiro” da grandeza se pode encontrar (de acordo com determinado grau de confiança). Portanto, a distinção entre esta abordagem contemporânea e a abordagem clássica resulta de se admitir que o resultado da medição não corresponde a um valor, mas a um intervalo de valores (valor médio inserido num intervalo de valores — incerteza de medição — com probabilidade diferenciada).

Em consequência, a representação actual do resultado da medição é constituída por um valor médio, \bar{x}_i , correspondente à melhor estimativa da grandeza associado à incerteza de medição, $u(x_i)$ associada a essa melhor estimativa.

$$\tilde{Q} = (\bar{x}_i \pm u(\bar{x}_i)) \cdot [\text{unidade}] \quad (7.3)$$

no exemplo, a representação apropriada do resultado de medição obtido pelo sistema A seria a seguinte:

$$\tilde{Q}_{v,A} = (15,9 \pm 0,2) \cdot \text{dm}^3 \text{s}^{-1}$$

Admitindo que, relativamente ao sistema de medição B, o resultado de medição é dado por $\tilde{Q}_{v,B} = (16 \pm 0,5) \cdot \text{dm}^3 \text{s}^{-1}$, então, a comparação pretendida entre os dois resultados de medição — objectivo inicial — torna-se possível e permite concluir que a medição obtida pelo sistema A tem maior grau de exactidão que a obtida pelo sistema B — conforme se depreende da observação da figura seguinte:

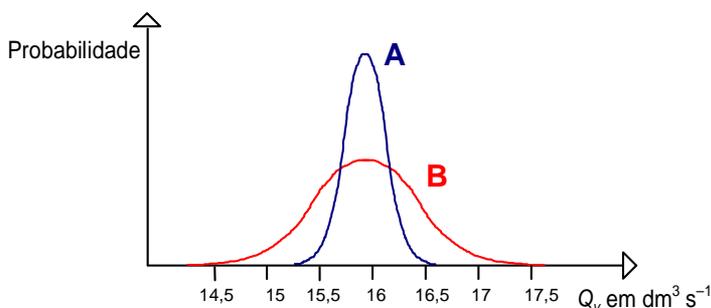


Figura 7.4 – Representação dos resultados de medição usando os sistemas A e B

Esta possibilidade de comparação é possível apenas se ambos os intervalos de confiança forem iguais, o que impõe implicitamente a regra do *nível de confiança associado à incerteza de medição cor-*

responder a um valor convencional de 95% (nalguns casos especiais — de instrumentação médica, por exemplo — utilizam-se níveis de confiança distintos de 99% e, até, de 99,99%).

Em Metrologia adopta-se, como regra, a apresentação do resultado de acordo com um **nível de confiança de 95%**.

O significado do nível de confiança encontra-se enraizado na Teoria das Probabilidades. Com efeito, sabendo que o resultado da medição obtido a partir de uma amostra de valores — suficientemente grande — tem uma distribuição de probabilidade normal, os seus intervalos de confiança resultam do produto do seu desvio padrão por um factor de expansão.

Assim, para um intervalo que esteja compreendido entre $\pm 1s$ (s designa o desvio-padrão experimental), corresponde um nível de confiança de cerca de 68% (isto é, da repetição da medição, em 100 vezes resultariam 68 valores compreendidos no intervalo considerado) e para um intervalo compreendido entre $\pm 2s$ obtém-se um nível de confiança de cerca de 95%⁸⁸. Neste segundo caso, a representação desse intervalo é a seguinte.

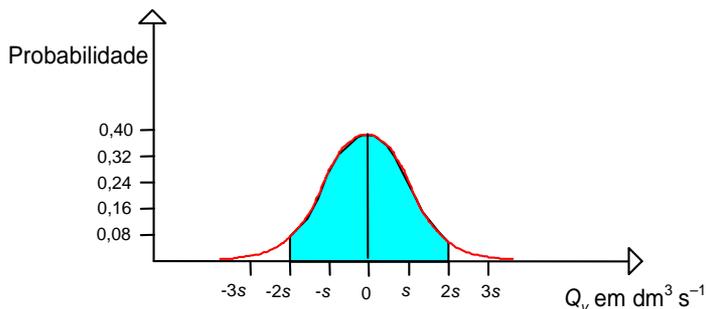


Figura 7.5 – Representação de um intervalo de confiança de 95%

Desta forma, os limites dados pela “incerteza de medição” representando um intervalo com 95%, determinam o indicador quantitativo do “grau de confiança” pretendido. A expressão recomendada para apresentação do **resultado da medição** contém, portanto, a indicação da “incerteza de medição” relativamente a um nível — intervalo — de confiança de 95%, $U(\bar{x}_i)$,

$$\tilde{Q} = (\bar{x}_i \pm U(\bar{x}_i)) \cdot [\text{unidade}] \quad (7.4)$$

⁸⁸ Na verdade, o valor exacto que corresponde ao intervalo de 95% é de $\pm 1,96s$ tomando-se o valor de 2 por razões de ordem prática.

ou, usando novamente o exemplo,

$$\tilde{Q}_{v,A} = (15,9 \pm 2 \times 0,2) \cdot \text{dm}^3 \text{s}^{-1} = (15,9 \pm 0,4) \cdot \text{dm}^3 \text{s}^{-1}.$$

Em resumo, esta concepção contemporânea da medição considera o “erro de medição” como um elemento conceptual, associado ao valor verdadeiro da grandeza — que é desconhecido e indeterminável. Este é constituído por factores (designados por *grandezas de entrada*) contendo componentes de natureza sistemática e componentes de natureza aleatória. As componentes de natureza sistemática devem originar correcções aos valores lidos e as componentes aleatórias devem ser contabilizadas na incerteza da medição.

Desta abordagem resulta a expressão do resultado da medição, constituída pela **média aritmética** das observações — a melhor estimativa do valor verdadeiro da grandeza — e pela **incerteza de medição expandida** (incerteza de medição para um intervalo de confiança de 95%).

7.2.3 Aspectos da caracterização dos sistemas de medição

Os sistemas de medição são constituídos por colecções de órgãos que se interpõem entre o observador e o objecto da medição, com capacidade de interagir com esse objecto e converter essa interacção em informação para o observador. Geralmente, a informação resultante é constituída por medições de uma grandeza.

Nesse grupo de órgãos encontra-se uma diversidade de soluções, desde os instrumentos que efectuem a medição directa das mensurandas até sistemas de medição cuja operação pode atingir um elevado grau de complexidade. No entanto, quer num caso quer noutro, estes podem ser descritos com base em aspectos de caracterização que são comuns.

Uma das suas características de base consiste na natureza dos sinais envolvidos. O **sinal** define-se como “a grandeza que representa a mensuranda e lhe está funcionalmente ligada” [IPQ-VIM (1996)].

Uma parte significativa dos sinais associados à medição possui, na actualidade, uma proveniência diversificada, encontrando-se associados a fenómenos mecânicos, eléctricos, vibracionais, acústicos e ópticos, entre outros.

A aquisição de sinais, visando o registo do comportamento da mensuranda requer, para tal, a existência de referenciais independentes. Habitualmente, as grandezas adoptadas são o tempo — “registo temporal” ou “registo no domínio do tempo” — e o espaço — “registo espacial” ou “registo no domínio espacial”. Dentro da utilização da grandeza tempo, encontra-se a representação *no* “domínio da frequência” — registo espectral — com aplicações importantes, nomeadamente, na análise de características de sistemas dinâmicos.

O sinal pode ser classificado como “contínuo” ou “discreto”, consoante o seu registo seja, no primeiro caso, “teoricamente, um número infinito de elementos de informação bruta” [Carvalho *et al.* (1991)] ou constituído por “um número finito de elementos espaçados de forma regular”.

A classificação dos sinais pode seguir uma via alternativa onde se utilizam os termos: “determinístico” e “aleatório”. Os sinais “determinísticos” (cujos valores são determináveis em condições específicas) possuem como subclassificação: “periódicos” (sinusoidais ou complexos), quando o seu comportamento se reproduz num determinado período de tempo; e no caso contrário, “não-periódicos” (quase-periódicos e transitórios).

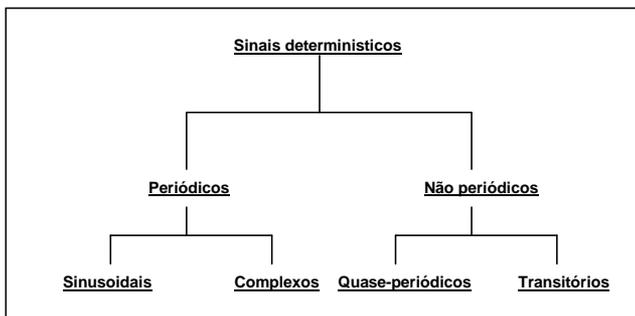


Figura 7.6 – Classificação de sinais determinísticos

Os sinais “aleatórios” (sujeitos a uma variabilidade estatística – probabilística) possuem a subclassificação de “estacionários” (ergódicos ou não ergódicos) quando a sua caracterização do ponto de vista estatístico é permanente, ao longo do tempo, e “não-estacionários”. Os sinais dizem-se “ergódicos” quando as suas propriedades estatísticas não dependem da amostra seleccionada e, no caso contrário, dizem-se “não-ergódicos”.

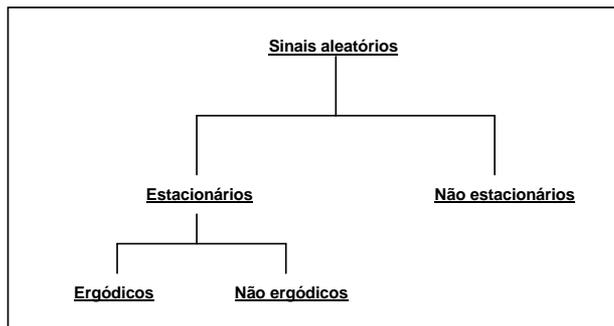


Figura 7.7 – Classificação de sinais aleatórios

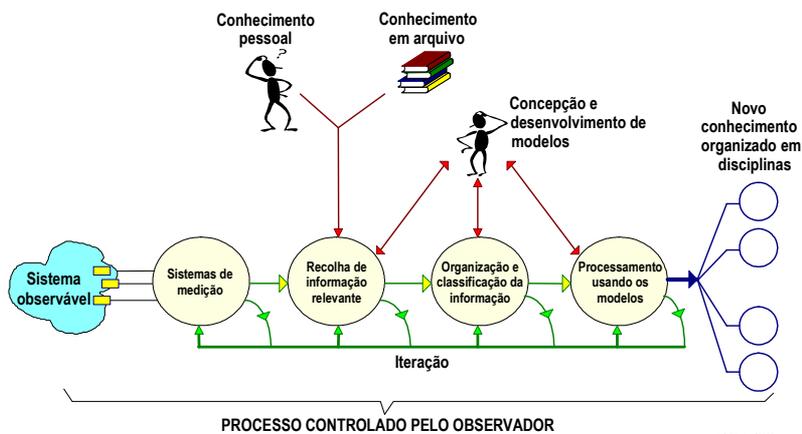


Figura 7.8 – Diagrama representativo de um sistema de medição (com controlo)

Uma outra perspectiva de caracterização dos sistemas de medição resulta da descrição dos estágios que compõem um sistema, constituindo dois grupos: os *estágios associados* ao fluxo de informação da mensuranda para o observador e os estágios suplementares de natureza funcional. No que se refere ao primeiro grupo, os estágios são expostos no Quadro 7.1.

Como nota adicional, refira-se que o ISO-VIM (1994) efectua uma distinção de terminologia entre o que classifica como instrumento de medição indicador (instrumento de medição que fornece um sinal de saída transportando informação acerca do valor da grandeza mensurável) e o dispositivo indicador (dispositivo que fornece a indicação de um sistema de medição na forma visual).

Quadro 7.1 – Estágios associados ao fluxo de informação

Estágio sensorial	Estágio onde se estabelece a interface entre os elementos sensoriais do sistema de medição e a mensuranda, sendo o seu elemento primordial o sensor * definido como “o elemento do sistema de medição que é directamente afectado pelo fenómeno, corpo ou substância que incorpora a grandeza mensurável” [ISO-VIM (2004)].
Estágio de condicionamento	Estágio que integra os elementos que efectuam a regeneração (recuperação do conteúdo de informação sujeita a degradação, mantendo a forma mas actuando na amplitude), a conversão (da forma de energia do sinal), e a formatação (modificação das suas propriedades para atenuar ruído ou preparar o sinal para a sua propagação) dos sinais. Alguns exemplos de elementos que o podem constituir são: os circuitos eléctricos, as placas de aquisição de dados, os <i>data loggers</i> , os conversores analógico-digital, os moduladores de sinal, os filtros activos e passivos, etc.
Estágio de registo e indicação	Estágio que incorpora os elementos dedicados, por um lado, ao registo e manutenção de dados (o mais comum é a memória permanente ou transitória associada a princípios da electrónica) e, por outro lado, a interface de apresentação de informação ao observador (incluindo, por exemplo, indicadores numéricos e gráficos, indicadores sonoros, tabelas, visores, monitores de computador, padrões de <i>pixels</i> , registadores e indicadores analógicos, etc.

* O uso do termo “detector” é igualmente aceite em contextos onde se pretende designar “o dispositivo ou substância que indica a presença de um fenómeno, corpo ou substância, quando um determinado valor limiar é ultrapassado ou uma grandeza associada é excedida (por exemplo: detector de fugas de halogéneo, papel de tomesol)” [ISO-VIM (2004)].

De forma complementar aos estágios apresentados, existem “estágios suplementares de natureza funcional” que devem igualmente ser considerados:

Quadro 7.2 – Estágios suplementares de natureza funcional

Transmissão	Estágio que engloba o conjunto de elementos que estabelecem as ligações entre os diferentes estágios, sendo responsáveis pela transferência de informação (por exemplo: cabos eléctricos, e os novos meios e recursos de propagação como a fibra óptica e a telemetria [*]).
Potência	Estágio integrante dos sistemas de medição possuindo uma importância particular por constituir a fonte de energia, em geral externa, que fornece ao sistema uma compensação energética pela energia dissipada na sua operação.
Segurança e protecção	Estágio que incorpora mecanismos para promover a robustez e fiabilidade dos sistemas de medição. Exemplos comuns são os mecanismos de falha-recuperação, sistemas redundantes, processos de reacção a fenómenos exógenos e perturbadores e outros factores de risco.
Manutenção	Estágio que pode envolver duas perspectivas distintas, a manutenção preventiva e a manutenção correctiva . A “manutenção preventiva”, procura minimizar os efeitos associados a factores de risco contribuindo para a concretização de outros elementos do processo (a segurança e protecção, por exemplo), aumentando a sua “fiabilidade” e possuindo um benefício importante de natureza económica (prolongamento da vida útil de componentes que integram os estágios do sistema de medição. A “manutenção correctiva” intervém em situações de falha onde é necessário proceder à substituição de elementos, com garantia de se obter um desempenho adequado.
Calibração	Estágio cujo papel é o de “credibilizar” os resultados da medição obtidos. Sendo adoptado o princípio de que não existe a medição ideal, e observando-se a existência do erro e da incerteza, só a avaliação e quantificação destes elementos permite adquirir um grau de “confiança” nos resultados, o que se obtém pela calibração e pela rastreabilidade das medições.

* Do grego “tele” – “longínquo ou remoto” e “metron” – “medir”, referindo-se a tecnologia com capacidade de transmissão e recolha de dados usando canais de comunicação de longa distância.

7.3 O Sistema Internacional de Unidades

7.3.1 Breve introdução histórica

O conceito de medição encontra as suas raízes na Antiguidade, associado a actividades específicas das primeiras sociedades organizadas, como a actividade agrícola, a arquitectura e o desen-

volvimento de engenhos, traduzida na existência de artefactos com a função de reprodução de medidas materializadas de grandezas constituindo padrões de unidades físicas (de peso, de comprimento, etc.) ou de contentores “padronizados” de medição (medidas de volumes).

Desta forma, constituíram-se sistemas primitivos de Metrologia originando, mais tarde (3000 AC) os primeiros sistemas de “Metrologia Legal” aplicados na regulação de transações comerciais. O desenvolvimento subsequente à queda dos impérios da Antiguidade provocou a disseminação dos padrões, atingindo números elevados (em França, no Séc. XVIII, existiam cerca de 700 designações de padrões distintos e cerca de 250 000 unidades).

Por proposta de Condorcet em 1775, foi criada em França, em 16 de Fevereiro de 1791 uma comissão com o objectivo de criar um *sistema de medição uniformizado*, cujos padrões de medição fossem invariáveis e suportados em fenómenos naturais e universais. A tarefa prática foi atribuída aos Geodestas P. Mechain e J. Delambre que, durante 7 anos, efectuaram o trabalho de triangulação entre Dunquerque e Barcelona, tendo resultado a definição, em 26 de Março de 1791, do metro como equivalente “à décima milionésima parte de um quarto de meridiano terrestre”.

O sistema métrico foi introduzido em 7 de Abril de 1795, pela Lei “Sur Poids et Mesures”. A unidade de massa foi definida a partir de um decímetro cúbico de água — matéria seleccionada de modo a facilitar a sua reprodução e disseminação universal — tendo-lhe sido atribuída a correspondência a um quilograma. Os primeiros padrões de comprimento e massa (realizados em 1799) foram depositados nos “Arquivos da República”, em Paris.

Em 1875, o BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), promoveu a Conferência Diplomática Internacional de 20 de Maio de 1875, em Versalhes, que originou o Tratado Internacional “Convenção do Metro” e do qual foram signatários 17 países⁸⁹.

⁸⁹ Actualmente, são 51 os países membros e 17 os países associados. Portugal é membro signatário fundador, tendo o tratado sido assinado por José da Silva Mendes Leal. Os 17 países signatários foram: Rússia, Alemanha, Áustria-Hungria, Bélgica, Brasil, Confederação Argentina, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos da América, França, Itália, Peru, Portugal, Suécia e Noruega, Suíça, Turquia e Venezuela.

O BIPM realizou e distribuiu cópias pelos países signatários, concretizado em 1889 e 1890, traduzido na realização de 42 protótipos do quilograma e 30 protótipos do metro — a Portugal foram atribuídos, por sorteio, os protótipos com o n.º 10.

Os desenvolvimentos posteriores de natureza científica e tecnológica permitiram que se atingisse a situação actual, onde o Sistema Internacional de Unidades é consagrado como um sistema coerente de base cobrindo a actual diversidade de domínios científicos. Por outro lado, a Metrologia como ramo da Ciência e suportada no SI, possui uma intervenção de carácter horizontal pela via da caracterização metrológica e da qualidade dos resultados obtidos, constituindo um elemento necessário à análise de qualquer sistema cujo objectivo é a medição.

7.3.2 Grandezas e unidades de base, suplementares e derivadas com interesse na medição de caudal

O Sistema Internacional de Unidades, SI, constitui um sistema métrico adoptado internacionalmente, visando a uniformização das grandezas e unidades de medida, devendo ser utilizada não só nas aplicações de índole científica mas, igualmente, no comércio internacional, constituindo uma linguagem universal.

A sua estrutura incorpora a definição de grandezas e de unidades, sendo conveniente relembrar algumas das suas definições e conceitos, que se apresentam no Quadro 7.3

Assim, as grandezas de base do SI, são as que constam no Quadro 7.4.

Existe outra categoria de grandezas, designadas “grandezas suplementares”, que não possuem as características de “grandezas de base” e nem se podem integrar no grupo de “grandezas derivadas”. As suas unidades, apresentadas no Quadro 7.5, interpretam-se como “unidades derivadas adimensionais”.

Quadro 7.3 – Algumas definições ISO-VIM (2004) de termos associados ao SI

Termo	Definição
Grandeza	Propriedade de um fenómeno, corpo ou substância, à qual pode ser atribuída uma magnitude (ou seja, pode ser quantificada).
Sistema de grandezas	Conjunto de grandezas associado a um conjunto de equações não-contraditórias que relacionam essas grandezas
Grandeza de base*	Grandeza, seleccionada por convenção, utilizada num sistema (de grandezas) para definir outras grandezas (derivadas)
Grandeza derivada	Grandeza, num sistema de grandezas, definida como uma função das grandezas de base
Unidade de medida	Grandeza escalar, definida e adoptada por convenção, com a qual outras grandezas do mesmo tipo podem ser comparadas visando exprimir as suas magnitudes.
Valor de uma grandeza	Magnitude de uma grandeza representada por um número e uma referência (símbolo). Por exemplo, a temperatura de um objecto é 25°C.
Sistema de unidades	Conjunto de unidades de base e unidades derivadas, bem como os seus múltiplos e submúltiplos, seleccionado por convenção, associado a um conjunto de regras para a sua utilização.

* Uma condição adicional consiste em que as grandezas de base seleccionadas sejam funcionalmente independentes umas das outras.

Quadro 7.4 – Grandezas e unidades de base do SI

Grandeza de base	Unidade de base	
<i>Designação</i>	<i>Designação</i>	<i>Símbolo</i>
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Intensidade de corrente eléctrica	ampere	A
Temperatura termodinâmica	kelvin	K
Quantidade de substância	mole	mol
Intensidade luminosa	candela	cd

Quadro 7.5 – Grandezas suplementares e respectivas unidades SI

Grandeza de base	Unidade de base	
Designação	Designação	Símbolo
Ângulo plano	radiano	rad
Ângulo sólido	esterradiano	sr

Este conjunto de grandezas e unidades de base do SI e grandezas suplementares permitem a definição das grandezas derivadas (grandezas definidas num sistema de grandezas, constituídas como uma função das grandezas de base do SI), aplicáveis aos vários domínios do conhecimento científico — espaço, tempo, mecânica, calor; electricidade e magnetismo; luz e radiações electromagnéticas afins, reacções nucleares e radiações ionizantes, química-física e molecular, e propriedades e estados da matéria. É dentro destes que se encontram algumas das grandezas derivadas de interesse no contexto da medição do caudal, sendo apresentadas no quadro que se segue:

Quadro 7.6 – Algumas grandezas derivadas e respectivas unidades SI

Grandeza de base		Unidade de base	
Designação	Símbolo	Designação	Símbolo
Espaço, Tempo e Mecânica			
Largura	b	metro	m
Altura	h	metro	m
Profundidade	h	metro	m
Espessura	d, δ	metro	m
Raio ou distância radial	r	metro	m
Diâmetro	d, D	metro	m
Área, superfície	A, S	metro quadrado	m ²
Volume	V	metro cúbico	m ³
Tempo	t	segundo	s
Período	T	segundo	s
Frequência	f, ν	hertz	Hz
Velocidade	$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	metro por segundo	m·s ⁻¹
Aceleração	\bar{a}	metro por segundo quadrado	m·s ⁻²
Aceleração da gravidade	\bar{g}	metro por segundo quadrado	m·s ⁻²

Massa volúmica	ρ	quilograma por metro cúbico	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Pressão	p	pascal	Pa (i.e., $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)
Caudal (em volume) ou caudal volumétrico	Q_v, q_v	metro cúbico por segundo	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Caudal (em massa) ou caudal mássico	Q_m, q_m	quilograma por segundo	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Tensão superficial	γ, σ	newton por metro	$\text{N}\cdot\text{m}$
Calor			
Temperatura Celsius	t, θ^*	grau Celsius	$^{\circ}\text{C}$
Intervalo de temperatura	ΔT $\Delta t, \Delta \theta$	kelvin grau Celsius	K $^{\circ}\text{C}$
Electricidade e Magnetismo			
Potencial eléctrico	V, φ	volt	V
Resistência (eléctrica)	R	ohm	Ω
Potência	P	watt	W
Campo magnético	\vec{H}	ampere por metro	$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$

* Deve ser utilizado o símbolo θ quando, na representação dentro do mesmo contexto, se verifique a presença da grandeza “tempo”, reservando-se o símbolo t para a referência à grandeza tempo.

Para além das grandezas e unidades referidas, existem outras cuja utilização é admitida (embora não integrem o núcleo organizado do SI), encontrando-se neste caso os seguintes grupos:

- i) Na grandeza tempo, a hora, h, o minuto, min, e o dia, d; na grandeza ângulo plano, o grau, $1^{\circ} = (\pi/180)$ rad, o minuto, $1' = (1/60)^{\circ} = (\pi/10\ 800)$ rad, e o segundo, $1'' = (1/60)' = (\pi/648000)$ rad; na grandeza volume, o litro, l ou L, equivalente a 10^{-3} m^3 ; e na grandeza massa, a tonelada, t, equivalente a 10^3 kg ;
- ii) Com a designação de “unidades fora do SI” mas aceites como úteis em domínios especializados, encontra-se o electrão-volt (eV) na grandeza energia, e a unidade de massa atómica (u) na grandeza massa;
- iii) No caso de unidades como a milha marítima, o nó (milha marítima por hora), o angström, o are, o hectare, o bar, o barn, o gal, o curie, o röntgen, o rad e o rem, é admitido o seu uso temporário devido ao seu enraizamento em domínios particulares importantes, prevendo-se, no entanto, a sua progressiva eliminação.

No Anexo 7.1, descrevem-se algumas recomendações e orientações normativas complementares, como a representação simbólica de grandezas e unidades (por exemplo, a simbologia e as designações utilizadas de múltiplos e submúltiplos), e algumas regras práticas de operação aritmética (arredondamento de números, regras de Algarismos Significativos e outras) que devem ser cumpridas nas aplicações práticas envolvendo o SI.

7.4 Estrutura do Vocabulário Internacional de Metrologia (ISO-VIM)

A necessidade de estabelecer uma uniformização de terminologia, de modo a facilitar a compreensão de conceitos usados na linguagem envolvida no contexto de uma determinada área científica — neste caso a Metrologia — resultou a elaboração de um Vocabulário Internacional de Metrologia editado pela ISO. Tal como aconteceu no contexto das grandezas e unidades de medição e sua simbologia, que conduziu à definição do SI, a harmonização deste tipo de elementos tem constituído um dos objectivos das Organizações Internacionais que orientam e regulam estes assuntos.

Este Vocabulário Internacional de Metrologia teve uma primeira edição em 1984, estabelecendo-se a sua revisão em intervalos de 10 anos. A segunda edição resultou da revisão de 1993, editada em 1994 pela ISO (com edição traduzida para português, do Instituto Português da Qualidade, de 1996) em vigor, encontrando-se em fase final a revisão de 2004-2005 promovida pela ISO.

Não sendo objectivo deste guia traduzir todos os conceitos que aí se encontram — embora se recomende a sua leitura — considera-se, no entanto, relevante expor sucintamente a estrutura do documento. Refira-se que, ao longo do texto deste capítulo, são apresentadas algumas definições de conceitos consideradas mais importantes, resultando, as mesmas, do conteúdo da revisão em curso.

O ISO-VIM (2004) tem sofrido modificações significativas na sua estrutura, traduzida numa evolução da organização do índice de matérias. A descrição que se segue refere a designação e o conteúdo respectivo dos capítulos, em traços gerais.

Cap. 1: *Grandezas e unidades*

Neste capítulo são introduzidos os conceitos associados à adopção do Sistema Internacional de Unidades, incluindo a

definição de conceitos fundamentais associados à estrutura do sistema, como o de grandeza, grandeza de base e derivada, grandeza adimensional, unidade e valor de uma grandeza, valor numérico e valor convencional de uma grandeza, entre outras.

Cap. 2: *Medição*

O capítulo dedicado à medição inclui conceitos relacionados com o processo de medição e as suas componentes. Por exemplo, a definição de medição, metrologia e mensuranda (grandeza a medir), princípio, método e procedimento de medição, escala de medição, incerteza de medição, incerteza padrão combinada e incerteza expandida, hierarquia de calibração e rastreabilidade metrológica, repetibilidade e reprodutibilidade.

Cap. 3: *Instrumentos de medição*

O capítulo dedicado aos instrumentos de medição contém conceitos relacionados com a classificação dos diferentes tipos de equipamentos integráveis em cadeias de medição, por exemplo, instrumento de medição, medida materializada, transdutor de medição, cadeia de medição, instrumento de medição indicador, dispositivo de indicação, sensor, e detector.

Cap. 4: *Características de sistemas de medição*

Este capítulo os elementos de caracterização metrológica de sistemas de medição como, por exemplo, intervalo de indicação, gama de medição, valor nominal, condições de estado estacionário, condições de referência, sensibilidade, resolução do sistema de medição, resolução de um dispositivo indicador, limiar de mobilidade, folga, estabilidade de um sistema de medição, variação devido a uma grandeza de influência, e incerteza instrumental.

Cap. 5: *Padrões de medição*

O último capítulo trata os conceitos relativos à classificação de padrões, aplicáveis na estrutura de cadeias de rastreabilidade como, por exemplo, padrão, padrão de medição nacional, padrão de medição secundário, padrão de medição de referência e padrão de trabalho, material de referência certificado, dados de referência e valor de referência de uma grandeza.

Adicionalmente, inclui um apêndice designado por “Conceitos Utilizados na Abordagem Clássica da Medição”. Neste, são incluídas as definições de conceitos como o de erro de medição e outros conceitos cuja definição se encontra associada ao conceito de “valor verdadeiro da grandeza”, como o de exactidão da medição, de erro aleatório e de erro sistemático de um sistema de medição.

Relativamente a esta revisão do vocabulário destaca-se a importância da integrar algum léxico exposto em documentação afim, nomeadamente, do ISO-GUM (1995) e da EN ISO/IEC 17025 (2005) (norma de referência aplicável na acreditação de laboratórios), bem como a orientação das definições para uma base comum — a incerteza de medição — ao contrário da perspectiva anterior (1996), apontando para uma partilha baseada, simultaneamente, nos conceitos de erro de medição e de incerteza de medição.

Pela sua importância actual no contexto da Metrologia insere-se, em seguida, a tradução da definição de “incerteza de medição” apresentada no ISO-VIM (2004).

Incerteza de medição: parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores da grandeza que se podem atribuir à mensuranda, com base na informação utilizada.

Notas adicionais:

- 1) A incerteza de medição caracteriza quantitativamente o conhecimento acerca da mensuranda, baseado na informação utilizada;
- 2) A incerteza de medição caracteriza a dispersão de um conjunto ou a distribuição de valores da grandeza relativos à mensuranda e obtidos mediante informação disponível. A dispersão resulta da **incerteza da definição** da mensuranda (tradução de “definitional uncertainty” — componente da incerteza de medição resultante da quantidade de discriminação intrinsecamente finita da definição da mensuranda) e dos efeitos sistemáticos e aleatórios da medição;
- 3) Se um valor individual da grandeza, como estimativa da mensuranda, se modifica, a incerteza de medição associada pode, igualmente, sofrer uma modificação;
- 4) O parâmetro pode ser, por exemplo, o desvio padrão designado por **incerteza de medição padrão** (ou um seu múltiplo), ou a

semi-amplitude de um intervalo, dispondo de um probabilidade expandida declarada;

- 5) A incerteza de medição incorpora, geralmente, muitas componentes; algumas dessas componentes podem ser determinadas a partir de uma **avaliação do tipo A da incerteza de medição** a partir da distribuição estatística dos valores da grandeza suportadas em séries de medições e podem ser caracterizadas pelos desvios padrão experimentais; as outras componentes, as quais podem ser determinadas a partir de uma **avaliação do tipo B da incerteza de medição**, também podem ser caracterizadas por desvios padrão, determinadas a partir de distribuições de probabilidade que se assume que as representam, baseadas na experiência ou noutra informação;
- 6) Entende-se que o valor de um **resultado de medição** representa a melhor estimativa do valor da mensuranda e que todas as componentes da incerteza de medição, incluindo as que resultam de efeitos sistemáticos, como as componentes associadas às correcções e a valores atribuídos a **padrões de medição**, contribuem para a dispersão;
- 7) Dependendo da utilização pretendida, a **incerteza de medição expandida** de um resultado de medição poderá ser dada com um **factor de expansão**, originando um **intervalo de expansão**, entendendo-se que contém o valor da mensuranda com elevado grau de probabilidade ou incorpora uma fracção alargada declarada dos valores da grandeza dispersos que são atribuídos à mensuranda.

7.5 A caracterização metrológica de sistemas de medição

7.5.1 Introdução

A instrumentação utilizada em medição, pelas suas limitações intrínsecas, possui um desempenho que é afectado por dois tipos de efeitos característicos: um de natureza sistemática e outro de natureza aleatória.

Partindo desta constatação, um dos aspectos essenciais da sua caracterização consiste em avaliar o seu desempenho perante condições específicas que determinam o seu comportamento traduzindo-se, conseqüentemente, na identificação de factores de influência. Essa avaliação designa-se por “caracterização metroló-

gica” e tem como elemento de suporte as “características (da qualidade) metrológica”.

As **características metrológicas** são “aquelas que possibilitam o julgamento da adequação de cada instrumento para efectuar medições dentro de determinada gama, com uma exactidão conhecida, obtendo um valor da mensuranda e a estimativa da sua inexactidão” [Rabinovich (2000)].

A caracterização metrológica tem em vista, portanto, a **quantificação da diferença entre o modelo ideal e a realidade**, esta última obtida pela via prática ou experimental. Essa observação pode ser efectuada quer no contexto do funcionamento dos sistemas de medição “em regime estático” (em muitos casos, a mensuranda não se encontra efectivamente numa situação estática mas controlada dentro de determinados limites, devendo designar-se essa situação, em rigor, como “estacionária”) ou funcionamento em “regime dinâmico”.

Havendo uma diversidade considerável de características metrológicas dos sistemas de medição, apresentam-se em seguida as mais comuns, aplicáveis em condições de medição estática / estacionária que permite uma caracterização mais controlada e rigorosa da instrumentação. Esta descrição não invalida que, em circunstâncias que o exijam, se efectue uma análise das características em regime dinâmico. Essa avaliação adicional, não detalhada neste documento, deve ser pormenorizada observando alguns aspectos comportamentais, tais como, o tempo de resposta a sinais de entrada característicos — degrau, rampa, etc. — e o recurso a ferramentas matemáticas como a transformada de Laplace.

A caracterização metrológica constitui, portanto, o elemento necessário à identificação e à subsequente quantificação dos factores que devem ser considerados, por um lado, na determinação de componentes sistemáticas de erro (a incluir na correcção dos resultados da medição) e, por outro lado, na contabilização das componentes aleatórias de erro, necessárias para a avaliação das incertezas de medição determinando, assim, o seu elevado grau de importância no contexto da medição — Metrologia.

7.5.2 Indicação, intervalo de indicação e amplitude

A “indicação (de um sistema de medição)” define-se como “o valor da grandeza fornecido na saída do sistema de medição”.

Essa indicação pode ser obtida, no caso de um indicador do tipo analógico, pela leitura numa escala graduada ou, no caso de um indicador do tipo digital, pela indicação numérica de um mostrador ou pela aquisição desse valor usando um dispositivo de saída digital (por exemplo, $Q = 10,2 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$).

Em geral, a indicação encontra-se limitada entre determinados valores extremos mensuráveis da grandeza (por razões de natureza mecânica, electrónica, do interesse da aplicação em causa ou outras), constituindo o que se designa por intervalo de indicação, sendo a sua definição: “o conjunto de valores de uma grandeza limitado pelos valores extremos que são possíveis de obter como indicações de um sistema de medição”.

O “intervalo de indicação nominal” define-se de forma semelhante, como “o conjunto de valores de uma grandeza, limitado pelos valores das indicações extremas — valores arredondados ou aproximados — que podem ser obtidos com um ajustamento particular de controlo do sistema de medição e utilizado para designar esse ajustamento”. A indicação do intervalo de indicação nominal refere os valores nominais extremos de uma escala (por exemplo, -12 V a $+12 \text{ V}$ ou, quando um dos limites é igual a 0, é designado apenas pelo limite distinto de zero, i. e., $+24 \text{ V}$).

Finalmente, designa-se por “amplitude (de um intervalo nominal) o valor absoluto da diferença entre os valores extremos da grandeza que determinam o intervalo de indicação nominal” (por exemplo, no caso anterior limitado pelos valores extremos -12 V e $+12 \text{ V}$ a amplitude corresponde a 24 V , igual a $+12 \text{ V} - (-12 \text{ V})$).

7.5.3 Resolução

Para se entender o conceito de resolução deve-se salientar que este se aplica quer ao sistema de medição quer ao dispositivo indicador, havendo duas definições consoante a sua aplicação.

Define-se por “resolução de um sistema de medição” a “menor variação no valor da grandeza mensurável com um instrumento de medição, que causa uma modificação perceptível na respectiva indicação”.

Define-se por “resolução de um dispositivo indicador” a “menor diferença entre indicações desse dispositivo que se pode distinguir significativamente”.

No caso de instrumentos de medição cuja indicação é do tipo digital a interpretação do conceito é clara, uma vez que se traduz num valor da mensuranda que é apresentado. Ao contrário, no caso da indicação do tipo analógico, é importante distinguir a resolução do valor correspondente à marcação da escala.

Com efeito, duas situações podem ser observadas: uma, em que a resolução é equivalente à marcação da escala; outra, em que a resolução resulta de uma discriminação — estimativa — do espaço entre marcações sucessivas da escala.

Por exemplo, a leitura da indicação de um termómetro com resolução nominal (entre marcações sucessivas) de 1°C , por estimativa, correspondente a $\frac{1}{2}$ desse valor. A resolução, neste caso, corresponde a $0,5^{\circ}\text{C}$ e a leitura deve ser dada como $24,5^{\circ}\text{C}$.

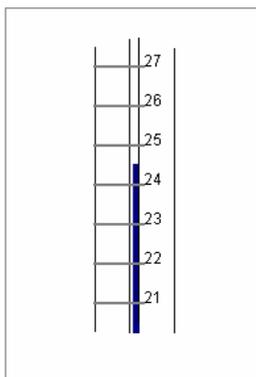


Figura 7.9 – Medição da temperatura com um termómetro de dilatação de líquido-em-vidro cuja resolução é superior à divisão de marcação

7.5.4 Condições de referência e condições óptimas

Definem-se as “condições de referência (de um sistema de medição)” como “as condições prescritas de utilização destinadas à avaliação do desempenho de um sistema de medição ou para a comparação de resultados de medição”.

De forma equivalente, definem-se as “condições óptimas (de um sistema de medição)” como “as condições de utilização desse sis-

tema de medição, com as quais, se consegue minimizar a sua contribuição para a incerteza de medição”.

7.5.5 Sensibilidade estática

A “sensibilidade (de um sistema de medição)”, S_i , é “o quociente entre a alteração da indicação de um sistema de medição (I_0) e a correspondente alteração do valor da grandeza mensurável (m_i)”.

$$S_i = \left(\frac{I_0}{m_i} \right)_{Q_i} \quad (7.5)$$

Na expressão anterior, Q_i corresponde a uma situação particular de funcionamento do sistema e S_i corresponde à sensibilidade estática nessa posição. Se o valor da sensibilidade estática permanece inalterável ao longo da gama de medição, o valor indicado é único e designa-se por S .

7.5.6 Limiar de mobilidade

A compreensão do conceito de “limiar de mobilidade” entende-se introduzindo previamente o conceito de “mobilidade”, o qual designa “a aptidão de um instrumento de medição para responder a pequenas variações do valor do estímulo”.

Neste contexto, o “limiar de mobilidade” corresponde “à maior alteração no valor da grandeza mensurável por um instrumento de medição que não produz uma alteração detectável na correspondente indicação”.

Para facilitar a sua compreensão, considere-se a seguinte experiência que ilustra este conceito: utilizando um instrumento de pesagem, com resolução igual a 1 g, coloca-se no seu receptor de carga determinada porção de matéria até se atingir uma indicação de 50 g (Figura 7.10). Após se atingir esse patamar, colocam-se sucessivamente pequenos pesos adicionais até se observar a mudança no valor da indicação. Sabendo que cada um dos pesos corresponde a 0,1 g (i. e., 100 mg ou 1/10 da resolução) e verificando-se que após a adição de 9 desses pesos (i.e., 0,9 mg) se observa a modificação da indicação para 51 g (Figura 7.11), estima-se que o limiar de mobilidade determinado pelo teste corresponde a 0,9 mg.

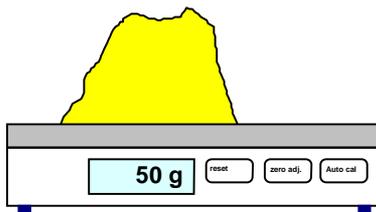


Figura 7.10 – Pesagem inicial

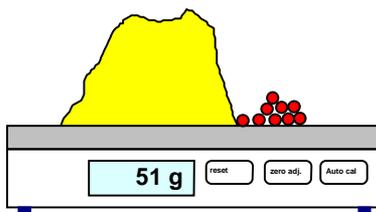


Figura 7.11 – Pesagem final

7.5.7 Estabilidade do sistema de medição

A “estabilidade de um sistema de medição”, ΔI_e , define-se como “a capacidade do sistema de medição de manter constantes ao longo do tempo as suas características metrológicas”.

Uma forma de efectuar a sua quantificação consiste em determinar a variação da indicação, I , que é detectada quando a mensuranda se encontra num regime estacionário.

$$\Delta I_e = I_{\max} - I_{\min} \quad (7.6)$$

7.5.8 Folga da indicação

A “folga de um instrumento de medição” entende-se como “o intervalo máximo através do qual o valor de uma grandeza mensurável por um sistema de medição se pode alterar, em ambas as direcções, sem que esse facto produza uma alteração detectável na indicação correspondente”.

7.5.9 Deriva

A “deriva” define-se como “uma modificação da indicação de um sistema de medição, geralmente de forma lenta e contínua no

tempo, não sendo relacionável com a alteração da mensuranda nem com a alteração das grandezas de influência”.

Esta componente manifesta o seu efeito mesmo em situações em que o equipamento não é utilizado num período correspondente ao definido como periodicidade de calibração. Um exemplo habitualmente referido consiste na deriva secular dos termómetros de líquido-em-vidro, fenómeno estudado por Joule, de cuja observação se concluiu a existência de uma deriva de longo período, associada á variação do volume do bolbo, podendo conduzir á variação da indicação do termómetro de 0,04°C no primeiro ano, seguindo-se uma depreciação da ordem de 0,01°C/ano.

Refira-se que, no contexto das grandezas eléctricas, muitos fabricantes indicam valores de deriva significativos, pelo que é habitual a apresentação de valores de exactidão indexados a períodos de tempo específicos, por exemplo, para 24 h, para 1 mês ou 6 meses após a realização da calibração.

7.5.10 Variação por efeito de uma grandeza de influência

A “variação por efeito de uma grandeza de influência” entende-se como “a diferença de indicações num sistema de medição, para o mesmo valor da grandeza mensurável quando uma grandeza de influência assume, sucessivamente, dois valores diferentes”.

Por exemplo, sabendo que o coeficiente linear de dilatação térmica, α , de uma barra de aço é da ordem de $1,15 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, então, o comprimento dessa barra com valor convencional de 1 m quando sujeita a uma variação de temperatura de 10°C sofre uma variação no comprimento dada por $(L \cdot \alpha \cdot \Delta T) = (1 \cdot 1,15 \cdot 10^{-5} \cdot 10) \text{ m} = 0,115 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,115 \text{ mm}$.

7.5.11 Repetibilidade

A “repetibilidade” define-se como uma “propriedade do sistema de medição de fornecer indicações similares aproximadas para medições replicadas da mesma grandeza mensurável nas mesmas condições de medição”.

Como a definição indica, ela pressupõe que são mantidas as “mesmas condições de medição” ditas “condições de repetibilidade”, as quais traduzem-se no controlo das grandezas de influência dentro de limites de variação especificados (por exemplo, a tempe-

ratura e a humidade relativa ambientais) e manter invariáveis outros factores cuja variação, potencialmente, possa perturbar os resultados das medições (por exemplo, a mudança de operador — se este interferir no processo de medição; a alteração de equipamento de medição; a alteração do local de ensaio; e a alteração da metodologia de ensaio ou calibração).

Este conceito tem uma natureza qualitativa, devendo a sua quantificação ser efectuada, dentro das condições de repetibilidade, pela replicação dos ensaios e obtenção de valores respectivos, com os quais, se determina o desvio padrão experimental que exprime quantitativamente esta característica metrológica.

7.5.12 Linearidade

Em muitos sistemas de medição considera-se que a relação que se estabelece entre a grandeza de entrada e a grandeza de saída é constante numa determinada gama de medição e, consequentemente, que possui um comportamento dito “linear”. A realidade mostra, porém, que o comportamento real difere dessa relação, observando-se desvios, cuja composição constitui o “desvio de linearidade”.

Esse parâmetro (desvio) traduz a diferença, em cada posição de medição, entre a situação ideal — valor expectável — e a situação real — valor da indicação.

Uma das formas mais comuns de expressão desta característica consiste em determinar esse desvio máximo e efectuar a sua indicação como um “desvio (relativo) de linearidade”. Por exemplo, dizer que um caudalímetro possui um desvio de linearidade de 0,1% significa que, para uma leitura de $10 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ o valor do desvio de linearidade corresponde a $0,1\% \cdot 10 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1} = 0,01 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$.

7.5.13 Reprodutibilidade

A realização de medições é efectuada, frequentemente, em situações consideravelmente distintas das definidas como “condições de repetibilidade”, por exemplo, porque podem ser efectuadas por operadores distintos, usando metodologias diferentes ou utilizando equipamentos diferentes. Quando tal acontece, é importante determinar a influência destas circunstâncias na medição.

Assim, em IPQ-VIM (1996) define-se “reprodutibilidade dos resultados (de uma medição)” como “a aproximação entre os resultados das medições da mesma mensuranda efectuada com a alteração das condições de medição” acrescentada das seguintes notas:

- uma informação válida da reprodutibilidade exige a especificação das condições alteradas;
- as condições alteradas podem incluir o princípio de medição; o método de medição; o observador; o instrumento de medição; o padrão de referência; o local; as condições de utilização; o tempo.
- a reprodutibilidade pode exprimir-se quantitativamente em termos das características da dispersão dos resultados;
- os resultados aqui são usualmente entendidos como resultados corrigidos.

7.6 Calibração e rastreabilidade

7.6.1 Introdução

Um dos pressupostos inerentes à medição consiste em admitir que a medição de grandezas físicas é, em regra, perturbada por diversos factores de influência, decorrente da existência de dificuldades em controlar a sua variabilidade. Esta natureza do problema constitui um forte argumento para compreender que a actividade de medição tenha associado um grau de incerteza.

Essa inexactidão suscita a necessidade de possuir referências que permitam, por um lado, corrigir os seus desvios e, por outro lado, dispor de parâmetros cuja informação permita a avaliação do grau de confiança da informação obtida — o resultado da medição. É por esta razão que se atribui à calibração dos instrumentos de medição importância neste contexto, uma vez que é mediante a sua concretização que são obtidas as ferramentas para responder às necessidades apontadas.

7.6.2 Os conceitos de *precisão* e de *exactidão*

Os conceitos de **precisão** e de **exactidão** geram, em regra, interpretações inapropriadas e utilização incorrecta na linguagem con-

siderando-se útil, por isso, promover o seu esclarecimento neste documento.

Possuindo ambos os conceitos uma natureza qualitativa, a sua quantificação por parâmetros ou métricas não é particularmente evidente. Assim, aponta-se um exemplo conceptual cuja apresentação é comum quando se trata deste assunto.

Considere-se um atirador que executa duas séries de disparos (“a” e “b”), com idêntica perícia contra uma determinada zona “branca” (Figura 7.12). Sobre as duas séries, pode-se referir que possuem uma dispersão equivalente (“precisão”) mas não se pode concluir sobre qual a que se encontra mais próxima de um alvo, visto este não se encontrar definido.

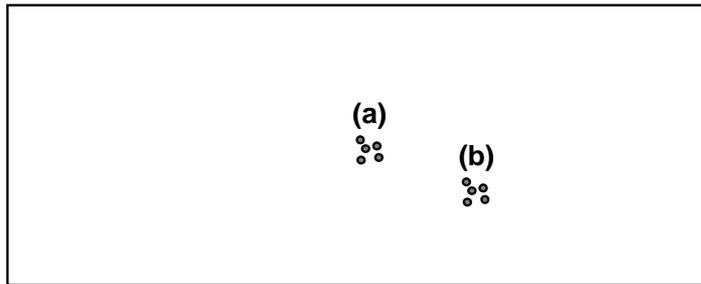


Figura 7.12 – Exemplo de precisão com exactidão desconhecida

A colocação desse alvo revela-se essencial uma vez que possibilita a determinação da série que se encontra melhor posicionada, i.e., que se encontra menos afastada do seu centro (Figura 7.13). Neste caso, a série (b).

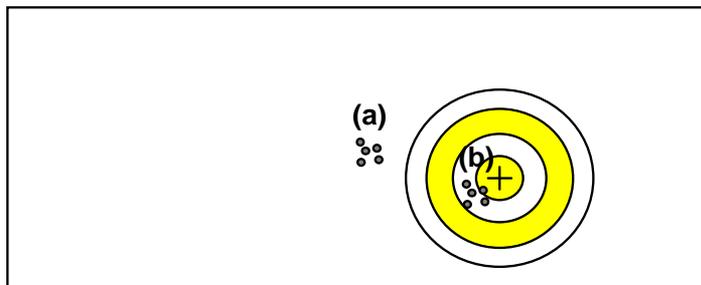


Figura 7.13 – Exemplo de precisão com exactidão conhecida

Considerando que o centro do alvo corresponde ao “valor verdadeiro da grandeza” e cada série corresponde a uma amostra de “valores medidos da grandeza”, poder-se-ia dizer que, no caso da série (b) a diferença entre o seu “valor médio” e o “valor verdadeiro

da grandeza” é menor do que o observado no caso (a) e, conseqüentemente, que a sua “exactidão” é maior.

Para distinguir os dois conceitos, refira-se que a **precisão** representa a **repetibilidade** da medição enquanto que a **exactidão** se define como a **aproximação entre o resultado da medição e o valor verdadeiro da mensuranda**. Conseqüentemente, no diagrama seguinte ilustram-se as quatro diferentes possibilidades de conjugação desses dois conceitos: (1) baixa exactidão e baixa precisão; (2) baixa exactidão e elevada precisão; (3) elevada exactidão e baixa precisão; e (4) elevada exactidão e elevada precisão.

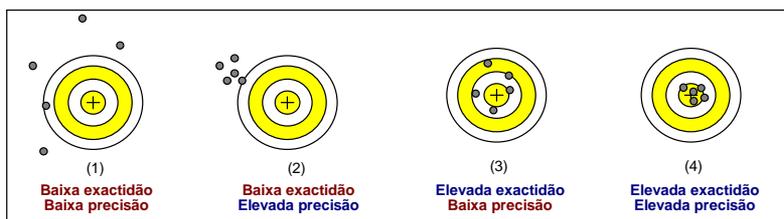


Figura 7.14 – Diagrama ilustrativo da diferenciação dos conceitos de precisão e de exactidão

7.6.3 A calibração e a rastreabilidade

A realização da medição, por si só, não constitui uma garantia de que o resultado obtido corresponda ao valor da grandeza mensurável, nem sequer, que esteja próximo ou afastado deste. Com efeito, uma medição ou um conjunto de medições isoladamente, sem qualquer outra referência (Figura 7.11), constitui um resultado com reduzido grau de informação.

Fazendo uma analogia com o exemplo anterior, considere-se a realização de um conjunto de medições cuja distribuição de valores se expressa numa curva normal (1). A calibração permite introduzir uma referência (alvo) dada pela curva (2), a qual permite a determinação da “aproximação dos resultados da medição” aos “valores convencionalmente verdadeiros” — de um padrão de referência.

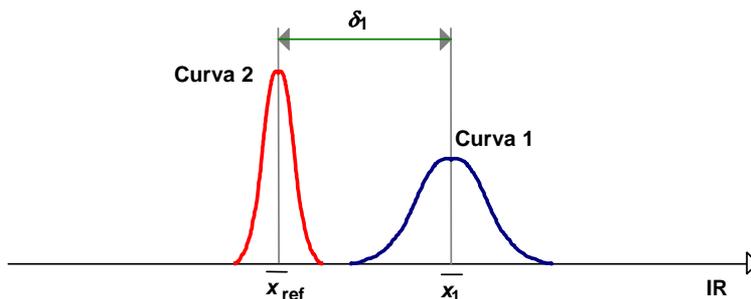


Figura 7.15 – Representação do erro sistemático determinado numa calibração

Essa operação determina o “desvio sistemático de calibração” (também designado por **componente sistemática do erro de medição**), δ_1 , que deverá conduzir à correção posterior dos valores lidos. Simultaneamente, observam-se afastamentos distintos entre pontos das duas curvas associáveis à dispersão de valores de cada uma delas havendo, portanto, uma “**componente aleatória do erro de medição**” que importa quantificar. Essa componente contribui, em particular, para a incerteza de medição.

Por definição, a **calibração** é “o conjunto de operações que estabelecem, em condições especificadas, a relação entre valores de grandezas indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência e os correspondentes valores realizados por padrões”.

A calibração pressupõe a existência de padrões através dos quais se definem os valores de referência. Essa relação entre o equipamento que efectua a medição e os padrões que fornecem a “referência” designa-se, habitualmente, por **rastreabilidade**.

Existindo **diferentes tipos de padrões** apresentam-se, em seguida, as respectivas definições:

- **padrão (de medição) primário** – padrão de medição cujo valor da grandeza e incerteza de medição são estabelecidas sem relação a outro padrão de medição, para uma grandeza do mesmo tipo (constitui o primeiro padrão de medição numa hierarquia de calibração);
- **padrão (de medição) secundário** – padrão de medição cujo valor da grandeza e incerteza de medição são atribuídas mediante a calibração por comparação com um padrão de medição primário, para uma grandeza do

- mesmo tipo (a sua relação com o padrão primário pode ser directa ou intermediada por um sistema de medição);
- **padrão (de medição) de referência** – padrão de medição utilizado para a calibração de padrões de trabalho, numa determinada organização ou num determinado local;
 - **padrão (de medição) de trabalho** – padrão de medição utilizado rotineiramente na calibração ou verificação de sistemas de medição, medidas materializadas ou materiais de referência;
 - **padrão (de medição) intrínseco** – padrão de medição baseado numa propriedade, fenómeno ou substância suficientemente estável e reprodutível (estabelecido por consenso não se relacionando com outro padrão de medição do mesmo tipo).

Efectuando sucessivas comparações entre instrumentos e sistemas de medição e padrões de “qualidade superior”, consegue-se “transferir” a exactidão desde o padrão fundamental que realiza uma grandeza até à medição que se pretende efectuar. A figura seguinte ilustra essa relação numa sequência que se inicia no BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), entidade que determina a forma de realização fundamental das grandezas, e inicia o processo de transferência da exactidão até à medição e aos resultados que dela resultam.



Figura 7.16 – Representação típica da sequência numa cadeia de rastreabilidade

Esta sequência de operações permite ao instrumento ou sistema de medição adquirir “rastreadibilidade metrológica” a um padrão fundamental da grandeza mensurável e, simultaneamente, que este se integre numa “cadeia de rastreadibilidade” extensível à medição e aos resultados que dela advêm.

Estes dois importantes conceitos encontram-se definidos no ISO-VIM (2004):

- **rastreadibilidade metrológica** – propriedade de um resultado de medição de se relacionar com uma referência metrológica declarada, através de uma cadeia ininterrupta de calibrações de um sistema de medição ou de comparações, cada qual contribuindo para a incerteza de medição declarada.
- **cadeia de rastreadibilidade** – cadeia de sistemas de medição alternados com procedimentos de medição e padrões de medição associados, de um resultado de medição a uma referência metrológica declarada.

A inclusão dos equipamentos numa cadeia de rastreadibilidade traduz-se, portanto, na possibilidade de se estabelecer, com um determinado grau de exactidão, o estado actual do sistema de medição e, conhecendo o seu historial, efectuar a “previsão” do seu estado futuro .

No que se refere ao conceito de cadeia de rastreadibilidade, a sua definição corresponde à sequência de calibrações de sistemas de medição entre uma referência metrológica declarada e o sistema de medição final. Nessa cadeia, encontra-se necessariamente associada uma “hierarquia de calibração”, onde os padrões utilizados em cada nível possui melhores características metrológicas que os instrumentos ou sistemas de medição que são sujeitos à calibração.

7.6.4 O conteúdo do certificado de calibração

O conteúdo do certificado de calibração adquire importância ao constituir o elemento que contém a informação relativa aos diferentes aspectos anteriormente referidos, nomeadamente, desvios de calibração, rastreadibilidade, identificação de padrões e do método de calibração e incertezas de medição.

Assim, tendo como base a descrição contida na norma EN ISO/IEC 17025 (2005), os aspectos mais relevantes de informação que se devem encontrar no certificado de calibração são:

- a identificação da entidade calibradora e da entidade proprietária do equipamento a calibrar;
- os padrões de referência utilizados;
- a rastreabilidade dos padrões de referência;
- a identificação do equipamento a calibrar;
- as condições de realização do ensaio de calibração, com especial destaque para aquelas que influenciam os resultados da medição (condições ambientais, local de realização do ensaio, etc.);
- as observações relevantes relativamente à realização da calibração (aspectos de montagem, de inspecção prévia, preparação e outras especificações relevantes para a realização do ensaio de calibração);
- a data de recepção e de emissão do certificado de calibração;
- o método de calibração e a norma ou procedimento que o suporta;
- a data de calibração (de modo a que se possa definir a periodicidade de recalibração);
- o responsável pela calibração;
- os resultados da calibração incluindo os valores de referência e os valores lidos (podendo incluir os desvios de calibração obtidos);
- a declaração de conformidade quando constituir especificação do procedimento de calibração suportado em normas de referência;
- a incerteza de medição expandida (95%) e a forma como foi determinada (usando um factor de expansão $k = 2,00$ ou utilizando a função de probabilidade t-Student. No segundo caso, deverá indicar o número de graus de liberdade efectivos e o respectivo factor de expansão utilizado).

7.6.5 A aplicação dos resultados da calibração

A informação contida em certificados de calibração possui elementos de particular importância, entre os quais, os resultados que determinam os desvios de calibração a incorporar em subsequentes processos de correcção de observações de medição (valores lidos). Nos certificados, a forma mais usual de expressão refere os valores de referência, I_{ref} , e os valores medidos (com o equipamento a calibrar), I_{med} , determinando-se o desvio de calibração, δ , usando a expressão seguinte:

$$\delta = I_{med} - I_{ref} \quad (7.7)$$

Existem diversas estratégias de correcção de valores lidos, sendo a mais comum a relacionada com a adopção da aplicação de uma regressão linear, da qual, resulta um desvio de correcção, δ_{regr} .

Nesse caso, a forma habitual de promover a correcção consiste em determinar uma curva de correcção com base nos desvios observados num conjunto de pontos de calibração (Figura 7.17) extraíndo-se daí a expressão de correcção de valores lidos (a e b representam os coeficientes da regressão linear),

$$I_{corr} = I_{med} - \delta_{regr} = I_{med} - (a \cdot I_{med} + b) \quad (7.8)$$

A calibração de instrumentos e sistemas de medição permite, ainda, efectuar o que se designa por “confirmação metrológica”, traduzível num processo em que se promove a aceitação da instrumentação calibrada como apta à realização das medições pretendidas. Para tal, é necessário possuir um critério de aceitação que compare, por exemplo, a “incerteza máxima admissível” com a “incerteza da instrumentação após calibração”.

A “incerteza máxima admissível” (IMA) é determinada em função dos requisitos ou especificações dos ensaios ou medições que se pretende efectuar.

A “incerteza da instrumentação após calibração” (IC) pode ser estimada como o resultado da combinação (soma quadrática) da componente de incerteza de medição, $u(y)$, com uma componente resultante dos **erros residuais após correcção**, $u(\delta_{corr})$ ⁹⁰:

$$IC = \sqrt{u^2(y) + u^2(\delta_{corr})} \quad (7.9)$$

⁹⁰ Estes erros residuais indicam a componente dos desvios sistemáticos que, em cada patamar de ensaio, não é corrigida.

onde $u(\delta_{\text{corr}})$ pode ser obtida — como aproximação — a partir da variância de uma distribuição rectangular centrada com limites dados pelo desvio residual máximo, $\pm (\delta_{\text{corr,max}})$, sendo essa expressão igual a $(\delta_{\text{corr,max}})/\sqrt{3}$; ou pelo desvio padrão experimental dos desvios residuais (estimativa aproximada da sua dispersão estatística).

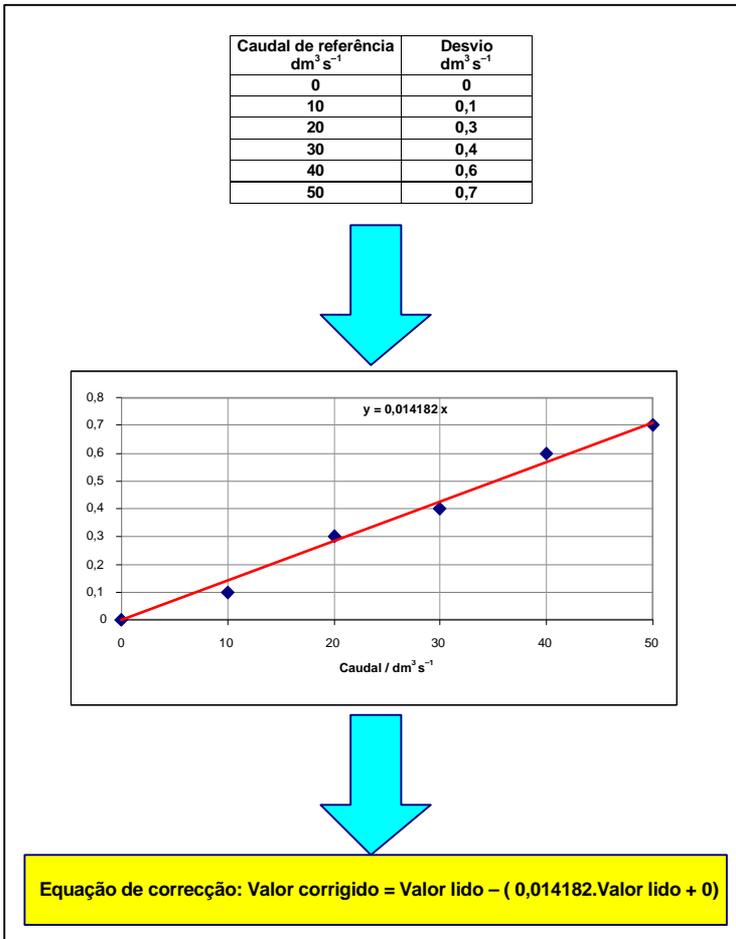


Figura 7.17 – Determinação de uma equação linear de correcção

7.7 Avaliação de incertezas de medição

7.7.1 Metodologia

Desde a introdução do ISO-GUM (1993), que se considera que a expressão do resultado da medição só é completo se contiver o valor atribuído à mensuranda e a respectiva incerteza de medição.

Este documento apresenta uma metodologia destinada à determinação das incertezas de medição, seguindo um conjunto de etapas que se apresenta a seguir, de acordo com a sua formulação e de forma resumida.

A 1.^a etapa ou ponto de partida é a **identificação das variáveis aleatórias** e a **relação funcional** associada ao processo de medição:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (7.10)$$

Por exemplo, o caudal mássico é determinado pela expressão seguinte,

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} = f(\Delta m, \Delta t) \quad (7.11)$$

onde a grandeza mensurável — de saída — caudal mássico, Q_m , é uma função das grandezas de entrada: variação de massa do líquido em escoamento, Δm , e intervalo de tempo durante o qual aquela ocorreu, Δt .

É importante salientar que a expressão anterior é uma versão simplificada que permite a determinação da estimativa da mensuranda, Q_m . Para efectuar a identificação de todas as fontes de incerteza é necessário determinar as diferentes componentes que contribuem para a medição de Δm e de Δt associadas a 3 vertentes: a instrumentação, a metodologia, e a componente humana — o operador. A incorporação dessas componentes conduziria a uma função relacional mais detalhada, do tipo:

$$Q_m = \frac{(\Delta m + \sum \delta m_{inst} + \sum \delta m_{metod} + \sum \delta m_{human})}{(\Delta t + \sum \delta t_{inst} + \sum \delta t_{metod} + \sum \delta t_{human})} \quad (7.12)$$

Admite-se que os desvios apresentados possuem valor médio nulo, permitindo que a estimativa se possa fazer de acordo com a Equação (7.11), no entanto, a sua variância deverá ser não nula em diversos casos (incertezas associadas à resolução da instrumentação, à sua repetibilidade, à montagem experimental, à lei-

tura de um indicador analógico por um operador, etc.), sendo contabilizada na avaliação da incerteza de medição. Este aspecto será desenvolvido na secção seguinte onde se encontra um exemplo prático.

A realização da experimentação permite aceder a valores que constituem estimativas das variáveis aleatórias. Por exemplo, relativamente à variável aleatória X_1 são obtidos os seguintes n valores: $\{x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n}\}$ e para a variável aleatória X_i são obtidos os seguintes n valores: $\{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}\}$. Com estes valores, é possível determinar estimativas das variáveis aleatórias sujeitas a observação. No ISO-GUM (1995) estas variáveis aleatórias designam-se por **grandezas de entrada**.

A estimativa de cada uma das grandezas de entrada é obtida usando a expressão da média aritmética,

$$\begin{array}{lcl} \text{Estimativa de } X_1 & \longrightarrow & \bar{x}_1 = \sum_{i=1}^n \frac{x_{1,i}}{n} \\ (\dots) & \longrightarrow & (\dots) \\ \text{Estimativa de } X_N & \longrightarrow & \bar{x}_N = \sum_{i=1}^n \frac{x_{N,i}}{n} \end{array}$$

Conhecendo estas estimativas e a relação funcional (7.10), determina-se uma estimativa da mensuranda (grandeza a medir — também designada por **grandeza de saída**), usando a dita relação,

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (7.13)$$

Assim, é obtida a primeira parcela do resultado da medição, o valor atribuído à mensuranda, y .

No exemplo associado à determinação do caudal mássico, corresponde a

$$\bar{Q}_m = \frac{\Delta \bar{m}}{\Delta \bar{t}} \quad (7.14)$$

A determinação da incerteza de medição associada à estimativa y traduz-se na determinação da sua dispersão de valores, devendo aplicar-se então a metodologia apresentada no ISO-GUM (1995) para esse efeito.

Esta metodologia tem um enquadramento do qual é importante destacar quatro aspectos:

- o erro de medição resulta de uma diversidade de componentes designadas por “grandezas de entrada”;
- cada uma das grandezas de entrada pode ser constituída por “componentes sistemáticas” e “componentes aleatórias”;
- as componentes sistemáticas devem conduzir a correcções dos valores lidos;
- as componentes aleatórias devem ser contabilizadas na avaliação da incerteza de medição.

Qualquer das grandezas de entrada contribui para o erro com componentes sistemáticas e aleatórias. No exemplo da determinação do caudal mássico, a determinação de massa possui um desvio — componente sistemática — de calibração equivalente a 1 g e uma incerteza de medição de $\pm 0,5$ g — componente aleatória.

Conforme referido anteriormente, a componente sistemática deve originar uma correcção, ou seja, qualquer leitura de Δm deve ser corrigida do desvio de calibração. A componente aleatória, por sua vez, deve ser incorporada na avaliação de incerteza.

No ISO-GUM (1995) são apontadas as principais fontes que originam componentes de incerteza e que permitem a sua identificação:

- a definição incompleta da mensuranda;
- a realização imperfeita da definição da mensuranda;
- a não-representatividade da amostra;
- a medição imperfeita das condições ambientais ou o conhecimento inadequado dos efeitos associados à grandezas de influência na medição;
- a intervenção de pessoal na leitura de instrumentação com indicação analógica;
- a resolução finita ou o limiar de mobilidade da instrumentação;
- os valores inexactos de padrões e materiais de referência;

- os valores inexactos de constantes e parâmetros provenientes de fontes externas e utilizados em algoritmos de processamento de dados;
- as aproximações de valores e valores assumidos no método e no procedimento de ensaio;
- a variação detectada em observações sucessivas realizadas em condições aparentemente idênticas.

A identificação das fontes de incerteza deve ser acompanhada da elaboração do modelo matemático $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ que as relaciona, o qual servirá de suporte à aplicação da expressão fundamental para o cálculo de incertezas: a Lei de Propagação de Incertezas.

A este processo de identificação das fontes de incerteza deverá seguir o processo de quantificação da sua variação. O ISO-GUM (1995) aponta duas vias para efectuar essa quantificação: o **método (de avaliação) do tipo A** e o **método (de avaliação) do tipo B**.

Tendo em conta que a quantificação corresponde, de facto, à determinação da variância de cada componente, essa diferenciação reflecte a forma como a informação é obtida. Assim, nalgumas situações é possível e economicamente viável efectuar uma amostragem e determinar por via estatística a variância da componente. Nessa situação, diz-se que a avaliação segue o método do tipo A, sendo a variância respectiva obtida por:

$$\text{var}(\bar{x}_i) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (7.15)$$

Noutras situações, não se considera viável a realização dessa amostragem por não ser possível (por a grandeza em causa se encontrar correlacionada com outras grandezas), por razões de natureza económica ou por outras razões efectuando-se, como alternativa, a obtenção de informação relativa aos seus limites de variação e à função densidade de probabilidade que a representa (por exemplo, usando dados de medições de um historial ou de medições equivalentes, dados de fabricante, dados de catálogos e normas, etc).

Neste caso, diz-se que o método de avaliação utilizado é do tipo B e a determinação da variância resulta da respectiva expressão

associada à função densidade de probabilidade adoptada (considerando os seus limites de variação).

As funções densidade de probabilidade adoptadas habitualmente e as respectivas variâncias são as seguintes:

Quadro 7.7 – Algumas distribuições de probabilidade, seus limites de variação e expressões da variância

Função distribuição de probabilidade		Limites de variação	Expressão da variância
Tipo	Configuração característica		
Uniforme centrada		$\pm a$	$\frac{a^2}{3}$
Triangular centrada		$\pm a$	$\frac{a^2}{6}$
Arcosseno ou Configuração U centrada		$\pm a$	$\frac{a^2}{2}$
Normal centrada		$\pm s$	s^2

Traduzindo para um caso prático: não sendo possível monitorizar a temperatura em determinado processo de medição, pode-se observar a sua variação num intervalo de tempo e determinar os seus valores limite, iguais a $(\pm a \text{ } ^\circ\text{C})$. Admitindo que neste intervalo todas as temperaturas são equiprováveis, poder-se-á adoptar a

função densidade de probabilidade normal como representativa. Para esta função densidade de probabilidade, a variância é dada por:

$$\text{var}(\bar{x}_i) = \frac{a^2}{3} \cdot C^2 \quad (7.16)$$

Em geral, uma parte significativa das contribuições relativas a grandezas de entrada resultam de uma abordagem segundo um método do tipo B.

Com base nesta informação — identificação das grandezas de entrada — aplica-se a Lei de Propagação de Incertezas, relacionando a variância da mensuranda $u_c^2(y)$ — ou o quadrado da incerteza de medição padrão, genericamente referida como $u^2(y)$ — com as contribuições para essa incerteza associadas às grandezas de entrada:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) \quad (7.17a)$$

Esta expressão é uma simplificação da expressão geral mais complexa (admitindo que as grandezas de entrada não são correlacionadas), apresentada na Equação (7.17b), a qual é obtida a partir de um formalismo matemático que se encontra descrito no Anexo 7.2.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i \cdot c_j \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (7.17b)$$

Os elementos que constituem as expressões anteriores são:

- $u_i(x_i)$ representando a incerteza de medição ($u^2(x_i)$ possui a dimensão de uma variância);
- $c_i = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Big|_{x_{j \neq i} = \text{constante}}$, correspondendo à derivada parcial da função relativamente à grandeza de entrada X_i ;
- $r(x_i, x_j)$, o coeficiente de correlação entre cada par de grandezas de entrada.

Retomando o exemplo da determinação do caudal mássico (desprezando outras componentes de incerteza adicionais), o desenvolvimento da expressão de cálculo da incerteza de medição tem a forma:

$$\begin{aligned} u^2(Q_m) &= c_{\Delta m}^2 u^2(\Delta m) + c_{\Delta t}^2 u^2(\Delta t) = \\ &= \left(\frac{\partial Q_m}{\partial \Delta m}\right)^2 u^2(\Delta m) + \left(\frac{\partial Q_m}{\partial \Delta t}\right)^2 u^2(\Delta t) \end{aligned} \quad (7.18)$$

ou seja,

$$u^2(Q_m) = \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 u^2(\Delta m) + \left(\frac{\Delta m}{\Delta t^2}\right)^2 u^2(\Delta t) \quad (7.19)$$

Esta equação permite uma simplificação resultante de se efectuar a sua transformação numa **incerteza de medição padrão relativa** (resultante da divisão de ambos os membros pelo valor do quadrado da grandeza mensurável, o caudal, Q_m^2),

$$\frac{u^2(Q_m)}{Q_m^2} = \frac{1}{Q_m^2} \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 u^2(\Delta m) + \frac{1}{Q_m^2} \left(\frac{\Delta m}{\Delta t^2}\right)^2 u^2(\Delta t) \quad (7.20)$$

obtendo-se a dita expressão simplificada,

$$\frac{u^2(Q_m)}{Q_m^2} = \frac{u^2(\Delta m)}{\Delta m^2} + \frac{u^2(\Delta t)}{\Delta t^2} \quad (7.21)$$

Existem formas de simplificação da expressão de cálculo cuja aplicação é frequente.

Uma delas, corresponde à situação em que a relação funcional em causa resulta de **somas e subtracções de grandezas de entrada** (os termos a_i representam valores constantes):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n a_i x_i$$

sendo o quadrado da incerteza de medição padrão dado por

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n a_i^2 u^2(x_i)$$

(Por exemplo: $y = 2x_1 + 3x_2 - 4x_3$,

então, $u^2(y) = 2^2 u^2(x_1) + 3^2 u^2(x_2) + (-4)^2 u^2(x_3)$.

Outra situação igualmente comum verifica-se quando a relação funcional é constituída por **produtos e divisões de grandezas de entrada** (os termos a_i representam valores constantes),

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n x_i^{a_i}$$

e o quadrado da incerteza de medição padrão respectiva dado pela expressão seguinte:

$$\frac{u^2(y)}{y} = \sum_{i=1}^n a_i^2 \frac{u^2(x_i)}{x_i^2}$$

(Por exemplo: $y = x_1^3 \cdot x_2^{-4}$,

então, $\frac{u^2(y)}{y^2} = 3^2 \frac{u^2(x_1)}{x_1^2} + (-4)^2 \frac{u^2(x_2)}{x_2^2}$).

Com base no que foi enunciado, de forma resumida, apresentam-se as etapas de um **procedimento para a avaliação das incertezas de medição padrão**:

- A1 Identificação da relação funcional: $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$
- A2 Identificação das grandezas de entrada do tipo A e determinação das respectivas variâncias $[u^2(x_i)]$ usando a expressão:

$$\text{var}(\bar{x}_i) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

- A3 Identificação das grandezas de entrada do tipo B e determinação dos valores limite e da função densidade de probabilidade a adoptar;
- A4 Determinação das variâncias do tipo B, $[u^2(x_i)]$, associadas às grandezas de entrada identificadas em A3, usando as expressões adequadas consoante o tipo de função de probabilidade adoptada (Quadro 7.7);

- A5 Determinação das derivadas parciais $c_i = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Big|_{x_{j \neq i} = \text{constante}}$

A6 Aplicação da Lei de Propagação de Incertezas — Equação (7.17a) — à relação funcional A1 e determinação da incerteza de medição padrão (considerando que não existe correlação entre as grandezas de entrada envolvidas: caso contrário, aplicar-se-ia a Equação (7.17b):

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i)$$

7.7.2 Incerteza de medição expandida

A expressão da incerteza de medição deve ser efectuada (por recomendação do ISO-GUM (1995)) considerando um intervalo de confiança de 95%.

A forma de concretizar essa expansão consiste em multiplicar a incerteza de medição padrão por 2 (uma vez que, admitindo a representação pela distribuição normal, 1 desvio padrão corresponde a um intervalo de confiança de cerca de 68% e 2 desvios padrão correspondem a um intervalo de confiança de cerca de 95%). Logo, a incerteza de medição expandida (95%) é dada por

$$U(y) = k \cdot u(y) = 2 \cdot u(y) \quad (7.22)$$

onde k representa o factor de expansão.

A aplicação desta regra pressupõe que a dimensão da amostra utilizada na determinação da mensuranda, y , permite considerar que a sua função densidade de probabilidade é normal.

Em situações frequentes de medição, encontram-se amostras de valores consideradas reduzidas (tipicamente com um número de graus de liberdade inferior a 50). Nestas circunstâncias não é apropriado utilizar o factor de expansão directamente associado à distribuição de probabilidade normal, havendo necessidade de recorrer à função de probabilidade t-Student, aplicável a este tipo de situações. Nesse caso, é necessário determinar o **número de graus de liberdade efectivos**, ν_{ef} , através das seguintes etapas:

- B1 Determinar o número de graus de liberdade, ν_i , de componentes de incerteza $[u(x_i)]$ obtidas por amostras de dimensão n e usando métodos do tipo A, sendo o número de graus de liberdade dado por $(n - 1)$;
- B2 Determinar o número de graus de liberdade de componentes de incerteza $[u(x_i)]$ obtidas por métodos do tipo B, atribuindo

valores apropriados (em geral, usa-se o valor de 50 ou uma expressão do ISO-GUM (1995) — Anexo G, expressão G.3 — que relaciona o número de graus de liberdade, ν_i , com o grau de confiança dos limites adoptados):

$$\nu_i = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad (7.23)$$

Nesta expressão, o **grau de fiabilidade** da informação é dado por $\Delta u(x_i)/u(x_i)$, onde $\Delta u(x_i)$ representa a estimativa de variabilidade do intervalo de incerteza considerado, $u(x_i)$. Assim, se, por exemplo, $\Delta u(x_i)$ é igual a 10% de $u(x_i)$, então o **grau de fiabilidade** do intervalo de incerteza determinado — ou **intervalo de confiança** — corresponde a 90% (ou seja, admite-se que esse intervalo de confiança incorpora 90% das possibilidades de valores observados) e, conseqüentemente, a expressão $\nu_i = \frac{1}{2} \cdot [0,1]^{-2} = 50$ determina o número de graus de liberdade respectivo;

- B3 Determinar o número de graus de liberdade efectivos, ν_{ef} , associado à mensuranda, y , usando a fórmula de Welch-Satterthwaite, notando que $u_i^2(y) = [c_i u_i(x_i)]^2$:

$$\nu_{\text{ef}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (7.24)$$

- B4 Determinar o factor de expansão (t-Student), t_p , no caso, aplicável a um intervalo de confiança de $p = 95\%$ (designado por t_{95}), relacionando-o com o número de graus de liberdade efectivos determinado em B3 — utilizando a tabela do Quadro 7.8;
- B5 Determinar a incerteza de medição expandida usando a expressão seguinte:

$$U(y) = t_{95} \cdot u(y) \quad (7.25)$$

Quadro 7.8 – Graus de liberdade e respectivos factores de expansão de acordo com a distribuição t-Student

ν_{ef}	t_{95}	ν_{ef}	t_{95}
1	12,72	16	2,12
2	4,30	17	2,11
3	3,18	18	2,10
4	2,78	19	2,09
5	2,57	20	2,09
6	2,45	25	2,06
7	2,36	30	2,04
8	2,31	35	2,03
9	2,26	40	2,03
10	2,23	45	2,01
11	2,20	50	2,01
12	2,18	100	1,984
13	2,16	∞	1,960
14	2,14		
15	2,13		

7.7.3 Tabela de cálculo de incertezas

Uma forma de representação sintética dos elementos que constituem o cálculo da incerteza de medição expandida é apresentada na tabela seguinte:

Quadro 7.9 – Tabela de balanço de incertezas de medição

Componente de incerteza x_i	Fonte de incerteza	Função de probabilidade adoptada	Valor da incerteza padrão $u(x_i)$	Coefficiente $c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$\sqrt{c_i^2 \cdot u^2(x_i)}$	Graus de liberdade ν_i
Incerteza de medição padrão, $u(y)$:						
Graus de liberdade efectivos, ν_{ef} :						
Factor de expansão, t_{95} :						
Incerteza de medição expandida, $U(y)$:						

7.8 Exemplo de aplicação

7.8.1 Introdução

A avaliação de incertezas de medição em situações concretas, envolvendo a medição de grandezas físicas, permite a atribuição de um grau de confiança aos resultados dessa medição. A sua concretização resulta da adopção de um procedimento, cujas etapas foram sumariamente apontadas na secção 7.7.

Com o objectivo de promover a exposição da aplicação prática a um caso comum de medição no contexto da caudalimetria, o exemplo que se segue envolve a medição de caudal recorrendo a um caudalímetro electromagnético, sendo descritos os diferentes elementos que integram o referido procedimento, desde o levantamento de factores contributivos para a incerteza, passando pela adopção de funções densidade de probabilidade e parâmetros ou limites, pela constituição da tabela de balanço de incertezas até se atingir a pretendida quantificação da incerteza de medição padrão e, finalmente, pela obtenção da incerteza de medição expandida.

7.8.2 As fontes de incerteza

Uma das tarefas fundamentais da análise de incertezas de medição consiste na identificação e quantificação das fontes de incerteza, uma vez que esta tarefa, quando incompleta, produz um inevitável efeito prejudicial à avaliação pretendida ao subavaliar o valor da incerteza de medição.

O exemplo de estudo consiste na inclusão de um caudalímetro numa conduta fechada, com o objectivo de realizar a medição de caudal efectuando uma comparação directa da grandeza mensurável — o caudal.

Esta análise pressupõe a aceitação de um princípio fundamental da Metrologia: a imperfeição da medição, resultante de diversos factores anteriormente apontados — a metodologia, a instrumentação, etc. — identificáveis quando se compara a realização prática com a concepção ideal da medição.

De facto, num contexto ideal observar-se-iam condições perfeitas, tais como: condutas perfeitamente circulares, escoamentos com perfis de velocidades uniformes (temporal e espacialmente), comportamento temporal estabilizado da grandeza a medir, ausência de perturbações ou irregularidades no percurso, instalações e montagens com geometria perfeita, etc. Na realidade, as condi-

ções de execução prática raramente se aproximam das condições ideais.

O levantamento das grandezas de influência resulta, portanto, da observação dos aspectos que, por se diferenciarem das condições ideais, determinam o erro da medição. Esse levantamento, no exemplo considerado, é facilitado apontando três origens genéricas de componentes de incerteza: a vertente hidráulica (incluindo a instalação e montagem), a vertente electrotécnica e a vertente metrológica.

Considerando estas vertentes, são apontadas as seguintes fontes de incerteza:

Quadro 7.10 – Fontes de incerteza na medição de caudal usando um caudalímetro electromagnético

Condições hidráulicas e de instalação do elemento primário
Instabilidade associada ao regime dinâmico do escoamento
Posição do eixo dos eléctrodos do elemento primário
Perfil de velocidades do escoamento
Colocação de juntas de desmontagem (afectando o perfil de velocidades)
Desvios de alinhamento (idem)
Colocação inapropriada de cones de transição (idem)
Incumprimento de regras de dimensionamento
Inclinação inadequada das condutas
Efeito das condições ambientais (temperatura e pressão)
Geometria das condutas (simetria e irrotacionalidade do escoamento)
Inversão do sentido de escoamento
Presença de ar nas condutas
Condições electrotécnicas
Interferência de campos electromagnéticos (sobre circuitos de sinal e sobre órgãos electrónicos)
Imperfeições na excitação magnética
Interferência de correntes eléctricas na água (por diferença de potencial entre condutas)
Deriva de zero e de sinais de referência
Dispositivos interpostos na cadeia de medição com sinais analógicos (amplificação, isolamento galvânico, condicionamento, aquisição)
Ruído intrínseco
Ligações à terra deficientes
Equipotencialização deficiente
Perturbações com origem nas fontes de alimentação de energia

Efeito da temperatura na instrumentação
Condutividade eléctrica do líquido (efeito, em geral, de menor importância, podendo perturbar a impedância interna do elemento primário)
Condições metrológicas
Variação de caudal durante a aquisição de valores médios
Incerteza de calibração
Desvios residuais de calibração
Resolução associada às grandezas mensuráveis
Resolução associada à conversão A/D
Repetibilidade
Processamento de dados
Operações de totalização e sua resolução
Efeito da parametrização primário-secundário
Processamento computacional da informação
Efeito associado a grandezas de influência (pressão e temperatura)

A representação destas fontes de incerteza, associadas a elementos específicos de uma cadeia de medição, é exposta num diagrama (Figura 7.18) ilustrativo de um processo de medição de caudal utilizando um caudalímetro electromagnético.

Deste elenco de potenciais fontes de incerteza, algumas delas não permitem uma quantificação fácil, devendo, por essa razão, utilizar-se uma estratégia de minimização da sua influência. São os casos observados, sobretudo, na vertente das condições hidráulicas: colocação de juntas de desmontagem; alinhamento; geometria das condutas; cones de redução; regras de dimensionamento.

Duas outras observações são igualmente importantes: uma consiste em fazer notar que, das fontes de incerteza apresentadas, em geral, não existe informação — dos fabricantes ou de outra origem — sobre a sua variabilidade ou influência dos resultados de medição; a segunda, que a lista apresentada evidencia, que a incerteza de medição poderá depender de muitos outros factores para além da calibração do instrumento de medição, cuja incerteza representa apenas uma parcela do total, ou seja, não é correcto interpretar essa incerteza de calibração declarada no respectivo certificado como aquela que, efectivamente, representará a incerteza associada a qualquer medição efectuada posteriormente a essa calibração.

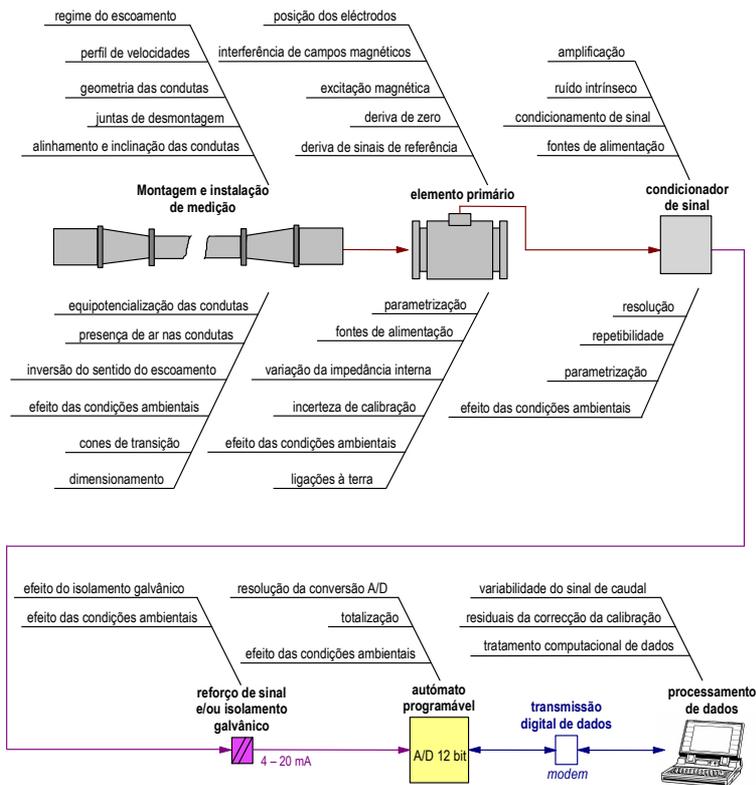


Figura 7.18 – Representação de componentes de incerteza num sistema de medição de caudal usando um caudalímetro electromagnético

O modelo matemático subjacente a este tipo de análise tem a forma genérica seguinte:

$$Q_{\text{corr}} = Q_{\text{lido}} + \varepsilon + \sum \delta Q_i \quad (7.26)$$

onde Q_{corr} representa o valor de caudal corrigido, Q_{lido} é o resultado da medição (valor lido, valor médio de uma amostra de leituras), ε representa o valor da correcção decorrente da calibração e os δQ_i representam os diversos factores de influência — grandezas de entrada — identificadas e listadas na tabela anterior.

Na expressão anterior cada termo δQ_i representa a variação de caudal devido à variação de uma determinada grandeza de entrada, x_i . Por exemplo, considerando que a temperatura durante a medição é distinta da temperatura de referência ($\Delta\theta = \theta_{\text{med}} - \theta_{\text{ref}}$), a correcção associada é dada por $\delta_{\Delta\theta} = Q_{\text{lido}} \cdot \kappa_{\Delta\theta} \Delta\theta$, sendo $\kappa_{\Delta\theta}$ um factor de correcção (de unidade $^{\circ}\text{C}^{-1}$).

A aplicação da LPI ao modelo matemático exposto conduz à seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
 u^2(y) &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) \\
 u^2(Q) &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Q}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = u^2(Q_{\text{lido}}) + u^2(\varepsilon) + \\
 &+ \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Q}{\partial [\delta Q_i]} \right)^2 u^2(\delta Q_i)
 \end{aligned} \tag{7.27}$$

Neste, como em casos equivalentes, a transformação da expressão na sua forma relativa torna-se útil (sobretudo porque muitas das grandezas de entrada do modelo são definidas originalmente nessa forma), o que se processa de acordo com a divisão de ambos os termos pelo valor do caudal, em cada patamar de ensaio:

$$\frac{u^2(Q)}{Q^2} = \frac{u^2(Q_{\text{lido}})}{Q^2} + \frac{u^2(\varepsilon)}{Q^2} + \frac{1}{Q^2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Q}{\partial [\delta Q_i]} \right)^2 u^2(\delta Q_i) \tag{7.28}$$

Esta modificação permite obter o valor de incerteza em percentagem do valor de caudal — observado em cada patamar de ensaio —, utilizando como componentes contributivas os valores relativos — percentuais — das mesmas.

Ultrapassada esta primeira etapa, a segunda etapa consiste em classificar as fontes de incerteza de acordo com o método de quantificação (do tipo A ou do tipo B), apontar as funções densidade de probabilidade e os parâmetros ou seus limites de variabilidade. Para a organização dessa informação revela-se particularmente útil adoptar a estrutura da tabela de balanço de incertezas apresentada na secção 7.7.3 deste documento.

Como nota adicional refira-se que se considera que é possível minimizar o efeito produzido por algumas das componentes de incerteza apontadas, tornando-as desprezáveis, por se admitir que os requisitos de instalação e montagem são cumpridos integralmente. Encontram-se nessa situação as seguintes:

- colocação dos eléctrodos;
- colocação de juntas de desmontagem (afectando o perfil de velocidades);

- desvios de alinhamento (idem);
- colocação inapropriada de cones de redução (idem);
- incumprimento de regras de dimensionamento;
- inclinação inapropriada das condutas;
- ligações à terra;
- equipotencialização.

As restantes componentes de incerteza, considerando o modelo matemático exposto na Equação (7.26) são então incorporadas na tabela de balanço de incertezas (notando que os resultados obtidos se reportam a um determinado patamar de medição de caudal — no caso, $10 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ — para diferentes valores de caudal seria necessário efectuar outro conjunto de cálculos, o que sucede devido ao facto de existirem quantidades dependentes desse valor de caudal, como é um exemplo, as contribuições associadas à variação da temperatura e da pressão durante a realização do ensaio).

As duas tabelas de balanço de incertezas que se apresentam nos quadros 7.11 e 7.12 correspondem a dois casos distintos: o primeiro, em que a variabilidade da mensuranda (estabilidade durante a realização da medição) é da ordem de $\pm 0,5\%$ e a incerteza de calibração é da ordem de $\pm 0,4\%$, e o segundo, em que a variabilidade da mensuranda é da ordem de $\pm 1\%$ e a incerteza de calibração é da ordem de $\pm 2\%$.

Quadro 7.11 – Balanço de incertezas de medição referente ao primeiro caso

Componente de incerteza x_i	Fonte de incerteza	Função de probabilidade adoptada*	Valor da incerteza padrão** $u(x_i)$	Coefficiente $c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$\sqrt{c_i^2 \cdot u^2(x_i)}$	Graus de liberdade ν_i
δQ_1	Regime dinâmico do líquido	R	$\pm (1\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_2	Perfil de velocidades	N	$\pm (0,1\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_3	Condições ambientais (temperatura)	T	$\pm [(10^\circ\text{C})] / \sqrt{6}$	$Q_{\text{lido}} \cdot K_{\Delta T \theta_i}$	$4 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_4	Condições ambientais (pressão)	T	$\pm [(10\text{bar})] / \sqrt{6}$	$Q_{\text{lido}} \cdot K_{\Delta P}$	$5 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_5	Inversão do sentido de escoamento	R	$\pm (0,01\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-3}\%$	50
δQ_6	Presença de ar nas condutas	R	$\pm (0\%) / Q$	1	0	50
δQ_7	Interferência de campos electromagnéticos	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50

δQ_8	Excitação magnética	R	$\pm (0,05\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_9	Diferenças de potencial entre condutas	T	$\pm (0,2\%) / \sqrt{6}$	1	$8,16 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_{10}	Deriva de zero e de sinais de referência	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_{11}	Amplificação de sinais	R	$\pm (0,2\%) / \sqrt{3}$	1	$1,15 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_{12}	Isolamento galvânico	R	$\pm (0,1\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_{13}	Condicionamento de sinais	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_{14}	Ruído intrínseco	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_{15}	Fontes de alimentação de energia	R	$\pm (0\%) / \sqrt{3}$	1	0	50
δQ_{16}	Efeito da temperatura na instrumentação	T	$\pm [(10^\circ\text{C})] / \sqrt{6}$	$Q_{\text{lido}} \cdot K_{\Delta\theta_2}$	$4 \cdot 10^{-3}\%$	50
δQ_{17}	Condutividade eléctrica do líquido	R	$\pm (0\%) / \sqrt{3}$	1	0	50
δQ_{18}	Variabilidade da mensuranda — caudal	N	$\pm (0,5\%)$	1	2%	50
ε	Incerteza de calibração	N	$\pm (0,4\%)$	1	3%	50
	Desvios residuais de calibração	N	$\pm (0,2\%)$	1	0,5%	50
Q_{lido}	Resolução da instrumentação	R	$\pm (0,1\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-2}\%$	50
	Resolução da conversão A/D (12 bits)	R	$\pm \left(\frac{1}{4096} Q_{\text{max}} \right) \frac{1}{Q} \frac{1}{\sqrt{3}}$	1	$4 \cdot 10^{-3}\%$	50
	Repetibilidade das observações	N	$\pm (0,1\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-2}\%$	50
	Totalização e sua resolução	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_{19}	Parametrização primário-secundário	R	$\pm (0\%) / \sqrt{3}$	1	0	50
δQ_{20}	Processamento computacional	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50
Incerteza de medição padrão, $u(y)$: $\pm 1,2\%$						
Graus de liberdade efectivos, ν_{ef} : 50						
Factor de expansão, k_{95} : 2,00						
Incerteza de medição expandida, $U(y)$: $\pm 2,4\%$						

* R – rectangular ou uniforme centrada, T – triangular centrada, N – Normal, U – Arcosseno ou de configuração U.

** Os valores de $u(x_i)$ apresentados incorporam o valor relativo associado ao limite de variação ou desvio padrão da grandeza em causa dividido por um termo (raiz quadrada de um número), associado à expressão do desvio padrão relativo à função densidade de probabilidade adoptada. Por exemplo, no caso de uma distribuição rectangular com intervalo $[-a, +a]$ a expressão da variância é igual a $(a^2/3)$ e o desvio padrão respectivo igual a $(a / \sqrt{3})$.

Desta forma, procura-se ilustrar dois aspectos particularmente importantes e que constituem um benefício directo da avaliação de incertezas de medição:

- a constatação de que a incerteza da medição não depende exclusivamente das incertezas de calibração, existindo outros factores igualmente preponderantes, como se pode observar no Quadro 7.11;
- a possibilidade de se identificar, no cômputo da incerteza de medição, as contribuições que são dominantes (no segundo caso, o regime dinâmico do líquido, a variabilidade da mensuranda e a incerteza de calibração — a que correspondem as linhas do Quadro 7.12 sombreadas a cinzento mais escuro — determinam a incerteza de medição expandida) e, conseqüentemente, em que uma melhoria de parâmetros relativos a contribuições específicas de incerteza se traduzem numa melhoria da incerteza final de forma mais eficaz.

Quadro 7.12 – Balanço de incertezas de medição referente ao segundo caso

Componente de incerteza x_i	Fonte de incerteza	Função de probabilidade adoptada*	Valor da incerteza padrão** $u(x_i)$	Coefficiente $c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$\sqrt{c_i^2 \cdot u^2(x_i)}$	Graus de liberdade ν_i
δQ_1	Regime dinâmico do líquido	R	$\pm (1\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_2	Perfil de velocidades	N	$\pm (0,1\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_3	Condições ambientais (temperatura)	T	$\pm [(10^\circ\text{C})] / \sqrt{6}$	$Q_{\text{lido}} \cdot K_{\Delta\theta_i}$	$4 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_4	Condições ambientais (pressão)	T	$\pm [(10\text{bar})] / \sqrt{6}$	$Q_{\text{lido}} \cdot K_{\Delta p}$	$5 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_5	Inversão do sentido de escoamento	R	$\pm (0,01\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-3}\%$	50
δQ_6	Presença de ar nas condutas	R	$\pm (0\%) / Q$	1	0	50
δQ_7	Interferência de campos electromagnéticos	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_8	Excitação magnética	R	$\pm (0,05\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_9	Diferenças de potencial entre condutas	T	$\pm (0,2\%) / \sqrt{6}$	1	$8,16 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_{10}	Deriva de zero e de sinais de referência	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_{11}	Amplificação de sinais	R	$\pm (0,2\%) / \sqrt{3}$	1	$1,15 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_{12}	Isolamento galvânico	R	$\pm (0,1\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-2}\%$	50

δQ_{13}	Condicionamento de sinais	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_{14}	Ruído intrínseco	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_{15}	Fontes de alimentação de energia	R	$\pm (0\%) / \sqrt{3}$	1	0	50
δQ_{16}	Efeito da temperatura na instrumentação	T	$\pm [(10^\circ\text{C})] / \sqrt{6}$	$Q_{\text{lido}} \cdot K_{\Delta t, \theta_2}$	$4 \cdot 10^{-3}\%$	50
δQ_{17}	Condutividade eléctrica do líquido	R	$\pm (0\%) / \sqrt{3}$	1	0	50
δQ_{18}	Variabilidade da mensuranda — caudal	N	$\pm (1\%)$	1	1%	50
ε	Incerteza de calibração	N	$\pm (2\%)$	1	2%	50
	Desvios residuais de calibração	N	$\pm (0,5\%)$	1	0,5%	50
Q_{lido}	Resolução da instrumentação	R	$\pm (0,1\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-2}\%$	50
	Resolução da conversão A/D (12 bits)	R	$\pm \left(\frac{1}{4096} Q_{\text{max}} \right) \frac{1}{Q} \frac{1}{\sqrt{3}}$	1	$4 \cdot 10^{-3}\%$	50
	Repetibilidade das observações	N	$\pm (0,1\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-2}\%$	50
	Totalização e sua resolução	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50
δQ_{19}	Parametrização primário-secundário	R	$\pm (0\%) / \sqrt{3}$	1	0	50
δQ_{20}	Processamento computacional	R	$\pm (0,5\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-1}\%$	50
Incerteza de medição padrão, $u(y)$: $\pm 2,5\%$						
Graus de liberdade efectivos, ν_{ef} : 50						
Factor de expansão, t_{95} : 2,00						
Incerteza de medição expandida, $U(y)$: $\pm 5,0\%$						

* R – rectangular ou uniforme centrada, T – triangular centrada, N – Normal, U – Arcosseno ou de configuração U.

** Os valores de $u(x_i)$ apresentados incorporam o valor relativo associado ao limite de variação ou desvio padrão da grandeza em causa dividido por um termo (raiz quadrada de um número), associado à expressão do desvio padrão relativo à função densidade de probabilidade adoptada. Por exemplo, no caso de uma distribuição rectangular com intervalo $[-a, +a]$ a expressão da variância é igual a $(a^2/3)$ e o desvio padrão respectivo igual a $(a / \sqrt{3})$.

Relativamente aos valores que se encontram na tabela de balanço de incertezas, refira-se que alguns destes resultam de estimativas associadas ao conhecimento do funcionamento da instrumentação, de informação disponibilizada por fabricantes e do conhecimento empírico dos sistemas em causa. No que se refere à atribuição do valor de 50 a alguns dos graus de liberdade associados às estimativas de grandezas de entrada — rectangulares e triangulares, obtidas de acordo com o procedimento do método do tipo

B — esse valor atribuído resulta de se considerar, genericamente, que os limites apontados possuem um nível de confiança de 90%, utilizando-se esse valor na Equação (7.23) que determina o número de graus de liberdade em causa.

No que se refere à influência das condições ambientais, o coeficiente de temperatura adoptado, $\kappa_{\Delta\theta}$, tem o valor de $1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. No caso da influência da variação de temperatura no caudal, considerando uma variação máxima de temperatura de $\pm 10 \text{ } ^\circ\text{C}$, e um valor do patamar de caudal $Q = 10 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$, resulta uma parcela equivalente a

$$\frac{(10 \text{ } ^\circ\text{C})}{\sqrt{6}} \cdot (1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) \cdot (10 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}) \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (7.29)$$

Este valor, considerando o patamar de caudal de $10 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$, corresponde a um valor da ordem de 0,04%, contabilizado no cálculo da incerteza de medição.

O efeito produzido pela variação de temperatura na instrumentação, afectando o valor da leitura foi calculado de forma equivalente, considerando uma variação máxima de temperatura — durante a realização da leitura — de $\pm 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ e o mesmo valor de caudal, $Q = 10 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$, resultando uma contribuição de 0,004%.

No caso da contabilização do efeito da pressão, usando uma análise similar, considerando uma variação de pressão de $\pm 0,5 \text{ kPa}$ ($5 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$) e um coeficiente de pressão, $\kappa_{\Delta p}$, com o valor de $1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$, resulta uma estimativa cujo valor é da ordem de 0,05%.

A determinação do factor de expansão resulta da aplicação da Equação (7.25) e a determinação do factor de expansão foi efectuada usando a tabela do Quadro 7.8.

Uma avaliação complementar resulta de se considerar que a medição de caudal não se efectua na zona da gama de velocidades aconselhada — de menor valor de incerteza — mas para valores de velocidade mais baixos. Sabendo que, nessas circunstâncias, a incerteza típica do equipamento considerado no Quadro 7.11 pode ser da ordem de 4%, substituindo esse valor na tabela de balanço de incertezas verifica-se que o resultado da incerteza de medição padrão se altera para 5,2% e, conseqüentemente, a incerteza expandida adquire o novo valor de 10,4%.

Nas condições estipuladas no Quadro 7.12, admitindo que o valor médio corrigido das leituras que foi encontrado é igual a $Q = 10,2$

$\text{dm}^3 \text{s}^{-1}$, a expressão do resultado da medição, exposto em (7.30), resulta da avaliação de 5% de $10,2 \text{ dm}^3 \text{s}^{-1}$, correspondente a, aproximadamente, $0,5 \text{ dm}^3 \text{s}^{-1}$:

$$(10,2 \pm 0,7) \text{ dm}^3 \text{s}^{-1} \quad (7.30)$$

Como nota final, recomenda-se que a aplicação da metodologia de cálculo de incertezas de medição do ISO-GUM (1995) envolva uma avaliação o mais detalhada possível das fontes de incerteza do sistema de medição, em particular identificando aquelas que contribuem de forma mais significativa para o resultado final. Neste sentido, as tabelas de balanço de incertezas apresentadas nos quadros 7.11 e 7.12 devem ser tomadas como exemplos de aplicação, embora associadas a casos concretos de medição de caudal.

7.9 Simbologia

Quadro 7.13 – Simbologia utilizada no Capítulo 7

Símbolo	Grandeza	Unidade de medida SI
c_i	Coeficientes correspondentes a derivadas parciais	
IC	Incerteza da instrumentação após calibração	
I_{corr}	Valor corrigido da indicação	
IMA	Incerteza máxima admissível	
I_{med}	Valor de indicação resultante da medição	
I_{ref}	Valor de referência	
I_{regr}	Valor de calculado pela aplicação de uma regressão linear	
k	Factor de expansão	
L	Comprimento	m
m	Massa	kg
Q_m	Caudal mássico	kg s^{-1}
Q_v	Caudal volúmico	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$s(x)$	Desvio padrão experimental da amostra	
$s(\bar{x})$	Desvio padrão experimental da média	
t	Tempo	s
T	Temperatura	K
$u(x_i)$	Incerteza de medição padrão associada à variável aleatória de uma grandeza de entrada x_i	

$U(y)$	Incerteza de medição expandida associada à variável aleatória de uma grandeza de saída y	
$\text{var}(x)$	Variância da amostra experimental	
$\text{var}(\bar{x})$	Variância da média	
x_i	Observação associada a uma variável aleatória X_i	
X_i	Variável aleatória de entrada	
y	Valor associado a uma variável de saída Y	
Y	Variável aleatória de saída	
α	Coeficiente linear de expansão térmica	K^{-1}
δ	Desvio de calibração	
δ_{corr}	Desvio residual após correcção da indicação	
δ_{regr}	Desvio de correcção resultante da aplicação de uma regressão linear	
ε	Correcção determinada pela calibração	
$K_{\Delta\rho}$	Coeficiente de variação de caudal pela variação de pressão	Pa^{-1}
$K_{\Delta\theta}$	Coeficiente de variação de caudal pela variação de temperatura	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
V_{ef}	Número de graus de liberdade efectivos	
V_i	Número de graus de liberdade associados à grandeza de entrada x_i	
θ	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
Δm	Varição de massa	kg
Δt	Intervalo de tempo	s
ΔT	Varição de temperatura	K

7.10 Bibliografia

Almeida, G. – *Sistema Internacional de Unidades (SI) – Grandezas e Unidades Físicas. Terminologia, Símbolos e Recomendações*. Lisboa, Plátano Ed., 2.ª Edição, 1997.

ASTM E29-04 – *Standard Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications*. West Conshohocken, PA (EUA), ASTM International, 2004.

Carvalho, F.; Oliveira Costa, C.; Schiappa de Azevedo, F. – *Elementos de Sistemas e de Análise e Processamento de Sinais*. Texto didáctico, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1991.

Dally, J.; Riley, W.; McConnell, K. – *Instrumentation for Engineering Measurements*. Wiley International Editions, 2nd Ed., 1993.

Decreto-Lei n.º 427/83, publicado no Diário da República n.º 281/83, Série I, de 1983-12-07, pág.^s 3990 – 3992 [“Actualiza o sistema legal de unidades de medida”].

Decreto-Lei n.º 320/84, publicado no Diário da República n.º 228/84, Série I, de 1984-10-01, pág.^s 3018 – 3020 [“Substitui o anexo ao Decreto-Lei n.º 427/83, de 7 de Dezembro”].

Decreto-Lei n.º 238/94, publicado no Diário da República n.º 217/94, Série I-A, de 1994-09-19, pág.^s 5610 – 5614 [“Estabelece o novo sistema de unidades de medida legais”].

Decreto-Lei n.º 254/2002, publicado no Diário da República n.º 270, Série I-A, de 2002-11-22, pág.^s 7337 – 7338 [“Transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva do Parlamento Europeu e do Conselho n.º 1999/103/CE, de 2000-01-24, e altera o Decreto-Lei n.º 238/94, de 19 de Setembro”].

Doebelin, E. – *Measurement Systems – Application and Design*. Singapura, McGraw-Hill, 4th Ed., 1990.

EA-4/02 – *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*. Paris, EA – European Co-operation for Accreditation, 1999.

EAL-G12 – *Traceability of Measuring and Test Equipment to National Standards*. Paris, EA – European Co-operation for Accreditation, 1995.

EN ISO/IEC 17025 – *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/IEC 17025:2005)*. Bruxelas, CEN – European Committee for Standardization, 2005.

Finkelstein, L. – *Theory and Philosophy of Measurement*. Handbook of Measurement Science – Vol.1. Norwich (Reino Unido), John Wiley & Sons, 1982.

Finkelstein, L.; Watts, R. D. – *Fundamentals of Transducers: Description by Mathematical Models*. Handbook of Measurement Science – Vol. 2. Belfast (Irlanda do Norte), John Wiley & Sons, 1978, pág.^s 747 – 796.

Hofmann, D. – *Measurement Errors, Probability and Information Theory*. Handbook of Measurement Science – Vol. 1, Norwich (Reino Unido), John Wiley & Sons, 1982.

IPQ-GUM – *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição nos Laboratórios de Calibração*. Monte de Caparica, Instituto Português da Qualidade, 1996.

IPQ-VIM – *Vocabulário Internacional de Metrologia*. Monte de Caparica, Instituto Português da Qualidade, 1996.

ISO 31-0 – *Quantities and units – Part 0: General principles*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1992.

ISO-GUM – *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1995.

ISO-VIM – *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1994.

ISO-VIM – *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM)* (versão em revisão). Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 2004.

Lesurf, J. – *Information and Measurement*. Bristol (Reino Unido), Institute of Physics Publishing Inc., 1995.

Montgomery, D. – *Introduction to Statistical Quality Control*. Wiley International Editions, 2nd Ed., 1990.

Mood, A.; Graybill F.; Boes, D. – *Introduction to the Theory of Statistics*. McGraw Hill, 3rd Ed., 1974.

NP 37 – *Arredondamento dos valores numéricos* (2.^a Edição). Monte de Caparica, Instituto Português da Qualidade, 1961.

Rabinovich, S. – *Measurement Errors and Uncertainties. Theory and Practice*. York (E.U.A.), Springer Verlag, 2nd Ed., 2000.

Sydenham, P. H. – *Measurements, Models and Systems*, Handbook of Measurement Science – Vol. 1. Norwich (Reino Unido), John Wiley & Sons, 1982.

Sydenham, P. H. – *Standardization of Measurement Fundamentals and Practice*. Handbook of Measurement Science – Vol. 1, Norwich (Reino Unido), John Wiley & Sons, 1982.

Sydenham, P.; Hancock, N.; Thorn, R. – *Introduction to Measurement Science and Engineering*. Guilford (Reino Unido), John Wiley & Sons, 1989.

Anexo 7.1 Algumas regras, recomendações e orientações normativas aplicáveis em Metrologia

A importância da utilização correcta da linguagem estende-se ao uso da simbologia e das notações quer relacionadas com a terminologia do Sistema Internacional de Unidades quer com a expressão de conceitos de natureza matemática.

Esta é a razão que justifica o interesse de indicar algumas das regras, recomendações e orientações normativas que definem a forma adequada de as apresentar. A sua exposição, que se segue, refere o objecto da descrição e as regras e recomendações aplicáveis.

Símbolos de grandezas

Os símbolos das grandezas devem ser escritos em caracteres romanos *itálicos*, quer tenham origem no alfabeto latino quer no alfabeto grego. Não devem ser seguidos de pontos excepto quando sujeitos às regras de pontuação habitual (por exemplo, para a grandeza massa utiliza-se o símbolo m , para a grandeza pressão p).

Símbolos de grandezas vectoriais

Os símbolos para a representação de grandezas vectoriais escrevem-se em caracteres romanos *itálicos* e a **negro** (por exemplo, \mathbf{F} , \mathbf{v}) ou em caracteres romanos *itálicos* encimados com uma seta (por exemplo, \vec{F} , \vec{v}).

Abreviaturas

As abreviaturas devem ser escritas em caracteres romanos direitos, admitindo a colocação de pontos e devem seguir uma sequência de acordo com a língua do texto em que se inserem (por exemplo, f.e.m., em português ou e.m.f., em inglês).

Índices

A impressão de índices numéricos deverá ser efectuada em caracteres romanos direitos (por exemplo, m_1), devendo os índices

literais ser impressos em caracteres romanos itálicos apenas quando se referem a símbolos de grandezas (por exemplo, a capacidade térmica a pressão constante, C_p) e direitos nos restantes casos (por exemplo, a massa do electrão, m_e).

Valores especiais referentes a uma grandeza periódica

A simbologia adoptada para representar valores específicos de uma grandeza periódica, cuja designação genérica é x , deve respeitar as seguintes regras:

x	para um valor instantâneo;
\tilde{x}	para o valor eficaz;
x_{\max} ou \hat{x}	para o valor máximo;
\bar{x} ou $\langle x \rangle$	para o valor médio;
x_{\min} ou \check{x}	para o valor mínimo.

Grandezas e unidades em gráficos e tabelas

A indicação de grandezas e unidades em gráficos e tabelas, considerando que a expressão genérica de uma grandeza é Q , se exprime pelo produto do seu valor numérico pela unidade da grandeza respectiva ($Q = \{Q\} \cdot [Q]$), a representação de valores numéricos $\{Q\}$ é efectuada por $Q/[Q]$ (por exemplo, T/K ou $v/m \cdot s^{-1}$).

Adjectivos “linear”, “superficial” e “volúmico”

A utilização dos adjectivos *linear*, *superficial* e *volúmico*, quando são associados ao nome de grandezas físicas, indicam o quociente da grandeza em causa por um *comprimento*, uma *área* ou um *volume*, respectivamente.

Termos “densidade”, “concentração”, “mássico” e “molar”

A utilização dos termos *densidade*, *concentração*, *mássico* e *molar*, associados ao nome de grandezas físicas, indicam o quociente da grandeza em causa por uma *área* (exprimindo um *fluxo* ou uma *corrente*), pelo *volume total* (em particular, no caso de

misturas de elementos), pela *massa*, e pela *quantidade de matéria*, respectivamente.

Termos “coeficiente de ...” e “factor de ...”

Os termos *coeficiente de ...* e *factor de ...* devem ser utilizados, no primeiro caso, quando existe uma proporcionalidade entre duas grandezas *A* e *B*, com $B = kA$, designando *k* por “coeficiente” se as grandezas possuírem dimensões diferentes (por exemplo, o coeficiente de dilatação linear, $\alpha_l = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT}$), ou por “factor”, quando as duas grandezas possuem a mesma dimensão, sendo *k* adimensional.

Nomes de unidades (escritos por extenso)

Com excepção do grau Celsius, todos os nomes de unidades, quando escritos por extenso, devem ser impressos com caracteres romanos direitos minúsculos, mesmo os que derivam de nomes próprios (por exemplo, ampere, watt, hertz, etc.). Os nomes derivados dos de cientistas seguem a grafia original, podendo os restantes ser escritos de acordo com o idioma.

Plural de nomes de unidades (escritos por extenso)

É admitido o uso de plural de nomes de unidades, desde que o valor numérico em causa seja igual ou superior a 2 (por exemplo: 1,99 miliampere; 2,25 miliamperes; 1,83 metro por segundo; 3,80 metros por segundo).

Símbolos de unidades

Os símbolos de unidades devem ser escritos em caracteres romanos direitos minúsculos, no caso geral, e maiúsculos — aplicável apenas à primeira letra do símbolo — se derivam de nomes de personalidades (por exemplo: m de metro, s de segundo, A de ampere, W de watt, Hz de hertz).

Nos símbolos de unidades não é admitido o uso de plural, o uso de pontuação, o uso de índices ou outros símbolos adicionais — com excepção de múltiplos e submúltiplos como prefixos — e o uso de abreviaturas.

Valores numéricos

A ligação de valores numéricos a símbolos de unidades deve conter um espaço e o produto ou quociente de unidades deve conter entre estas um ponto ou um espaço, evitando ambiguidades (por exemplo: “s·m” ou “s m”);

A representação de numeração deve incluir a existência de espaços entre sequências de 3 algarismos como, por exemplo:

13 456,344 53

0,427 335

1 753 449,78

Em Portugal, existe a recomendação de utilização de vírgula como sinal decimal e do ponto a meia altura como sinal de multiplicação (é admitido, em alternativa, o uso de uma cruz “×”).

A representação preferencialmente adoptada para a expressão de resultados numéricos consiste em um algarismo à esquerda da vírgula decimal e a utilização de expoentes, por exemplo:

5,779 448 33·10¹⁸

1,789 43·10⁶

Dimensões das grandezas físicas de base do SI

As dimensões das grandezas físicas de base do SI são as seguintes: comprimento, L, massa, M, tempo, T, intensidade de corrente eléctrica, I, temperatura termodinâmica, Θ , quantidade de matéria, N, intensidade luminosa, J.

Múltiplos e submúltiplos admitidos pelo SI

Quadro 7.1.1 – Definições de múltiplos e submúltiplos admitidos no SI

Símbolo	Designação	Factor
Y	yotta	10^{24}
Z	zetta	10^{21}
E	exa	10^{18}
P	peta	10^{15}
T	tera	10^{12}
G	giga	10^9
M	mega	10^6
k	quilo	10^3
h	hecto	10^2
da	deca	10^1

Símbolo	Designação	Factor
d	deci	10^{-1}
c	centi	10^{-2}
m	mili	10^{-3}
μ	micro	10^{-6}
n	nano	10^{-9}
p	pico	10^{-12}
f	fento	10^{-15}
a	ato	10^{-18}
z	zepto	10^{-21}
y	yocto	10^{-24}

Em complemento às notas apresentadas, refira-se a existência de recomendações para operações de arredondamento de números e para arredondamento de valores, sendo aplicáveis em Metrologia.

Arredondamento de números

O arredondamento de números deve respeitar as regras definidas na norma ISO 31-0 (1992), em particular no seu Anexo B, onde se aponta o conceito de arredondamento e se determinam o conjunto de regras a seguir.

O *arredondamento de um número* define-se como a modificação da magnitude de um dado número por outro, o qual se designa por *número arredondado*, seleccionado a partir da sequência de múltiplos integrais de um *intervalo de arredondamento* seleccionado.

Por exemplo, sendo o *intervalo de arredondamento* de 0,01; os múltiplos integrais deste na proximidade o número 25 são: 24,97, 24,98, 24,99, 25,00, 25,01, 25,02, Se o intervalo de arredondamento é 10, na proximidade de 2500 os múltiplos integrais serão: ..., 2480, 2490, 2500, 2510, 2520,

Dado um *intervalo de arredondamento*, qualquer que seja o número em causa, ele estará forçosamente compreendido entre dois múltiplos integrais desse intervalo. Então, duas situações podem ocorrer:

- a) o número em causa encontra-se mais próximo de um dos múltiplos integrais;
- b) o número em causa encontra-se a uma distância igual dos múltiplos integrais.

No caso a), o arredondamento faz-se para o múltiplo integral mais próximo:

Intervalo de arredondamento: 0,1;

Número: 123,647 (entre 123,6 e 123,7) o número arredondado é 123,6;

Número: 25,371 (entre 25,3 e 25,4) o número arredondado é 25,4.

No caso b), o arredondamento resulta da adopção:

b1) da regra geral;

b2) da regra computacional.

A regra geral, b1), determina que o arredondamento se faça seleccionando sempre o **múltiplo integral par que esteja mais próximo** (este procedimento é aconselhado sobretudo por permitir séries de medições, uma vez que minimiza o efeito produzido pelos erros de arredondamento).

Exemplo:

Intervalo de arredondamento: 0,1;

Número: 123,65 (entre 123,6 e 123,7) o número arredondado é 123,6;

Número: 123,75 (entre 123,7 e 123,8) o número arredondado é 123,8.

A regra computacional, b2), determina que o arredondamento se faça seleccionando sempre o **múltiplo integral superior**.

Exemplo:

Intervalo de arredondamento: 0,1;

Número: 123,65 (entre 123,6 e 123,7) o número arredondado é 123,7

Número: 123,75 (entre 123,7 e 123,8) o número arredondado é 123,8

Regras de determinação do número de algarismos significativos

Finalmente, as regras adoptadas para a representação de algarismos significativos associados a operações aritméticas e funções exponenciais e logarítmicas [ASTM E29-04 (2004), NP 37 (1961)] consistem no seguinte:

- a apresentação do resultado (número arredondado) que decorra de operações aritméticas de adição ou subtracção deve possuir um número de casas decimais não superior à do componente envolvido no cálculo que possuir o menor número de casas decimais (por exemplo: $12,298 + 300,6 = 312,9$);
- a apresentação do resultado (número arredondado) obtido por produtos e divisões não deve conter mais algarismos significativos que o componente do cálculo que possuir o menor número de algarismos significativos (por exemplo: $17,45 / 3,1 = 5,6$);
- a apresentação, no caso de funções como $\ln(x)$ ou $\log_{10}(x)$, deve ser efectuada com algarismos significativos até à n -ésima posição, quando x possui n algarismos significativos; o número de algarismos significativos de e^x ou 10^x é igual à posição do último algarismo significativo observado em x após a vírgula decimal.

Para ilustrar este último conjunto de regras, apresentam-se os seguintes exemplos [ASTM E29-04 (2004)]: $\ln(3,46) = 1,241$ — com 3 algarismos após a vírgula decimal em virtude de $x = 3,46$ possuir 3 algarismos significativos. $10^{3,46} = 2900$ — com dois algarismos significativos, porque $x = 3,46$ tem dois algarismos após a vírgula decimal.

Anexo 7.2 Lei de Propagação de Incertezas

A obtenção da Lei de Propagação de Incertezas (LPI) resulta de um tratamento matemático que parte da relação funcional,

$$y = f(x_1, \dots, x_N) \quad (7.2.1)$$

onde os x_i representam estimativas de grandezas X_i , para as quais, existe um vector de valores esperados (μ_1, \dots, μ_N) . Da aplicação à relação anterior do desenvolvimento em série de Taylor de 1.ª ordem em torno do valor dos μ_i , (admitindo um comportamento linear) resulta a seguinte expressão:

$$y = f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot (x_i - \mu_i) + r_2(x_i) \quad (7.2.2)$$

onde μ_i e x_i representam, respectivamente, o valor esperado e a estimativa de cada grandeza de entrada, r_2 representa o resto de 2.ª ordem do desenvolvimento em série de Taylor e $f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$ representa o valor esperado μ_y , da grandeza a medir, y .

Sabendo que $\mu_y = f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$, a expressão anterior pode ser modificada transferindo o primeiro termo do segundo membro para o primeiro membro,

$$y - \mu_y = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot (x_i - \mu_i) + r_2(x_i) \quad (7.2.3)$$

A utilidade desta modificação consiste em permitir constituir a diferença de base da definição da variância da grandeza de saída. Usando a definição da variância e o resultado anterior resulta, portanto, uma expressão desse parâmetro (considerando que o modelo é linear, então, $r_2(x_i) = 0$):

$$\hat{\sigma}_y^2 = E[(y - \mu_y)^2] = E \left[\left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot (x_i - \mu_i) \right)^2 \right] \quad (7.2.4)$$

É com base nesta relação que se estabelece a LPI expressa no ISO-GUM (1995):

$$s_y^2 = E \left[\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot (x_i - \mu_i) \cdot (x_j - \mu_j) \right) \right] \quad (7.2.5)$$

Atendendo a que os termos diferenciais são constantes em cada posição e considerando as propriedades do valor expectável,

$$s_y^2 = \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot E[(x_i - \mu_i) \cdot (x_j - \mu_j)] \right) \quad (7.2.6)$$

Separando, no segundo termo, as componentes relativas a grandezas de entrada individuais, i , das que respeitam a pares de grandezas de entrada distintas, $i \neq j$, resulta a expressão mais conhecida da LPI:

$$s^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot E[(x_i - \mu_i)^2] + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot E[(x_i - \mu_i) \cdot (x_j - \mu_j)] \quad (7.2.7)$$

Em particular, nota-se que o segundo termo do segundo membro se encontra relacionado com a possibilidade de existência de covariância entre pares de grandezas de entrada. Substituindo os valores esperados expostos na expressão pela simbologia associada às variâncias e covariâncias, resulta a pretendida relação entre a variância da grandeza de saída e as variâncias e covariâncias das grandezas de entrada:

$$s^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot s_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot s_{ij} \quad (7.2.8)$$

onde s_{ij} representa a covariância estabelecida entre cada par de grandezas aleatórias (x_i, x_j) , sendo equivalente a $(r_{ij} \cdot s_i \cdot s_j)$, em que r é o coeficiente de correlação para as variáveis em causa. Consequentemente, quando não existe correlação ou quando se admite que esta é desprezável ($r_{ij} \cong 0$, com $i \neq j$), a equação anterior toma a forma simplificada seguinte:

$$s^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot s_i^2 \quad (7.2.9)$$

Estas duas expressões têm sido difundidas pelo ISO-GUM (1995), usando a nomenclatura que foi apresentada anteriormente, com a presença de correlação — Equação (7.2.10) — ou sem correlação entre as grandezas de entrada — Equação (7.2.11):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i \cdot c_j \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (7.2.10)$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7.2.11)$$

8 EXEMPLOS DESCRITIVOS DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE CAUDAL

8.1 Introdução

Nos capítulos 3 a 7 foram tratados diversos aspectos parcelares dos sistemas de medição de caudal adequados a escoamentos sob pressão e a escoamentos com superfície livre — aspectos de hidráulica, princípios e tecnologias de transdução, aspectos electrotécnicos e aspectos metrológicos, designadamente —, tendo ficado bem patente a existência de grande diversidade de situações práticas e soluções técnicas.

A abordagem desses sistemas na sua globalidade é feita no presente capítulo, de forma muito sucinta, com base na apresentação de exemplos descritivos de tipos usuais dos sistemas em questão.

8.2 Exemplo de um sistema de medição de caudal de água em escoamento sob pressão

Trata-se de um sistema de medição de caudal em escoamento unidireccional de água sob pressão numa conduta de aço galvanizado com diâmetro nominal DN 1000 (adiante designada por «conduta principal»), enterrada, sendo os valores por ele medidos destinados a facturação.

O sistema inclui um caudalímetro electromagnético tubular, cujo primário tem revestimento interior de ebonite⁹¹ e flanges de classe de pressão (vulgarmente chamada “pressão nominal”) PN 10⁹². A sua instalação está esquematizada na Figura 8.1.

⁹¹ Material apropriado para utilização com água destinada a consumo humano; denominado *hard rubber* em inglês.

⁹² Ver o primeiro parágrafo da secção 4.4.1.

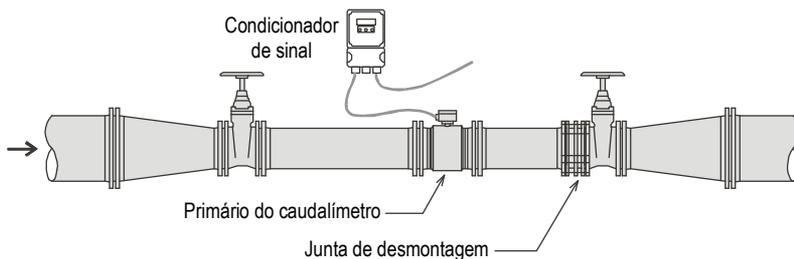


Figura 8.1 – Esquema da instalação do caudalímetro electromagnético tubular componente do sistema de medição de caudal de água

O primário foi dimensionado para os valores de caudal que constam no Quadro 8.1. Qualquer dos dois métodos de dimensionamento hidráulico descritos na secção 4.4.2 forneceu DN 500 como valor adequado do seu diâmetro nominal; o correspondente valor do diâmetro interior do primário, fornecido pelo fabricante, é $D = 489$ mm.

No Quadro 8.1 apresentam-se também os valores da velocidade média do escoamento no primário — calculados pela Equação (3.14) — correspondentes aos caudais de dimensionamento e, com base neles e atendendo aos critérios mencionados na referida secção do Capítulo 4, justifica-se a adequação do diâmetro nominal do primário àqueles valores do caudal.

Quadro 8.1 – Primário do caudalímetro electromagnético do sistema de medição de caudal de água: valores da velocidade média do escoamento correspondentes aos caudais de dimensionamento e justificação da adequação do seu diâmetro nominal

Caudal de dimensionamento			Velocidade média no primário		Justificação da adequação do diâmetro nominal do primário*
Designação	Valor		Designação	Valor (m s ⁻¹)	
	(m ³ h ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)			
Q	2600	0,722	U	3,84	Valor de U suficientemente próximo do intervalo [4 m s ⁻¹ , 5 m s ⁻¹] recomendado
Q _{max}	3500	0,972	U _{max}	5,18	Valor de U _{max} < 6 m s ⁻¹
Q _{min}	600	0,167	U _{min}	0,89	Valor de U _{min} > 0,5 m s ⁻¹

* Ver a secção 4.4.2 (terceiro parágrafo após a Figura 4.15).

Do ponto de vista hidráulico, os aspectos adequados⁹³ da instalação do primário do caudalímetro que importa realçar são os seguintes:

- a conduta de instalação do primário — adiante designada abreviadamente por «conduta de instalação» — tem diâmetro nominal igual ao do primário e declive ascendente no sentido do escoamento de 7,0% (7,0 cm por metro de desenvolvimento em planta), a que corresponde um ângulo de inclinação de 4°;
- os comprimentos rectos a montante e a jusante do primário são, respectivamente, de 5,2 $D_n = 2600$ mm (desde o plano dos eléctrodos do primário até à face da flange de ligação à válvula de montante) e 3,2 $D_n = 1600$ mm (desde o referido plano até à face da flange de ligação à junta de desmontagem), sendo D_n o diâmetro interior fictício do primário que, expresso em milímetros, é numericamente igual ao valor do seu diâmetro nominal;
- a junta de desmontagem está ligada à extremidade de jusante da conduta de instalação — localização correcta desse acessório, da qual o caso ilustrado na Figura 8.2 é um exemplo, mas não tão frequente como deveria ser, pois a localização incorrecta que a Figura 8.3 apresenta não é rara;
- as válvulas de secionamento a montante e a jusante da conduta de instalação são de cunha elástica — de passagem plena quando totalmente abertas, por conseguinte;
- os cones de ligação da conduta de instalação à conduta principal têm um ângulo de abertura total de 15° — ou seja, um ângulo de semi-abertura de 7° 30', como vulgarmente são também identificados.

⁹³ Comparar com o exposto na secção 4.5.1.

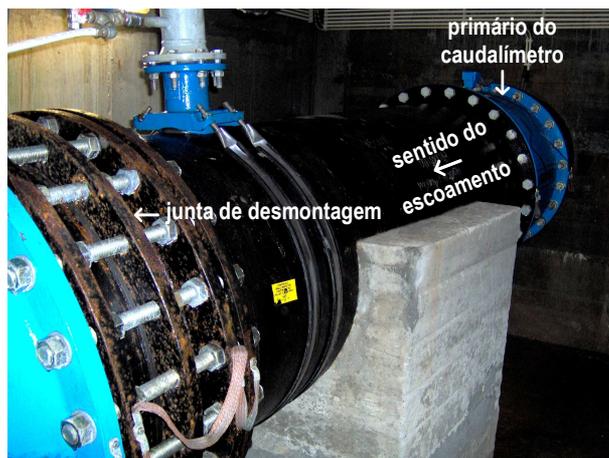


Figura 8.2 – Caudalímetro electromagnético na saída da Estação Elevatória de Seixo Alvo (sistema de abastecimento “em alta” da empresa Águas do Douro e Paiva, S.A.): junta de desmontagem ligada à extremidade de jusante da conduta de instalação do primário (localização correcta)



Figura 8.3 – Caudalímetro electromagnético de um sistema de abastecimento de água: junta de desmontagem imediatamente a jusante do primário (localização incorrecta)

A conduta de instalação é de aço galvanizado (tal como a conduta principal) e tem 508 mm de diâmetro exterior e 11 mm de espessura de parede, sendo portanto o seu diâmetro interior de 486 mm, inferior em 3 mm ao do primário. Assim, não foi possível neste caso cumprir o que é recomendado nas normas ISO 6817 (1992) e ISO 9104 (1991) quanto à relação entre os diâmetros interiores do

primário e da conduta de instalação⁹⁴: o diâmetro interior desta não deve ser inferior ao daquele nem excedê-lo em mais de 3%; no entanto, a diferença entre os dois diâmetros interiores é tão pequena que eles podem ser considerados praticamente iguais.

Visto a conduta de instalação ser metálica, foram realizadas todas as ligações de equipotencialização entre o primário e os troços dessa conduta a ele adjacentes.

O primário do caudalímetro está ligado ao condicionador de sinal (secundário) por um cabo de comprimento reduzido.

Na cadeia de medição de caudal, que está esquematicamente representada na Figura 8.4, o secundário do caudalímetro comunica por transmissão série com um autómato que assegura funções de aquisição de dados e de controlador do automatismo local. O mesmo autómato integra-se num sistema de telegestão por ligação telefónica fixa da rede pública através de *modem*.

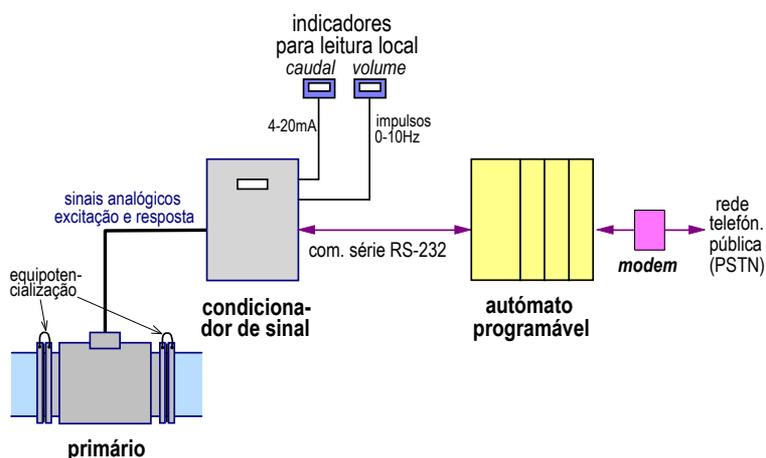


Figura 8.4 – Esquema geral da cadeia de medição de caudal de água

Os equipamentos prioritários do sistema de medição de caudal são servidos por energia eléctrica em regime não interruptível, a 24 Vdc, conforme as indicações constantes na secção 6.6.4, Figura 6.19. O secundário do caudalímetro, bem como os dispositivos de automação (PLC), de comunicação (*modem* PSTN) e de energia (fontes de alimentação, órgãos de protecção contra sobretensões e contra sobretensões, carregador de baterias) estão

⁹⁴ Já anteriormente referido na nota de pé-de-página n.º 44.

instalados em armário. Os acumuladores residem em resguardo separado, ventilado e não metálico.

8.3 Exemplos de sistemas de medição de caudal de águas residuais em escoamento com superfície livre em conduta

8.3.1 Sistema de medição de caudal em colector de DN 400

O sistema de medição de caudal que adiante se descreve, doravante designado por «sistema de medição 1», satisfaz os seguintes requisitos gerais:

- medição de caudal num trecho de um colector de uma rede de drenagem de águas residuais urbanas, já em exploração, constituído por um tubo de PVC⁹⁵ de secção circular, com diâmetro nominal DN 400 e classe de pressão PN 4⁹⁶, e declive constante de cerca de 4% — adiante designado por «trecho de medição»;
- valores medidos do caudal destinados a facturação;
- cadência de medição com período mínimo de 1 min;
- registo programado de dados, com arquivo local de valores medidos com período mínimo de 5 min;
- acesso remoto a partir de posto central de supervisão.

As condições hidráulicas de serviço previstas no trecho de medição foram as seguintes:

- caudal médio moderado (correspondente a uma altura média do escoamento aproximadamente igual a 1/3 do diâmetro do colector);
- possibilidade incidental, embora esporádica, de enchimento total (ou, como é usual dizer-se, de “entrada em carga”).

O trecho de medição está ligado, pela sua extremidade de jusante, a uma câmara de visita de betão conforme com a norma EN 1917 (2002).

⁹⁵ Poli(cloreto de vinilo).

⁹⁶ De acordo com o catálogo do fabricante, o tubo em questão tem as seguintes características dimensionais: diâmetro exterior = 400,0 a 401,2 mm; espessura de parede = 7,9 a 8,9 mm.

Quanto a tecnologias de transdução, o sistema de medição 1 fundamenta-se numa solução multissensorizada, com redundância, que inclui os seguintes sensores primários:

- transdutor ultrassónico de velocidade baseado no efeito Doppler de onda contínua, com dois feixes;
- transdutor ultrassónico de nível baseado no princípio do tempo de propagação (ou tempo de trânsito, como também se diz) fora do líquido, com quatro feixes;
- transdutor adicional de nível por medição da pressão hidrostática.

Os sensores primários estão agrupados em dois blocos, um fixado na parte inferior e o outro na parte superior da conduta no local de medição, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 8.5. Cada bloco, com os respectivos cabos, é adequado a funcionar em submersão permanente.

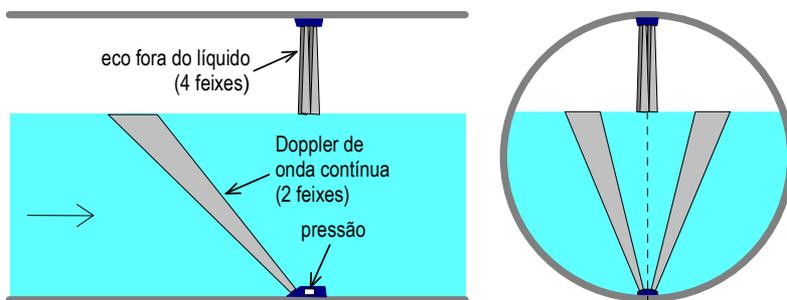


Figura 8.5 – Descrição esquemática da combinação de sensores no sistema de medição 1

Os sensores primários estão ligados por cabos a uma unidade de condicionamento de sinal e processamento de dados, que tem as seguintes características funcionais mais relevantes:

- capacidade para realizar processamento de dados calculando, em tempo real, valores de caudal a partir dos sinais provenientes dos transdutores;
- memória para armazenamento de dados dos vários sensores em separado, correspondentes, no mínimo, a um mês de operação com registos a intervalos de 5 min;
- consola interna para parametrização/comando local dotada de mostrador digital onde podem ser visualizados valores de medições;

- adequação a funcionamento em submersão e em ambiente explosivo;
- acesso remoto a partir de *modem* GSM;
- disponibilidade de acumuladores eléctricos que lhe conferem autonomia energética para operar durante um mês e de bateria de acumuladores de substituição.

A fixação dos sensores primários no trecho de medição é feita por meio de cinta de montagem, a cerca de 1,2 m a montante da câmara de visita, conforme ilustrado na Figura 8.6.

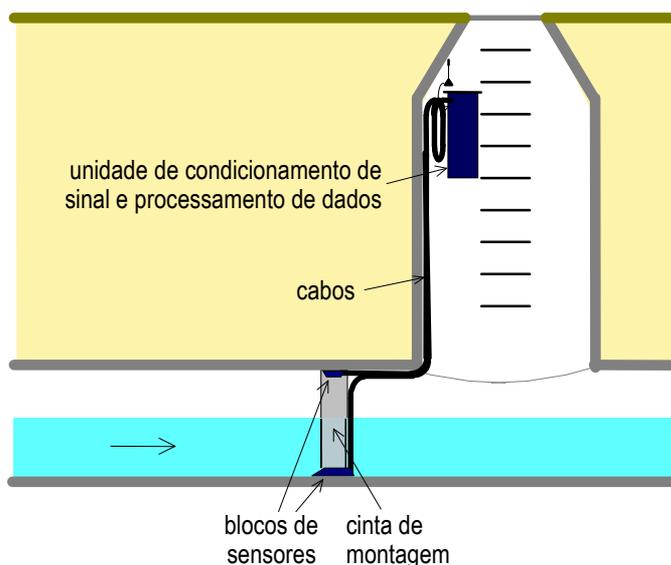


Figura 8.6 – Disposição de montagem dos equipamentos para medição de caudal no sistema de medição 1

Como localmente não havia condições para construir uma caseta exterior para resguardo do equipamento, a unidade de condicionamento de sinal e processamento de dados — cujas características são totalmente apropriadas para o efeito — ficou instalada na câmara de visita, onde existe risco de inundação temporária e também risco de explosão.

Os dados arquivados nessa unidade são posteriormente transferidos para computador (PC) munido de *software* que permite realizar o seu tratamento adicional.

A empresa SANEST, S.A., entidade gestora do Sistema Multimunicipal de Saneamento da Costa do Estoril, possui diversos siste-

mas de medição de caudal de tecnologia semelhante à do que acabou de ser descrito (apenas diferindo dele, eventualmente, quanto ao número de feixes dos sensores, ao material das condutas, ou à localização da unidade de condicionamento de sinal e processamento de dados).

8.3.2 Sistema de medição de caudal em colector de DN 1000

O sistema de medição de caudal que agora vai ser descrito, adiante designado por «sistema de medição 2», cumpre requisitos operacionais semelhantes aos referidos para o sistema de medição 1, mas em colector de betão com secção circular de DN 1000, sendo a altura do escoamento no trecho de medição não inferior a 20 cm.

Neste caso, foi possível construir uma caseta exterior destinada a resguardo de equipamento, com instalação de energia eléctrica e ligação à rede telefónica pública.

A tecnologia de transdução do sistema de medição 2 consiste numa solução de multissensorização, com redundância, possuindo a seguinte combinação de sensores primários:

- transdutor ultrassónico de perfis de velocidades baseado no efeito Doppler de onda pulsada, múltiplo, com dois feixes, permitindo uma resolução espacial de velocidades de 50 mm;
- transdutor ultrassónico de nível baseado no princípio do tempo de trânsito no líquido, com um feixe.

Estes sensores estão agrupados num único bloco, fixado na parte inferior do trecho de medição, conforme indicado na Figura 8.7.

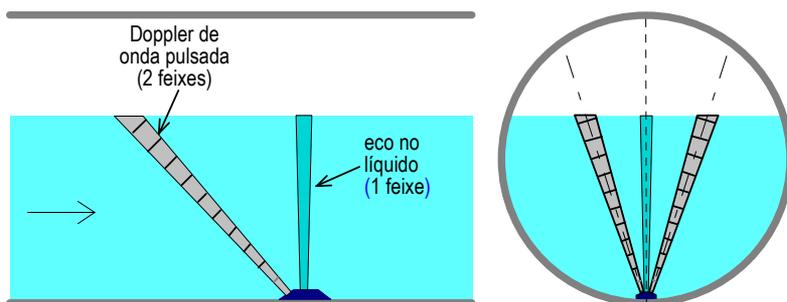


Figura 8.7 – Descrição esquemática da combinação de sensores no sistema de medição 2

A fixação do bloco de sensores é feita por meio de uma chapa de montagem (ver a Figura 5.46), a cerca de 3 m a montante da câmara de visita, conforme ilustrado na Figura 8.8.

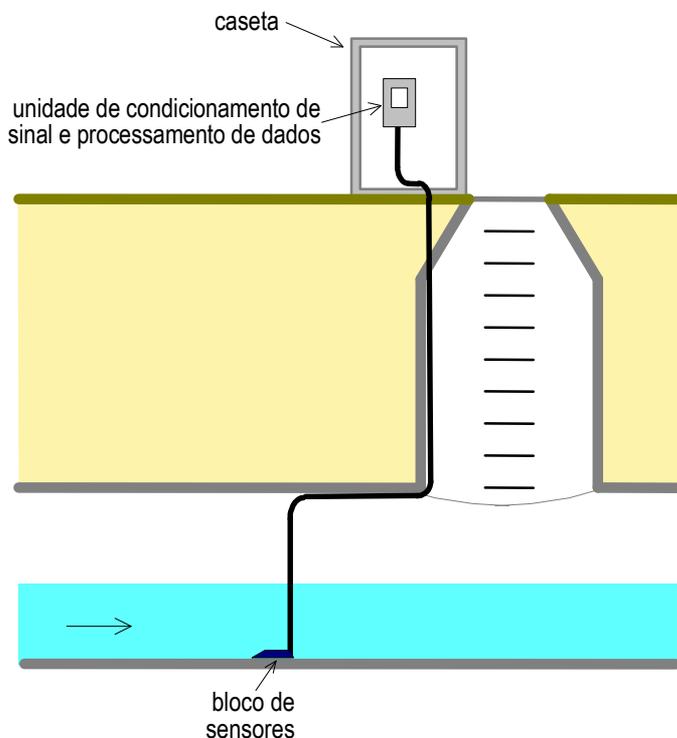


Figura 8.8 – Disposição de montagem dos equipamentos para medição de caudal no sistema de medição 2

A unidade de condicionamento de sinal e processamento de dados, que se encontra instalada na caseta em ambiente resguardado, não tem exigência de índice de protecção elevado (bastando IP54), estando expostos a sua consola e o respectivo mostrador. As suas características funcionais são idênticas às da unidade correspondente do sistema de medição 1.

A autonomia energética do sistema de medição 2, em regime não interruptível, provém de carregador automático e acumuladores ácidos.

8.4 Simbologia

Quadro 8.2 – Simbologia utilizada no Capítulo 8

Símbolo	Grandeza	Unidade de medida SI
D	Diâmetro interior do primário de um caudalímetro electromagnético tubular	m
D_n	Diâmetro interior fictício do primário de um caudalímetro electromagnético tubular que, expresso em milímetros, é numericamente igual ao valor do seu diâmetro nominal	m
Q	Caudal médio de dimensionamento	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Q_{max}	Caudal máximo de dimensionamento	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Q_{min}	Caudal mínimo de dimensionamento	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
U	Velocidade média no primário de um caudalímetro electromagnético correspondente a Q	m s^{-1}
U_{max}	Velocidade média no primário de um caudalímetro electromagnético correspondente a Q_{max}	m s^{-1}
U_{min}	Velocidade média no primário de um caudalímetro electromagnético correspondente a Q_{min}	m s^{-1}

8.5 Bibliografia

ISO 6817 – *Measurement of conductive liquid flow in closed conduits – Method using electromagnetic flowmeters*. Genève (Suiça), International Organization for Standardization, 1992.

ISO 9104 – *Measurement of fluid flow in closed conduits – Methods of evaluating the performance of electromagnetic flow-meters for liquids*. Genève (Suiça), International Organization for Standardization, 1991.

EN 1917 – *Concrete manholes and inspection chambers, unreinforced, steel fibre and reinforced*. Bruxelas, CEN – European Committee for Standardization, 2002.

9 TÓPICOS GERAIS PARA A ELABORAÇÃO DE CADERNOS DE ENCARGOS

9.1 Introdução

As entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água ou de sistemas de saneamento de águas residuais urbanas têm normalmente necessidade de promover, na qualidade de donos-de-obra, concursos para fornecimento e instalação de equipamentos e sistemas de caudalimetria. Quando dispõem de recursos humanos com as valências técnicas e a experiência adequadas, essas entidades podem preparar o projecto de algumas ou de todas as partes envolvidas e, nalguns casos, realizar até a própria instalação.

Mas é frequente terem de recorrer a concursos para fornecimento e instalação dos sistemas de caudalimetria, no todo ou em parte. Esses concursos são, muitas vezes, de concepção-construção, sendo deixada aos concorrentes a liberdade de proporem os equipamentos que representam comercialmente ou que consideram ser alternativas preferenciais no balanço técnico-económico.

Em qualquer destes casos, torna-se indispensável impor criteriosamente um conjunto de requisitos mínimos nas Condições Técnicas que integram o respectivo Caderno de Encargos. Foi para facilitar a preparação desse tipo de documento que se organizou a informação contida no presente capítulo. Ao longo dele chama-se a atenção para aspectos técnicos de diferentes especialidades e para requisitos complementares igualmente indispensáveis. Em alguns casos remete-se para secções específicas dos capítulos precedentes.

Os conteúdos estão naturalmente resumidos, na forma de tópicos, devendo, na generalidade dos casos, ser adaptados e desenvolvidos para cada situação concreta. Por outro lado, a experiência acumulada com a elaboração deste tipo de especificações, face à sua validação prática posterior, permitirá refinar sucessivamente os conteúdos e termos dos cadernos de encargos, valorizando a sua eficácia em situações futuras.

As indicações que se seguem não evitam, de modo algum, o estudo técnico dos sistemas de caudalimetria antes de promover a sua execução, ou o acompanhamento do estudo se esta se vier a

concretizar na modalidade de concepção-construção. As condicionantes económicas estão fora do âmbito das recomendações aqui reunidas, não obstante terem especial importância para as opções e decisões a tomar e requererem estudo específico.

9.2 Comentários prévios

Tem-se provado ser prejudicial, em muitos casos, a falta de articulação entre diferentes especialidades técnico-científicas, mesmo quando elas aparentam ser relativamente independentes. Por isso, essa articulação deve ser insistentemente promovida logo desde a fase de estudo inicial e mantida na elaboração de projectos e respectivos cadernos de encargos.

Será fundamental que outros equipamentos e sistemas (por exemplo, grupos electrobomba, variadores electrónicos de velocidade, sistemas de tratamento, instrumentos de medição da qualidade do líquido, sistemas de ventilação, etc.) que existam nos mesmos espaços físicos dos sistemas de caudalimetria, ou na sua vizinhança, também sejam encarados pelas influências que sobre estes poderão ter. Ainda mais preocupantes poderão ser as consequências sobre o desempenho dos sistemas de caudalimetria resultantes da instalação *a posteriori* desses outros equipamentos e sistemas, se não forem então avaliadas essas influências.

O carácter exigente das especificações relativas à instalação de instrumentação de caudalimetria propriamente dita deve ser estendido a outra instrumentação complementar que eventualmente seja incluída nos mesmos concursos, em particular para medição de pressão e de nível.

9.3 Requisitos referentes a caudalímetros para escoamentos sob pressão e sua instalação

Relativamente a qualquer caudalímetro para escoamentos sob pressão, os requisitos técnicos a incluir no Caderno de Encargos devem contemplar, nomeadamente, os seguintes aspectos:

- tipo do caudalímetro e tecnologia de transdução;
- especificações dimensionais;

- características metrológicas relevantes (p.ex. gama de medição, intervalo de indicação, resolução, repetibilidade — ver a secção 7.5);
- níveis de incerteza de medição pretendidos;
- especificações da primeira calibração e do conteúdo informativo do respectivo certificado (ver as secções 4.6.2 e 7.6.4) — documento que deve ser sempre fornecido juntamente com o caudalímetro;
- especificações funcionais (p.ex. parametrização mínima a disponibilizar, capacidade de memorização de dados, limitação de acessos à parametrização, condições de recomeço em caso de falta de energia, unidades de afixação dos valores medidos da grandeza, capacidade de funcionamento unidireccional ou bidireccional);
- interfaces eléctricas (analógicas, binárias, de comunicação digital);
- ligações eléctricas entre elementos primário e secundário tão curtas quanto possível;
- grau de protecção e de adequação ambiental das diferentes partes e das suas ligações.

A formulação dos requisitos técnicos acima mencionados não deve ignorar certas questões geralmente importantes, tais como as seguintes:

- conveniência de uniformizar, tanto quanto possível, todos os equipamentos de caudalimetria num sistema de abastecimento de água ou de saneamento de águas residuais urbanas, ou em vários deles, sob gestão da mesma entidade;
- conveniência de compatibilizar funcionalmente os equipamentos de caudalimetria a adquirir com outros equipamentos e sistemas de aquisição, automação e comunicação já existentes no(s) sistema(s) em causa;
- conveniência de preservar as características metrológicas consideradas relevantes ao longo de todos os órgãos interpostos na cadeia de medição de caudal;
- implicações com aspectos de manutenção e de calibração periódica (ver as secções 4.6.1, 4.6.2 e 9.8).

Se um estudo prévio à elaboração do Caderno de Encargos, que tenha considerado devidamente os requisitos e as questões acima expostos, tiver já definido marcas e modelos do equipamento a adquirir, não será então necessário discriminar a totalidade das especificações anteriores. Todavia, mesmo nesse caso, não devem ser descuradas as especificações referentes a calibração prévia, instalação e manutenção.

Devem ser formuladas exigências muito estritas quanto ao acondicionamento, transporte e instalação dos componentes do caudalímetro.

Deve ficar previsto o aviso atempado do instalador ao dono-de-obra relativamente ao início e duração dos trabalhos de instalação, para dar oportunidade à presença de técnicos deste último, ou de entidade de sua confiança, para acompanhamento desses trabalhos.

Os aspectos hidráulicos de instalação do primário do caudalímetro, ou do(s) transdutor(es) deste montado(s) sobre a conduta, devem motivar exigências específicas — em especial no que diz respeito aos comprimentos rectos de conduta a montante e a jusante — que traduzam o que de pertinente é referido na secção 4.5.

Se a conduta de instalação — do primário ou do(s) transdutor(es) do caudalímetro — e seus acessórios de montagem/desmontagem, seccionamento e ligação fizerem parte do fornecimento, os seguintes requisitos devem ser incluídos no Caderno de Encargos:

- definição dos esquemas completos de protecção anticorrosiva da conduta de instalação e dos seus acessórios;
- identificação da norma europeia [EN 1092-1 (2001) ou EN 1092-2 (1997)] ou internacional [ISO 7005-1 (1992) ou ISO 7005-2 (1988)] de referência para as flanges de ligação;
- localização de eventual junta de desmontagem na extremidade de jusante da conduta de instalação, de modo a proporcionar um valor adequado do comprimento recto a jusante;
- tipo das válvulas de seccionamento — de passagem plena, de preferência com obturador de cunha elástica — e sua localização na conduta de instalação — uma na extremidade de montante, a outra na de jusante, ou ligada à junta de desmontagem, se esta existir;

- definição dimensional dos cones, ou identificação das transições concêntricas de acordo com a norma ASME B16.9-2003 (2004), de ligação da conduta de instalação à conduta principal (ver a secção 4.5).

Se o caudalímetro for electromagnético tubular, deve ser exigido que o fabricante quantifique o diâmetro interior do primário (ver o segundo parágrafo da secção 4.4.1) e as respectivas tolerâncias.

No caso de o caudalímetro ser ultrassónico deve ser exigida uma metodologia muito rigorosa de verificação dimensional da colocação dos órgãos emissores e receptores acústicos. Deve também ser exigida uma adequada compensação do efeito da temperatura.

Deve ser exigido que as ligações eléctricas aos componentes do caudalímetro sejam executadas de forma muito cuidada, designadamente as de equipotencialização, as de terra de protecção e de sinal, e as de contacto com as blindagens. Os pontos de passagem de cablagens para os aparelhos são frequentemente comprometedores do grau de estanquidade que estes, por si só, asseguram, pelo que é essencial exigir e verificar a sua correcta execução.

Deve ser responsabilizado o instalador pela mobilização dos recursos adequados para os trabalhos de instalação, teste e colocação em serviço de todos os equipamentos, de acordo com as melhores regras da arte. Acerca dos requisitos de qualificação dos instaladores e dos respectivos recursos humanos atente-se na secção 9.11.

9.4 Requisitos referentes a caudalímetros para escoamentos com superfície livre e sua instalação

9.4.1 Caudalímetros para escoamentos com superfície livre em canal

No caso de um caudalímetro com descarregador de soleira delgada, os requisitos a considerar devem ser designadamente os seguintes:

- tipo de descarregador, sua definição geométrica e respectivas tolerâncias dimensionais;

- identificação das normas de referência para dimensionamento, construção, instalação e operação [BS 3680-4A (1981), ISO 1438 (1975) ou ISO 1438-1 (1980)];
- definição geométrica, tolerâncias dimensionais e, eventualmente, requisitos quanto ao acabamento superficial das paredes e do fundo do canal de alimentação do descarregador;
- localização e requisitos de dimensionamento do poço de medição de nível (ver a secção 5.2.5);
- tipo e características metrológicas relevantes do medidor de nível — resolução, alcance e máxima incerteza de medição padrão, designadamente;
- requisitos hidráulicos de instalação (ver a secção 5.7);
- requisitos hidráulicos de operação, incluindo, se for necessária, a instalação de dispositivos de tranquilização e regularização do escoamento na entrada do canal de alimentação do descarregador;
- requisitos de adequado arejamento do jacto no caso de um descarregador Bazin.

Tratando-se de um caudalímetro com caleira, quer seja Venturi ou Parshall, deve-se sempre exigir que ela funcione em condições de descarga livre em toda a gama de valores previstos do caudal.

Exceptuando os que são referidos na última alínea, os requisitos da lista acima apresentada, devidamente adaptados⁹⁷, devem também ser considerados para um caudalímetro com caleira.

9.4.2 Caudalímetros para escoamentos com superfície livre em conduta

Para medição do caudal de águas residuais em conduta parcialmente cheia deve ser dada preferência a caudalímetros baseados em soluções de multissensorização e com redundância de órgãos de transdução que, para além disso, sejam pouco susceptíveis a depreciação motivada pela presença de sedimentos e por acções mecânicas e químicas no ambiente agressivo típico do local de instalação.

⁹⁷ Ou seja, com «caleira» em lugar de «descarregador».

Deve ser referida explicitamente a exigência de comportamento adequado nas gamas de caudal previsíveis, com especial atenção às situações em que os valores do caudal são baixos (e as alturas do escoamento, por conseguinte, são pequenas) e em que o caudal é elevado (com possibilidade de enchimento total da conduta e consequente transição de escoamento com superfície livre para escoamento sob pressão).

Na transdução ultrassónica de nível por tempo de trânsito fora do líquido devem ser exigidos, pelo menos, dois sensores. Na transdução de velocidade por efeito Doppler ultrassónico devem ser requeridos, pelo menos, dois sensores de valor global (modalidade Doppler de onda contínua) ou, preferencialmente, com capacidade de escrutinar o perfil de velocidades em vários pontos ao longo da sua direcção de medição (modalidade Doppler de onda pulsada). No caso de os medidores de velocidade terem a capacidade de escrutinar perfis de velocidade, poderá ser aliviada a exigência de redundância na medição de nível.

Os vários medidores de velocidade devem ser orientados para direcções distintas por forma a melhor cobrirem a distribuição de velocidades do escoamento na zona de medição. Com transdução ultrassónica deve ser sempre exigida uma adequada compensação de temperatura.

As exigências relativas à qualidade das medições a efectuar devem ser formuladas quanto aos valores globais de caudal, na gama de interesse, explicitando concretamente a geometria da secção a que se referem e ainda a gama de valores da temperatura de serviço. Nas soluções multissensorizadas é conveniente formular também requisitos metrológicos mínimos para cada dispositivo medidor (de velocidade e de nível).

Todo o *software* necessário para operação local do sistema de medição e aquisição, comunicação remota e processamento de dados deve ser exigido com o fornecimento do caudalímetro. É importante que o fornecedor apresente explicitamente o algoritmo de cálculo utilizado para obter o valor de caudal a partir dos valores medidos da velocidade e do nível, nomeadamente nas situações de transição entre escoamento com superfície livre e escoamento sob pressão, e quando algum dos sensores fique a funcionar fora da sua gama de medição.

Deve ser exigida elevada imunidade global do sistema de medição face à saturação ou avaria de algum dos sensores, bem como à capacidade de recuperação automática da condição normal de

serviço quando a ocorrência cessar. Devem ser especificadas as características funcionais pretendidas do *software* de aquisição e processamento de dados, sendo aconselhável a exigência da sua validação, em particular para fazer face a qualquer das referidas ocorrências e, se possível, para providenciar estimativas de incerteza nessas situações.

O sistema sensor terá de suportar imersão por longos períodos e, eventualmente, ambiente explosivo (como é o caso dos sistemas de drenagem de águas residuais urbanas).

Deve ser exigido equipamento robusto, de instalação simples e, tanto quanto possível, não obstrutivo do escoamento, tendo em conta a totalidade dos acessórios necessários (incluindo cablagens). A instalação deve proporcionar a mínima interferência nas condições de escoamento e, simultaneamente, a satisfação rigorosa da geometria da zona de medição e do posicionamento dos sensores (nomeadamente quanto à orientação de feixes ultrassónicos ou de radar).

9.5 Requisitos referentes a sistemas eléctricos de energia, automação, aquisição e supervisão e sua instalação

9.5.1 Sistemas eléctricos de energia

No que respeita aos recursos de energia afectos a sistemas de caudalimetria, deve existir sempre uma instalação de utilização de energia eléctrica convenientemente estruturada, dimensionada e protegida (ver a secção 6.5).

Quer o seu projecto seja elaborado pelo dono-de-obra quer fique a cargo de um instalador externo, a concepção das instalações de energia eléctrica deve contemplar, necessariamente mas não apenas, os seguintes requisitos gerais:

- satisfação de todas as exigências regulamentares de segurança aplicáveis à sua categoria;
- fornecimento de energia eléctrica em regime não interruptível para os equipamentos prioritários;
- adopção de soluções que minimizem a perturbação electromagnética de sinais em circuitos e equipamentos, nomeadamente quanto à qualidade dos sistemas de terras e à implantação dos circuitos de energia face aos de sinal;

- adopção de soluções de localização que minimizem os diversos riscos previsíveis em cada caso;
- adequação dos equipamentos e das canalizações eléctricas aos ambientes, quase sempre com riscos especiais, dos locais de instalação (p.ex. húmidos, sujeitos a inundações, a acções mecânicas intensas e/ou vibrações fortes e a radiação solar, e até com risco de explosão — como é o caso, já antes mencionado, dos sistemas de drenagem de águas residuais).

Quando já existam instalações idênticas tecnicamente actualizadas, as especificações técnicas devem procurar garantir a uniformidade de soluções, de materiais e de equipamentos, que se pode reflectir vantajosamente em termos de operação e de manutenção.

O instalador deve ser incumbido de proceder aos passos necessários para obtenção do licenciamento das instalações que dele necessitem, intervindo o dono-de-obra apenas nos aspectos em que tal se torne indispensável.

9.5.2 Sistemas de automação, aquisição e supervisão

No que concerne aos sistemas de automação, para além das especificações técnicas e funcionais, devem ser tidas em conta as considerações feitas na secção 6.3.2, nomeadamente exigindo soluções normalizadas (normas europeias e, na sua falta, da IEC⁹⁸) de equipamentos (p.ex. autómatos), sistemas (p.ex. redes de transmissão de dados) e linguagens de programação. Por outro lado, há que assegurar a interoperabilidade com outros sistemas de automação e/ou instrumentação existentes.

No que respeita ao estabelecimento de circuitos de sinal, de comunicação e de comando há que requerer:

- a satisfação das exigências regulamentares de segurança aplicáveis;
- a adopção de soluções (quanto aos circuitos e aos equipamentos) que minimizem a susceptibilidade a perturbações electromagnéticas (em particular com origem em descargas atmosféricas e em sistemas perturbadores próximos);

⁹⁸ International Electrotechnical Commission.

- a minimização dos efeitos de inundações, acções mecânicas, radiação solar e outros que possam ser previstos em cada caso.

Se a entidade gestora possuir recursos humanos capazes de efectuar a manutenção futura dos sistemas de automação e aquisição de dados, deve exigir, em sede de Caderno de Encargos, o fornecimento dos próprios recursos de *hardware* e *software* necessários para a programação de todos os equipamentos programáveis ou parametrizáveis da instalação (i.e. programas para PC, unidades portáteis, etc.). Esta hipótese confere alguma flexibilidade contratual ao dono-de-obra na negociação da manutenção dos referidos sistemas a longo prazo, mas deve ser também avaliada face ao acréscimo de responsabilidade.

Idêntica atitude deve ser ponderada a propósito das licenças de programas de desenvolvimento dos ambientes de supervisão, se tal necessidade surgir juntamente com a construção dos sistemas de caudalimetria.

9.6 Requisitos referentes a aspectos de construção civil

Na concepção dos espaços para alojamento de sistemas de caudalimetria devem ser tidas em conta designadamente as seguintes especificações gerais:

- garantia de acessibilidade aos vários órgãos e equipamentos para entrada, retirada, instalação, desinstalação, manutenção e exploração, incluindo as condições adequadas para movimentação dos elementos e acessórios de instalação hidráulica (p.ex. tubos, válvulas de seccionamento, junta de desmontagem) de maiores dimensões, e tendo em atenção os espaços necessários para o pessoal técnico operar com os sistemas auxiliares de apoio a essas manobras;
- minimização do risco de inundações complementada com soluções de drenagem adequadas;
- separação de espaços técnicos, garantindo nomeadamente a adequada localização dos equipamentos eléctricos face aos acessos e aos riscos especiais, sem perder de vista que os sensores primários e os órgãos secundá-

- rios devem ficar a distâncias tão curtas quanto possível entre si;
- existência de meios seguros de acesso (p.ex. escadas com resguardos de protecção dorsal), permanência (p.ex. ventilação, natural ou forçada, que garanta condições ambientais apropriadas) e movimentação (p.ex. pavimentos antiderrapantes) de pessoal;
 - protecção eficaz contra a intrusão.

9.7 Requisitos referentes a testes e colocação em serviço

Deve ser exigida a realização de testes finais exaustivos aos sistemas de energia, automação e instrumentação, no âmbito dos quais também se incluem os testes de funcionamento dos caudalímetros.

Os ensaios a realizar devem subordinar-se a um plano de testes finais, que deve conter procedimentos, critérios de aceitação e prazos.

A elaboração detalhada desse plano deve ser exigida pelo dono-de-obra ao instalador no Caderno de Encargos. Considera-se todavia recomendável impor, desde logo, mesmo que com alguma generalidade, os principais aspectos que esse plano deve contemplar. No que respeita aos sistemas de energia, instrumentação e automação podem seguir-se, por exemplo, as indicações que constam na secção 6.6.6. Deve ser igualmente prevista a necessidade de aprovação, por parte do dono-de-obra, do plano de testes finais que o instalador apresentar.

Deve ficar definida a responsabilidade do instalador em disponibilizar e mobilizar os recursos necessários para a realização dos testes finais, salvo nos aspectos que dependam inevitavelmente da intervenção da entidade gestora.

9.8 Requisitos referentes à manutenção

Considera-se recomendável negociar, logo na fase do concurso para fornecimento/instalação, a manutenção preventiva e correctiva dos equipamentos e sistemas a médio e longo prazo.

Quer essa manutenção fique a cargo do fornecedor quer do dono-de-obra, deve ser exigido ao primeiro a elaboração dos indispensáveis planos de manutenção preventiva e correctiva. Esses planos devem cobrir cada equipamento ou subsistema específico, sem perder de vista as implicações decorrentes da interligação física e funcional das diferentes partes.

É conveniente formular exigências criteriosas quanto ao *stock* de peças sobressalentes destinado a evitar situações de demora nas reparações correctivas, visto que a inactividade de equipamento de medição de caudal pode ter consequências gravosas para a entidade gestora. Deve ser ponderada a conveniência de, em certos casos, a própria entidade gestora assegurar esse *stock*.

Quanto a verificações periódicas e acções correctivas a efectuar sobre os caudalímetros, os planos em questão devem ter em consideração o que é referido nas secções 4.6.1 e 5.8.1.

A manutenção metrológica deve ser prevista, designadamente, exigindo ao fornecedor/instalador a disponibilização de informação relativa a:

- verificações intermédias — entre calibrações sucessivas — de órgãos do sistema de medição, se aplicável;
- recomendações quanto à periodicidade de calibração ou a factores que a possam determinar;
- elementos complementares de caracterização metrológica;
- recomendações de operação com influência no desempenho do sistema de medição;
- elementos que possam contribuir para a identificação de fontes de incerteza e para a sua quantificação;
- procedimentos dedicados à aplicação de correcções (via *software* ou *hardware*) aos valores lidos resultantes de calibração.

9.9 Requisitos referentes a acções de formação de pessoal

Com a adopção de novas marcas ou gerações de equipamentos, ou instalações substancialmente diferentes daquelas já bem conhecidas do pessoal de uma dada entidade gestora, devem ser

previstas, complementarmente ao fornecimento da parte material, acções de formação ou de reciclagem de pessoal técnico orientadas para:

- utilização dos caudalímetros;
- exploração e manutenção dos restantes equipamentos e instalações.

Para cada acção de formação deve ser exigido um plano que explicitamente:

- as competências a alcançar;
- os meios didácticos e os tempos a envolver, bem como o nível dos formadores;
- a compatibilização com os conhecimentos prévios dos formandos;
- o modo de avaliação dos resultados da formação.

9.10 Requisitos referentes a documentos a fornecer

Os concorrentes devem fornecer para concurso documentação técnica relevante relativa aos equipamentos, materiais e, eventualmente, metodologias construtivas que propõem (cf. secções precedentes neste capítulo).

Para além disso, deve ser exigida explicitamente a entrega de documentos de arquivo (em papel e em suporte informático) para exploração e manutenção, nomeadamente:

- documentação de projecto de execução, na versão de telas finais, para as diferentes especialidades envolvidas, onde se incluem construção civil, hidráulica e electrotecnia (energia, instrumentação e automação);
- documentação esquemática completa em conformidade com a execução;
- documentação com todos os dados das parametrizações feitas em aparelhos;
- listagens do *software* de automação e supervisão;
- resultados dos testes finais evidenciando o cumprimento dos critérios estabelecidos no respectivo plano;

- certificados de calibração dos caudalímetros e de outros órgãos do sistema de medição que influenciem os resultados da medição;
- boletins de inspeção e ensaio dos equipamentos;
- plano(s) de manutenção de equipamentos e/ou subsistemas (ver a secção 9.8);
- procedimentos de verificações intermédias entre calibrações sucessivas e procedimentos de calibração interna aplicáveis;
- documentos/ficheiros de apoio didáctico das acções de formação realizadas.

9.11 Requisitos referentes à qualificação das entidades instaladoras e de manutenção e do seu pessoal

Devem ser feitas exigências de qualificação das entidades instaladoras e de manutenção, nomeadamente quanto a:

- certificação da qualidade dos produtos ou das actividades em causa;
- competência técnica do seu quadro de pessoal;
- delimitação muito clara quanto à possibilidade de subempreitadas e seus requisitos;
- habilitação adequada dos laboratórios de ensaios hidráulicos — de preferência fundamentada em acreditação — para a realização de calibrações dos caudalímetros.

9.12 Bibliografia

ASME BS16.9-2003 – *Factory-made wrought butt welding fittings*. New York, NY (EUA), The American Society of Mechanical Engineers, 2004.

BS 3680-4A – *Methods of measurement of liquid flow in open channels – Part 4A: Thin-plate weirs*. Londres, British Standards Institution, 1981.

EN 1092-1 – *Flanges and their joints – Circular flanges for pipes, valves, fittings and accessories, PN designated – Part 1: Steel flanges*. Bruxelas, CEN – European Committee for Standardization, 2001.

EN 1092-2 – *Flanges and their joints – Circular flanges for pipes, valves, fittings and accessories, PN designated – Part 2: Cast iron flanges*. Bruxelas, CEN – European Committee for Standardization, 1997.

ISO 1438 – *Liquid flow measurement in open channels using weirs and Venturi flumes*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1975.

ISO 1438-1 – *Water flow measurement in open channels using weirs and Venturi flumes – Part 1: Thin-plate weirs*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1980.

ISO 7005-1 – *Metallic flanges – Part 1: Steel flanges*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1992.

ISO 7005-2 – *Metallic flanges – Part 2: Cast iron flanges*. Genève (Suíça), International Organization for Standardization, 1988.

Medição de caudal em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas

Num sistema de abastecimento de água ou de saneamento de águas residuais urbanas, a correcta medição de caudal é questão de grande relevância. Com efeito, dela depende o cabal cumprimento de objectivos de gestão e exploração do sistema em causa orientados não apenas para um elevado nível de qualidade do serviço prestado aos utilizadores, mas também para uma boa situação financeira da empresa concessionária do sistema.

O presente Guia Técnico, editado conjuntamente pelo IRAR e pelo LNEC, tem um carácter essencialmente prático e visa proporcionar apoio útil às entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água ou de saneamento de águas residuais na selecção, instalação e utilização de meios adequados de medição de caudal em escoamentos sob pressão ou em escoamentos com superfície livre.



INSTITUTO REGULADOR DE ÁGUAS E RESÍDUOS

Centro Empresarial Torres de Lisboa
Rua Tomás da Fonseca, Torre G, 8.º andar – 1600-209 LISBOA