

Manual Orientativo para Sistemas de Medição de Vazão de Água em Conduitos Forçados

República Federativa do Brasil

Jair Bolsonaro
Presidente da República

Ministério do Desenvolvimento Regional

Gustavo Henrique Rigodanzo Canuto
Ministro

Agência Nacional de Águas

Diretoria Colegiada

Christianne Dias Ferreira
(Diretora-Presidente)
Ney Maranhão (até 16 de julho de 2019)
Ricardo Medeiros Andrade
Oscar Cordeiro Netto
Marcelo Cruz

Secretaria Geral (SGE)

Rogério de Abreu Menescal

Procuradoria-Federal (PF/ANA)

Luís Carlos Martins Alves Júnior

Corregedoria (COR)

Maurício Abijaodi Lopes de Vasconcellos

Auditoria Interna (AUD)

Eliomar Ayres da Fonseca Rios

Chefia de Gabinete (GAB)

Thiago Serrat

Gerência Geral de Estratégia (GGES)

Nazareno Marques de Araújo

Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR)

Sérgio Rodrigues Ayrimoraes Soares

Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica Nacional (SGH)

Marcelo Jorge Medeiros

Superintendência de Tecnologia da Informação (STI)

Sérgio Augusto Barbosa

Superintendência de Apoio ao Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SAS)

Humberto Cardoso Gonçalves

Superintendência de Implementação de Programas e Projetos (SIP)

Tibério Magalhães Pinheiro

Superintendência de Regulação (SRE)

Rodrigo Flecha Ferreira Alves

Superintendência de Operações e Eventos Críticos (SOE)

Joaquim Guedes Corrêa Gondim Filho

Superintendência de Fiscalização (SFI)

Alan Vaz Lopes

Superintendência de Administração, Finanças e Gestão de Pessoas (SAF)

Luís André Muniz

Agência Nacional de Águas
Ministério do Desenvolvimento Regional

**MANUAL ORIENTATIVO PARA
SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO
DE ÁGUA EM CONDUTOS FORÇADOS**

Brasília/DF
ANA
2019

© 2019, Agência Nacional de Águas (ANA)

Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Blocos B, L, M, N, O e T. CEP 70610-200, Brasília/DF

PABX: (61) 2109-5400 / (61) 2109-5252

Endereço eletrônico: www.ana.gov.br

Comitê de Editoração

Diretor

Ricardo Medeiros de Andrade

Superintendentes

Humberto Cardoso Gonçalves

Joaquim Guedes Correa Gondim Filho

Sergio Ayrimoraes Soares

Secretário Executivo

Rogério de Abreu Menescal

Revisão dos originais

Pela ANA

Josimar Alves de Oliveira

Marcus Vinícius de Araújo Mello de Oliveira

Othon Fialho de Oliveira

Pelo IPT

Rubens Silva Telles

Valmir Ruiz

Rui Gomez Teixeira de Almeida

Elaboração

Rubens Silva Telles (Chefe da Seção de Óleo e Gás - CTMetro)

Kazuto Kawakita

Nilson Massami Taira (Diretor do CTMetro)

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT

Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos - CTMetro

Avenida Professor Almeida Prado, 532 - Prédio 37

05508-901 - Butantã - São Paulo / SP

Tel.: (11) 3767-4756

E-mail: ctmetro@ipt.br

Projeto gráfico e diagramação

Gráfica e Editora Movimento

Todos os direitos reservados.

É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesta publicação, desde que citada a fonte.

Catálogo na fonte: CEDOC/BIBLIOTECA

A265m Agência Nacional do Águas (Brasil).
Manual orientativo para sistemas de medição de vazão de água em condutos forçados / Agência Nacional de Águas. – Brasília: ANA, 2019.

102 p. il.

ISBN: 978-85-8210-064-6

1. Vazão - Medição. I. Título.

CDU556.08(035)

FIGURAS

Figura 1. Medidores de vazão de água em uma estação de bombeamento.....	11
Figura 2. Manipulação da água na Antiguidade.	12
Figura 3. A medição de vazão está presente em todas as etapas da indústria da água.	13
Figura 4. Representação da vazão volumétrica de um fluido em uma seção transversal de referência.	14
Figura 5. Tubo de seção circular.	16
Figura 6. Princípio da aderência de um fluido.	17
Figura 7. Bases da definição da viscosidade	18
Figura 8. Fluidos newtonianos e não newtonianos.....	19
Figura 9. Princípio da Lei da Continuidade.....	21
Figura 10. Componentes principais de energia em um escoamento.....	23
Figura 11. Representação do escoamento na ponta de um tubo de Pitot.....	24
Figura 12. Representação de um escoamento em regime laminar.....	27
Figura 13. Representação de um escoamento em regime turbulento.....	27
Figura 14. Perfil de velocidades de um escoamento laminar.	28
Figura 15. Perfil de velocidades de um escoamento turbulento.	28
Figura 16. Perfil de velocidades de um escoamento laminar.	29
Figura 17. Perfil de velocidades de um escoamento turbulento.	29
Figura 18. Assimetria no perfil de velocidades do escoamento provocada por uma curva de 90° e sua atenuação ao longo de um trecho reto de tubulação.....	30
Figura 19. Escoamento helicoidal (swirl) induzido por duas curvas de 90° adjacentes e em planos perpendiculares.	31
Figura 20. Dois modelos de retificador e de condicionador de escoamento.	32
Figura 21. Curva característica de um medidor de vazão linear.....	38
Figura 22. Curva característica de um medidor de vazão não-linear.	38
Figura 23. Exemplo de curva de índice de desempenho de um medidor de vazão.....	39
Figura 24. Exemplo de curva característica baseada no coeficiente de descarga de um medidor de vazão.	40
Figura 25. Exemplo de curva característica de um medidor baseada no fator K	42
Figura 26. Exemplos de modos de declaração dos limites de erro de medida de vazão.	60
Figura 27. Linearidade de um medidor de vazão.....	61

Figura 28. Características de um medidor de vazão do tipo turbina.....	62
Figura 29. Distribuição típica de desempenho dos grupos de medidores de vazão.....	64
Figura 30. Distribuição típica de tamanhos dos grupos de medidores de vazão.....	71
Figura 31. Comparação entre preços de aquisição de medidores de vazão para líquidos.	79
Figura 32. Comparação entre preços de aquisição de medidores de vazão para líquidos.	80
Figura 33. Desempenho metrológicos de um medidor.	94

TABELAS

Tabela 1. Viscosidades dinâmicas de alguns fluidos à temperatura ambiente.....	20
Tabela 2. Velocidades e vazões máximas em redes de abastecimento.	44
Tabela 3. Classificação de medidores de vazão.....	52
Tabela 4. Designações de grupos dos medidores de vazão	53
Tabela 5. Áreas gerais de aplicação de medidores de vazão para líquidos.....	55
Tabela 6. Variáveis para o procedimento de seleção.....	56
Tabela 7. Fatores de desempenho na seleção de medidores de vazão.....	59
Tabela 8. Fatores a serem considerados no procedimento de seleção.	66
Tabela 9. Seleção em função das propriedades do fluido.....	67
Tabela 10. Requisitos gerais de instalação para a seleção de medidores de vazão.	68
Tabela 11. Seleção em função de requisitos ambientais.....	75
Tabela 12. Seleção em função de fatores econômicos.....	78
Tabela 13. Trechos retos requeridos entre placas de orifício e conexões sem o uso de condicionadores de escoamento	89

RESUMO

Este manual é destinado aos projetistas, construtores e usuários de sistemas de medição de água bruta, especialmente dos segmentos de captação, transporte e distribuição de água, além dos profissionais que atuam no suprimento dessa utilidade para plantas industriais. O documento tem como objetivo principal informar e orientar os profissionais da área sobre os princípios básicos envolvidos na atividade da medição de vazão de fluidos, apoiando-os na definição de diretrizes para a medição de vazão de água bruta nos serviços de gestão metrológica das águas, especificamente aos usuários de recursos hídricos. Com base nos fundamentos apresentados, o manual aborda de modo particular aspectos relacionados ao dimensionamento, projeto, construção, instalação e operação de sistemas de medição de vazão de água bruta em condutos forçados. Para a elaboração deste manual, foram consideradas a normatização nacional e internacional existente sobre o assunto, informações técnicas de fabricantes de medidores de vazão, referências bibliográficas da área e recomendações de institutos de pesquisa especializados. Este documento foi elaborado no âmbito do Contrato nº 073/2017/ANA firmado entre a Agência Nacional de Águas – ANA e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO DO MANUAL	11
3	ESCOPO E APLICAÇÃO	13
4	FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE ÁGUA EM CONDUTOS FORÇADOS	14
4.1	O conceito de vazão de um fluido	14
4.2	A tubulação de seção circular	15
4.3	Propriedades dos fluidos	16
4.3.1	Princípio da aderência	17
4.3.2	Massa específica de um fluido	18
4.3.3	Viscosidade de um fluido	18
5	PRINCÍPIOS BÁSICOS PARA A MEDIÇÃO DE VAZÃO DE ÁGUA EM CONDUTOS FORÇADOS	20
5.1	Lei da Continuidade	20
5.2	Lei da Conservação da Energia	22
5.3	Número de Reynolds	25
5.4	Escoamentos laminar e turbulento	26
5.5	Perfis de velocidades	28
5.6	Assimetrias do perfil de velocidades	30
5.7	Escoamento helicoidal	30
5.8	Retificadores e condicionadores de escoamento	31
5.9	Outros fatores que impactam o escoamento e a medição da vazão de um fluido	32
5.9.1	Cavitação	32

5.9.2	Pulsção e vazão não constante	33
5.9.3	Tubulação	33
5.9.4	Válvula	34
5.9.5	Conexões	34
5.9.6	Golpe de ariete	34
5.10	Tipos básicos de medição de vazão	35
5.10.1	Medição da velocidade pontual	35
5.10.2	Medição da velocidade média	35
5.10.3	Medição da vazão volumétrica	36
5.10.4	Medição do volume totalizado	36
5.10.5	Medição da vazão mássica	37
5.10.6	Medição da massa totalizada	37
5.11	Curvas de calibração	38
5.11.1	Medidores de vazão lineares e não lineares	38
5.11.2	Índice de desempenho do medidor	38
5.11.3	Coefficiente de descarga	39
5.11.4	Erro de indicação do medidor	40
5.11.5	Fator do medidor	41
5.11.6	Fator K	41
6	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	42
6.1	Faixa prevista de vazão de operação do processo	43
6.2	Vazão usual de operação prevista	44
6.3	Exatidão esperada das medidas	44
6.4	Faixas de pressão da água esperada na linha	45
6.5	Temperatura média da água	45

6.6	Diâmetro nominal do conduto por onde escoar a água a ser medida	45
6.7	Diâmetro interno efetivo e as condições superficiais internas do conduto.	45
6.8	Disponibilidade ou não de trechos retos de tubulação no local de instalação do medidor	46
7	PROJETO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	46
7.1	Especificação do processo de medição.	47
7.2	Parâmetros para a seleção de um medidor de vazão.	48
7.3	Medidores de vazão utilizados na medição de água bruta em condutos forçados	50
8	SELEÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO FLUIDOS PARA CONDUTOS FORÇADOS . . .	51
8.1	Classificação dos medidores de vazão.	52
8.2	Procedimento geral para seleção de medidor de vazão.	54
8.2.1	Introdução	54
8.2.2	Seleção básica do medidor de vazão	56
8.2.2.1	Especificação inicial da medição.	57
8.2.3	Considerações de desempenho.	58
8.2.3.1	Exatidão de medida	60
8.2.3.2	Repetibilidade de medida	61
8.2.3.3	Linearidade	61
8.2.3.4	Intervalo de medição.	63
8.2.3.5	Incerteza de medida	63
8.2.3.6	Características do sinal de saída.	65
8.2.3.7	Queda de pressão no fluxo máximo.	65
8.2.4	Considerações sobre a instalação de medidores de vazão	66
8.2.4.1	Considerações sobre as propriedades do fluido	67
8.2.4.2	Orientação da tubulação.	69
8.2.4.3	Sentido do escoamento.	69

8.2.4.4	Trechos retos de tubulação a montante e a jusante do medidor	70
8.2.4.5	Tamanhos de linhas	70
8.2.4.6	Local de instalação para fins de manutenção	72
8.2.4.7	Vibração local	72
8.2.4.8	Localização das válvulas	72
8.2.4.9	Conexões elétricas	73
8.2.4.10	Interferência eletromagnética	73
8.2.4.11	Fornecimento de acessórios	73
8.2.4.12	Pulsações e escoamento instável	74
8.2.5	Considerações ambientais	74
8.2.5.1	Geral	74
8.2.5.2	Temperatura ambiente	76
8.2.5.3	Umidade	76
8.2.5.4	Segurança	76
8.2.5.5	Interferência eletromagnética	77
8.2.6	Considerações econômicas	77
8.2.6.1	Geral	77
8.2.6.2	Preço de aquisição	79
8.2.6.3	Custos de instalação	80
8.2.6.4	Custos de calibração	81
8.2.6.5	Custos operacionais	81
8.2.6.6	Custos de manutenção	82
8.2.6.7	Custo e disponibilidade de peças sobressalentes	82
8.2.7	Exemplos de seleção de medidor de vazão	82
8.2.7.1	Geral	82
8.2.7.2	Exemplo 1	83
8.2.7.3	Exemplo 2	85

9	INSTALAÇÃO DO SENSOR, MEDIDOR E ACESSÓRIOS	87
9.1	Efeitos de instalação para perfil de fluxo.	87
9.2	Vibrações - Hidráulica e Mecânica.	88
9.3	Válvulas.	88
9.4	Exemplo: comprimentos mínimos de trechos retos de montante e de jusante entre várias conexões e uma placa de orifício	88
9.5	SPDA.	90
10	OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	91
11	REFERÊNCIAS	92
	ANEXO A - CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	93
	ANEXO B - TERMOS E DEFINIÇÕES	99

1 INTRODUÇÃO

Sob o ponto de vista do controle de processos, a grandeza vazão de fluidos é uma das variáveis mais importantes para a operação de uma planta industrial. A medição da vazão é essencial a todas as fases da manipulação dos fluidos, incluindo a produção, o processamento, além da distribuição dos produtos e das utilidades. Ela está associada à segurança operacional, ao controle e aos balanços de massa nos processos, na garantia da qualidade dos produtos e, do ponto de vista comercial, está diretamente ligada aos aspectos de compra e venda de produtos como água, hidrocarbonetos, produtos químicos e alimentos, entre tantos outros.

Dentre as diversas áreas de aplicação da metrologia de vazão fluidos, podem ser citadas as medições realizadas na área de gestão das águas onde a medição e o controle das vazões e dos volumes de água produzidos, transportados e distribuídos são atividades fundamentais ao gerenciamento adequado dos recursos pelas empresas do setor.

A medição confiável e precisa da vazão de um fluido exige o cumprimento satisfatório de um conjunto de atividades técnicas que envolvem as etapas de seleção, instalação, operação e manutenção do instrumento ou do sistema de medição, além da interpretação correta dos resultados obtidos.



Figura 1. Medidores de vazão de água em uma estação de bombeamento.

2 OBJETIVO DO MANUAL

Ao contrário do que aparenta à primeira vista, a medição correta da vazão de água não é uma atividade trivial.

A imagem folclórica das práticas rudimentares de manipulação e quantificação da água utilizada na Antiguidade, baseadas na totalização de volumes do líquido por meio de vasos ou da medição de vazão baseada na visualização do nível da água escoando sobre vertedores, definitivamente já não se adequa às necessidades metrológicas do mundo moderno. A humanidade evoluiu e as tecnologias de medição de vazão de fluidos foram sendo idealizadas e desenvolvidas, particularmente nas últimas décadas com a introdução cada vez mais frequente de novos e melhores sensores e processadores eletrônicos de sinal.



Figura 2. Manipulação da água na Antiguidade.

Não obstante, mesmo com a ampla disponibilidade de tecnologias de medição de vazão no mercado, não raramente nos deparamos com aplicações inadequadas de medidores sendo utilizados de maneira inapropriada na medição de vazão de água, gases industriais, gás natural, petróleo e seus derivados, bebidas, alimentos, produtos químicos, entre outros.

Para sanar essa dificuldade, o presente documento tem como objetivo principal apresentar aos profissionais da área os princípios básicos envolvidos na atividade da medição de vazão de fluidos.

Com base nos fundamentos apresentados, o manual aborda de modo particular aspectos relacionados ao dimensionamento, projeto, construção, instalação e operação de sistemas de medição de vazão de água bruta em condutos forçados.

Salienta-se que, no conceito atual da área, um sistema de medição de vazão deve ser considerado como um conjunto formado pelo medidor de vazão e os trechos da tubulação a montante e a jusante do mesmo, podendo incluir, ainda, válvulas, filtros, tomadas de pressão e de temperatura, transmissores de pressão e de temperatura,

conversores e indicadores, controladores lógicos programáveis ou computador de vazão, retificadores ou condicionadores de escoamento, atenuadores de pulsação, além de outros acessórios.

A função esperada de um sistema de medição de vazão de água é o fornecimento de medidas de vazão consistentes e representativas do escoamento sob medição, e com um nível de confiabilidade adequado à finalidade proposta. Para isso, espera-se que as informações e orientações disponibilizadas neste documento sejam úteis aos profissionais da área.

3 ESCOPO E APLICAÇÃO

Este manual orientativo se aplica aos projetistas, construtores e usuários de sistemas de medição de água bruta, especialmente dos segmentos de captação, transporte e distribuição de água, além dos profissionais que atuam no suprimento dessa utilidade para plantas industriais.

A finalidade do documento é disponibilizar informações para a definição de diretrizes aplicáveis à medição de vazão de água bruta, especificamente aos técnicos que atuam na gestão de recursos hídricos.

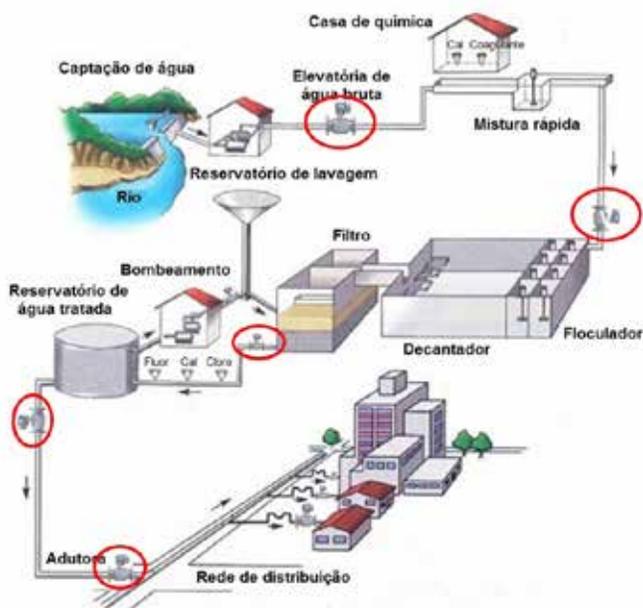


Figura 3. A medição de vazão está presente em todas as etapas da indústria da água.

O documento orientativo foi elaborado considerando os principais fundamentos científicos aplicados à atividade, a normatização nacional e internacional existente sobre o tema, as recomendações de fabricantes e de laboratórios de calibração de medidores de vazão e as tecnologias atualmente disponíveis no mercado.

Ao longo do documento são apresentadas diferentes tecnologias de medição de vazão de fluidos e, por vezes, são utilizadas imagens de modelos de medidores. Tais imagens servem única e exclusivamente para fins de ilustração visando facilitar a explicação e o entendimento do tema tratado, não sendo de nenhuma maneira intenção dos autores deste documento propor ou evidenciar preferências acerca de uma ou de outra tecnologia de medição ou mesmo de um ou de outro fabricante de medidor.

4 FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE ÁGUA EM CONDUTOS FORÇADOS

Para desenvolver de forma apropriada atividades relacionadas à medição de vazão de água em condutos forçados é fundamental conhecer e entender, preliminarmente, os princípios básicos envolvidos na medição, incluindo a definição clara da grandeza que se pretende medir, além da dinâmica e os regimes de escoamento da água que podem ser estabelecidos em um conduto forçado. Esse conhecimento científico da matéria é fundamental para a definição de soluções tecnológicas adequadas e eficazes a cada aplicação.

4.1 O conceito de vazão de um fluido

Quando tomamos uma seção transversal de referência em um conduto forçado (Figura 4), a vazão é a quantidade do fluido, expressa em massa ou em volume, que passa por ela durante um intervalo de tempo. Portanto, o parâmetro vazão pode ser expresso em unidades de volume ou de massa do fluido por unidade de tempo (por exemplo: m^3/s , L/min, kg/s, t/h etc.).

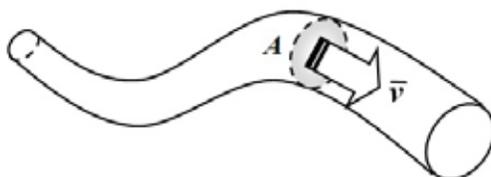


Figura 4. Representação da vazão volumétrica de um fluido em uma seção transversal de referência.

Podemos dizer também que a vazão volumétrica (Q) de um fluido, expressa em m^3/s , é igual ao resultado do produto da velocidade média (\bar{v}) do fluido no escoamento, em m/s , pela área (A) da seção transversal da tubulação, em m^2 . Ou seja:

$$Q = \bar{v} \cdot A \quad (1)$$

Por sua vez, a vazão em massa ou simplesmente vazão mássica (\dot{m}) de um fluido, em kg/s , é igual ao resultado do produto da vazão volumétrica (Q) do fluido, em m^3/s , pela sua massa específica (ρ), em kg/m^3 . Assim:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad \text{X}$$

Na prática, porém, como é difícil e custosa a medição direta e em tempo real da massa específica da água, muitas vezes é utilizado o valor da temperatura média da água para a determinação da sua massa específica com base em fórmulas empíricas disponíveis na literatura. Na prática, são poucas as aplicações de medição de vazão de água onde a massa específica efetiva da água de processo necessite ter o seu valor medido. Essas aplicações normalmente se restringem a medições realizadas em atividades de calibração de medidores de vazão de água em laboratórios.

A partir da medida da vazão volumétrica ou mássica da água, é possível se obter o resultado de sua totalização, na forma de um volume ou de uma massa totalizada, por meio da integração da vazão instantânea ao longo do tempo.

4.2 A tubulação de seção circular

Atualmente, o meio mais comumente utilizado para o transporte de fluidos entre duas localidades ou dois pontos de uma planta industrial é através de uma tubulação de seção circular. O motivo é que o perfil circular de um tubo fornece a maior resistência estrutural e apresenta a maior área transversal por unidade de superfície de parede. Nesse sentido, a menos que explicitado de forma diferente, as palavras tubo e tubulação sempre se referirão a um conduto fechado, com seção transversal circular e com diâmetro interno constante.

Ocasionalmente, são encontrados condutos fechados com seção transversal não circular, comumente utilizados em sistemas de ventilação e de ar condicionado devido às baixas pressões envolvidas e à conveniência ao ambiente de instalação, ou tubulações com seção circular, porém não totalmente preenchidas pelo fluido, comuns em tubulações na área de saneamento básico, a exemplo das redes de esgoto e de águas pluviais. Tais casos não serão abordados neste documento.



Figura 5. Tubo de seção circular.

Outros tipos de escoamentos ocorrem através de condutos livres e movidos pela força da gravidade, a exemplo dos aquedutos e das canaletas de drenagem de águas pluviais e efluentes industriais. Esses escoamentos, e os que ocorrem sem a limitação de condutos ou paredes, como os ventos ou as correntes marítimas, são casos que necessitam um tratamento particular não sendo objeto de abordagem neste documento.

4.3 Propriedades dos fluidos

Na prática, as condições de operação de um sistema onde existe um fluido em escoamento podem ser bastante amplas, a começar pelo próprio fluido que pode ser um gás ou um líquido, e dentre estes estados básicos existem infinitos tipos de fluidos.

As faixas de vazão variam desde vazões imensas como as de um rio caudaloso até diminutas quantidades de gás utilizadas para a alimentação de espectrômetros de massa. As faixas de pressão do fluido no escoamento podem variar desde as condições próximas ao vácuo absoluto até centenas de atmosferas. Por sua vez, as temperaturas do processo podem variar desde temperaturas próximas ao zero absoluto até temperaturas a nível de plasma.

A possibilidade de combinação destas condições em uma matriz n -dimensional torna a metrologia de vazão de fluidos uma das áreas mais interessantes e desafiadoras da Engenharia. Continuaremos, portanto, a seguir abordando as propriedades fundamentais de um fluido e as principais características inerentes aos escoamentos sempre sob o ponto de vista metrológico.

As propriedades dos fluidos determinam como os fluidos podem ser utilizados na Engenharia e na Tecnologia. Elas também determinam o comportamento dos fluidos na natureza, realidade reproduzida nas teorias que embasam a Mecânica dos Fluidos.

Algumas das propriedades básicas importantes dos fluidos para a medição da sua vazão são apresentadas a seguir.

4.3.1 Princípio da aderência

Podemos definir um fluido de forma bastante simples: um fluido é qualquer substância que escoa. Normalmente, os fluidos são classificados segundo os seus estados mais comuns na natureza, ou seja, líquidos e gases. Um líquido, embora escoe com relativa facilidade, caracteriza-se pela dificuldade de ser comprimido. Por outro lado, um gás, devido ao fato de não possuir fronteiras, faz com que o seu volume de controle seja dependente do volume do recipiente que o contém.

De acordo com a termodinâmica convencional, o fluido real, viscoso, seja ele líquido ou gás, é um meio contínuo e cujo escoamento também é contínuo.

O movimento de um fluido gera e é gerado por forças de cisalhamento entre as camadas do fluido, e quando o fluido escoa em uma tubulação, é normal imaginarmos a existência uma fronteira clara entre o fluido e a parede da tubulação, fazendo com que possamos desprezar a relação entre o fluido adjacente e a parede. Sendo assim, admite-se que a velocidade do fluido (v) é igual a “zero” (princípio da aderência) junto à parede e que a mesma aumenta gradualmente na medida em que se distancia da mesma.

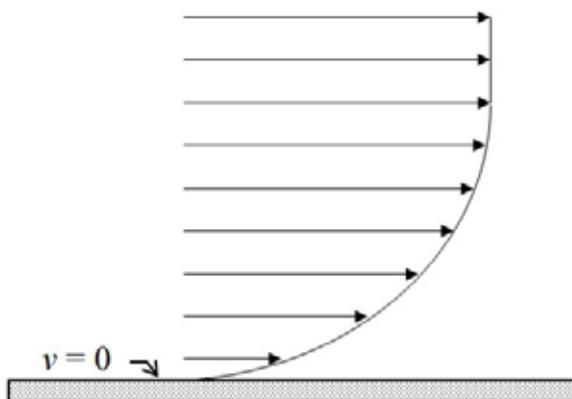


Figura 6. Princípio da aderência de um fluido.

4.3.2 Massa específica de um fluido

A massa específica (ρ) de um fluido é o resultado da relação entre a sua massa (m) e o seu volume (V). Ou seja:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

A título de curiosidade, a massa específica da água pura à temperatura de 21 °C é de 998 kg/m³, valor que equivale, de modo grosseiro, a aproximadamente oitocentos e trinta e duas vezes a massa específica do ar à pressão atmosférica ao nível do mar ($\rho_{\text{ar}} \cong 1,2 \text{ kg/m}^3$).

4.3.3 Viscosidade de um fluido

A viscosidade (μ) de um fluido é a propriedade pela qual o fluido oferece resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, ao seu escoamento. A lei de Newton da viscosidade estabelece que, para uma dada taxa de deformação angular de um fluido ($\dot{\gamma}$), a tensão de cisalhamento (τ) é diretamente proporcional à viscosidade do fluido. O experimento da placa plana móvel colocada sobre uma camada de um fluido mostra a ação desses parâmetros:

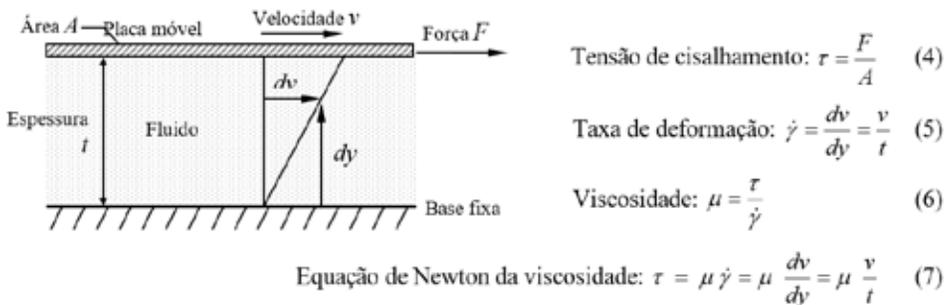


Figura 7. Bases da definição da viscosidade

De acordo com a Figura 8, os fluidos podem ser classificados como *newtonianos* ou *não newtonianos*.

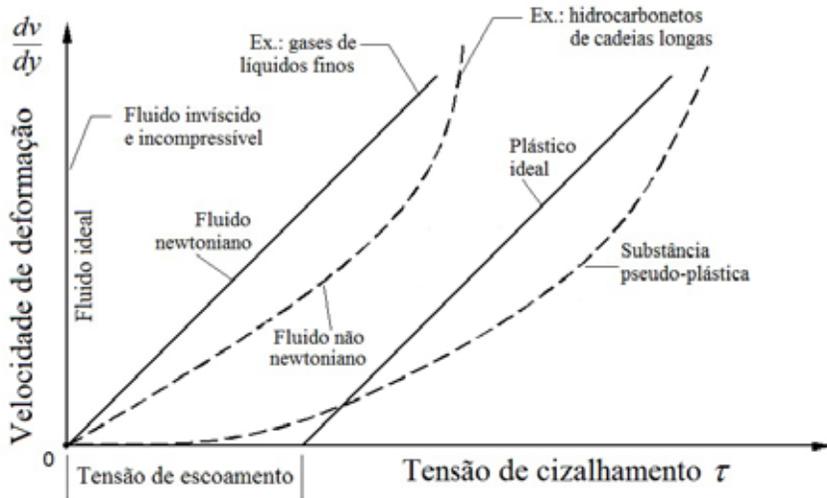


Figura 8. Fluidos newtonianos e não newtonianos.

Basicamente, o fluido newtoniano obedece a uma relação linear entre o valor da tensão de cisalhamento aplicada e a velocidade de deformação resultante. No fluido não newtoniano, esta relação não é linear e seu comportamento é complexo, não sendo objeto de abordagem neste documento.

A viscosidade (μ) de um fluido é referida como sendo a viscosidade absoluta ou viscosidade dinâmica, a fim de diferenciá-la da viscosidade cinemática (ν). A relação entre os dois tipos de viscosidades é dada por:

$$\mu = \rho \nu \quad (8)$$

A unidade da viscosidade dinâmica no Sistema Internacional de Unidades-SI é o Pascal-segundo (Pa.s), mas é comum se expressar a viscosidade em centiPoise (cP), sendo que 1 cP equivale a 1×10^{-3} Pa.s.

A unidade da viscosidade cinemática no SI é m^2/s , porém, uma unidade comum é o centiStoke (cSt), sendo que 1 cSt equivale a 1×10^{-6} m^2/s .

Para se entender e se avaliar o que esses valores de viscosidade significam, a Tabela 1 a seguir traz alguns dados práticos de viscosidade dinâmica de diferentes fluidos. Os valores fornecidos são valores médios aproximados e estão referidos à temperatura ambiente.

Tabela 1. Viscosidades dinâmicas de alguns fluidos à temperatura ambiente.

Substância	Viscosidade, cP
Gás natural	0,01
Ar	0,02
Água	1
Óleo de motor	100
Graxa	1000
Mel	100000

Como descrito no início deste item, a viscosidade de um fluido está diretamente relacionada à resistência que este fluido impõe ao seu escoamento. Dessa forma, a viscosidade do fluido impacta diretamente na energia necessária à realização do seu escoamento entre dois pontos de um conduto forçado, sendo que essa energia é normalmente fornecida ao sistema hidráulico por intermédio de máquinas de fluxo como, por exemplo, as motobombas elétricas ou a combustão.

Na Hidráulica, o cálculo da energia dissipada no escoamento por meio dos atritos viscosos entre as moléculas do fluido e entre elas e as paredes do conduto se traduz nas conhecidas perda de carga distribuída, que ocorrem ao longo de trechos de conduto, e perda de carga localizada, que acontece nas conexões, válvulas, filtros etc. O cálculo das perdas de carga distribuída e localizada se baseia na utilização de equações empíricas amplamente disponíveis na Literatura.

5 PRINCÍPIOS BÁSICOS PARA A MEDIÇÃO DE VAZÃO DE ÁGUA EM CONDUTOS FORÇADOS

Antes de darmos início a um processo de medição de vazão de um fluido é importante conhecer e atender a alguns princípios físicos básicos envolvidos no escoamento de um fluido em um conduto forçado.

5.1 Lei da Continuidade

O primeiro princípio fundamental é lei da conservação da massa que estabelece que, em um escoamento em regime permanente de um fluido em um conduto forçado, a sua vazão expressa em unidades de massa é constante entre duas seções transversais do conduto, desde que não haja entradas ou saídas de fluido entre essas duas seções. Isto significa que, conforme a Figura 9, a quantidade de matéria que entra na seção transversal 1 do conduto é igual à que sai na seção transversal 2.

Na prática, essa lei é mais conhecida como Lei da Continuidade.



Figura 9. Princípio da Lei da Continuidade.

Embora intuitivo o princípio envolvido na Lei da Continuidade é de fundamental importância quando estudamos o comportamento de um medidor de vazão.

Matematicamente, a Lei da Continuidade pode ser escrita da seguinte forma:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (9)$$

onde:

\dot{m}_1 : vazão em massa do fluido na seção 1 do conduto, em kg/s;

\dot{m}_2 : vazão em massa do fluido na seção 2 do conduto, em kg/s;

1, 2 : sub índices referentes às posições 1 e 2 do conduto, respectivamente.

Por outro lado, a vazão em massa de um fluido pode ser expressa como resultado do produto da sua massa específica pela sua vazão volumétrica, ou seja, a vazão expressa em unidades de volume. Assim:

$$\dot{m} = \rho Q \quad (10)$$

onde:

ρ : massa específica do fluido na seção especificada do conduto, em kg/m³;

Q : vazão volumétrica do fluido na seção especificada do conduto, em m³/s.

Com isso, a expressão (9) resulta:

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (11)$$

onde:

ρ_1 : massa específica do fluido na seção de entrada 1 do conduto, em kg/m³;

ρ_2 : massa específica do fluido na seção de saída 2 do conduto, em kg/m³;

Q_1 : vazão volumétrica do fluido na seção de entrada 1 do conduto, em m³/s;

Q_2 : vazão volumétrica do fluido na seção de saída 2 do conduto, em m^3/s ;

A expressão (11) mostra que, se o fluido em escoamento for um fluido incompressível, a vazão volumétrica (Q) também se manterá constante em qualquer das seções transversais do conduto.

Por sua vez, a vazão volumétrica do fluido é igual à velocidade média do fluido no escoamento multiplicada pela área da seção transversal do conduto. Ou seja:

$$Q = \bar{v} A \quad (12)$$

onde:

\bar{v} : velocidade média do fluido na seção especificada do conduto, em m/s ;

A : área da seção transversal na seção especificada do conduto, em m^2 ;

A expressão (12) mostra que, quando a área da seção transversal de um conduto diminui, a velocidade média do escoamento deve aumentar e vice-versa.

Considerando a expressão (12), a expressão (11) pode ser reescrita como:

$$\rho_1 \bar{v}_1 A_1 = \rho_2 \bar{v}_2 A_2 \quad (13)$$

onde:

\bar{v}_1 : velocidade média do fluido na seção de entrada 1 do conduto, em m/s ;

\bar{v}_2 : velocidade média do fluido na seção de saída 2 do conduto, em m/s ;

A_1 : área da seção transversal na seção de entrada 1 do conduto, em m^2 ;

A_2 : área da seção transversal na seção de saída 2 do conduto, em m^2 ;

Todas as variáveis nas equações devem estar expressas em unidades de medida consistentes.

5.2 Lei da Conservação da Energia

Daniel Bernoulli (1700 - 1782), matemático suíço, em sua obra *Hydrodynamica* de 1738 propôs que, em um escoamento de um fluido ideal (fluido sem viscosidade) sem atrito por um trecho de conduto fechado, a energia do escoamento do fluido permanece constante ao longo de seu percurso.

O Teorema de Bernoulli, também denominado Lei da Conservação da Energia, descreve o comportamento de um fluido movendo-se ao longo de uma linha de corrente e traduz para os fluidos o princípio da conservação da energia.

Conforme mostrado na Figura 10, a energia contida no escoamento de um fluido, em qualquer momento, consiste basicamente de três componentes: as energias de pressão, cinética e potencial gravitacional.

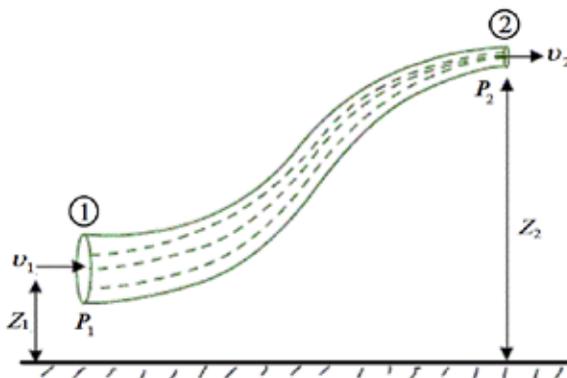


Figura 10. Componentes principais de energia em um escoamento.

A Lei da Conservação de Energia estabelece que toda energia de um escoamento de um fluido que ingressa em um sistema no ponto 1 também estará no sistema no ponto 2, embora uma forma de energia possa ser alterada para outra. O Teorema de Bernoulli expressa este fato em termos matemáticos:

$$P_1 + \frac{\rho_1 v_1^2}{2} + \rho g Z_1 = P_2 + \frac{\rho_2 v_2^2}{2} + \rho g Z_2 \quad (14)$$

onde:

P : pressão absoluta média do fluido na seção transversal, em Pa;

ρ : massa específica média do fluido na seção transversal, em kg/m^3 ;

\bar{v} : velocidade média na seção transversal, em m/s;

g : aceleração da gravidade local, em m/s^2 ;

Z : cota da seção transversal, em m;

1, 2 : sub índices referentes às posições 1 e 2 do conduto, respectivamente.

É importante ressaltar que, nesta expressão, não são consideradas as trocas térmicas, com a conseqüente variação de energia interna do escoamento do fluido, nem as perdas de energia devido às forças de atrito e viscosas que agem no fluido.

A equação completa é mais abrangente, mas se nós assumirmos que a tubulação está na posição horizontal e que o fluido é incompressível, além de desprezarmos alguns

fatores como o efeito do atrito na transformação de energia mecânica em calor, o Teorema de Bernoulli resume-se à seguinte expressão:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{\bar{v}^2}{2g} = \text{constante em todas as seções transversais} \quad (15)$$

Esta expressão, embora aparentemente simples, pode ser utilizada para a derivação de fórmulas teóricas sobre o comportamento de vários tipos de medidores de vazão, em particular os que se baseiam no princípio da pressão diferencial entre dois pontos do escoamento de um fluido.

O tubo de Pitot exemplifica uma aplicação prática do Teorema de Bernoulli que estabelece que a energia total de um fluido em movimento é a mesma em todas as seções transversais ao longo do conduto, desconsiderando as trocas térmicas, com a consequente variação de energia interna do fluido, nem as perdas de energia devido às forças viscosas que agem no fluido.

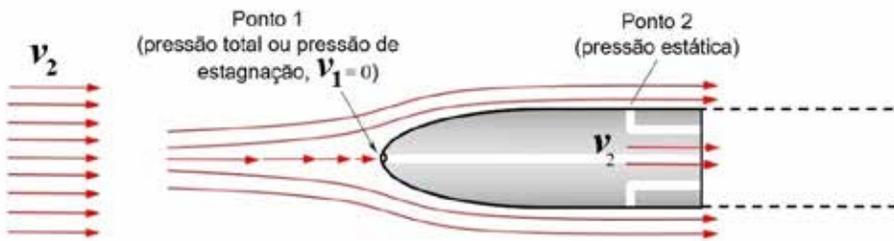


Figura 11. Representação do escoamento na ponta de um tubo de Pitot.

Adotando-se as hipóteses simplificadoras de que o escoamento é incompressível ($\rho_1 = \rho_2 = \rho$), de que não há variação de altitude entre as tomadas de pressão 1 e 2 ($Z_1 = Z_2$) e, ainda, de que no ponto de estagnação (tomada de pressão localizada na ponta do tubo de Pitot) a velocidade do fluido é teoricamente nula ($\bar{v}_1 = 0$), a expressão (14) resulta:

$$P_1 = P_2 + \frac{\rho \bar{v}_2^2}{2} \quad (16)$$

Da expressão (16), resulta a fórmula teórica utilizada na medição da velocidade de um fluido em escoamento utilizando-se uma sonda do tipo tubo de Pitot estático:

$$\bar{v}_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (17)$$

Outro exemplo de aplicação do Teorema de Bernoulli é a expressão de cálculo da vazão em massa de um fluido medida por um sistema de medição de vazão por placa de orifício que utiliza a seguinte equação:

$$\dot{m} = \frac{C}{\sqrt{1 - (d/D)^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta P \rho_1} \quad (18)$$

onde:

\dot{m} : vazão em massa do fluido, em kg/s;

C : coeficiente de descarga da placa de orifício, adimensional;

ε : coeficiente de expansão do fluido, adimensional;

d : diâmetro do orifício da placa nas condições do escoamento, em m;

D : diâmetro interno do tubo nas condições do escoamento, em m;

ΔP : pressão diferencial entre as tomadas de pressão de montante e de jusante, em Pa;

ρ_1 : massa específica do fluido nas condições do escoamento ($1 =$ tomada de montante), kg/m³.

5.3 Número de Reynolds

O comportamento de um fluido escoando através de uma tubulação pode ser traduzido por um adimensional conhecido por Número de Reynolds (Re_D). Este adimensional é definido como sendo:

$$Re_D = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu} \quad (19)$$

onde:

ρ : massa específica do fluido, em kg/m³;

\bar{v} : velocidade média do escoamento, em m/s;

D : diâmetro interno da tubulação, em m;

μ : viscosidade dinâmica do fluido, em Pa·s.

O Número de Reynolds é um parâmetro de grande importância na medição de vazão de fluidos.

Considere-se o numerador da expressão (19): sendo ρ a massa por unidade de volume, o produto $\rho \bar{v}$ representa, portanto, a quantidade de movimento por unidade

de volume, e o termo $\rho \bar{v} D$ é o momento da quantidade de movimento por unidade de volume. O numerador é, portanto, a medida da quantidade de forças dinâmicas envolvidas no escoamento, enquanto o denominador, no caso a viscosidade dinâmica μ , é uma medida da quantidade de forças viscosas.

Isto significa que o Número de Reynolds indica quais os tipos de forças que predominam no escoamento de um fluido. Quando o termo $\rho \bar{v} D$ é relativamente grande na relação, Re_D também resulta grande, e isto significa que no escoamento há uma predominância das forças dinâmicas. Porém, quando μ é relativamente grande em relação ao termo $\rho \bar{v} D$, o número de Reynolds resulta menor e, nesse caso, trata-se de um escoamento onde as forças viscosas prevalecem.

É interessante observar que Re_D é chamado de Número de Reynolds porque a dimensão de $\rho \bar{v} D$ é a mesma de μ e, dessa forma, Re_D resulta uma relação adimensional.

O sub índice D refere-se ao parâmetro dimensional utilizado no cálculo do Número de Reynolds, no caso o diâmetro interno (D) de um conduto circular. Vale atentar que, no cálculo do Número de Reynolds, podem ser utilizados outros parâmetros dimensionais, a exemplo do diâmetro do furo de uma placa de orifício (d), a largura do corpo gerador de vórtices (L) no medidor do tipo vórtice, entre outros.

5.4 Escoamentos laminar e turbulento

Um fluido pode escoar em uma tubulação basicamente sob dois regimes diferentes: escoamento laminar ou escoamento turbulento.

O regime de escoamento laminar, ou como muitas vezes chamado de “escoamento em linhas de corrente”, ou ainda “escoamento viscoso”, é governado pela lei de Newton da viscosidade. Ela pode ser considerada como o regime de escoamento onde toda a turbulência é amortecida pela ação da viscosidade do fluido. Teoricamente, o regime laminar ocorre para escoamentos com números de Reynolds abaixo de 2 100.

O escoamento laminar é caracterizado por um movimento suave e contínuo do fluido, com pouca deformação. O regime de escoamento laminar é obtido de vários modos: por meio de um fluido com baixa massa específica, por meio de um escoamento em baixa velocidade, através de um conduto de pequena dimensão, ou por meio de um fluido com viscosidade elevada, tais como óleos e lubrificantes.

O escoamento laminar é assim denominado porque todas as partículas do fluido se movem em linhas de corrente distintas e separadas. As partículas do fluido se deslocam em linhas retas paralelas ao eixo do conduto, e de modo ordenado. A ação se processa como se as linhas do fluido escorregassem relativamente entre si.

No caso do escoamento em regime laminar em uma tubulação de perfil circular, a velocidade adjacente à parede é zero e aumenta para um valor máximo no centro do tubo. O perfil de velocidades possui o formato de uma parábola, e a velocidade média é igual à metade da velocidade máxima no eixo central.

Figurativamente, este regime pode ser comparado com o fluxo de veículos em uma estrada movimentada, com o tráfego nas diversas faixas fluindo paralelamente e em velocidades diferentes; as partes mais lentas encontrando-se próximas às paredes da tubulação e as mais rápidas no centro da tubulação.

Teoricamente, em um regime de escoamento laminar, assume-se que um “veículo” nunca muda de faixa durante o deslocamento. Na verdade, uma mudança gradual entre as faixas acaba acontecendo. Este fenômeno é denominado de escoamento secundário, e é um assunto complexo, desconsiderado em situações práticas, embora algumas vezes isso possa ter consequências importantes.

Por sua vez, o regime de escoamento turbulento normalmente ocorre em Número de Reynolds superiores a 4 000. Entretanto, às vezes podem continuar ou iniciar em Número de Reynolds inferiores a 4 000.

No regime de escoamento turbulento, não é possível observar linhas de corrente distintas, consistindo o escoamento de uma massa de turbilhões. Assim, as partículas do fluido não necessariamente seguem uma mesma trajetória todo o tempo.

Na prática, o escoamento turbulento pode ser associado ao voo de um enxame de abelhas. A princípio, o enxame como um todo pode estar voando em linha reta e a uma velocidade constante, mas se pudéssemos observar o voo individual de um inseto qualquer, teríamos a impressão de que ele estaria zigzagueando e movimentando-se aleatoriamente dentro do enxame durante o voo.

Nas aplicações práticas, os números de Reynolds nas tubulações são, via de regra, muito superiores a 2 100, e o escoamento laminar é raramente encontrado, a menos que o fluido seja um líquido muito viscoso ou as velocidades muito reduzidas. No nosso caso, assumiremos que os escoamentos tratados ocorrem em regimes turbulentos, a menos que o regime de escoamento laminar seja explicitado.

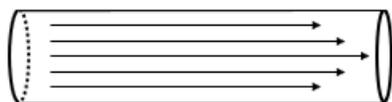


Figura 12. Representação de um escoamento em regime laminar.

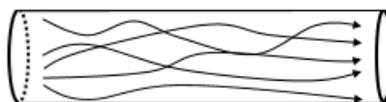


Figura 13. Representação de um escoamento em regime turbulento.

5.5 Perfis de velocidades

O termo perfil de velocidades traduz a representação gráfica que mostra como as velocidades do fluido em um escoamento variam ao longo do diâmetro de uma tubulação. Tradicionalmente, esta representação gráfica é feita no plano bidimensional. Entretanto, é importante entender que o escoamento no interior de uma tubulação ocorre no espaço tridimensional, e de maneira muitas vezes mais complexa que uma simples figura possa representar.

No regime de escoamento laminar, o perfil de velocidades possui a forma parabólica e a velocidade do escoamento no centro da tubulação equivale aproximadamente ao dobro da velocidade média do escoamento.

No escoamento turbulento, o perfil de velocidades a jusante de um trecho reto longo de tubulação é mais achatado ou plano, e a velocidade no centro é cerca de 1,2 vezes a velocidade média do escoamento. Sob estas condições, diz-se que o perfil de velocidades do escoamento encontra-se plenamente desenvolvido.

Os perfis de velocidade típicos para os regimes de escoamento laminar e turbulento no plano bidimensional e no espaço tridimensional são mostrados nas figuras seguintes.

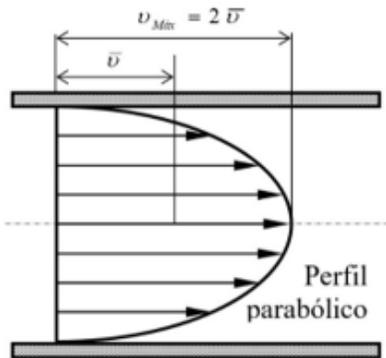


Figura 14. Perfil de velocidades de um escoamento laminar.

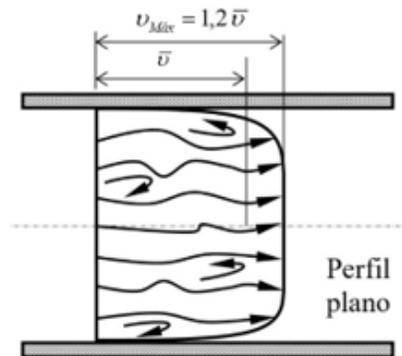


Figura 15. Perfil de velocidades de um escoamento turbulento.

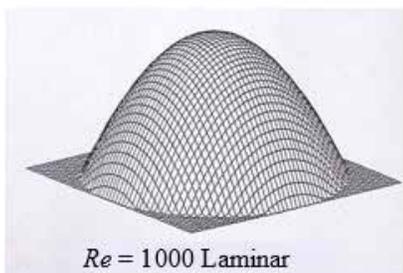


Figura 16. Perfil de velocidades de um escoamento laminar.

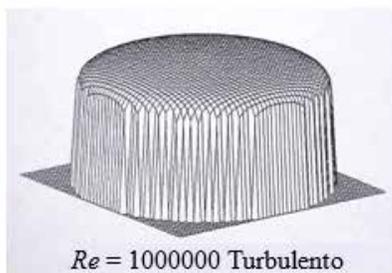


Figura 17. Perfil de velocidades de um escoamento turbulento.

Nas aplicações práticas, são comuns os circuitos de tubulação apresentarem mudanças de dimensão e de direção. Nestes casos, o perfil de velocidades do escoamento em uma determinada seção do conduto pode se tornar completamente distorcido devido à presença de singularidades como curvas, reduções, têes, válvulas, filtros ou mesmo medidores de vazão a montante dessa seção.

As distorções do perfil de velocidades podem ser subdivididas basicamente em dois tipos de perturbações: a assimetria ou distorção no perfil de velocidades e os escoamentos helicoidais (*swirl*). Esses dois tipos de perturbações são extremamente danosos para a confiabilidade das medições de vazão quando estas são realizadas por meio de medidores que dependem de um perfil de velocidades plenamente desenvolvido na sua entrada, a exemplo das placas de orifício, medidores dos tipos turbina, ultrassônico, vórtice e outros. Estes tipos de medidores de vazão de fluidos requerem, para um bom desempenho metrológico, a chamada axissimetria do escoamento.

Por exemplo, nos medidores de vazão baseados na medição por pressão diferencial dos tipos placa de orifício, tubo de Venturi e bocal, a pressão diferencial é medida em tomadas de pressão localizadas em pontos específicos de duas seções transversais do corpo do medidor. Uma assimetria no perfil de velocidades ou um escoamento helicoidal podem provocar medidas de pressão diferencial que não representam o escoamento real.

Em um medidor do tipo turbina, tais perturbações podem ocasionar erros de medida seja pelo desbalanceamento do medidor, seja pela aceleração ou retardo no giro do rotor devido ao efeito do *swirl* do escoamento.

Por sua vez, em um medidor do tipo ultrassônico, a assimetria do perfil de velocidades e o *swirl* do escoamento podem provocar erros de medida significativos devido ao seu princípio de funcionamento baseado na medição de velocidades médias a partir apenas de amostras obtidas em trajetórias específicas através do escoamento do fluido.

5.6 Assimetrias do perfil de velocidades

As curvas e cotovelos são conexões presentes em praticamente todos os tipos de tubulação. Ao passar por uma curva, o escoamento de um fluido é obrigado a realizar uma mudança de direção provocada pelas paredes do conduto. Associado a esse fato, a inércia do fluido induz o escoamento a fluir com velocidades maiores junto à parede oposta da curva resultando na assimetria ou distorção do perfil de velocidades do escoamento.

A figura a seguir mostra a assimetria induzida no perfil de velocidades por uma curva de 90° em uma tubulação e a sua atenuação ao longo do trecho reto a jusante da curva.

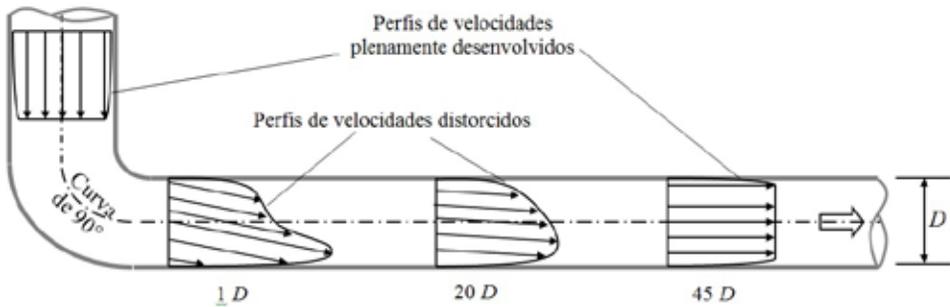


Figura 18. Assimetria no perfil de velocidades do escoamento provocada por uma curva de 90° e sua atenuação ao longo de um trecho reto de tubulação.

O comprimento de trecho reto de tubulação necessário ao reestabelecimento da simetria no perfil de velocidades de um escoamento plenamente desenvolvido não é fixo, pois depende de diversos fatores, entre os quais o número de Reynolds do escoamento e a rugosidade da superfície interna do conduto. Portanto, os valores de número de diâmetros apresentados na Figura 18 são meramente ilustrativos.

5.7 Escoamento helicoidal

Além da distorção no perfil de velocidades do escoamento, um tipo mais severo de perturbação é o escoamento helicoidal em três dimensões, ou também conhecido por seu termo em inglês como *swirl*, produzido por duas curvas subsequentes posicionadas em planos perpendiculares (Figura 19).

Esta configuração de tubulação, bastante comum em instalações industriais, faz com que o escoamento rotacione de modo helicoidal na medida em que o fluido se desloca através das duas curvas subsequentes da tubulação, sendo que este efeito helicoidal persiste por longas distâncias após o seu ponto de geração.

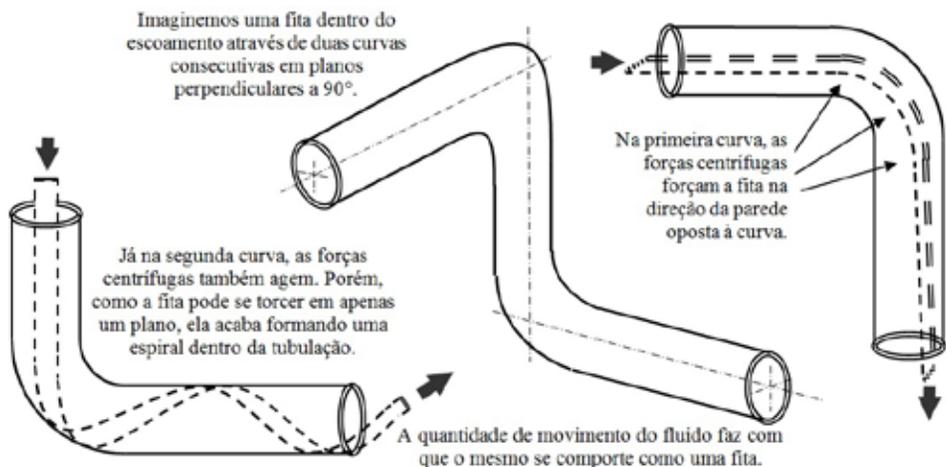


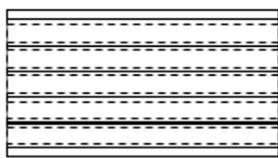
Figura 19. Escoamento helicoidal (swirl) induzido por duas curvas de 90° adjacentes e em planos perpendiculares.

Como mencionado anteriormente, o escoamento helicoidal na entrada de um medidor de vazão altera significativamente a sua indicação. Por exemplo, um medidor do tipo turbina pode ter a rotação de seu rotor acelerada ou retardada em relação à condição de calibração, em função do sentido de giro do escoamento helicoidal.

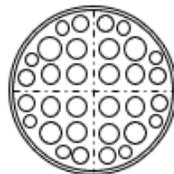
Em números de Reynolds elevados em tubos comerciais, esse fenômeno decai a uma taxa de cerca de 4 % por diâmetro percorrido e, a baixos Números de Reynolds, esse decaimento é de cerca de 2 % por diâmetro. Isso quer dizer que, para uma tubulação de 100 mm (4") de diâmetro, a intensidade do *swirl* diminui de somente 4 % (ou 2 %) a cada 100 mm de trecho que o fluido percorre no interior da tubulação.

5.8 Retificadores e condicionadores de escoamento

Retificadores ou condicionadores de escoamento podem ser instalados a montante do ponto de medição para aprimorar as condições do escoamento de um fluido adequando-o para a medição da vazão. Estes dispositivos tem a função básica de reduzir os efeitos de assimetria no perfil de velocidades e de escoamentos helicoidais presentes no escoamento, a níveis aceitáveis para uma medição confiável.



(a) Retificador de escoamento do tipo feixe de 19 tubos.



(b) Condicionador de escoamento do tipo Zanker.

Figura 20. Dois modelos de retificador e de condicionador de escoamento.

Uma vez instalado a montante do medidor, o retificador ou condicionador de escoamento reduz o comprimento do trecho reto de tubulação necessário a montante do medidor. Normalmente, a geometria, especificação e a utilização destes tipos de dispositivos são reguladas por meio de normas técnicas.

5.9 Outros fatores que impactam o escoamento e a medição da vazão de um fluido

A definição da exatidão de uma medida da vazão de um fluido é baseada no escoamento em regime permanente de um fluido newtoniano, homogêneo, monofásico e com um perfil de velocidades plenamente desenvolvido por meio da utilização de trechos retos de tubulação suficientemente longos. Desvios destas condições de referência podem afetar o desempenho do sistema de medição e, conseqüentemente, o resultado de uma medição. A seguir, são tratados alguns tipos de fontes de distúrbios que podem interferir na medição da vazão de um fluido.

5.9.1 Cavitação

Fisicamente, é possível vaporizar a água por meio de dois processos distintos: ou aumentando-se a sua temperatura e mantendo-se a pressão constante, ou diminuindo-se a pressão e mantendo-se a sua temperatura constante.

Por definição, a cavitação é a vaporização da água causada pela diminuição da pressão estática abaixo da sua pressão de vapor. A cavitação depende do par casado temperatura e pressão estática. Na cavitação há a formação e a implosão de bolhas de vapor d'água. Este colapso das bolhas de vapor é responsável pelo ruído característico associado à cavitação.

A cavitação ocorre em um escoamento quando a pressão do fluido se reduz muito, ou por atrito, ou por separação do escoamento, ou por uma restrição apresentada por uma válvula, obstáculo, ou elemento gerador de pressão diferencial. Mesmo em um sistema com uma tubulação bem projetada, pode ocorrer a cavitação quando uma válvula de controle ou de alívio é aberta de forma repentina.

Na medição de vazão de água pelo princípio da pressão diferencial, tem-se uma queda brusca da pressão após o elemento primário. Quando a pressão no escoamento se reduz, aproximando-se da pressão de vapor do líquido na linha, inicia-se a cavitação.

A cavitação, quando intensa, pode perturbar o escoamento, restringir a vazão, produzir vibrações nas estruturas, gerar ruído intenso e danificar o elemento primário ou mesmo a tubulação.

5.9.2 Pulsação e vazão não constante

A medição de vazão de um fluido em um escoamento com a presença de pulsações e variações bruscas na vazão é invariavelmente difícil de se realizar. Normalmente, o resultado é afetado por sinais instáveis da vazão e, assim, com um desvio padrão das medidas elevado.

Exemplos de fontes geradoras de pulsação em escoamentos são válvulas de controle ou de alívio mal dimensionadas ou desreguladas, bombas hidráulicas, compressores, descargas de caldeiras etc.

Para escoamentos de líquidos, quando isso ocorrer, a solução usual é a instalação de uma câmara de absorção de pulsações do tipo pulmão (*cushion*) parcialmente cheia com gás ou vapor entre a fonte de pulsação e o medidor de vazão. Para a medição de vazão em escoamentos de gás ou de vapor, os efeitos devidos à pulsação podem ser atenuados com o uso de elementos primários com a relação beta elevada e capazes de gerar pequenas pressões diferenciais e, também, por meio da operação do sistema com uma pressão estática elevada.

5.9.3 Tubulação

O escoamento de um fluido em uma tubulação longa de seção circular sofre uma perda de carga ao longo do seu trajeto na linha. Essa perda de carga distribuída pode ser quantificada por meio da utilização de fórmulas empíricas, a exemplo da equação de Darcy-Weisbach[2], que foi proposta em 1845. Há vários parâmetros da tubulação que influem nessa perda de carga do escoamento: o material e o método de fabricação do conduto, o seu diâmetro, a idade da tubulação e as condições físicas da sua superfície interna.

A utilização frequente de válvulas, expansões, contrações, curvas, cotovelos, têes, filtros e até mesmo poços termométricos, provoca perdas de carga adicionais, denominadas na Hidráulica como perdas de carga localizadas.

5.9.4 Válvula

As válvulas podem ser divididas em dois grupos principais, quando se considera a sua resistência ao escoamento: (1) a válvula globo, que apresenta uma grande perda de carga do escoamento, e é normalmente utilizada para um controle contínuo da vazão e, (2) as válvulas dos tipos gaveta e esfera que apresentam uma perda de carga menor, e que são geralmente utilizadas apenas nas posições totalmente aberta ou totalmente fechada. A maioria dos demais tipos de válvulas situam-se entre estes dois grupos.

Em todo caso, no projeto de um sistema de medição de vazão, sempre que possível deve-se evitar a instalação de válvulas a montante e próximas do ponto de medição a fim de evitar as perturbações no escoamento que esses tipos de dispositivos normalmente provocam.

5.9.5 Conexões

As principais conexões da tubulação são os flanges, as uniões, os têes de separação, as curvas e os cotovelos de deflexão, as reduções e as expansões, *headers* entre outros. Normalmente, a perda de carga provocada no escoamento por estas conexões é fornecida em termos de comprimentos equivalentes de tubulação reta que causariam a mesma perda de carga, sob as mesmas condições de escoamento.

Sob o aspecto da perturbação das condições do escoamento, as conexões presentes em uma tubulação a montante de um sistema de medição de vazão podem provocar os fenômenos de assimetria ou distorção no perfil de velocidades do escoamento ou mesmo o escoamento helicoidal, conforme visto anteriormente.

5.9.6 Golpe de aríete

O golpe de aríete é um fenômeno que aparece e se propaga na tubulação, causado normalmente pela variação brusca de uma seção da tubulação ou pela abertura ou fechamento rápido de uma válvula da linha. Quando se interrompe de forma brusca o escoamento de um fluido, ocorre um aumento repentino da sua pressão, que se propaga no sentido contrário ao do escoamento original. É um fenômeno análogo à Lei de Lenz, na Eletricidade, que faz aparecer uma altíssima tensão quando se desliga, de repente, uma chave com corrente elevada.

As propriedades elásticas do líquido e das paredes do tubo tendem a absorver esta perturbação, amortecendo a pressão ao longo da linha. As partes mais afetadas serão invariavelmente as mais próximas da válvula. Estas partes são comprimidas e as paredes adjacentes são expandidas pelo aumento da pressão provocada pela interrupção repentina do escoamento.

O golpe de aríete é extremamente prejudicial ao sistema hidráulico porque pode danificar o medidor de vazão e até mesmo destruir a tubulação.

5.10 Tipos básicos de medição de vazão

A princípio, a medição de vazão de um fluido pode parecer simples e de fácil entendimento. No entanto, o termo genérico medição de vazão de um fluido pode se referir a qualquer um dos seis tipos de medição mais comumente encontrados. Estes tipos são brevemente descritos nos itens a seguir.

5.10.1 Medição da velocidade pontual

Existem diversos tipos de instrumentos disponíveis para a medição da velocidade pontual (v) de escoamento de um determinado fluido. Esses medidores são denominados geralmente de anemômetros quando utilizados em jatos livres de ar, molinetes hidrométricos ou correntômetros se forem empregados em correntes de água e medidores de inserção se utilizados especificamente no interior de condutos forçados.

É importante ressaltar que a medição da velocidade pontual do fluido em um escoamento permite apenas o conhecimento da velocidade em um dado ponto particular de uma seção transversal do conduto, não sendo aplicável à inferência exata da vazão do fluido em escoamento.

5.10.2 Medição da velocidade média

A velocidade média (\bar{v}) do escoamento de um fluido em uma tubulação está relacionada com a vazão volumétrica (Q) e a área da seção transversal da tubulação (A), pela seguinte expressão:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} \quad (19)$$

A velocidade média (\bar{v}) do escoamento de um fluido pode ser determinada de três maneiras diferentes:

a) medindo-se a vazão volumétrica (Q) do fluido e a área da seção transversal (A) do conduto e aplicando-se a equação (17);

b) medindo-se a velocidade pontual (v) em vários pontos de uma determinada seção transversal e, então, tirando-se uma média ponderada apropriada;

c) ou, com menos exatidão, medindo-se, por meio de um sensor de inserção, a velocidade em um ponto situado a $\frac{3}{4}$ de distância entre o centro e a parede interna da tubulação, uma vez que normalmente, em escoamentos plenamente desenvolvidos, a velocidade do fluido nesse ponto representa aproximadamente a velocidade média do escoamento.

5.10.3 Medição da vazão volumétrica

A vazão volumétrica (Q) de um fluido pode ser definida como sendo o resultado da relação entre o escoamento de um determinado volume (V) de fluido por um intervalo de tempo (Δt), ou seja:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (20)$$

Muitos medidores utilizam a relação contida na expressão anterior com a medição de um determinado volume de fluido ao longo de um intervalo de tempo e apresentam o resultado com atualizações periódicas da vazão volumétrica.

Por outro lado, existem medidores de vazão que são projetados para indicar direta e continuamente o valor da vazão volumétrica (Q) instantânea do fluido, a exemplo dos medidores dos tipos eletromagnético, térmico, rotâmetro etc.

5.10.4 Medição do volume totalizado

Alguns medidores são projetados para indicar diretamente o volume (V) total de fluido que passa através do medidor ao longo de um intervalo de tempo de medição. Normalmente, eles são chamados de medidores volumétricos ou totalizadores, a fim de distingui-los de outros tipos de medidores de vazão instantânea. O hidrômetro utilizado na medição de água suprida para residências é um exemplo típico desse tipo de totalizador. Sob esse aspecto, é importante entender que o totalizador de volume de fluido normalmente operará sob diferentes vazões volumétricas ao longo do período de totalização.

É possível se obter o valor do volume (V) total de fluido que passa através do medidor de vazão por meio da integração de seu sinal de saída de vazão instantânea

ao longo de um determinado intervalo de tempo. Também, é possível se obter a vazão volumétrica (Q) medida por um medidor volumétrico derivando-se o seu sinal de saída em relação ao tempo. Entretanto, estas operações geralmente resultam, em maior ou menor grau, em uma diminuição da exatidão das medidas.

5.10.5 Medição da vazão mássica

A vazão mássica de um fluido (\dot{m}) em escoamento, representa a passagem de uma dada massa (m) de fluido por um medidor durante um intervalo de tempo (Δt), ou seja:

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t} \quad (21)$$

Alguns medidores de vazão são projetados para indicar diretamente a vazão mássica do fluido em escoamento. Eles são chamados de medidores mássicos, ou medidores mássicos verdadeiros. Incluem-se nessa categoria, os medidores de vazão do tipo Coriolis e os medidores mássicos por princípio térmico.

Por outro lado, a vazão mássica de um fluido (\dot{m}) pode ser também determinada efetuando-se várias medidas simultâneas da vazão volumétrica (Q) e da massa específica do (ρ) do fluido, e aplicando-se a seguinte equação:

$$\dot{m} = \rho Q \quad (22)$$

5.10.6 Medição da massa totalizada

Atualmente, existem disponíveis no mercado medidores capazes de medir diretamente a massa total de fluido escoado através do medidor durante um determinado intervalo de tempo.

Para se determinar a massa (m) total de fluido escoado é preciso medir a vazão mássica instantânea do fluido (\dot{m}) e integrar as medições ao longo de um determinado intervalo de tempo (Δt), ou então, medir o volume (V) de fluido escoado e a massa específica (ρ) média e utilizar a seguinte expressão:

$$m = \rho V \quad (23)$$

5.11 Curvas de calibração

Uma curva de calibração ou curva característica de um medidor de vazão é um gráfico que mostra como um índice de desempenho metrológico do medidor varia com a vazão, com a velocidade ou com o Número de Reynolds do escoamento.

Geralmente, esta curva é obtida por meio de uma calibração do medidor, ou seja, por meio de uma série de testes realizados em pontos específicos ao longo da faixa de operação do medidor, comparando-se as indicações de (vazão, volume, massa, velocidade etc.) fornecidas pelo instrumento (ou parâmetros derivados de sua indicação como o *meter factor MF*, o fator *K* etc.) com os valores de referência obtidos utilizando-se um medidor de referência com classe de exatidão mais elevada e que proporcione medidas rastreáveis ao SI.

5.11.1 Medidores de vazão lineares e não lineares

A princípio, os resultados de uma calibração podem ser plotados em um gráfico que relacione a indicação do medidor (Y) com a vazão de referência (Q_{ref}).

Se o gráfico formar uma linha mais ou menos reta passando pela origem como na Figura 21, o medidor é considerado como sendo linear. Porém, muitos medidores não-lineares possuem características como a mostrada na Figura 22, onde Y é proporcional a Q_r^2 . Medidores de vazão do tipo tubo de Venturi, placas de orifício, bocais e tubos de Pitot, pertencem a essa classe de medidores, onde Y é o valor medido da pressão diferencial.

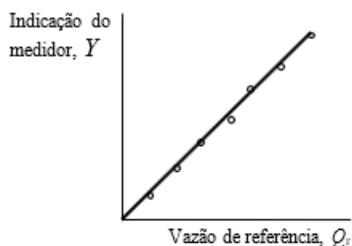


Figura 21. Curva característica de um medidor de vazão linear.



Figura 22. Curva característica de um medidor de vazão não-linear.

5.11.2 Índice de desempenho do medidor

Na prática, gráficos como os ilustrados nas figuras anteriores raramente são usados porque não fornecem detalhes suficientes acerca da calibração. O ideal é a utilização de um gráfico que mostre claramente qualquer pequeno desvio do comportamento ideal do medidor.

Nesse sentido, na área da metrologia de vazão de fluidos é comum plotar algum tipo de índice de desempenho do medidor contra a vazão indicada pelo mesmo, ou contra quantidades comparativas como por exemplo o Número de Reynolds. Quanto mais o gráfico resultante se aproximar de uma linha horizontal reta, mais próximo de um desempenho ideal estará o medidor.

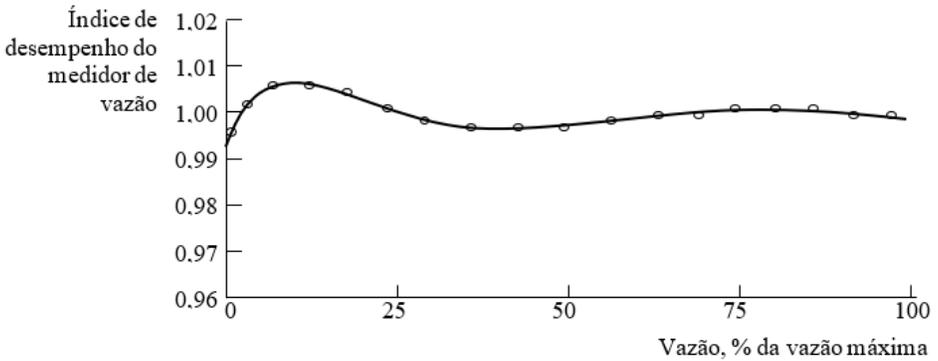


Figura 23. Exemplo de curva de índice de desempenho de um medidor de vazão.

Existem vários tipos de índices de desempenho, mas somente quatro são de utilização mais comum. Eles são descritos a seguir.

5.11.3 Coeficiente de descarga

Para medidores de vazão que se baseiam na medida da pressão diferencial, o coeficiente de descarga C do elemento primário é definido como sendo:

$$C = \frac{Q_{ref}}{Q_{ind}} \quad (24)$$

e, para medidores de velocidade, como:

$$C = \frac{v_{ref}}{v_{ind}} \quad (25)$$

onde Q_{ref} e v_{ref} são comumente chamados de vazão de referência e velocidade de referência, respectivamente, indicando que esses valores são obtidos a partir de medidores padrão, normalmente utilizados na calibração de outros medidores. Os

parâmetros Q_{ind} e v_{ind} representam, respectivamente, a vazão e a velocidade indicadas pelo medidor, ou calculadas a partir de leitura nos medidores.

O coeficiente de descarga, que geralmente é menor que a unidade, é amplamente aplicado no caso de medidores por pressão diferencial. Normalmente, o coeficiente de descarga (C) é plotado em relação ao Número de Reynolds calculado para a garganta do medidor (Re_d) muito embora deva ser utilizado, sempre que possível o Número de Reynolds baseado no diâmetro da tubulação (Re_D).

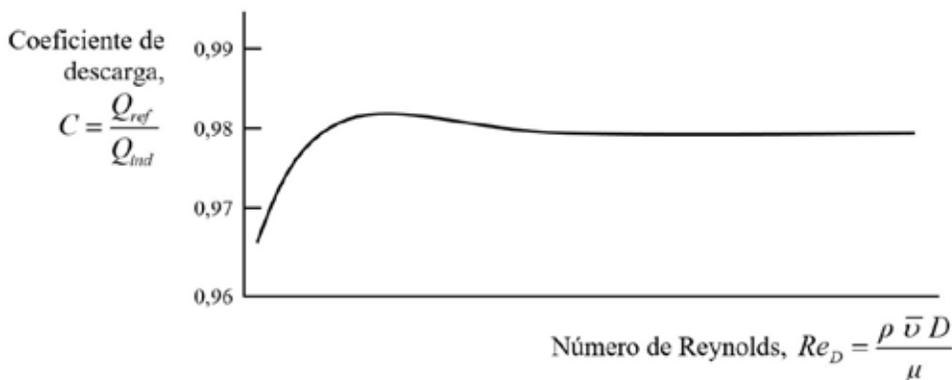


Figura 24. Exemplo de curva característica baseada no coeficiente de descarga de um medidor de vazão.

5.11.4 Erro de indicação do medidor

O erro de indicação do medidor (E) é um dos parâmetros de desempenho metrológico mais utilizados na área da medição de vazão de fluidos e é definido como:

$$E = \frac{V_{ind} - V_{ref}}{V_{ref}} \quad \text{ou, percentualmente,} \quad E = \frac{V_{ind} - V_{ref}}{V_{ref}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (26)$$

onde V_{ref} e V_{ind} indicam, respectivamente, o volume de referência e o volume indicado pelo medidor. Geralmente, o erro de indicação do medidor é expresso em termos de porcentagem do valor de referência.

O termo erro de indicação do medidor é normalmente utilizado em conjunto com medidores volumétricos cuja indicação é dada diretamente em unidades de volume, principalmente no caso de medidores do tipo deslocamento positivo. Mas também é utilizado para medidores de vazão instantânea volumétrica ou mássica.

5.11.5 Fator do medidor

O fator do medidor (MF) é um termo aplicado principalmente com medidores utilizados para se medir o volume total e, especialmente, com medidores dos tipos turbina e deslocamento positivo.

O fator do medidor, cujo símbolo MF deriva do seu termo em inglês *meter factor*, representa o fator pelo qual o volume indicado pelo medidor deveria ser multiplicado a fim de se obter o volume de referência e é expresso da seguinte forma:

$$MF = \frac{V_{ref}}{V_{ind}} \quad (27)$$

5.11.6 Fator K

O fator K é um parâmetro utilizado para se avaliar o desempenho de medidores de vazão, por exemplo do tipo turbina, cujo sinal de saída é disponível na forma de uma série de pulsos elétricos, e onde, normalmente, o número de pulsos (n) totalizado ao longo de um determinado intervalo de tempo é nominalmente proporcional ao volume total (V) de fluido escoado. Assim, o fator K é expresso como:

$$K = \frac{n}{V} \quad (26)$$

A frequência de pulsos (dn/dt) é nominalmente proporcional à vazão de fluido.

As curvas características de medidores do tipo turbina são geralmente apresentadas na forma de um gráfico do fator K em função da vazão, como ilustrado na Figura 25.

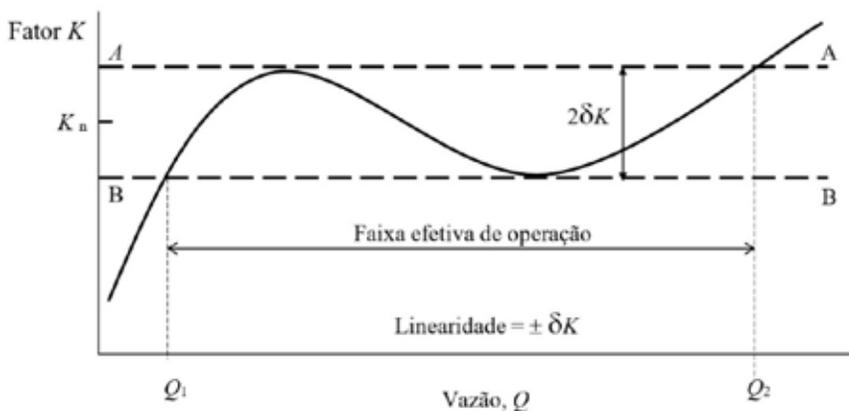


Figura 25. Exemplo de curva característica de um medidor baseada no fator K .

O termo recíproco do fator K , ou seja, o fator $1/K$, é um parâmetro de grande importância prática, pois toda vez que o medidor for utilizado, o número de pulsos medido (n) deve ser multiplicado pelo fator $1/K$ para se obter o volume de fluido que passou pelo medidor.

6 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

A primeira providência a se tomar para a implementação de um sistema de medição de vazão de água bruta em conduto forçado é definir o mensurando, ou seja, a grandeza que se pretende medir no processo onde será instalado o medidor.

Como visto anteriormente, o termo genérico medição de vazão pode se referir a qualquer um dos seis tipos de medição mais comumente encontrados que são:

- Medição da velocidade pontual
- Medição da velocidade média
- Medição da vazão volumétrica
- Medição do volume totalizado
- Medição da vazão mássica
- Medição da massa totalizada

Uma vez definida a grandeza de interesse a ser medida, é possível avaliar os métodos de medição aplicáveis e as tecnologias de medição disponíveis no mercado com base em normas técnicas e bibliografia especializada no assunto, além de catálogos e informações disponibilizadas por fabricantes de medidores de vazão.

Via de regra, o dimensionamento do sistema de medição de vazão de água bruta em conduto forçado é baseado nos parâmetros do processo a ser medido, além de informações relativas ao conduto e as condições físicas do local. Tais informações são normalmente as seguintes:

6.1 Faixa prevista de vazão de operação do processo

O conhecimento da faixa de vazão de operação esperada no conduto é fundamental para um bom dimensionamento do sistema de medição a ser implementado, uma vez que esta informação permite definir o tipo e o modelo de medidor de vazão mais indicado para atender com desempenho apropriado desde as vazões mínimas até as máximas do processo.

Caso um único medidor de vazão não seja capaz de atender uma faixa ampla de vazões de operação do sistema, pode ser necessário o projeto e a instalação de um sistema de medição composto de mais de um medidor de vazão, normalmente em linhas paralelas dotadas de válvulas de bloqueio e de controle para a seleção da linha específica para cada condição de operação.

Como o parâmetro vazão está relacionado diretamente à velocidade média do escoamento no conduto forçado, é importante avaliar se os valores recomendados em literatura estão sendo seguidos no projeto em questão.

De acordo com Porto [2], a equação empírica seguinte permite calcular as velocidades e vazões máximas admissíveis nos projetos de redes de transporte de água:

$$V_{\text{máx}} \text{ (m/s)} = 0,60 + 1,5 \cdot D \text{ (m)} \quad \text{e} \quad V_{\text{máx}} \leq 2,0 \text{ m/s} \quad (27)$$

onde:

$V_{\text{máx}}$: velocidade máxima admissível do escoamento no conduto, em m/s;

D : diâmetro interno do conduto, em m.

A Tabela 2 apresenta valores de velocidades e vazões máximos admissíveis calculados utilizando-se a equação anterior.

Tabela 2. Velocidades e vazões máximas em redes de abastecimento.

Diâmetro (mm)	Velocidade máxima (m/s)	Vazão máxima (L/s)
50	0,68	1,34
60	0,68	1,95
75	0,71	3,14
100	0,75	5,89
125	0,79	9,69
150	0,83	14,7
200	0,90	28,3
250	0,98	47,9
300	1,05	74,2
350	1,13	109
400	1,20	151
500	1,35	265
750	1,73	762
1000	2,10	1649

6.2 Vazão usual de operação prevista

A informação da vazão usual de operação prevista para o processo orienta o dimensionamento e a seleção de um sistema de medição de vazão tomando como base o critério de que o desempenho metrológico do sistema de medição deverá ser o melhor possível na faixa ao redor dessa vazão usual de operação do sistema.

Além disso, posteriormente, durante o processo de calibração do medidor de vazão do sistema normalmente realizada em laboratório, também poderá ser dada atenção especial a essa faixa usual de operação do sistema, por exemplo, privilegiando a distribuição dos pontos de calibração ao redor desse valor visando aumentar a confiabilidade da curva de calibração (ou equação de correção) determinada a partir do tratamento estatístico dos resultados da calibração.

6.3 Exatidão esperada das medidas

Definir um limite alvo para a incerteza máxima de medida do mensurando é importante para um bom dimensionamento do sistema de medição de vazão. Com base nessa premissa, poderão ser definidas por meio de critério técnico as tecnologias de medição mais apropriadas à finalidade, culminando inclusive na seleção dos modelos de

medidores mais indicados à aplicação. Essa condição de projeto evita que a seleção do sistema de medição seja baseada apenas em critérios econômicos.

Nesse caso, é fundamental que essa incerteza limite seja definida por pessoal capacitado e competente nesse assunto, com pleno entendimento da aplicação em questão, a fim de evitar valores de incerteza absolutamente impraticáveis, seja em termos técnicos como financeiros.

6.4 Faixas de pressão da água esperada na linha

As pressões da água no conduto são dados importantes para a seleção da classe de pressão do elemento primário do sistema de medição, seja nos casos onde este é um medidor integral ou mesmo na forma de sondas de inserção. Os tubos, flanges, conexões, roscas e soldas deverão ser dimensionados para atender aos requisitos de norma para esses elementos de tubulação.

6.5 Temperatura média da água

Na grande maioria dos casos de medição de vazão de água bruta, a temperatura do líquido se encontra próximo à temperatura ambiente. Não obstante, nos casos onde essa temperatura for substancialmente diferente da ambiente, deverão ser consultadas as especificações fornecidas pelos fabricantes de medidores de vazão onde constam as faixas de temperatura operacional do modelo específico do medidor.

6.6 Diâmetro nominal do conduto por onde escoar a água a ser medida

O dado de diâmetro nominal do conduto permite a escolha do diâmetro nominal do medidor de vazão nos casos onde a solução for pela utilização de um medidor de corpo integral instalado na linha.

6.7 Diâmetro interno efetivo e as condições superficiais internas do conduto

Para a instalação de medidores de vazão em linhas já existentes, é fundamental o conhecimento do diâmetro interno efetivo do conduto a fim de se certificar que o diâmetro interno de entrada de um medidor integral e do conduto sejam os mesmos para evitar ressaltos que possam induzir perturbações no escoamento sob medição.

No caso da utilização de sondas de inserção no conduto, a informação do diâmetro interno efetivo na seção de medição é normalmente utilizada no cálculo da área da seção transversal do conduto e impacta diretamente no resultado da vazão medida. Além disso, esse dado permite o posicionamento da sonda no ponto correto desse diâmetro conforme requisitos de norma ou orientações do fabricante do medidor de vazão.

Além do diâmetro interno efetivo do conduto, é imprescindível conhecer as condições superficiais internas do conduto para garantir um escoamento de água plenamente desenvolvido e sem perturbações na entrada do medidor de vazão. Caso as condições internas do conduto no ponto de medição sejam impróprias, por exemplo, com a presença de incrustações ou tubérculos nas paredes internas, é necessária a remoção e limpeza do conduto ou, em último caso, a instalação de trechos retos de tubulação a montante e a jusante do medidor, confeccionadas com material especial e dimensões controladas.

6.8 Disponibilidade ou não de trechos retos de tubulação no local de instalação do medidor

Conforme apresentado anteriormente, algumas tecnologias de medição de vazão exigem que o medidor integral ou o sensor sejam instalados em um conduto com trechos retos de tubulação a montante e a jusante do mesmo.

Nos casos onde inexistem tais condições, as soluções devem ser pela utilização de tecnologias de medição que não requerem o condicionamento do escoamento na entrada do medidor de vazão. Obviamente, estas soluções podem impactar na qualidade dos resultados das medições e nos custos de implementação e operação do sistema de medição.

7 PROJETO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Uma vez dimensionado o medidor de vazão a ser utilizado, a etapa seguinte é a definição da tecnologia de medição e o desenvolvimento do projeto do sistema de medição de vazão de água bruta em conduto forçado.

No projeto do sistema devem ser considerados os componentes do sistema de medição e os aspectos relacionados à integração desses componentes. Deve ser considerado ainda que os processos de medição devem ser planejados, validados, implementados, documentados e controlados. As grandezas de influência que possam afetar os processos de medição devem ser identificadas e avaliadas.

7.1 Especificação do processo de medição

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 10012: 2004 *Sistemas de gestão de medição - Requisitos para os processos de medição e equipamento de medição* ^[5], a especificação completa do processo de medição deve incluir a identificação de todo o equipamento pertinente, dos procedimentos de medição, programas de computador para medição, condições de uso, competências e habilidades do operador e todos os outros fatores que afetam a confiabilidade do resultado de medição.

Os requisitos metrológicos a serem atendidos pelo sistema de medição devem ser determinados com base nos requisitos do processo, da organização, estatutários ou regulamentares. O processo de medição projetado para satisfazer esses requisitos especificados deve ser documentado, validado como apropriado e, se necessário, acordado entre as partes envolvidas.

Para o processo de medição, os elementos e os controles do processo pertinente devem ser identificados. A escolha de elementos e limites de controle deve ser compatível com o risco de falha na conformidade com os requisitos especificados. Esses elementos e controles do processo devem incluir os efeitos de operadores, equipamento, condições ambientais, grandezas de influência e métodos de aplicação.

O processo de medição deve ser projetado para prevenir resultados de medição errôneos e deve assegurar a pronta detecção de deficiências e ações corretivas em tempo oportuno.

As características de desempenho requeridas para o uso pretendido do processo de medição devem ser identificadas e quantificadas.

O processo de medição deve ser realizado sob condições controladas projetadas para atender aos requisitos metrológicos.

As condições a serem controladas devem incluir:

- o uso de um equipamento de medição que possua modelo aprovado pelo órgão metrológico nacional;
- a aplicação de um procedimento de medição validado;
- a disponibilidade das fontes de informações requeridas;
- a manutenção das condições ambientais requeridas;
- o uso de pessoal competente;
- o relato adequado dos resultados, e
- a implementação de um sistema de monitoramento conforme especificado.

Os responsáveis pelo sistema de medição devem manter registros para demonstrar a conformidade com os requisitos do processo de medição, incluindo:

- uma descrição completa dos processos de medição implementados, incluindo todos os elementos (por exemplo, operadores, qualquer equipamento de medição ou padrões de verificação) utilizados e as condições de operação adequadas;
- os dados pertinentes obtidos dos controles do processo de medição, incluindo qualquer informação pertinente à incerteza de medida;
- quaisquer ações tomadas como resultado de dados de controle do processo de medição;
- a data na qual foi conduzida cada atividade de controle do processo de medição;
- a identificação de quaisquer documentos de verificação pertinentes;
- a identificação da pessoa responsável por prover a informação para os registros;
- as habilidades requeridas e alcançadas do pessoal.

7.2 Parâmetros para a seleção de um medidor de vazão

Os principais parâmetros que devem ser considerados durante o projeto, para a seleção e especificação de um medidor de vazão de água em condutos forçados são as seguintes:

- Custos

Os custos de aquisição e implementação do sistema de medição, incluindo-se os relativos ao projeto, construção, instalação, operação e manutenção.

- Função

A função a ser desenvolvida pelo instrumento: a indicação de vazão instantânea, o registro dos valores para totalização posterior ou apenas para verificação, o controle ou a totalização direta da vazão, no local ou remotamente.

- Desempenho

O desempenho metrológico do sistema de medição com relação à amplitude de medição, a exatidão, a precisão e a reprodutibilidade das medidas, além da estabilidade operacional relacionada à preservação e estabilidade dos seus parâmetros de calibração.

- Conduto

O presente documento trata especificamente o caso de escoamentos em condutos forçados. No entanto, é importante verificar a disponibilidade de trechos retos de conduto antes e depois do ponto de instalação do medidor; a necessidade de uso adicional de condicionadores de escoamento ou mesmo de implementação de modificações na instalação original.

- Instalação

A facilidade da instalação na tubulação já existente, a simplicidade da operação futura e a possibilidade de retirada e de colocação do medidor sem grandes interrupções do processo.

- Faixa de medição

A faixa de medição da vazão: valores máximo e mínimo, largura de faixa, condições de pressão estática e de temperatura do processo.

- Fluido

As características físicas e químicas da água bruta que entrará em contato direto com o medidor: composição, temperatura, pressão, abrasividade, corrosividade, sólidos em suspensão, valor e perfil das velocidades.

- Perda de carga

A perda de carga permanente admissível imposta ao escoamento que, de um lado, pode limitar a vazão de água por gravidade a partir de um reservatório ou, de outro, pode impactar o custo da energia consumida no sistema de bombeamento ao longo de anos.

- Dimensões e peso

As dimensões e o peso do medidor, características associadas ao transporte, armazenagem, manipulação, montagem e necessidade de se prover suportes para a sua instalação.

- Tecnologia

A tecnologia empregada, associada à manutenção, à tradição, à quantidade de partes móveis e ao número de peças de reposição necessárias.

- Medidor de vazão ideal

O medidor de vazão universal ideal seria aquele de baixo custo, alto desempenho, capaz de medir uma ampla faixa de vazão, com erro zero nos valores elevados e baixos, que não provoque perda de carga permanente, livre de manutenção, instalado na tubulação existente, sem a necessidade de trechos retos, podendo ser

retirado e instalado sem a interrupção do processo, com saída analógica para o registro e controle e digital para a totalização do mensurando.

Este medidor universal não existe, na prática. Na engenharia de medição de vazão, porém, existem dezenas de medidores diferentes, que utilizam princípios de operação distintos, com vantagens e desvantagens inerentes à sua geometria e à sua tecnologia de fabricação. Para cada conjunto de condições e exigências de processo há um medidor mais adequado que pode ser o escolhido. Isto obriga o engenheiro ou o técnico a conhecer os princípios básicos de todos os medidores de vazão e a aplicação mais indicada para cada caso.

O ponto de partida para esta escolha é o conhecimento prévio de todos os dados do processo que se deseja medir. A escolha deve ser feita baseada no compromisso entre o custo e o desempenho. Porém, apenas a escolha do melhor medidor de vazão não é suficiente para que se estabeleça uma medição contínua, com resultados exatos e confiáveis. O instrumento escolhido deve ser montado corretamente, mantido em perfeitas condições, recalibrado com periodicidade adequada, e os resultados fornecidos por ele devem ser interpretados e entendidos de modo correto e completo.

7.3 Medidores de vazão utilizados na medição de água bruta em condutos forçados

Alguns dos principais tipos de medidores de vazão aplicáveis à medição de água bruta em condutos forçados são os seguintes:

- a) Medidor de vazão do tipo eletromagnético, com excitação senoidal e corrente contínua pulsada. Utilizado para a medição de água bruta com certo grau de sujidades e sem impor perda de carga adicional ao escoamento. Aplicado tanto para pequenas quanto para grandes vazões de água.
- b) Medidor de vazão do tipo deslocamento positivo dos tipos hidrômetro e engrenagens ovais. Utilizados para a totalização direta de pequenas e médias vazões de água. Normalmente, não toleram muita sujidade na água, especialmente particulados.
- c) Sistema de medição de vazão com elemento primário gerador de pressão diferencial. Os tipos mais utilizados são a placa de orifício, o tubo de Venturi e o bocal. Outros dispositivos que operam com base no princípio de medição da pressão diferencial são o tubo de Pitot estático, o tubo de Pitot do tipo Cole e o tubo multifuros. Até recentemente, os medidores de vazão por pressão diferencial eram os tipos empregados na maioria das aplicações industriais.

- d) Medidor de vazão do tipo ultrassônico por efeito Doppler ou por tempo de trânsito. Aplicável na medição de médias e grandes vazões de água. É um medidor amostral que mede a velocidade do escoamento em uma trajetória específica dos pulsos ultrassônicos que cruzam o escoamento, sendo a vazão da água calculada a partir dessa velocidade amostral que, por hipótese, seria representativa do escoamento total.
- e) Medidor de vazão do tipo turbina com eixo longitudinal. Utilizada para a medição de vazão de água limpa, sem particulados que possam impactar as aletas do medidor. Pode possuir saída pulsada digital conveniente para a totalização.
- f) Medidor de vazão do tipo térmico, de potência constante ou de temperatura constante.
- g) Medidor de vazão do tipo vórtice baseado na geração alternada de vórtices de von Karman.
- h) Medidor de vazão do tipo mássico baseado no princípio de Coriolis. Embora de tecnologia moderna e altamente confiável, ainda apresenta pouca inserção no mercado de medição de água bruta devido ao seu custo inicial e a perda de carga que impõe ao escoamento.
- i) Medidor de vazão que utiliza o princípio de área variável de um tubo cônico com flutuador, muitas vezes conhecido como rotâmetro, e utilizado para a indicação local e barata de pequenas vazões de água sob pressão não muito elevada.

8 SELEÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO FLUIDOS PARA CONDUTOS FORÇADOS

A medição de vazão é uma das atividades mais importantes de todas as medições de processos. Milhões de metros cúbicos ou toneladas de fluidos são vendidos e comprados todos os dias sendo o seu valor determinado por meio de medições de vazão. O controle de plantas químicas e outras plantas de processo também dependem fortemente do desempenho de uma ampla gama de tipos de medidores de vazão. Todos os anos, novos modelos de medidores são lançados no mercado com a incorporação de avanços tecnológicos que ampliam os campos de aplicação dos medidores de vazão.

Atualmente, diversos medidores de vazão podem operar com confiabilidade em condições de pressão elevada, sob altas e baixas temperaturas e inclusive com fluidos agressivos. Existem também inúmeras publicações sobre aplicações de medidores de

vazão que aparecem em periódicos e que evidenciam que não existe um medidor de vazão único que seja adequado a todas as aplicações.

Este item fornece uma orientação sobre a seleção e a aplicação de medidores de vazão para a medição de vazão de fluidos em condutos fechados. Nele, os medidores estão classificados em dez grupos principais e são cobertos os princípios básicos de operação e aplicação de cada grupo. Também, são incluídas informações sobre a instrumentação secundária e alguns aspectos sobre a calibração do medidor. O escopo é restrito a medições de vazão em condutos forçados, de seção circular e não circular e, portanto, a medição de escoamentos em condutos abertos não é abordada neste documento.

As diretrizes foram adaptadas da norma BS 7405:1991 *Guide to Selection and application of flowmeters for the measurement of fluid flow in closed conduits* [4].

8.1 Classificação dos medidores de vazão

Atualmente, existem diversos tipos de medidores de vazão disponíveis comercialmente. Entretanto, conforme já mencionado, não existe nenhum tipo de medidor ideal para todas as aplicações. Dessa forma, são necessários habilidade e conhecimento para selecionar o medidor apropriado para uma aplicação particular.

Considerando a necessidade de atender uma ampla variedade de aplicações industriais, comerciais e de pesquisa, vários princípios fundamentais de operação de medidores de vazão foram e continuam a ser desenvolvidos por diferentes fabricantes. Esses princípios de operação convenientemente formam a base para a classificação dos medidores de vazão. Os medidores de vazão considerados neste documento são dispostos em dez grupos principais como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Classificação de medidores de vazão

Grupo	Descrição
1	Placas de orifício, tubos de Venturi e bocais
2	Outros tipos de medidores por pressão diferencial
3	Medidores do tipo deslocamento positivo
4	Medidores do tipo turbina rotativa
5	Medidores por oscilação do fluido
6	Medidores do tipo eletromagnético
7	Medidores do tipo ultrassônico
8	Medidores dos tipos mássicos diretos ou indiretos
9	Medidores dos tipos térmicos
10	Outros tipos

A Tabela 4 apresenta uma lista detalhada das tecnologias de medição cobertas por este documento e os grupos nos quais eles foram inseridos.

Tabela 4. Designações de grupos dos medidores de vazão

Grupo	Tecnologia de medição	Grupo	Tecnologia de medição
1	<p><i>Tipos convencionais de medidores por diferencial de pressão</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Placa de orifício concêntrico e de canto vivo (tipos de tomadas de pressão de canto, D e $D/2$ e nos flanges) • Tubos de Venturi (clássico e bocal tipo Venturi) • Bocais (tipos ISA e de raio longo) 	4	<p><i>Medidores do tipo turbina rotativa</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Medidor do tipo turbina axial • Medidor do tipo helicoidal mecânico • Turbina sem rolamentos • Medidores do tipo hélice • Turbina de inserção • Medidor do tipo turbina de rotor gêmeo • Medidor do tipo multijato ou multipalhetas • Disco de Pelton • Anemômetros de copos
2	<p><i>Outros tipos de medidores por diferencial de pressão</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Orifício anular • Orifício segmental ou excêntrico • Orifício integral • Tubo Gentile • Medidores por abertura de mola • Medidor tipo cotovelo • Medidor por resistência linear • Tubo de Dall • Bocais de vazão proprietários • Tubos de Pitot multifuros • Medidor do tipo wedge • Tubo de Pitot • Medidor do tipo área variável • Medidor do tipo target • Bocais sônicos • Placas de orifício de entrada cônica e de $1/4$ de círculo 	5	<p><i>Medidores por oscilação do fluido</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Medidor por emissão de vórtices • Swirlmeter • Vórtice de inserção • Oscilador de fluidos • Medidor de deflexão de fluido
3	<p><i>Medidores do tipo deslocamento positivo</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pistão recíproco • Aleta deslizante • Disco mutante • Bi e tri rotores • Medidores do tipo roots • Medidores do tipo diafragma • Pistão rotativo • Engrenagens ovais • Medidor do tipo rotor helicoidal • Bombas de medição de líquidos • Medidores do tipo gás úmido • Medidores do tipo foles 	6	<p><i>Medidores do tipo eletromagnético</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipos corrente alternada • Tipos corrente contínua • Tipos com sondas de velocidade
		7	<p><i>Medidores do tipo ultrassônico</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Medidores por tempo de trânsito • Tipo sing-around • Medidores de reflexo • Medidores por efeito Doppler • Acústica de onda longa
		8	<p><i>Medidores dos tipos mássicos diretos ou indiretos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Métodos indiretos • Turbina de momento angular • Venturi paralelo • Medidor giroscópico • Momento angular impulsionado • Tipo Coriolis • Ponte de Wheatstone
		9	<p><i>Medidores dos tipos térmicos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipos por perda de calor • Anemômetros de fio e filme quente • Medidores de perfil térmico • Grade de calor calorimétrico
		10	<p><i>Outros tipos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Medidores de correlação cruzada • Ressonância magnética nuclear • Ionização de gás • Anemômetro a laser • Medidores por injeção de traçadores • Métodos de ponderação • Técnicas de área e velocidade

8.2 Procedimento geral para seleção de medidor de vazão

8.2.1 Introdução

A seleção correta de um medidor de vazão para uma aplicação específica é uma atividade complexa e as consequências de uma seleção incorreta são as perdas de desempenho, tempo e dinheiro, com a possibilidade de causar danos ao equipamento e à instalação. Esta seção faz uso de figuras e tabelas para indicar (por meio de um processo de eliminação) aquelas técnicas de medição que não se adequam às aplicações do usuário.

A finalidade é restringir a escolha pelo usuário do medidor somente àquelas tecnologias que atendem de forma parcial ou total os requisitos. Se o atendimento for parcial, então uma consulta ao fabricante pode culminar em uma solução que busque a fabricação de uma versão especial do medidor, o que pode ser uma simples modificação.

O procedimento de seleção pode também servir como um checklist para o usuário experiente do medidor para assegurar que todas as variáveis foram consideradas. Em casos mais difíceis, pode ser necessário consultar um fabricante de medidor ou uma autoridade de avaliação técnica independente.

O ponto de partida para a seleção é a consideração do tipo de fluido a ser medido, isto é, líquido, gás ou outro fluido (ver a Tabela 5). O procedimento consiste, então, em examinar com mais detalhes as cinco áreas básicas que definem a aplicação, como a seguir:

- a. considerações de desempenho;
- b. considerações sobre as propriedades do fluido;
- c. considerações sobre a instalação e manutenção;
- d. considerações sobre o ambiente;
- e. considerações econômicas.

Dentro de cada área básica, existem inúmeros fatores que devem ser levados em consideração quando da especificação de um medidor de vazão. Recomenda-se que os fatores sejam reavaliados em conjunto uma vez que as cinco áreas são interativas.

Tabela 5. Áreas gerais de aplicação de medidores de vazão para líquidos

Grupo	Aplicação ⇒ Tipo ↓	A Líquidos em geral (viscosidade < 50 cP) (< 0,05 Pa·s)	B Pequenas vazões de líquidos (< 0,12 m³/h) (< 2 L/min)	C Grandes vazões de líquidos (> 1000 m³/h) (> 1,7 x 104 L/min)	D Grandes tubulações de água (D > 0,5 m)
1	Placa de orifício	✓	?	✓	✓
	Tubo de Venturi	✓		✓	✓
	Bocal	✓		✓	✓
2	Área variável	✓	✓		
	Tubo de Pitot	✓		✓	✓
3	Palhetas deslizantes	✓		#	
	Engrenagens ovais	✓	✓	#	
	Pistão rotativo	✓	?		
4	Turbina	✓		✓	#
	Medidor mecânico Turbina de inserção	✓ ✓		✓	✓
5	Vórtice	✓			
	Vórtice de inserção	✓		✓	✓
6	Eletromagnético	✓	✓	✓	✓
	Eletromagnético de inserção	✓		✓	✓
7	Ultrassônico Doppler	✓		?	?
	Ultrass. tempo de trânsito	✓	?	✓	✓
8	Coriolis (direto)	✓			
	Rotores gêmeos (indireto)	✓			
9	Anemômetro	✓		?	?
	Mássico térmico		#		
10	Traçador	✓	#	✓	✓
	Laser	✓		?	

Legenda:
 ✓ : é adequado, geralmente aplicável.
 ? : vale a pena considerar, às vezes aplicável;
 # : vale a pena considerar, disponibilidade limitada ou tende a ser caro;
 Em branco indica a não adequação, não aplicável.

Na seleção básica de um medidor de vazão, não deveriam ser consideradas somente as condições normais de processo, mas também as condições extraordinárias deveriam ser avaliadas. Essas poderiam incluir procedimentos de limpeza, desligamento, purga e outros processos que ocorrem em bases ocasionais e que podem ter um efeito adverso sobre o medidor.

8.2.2 Seleção básica do medidor de vazão

Para selecionar um medidor de vazão para uma aplicação específica, é recomendável utilizar um processo de eliminação, comparando-se o requisito da aplicação com a especificação publicada para todos os medidores. Quando uma especificação de um medidor não atende ao requisito da aplicação em uma das cinco áreas listadas, este é eliminado do processo de seleção. É importante que os requisitos da aplicação sejam definidos de forma abrangente e, assim, a Tabela 6 deveria ser utilizada para garantir que todos os fatores relevantes sejam considerados.

Tabela 6. Variáveis para o procedimento de seleção

Considerações sobre o desempenho metrológico do medidor	<ul style="list-style-type: none"> Incerteza de medida Repetibilidade das medidas Intervalo de medição Perda de carga Características do sinal de saída Tempo de resposta 	Considerações sobre o ambiente de medição	<ul style="list-style-type: none"> Temperatura ambiente e umidade do ar Condições climáticas (insolação, vento, chuva etc.) Condições de segurança Riscos elétricos Interferência eletromagnética
Considerações sobre a instalação de medição	<ul style="list-style-type: none"> Diâmetro da linha Trecho reto de tubulação a montante e a jusante Condições internas do conduto Orientação do medidor e sentido do escoamento Espaço para manutenção Localização das válvulas Conexões elétricas Fornecimento de acessórios (p.ex. filtros, retificadores, eliminadores de ar, transdutores de pressão e temperatura) Classificação da área Vibração do medidor e pulsação do escoamento 	Considerações sobre aspectos econômicos	<ul style="list-style-type: none"> Custo de aquisição Custos de instalação Custos operacionais Custos de manutenção Custos de calibração Vida útil do medidor Disponibilidade e custos de peças de reposição Custos decorrentes da perda de carga permanente Custos para atualização tecnológica
Considerações sobre as propriedades do fluido medido	<ul style="list-style-type: none"> Tipo de líquido Pressão e temperatura do líquido Massa específica Viscosidade e lubrificidade Propriedades químicas conhecidas Tensão superficial Abrasividade Presença de outras fases e outros componentes 		

A primeira consideração é a área de aplicação. A Tabela 5 lista as aplicações típicas para líquidos, mostrando os casos onde os medidores mais comumente disponíveis de cada grupo são aplicáveis.

Na tabela, um símbolo ✓ indica que um medidor é normalmente adequado, já um sinal ? indica três opções possíveis:

- a) deveria ser analisado com mais profundidade;
- b) a verificação é necessária, pois muitas vezes há dúvidas de que o requisito possa ser atendido;
- c) outros tipos de medidores do grupo podem ser adequados.

Um espaço em branco na tabela indica que o tipo de medidor considerado geralmente não é adequado para a aplicação. Esta tabela permite eliminar grupos de medidores que são claramente inadequados, para fornecer uma pequena lista de tipos de medidores a serem considerados. Os tipos de medidor restantes na lista menor podem ser avaliados detalhadamente nas cinco áreas listadas em 8.2.1.

A Tabela 6 fornece uma lista detalhada dos fatores que exigem consideração ao avaliar os medidores ainda presentes na relação de possíveis alternativas. Informações mais detalhadas sobre cada um desses fatores podem ser encontradas em 8.2.3 a 8.2.6.

É importante salientar que as tabelas e figuras apresentadas são apenas para orientação geral e, em alguns casos, não indicam as variações que ocorrem entre tipos de medidores dentro de um grupo ou mesmo variações entre fabricantes para os mesmos tipos de medidores.

8.2.2.1 Especificação inicial da medição

Os requisitos iniciais de uma aplicação podem ser tão restritivos que a especificação inicial pode necessitar ser relaxada para permitir que métodos adequados sejam identificados. Durante a especificação de uma aplicação de medição de vazão, é importante não incluir um requisito que seja claramente difícil de ser alcançado.

Por exemplo, um requisito de intervalo de medição onde o resultado da vazão máxima em relação à vazão mínima seja superior a 100 normalmente não é necessário em uma aplicação industrial. Se isto for mantido na especificação quando claramente não for necessário, o medidor escolhido pode não representar a solução ideal quando comparado a um selecionado com uma especificação menos rigorosa. Assim, uma especificação inicial incompatível com a aplicação pode resultar na escolha de um medidor de vazão que está longe do ideal.

A subespecificação pode levar à escolha de um medidor que é, na verdade, inadequado e, ao contrário, a especificação excessiva pode implicar a aquisição de um medidor excessivamente caro para uma aplicação onde uma alternativa mais barata teria cumprido a aplicação.

Infelizmente ainda não conseguimos encontrar o medidor de vazão universal e muitas vezes a escolha final é um compromisso entre vários fatores de influência. Os sistemas de medição de vazão geralmente consistem em dispositivos primários e secundários e instrumentação auxiliar. A seleção deve, portanto, ser feita com base no sistema e não apenas limitada às características do elemento primário.

Um parâmetro não listado na Tabela 6 é a preferência pessoal. Em alguns casos, esse aspecto intangível pode acabar dominando o processo de seleção. Por exemplo, onde diversas unidades de um tipo particular de medidor foram utilizadas em uma aplicação com sucesso geralmente bom, a seleção de novos medidores para outra aplicação pode vir a ser influenciada por este fato. Isso pode ou não resultar na escolha do medidor ideal para a nova aplicação.

A obtenção de dados reais de processo para especificar um sistema de medição é difícil, mas essencial. Em muitas aplicações, a composição real do fluido, as variações de pressão e de temperatura e de outras variáveis podem não ser conhecidas e, muitas vezes, apenas pode ser feita uma estimativa desses parâmetros.

A familiaridade com o processo a ser medido é valiosa, uma vez que o operador do processo possui informações, dados e experiência que, em geral, ajuda o engenheiro de instrumentação a compilar a especificação do sistema de medição. Assim, a seleção do medidor de vazão deve, sempre que possível, envolver dois ou mais profissionais para assegurar que a especificação correta seja elaborada.

Quando o procedimento de seleção estiver concluído, é aconselhável reavaliar a especificação, modificá-la conforme necessário e passar novamente pelo processo de seleção.

8.2.3 Considerações de desempenho

O desempenho metrológico dos medidores de vazão pode variar significativamente dependendo do projeto e do tipo de medidor. A Tabela 7 indica dados típicos para os medidores mais comuns listados na Tabela 5. Estes dados são faixas de valores para cada um dos tipos de medidores e é possível encontrar fornecedores com produtos melhores ou piores do que os apresentados. Novos produtos estão continuamente sendo lançados no mercado e melhorias no desempenho estão sendo implementadas o tempo todo.

O desempenho de um medidor de vazão é normalmente avaliado em função das características de exatidão e repetibilidade das medidas que ele proporciona. Frequentemente, embora incorretamente, estes termos são muito utilizados como sinônimos. Exatidão das medidas é normalmente necessária para aplicações de transferência de custódia e de balanços de volume ou massa. Se as medidas fornecidas por um medidor são consistentemente exatas, então também apresentam uma boa repetibilidade. No entanto, uma boa repetibilidade das medidas por si só não garante a sua exatidão, uma vez que estas podem incorporar repetidamente erros sistemáticos grandes.

A seguir, são apresentadas algumas definições importantes para a avaliação do desempenho metrológico dos medidores de vazão.

Tabela 7. Fatores de desempenho na seleção de medidores de vazão

Grupo	Tipo	Linearidade das medidas	Repetibilidade das medidas	Relação da vazão máxima/vazão mínima	Perda de carga na vazão máxima*	Parâmetro medido
1	Placa de orifício	#	#	3 ou 4:1	3 a 4	Q
	Tubo de Venturi	#	#	3 ou 4:1	2	Q
	Bocal	#	#	3 ou 4:1	2 a 3	Q
2	Área variável	$\pm 1\% \text{ FE a } \pm 5\% \text{ FE}$	$\pm 0,5\% \text{ FE a } \pm 1\% \text{ FE}$	10:1	3	Q
	Tubo de Pitot	#	$\pm 0,05\% \text{ I a } \pm 0,2\% \text{ I}$	#	1 a 2	Vm
3	Palhetas deslizantes	$\pm 0,1\% \text{ I a } \pm 0,3\% \text{ I}$	$\pm 0,01\% \text{ I a } \pm 0,5\% \text{ I}$	10:1 a 20:1	4 a 5	T
	Engrenagens ovais	$\pm 0,25\% \text{ I}$	$\pm 0,05\% \text{ I a } \pm 0,1\% \text{ I}$		4	T
	Pistão rotativo	$\pm 0,5\% \text{ I a } \pm 1\% \text{ I}$	$\pm 0,2\% \text{ I}$	10:1 a 250:1	4 a 5	T
4	Turbina	$\pm 0,15\% \text{ I a } \pm 1\% \text{ I}$	$\pm 0,02\% \text{ I a } \pm 0,5\% \text{ I}$	5:1 a 10:1	3	Q, T
	Medidor mecânico	Sem dados	$\pm 1\% \text{ FE}$	10:1 a 280:1	3	Q, T
	Turbina de inserção	$\pm 0,25\% \text{ I a } \pm 5\% \text{ I}$	$\pm 0,1\% \text{ I a } \pm 2\% \text{ I}$	10:1 a 40:1	1 a 2	Vp
5	Vórtice	$\pm 1\% \text{ I}$	$\pm 0,1\% \text{ I a } \pm 1\% \text{ I}$	4:1 a 40:1	3	Q
	Vórtice de inserção	$\pm 2\% \text{ I}$	$\pm 0,1\% \text{ I}$	15:1 a 30:1	1	Vp
6	Eletromagnético	$\pm 0,5\% \text{ I a } \pm 1\% \text{ I}$	$\pm 0,1\% \text{ I a } \pm 0,2\% \text{ FE}$	10:1 a 100:1	1	Q, T
	Eletromag. de inserção	$\pm 2,5\% \text{ I a } \pm 4\% \text{ I}$	$\pm 0,1\% \text{ I}$	10:1	1	Vp
7	Ultrassônico Doppler	Sem dados	$\pm 0,2\% \text{ FE}$	5:1 a 25:1	1	Vm, Q
	Ultras. tempo de trânsito	$\pm 0,1\% \text{ I a } \pm 1\% \text{ I}$	$\pm 0,2\% \text{ I a } \pm 1\% \text{ FE}$	10:1 a 300:1	1	Q
	Coriolis (direto)	Sem especificação	$\pm 0,1\% \text{ I a } \pm 0,25\% \text{ I}$	10:1 a 100:1	2 a 5	Q, T
8	Rotores gêmeos (indireto)	Sem dados	Sem dados	10:1 a 20:1	3 a 4	Q, T
	Anemômetro	Sem dados	$\pm 0,2\% \text{ FE}$	10:1 a 40:1	2	Vp
9	Mássico térmico	$\pm 0,5\% \text{ FE a } \pm 2\% \text{ FE}$	$\pm 0,2\% \text{ FE a } \pm 1\% \text{ I}$	10:1 a 500:1	2	Q
	Traçador	Sem dados	Sem dados	Até 1000:1	1	Vm
10	Laser	Sem dados	$\pm 0,5\% \text{ I}$	Até 2500:1	1	Vp

Q : vazão
T : volume totalizado
Vm : velocidade média

Vp : velocidade pontual
% I : porcentagem da vazão indicada
% FE : porcentagem do fundo de escala

: depende da medição da pressão diferencial
* : 1 é baixo e 5 é alto

8.2.3.1 Exatidão de medida

A exatidão de medida é definida no VIM ^[3] como o *grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando*. A exatidão de medida é um conceito apenas qualitativo e, assim, não é uma grandeza e não lhe é atribuída um valor numérico. Simplesmente se diz que uma medida é dita mais exata quando fornece um erro de medida menor.

A exemplo do que ocorre em outros segmentos da instrumentação, na área de medidores de vazão existe uma grande confusão envolvendo a especificação das características de desempenho metrológico desses instrumentos. Alguns fabricantes citam que seus medidores proporcionam resultados com a exatidão das medidas em termos de uma porcentagem do valor medido da grandeza e, outros, em termos de uma porcentagem do fundo de escala ou do intervalo.

A Figura 26 fornece um exemplo de como o erro de medida de vazão pode diferir em função da vazão medida, dependendo de qual base está sendo utilizada. É importante observar, a partir desta figura, que o erro como uma porcentagem da leitura é o erro que se aplica ao longo da faixa de vazão declarada do medidor.

Embora pouco recomendável, se a finalidade da aplicação for pela utilização de um medidor de vazão na parte inferior da sua faixa nominal de medição, é prudente calcular os erros reais de medida no intervalo definido.

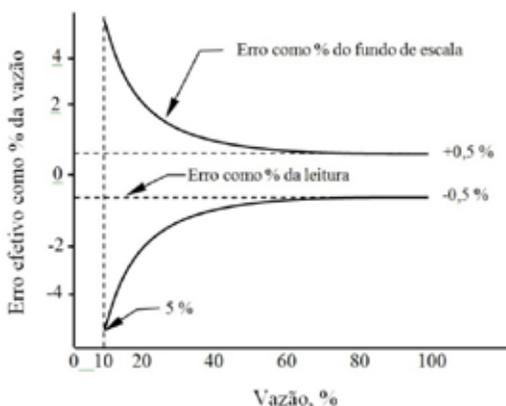


Figura 26. Exemplos de modos de declaração dos limites de erro de medida de vazão.

8.2.3.2 Repetibilidade de medida

O termo repetibilidade de medida é definido no VIM^[3] como a *precisão de medida sob um conjunto de condições de repetibilidade*. Por sua vez, o termo precisão de medida é definido no mesmo documento como o *grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares sob condições especificadas*.

A repetibilidade de medida pode ser afetada por mudanças de temperatura, pressão, viscosidade e outras propriedades do fluido, bem como por influências ambientais externas, durante as medições de vazão. Assim, as variações dos valores medidos podem se desviar de um valor médio de acordo com as leis estatísticas estabelecidas.

8.2.3.3 Linearidade

A linearidade de indicação é frequentemente um parâmetro importante na determinação da seleção de um medidor de vazão. Duas formas de mostrar as bandas de linearidade são dadas em (a) e (b) da Figura 27, onde os limites são desenhados com uma diferença de $\pm A\%$. A linearidade do medidor pode então ser cotada como $\pm A\%$ do fundo de escala para (a) e $\pm A\%$ do valor medido para (b) da Figura 27.

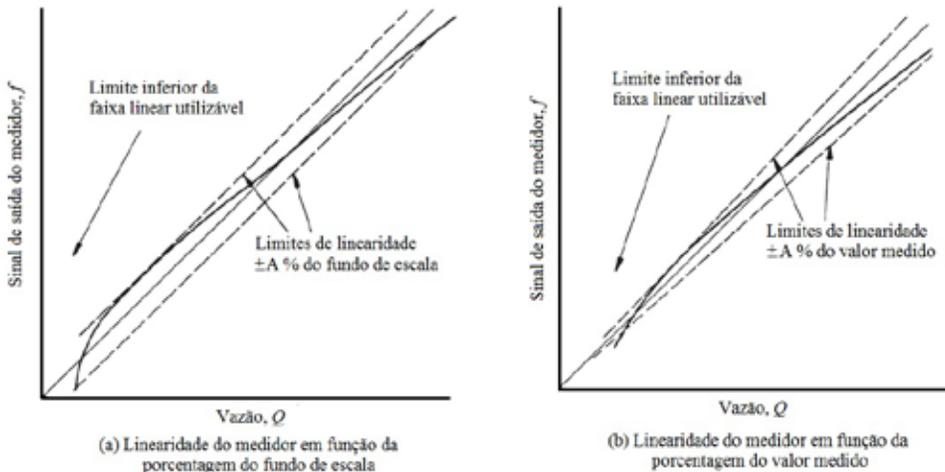


Figura 27. Linearidade de um medidor de vazão

Um exemplo de indicação alternativa de linearidade, aplicável a um medidor de vazão do tipo turbina, é mostrada na Figura 28.

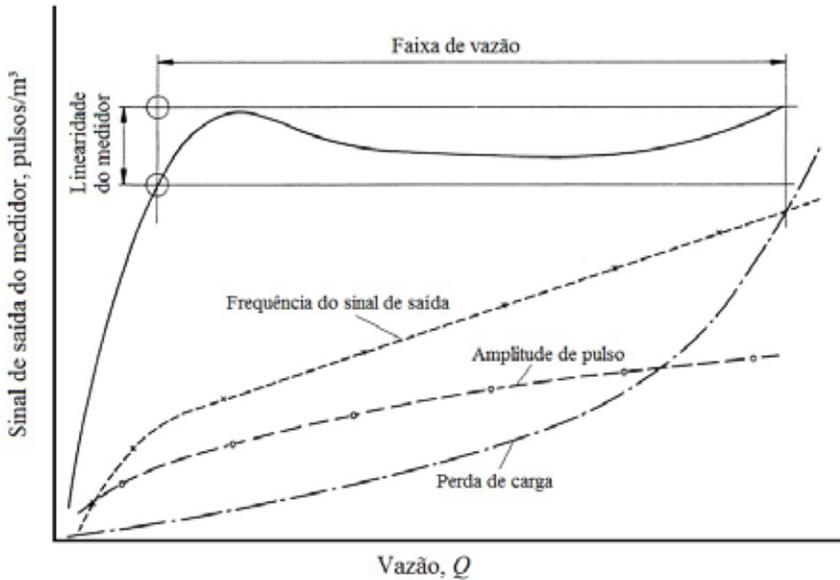


Figura 28. Características de um medidor de vazão do tipo turbina

Uma boa linearidade do medidor é particularmente importante para os medidores que possuem sinal de saída pulsada, em que um único valor do fator de desempenho metrológico do medidor pode ser utilizado para indicar a vazão na faixa de operação especificada.

Atualmente, os sistemas de medição incorporaram cada vez mais computadores de vazão ou sistemas supervisórios que permitem a configuração de fatores de ajuste ou curvas de calibração para a correção dos desvios de linearidade dos medidores de vazão. Esses fatores de ajuste ou curvas de calibração são levantados por meio da calibração do medidor em laboratório ou em campo, com a utilização de padrões de medida de referência rastreáveis e com incertezas de medida determinadas de acordo com procedimentos validados.

8.2.3.4 Intervalo de medição

O termo intervalo de medição é definido no VIM ^[3] como o *conjunto de valores de grandezas da mesma natureza que pode ser medido por um dado instrumento de medição ou sistema de medição com incerteza de medida instrumental especificada, sob condições determinadas.*

Um intervalo de medição de vazão extenso representa a capacidade de um determinado medidor operar em uma ampla faixa de vazões e é, muitas vezes, o principal requisito de algumas aplicações, como as medições destinadas ao controle de processos com vazões altamente variáveis. Sob esse aspecto, alguns modelos de medidores de vazão dos tipos deslocamento positivo, eletromagnéticos, turbina e mássicos tendem a apresentar intervalos de medida de vazão amplos o suficiente para atender a maioria das aplicações.

Se um medidor de vazão apresentar resultados altamente repetitivos, mas não necessariamente lineares, o sinal de saída pode ser condicionado eletronicamente com o objetivo de aumentar o intervalo útil de medição de vazão. Os fabricantes muitas vezes aconselham os usuários sobre as várias maneiras de se aumentar o intervalo de medição dos seus instrumentos. Os efeitos das propriedades do fluido, particularmente a massa específica e a viscosidade, também são importantes, uma vez que podem alterar significativamente o intervalo útil de operação de um determinado modelo de medidor.

A vazão correspondente ao sinal de saída de fundo de escala pode ser alterada em muitos medidores de vazão modernos. Um exemplo é o medidor de vazão do tipo eletromagnético para líquidos condutivos, onde alguns modelos disponíveis no mercado permitem configurar as faixas de velocidade do escoamento de 0 m/s a 1 m/s até 0 m/s a 10 m/s. Nesses casos, é importante sempre confirmar se um intervalo de medição de 10:1 ainda se aplica quando a saída do medidor é alterada para operar na faixa mais baixa de vazões de operação.

8.2.3.5 Incerteza de medida

O desempenho metrológico dos instrumentos de medição está sendo cada vez mais expresso em termos da incerteza de medida que este consegue proporcionar segundo um determinado nível de confiança, normalmente de 95 %. O termo incerteza de medida é definido no VIM ^[3] como um *parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.*

A incerteza de medida proporciona ao usuário uma indicação muito mais apropriada do desempenho do medidor do que a exatidão de medida. A incerteza de medida engloba efeitos de erros aleatórios e sistemáticos cometidos durante uma medição e inclui componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como

componentes associadas a correções empíricas, a valores atribuídos a padrões de medida, assim como à própria incerteza definicional (mínima).

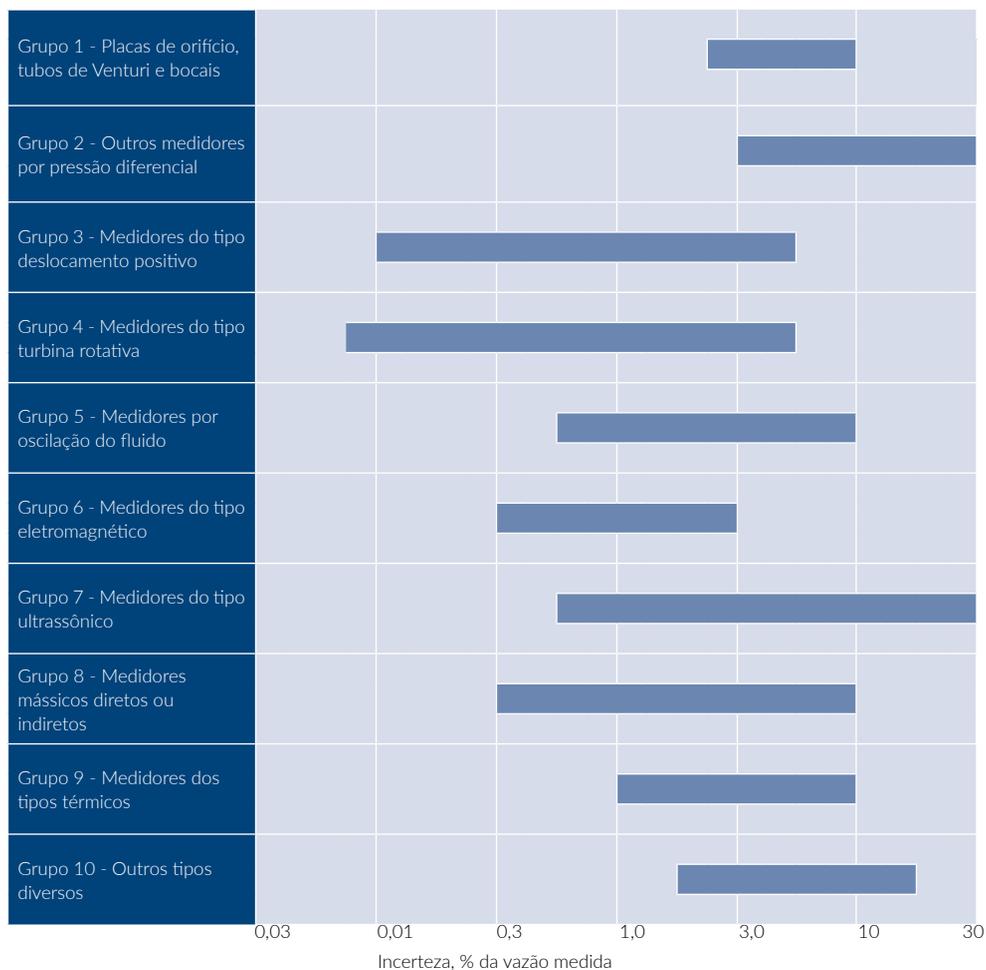


Figura 29. Distribuição típica de desempenho dos grupos de medidores de vazão.

Os erros aleatórios e sistemáticos inerentes a uma medição não são normalmente declarados em separado pelo fabricante do medidor de vazão quando este especifica o desempenho do seu instrumento.

Por outro lado, também é importante ressaltar a diferença entre erro de medida e incerteza de medida. A incerteza de medida pode ser calculada de acordo com um procedimento, como detalhado no GUM [7], enquanto o erro de medida é a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.

8.2.3.6 Características do sinal de saída

Muitas vezes, o tipo de sinal de saída determina a escolha do medidor. Dependendo do projeto e da aplicação, o sinal de saída do mensurando medido pode ser uma função:

- a) da vazão volumétrica do fluido;
- b) da vazão mássica do fluido;
- c) do volume totalizado de fluido;
- d) da massa totalizada de fluido;
- e) da velocidade média do escoamento;
- f) da velocidade pontual do fluido no escoamento.

Alguns medidores de vazão geram sinais de saída em tensão ou corrente elétrica, enquanto outros fornecem saídas na forma de pulsos, cada pulso correspondendo a um volume discreto do fluido. Os sinais de saída dos medidores de vazão volumétrica às vezes são configurados em unidades de massa e vice-versa.

Os medidores com sinal de saída pulsado geralmente são mais adequados para aplicações de indicação de taxa ou totalização de fluxo, enquanto os sinais analógicos interagem mais facilmente com elementos de loop de controle, como válvulas. Os níveis dos sinais de saída dos medidores analógicos podem variar consideravelmente (por exemplo, de alguns milivolts a vários volts), enquanto as saídas de pulso variam de quase uma corrente contínua até 10 kHz. A magnitude e o tipo de sinal de saída também devem ser examinados quanto à compatibilidade com computadores de fluxo, registradores de dados, instrumentos de alarme e sistemas de transmissão de dados. O sistema completo deve ser mantido o mais simples possível para minimizar o número de fontes de erro. Conforme discutido na seção 6, isso reduzirá a incerteza total de medição do sistema completo.

8.2.3.7 Queda de pressão no fluxo máximo

Restrições na queda de pressão máxima permitida devem ser definidas antes da seleção do medidor. A aplicação pode ter uma pressão de entrada ou capacidade de bombeamento limitada e uma alta perda gerada pela seleção do medidor errado pode afetar a eficiência do processo. A maioria dos medidores de vazão tem uma perda de carga não recuperável que varia com a vazão. Isso pode variar de perto de zero a tão alto quanto vários bar. Em algumas aplicações, principalmente hidrocarbonetos líquidos de com alta pressão de vapor, a queda excessiva de pressão pode resultar em cavitação

ou vaporização do líquido, com a consequente perda da precisão de medição e possíveis danos ao medidor.

8.2.4 Considerações sobre a instalação de medidores de vazão

Os requisitos de instalação para os medidores de vazão variam para as diferentes técnicas de medição. Alguns tipos de medidores necessitam de longos comprimentos retos de tubulação a montante para garantir o escoamento plenamente desenvolvido na entrada do medidor (por exemplo, alguns medidores dos grupos 1, 4, 6, 7 e 9), enquanto outros, notadamente os medidores do grupo 3 e 8, não são influenciados dessa mesma forma pela configuração da tubulação de entrada. Apesar disso, alguns medidores são especificados sem a devida consideração da sua localização em relação à direção do escoamento, orientação, aspectos de manutenção ou outros parâmetros.

Atualmente, existem diversos artigos técnicos publicados que mostram a forte influência dos efeitos da instalação sobre o desempenho dos medidores de vazão. A Tabela 8 lista os vários fatores que necessitam ser considerados nas restrições de instalação.

Tabela 8. Fatores a serem considerados no procedimento de seleção.

Fatores relacionados ao fluido e ao escoamento	Considerações sobre as propriedades do fluido Sentido do escoamento Pulsações e escoamento instável
Fatores relacionados à tubulação	Orientação da tubulação Trechos retos de tubulação a montante e a jusante do medidor Tamanhos de linhas Localização das válvulas
Fatores relacionados ao local	Local de instalação para fins de manutenção Vibração local Conexões elétricas Interferência eletromagnética
Requisitos específicos do medidor	Necessidade de acessórios (p.ex. filtros, retificadores, eliminadores de ar, detectores de gás, para-raios, painéis solares, baterias reserva) Necessidade de instrumentação adicional (p.ex.: medição de pressão e temperatura)

8.2.4.1 Considerações sobre as propriedades do fluido

Tabela 9. Seleção em função das propriedades do fluido.

Grupo	Tipo	Orientação	Sentido	Faixa nominal de trechos retos mínimos a montante	Faixa nominal de trechos retos mínimos a jusante	Filtro	Faixa de diâmetros da tubulação [mm]
1	Placa de orifício	H, VC, VB, I	U, B	5D / 80D	2D / 8D	N	6 a 2600
	Tubo de Venturi	H, VC, VB, I	U	0,5D / 29,5D	4D	N	>6
	Bocal	H, VC, VB, I	U	5D / 80D	2D / 8D		
2	Área variável	VC	U	0D	0D	P	2 a 600
	Target	H, VC, VB, I	U	6D / 20D	3,5D / 4,5D	N	12 a 100
	Tubo de Pitot	H, VC, VB, I	U, B	2D / 25D	2D / 4D	P	>25
	Bocal sônico	H, VC, VB, I	U	>5D	>0D	N	≥5
3	Palhetas deslizantes	H, VC, VB, I	U	0D	0D	R	25 a 250
	Engrenagens ovais	H	U	0D	0D	R	4 a 400
	Pistão rotativo	H, VC, VB, I	U	0D	0D	R	6 a 1000
	Diafragma	H	U	0D	0D	N	20 a 100
	Rotativo para gás	H, VC, VB, I	U, B	0D / 10D	0D / 5D	R	50 a 400
4	Turbina	H, VC, VB, I	U, B	5D / 20D	3D / 10D	P	5 a 600
	Pelton	H, VC, VB, I	U	5D	5D	R	4 a 20
	Medidor mecânico	H, VC, VB, I	U	3D / 10D	1D / 5D	R	12 a 1800
	Turbina de inserção	H, VC, VB, I	U, B	10D / 80D	5D / 10D	P	>75
5	Vórtice	H, VC, VB, I	U	1D / 40D	5D	N	12 a 200
	Swirlmeter	H, VC, VB, I	U	3D	1D	N	12 a 400
	Vórtice de inserção	H, VC, VB, I	U	20D	5D	N	>200
6	Eletromagnético	H, VC, VB, I	U, B	0D / 10D	0D / 5D	N	2 a 3000
	Eletrom. de inserção	H, VC, VB, I	U, B	25D	5D	N	>100
7	Doppler	H, VC, VB, I	U, B	10D	5D	N	>25
	Tempo de trânsito	H, VC, VB, I	U, B	0D / 50D	2D / 5D	N	>4
8	Coriolis (direto)	H, VC, VB, I	U	0D	0D	N	6 a 150
	Twin rotor (indireto)	H, VC, VB, I	U	20D	5D	N	6 a 150
9	Anemômetro	H, VC, VB, I	U, B	10D / 40D	Sem dados	R	>25
	Mássico térmico	H, VC, VB, I	U	Sem dados	Sem dados	R	2 a 300
10	Traçador	H, VC, VB, I	U, B	#	#	N	Sem limite
	Laser	H, VC, VB, I	U, B	0D	0D	P	

Legenda: D : diâmetro nominal do tubo
 H : escoamento horizontal
 VC : escoamento vertical para cima
 VB : escoamento vertical para baixo
 I : escoamento inclinado
 # : comprimento de mistura

U : escoamento unidirecional
 B : escoamento bidirecional
 R : recomendado
 N : não necessário
 P : possível

Tabela 10. Requisitos gerais de instalação para a seleção de medidores de vazão.

Grupo	Tipo	Pressão máxima (bar)	Faixa de temperatura (°C)	Número de Reynolds mínimo, ReD	Gás (G) ou Líquido (L)	Duas ou mais fases
1	Placa de orifício	400	< 650	3 x 104	L, G	P
	Tubo de Venturi	400	< 650	105	L, G	P
	Bocal	400	< 650	2 x 104	L, G	N
2	Área variável	700	-80 a 400	Sem dados	L, G	N
	Target	100	-40 a 120	3 x 104	L, G	A
	Tubo de Pitot	400	< 540	104	L, G	N
	Bocal sônico	400	< 650	2,5 x 104	G	N
3	Palhetas deslizantes	100	-30 a 200	103	L	N
	Engrenagens ovais	100	-15 a 290	102	L	N
	Pistão rotativo	170	-40 a 170	102	L	N
	Diafragma	200	-30 a 200	2,5 x 102	G	N
	Rotativo para gás	100	-40 a 150	103	G	N
4	Turbina	3500	-268 a 530	104	L, G	N
	Pelton	600	-225 a 530	104	L, G	N
	Medidor mecânico	70	-25 a 200	103	L, G	N
	Turbina de inserção	250	-50 a 430	104	L, G	N
5	Vórtice	260	-200 a 430	2 x 104	L, G	P
	Swirlmeter	100	-40 a 110	Sem dados	L, G	N
	Vórtice de inserção	70	-30 a 150	5 x 103	L, G	N
6	Eletromagnético	300	-60 a 220	Sem limite	L	A/P
	Eletrom. de inserção	20	5 a 25	Sem dados	L	N
7	Doppler	*	-20 a 80	5 x 103	L	A
	Tempo de trânsito	200	-200 a 250	5 x 103	L, G	N/P
8	Coriolis (direto)	390	-240 a 400	102	L	P
	Twin rotor (indireto)	400	-240 a 350	104	L	N
9	Anemômetro	20	-200 a 400	Sem dados	L, G	N
	Mássico térmico	300	0 a 100	Sem dados	L, G	N
10	Traçador	Sem dados	Sem dados	Sem limite	L, G	P
	Laser	*	Sem dados	Sem limite	L, G	N

Legenda: A : é adequado
N : não é adequado
P : é possível
* : depende da espessura da parede do tubo

A Tabela 10 fornece dados sobre os requisitos de instalação e indica se componentes, como filtros ou retificadores de escoamento, devem ser instalados.

8.2.4.2 Orientação da tubulação

A orientação da tubulação pode, em alguns casos, afetar a escolha do medidor de vazão. O desempenho de alguns medidores pode variar entre instalações horizontais e verticais. Por exemplo, efeitos severos podem ser notados em alguns escoamentos verticais para baixo, onde o carregamento em componentes rotativos pode levar à perda de linearidade ou baixa repetibilidade das medidas.

A orientação de instalação da maioria dos medidores é especificada pelo fabricante e essas recomendações devem ser seguidas. Onde for necessária a instalação do medidor em orientações diferentes das previstas pelo fabricante, esclarecimentos adicionais devem ser solicitados ao fornecedor. A orientação também pode depender da natureza do fluido e de seu escoamento. Por exemplo, a deposição de partículas sólidas pode ocorrer em tubos horizontais e, portanto, a medição de polpas apresenta melhores resultados quando realizada em linhas verticais.

Sempre que possível, os medidores de vazão para fluidos monofásicos devem ser instalados em linhas horizontais, a menos que indicado de outra forma, uma vez que isso se aproxima mais da condição de instalação na qual o medidor provavelmente foi calibrado. No entanto, alguns medidores não são afetados significativamente pela orientação e a Tabela 10 fornece as diretrizes gerais para cada caso.

8.2.4.3 Sentido do escoamento

É muito importante notar que alguns medidores de vazão operam com o fluido escoando somente em um sentido e a sua instalação incorreta pode resultar em danos permanentes sobre o mesmo. Da mesma forma, é importante identificar a possibilidade de ocorrência de escoamento reverso na linha, por exemplo, em condições de falha ou de desligamento de bombas hidráulicas. Em casos onde tais situações possam ocorrer, a instalação pode exigir válvulas de retenção ou de bloqueio para proteger o medidor.

O desempenho metrológico daqueles medidores capazes de operar nos dois sentidos pode variar entre as direções para frente e para trás. A maioria dos medidores de vazão apresenta a direção do escoamento claramente marcada no corpo do medidor e os resultados da calibração do medidor deverá ser aplicada somente para o seu uso nesta direção. Os medidores bidirecionais devem ser calibrados em ambas as direções.

8.2.4.4 Trechos retos de tubulação a montante e a jusante do medidor

A maioria dos medidores de vazão é afetada em algum grau pelas condições de escoamento na sua entrada e, assim, cuidados devem ser tomados para garantir escoamentos sem perturbações na sua entrada. O arranjo da tubulação pode introduzir vários tipos de distúrbios de escoamento, sendo os mais comuns a distorção do perfil de velocidades e o escoamento helicoidal. A distorção do perfil de velocidades na entrada do medidor pode ser causada por uma obstrução bloqueando parcialmente o tubo, por exemplo, uma válvula semiaberta, ou pela influência de uma curva a montante do medidor. Por sua vez, o escoamento helicoidal é geralmente causado por duas ou mais curvas próximas em planos diferentes. Estes efeitos podem ser controlados garantindo um comprimento adequado de trecho reto de tubulação a montante do medidor ou instalando um dispositivo de retificação do escoamento. Em instalações mal projetadas, ambos os efeitos provavelmente ocorrerão juntos e condicionadores de escoamento especiais serão necessários.

Não é apenas a conexão imediatamente a montante do medidor que deve ser considerada, porque combinações de acessórios mais a montante na linha podem, de fato, ser a fonte de perturbações diferentes daquelas produzidas pelo acessório mais próximo. Esses efeitos podem ser reduzidos introduzindo a maior distância possível entre os componentes que produzem perturbações, em vez de agrupá-los, como ocorre com frequência na prática. Um exemplo muito comum é uma única curva a jusante de uma válvula parcialmente aberta. Também é importante garantir que comprimentos retos curtos desobstruídos a jusante também sejam incluídos para minimizar os efeitos de escoamento na saída do medidor.

Cavitação e condensação são mais dois efeitos que podem ser causados por tubulações inapropriadas. Tais problemas podem ser evitados garantindo que não ocorram grandes mudanças repentinas no diâmetro ou na direção da tubulação. As configurações de tubulação também podem gerar pulsações no escoamento.

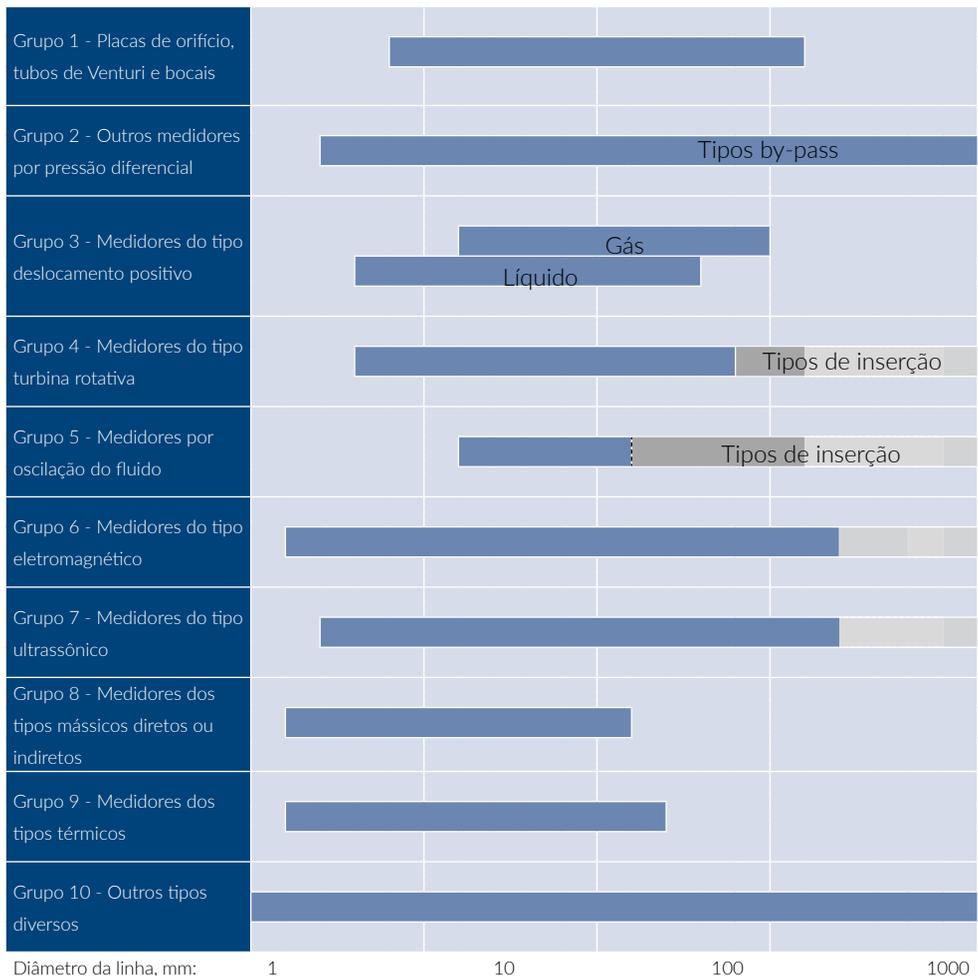
8.2.4.5 Tamanhos de linhas

Diâmetros de tubulação muito pequenos ou muito grandes geralmente restringem a escolha do medidor de vazão. Alguns medidores de vazão não são fabricados em uma ampla gama de tamanhos e, embora um medidor específico possa atender aos requisitos do usuário, ele pode não estar disponível comercialmente para aquela dimensão de linha.

A Figura 30 apresenta as faixas típicas de tamanho disponíveis para os 10 grupos discutidos e, na última coluna da Tabela 10, são mostrados exemplos de tamanhos de medidores mais comuns dentro desses grupos.

Baixas velocidades de escoamento em tubos grandes ou altas velocidades em tubos pequenos podem exigir uma alteração no diâmetro do tubo para produzir uma velocidade que resulte dentro da faixa operacional de medidores de vazão comerciais.

Uma velocidade muito baixa restringe a escolha do medidor e uma velocidade muito alta pode causar danos por excesso de velocidade ou perda de carga elevada.



NOTA: A área hachurada representa a sobreposição de faixas entre os medidores de carretel e de inserção.

Figura 30. Distribuição típica de tamanhos dos grupos de medidores de vazão.

8.2.4.6 Local de instalação para fins de manutenção

A importância do local de instalação do medidor com vistas à sua manutenção nem sempre é considerada. Como regra geral, a acessibilidade física ao local deve ser proporcionada ao operador e o medidor deve ser instalado em um local que possibilite a sua manutenção ou substituição com presteza e segurança.

Alguns medidores podem necessitar ser instalados em ambientes que restrinjam a manutenção. Estes são geralmente áreas perigosas, por exemplo, áreas classificadas ou de alta radiação. Nestes casos, a escolha do medidor deve ser motivada pela necessidade de não haver manutenção.

8.2.4.7 Vibração local

Alguns medidores de vazão são suscetíveis a vibrações mecânicas e, assim, o projeto de suportes adequados para tubulações deve ser considerado em todos os sistemas de medição. Amortecedores de pulsação podem remover os efeitos de bombas e compressores, mas todos os instrumentos devem estar localizados o mais distante possível de fontes de vibração ou pulsação. É uma boa prática permitir que os fabricantes de medidores revisem o leiaute da tubulação para informar sobre quaisquer modificações que possam ser necessárias para minimizar esses efeitos.

8.2.4.8 Localização das válvulas

As tubulações onde são instalados os medidores de vazão geralmente possuem válvulas de controle de fluxo e válvulas de isolamento de linha. As válvulas de controle de fluxo devem estar localizadas a jusante do medidor para evitar qualquer perturbação no perfil de velocidades do escoamento ou cavitação associada às válvulas, afetando o desempenho do medidor. As válvulas, além de controlar o fluxo, também podem aumentar a contrapressão no medidor. É essencial que a pressão no medidor seja mantida significativamente mais alta do que a pressão de vapor para evitar a cavitação para certos tipos de medidores como, por exemplo, turbinas para líquidos.

Válvulas a montante e a jusante são frequentemente instaladas para isolar o medidor, permitindo a sua manutenção. As válvulas a montante devem ter passagem plena, mas mesmo assim devem estar localizadas a uma distância suficiente para evitar a perturbação do perfil de velocidades do escoamento na entrada do medidor. Em sistemas de medição de vazão para transferência de custódia de fluidos utilizando várias linhas, as válvulas instaladas a jusante do medidor devem ser de alta integridade, bloqueio duplo

e sangria. Frequentemente, é instalada uma linha sobresselente ou um *by-pass* para permitir o escoamento quando um medidor está sendo submetido à manutenção ou calibrado.

8.2.4.9 Conexões elétricas

A maioria dos sistemas de medição modernos incorporam equipamentos eletrônicos no medidor ou associado a ele. Dessa forma, é importante garantir que a fonte de energia disponível seja suficiente para o medidor selecionado.

Quando o nível do sinal de saída gerado pelo medidor for inadequado, devem ser usados pré-amplificadores compatíveis com o ambiente da aplicação.

O medidor e todas as conexões elétricas devem ser protegidos contra interferência elétrica dispersa. Os fabricantes de medidores podem orientar o projetista do sistema de medição sobre as conexões elétricas e os tipos de cabeamento necessários.

8.2.4.10 Interferência eletromagnética

Os sinais de saída de alguns tipos de medidores de vazão são suscetíveis à presença de fontes de energia elétrica de alta potência. Essas fontes de energia podem produzir surtos nos cabos de sinal que são detectados nos pulsos de saída do medidor. Podem também afetar o funcionamento elétrico do medidor ocasionando, por exemplo, uma distorção de campo no medidor de vazão eletromagnético. Nesse sentido, os cabos de sinal devem ser direcionados para longe dos cabos elétricos e de fontes de energia visando minimizar os efeitos de interferências eletromagnéticas e de radiofrequência.

8.2.4.11 Fornecimento de acessórios

Algumas instalações de medição de vazão podem exigir equipamentos adicionais para garantir o funcionamento satisfatório do medidor. Por exemplo, os medidores do tipo deslocamento positivo (grupo 3) e tipo turbina (grupo 4) geralmente requerem alguma forma de filtragem do fluido a montante do medidor.

Algumas aplicações também podem exigir instrumentação adicional para complementar a medição principal. Por exemplo, aplicações de medição de vazão em massa podem utilizar medidores convencionais de vazão volumétrica, associados a instrumentos de medição de temperatura e pressão do fluido. Alternativamente, medições de pressão e de temperatura do fluido podem ser necessárias para fins de compensação dos efeitos desses parâmetros na medição de vazão do fluido.

Outros equipamentos podem incluir detectores de gás para fornecer uma advertência se o medidor de vazão não estiver funcionando completamente cheio de líquido ou para controlar a condensação do vapor d'água do ar ambiente. Outros acessórios podem, ainda, incluir para-raios, painéis solares, ou conjuntos de baterias reserva.

8.2.4.12 Pulsações e escoamento instável

Sempre que possível, os escoamentos pulsantes devem ser evitados já que a maioria dos medidores de vazão apresenta uma sobre medida nessas aplicações. Causas comuns de pulsações é a presença de bombas de deslocamento, compressores alternativos, válvulas reguladoras, ou oscilações hidráulicas como a geração de vórtices no escoamento. Se houver suspeita da presença de pulsações no escoamento, as suas amplitude e frequência devem ser medidas por intermédio de um dispositivo de resposta rápida, como uma sonda de anemômetro de fio quente. Isso determinará se o requisito de alta frequência de resposta deve ser listado junto com os outros parâmetros de desempenho antes do início do procedimento de seleção do medidor.

É bem conhecido que os medidores de pressão diferencial de todos os tipos estão sujeitos a erros de medida devido à pulsação, mas é menos sabido que os medidores de vazão dos tipos turbina e vórtice, por exemplo, possam dar origem a erros de sobre medição tão sérios quantos aqueles apresentados por medidores de orifício. Também, é necessário perceber que pode haver efeitos de pulsação separados nos dispositivos primário e secundário. Os efeitos de pulsação podem ser minimizados pela instalação de amortecedores. O escoamento instável é uma forma menos grave de pulsação que pode surgir, por exemplo, da operação de válvulas de controle superdimensionadas. Os medidores de vazão de resposta de alta frequência geralmente podem tolerar baixos níveis de instabilidade de fluxo.

8.2.5 Considerações ambientais

8.2.5.1 Geral

As condições ambientais e possíveis variações nessas condições esperadas em torno do medidor de vazão devem ser consideradas no procedimento de seleção. A Tabela 6 e a Tabela 11 listam os fatores relevantes.

Tabela 11. Seleção em função de requisitos ambientais.

Grupo	Tipo	Efeito da temperatura ¹⁾	Versão intrinsecamente segura	Versão a prova d'água e explosão	Efeito de IEM ou de IRF ¹⁾
1	Placa de orifício	4	#	#	1/2
	Tubo de Venturi	3	#	#	1/2
	Bocal	3	#	#	1/2
2	Área variável	3	D	D	1
	Target	3	ND	D	3
	Tubo de Pitot	3	#	#	2
	Bocal sônico	3	D	ND	1/2
3	Palhetas deslizantes	4	D	D	1/3
	Engrenagens ovais	4	D	D	1/3
	Pistão rotativo	4	D	D	1/3
	Diafragma	4	D	ND	1/3
	Rotativo para gás	4	D	ND	1/3
4	Turbina	3	D	D	4
	Pelton	3	D	D	4
	Medidor mecânico	3	D	D	1
	Turbina de inserção	3	D	D	4
5	Vórtice	2	D	D	4
	Swirlmeter	2	D	D	3
	Vórtice de inserção	1	D	N	3
6	Eletromagnético	1	D	D	3
	Eletrom. de inserção	1	D	N	3
7	Doppler	3/4	D	D	4
	Tempo de trânsito	3/4	ND	D	4
8	Coriolis (direto)	1	D	D/ND	4
	Twin rotor (indireto)	2	Sem dados	Sem Dados	4
9	Anemômetro	3	ND	ND	2
	Mássico térmico	4	D	D	2
10	Traçador	1	N	N	1
	Laser	1	ND	ND	4

Legenda:

N : não é necessário

D : é disponível

ND : não é disponível

: é dependente da medida da pressão diferencial

¹⁾ : 1 é baixo e 5 é alto

IEM : interferência eletromagnética

IRF : interferência de rádio frequência

8.2.5.2 Temperatura ambiente

A eletrônica e em alguns casos, os medidores podem ser afetados por mudanças significativas da temperatura ambiente. O medidor de vazão pode sofrer alterações dimensionais, enquanto os componentes afetados na eletrônica secundária podem reduzir seu desempenho. Mudanças de massa específica ou de viscosidade do fluido sob medição também podem ocorrer devido à transferência de calor através do corpo do medidor. Às vezes, é possível posicionar o medidor e os dispositivos de leitura em locais diferentes para proteger os componentes eletrônicos dos efeitos da temperatura. Em determinadas situações, pode ser necessário o uso de abrigos com controle ambiental.

O isolamento térmico da tubulação é necessário quando as mudanças de temperatura ambiente afetam as propriedades do escoamento. Quando a incerteza total da medição de vazão está sendo calculada, os efeitos ambientais podem ser uma fonte significativa de incerteza. Além disso, os materiais de construção do medidor e a tubulação associada precisam de uma avaliação cuidadosa quando ocorrem grandes variações da temperatura ambiente e da temperatura do fluido de processo.

8.2.5.3 Umidade

A alta umidade pode acelerar a corrosão atmosférica e eletrolítica e reduzir o isolamento elétrico. A baixa umidade pode induzir eletricidade estática. Problemas decorrentes da umidade podem ser causados por mudanças rápidas da temperatura ambiente ou da temperatura do fluido de processo. O usuário deve conhecer o intervalo de variações esperadas e verificar se isso não gera problemas na operação, levando em consideração o medidor e os instrumentos associados que estão sendo utilizados.

8.2.5.4 Segurança

Em aplicações com ambientes perigosos, os medidores de vazão devem ser selecionados com relação à compatibilidade atmosférica, classificação elétrica da área e outros regulamentos ou normas de segurança que possam ser aplicados.

Atmosferas quimicamente agressivas podem resultar em corrosão externa do medidor ou podem afetar as leituras eletrônicas se não forem montadas remotamente. Invólucros especiais devem ser considerados nestes casos e onde vapores inflamáveis ou partículas de poeira inflamáveis estão presentes. Grandes fontes de energia elétrica não devem ser usadas nesses ambientes. Invólucros à prova d'água para o medidor e eletrônicos podem ser necessários em muitas aplicações de processo. Muitas vezes, instalações completas são lavadas durante a limpeza de rotina e a instrumentação deve ser protegida para garantir uma operação segura.

8.2.5.5 Interferência eletromagnética

Cabos de energia, motores elétricos e comutadores de processo, todos produzem interferência eletromagnética, o que pode causar erros de medida.

8.2.6 Considerações econômicas

8.2.6.1 Geral

Ao olhar para o custo total da medição, vários fatores devem ser examinados e não simplesmente o preço de aquisição do medidor. A Tabela 6 inclui uma lista das variáveis econômicas a serem consideradas, e a Tabela 12 indica os custos relativos das mais importantes.

Tabela 12. Seleção em função de fatores econômicos.

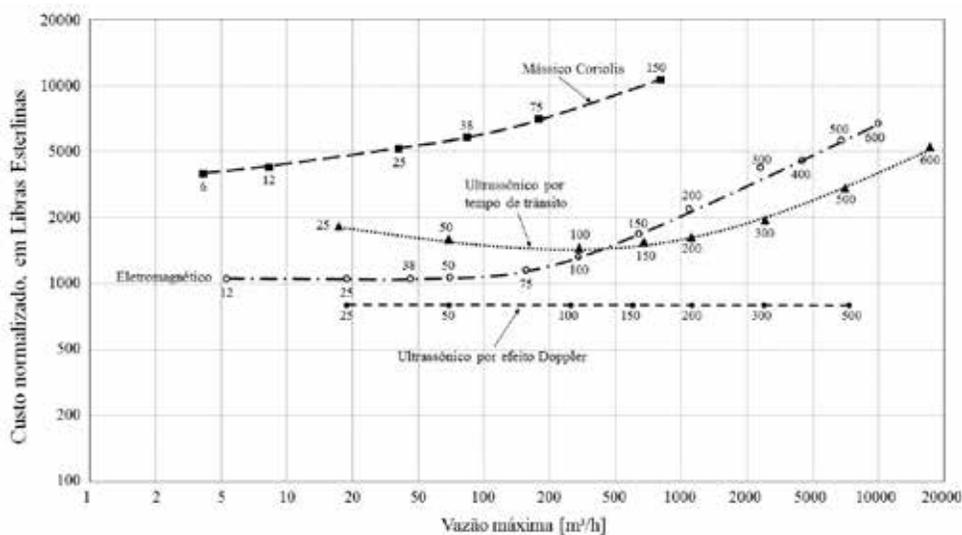
Grupo	Tipo	Custos de instalação	Custos de calibração	Custos de operação	Custos de manutenção	Custos de peças de reposição
1	Placa de orifício	2/4	1	3	2	1
	Tubo de Venturi	4	1/4	2	3	3
	Bocal	3	3	2	3	2
2	Área variável	1/3	2	2	1	1
	Target	3	3	2	3	3
	Tubo de Pitot	2	3	2	2	2
	Bocal sônico	2	1	3/4	2	1
3	Palhetas deslizantes	3	5	4	4	5
	Engrenagens ovais	3	4	4	4	5
	Pistão rotativo	3	3	3	3	4
	Diafragma	3	3	1	2	2
	Rotativo para gás	3	4	3	3	3
4	Turbina	3	4	3	4	4
	Pelton	4	3	3	4	3
	Medidor mecânico	3	2	2	3	3
	Turbina de inserção	2	3	2	2	3
5	Vórtice	3	3	3	3	3
	Swirlmeter	3	4	3	3	3
	Vórtice de inserção	2	3	2	3	3
6	Eletromagnético	3	3	1	3	3
	Eletrom. de inserção	2	3	2	3	2
7	Doppler	1/3	1	1	3	2
	Tempo de trânsito	1/3	3	1	3	2
8	Coriolis (direto)	3	4	4	3	3
	Twin rotor (indireto)	3	3	3	3	3
9	Anemômetro	3	2	1	3	3
	Mássico térmico	3	4	2	4	3
10	Traçador	2	-	4	2	4
	Laser	5	-	4	5	5

Legenda: 1 é baixo e 5 é alto

Ressalta-se que os valores apresentados na Tabela 12 devem ser utilizados com extrema cautela, pois os vários projetos dentro de cada grupo podem variar consideravelmente em todos os aspectos listados.

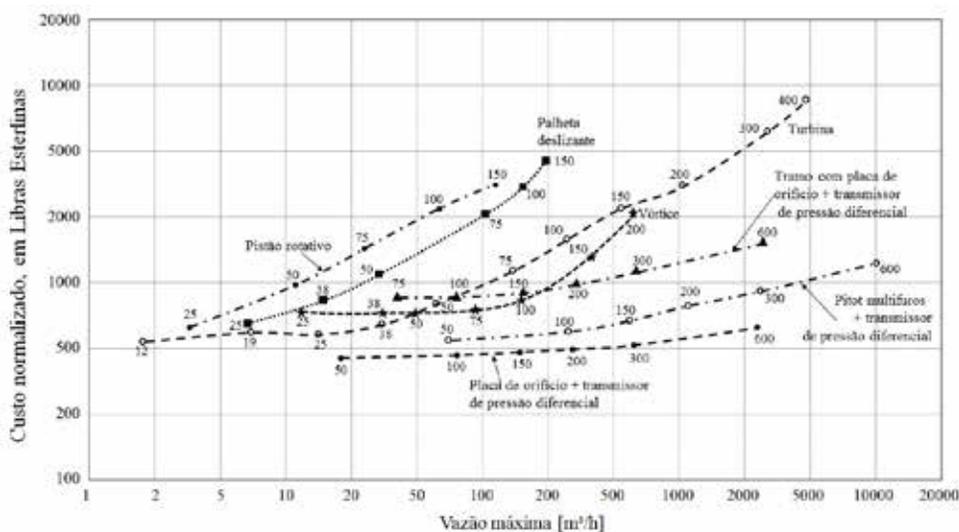
8.2.6.2 Preço de aquisição

Com relação aos preços de aquisição de medidores de vazão, não existem dados consolidados referentes ao mercado desses produtos no Brasil. Nesse sentido, apenas a título de informação, nas Figuras 31 e 32 são apresentadas linhas de tendência com os preços normalizados de aquisição para alguns tipos de medidores de vazão de líquidos em função das vazões de operação e dos diâmetros nominais de tubulação. Esses preços referem-se ao mercado de medidores de vazão no Reino Unido e levantado na década de 1990.



NOTA: Os números junto aos pontos plotados referem-se ao diâmetro do conduto em milímetros.

Figura 31. Comparação entre preços de aquisição de medidores de vazão para líquidos.



NOTA: Os números junto aos pontos plotados referem-se ao diâmetro do conduto em milímetros.

Figura 32. Comparação entre preços de aquisição de medidores de vazão para líquidos.

As figuras mostram que, por exemplo, para uma vazão de 250 m³/h, podem ser utilizados tanto uma placa de orifício de 200 mm, um medidor do tipo vórtice de 150 mm ou um medidor do tipo eletromagnético de 100 mm. Assim, os custos totais da instalação completa podem ser comparados de uma forma mais direta.

As Figuras 31 e 32 devem ser utilizadas com muito cuidado e apenas para uma avaliação relativa. O preço de compra efetivo de um medidor dependerá de muitas variáveis, como classes de pressão, materiais de construção, grau de proteção, etc. Portanto, deve ser sempre considerada a possibilidade de ocorrer uma grande variação em torno dos valores apresentados nas figuras.

8.2.6.3 Custos de instalação

Alguns métodos de medição de vazão de fluidos exigem atenção ao condicionamento do escoamento e a provisão de trechos retos de tubulação longos na entrada do medidor para garantir um bom desempenho metrológico. A instalação correta pode exigir tubulação extra ou a provisão de linhas de desvio para manutenção e verificação de rotina. Uma placa de orifício com uma célula de pressão diferencial é relativamente barata, mas quando instalada corretamente com um tubo de medição com trechos retos de montante e de jusante, conexões de pressão e de temperatura e

condicionadores de escoamento apropriados, o custo total pode ser muitas vezes maior que o custo do elemento básico.

Outros fatores de custo poderiam incluir a necessidade de comprar válvulas de bloqueio, filtros ou outros equipamentos auxiliares para completar a instalação do sistema de medição. Todos estes contribuem para os custos de instalação completos, mas raramente são considerados nos aspectos econômicos da seleção.

8.2.6.4 Custos de calibração

Os custos de calibração de medidores de vazão geralmente aumentam proporcionalmente ao nível de desempenho requerido. Para calibrações de baixa incerteza associada aos resultados, são necessárias instalações de teste certificadas, e podem ser caras para se construir ou contratar. Os custos de calibração listados na Tabela 12 indicam esse fato.

Por sua vez, a frequência de calibração afeta os custos totais. Alguns tipos de medidores exigem uma recalibração periódica, enquanto outros não requerem calibrações com tanta frequência. Outros tipos de medidores requerem apenas uma inspeção visual e verificação dimensional (os do grupo 1, por exemplo), e a calibração em escoamento pode não ser necessária, desde que os medidores sejam projetados, construídos, instalados e utilizados de acordo com normas técnicas apropriadas.

Novamente, o nível requerido de desempenho metrológico é importante ao avaliar os custos de calibração. Sob esse aspecto, o fornecedor pode aconselhar o usuário sobre a frequência necessária de calibração e os custos para aplicações específicas.

8.2.6.5 Custos operacionais

Os custos operacionais de um sistema de medição de vazão são principalmente associados à energia necessária para mantê-lo operando. Eles podem incluir os custos de energia elétrica para acionar a eletrônica dentro do sistema (que é muito baixa na maioria dos medidores modernos), bem como os custos decorrentes da perda de carga imposta pelo medidor ao escoamento do fluido através da tubulação. Isso significa que a perda de carga ocasionada pelo medidor é um fator importante na análise, pois, na maioria dos casos, essa perda não é recuperável.

Sob esse aspecto, os medidores de vazão do tipo sonda de inserção (Pitot, térmico etc.) e os do tipo passagem plena (eletromagnético, ultrassônico etc.), por exemplo, oferecem economias consideráveis nos custos operacionais em relação aos outros tipos de medidores de vazão com elementos inseridos no escoamento (vórtice, turbinas, deslocamento positivo, placa de orifício, Venturi etc.) ou com sensores especiais

(Coriolis), porque oferecem taxas de bloqueio muito menores. Cada aplicação deve ser avaliada para determinar se essa economia pode ser feita se diferentes técnicas de medição atenderem a todos os outros critérios.

8.2.6.6 Custos de manutenção

Os custos de manutenção são os custos para a manutenção do funcionamento de um sistema de medição de vazão, uma vez instalado e comissionado. Constituem-se basicamente de dois componentes principais: peças de reposição e mão de obra. Medidores com partes móveis geralmente exigem mais manutenção.

Exemplos de custos de manutenção podem ser decorrentes da necessidade de substituição periódica de rolamentos, rotores, eixos ou engrenagens de transmissão que experimentam desgaste com o tempo. Entretanto, medidores sem partes móveis também podem exigir atenção frequente, sendo um exemplo comum a verificação necessária dos cantos vivos de uma placa de orifício.

8.2.6.7 Custo e disponibilidade de peças sobressalentes

O custo das peças sobressalentes geralmente aumenta com a complexidade do medidor e com os medidores capazes de apresentar um bom desempenho metrológico. Peças sobressalentes para medidores fabricados no exterior podem custar mais do que os instrumentos produzidos localmente, e a disponibilidade de peças sobressalentes também pode ser um problema maior. Os números dados na última coluna da Tabela 12 podem variar significativamente dependendo da fonte e do projeto do medidor. Recomendações de vários fornecedores do mesmo tipo devem ser solicitadas se o custo e a disponibilidade das peças sobressalentes forem importantes.

8.2.7 Exemplos de seleção de medidor de vazão

8.2.7.1 Geral

Esta seção do guia ilustra o uso das várias tabelas e figuras de dados. Os exemplos ilustrarão as importantes considerações e julgamentos a serem feitos na seleção de técnicas aplicáveis.

8.2.7.2 Exemplo 1

A seguinte especificação resumida de requisitos foi fornecida pelo engenheiro de uma estação de bombeamento de água bruta suprida a partir de um reservatório de grandes dimensões:

- Aplicação: medição da vazão de recalque de água bruta realizado meio de sistema de bombeamento com duas bombas em paralelo.
- Diâmetro da adutora: $D = 2350 \text{ mm}$
- Fluido: água bruta
- Pressão máxima de operação: 10 bar
- Faixa de temperatura de operação: 25 °C a 35 °C
- Incerteza requerida: < 3 % da vazão medida
- Vazão máxima de operação: 15 m³/s (54 000 m³/h)
- Vazão usual de operação: 7,5 m³/s
- Sinal de saída: pulsada ou 4 mA a 20 mA para sistema supervisorio na sala de controle da estação
- Local de instalação do elemento primário: na adutora, protegido em abrigo de concreto
- Restrições de tubulação: ponto de medição com trechos retos > 20D a montante e > 5D a jusante, tubulação inclinada ascendente
- Recursos de capital: parâmetro importante e sensível

Primeiro passo. Consultar a Tabela 5 para determinar os grupos de medidores aplicáveis e a Tabela 6 para confirmar que todos os parâmetros aplicáveis foram considerados na especificação. A aplicação D na Tabela 5 atende às especificações.

Grupos aplicáveis: grupos 1, 2, 4, 5, 6, 7 e 10.

Segundo passo. Consultar a Tabela 7 e a Figura 26 para determinar os grupos que atendem a especificação de desempenho.

Grupos restantes aplicáveis: grupos 1, 4, 5, 6, 7 e 10.

Terceiro passo. Consultar a Tabela 10 para investigar possíveis limitações das propriedades do fluido, particularmente o número de Reynolds (calculando-o, se ainda não conhecido), nos grupos restantes. A variação de temperatura é pequena, a pressão é baixa, todos os grupos restantes da segunda etapa ainda são aplicáveis.

Grupos restantes aplicáveis: grupos 1, 3, 4, 6, 7 e 8.

Quarto passo. Consultar a Tabela 9 para determinar quais tipos de medidores de vazão dentro dos grupos restantes aplicáveis são adequados para as restrições de tubulação aplicáveis a esta aplicação.

O exame da Tabela 9 mostra que apenas uma seleção limitada de tipos de medidores de vazão é adequada dentro dos grupos aplicáveis. Assim, no grupo 1, apenas um medidor do tipo Venturi é possível; no grupo 3, todos, exceto os medidores de gás, são possíveis; no grupo 4, apenas um medidor mecânico pode ser possível; no grupo 6, apenas um medidor eletromagnético pode ser possível; no grupo 7, apenas um medidor de tempo de trânsito pode ser possível, e no grupo 8, apenas um medidor do tipo Coriolis é possível.

Quinto passo. Consultar a Tabela 11 para restrições ambientais; isso não elimina outros grupos, mas indica que os grupos 6 e 8 são menos sensíveis à temperatura e todos têm resposta similar a EMI e RFI. A classificação possível é então: 1ª escolha grupos 6 e 8, 2º grupo de escolha 3.

Sexto passo. Consultar as Figuras 31 e 32 para indicação do preço de compra e a Tabela 12 para fatores econômicos a serem considerados.

Os custos de compra indicam a seguinte classificação: 1º - grupo 6; 2º - grupo 3 e 3º - grupo 8.

A Tabela 12 indica que os custos de instalação e calibração são todos comparáveis, o grupo 6 tem a menor manutenção e custos de peças de reposição.

Conclusão. Os passos quatro, cinco e seis indicam que o grupo 6 (eletromagnético) é a primeira escolha, com o grupo 3 (deslocamento positivo) segundo nos fatores econômicos, o grupo 8 (medidor do tipo Coriolis) como uma terceira opção.

Se a pesquisa cobrindo aquela instalação em particular não tiver sido feita ou se sugerir que o medidor eletromagnético não deve ser localizado em 3D a partir da instalação, um medidor de deslocamento positivo seria adequado, com um medidor de coriolis como uma opção possível.

Uma vez que o medidor tenha sido selecionado, quaisquer limitações do medidor escolhido devem ser comparadas em detalhes com os requisitos da especificação original. Se as diferenças forem significativas, o procedimento de seleção deve ser repetido após a revisão da especificação original.

Esta aplicação foi relativamente bem definida e mostra a importância de coletar tantos dados de processo quanto possível. O ranking de possíveis medidores foi facilitado pelo engenheiro de processo, observando a localização do medidor necessário e o desempenho necessário para atender aos critérios de produção.

8.2.7.3 Exemplo 2

A seguinte especificação resumida de requisitos foi fornecida por um técnico agrícola responsável por um ponto de captação de água para irrigação em rio federal:

- Aplicação: irrigação (necessário obtenção de outorga para captação da água)
- Tamanho da linha: 100 mm
- Fluido: água bruta
- Pressão de operação: não disponível
- Temperatura de operação: não disponível
- Incerteza requerida: 5 % da vazão
- Vazão usual de operação: 0 a 10 L/s (36 m³/h), variável conforme período de chuvas
- Leitura: visual (necessário informar ao organismo fiscalizador o volume captado por mês)
- Local de instalação do medidor: na tubulação no ponto de captação, próxima à bomba
- Restrições de tubulação: válvula de bloqueio a 2D a montante, >100D a jusante, tubulação horizontal e inclinada
- Gastos de capital: limitado

Primeiro passo. Consultar a Tabela 5 para determinar os grupos de medidores aplicáveis e a Tabela 6 para confirmar que todos os parâmetros aplicáveis foram considerados na especificação. A aplicação A na Tabela 5 atende às especificações.

Grupos aplicáveis: todos da Tabela 5.

Segundo passo. Consultar a Tabela 7 e para determinar os grupos que atendem a especificação de desempenho, faixa operacional e parâmetro medido.

Com base no desempenho e faixa operacional, todos os grupos da Tabela 7 são aplicáveis, com exceção do grupo 1, devido a limitações na relação da vazão máxima/vazão mínima. Considerando o parâmetro medido, no caso o medidor deve possuir um totalizador de volume, assim os grupos aplicáveis são 3, 4, 6 e 8.

Grupos restantes aplicáveis: grupos 3, 4, 6 e 8.

Terceiro passo. Consultar a Tabela 10 para investigar possíveis limitações das propriedades do fluido, particularmente o número de Reynolds (calculando-o, se ainda não conhecido), nos grupos restantes. A variação de temperatura é desconhecida, mas

não deve variar muito ao longo do ano, assim todos os grupos restantes da segunda etapa ainda são aplicáveis.

Grupos restantes aplicáveis: grupos 3, 4, 6 e 8.

Quarto passo. Consultar a Tabela 9 para determinar quais tipos de medidores de vazão dentro dos grupos restantes aplicáveis são adequados para as restrições de tubulação aplicáveis a esta aplicação.

O exame da Tabela 9 mostra que todos os grupos aplicáveis selecionados no passo anterior atendem os requisitos de orientação, sentido, trechos retos disponíveis e faixa de diâmetro. Entretanto, para os grupos 3 e 4 é recomendado o uso de filtro, que para aplicação em água bruta pode ser um fator complicador se não houver manutenção frequente. Assim, os grupos 6 e 8 podem ser os mais indicados para aplicação se for considerado que não serão realizadas manutenções frequentes.

Quinto passo. Consultar a Tabela 11 para restrições ambientais; isso não elimina outros grupos, mas indica que os grupos 6 e 8 são menos sensíveis à temperatura e todos têm resposta similar a EMI e RFI. A classificação possível é então: 1ª escolha grupos 6, 2º grupo de escolha 8, 3º grupo 4 e o grupo 3 em último.

Sexto passo. Consultar as Figuras 31 e 32 para indicação do preço de compra e a Tabela 12 para fatores econômicos a serem considerados.

Os custos de compra indicam a seguinte classificação: 1º - grupo 4; 2º - grupos 3 e 6 e 3º - grupo 8.

A Tabela 12 indica que os custos de instalação e calibração são todos comparáveis, o grupo 3 tem o maior custo de peças de reposição.

Conclusão. Os passos quatro, cinco e seis indicam que o grupo 6 (eletromagnético) é a primeira escolha, com o grupo 4 segundo nos fatores econômicos, os grupos 3 e 8 como uma terceira opção.

Se a pesquisa cobrindo aquela instalação em particular não tiver sido feita ou se sugerir que o medidor eletromagnético não deve ser localizado em 3D a partir da instalação, um medidor de medidor mecânico seria adequado, mas com ressalva em relação à necessidade de filtro e manutenção frequente.

Uma vez que o medidor tenha sido selecionado, quaisquer limitações do medidor escolhido devem ser comparadas em detalhes com os requisitos da especificação original. Se as diferenças forem significativas, o procedimento de seleção deve ser repetido após a revisão da especificação original.

Esta aplicação foi relativamente bem definida e mostra a importância de coletar tantos dados de processo quanto possível. O ranking de possíveis medidores pode ser modificado em relação à questão de vulnerabilidade e fraude, o medidor mecânico pode ter o seu totalizador de volume adulterado e o medidor eletromagnético

e Coriolis precisam ser protegidos contra inundação e ao acesso á configurações no módulo eletrônico. Como se observa, apesar da medição aparentar ser simples, existem riscos associados que podem gerar dúvidas e questionamentos.

9 INSTALAÇÃO DO SENSOR, MEDIDOR E ACESSÓRIOS

A instalação de um sistema de medição de água bruta em condutos forçados deve ser realizada por pessoal técnico especializado, com capacitação e experiência em instrumentação de medição de vazão.

O processo de instalação do sistema de medição deve contar com o apoio de serviços civis de abertura, limpeza e preparação da área onde será realizada a instalação do sistema. Normalmente, será necessário contar com uma equipe de caldeiraria para corte e preparação da tubulação, solda de flanges e outros componentes como tomadas de pressão, válvulas etc. A depender do tipo de medidor de vazão escolhido, poderá ser necessária a instalação de trechos retos de tubulação a montante e a jusante do medidor de vazão.

O suprimento de energia elétrica em tensão, frequência e corrente compatível com as necessidades do sistema de medição também deverá ser necessária na maioria dos casos.

A maioria dos fabricantes de medidores de vazão apresenta orientações e específica os seus requisitos para a montagem do medidor. Para alguns tipos de medidores de vazão, o atendimento a essas diretrizes é crucial para o bom desempenho do medidor.

A posição de montagem preferida para aplicações de alta pressão, no entanto, é horizontal, devido ao possível deslocamento zero. Para atingir o desempenho especificado, as diretrizes de instalação do fabricante devem ser seguidas.

9.1 Efeitos de instalação para perfil de fluxo

O desempenho de um medidor CTMF não é afetado por redemoinho de fluido e perfis de velocidade não uniformes induzidos pelas configurações de tubulação a montante e a jusante.

Normalmente não são necessários comprimentos especiais de tubulação reta, mas dependem do fabricante. No entanto, boas práticas de instalação devem ser observadas em todos os momentos.

Filtros ou outros dispositivos de proteção devem ser fornecidos a montante do medidor para remover sólidos ou gotículas de líquido que possam causar erros de medição.

10000

9.2 Vibrações - Hidráulica e Mecânica

As vibrações na linha de processo normalmente não afetam o desempenho do medidor do CTMF. No entanto, todas as vibrações devem permanecer dentro dos limites da prática comum.

9.3 Válvulas

As válvulas a montante e a jusante de um medidor CTMF, instaladas com a finalidade de isolar e zerar o medidor, podem ser de qualquer tipo. No entanto, eles devem fornecer fechamento hermético para garantir que a vazão zero verdadeira possa ser alcançada. As válvulas de controle em série com um medidor CTMF devem ser instaladas junto com o medidor TMF para minimizar o volume morto.

9.4 Exemplo: comprimentos mínimos de trechos retos de montante e de jusante entre várias conexões e uma placa de orifício

A título de exemplo sobre os requisitos de trechos retos de tubulação necessários para a instalação de um medidor de vazão, é apresentada a Tabela 13 da norma ABNT NBR ISO 5167-2:2011^[6]. Essa tabela estabelece os requisitos de comprimentos mínimos necessários de trechos retos a montante e a jusante da placa de orifício para as conexões especificadas na instalação sem condicionadores de escoamento.

Tabela 13. Trechos retos requeridos entre placas de orifício e conexões sem o uso de condicionadores de escoamento

Relação de diâmetros β	Lado a montante (entrada) da placa de orifício														Lado a jusante (saída) da placa de orifício
	Curva única de 90° Duas curvas de 90° em qualquer plano (S > 30D) a	Duas curvas de 90° no mesmo plano: configuração S (30D ≥ S > 10D) a	Duas curvas de 90° no mesmo plano: configuração S (10D ≥ S) a	Duas curvas de 90° em planos perpendiculares (30D ≥ S > 5D) a	Duas curvas de 90° em planos perpendiculares (5D > S) a, b	Tê único de 90° com ou sem uma extensão Curva mitral de 90°	Curva única de 45° Duas curvas de 45° no mesmo plano: configuração S (S ≥ 2D) a	Redução concêntrica 2D para D ao longo de um comprimento de 1,5D a 3D	Expansão concêntrica 0,5D para D ao longo de um comprimento de D a 2D	Válvula esfera de passagem plena ou válvula gaveta totalmente aberta	Redução simétrica abrupta	Poço ou tomada métrica de diâmetro c ≤ 0,03D d	Conexões (colunas 2 a 11) e a tomada do densitômetro		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
—	A e Bf	Ae Bf	Ae Bf	Ae Bf	Ae Bf	Ae Bf	Ae Bf	Ae Bf	Ae Bf	Ae Bf	Ae Bf	Ae Bf	Ae Bf		
≤ 0,20	6 3	10 g	10 g	19 18	34 17	3 g	7 g	5 g	6 g	12 6	30 15	5 3	4 2		
0,40	16 3	10 g	10 g	44 18	50 25	9 3	30 9	5 8	12 8	12 6	30 15	5 3	6 3		
0,50	22 9	18 10	22 10	44 18	75 34	19 9	30 18	8 5	20 9	12 6	30 15	5 3	6 3		
0,60	42 13	30 18	42 18	44 18	65 h	25 18	30 18	9 5	26 11	14 7	30 15	5 3	7 3,5		
0,67	44 20	44 18	44 20	44 20	60 18	36 18	44 18	12 6	28 14	18 9	30 15	5 3	7 3,5		
0,75	44 20	44 18	44 22	44 20	75 18	44 18	44 18	13 8	36 18	24 12	30 15	5 3	8 4		

NOTA 1: Os comprimentos mínimos de trechos retos requeridos são os comprimentos entre as várias conexões localizadas a montante e a jusante da placa de orifício e a própria placa de orifício. Os comprimentos dos trechos retos devem ser medidos a partir da extremidade de jusante da porção curva da curva mais próxima (ou única) ou do tê ou do ângulo de jusante da porção curva ou cônica da redução ou da expansão.

NOTA 2: A maioria das curvas sobre as quais os comprimentos nesta tabela estão baseados têm um raio de curvatura de 1,5D.

a S é a separação entre as duas curvas medidas a partir da extremidade de jusante da porção curva da curva de montante até a extremidade de montante da porção curva da curva de jusante.

b Esta não é uma boa instalação de montante; um condicionador deveria ser utilizado onde possível.

c A instalação de tomadas ou poços termométricos não altera os comprimentos mínimos de trechos retos de montante exigidos para as outras conexões.

d Uma tomada ou poço termométrico de diâmetro entre 0,03D e 0,13D pode ser instalado desde que os valores nas Colunas A e B sejam aumentados de 20 e 10 respectivamente. Entretanto, tal tipo de instalação não é recomendada.

e A Coluna A para cada conexão fornece comprimentos correspondentes aos valores para "incerteza adicional zero" (ver 6.2.3).

f A Coluna B para cada conexão fornece comprimentos correspondentes aos valores para "incerteza adicional de 0,5 %" (ver 6.2.4).

g O comprimento de trecho reto na Coluna A fornece incerteza adicional zero; não existem dados disponíveis para comprimentos menores de trechos retos que poderiam ser utilizados para fornecer os comprimentos de trechos retos exigidos para a Coluna B.

h É exigido 95D para ReD > 2 x 106 se S < 2D

A Tabela 13 mostra que quando um condicionador não é utilizado, os comprimentos especificados na tabela devem ser considerados como valores mínimos. Para trabalhos de pesquisa e de calibração, recomenda-se que os valores de comprimento de trechos retos de montante especificados na Tabela 13 sejam multiplicados pelo menos por um fator 2 para minimizar a incerteza de medida.

Quando os comprimentos de trechos retos de tubulação utilizados são iguais ou maiores que os valores especificados nas Colunas A da Tabela 13 para “incerteza adicional zero”, não é necessário aumentar a incerteza associada ao valor do coeficiente de descarga para levar em conta o efeito da instalação particular.

Para uma dada conexão, quando o comprimento do trecho reto de montante ou de jusante é menor que o valor do número de diâmetros correspondente à “incerteza adicional zero” mostrado nas Colunas A e igual ou maior que o número de diâmetros correspondente à “incerteza adicional de 0,5 %” mostrado nas Colunas B da Tabela 13, uma incerteza adicional de 0,5 % deve ser adicionada aritmeticamente à incerteza associada ao valor do coeficiente de descarga.

Esta parte da ABNT NBR ISO 5167 não pode ser utilizada para prognosticar o valor de qualquer incerteza adicional quando:

- a) são utilizados comprimentos de trechos retos menores que os valores correspondentes à “incerteza adicional de 0,5 %” especificados nas Colunas B da Tabela 13; ou
- b) ambos os comprimentos de trechos retos a montante e a jusante são menores que os valores correspondentes à “incerteza adicional zero” especificados nas Colunas A da Tabela 13.

Os valores fornecidos na Tabela 13 foram determinados experimentalmente com um trecho reto de tubulação bastante longo instalado a montante da conexão, de modo que o escoamento imediatamente a montante da mesma fosse considerado como totalmente desenvolvido e sem efeitos rotacionais. Como na prática tais condições são difíceis de serem obtidas, essas informações podem ser utilizadas apenas como um guia para a prática de instalação.

9.5 SPDA

No caso de sistemas de medição de vazão instalados em campo, é importante, sempre que possível, incluir um SPDA-sistema de proteção contra descargas atmosféricas. O SPDA tem a finalidade de proteger o medidor de vazão, os transmissores de parâmetros de processo e os sistemas terciários, elementos que normalmente possuem sistemas eletrônicos que podem ser facilmente danificados no caso da ocorrência de tais eventos.

10 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

A operação e a manutenção de um sistema de medição de vazão deve ser uma atividade planejada com vistas a garantir a manutenção das suas condições operacionais e metrológicas originais.

A manutenção da operação do sistema de medição exige o acompanhamento contínuo dos seus componentes, com relação à limpeza do medidor e dos componentes secundários como transmissores de pressão e temperatura, cabos de energia e de sinal, a manutenção da qualidade do suprimento da energia elétrica, a proteção e o aterramento necessários, a proteção contra corrosão, interferências eletromagnéticas, poeira, chuva e insolação, etc.

Sob o aspecto metrológico, o sistema de medição, incluindo o medidor de vazão e seus instrumentos acessórios, deve ser mantido calibrado na periodicidade apropriada. Uma calibração realizada por provedor de serviços acreditado por organismo acreditador, como a Cgcre do Inmetro no Brasil, garante a rastreabilidade das medidas realizadas pelo sistema de medição aos padrões do SI-Sistema Internacional de Unidades.

Nesse aspecto, é importante também, sempre que possível, a implementação de um sistema de gestão da medição de acordo com as diretrizes da norma ABNT NBR ISO 10012: 2004 Sistemas de gestão de medição – Requisitos para os processos de medição e equipamento de medição.

Um sistema de gestão de medição eficaz assegura que o equipamento de medição e os processos de medição são adequados para seu uso pretendido e é importante para atingir os objetivos da qualidade do produto e gerenciar o risco de resultado de medição incorreta.

O objetivo de um sistema de gestão de medição é gerenciar o risco de que o equipamento de medição e os processos de medição possam produzir resultados incorretos afetando a qualidade dos produtos de uma organização. Os métodos usados para o sistema de gestão de medição variam da verificação básica do equipamento à aplicação de técnicas estatísticas no controle do processo de medição.

As organizações têm a responsabilidade de determinar o nível dos controles necessários e especificar os requisitos do sistema de gestão de medição a ser aplicado como parte do seu sistema de gestão global.

11 REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10012: Sistemas de gestão de medição: requisitos para os processos de medição e equipamento de medição.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 5167-2: Medição de vazão de fluidos por dispositivos de pressão diferencial inseridos em condutos forçados de seção transversal circular - Parte 2: Placas de orifício.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- [3] AVALIAÇÃO de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição: GUM 2008. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. 141 p. Traduzido de: Evaluation of measurement data: guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [4] BRITISH STANDARD. **BS 7405: Guide to selection and application of flowmeters for the measurement of fluid flow in closed conduits.** London: BSI, 1991. 262 p.
- [5] Porto, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica.** 4. ed. EESC-USP: São Carlos, SP, 2006.
- [6] SISTEMA Internacional de Unidades: SI. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. 94 p. Traduzido de: Le Système international d'unités : The International System of Units, 8. ed. 2006.
- [7] VOCABULÁRIO Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais de termos associados (VIM 2012). Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. 94 p. Traduzido de: International Vocabulary of Metrology: basic and general concepts and associated terms: JCGM 200:2012. 3rd. ed. 2012.

ANEXO A - CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Neste anexo são apresentados alguns termos relacionados a instrumentos de medição em geral. Eles são de especial importância quando as propriedades dos medidores são levadas em consideração.

Discriminação

Por meio de acordo internacional, a palavra “discriminação” é utilizada para descrever o quão precisamente um instrumento pode medir. Por exemplo, a discriminação de um cronômetro digital eletrônico com leitura de milissegundos é uma centena de vezes maior do que a de um cronômetro manual com graduação de décimos de segundo.

Nunca devemos nos referir à discriminação com sendo “sensibilidade”, que segundo acordo internacional, significa algo completamente diferente, ou mesmo como “resolução”, cujo significado até recentemente não havia sido internacionalmente acordado.

A discriminação não deve ser confundida com exatidão, tão pouco. A discriminação indica tão somente quantas casas decimais nós podemos ler. Porém, ela nada diz a respeito de quantas dessas casas decimais nós podemos confiar.

Repetibilidade e Reprodutibilidade

A repetibilidade de um instrumento de medição é uma indicação de sua capacidade de fornecer o mesmo resultado quando utilizado para medir a mesma grandeza várias vezes sucessivamente.

Um valor numérico da repetibilidade pode ser obtido experimentalmente instalando-se dois medidores idênticos, lado a lado, e comparando-se as suas leituras inúmeras vezes sucessivamente.

Repetibilidade é frequentemente confundida com exatidão, o que, de acordo com os gráficos mostrados nas Figura 33, não são absolutamente as mesmas coisas.

Se um instrumento possui uma baixa repetibilidade, ele tenderá a ter também uma baixa exatidão. Por outro lado, o fato de um medidor apresentar uma boa repetibilidade não significa necessariamente que ele apresente também uma boa exatidão (embora ele possa ter), uma vez que ele poderia estar apresentando o mesmo valor incorreto repetidamente.

Um termo relacionado com a repetibilidade é a reprodutibilidade. Esse termo traduz a capacidade que um instrumento possui de fornecer o mesmo resultado quando

utilizado para medir a mesma grandeza em momentos diferentes e sob condições diferentes. Este fator se torna importante, por exemplo, quando da avaliação da suscetibilidade ou não de um determinado medidor às condições da instalação.

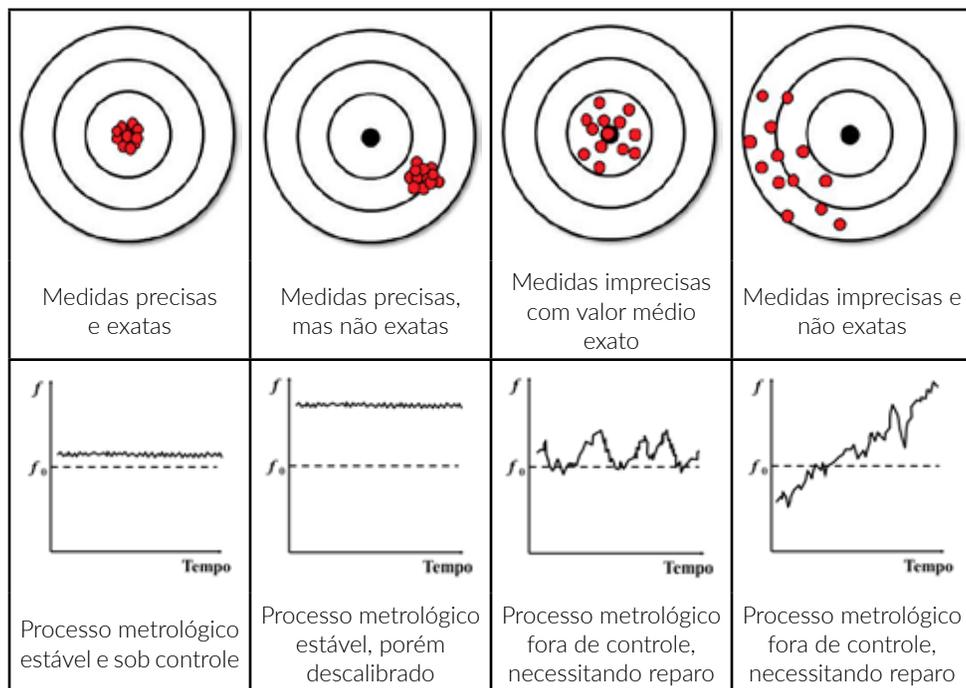


Figura 33. Desempenho metrológicos de um medidor.

Exatidão (*accuracy*) e Incerteza

Se nós pensarmos em repetibilidade como sendo a capacidade de um instrumento de “contar sempre a mesma história”, exatidão seria a medida da sua capacidade de “dizer a verdade”.

Em geral, uma boa repetibilidade de um medidor depende de um bom projeto e de uma fabricação cuidadosa, ao passo que uma boa exatidão depende, além dos dois requisitos mencionados anteriormente, de uma calibração cuidadosa contra um padrão. Por isso, quando necessitamos manter continuamente de uma alta exatidão de um medidor, o mesmo deve ser recalibrado regularmente.

O fato de existir duas maneiras diferentes de expressar a exatidão gera muita confusão. De fato, alguns fabricantes consideram-na como uma porcentagem do fundo de escala, outros como uma porcentagem da leitura. A diferença se torna muito significativa quando o medidor está trabalhando no começo da escala. Por exemplo, a 1/5 do valor máximo da escala, uma exatidão de 1% do fundo de escala equivale à exatidão de

5% da leitura. A menos que seja especificado o contrário, a exatidão deverá ser sempre expressa e entendida em termos de porcentagem da leitura.

Deve ser lembrado que a obtenção de uma boa repetibilidade de um medidor custa caro e uma boa exatidão custa mais ainda. Assim, é realmente um desperdício se instalar um medidor altamente repetitivo, quando um mais barato poderia ser utilizado. É o caso da instalação de um medidor com alta repetibilidade e cuidadosamente calibrado quando um simples instrumento com repetibilidade regular poderia ser utilizado, o que acontece, por exemplo, quando a finalidade do medidor é somente para estimativa e/ou controle da vazão passante através de uma tubulação.

Entretanto, um medidor com boa exatidão é recomendado toda vez que se compra, se vende ou se paga taxas de acordo com a indicação de um instrumento, como por exemplo nas atividades de transferência de custódia e na medição fiscal de hidrocarbonetos. A melhor maneira de assegurar uma boa exatidão é adquirir um medidor com alta repetibilidade, em conjunto com um equipamento de calibração dedicado.

É importante ressaltar que a palavra exatidão é uma palavra qualitativa e não deveria ser utilizada de forma a quantificar um determinado parâmetro porque ela possui vários significados.

Atualmente, o termo internacionalmente aceito para expressar a exatidão ou inexatidão de uma medição é o termo incerteza. Esse termo tem um significado preciso e deveria ser utilizado associado aos resultados de todas as medições de vazão.

Segundo a definição do VIM, a incerteza é um parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos ao mensurando.

A incerteza de uma medição é considerada como a metade da faixa de valores dentro da qual se espera que o valor verdadeiro do mensurando se encontre.

Faixa de Medição e *Rangeabilidade*

A faixa de medição de um instrumento é definida como sendo a faixa de trabalho do instrumento na qual ele cumpre os requisitos para uma determinada exatidão. Esta definição está ilustrada na Figura 25 anterior, onde as linhas horizontais AA e BB representam os limites aceitáveis de exatidão. Desta forma, a faixa de medição é de Q1 até Q2. A relação Q1/Q2 é denominada de *rangeabilidade* de um instrumento, ou, no caso de medidores de vazão, seu *turndown ratio* ou simplesmente *turndown*.

Linearidade

A linearidade de um instrumento indica o quanto o seu desempenho, quando trabalhando em sua faixa efetiva de medição, difere do ideal. Na Figura 25, onde os limites de exatidão estão plotados a uma distância de $2 \delta K$, a linearidade é $\pm \delta K$. A linearidade é geralmente expressa como uma porcentagem do fator K nominal, K_n , ou seja, como $100 \delta K / K_n$ por cento.

A seleção do medidor de vazão é uma tarefa difícil e complexa, geralmente exigindo várias iterações para se chegar à melhor escolha. Para dificultar o trabalho, a vazão é a variável de processo industrial que possui o maior número de elementos sensores e de medidores.

São disponíveis tabelas relacionando os tipos de medidores e as suas aplicações ideais, aceitáveis e impróprias. Porém, tais tabelas não são completas e não consideram todas as exigências e aplicações. Às vezes, elas são apresentadas pelo suspeito fabricante de determinado medidor que descreve com parcialidade as principais vantagens de seu medidor específico. Assim, a seleção de um medidor de vazão é uma tarefa que exige cuidado e que não deve se limitar à análise de uma tabela bidimensional.

Para fins didáticos, os medidores de vazão podem ser classificados sob vários aspectos: pela relação matemática entre a vazão e o sinal gerado, se linear ou não-linear, pelo tamanho físico do medidor em relação ao diâmetro da tubulação, se igual ou diferente, pelo tipo da vazão medida, se volumétrica ou mássica, pela manipulação da energia, se aditiva ou extrativa.

A1.1 Relações matemática linear ou não linear

A maioria dos medidores de vazão possui uma relação linear entre a vazão e a grandeza física gerada. São exemplos de instrumentos lineares os medidores de vazão dos tipos turbina, magnético, área variável, resistência linear para vazão laminar, e deslocamento positivo.

O sistema de medição de vazão mais aplicado, com placa de orifício é não linear. A pressão diferencial gerada pela restrição é proporcional ao quadrado da vazão medida. Exemplo de outro medidor não linear é o do tipo alvo, onde a força de impacto é proporcional ao quadrado da vazão.

A amplitude de medição do medidor que é a relação entre as vazões máxima e mínima medidas, com o mesmo desempenho é uma função inerente da linearidade. Os medidores lineares possuem a amplitude de medição típica de 10:1 e os medidores com grandeza física proporcional ao quadrado da vazão possuem a amplitude de medição típica de 3:1.

A1.2 Diâmetros totais e parciais do medidor

Sob o aspecto da instalação do medidor de vazão na tubulação, há dois tipos básicos que são o do tipo *full bore* e os de inserção.

A maioria dos medidores possui aproximadamente o mesmo diâmetro que a tubulação onde ele é instalado. A tubulação é cortada, retira-se um carretel do tamanho do medidor e o instala entre flanges ou rosqueado. Tipicamente, o seu diâmetro é pouco menor que o da tubulação, de modo que a energia consumida na restrição auxilie o seu funcionamento. Esta classe de medidores é mais cara, porém apresenta melhor desempenho.

A outra opção de montagem é através da inserção do medidor na tubulação. Exemplos de medidores deste tipo são os tubos de Pitot e turbinas de inserção. Os medidores de inserção podem ser portáteis, e são geralmente mais baratos, porém possuem desempenho e precisão inferiores.

A1.3 Medidores com e sem fator k

Há medidores que possuem o fator K, que relaciona a vazão com a grandeza física gerada. A desvantagem desta classe de medidores é a necessidade de outro medidor padrão de vazão para a sua calibração periódica. São exemplos de instrumentos com fator K os medidores dos tipos turbina, magnético e vórtice.

O sistema de medição de vazão com placa de orifício é calibrado e dimensionado a partir das equações matemáticas e dados experimentais disponíveis. A grande vantagem da medição com placa de orifício é a sua possibilidade de calibração direta, sem a necessidade de simulação direta de uma vazão conhecida ou de um medidor padrão de vazão de referência.

A1.4 Medidores de vazão volumétrica ou mássica

A maioria dos medidores industriais mede a velocidade do fluido, sendo que a partir desta velocidade é que é inferida a vazão volumétrica. A vazão volumétrica dos fluidos compressíveis depende da pressão e da temperatura. Na prática, o parâmetro mais interessante acaba sendo a vazão mássica do produto, que independe da pressão e da temperatura.

Tendo-se a vazão volumétrica e a densidade do fluido, é possível se obter a sua vazão em massa. Até recentemente, a medição direta e em linha da densidade era difícil e complexa. Na prática, ainda usualmente se mede a vazão volumétrica, a pressão e a temperatura do processo, obtendo-se a partir destes parâmetros e de um equacionamento a vazão mássica do fluido.

Atualmente, já se encontram disponíveis comercialmente instrumentos que medem diretamente a vazão em massa, sendo o mais comum, o que utiliza o princípio de Coriolis.

A1.5 Energias extrativa ou aditiva

Em termos simples, os medidores de vazão podem ser categorizados sob dois enfoques diferentes relacionados com a energia: ou extraem energia do processo medido ou adicionam energia ao processo medido.

Como o fluido escoando através de uma tubulação possui energia, sob várias formas diferentes, como a cinética, a potencial, de pressão e interna, pode-se medir a sua vazão extraindo-se alguma fração desta energia. Este enfoque de medição envolve a inserção de um elemento sensor no escoamento. O elemento primário extrai alguma energia do fluido, suficiente para fazê-lo operar. A vantagem desta técnica é a não necessidade de uma fonte externa de energia. Porém, o medidor é intrusivo e oferece algum bloqueio à vazão, o que se constitui em uma desvantagem inerente à classe de medidores.

Exemplos de instrumentos extratores de energia são os medidores dos tipos placa de orifício, tubo de Venturi, bocal, alvo, cotovelo, área variável, tubo de Pitot, resistência linear, vertedouro, calha, deslocamento positivo, turbina e vórtice.

O segundo enfoque básico utilizado para a medição da vazão é o chamado de energia aditiva. Neste enfoque, alguma fonte externa de energia é introduzida no escoamento e o efeito interativo da fonte e do fluido é monitorado para a medição da vazão. A medição com adição de energia é não intrusiva, e o elemento primário oferece nenhum ou pouco bloqueio à vazão. Como desvantagem, é necessário o uso de uma fonte externa de energia.

São exemplos de instrumentos aditivos de energia os medidores dos tipos magnético, ultrassônico, calorimétrico e termo anemômetro. O número de medidores baseados na adição de energia é menor que o de medidores com extração de energia. Isto é apenas a indicação do desenvolvimento mais recente destes medidores, e este fato não deve ser interpretado de modo enganoso, como se os medidores baseados na adição de energia fossem piores ou menos favoráveis que os do outro tipo.

ANEXO B - TERMOS E DEFINIÇÕES

Para as finalidades deste guia se aplicam as seguintes definições:

1. Termos relacionados ao sistema de medição de vazão

- **instrumento de medição¹**

Dispositivo utilizado para realizar medições, individualmente ou associado a um ou mais dispositivos suplementares.

- **sistema de medição²**

Conjunto de um ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e insumos, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de naturezas especificadas.

- **medidor de vazão³**

Um equipamento de medição de vazão de fluido que indica a vazão medida.

- **elemento primário**

Componente do sistema de medição que gera um sinal que possibilita que a vazão seja determinada. Dependendo do princípio utilizado, o elemento primário pode estar localizado interna ou externamente ao conduto.

- **elemento secundário**

Componente do sistema de medição que recebe um sinal de um elemento primário e o apresenta, registra, converte e/ou o transmite como uma medida da vazão do fluido.

1 NOTA 1 Um instrumento de medição que pode ser utilizado individualmente é um sistema de medição.
NOTA 2 Um instrumento de medição pode ser um instrumento de medição indicador ou uma medida materializada.

2 NOTA Um sistema de medição pode consistir em apenas um instrumento de medição.

3 NOTA: o termo medidor de vazão também se aplica a equipamento que indica a quantidade totalizada de fluido que passou pelo mesmo durante um intervalo de tempo selecionado.

- **elemento auxiliar**

Componente do sistema de medição que permite que as medições auxiliares necessárias sejam realizadas em sistemas de medição de vazão para se determinar os valores de tais parâmetros como pressão, pressão diferencial, temperatura, entre outros.

2. Termos relacionados ao fluido medido

- **vazão**

A quantidade de fluido que atravessa a seção transversal de um conduto durante um curto período de tempo, dividido por esse tempo.

- **vazão volumétrica**

Vazão na qual a quantidade de fluido é expressa como um volume.

- **totalização de volume⁴**

Volume de fluido que passou através da seção transversal de um conduto ao longo de um período de tempo.

- **vazão mássica⁵**

Vazão na qual a quantidade de fluido é expressa como uma massa.

- **velocidade axial média do fluido**

Resultado da divisão do valor da vazão volumétrica pela área da seção transversal do conduto.

- **velocidade pontual ou local**

A velocidade medida em um ponto discreto na seção transversal do conduto.

4 NOTA: Alguns tipos de medidores indicam esta grandeza diretamente e são, portanto, normalmente chamados de medidores de quantidade. O volume totalizado também pode ser obtido por meio da integração do sinal de vazão volumétrica de um medidor de vazão ao longo de um período de tempo conhecido. Portanto, os medidores de vazão podem ser utilizados para a indicação de volumes totalizados com o uso de um elemento secundário adequado.

5 NOTA: Não existem medidores que indiquem a massa totalizada da mesma forma que os medidores do tipo deslocamento positivo indicam o volume totalizado. A massa total medida pode ser obtida somente por meio da integração da vazão mássica ao longo de um período de tempo.

3. Termos relativos ao desempenho do medidor de vazão

- **exatidão de medida⁶**

Grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando.

- **erro de medida⁷**

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

- **precisão de medida⁸**

Grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas.

- **repetibilidade de medida**

Precisão de medida sob um conjunto de condições de repetibilidade.

6 NOTA 1: A “exatidão de medida” não é uma grandeza e não lhe é atribuído um valor numérico. Uma medida é dita mais exata quando fornece um erro de medida menor.

NOTA 2: O termo “exatidão de medida” não deve ser utilizado no lugar de veracidade de medida, assim como o termo “precisão de medida” não deve ser utilizada para expressar exatidão de medida, o qual, contudo, está relacionado a ambos os conceitos.

NOTA 3: A “exatidão de medida” é algumas vezes entendida como o grau de concordância entre valores medidos que são atribuídos ao mensurando. A expressão qualitativa para a proximidade de um valor medido em relação ao valor verdadeiro.

NOTA 4: A expressão quantitativa da exatidão deveria ser em termos de incerteza. Uma boa exatidão implica erros aleatórios e sistemáticos pequenos.

7 NOTA 1: O conceito de “erro de medida” pode ser utilizado:

a) quando existe um único valor de referência, o que ocorre se uma calibração for realizada por meio dum padrão de medida com um valor medido cuja incerteza de medida é desprezável, ou se um valor convencional for fornecido; nestes casos, o erro de medida é conhecido;

b) caso se suponha que um mensurando é representado por um único valor verdadeiro ou um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezável; neste caso, o erro de medida é desconhecido.

NOTA 2: Não se deve confundir erro de medida com erro de produção ou erro humano.

8 NOTA 1: A precisão de medida é geralmente expressa numericamente por características como o desvio-padrão, a variância ou o coeficiente de variação, sob condições especificadas de medição.

NOTA 2: As “condições especificadas” podem ser, por exemplo, condições de repetibilidade, condições de precisão intermediária ou condições de reprodutibilidade (ver ISO 5725-1:1994).

NOTA 3: A precisão de medida é utilizada para definir a repetibilidade de medida, a precisão intermediária de medida e a reprodutibilidade de medida.

NOTA 4: O termo “precisão de medida” é algumas vezes utilizado, erroneamente, para designar a exatidão de medida.

- **condição de repetibilidade de medida⁹**

Condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo.

- **incerteza de medida¹⁰**

Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

- **intervalo de medição¹¹**

Conjunto de valores de grandezas da mesma natureza que pode ser medido por um dado instrumento de medição ou sistema de medição com incerteza de medição instrumental especificada, sob condições determinadas.

9 NOTA 1: Uma condição de medição é uma condição de repetibilidade apenas com respeito a um conjunto especificado de condições de repetibilidade.

10 NOTA 1: A incerteza de medição inclui componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como componentes associadas a correções e a valores atribuídos a padrões, assim como a incerteza definicional. Algumas vezes, não são corrigidos efeitos sistemáticos estimados mas, em vez disso, são incorporadas componentes de incerteza de medição associadas.

NOTA 2: O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio-padrão denominado incerteza-padrão (ou um de seus múltiplos) ou a metade da amplitude dum intervalo tendo uma probabilidade de abrangência determinada.

NOTA 3: A incerteza de medição geralmente engloba muitas componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. As outras componentes, as quais podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo B da incerteza de medição, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações.

NOTA 4: Geralmente para um dado conjunto de informações subentende-se que a incerteza de medição está associada a um determinado valor atribuído ao mensurando. Uma modificação deste valor resulta numa modificação da incerteza associada.

11 NOTA 1: Em alguns domínios, o termo inglês é "measuring range" ou "measurement range" ou mesmo "rangeability".

NOTA 2: O limite inferior dum intervalo de medição não deve ser confundido com limite de detecção.



MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO REGIONAL

