

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Engenharia Mecânica

Energia e Fenômenos de Transporte

Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos

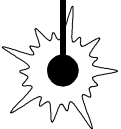
Medições Térmicas - ENG03108

Prof. Paulo Smith SMITH SCHNEIDER

www.geste.mecanica.ufrgs.br

pss@mecanica.ufrgs.br

GESTE - Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos



VELOCIDADE E VAZÃO DE FLUIDOS

1. Conceitos básicos de medição de vazão

1.1. Introdução

Antes de iniciar o estudo da medição de vazão em fluidos, é necessário reparar uma confusão existente no Brasil sobre a terminologia empregada na área de dinâmica de fluidos. Os textos em língua inglesa empregam o termo **flow** para nomear escoamento, mas infelizmente as traduções brasileiras usam a palavra fluxo como correspondente.

A definição de fluxo está ligada à uma grandeza por unidade de comprimento, área ou volume, como por exemplo W/m (potência por unidade de comprimento), W/m² (potência por unidade de área) ou ainda W/m³ (potência por unidade de volume). Nesse exemplo, a grandeza que representa a potência, em watts, é uma taxa de calor ou de energia mecânica, pois representa energia por unidade de tempo (J/s). O fluxo corresponde em inglês ao termo **flux**.

Já a terminologia correta para **flow** em português é escoamento, assim como o **mass flow** corresponde a vazão ou descarga, que podem representar taxas de massa ou de volume por unidade de tempo.

As grandezas associadas à medição do escoamento em fluidos são o taxa de massa por unidade de tempo \dot{m} e de volume por unidade de tempo \dot{V} ou \dot{Q} .

A taxa ou vazão volumétrica é dado por

$$\dot{V} = \vec{V} \cdot \vec{A} \quad (1.1)$$

onde \vec{V} é o vetor velocidade, em m/s, e \vec{A} é o vetor área orientada, em m². A vazão volumétrica é expressa no SI em m³/s, e é comum encontrar l/s, l/h, cm³/min, etc. As unidades inglesas mais comuns são ft³/min, in³/s, gal/h, entre várias outras.

A taxa de massa ou vazão mássica, considerando o produto do vetor velocidade \vec{V} pela área orientada \vec{A} como simplesmente $V_{med} A_c$ é dada por:

$$\dot{m} = \rho V_{med} A_c \quad (1.2)$$

onde ρ é a massa específica, em kg/m³. A unidade no SI para a vazão mássica é kg/s, mas também encontramos seus múltiplos e submúltiplos, como g/s, ton/h ou kg/min. As unidades inglesas mais comuns são lb/ft³, lb/in³, entre várias outras.

1.2. Classificação dos instrumentos

Segundo White, 2002, a caracterização de escoamentos passa pela medição de propriedades locais, integradas e globais. As propriedades locais podem ser termodinâmicas, como pressão, temperatura, massa específica, etc., que definem o estado do fluido, além de sua velocidade. As propriedades integradas são as vazões em massa e volumétrica, e as propriedades globais são aquelas relativas à visualização de todo campo de escoamento. Como o interesse desse documento é a medição de vazões, serão estudados inicialmente as técnicas e os instrumentos ligados à medição da velocidade local, para depois passar para a medição integrada da vazão.

2. Velocidade Local

Os princípios físicos e tipos de instrumentos de medição da velocidade média local, num ponto ou região de interesse, são apresentados a seguir:

2.1. Flutuadores ou partículas flutuantes

Trata-se da maneira mais simples de se estimar a velocidade ao longo de um escoamento, e princípio de medição é baseado no acompanhamento desses flutuadores ao longo da corrente de

fluido. Eles podem ser feitos de material sólido, capaz de manter-se na superfície do fluido, como também partículas que possam provocar algum contraste, como poeira em suspensão em um gás. Destaca-se ainda o uso de bolhas de gases em líquidos.

Instrumentos para a medição de velocidade (anemômetros) são muitas vezes construídos a partir de princípios simples e de idéias engenhosas. Por exemplo, historicamente a medição da velocidade de barcos foi feita com o uso de um dispositivo composto por um cabo, no qual vários nós eram espaçados regularmente, e por uma placa na sua ponta. Uma vez lançado na água, a placa provocava um forte arrasto e a contagem dos nós do cabo enrolado no navio, por unidade de tempo, dava uma idéia de sua velocidade. Ainda hoje são encontrados em clubes de velejadores (Clube dos Jangadeiros, em Porto Alegre) um anemômetro construído com uma placa metálica que pivota num engaste de um mastro, deslocada pela cinética do escoamento. O desenho a seguir mostra esquematicamente seu funcionamento

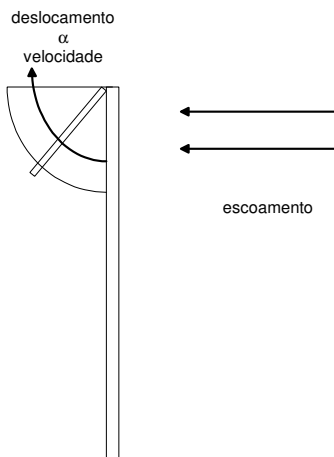


Fig. 2.1- Anemômetro de placa para medição da velocidade do ar atmosférico

2.2. Sensores rotativos

Baseados na transformação de um movimento relativo de um rotor, submetido a um escoamento de um líquido ou de um gás. A figura que segue mostra 4 modelos diferentes de anemômetros rotativos.

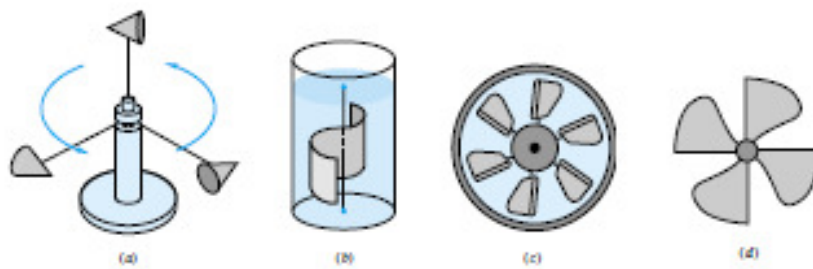


Fig. 2.2- Anemômetro (a) rotativo de conchas; (b) de Savonius e (c) de hélice em duto e (d) em escoamento livre [Fonte: WHITE, 2002]

Todos esses anemômetros somente medem a velocidade de uma corrente apenas para um mesmo sentido. A leitura da velocidade é facilmente adquirida por meios digitais, uma vez que sua calibração depende da contagem da rotação de um rotor. Devido ao seu tamanho, não representam valores discretos ou de “ponto” do campo de velocidades.

2.3. Tubo de Pitot

Permite obter a velocidade de uma dada corrente de um escoamento a partir da medição de duas pressões: estática e de estagnação, apresentadas no material da presente disciplina, relativo à medição de pressões [SMITH SCHNEIDER, 2003]. A diferença entre essas duas pressões é chamada de pressão dinâmica, e o processo de medição é apresentado na figura que segue.

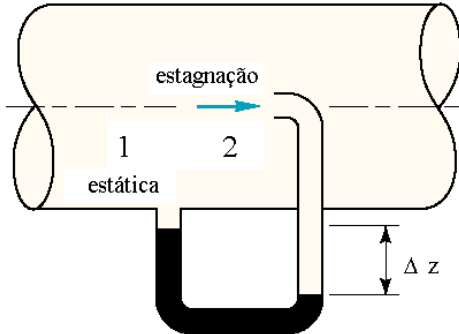


Fig. 2.3- Medição da velocidade do escoamento de um fluido no interior de um duto

A velocidade do fluido é obtida pela equação pela da lei de conservação da massa e da energia. A lei da conservação da massa aplicada a dois pontos 1 e 2 de uma linha de corrente resulta em

$$\dot{m} = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (2.1)$$

As grandezas V e A referem-se à velocidade média do escoamento e à área da seção normal ao mesmo escoamento, nas posições de uma linha de corrente. A equação anterior pode ser reescrita para a velocidade V_1 como segue:

$$V_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{A_2}{A_1} V_2 \quad (2.2)$$

Definindo-se $\beta = D_2 / D_1$ relação entre os diâmetros da tubulação nos pontos 1 e 2, chega-se em:

$$V_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \beta^2 V_2 \quad (2.3)$$

A lei da conservação da energia para escoamentos permanentes, incompressíveis ($\rho_1 = \rho_2 = \rho$), adiabáticos e sem atrito é dada pela equação de Bernoulli. Introduzindo o resultado a última equação, a expressão para a velocidade em um escoamento é dada por

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (2.4)$$

No caso de um tubo de Pitot, onde o diâmetro em 2 é muito menor do que o da tubulação em 1, o coeficiente geométrico $\beta \rightarrow 0$, e a velocidade do escoamento é simplesmente dada por

$$V = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}} \quad (2.5)$$

onde p_0 é a pressão de estagnação no ponto 2, p é a pressão estática ou termodinâmica medida na superfície do tubo.

A medição com o mesmo princípio do Tudo de Pitot é efetuada com a Sonda de Prandtl, que tem várias tomadas de pressão estática ao longo da superfície lateral da sonda, como mostra a figura.

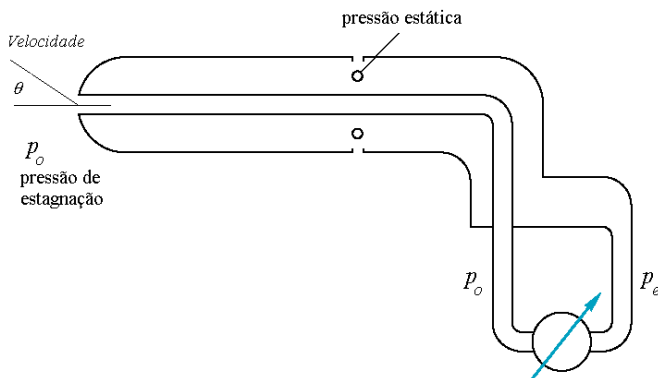


Fig. 2.4- Sonda de Prandtl para medição da velocidade de um escoamento.

Alguns cuidados devem ser tomados para diminuir os erros ou desvios na medição da velocidade com esse equipamento. Inicialmente, a sonda deve ser alinhada à corrente do escoamento, a fim de se obter a pressão estática e de estagnação. Quanto maior o ângulo de ataque θ , formado entre a velocidade do escoamento e o eixo longitudinal da sonda (figura anterior), maiores serão os desvios na medição. A pressão estática apresenta desvios positivos, pois a sua tomada de medição estará sujeita aos componentes transversais de velocidade do escoamento, e simultaneamente a pressão de estagnação diminui, com desvios negativos em relação ao valor esperado. Esse comportamento é visto na figura que segue, bem como na figura 4.5 da apostila de medição de pressão [SMITH SCHNEIDER, 2003].

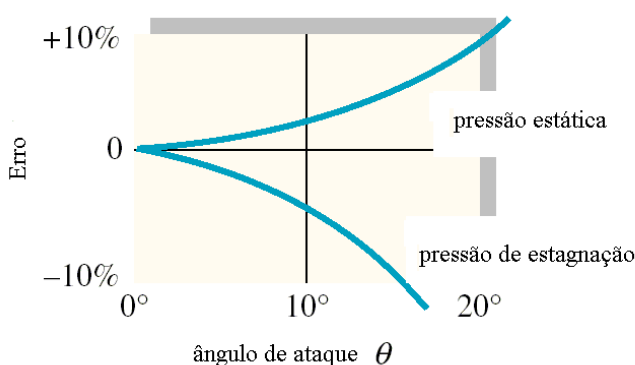


Fig. 2.5- Erro na leitura da pressão estática e de estagnação em função do ângulo de ataque da sonda de Prandtl [WHITE, 2002].

Outro cuidado importante deve ser tomado quando o escoamento é compressível, como em gases com número de Mach Ma superior a 0,3. Para escoamentos compressíveis, isentrópicos (adiabáticos sem atrito) e sem os efeitos de turbulência, a equação para o comportamento dos gases é dada por

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = r^{1/k} \quad (2.6)$$

onde $r=p_2/p_1$ é a razão entre pressões estáticas e $k = c_p / c_v$ o coeficiente isentrópico.

A integração da equação da energia conduz ao seguinte resultado:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \left(\frac{k}{k-1} \right) \left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} \right) \quad (2.7)$$

que combinada com a equação da conservação da massa leva a seguinte expressão para V_2 :

$$V_2 = \left[\frac{2k p_1 (1 - r^{(k-1)/k})}{(k-1)\rho_1 (1 - r^{2/k} \beta^4)} \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

Repetindo as mesmas considerações feitas para o caso incompressível, chega-se à expressão da velocidade do escoamento com o emprego de um tubo de Pitot da seguinte forma:

$$V = \left[\frac{2k}{(k-1)} \frac{p_e}{\rho} \left\{ \left(\frac{p_0}{p_e} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right\} \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

A eq.(2.5) para cálculo da velocidade do escoamento incompressível é sem dúvida mais simples de ser usada do que a anterior (eq.(2.9)), mas é necessário que se atente bem para casos onde a consideração de compressibilidade é obrigatória. Como exemplo, toma-se um escoamento de ar submetido a uma diferença de pressão que varia na faixa de 0 até 380 kPa, mostrado na figura a seguir.

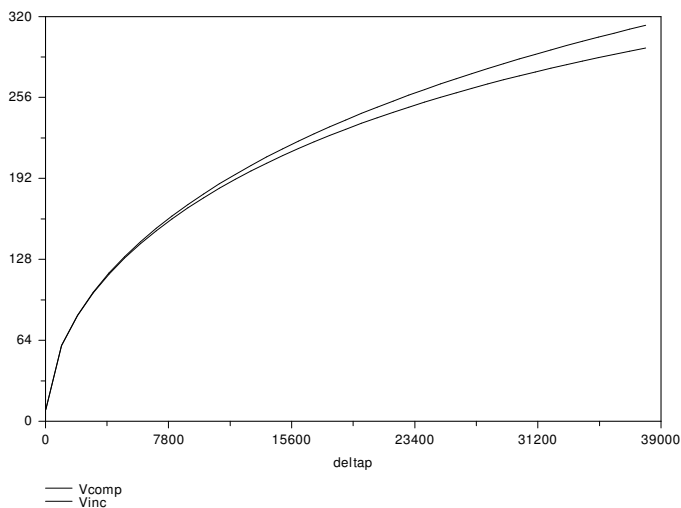


Fig. 2.6- Valores de velocidades do ar calculadas pela eq. (2.5), incompressível – linha superior, e pela eq. (2.9), compressível – linha inferior, em função da variação da pressão. (feito com o software IT)

Nota-se que a velocidade calculada pela formulação compressível é inferior à calculada pela equação que não corrige esse fenômeno. Também se percebe que as diferenças ficam mais perceptíveis para valores de velocidade superiores a 120 m/s, i.e., por volta de 1/3 da velocidade do som do ar em condições ambientes (~330 m/s).

O limite inferior de medição da velocidade com tubos de Pitot está ligado à capacidade de deslocamento da coluna manométrica. O termo $(p_0 - p)$ na equação (2.5) deve gerar uma altura manométrica que possa ser lida no sensor, que é dado por $(\rho g \Delta z)_M$, onde o índice M é relativo ao fluido manométrico empregado. O emprego do tubo de Pitot não é aconselhado para escoamentos transientes, pois o sistema de leitura de pressão diferencial responde de forma lenta.

2.4. Anemômetro de fio quente

O princípio desse tipo de sensor é de correlacionar a dissipação de calor em um fino fio, como mostra a figura que segue, com a velocidade do escoamento que provoca essa perda.

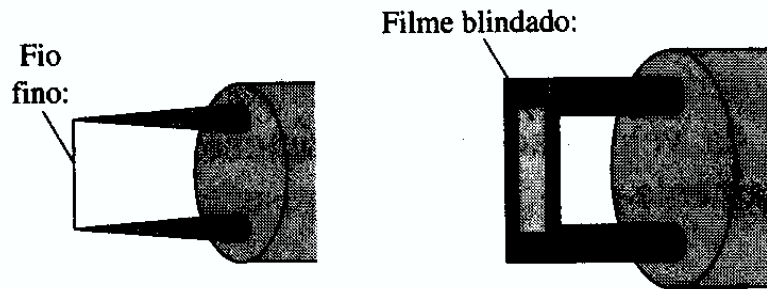


Fig. 2.7- Anemômetros de fio quente [WHITE, 2002].

A equação empregada para expressar a velocidade V do escoamento é conhecida como lei de King. White, 2002, apresenta a seguinte equação para o calor perdido pelo sensor

$$q = I^2 R = a + b(\rho V)^n \quad (2.10)$$

onde I é a corrente [A], e R a resistência elétrica [Ω]. Os coeficientes a , b e n são determinados por calibração.

Holman, 1996, já apresenta outra relação:

$$q = I^2 R = (a + bV^{0.5}) (T_f - T_a) \quad (2.11)$$

onde T_f é a temperatura do fio e T_a é a temperatura do ar. As medidas possíveis são tanto de resistência, com a corrente constante, como ao contrário.

3. Vazão

Os instrumentos que serão apresentados a seguir são capazes de apresentar o valor integrado de vazão, seja volumétrica ou mássica. Alguns dependem da medição da velocidade, que relacionada à área normal ao escoamento, levam ao cálculo da vazão. Outros instrumentos medem apenas a vazão, sendo então a velocidade média o resultado da divisão da vazão pela área, como mostram as equações (1.1) e (1.2).

3.1. Tubo de Pitot

A medição de pressão estática, dinâmica e de estagnação com tubos de Pitot foi apresentada na apostila de Medição de Pressão em Fluidos [SMITH SCHNEIDER, 2003] e o emprego desse instrumento para medição da velocidade do fluido foi apresentada na seção 2.3 da presente apostila. Com o tubo de Pitot é possível se medir a velocidade de um fluido em um ponto do escoamento, e a vazão do escoamento pode ser calculada a partir da medição em diferentes pontos.

A vazão será o resultado do tratamento das velocidades adequadamente [DELMÉE, 1983]. Os tubos de Pitot não são instrumentos recomendados para medição de velocidades variáveis em um dado ponto, e a medição integrada também não pode ser feita em situações onde a vazão muda

com o tempo. Em tubulações cilíndricas deve-se explorar a medição da velocidade em diferentes raios de um mesmo plano, espaçados por ângulos iguais, sendo recomendado o mínimo de 4 raios, isto é, 2 ângulos igualmente espaçados. Para tubulações com seção transversal retangular repete-se o mesmo procedimento para coordenadas de medição escolhidas, similares aos raios.

O procedimento de medição é feito da seguinte maneira:

- 1- escolha do número de os raios (seção cilíndrica) ou coordenadas (seção retangular).
- 2- escolha dos pontos de medição em função dos métodos de espaçamento e integração. A Tabela 3.1 mostra os métodos de “centróides de áreas iguais”, “cotas de Newton”, “Chebyshev” e “Gauss”, na forma de segmentos adimensionalizados $0 \leq r \leq 1$ ou $0 \leq x \leq 1$, onde deverão portanto ser feitas as medições de velocidade. O valor médio de velocidades V_m é dado pelo somatório dos produtos velocidade pelo fator de peso w , ou simplesmente

$$V_m = \sum_{i=1}^n V_i w_i \quad (3.1)$$

A vazão é calculada pelas equações (1.1) ou (1.2). Os valores de velocidade obtidos por qualquer outro anemômetro podem ser usados para a medição de vazões, seguindo o procedimento acima apresentado.

Tabela 2.1- Disposição dos pontos de medição por amostragem de acordo com 4 métodos de medição (x coordenada adimensional para tubos de seção retangular, r coordenada adimensional para tubos de seção circular, w fator de peso) [Fonte: DELMÉE, 1983].

Quantidade de pontos de medição n	Método											
	Centroide de áreas iguais (a)			Cotas de Newton			Chebyshev (a)			Gauss		
	x	r	w	x	r	w	x	r	w	x	r	w
2	0,2500	0,5000	1,2	0	0	1,2	0,2113	0,4597	1,2	0,2113	0,4597	1,2
	0,7500	0,8660		1	1		0,7887	0,8881		0,7887	0,8881	
3	0,1667	0,4082	1,3	0	0	0,1667	0,1464	0,3827	1,3	0,1127	0,3357	0,2778
	0,5000	0,7071		0,5	0,7071	0,6667	0,5000	0,7071		0,5000	0,7071	0,4444
	0,8333	0,9129		1	1	0,1667	0,8536	0,9239		0,8873	0,9420	0,2778
4	0,1250	0,3536	1,4	0	0	0,1250	0,1027	0,3203	1,4	0,0694	0,2635	0,1739
	0,3750	0,6124		0,3333	0,5774	0,3750	0,4072	0,6382		0,3300	0,5745	0,3261
	0,6250	0,7906		0,6667	0,8165	0,3750	0,5928	0,7699		0,6700	0,8185	0,3261
	0,8750	0,9354		1	1	0,1250	0,8973	0,9473		0,9306	0,9647	0,1739
5	0,1000	0,3162	1,5	0	0	0,0778	0,0838	0,2891	1,5	0,0469	0,2166	0,1185
	0,3000	0,5477		0,25	0,5000	0,3556	0,3127	0,5592		0,2308	0,4804	0,2393
	0,5000	0,7071		0,50	0,7071	0,1333	0,5000	0,7071		0,5000	0,7071	0,2844
	0,7000	0,8367		0,75	0,8660	0,3556	0,6873	0,8290		0,7692	0,8771	0,2393
	0,9000	0,9487		1	1	0,0778	0,9162	0,9572		0,9531	0,9763	0,1185

Nota: (a) Todas as medições têm peso igual.

3.2. Tanques aferidos

A forma mais simples de realizar uma medição de vazão pode ser exemplificada para o caso de um escoamento permanente de água. Tomando-se o circuito da figura, a saída do escoamento é uma descarga à pressão atmosférica, que é recolhida num reservatório. A medida da diferença de nível no reservatório, ao longo de um período de tempo informa a vazão volumétrica Q fornecida

pela bomba nesse circuito. A medida da vazão acontece sem interferência, ou seja, é não intrusiva, porém essa condição é muito particular.

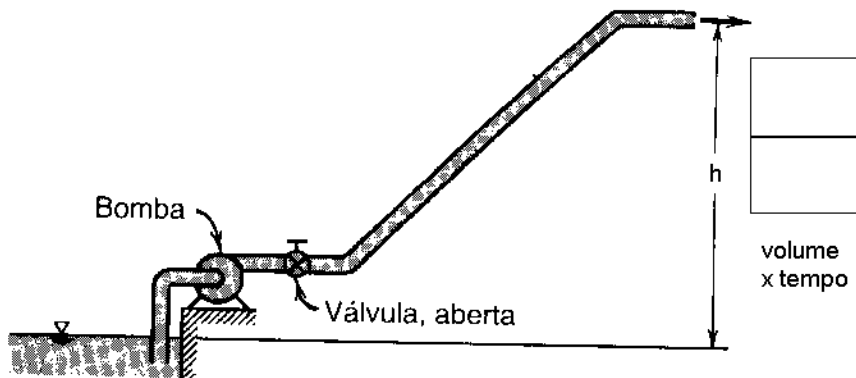


Fig. 3.1- Medida de vazão em circuito aberto [Fonte: adaptado de FOX e MCDONALD, 1995]

3.3 Medidores por obstrução

3.3.1. Tipos de medidores

Trata-se de um dos sensores ou dispositivos mais usuais de medida de vazão, e os diversos modelos e tipos constituem cerca de 50% dos equipamentos existentes. Também chamados de elementos deprimogênicos (DELMÉE, 1983), seu princípio de medição é baseado na variação da pressão provocada por algum tipo de obstrução, que é então relacionada à vazão, por alguma relação do tipo $\dot{V} \propto \sqrt{\Delta p}$.

Os medidores mais comuns são do tipo placa de orifício, bocal e ainda Venturi. Um esquema comparativo é apresentado na figura que segue.

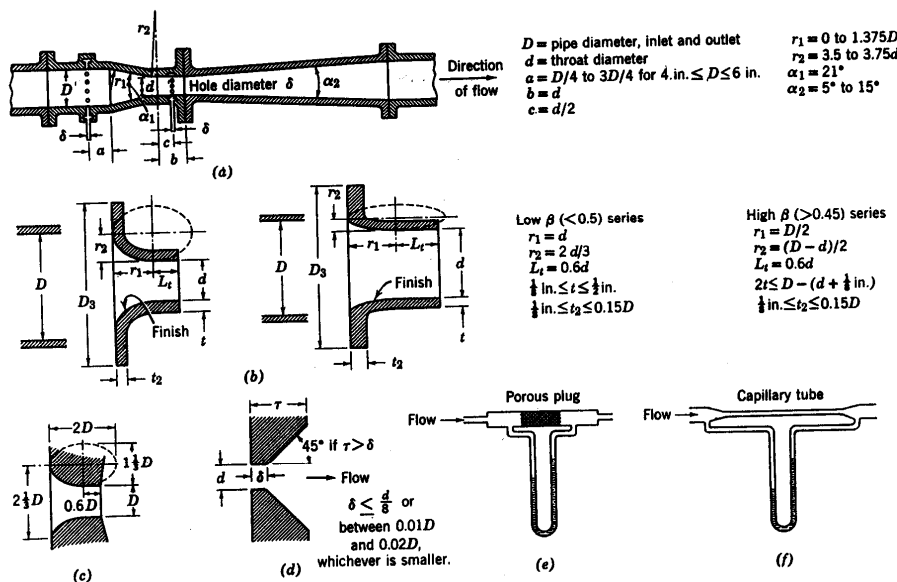


Fig. 3.2- Tipos de medidores por obstrução: a) Venturi, b) e c) bocais, d) placa de orifício e) cápsula porosa e f) tubo capilar [Fonte: BENEDICT, 1984]

3.3.2. Equacionamento para escoamentos incompressíveis

O equacionamento que será apresentado busca estabelecer uma relação da vazão com a diferença de pressão medida a montante e a jusante da obstrução. As expressões da vazão teórica para um fluido ideal, num escoamento adiabático e sem atrito, são obtidas pela aplicação das equações da continuidade e de Bernoulli, para a situação apresentada na figura que segue:

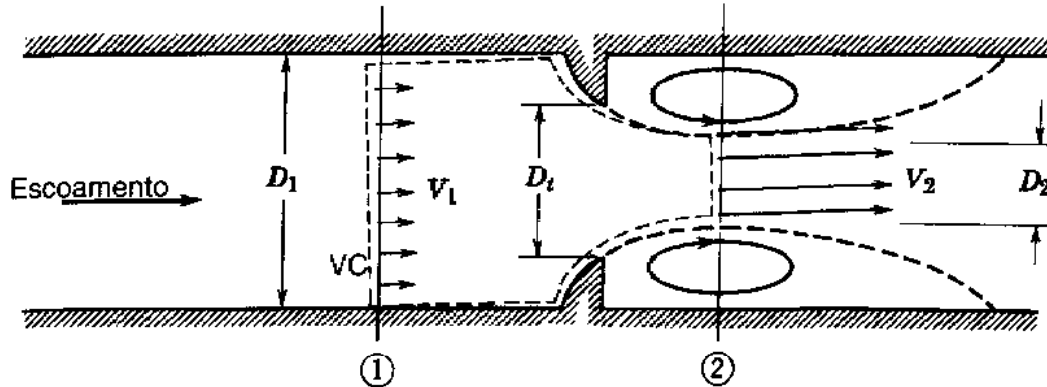


Fig. 3.3- Escoamento num bocal genérico [Fonte: FOX e MCDONALD, 1995]

A equação da energia sem perdas, ou equação de Bernoulli, aplicada ao fluido escoando ao longo de uma linha de corrente, é dada por

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g z = \text{const} \quad (3.2)$$

Como não há diferença de altura nesse tipo de medidor pode-se simplificar a equação anterior, eliminando-se o termo potencial.

Assumindo-se que a massa específica é constante (escoamento incompressível) e tomando-se dois pontos de observação 1 e 2 ao longo da linha de corrente, obtém-se:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2 \quad (3.3)$$

A validade do equacionamento dado pelas equações anteriores é restrita a condições de escoamento permanente, incompressível, ao longo de uma mesma linha de corrente, sem atrito, sem diferença de cota z , e com velocidade uniforme ao longo dos pontos ou seções de observação 1 e 2.

Respeitadas essas condições, a equação da continuidade é dada por:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad \text{ou} \quad \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \quad (3.4)$$

sendo D_1 é o diâmetro da canalização e D_2 é o diâmetro da veia contraída, resultante da obstrução. A equação da energia é dada por:

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2) = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right] \quad (3.5)$$

que combinadas resultam numa expressão para a velocidade na descarga da obstrução em função da diferença de pressão que segue:

$$\frac{\dot{V}}{A_2} = V_2 \approx \left[\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(1 - \frac{D_2^4}{D_1^4} \right)} \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

Essa expressão é imprecisa pois não leva em conta o atrito do escoamento, e também porque a determinação de D_2 não é prática. Para contornar a situação, emprega-se o diâmetro da obstrução D_t , ficando

$$\beta = \frac{D_t}{D_1} \quad (3.7)$$

e introduzindo-se o coeficiente adimensional de descarga C_d , para efetuar a correção dos problemas de atrito, tal que:

$$\dot{V} = A_t V_t = C_d A_t \left[\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho (1 - \beta^4)} \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

onde

$$C_d = \frac{Q_{real}}{Q_{ideal}} = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ideal}} \quad (3.9)$$

A partir dessas equações, define-se o coeficiente de vazão K , dado pelo produto do coeficiente de descarga C_d e pelo fator de velocidade de aproximação E , tal que:

$$K = C_d E \quad \text{onde} \quad E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (3.10)$$

Assim, é possível reescrever a equação da vazão como:

$$\dot{V} = K A_t \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad \text{ou} \quad \dot{V} = C_d E A_t \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (3.11)$$

Evita-se o emprego da dimensão da obstrução (D_t ou A_t) com a expressão que segue:

$$\dot{V} = C_d E \beta^2 A_1 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad \text{em m}^3/\text{s} \quad (3.12)$$

A vazão mássica real \dot{m}_{real} , em kg/s, é dada pela expressão

$$\dot{m}_{real} = K A_t \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \text{ ou } \dot{m}_{real} = C_d E \beta^2 A_1 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (3.13)$$

Os princípios apresentados nessa sessão foram usados para a padronização de medidores por obstrução, onde os coeficientes de descarga C_d e de vazão K são conhecidos empiricamente e tabelados em função do número de Reynolds e do diâmetro terno dos tubos.

Os coeficientes de descarga C e de vazão K são corrigidos para escoamentos turbulentos na forma

$$C_d = C_{d-\infty} + \frac{b}{Re_{D_t}^n} \quad \text{e} \quad K = K_{\infty} + \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{b}{Re_{D_t}^n} \quad (3.14)$$

onde $C_{d-\infty}$ e K_{∞} são os coeficientes de descarga e de vazão para Re infinito, e b e n são coeficientes de ajuste.

3.3.3. Equacionamento para escoamentos compressíveis

Para fluidos reais, a correção do equacionamento proposto até aqui pode ser obtida multiplicando-se as expressões das vazões volumétricas ou mássicas por um fator de expansão isentrópico ϵ , função de β , ΔP e k , da forma

$$Q_{comp} = Q_{incomp} \epsilon \quad (3.15)$$

Os valores de ϵ variam segundo a norma de medição adotada e também em relação aos pontos de tomada de pressão diferencial sobre o medidor. Pela norma ISO 5167/98 seu valor é dado por

$$\epsilon = 1 - \left(0,351 + 0,256 \beta^4 + 0,93 \beta^8 \right) \left(1 - \left[\frac{P_2}{P_1} \right]^{1/k} \right)$$

3.3.4. Placa de orifício (square-edged orifice)

A configuração mais comum é construída com um orifício concêntrico montado entre flanges, que interrompe uma canalização ou canal fechado. Também são encontradas placas com orifícios excêntricos e segmentais, como mostra a figura, escolhidos em função do tipo de impurezas encontradas no fluido.

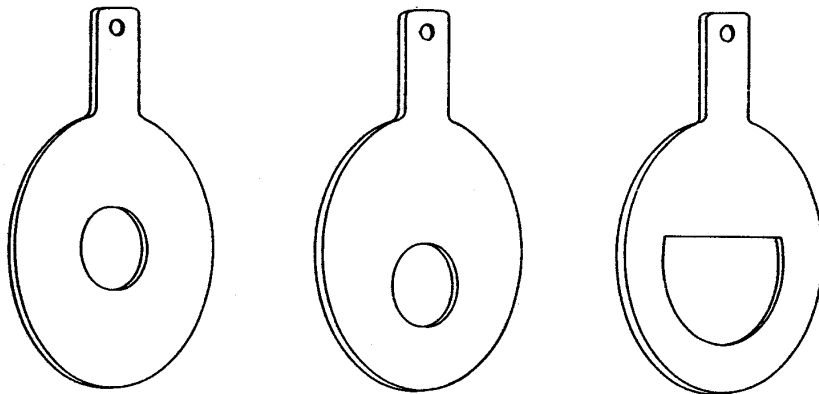


Fig. 3.4- Placas de orifício do tipo concêntrico, excêntrico e segmental [Fonte: DELMÉE, 1983]

A montagem da placa de orifício requer um comprimento de tubo reto a montante do dispositivo de cerca de 10 a 30 diâmetros para garantir o desenvolvimento completo da camada limite cinética. Já a colocação das tomadas de pressão diferencial não seguem uma única padronização, e são escolhidas conforme a necessidade da instalação. Algumas delas são mostradas na figura que segue.

De posse da diferença de pressão, para uma dada tomada de pressão escolhida, a vazão é dada pelas equações (3.12) e (3.13) para escoamentos incompressíveis, e (3.15) para compressíveis. Já o valor do coeficiente de vazão K depende das dimensões relativas do orifício, expresso por β , e de sua geometria, que determina tanto o coeficiente de descarga C_d como o fator de velocidade de aproximação E . Segundo Delmée, 1983, o coeficiente de vazão K pode ser calculado por fórmulas empíricas ou encontrado em tabelas.

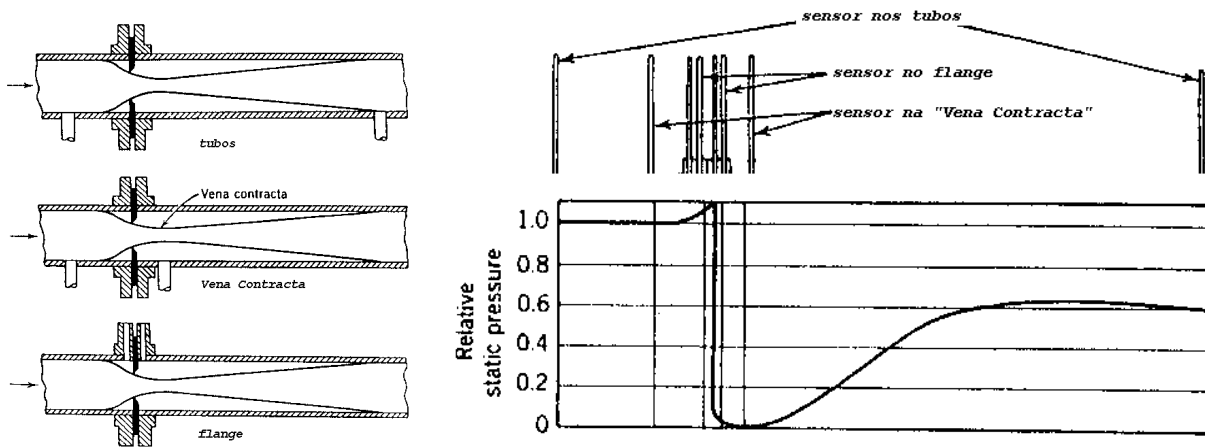


Fig. 3.5- Tomadas de pressão numa placa de orifício [Fonte: BENEDICT, 1984]

A figura a seguir mostra um gráfico de K em função do n° de Reynolds, para diferentes razões de diâmetro β , para uma leitura de pressão montada em canto do flange.

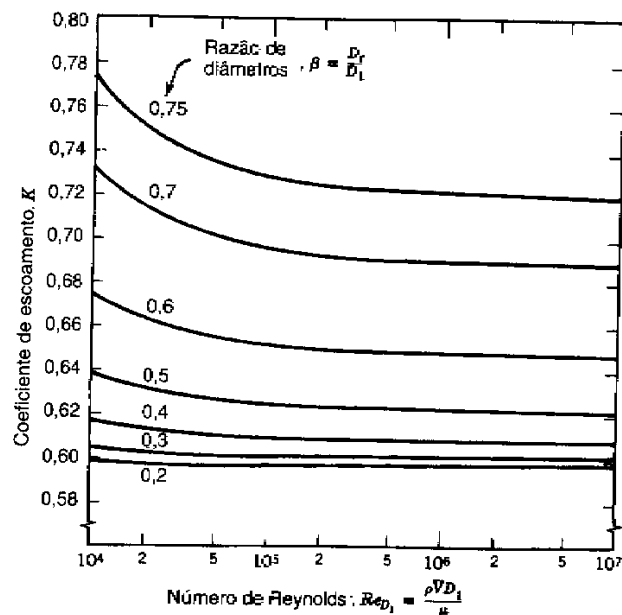


Fig. 3.6- Coeficiente de vazão K para tomada de leitura em canto [Fonte: FOX e MCDONALD, 1995]

As placas de orifício são dispositivos de baixo custo de instalação e manutenção. Sua grande desvantagem reside na perda de carga que impõe ao escoamento (intrusão importante), em função da expansão a jusante da placa. A incerteza de medição desse dispositivo se situa em cerca de 2 a 4 % do fundo de escala.

3.3.5. Bocais (flow nozzle)

Trata-se de um medidor intermediário entre a placa de orifício e o Venturi. Podem ser encontrados nas montagens em duto ou em câmaras pressurizadas. As montagens estão na próxima figura.

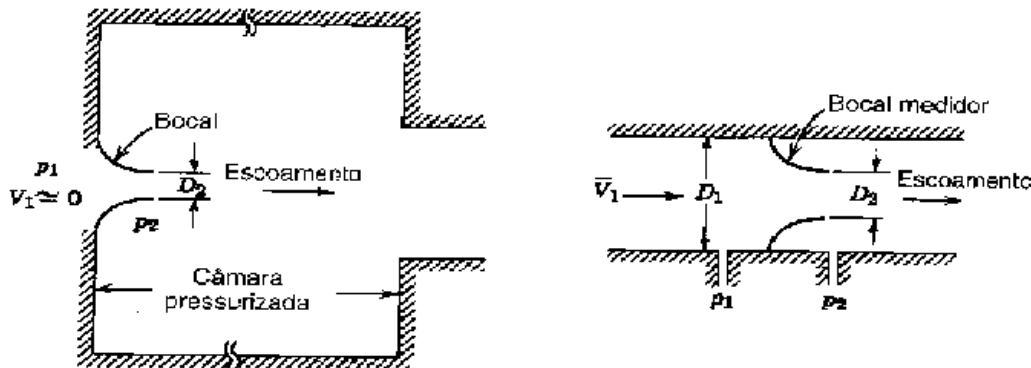


Fig. 3.7- Tipos de bocais: pressurizado e em duto

O cálculo da vazão se faz da mesma maneira que nas placas de orifício, e a literatura [DELMÉE, 1983; BENEDICT, 1984, entre outras] apresentam os valores de K em função de C_d , E e β . O gráfico a seguir mostra o comportamento do coeficiente de vazão para um bocal instalado em duto, em função do número de Reynolds.

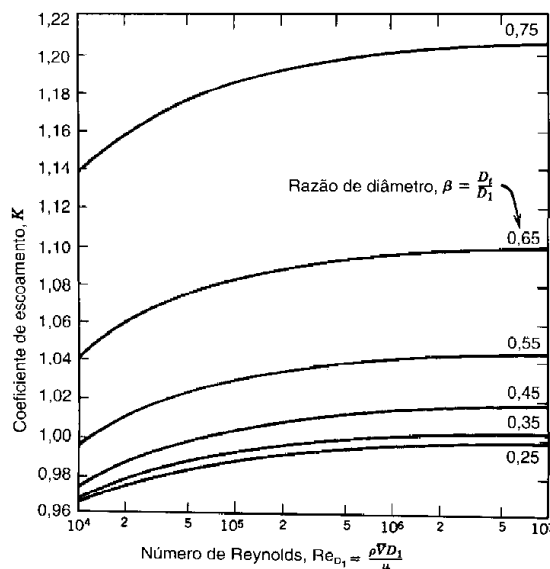


Fig. 3.8- Curvas de coeficiente de vazão para bocais com montagem em duto [Fonte: FOX e MCDONALD, 1995]

3.3.6. Venturi

São medidores com o melhor desempenho entre os seus similares, na categoria de medidores de obstrução. São os que provocam a menor perda de carga permanente na medida, portanto os menos intrusivos. A figura a seguir apresenta uma construção típica desse instrumento.

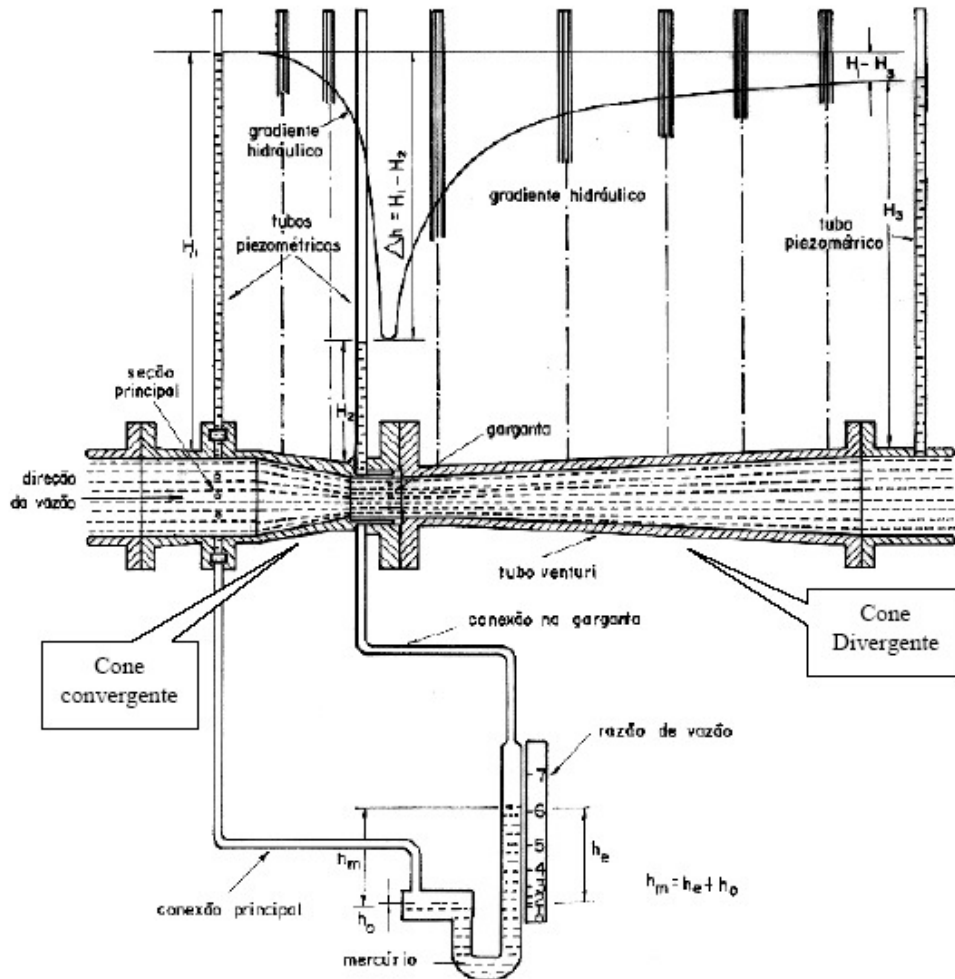


Fig. 3.9- Venturi clássico com diagrama de pressões [Fonte: VIANA, 1999]

A seleção do tipo de medidor por obstrução deverá atender critérios de custo de aquisição do equipamento propriamente dito e de seu sistema de medição de pressão diferencial, comparado com as desvantagens causadas pela introdução de perdas de carga no escoamento, inevitável para os 3 tipos de sensores. A figura que segue compara os três tipos vistos até aqui.

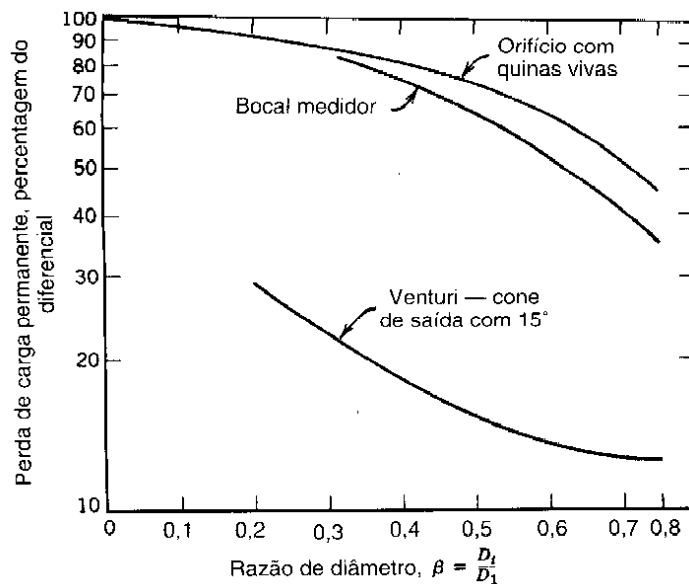


Fig. 3.10- Perda de carga em medidores por obstrução [Fonte: FOX e MCDONALD, 1995]

3.4. Rotâmetros

Trata-se de medidores de vazão baseados em efeitos de arrasto, onde o fluido que se deseja medir escoar pela parte inferior de um tubo colocado sempre em posição vertical. A bóia será elevada pelo fluido e estabilizará numa dada posição, em consequência do equilíbrio de sua força peso com o empuxo do escoamento, como mostra a figura a seguir.

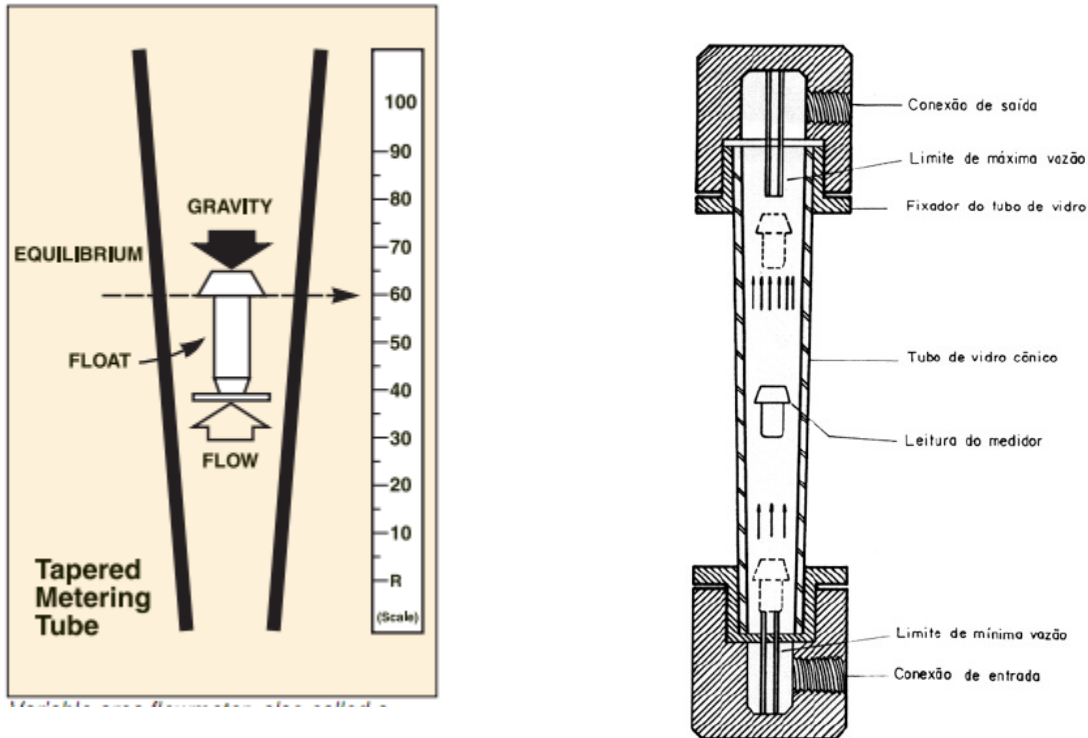


Fig. 3.11- Medidor de vazão de bóia (rotâmetro) de área variável: esquema de operação (esq) e montagem do instrumento (dir)

O tipo de boia ou flutuador pode ser de diferentes geometrias, como mostra a figura

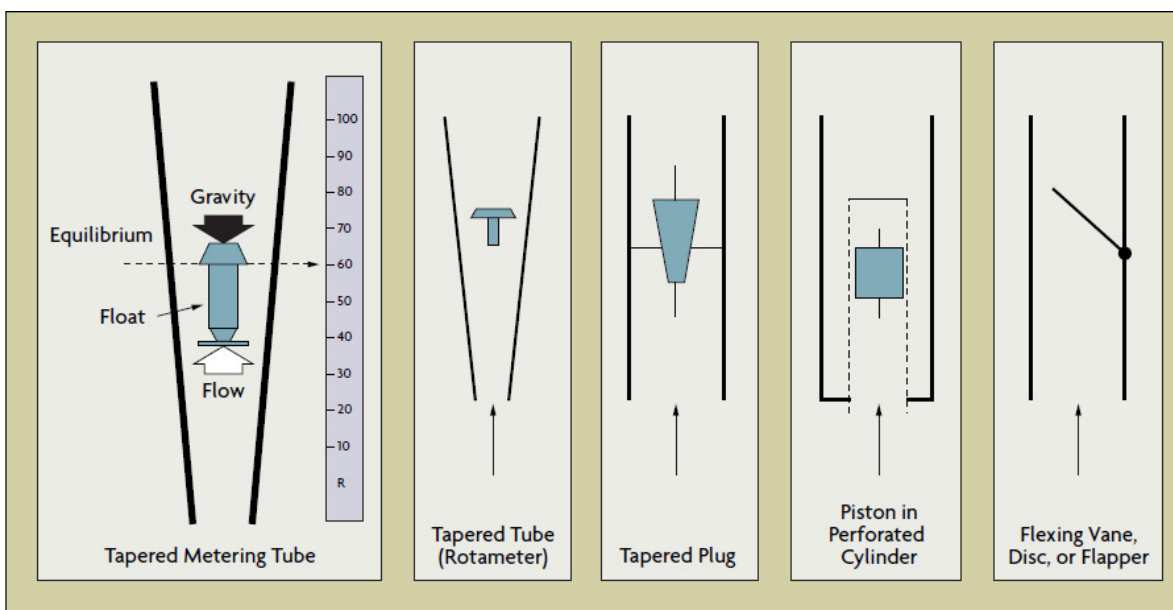


Fig. 3.12- Tipos de rotômetros (http://omega.com/literature/transactions/Transactions_Vol_IV.pdf acesso nov/2011)

A posição que a bóia estabiliza ao longo desse tubo vertical é usada para a indicação da vazão de um determinado fluido. O balanço na bóia é dado por

$$F_a + \rho_f (A y)_b g = \rho_b (A y)_b g \quad (3.16)$$

onde os sub-índices f e b são relativos ao fluido e à bóia, ρ a massa específica e $(A y)_b$ o volume da bóia, y é a cota vertical do rotâmetro, que corresponde a uma escala graduada. F_a é a força de arrasto, dada por

$$F_a = C_a A_b \frac{\rho_f V_m^2}{2} \quad (3.17)$$

C_a é o coeficiente de arrasto, A_b a área da bóia, e V_m a velocidade média no espaço livre entre a bóia e o tubo, que é um espaço anular. Combinando-se as duas últimas equações chega-se a relação para a vazão volumétrica \dot{V}

$$\dot{V} = A \left[\frac{1}{C_a} \frac{2(A y)_b}{A_b} \left(\frac{\rho_b}{\rho_f} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (3.18)$$

A área é dada por $A = \frac{\pi}{4} [(D + ay)^2 - d^2]$, onde D e d são os diâmetros de entrada do tubo e da bóia, respectivamente, e finalmente a é uma constante do rotâmetro.

O coeficiente de arrasto C_a depende do número de Reynolds $Re = V_m D / \nu$ e conseqüentemente das viscosidades μ ou ν . As bóias de rotâmetros são escolhidas de forma a apresentarem coeficiente de arrasto constante, eliminando essa dependência. Quando a relação quadrática de área aproxima-se de uma relação linear, em função das dimensões do conjunto, a vazão mássica pode ser dada por

$$\dot{m} = C_1 y [(\rho_b - \rho) \rho_f]^{1/2} \quad (3.19)$$

onde C_1 é uma constante do equipamento.

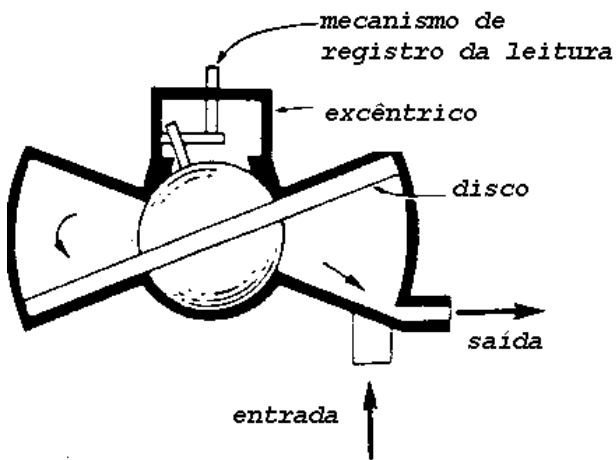
Após calibrado, as medidas efetuadas em condições de temperatura e pressão diferentes daquela de referência, emprega-se a relação de correção

$$\dot{V}_{corr} = \dot{V}_{cal} \sqrt{\frac{P_{cal}}{P_{corr}} \frac{T_{corr}}{T_{cal}}} \quad (3.20)$$

especificado para leituras de vazão em litros/minuto, temperaturas em kelvin e pressão em mmHg (<http://www.skinc.com/prod/320-100.asp>, acesso nov/2011). Tabelas de correção em função da temperatura, temperatura e pressão, viscosidade, também podem ser encontradas

3.5. Deslocamento positivo

http://www.flowmeters.com/ufm/index.cfm?task=positive_displacement
http://www.flowmeters.com/index.cfm?task=technologies_page



medidores por deslocamento positivo.

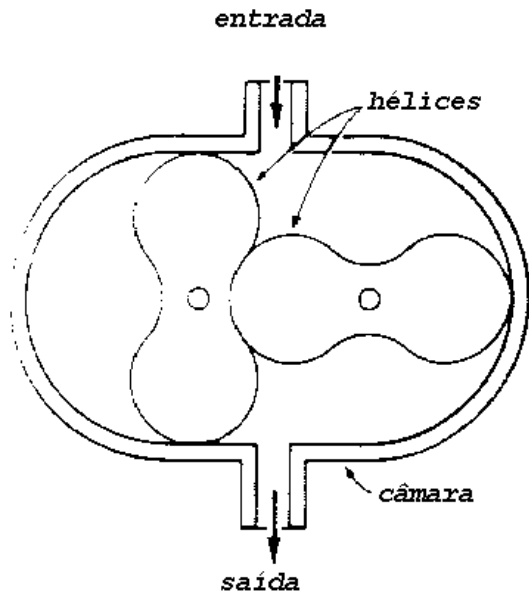
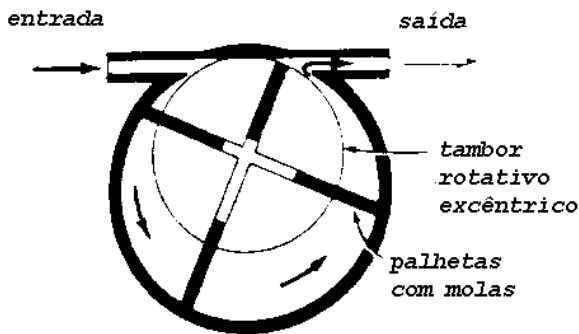


Fig. 3.12- Medidores por deslocamento positivo com disco móvel, com palhetas pressionadas por molas e por lóbulos, hélices ou engrenagens. [HOLMAN, 1996]

http://www.youtube.com/watch?v=eDTske_nSeI&feature=related

3.6. Turbinas

Nesse medidor, a passagem do fluido causa a movimentação de uma turbina, ou hélice, como mostra a figura.

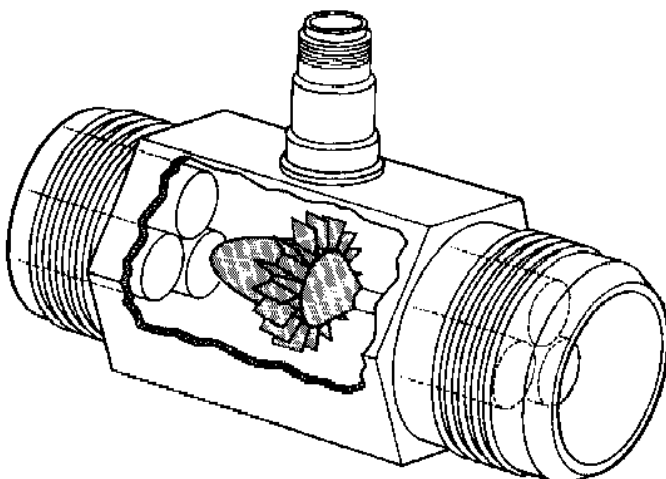


Fig. 3.13- Medidor de vazão do tipo turbina

A rotação da hélice é associada ao escoamento do fluido que passa, mesmo em regimes transientes. Esses medidores são caracterizados por um coeficiente de vazão K , que aparece na equação da vazão volumétrica \dot{V} (m³/s)

$$\dot{V} = \frac{f}{K} \quad (3.21)$$

onde f é a frequência dos pulsos. O coeficiente K depende da vazão e da viscosidade do fluido, e é obtido por calibração para cada equipamento.

3.7 Outros tipos de medidores, ou medidores especiais

Até aqui, os medidores de vazão apresentados têm em comum o fato de introduzirem importantes modificações no escoamento, gerando perdas de carga excessivas (placas de orifício) ou interferências no padrão do escoamento não desejadas. Os próximos sensores se caracterizam por tentar evitar esses efeitos, ou apenas mitigá-los. Medidores não intrusivos como os eletromagnéticos e os por ultra-som são bons exemplos de não interferência, mas ainda serão apresentados os medidores por efeito Coriolis e tipo Vortex, que embora interfiram no escoamento, trazem outros atrativos para a sua utilização.

a) Medidores eletromagnéticos

Somente são aplicáveis a fluidos condutores elétricos e trazem duas grandes vantagens:

- não interferem no escoamento
- independem do conhecimento de propriedades do fluido, quer sejam termo-físicas (viscosidade) ou termodinâmicas (massa específica, temperatura, pressão).

Seu princípio de funcionamento é baseado no fato que o fluido se comporta como um condutor elétrico em movimento, provocando uma alteração na densidade de fluxo eletromagnético B , em weber/m², criada na seção de teste. Para um escoamento com velocidade média V_m , em m/s, transversal a eletrodos instalados a uma distância D , em m, haverá a geração de uma força de campo E , em volts, igual a:

$$E = B D V \quad (3.22)$$

Como a vazão volumétrica \dot{V} , em m³/s, é dada pelo produto dessa mesma velocidade V_m pela área normal à passagem do escoamento, tem-se uma relação direta da vazão com a modificação do campo eletromagnético. O medidor pode ser visto esquematicamente na próxima figura

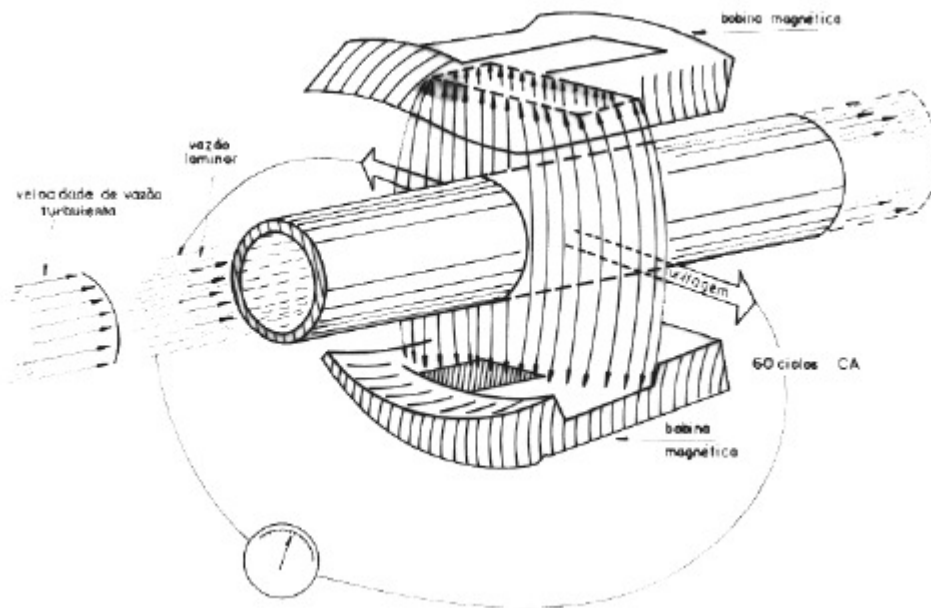


Fig. 3.14- Visão esquemática de um medidor de vazão tipo eletromagnético

b) Medidor por ultra-som

Sua operação está baseada no princípio da propagação de som em um líquido. Pulsos de pressão sonora se propagam a velocidade do som (mesmo princípio dos sonares em água) Num medidor de vazão, os pulsos sonoros gerados por um transdutor piezoelétrico, por exemplo, geram trens de pulsos no fluido, cuja velocidade pode somar-se a do fluido quando aplicado no sentido do escoamento ou subtrair-se, no caso contrário.

Dois tipos de sensores podem ser empregados nessa medição:

Por efeito Doppler - O fluido observado deve conter partículas refletoras em quantidade suficiente, tais como sólidos ou bolhas de gás, e sua distribuição dentro do fluido permitirá calcular a velocidade média do escoamento. O princípio de funcionamento desse medidor é baseado no efeito Doppler, onde a frequência de uma onda sofre alterações quando existe movimento relativo entre a fonte emissora e um receptor, e no caso dessa medição são as partículas refletoras que se movimentam em relação a um emissor A e um receptor B estacionários, como mostra a figura a seguir.

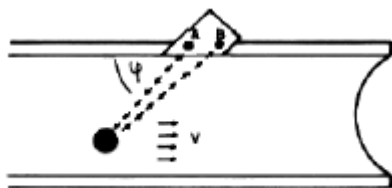


Fig. 3.15 – Efeito Doppler na medição da velocidade de um fluido escoando

O emissor e o receptor de ultra-som são instalados lado a lado em uma seção de teste, e sinais de medição com frequência e amplitude constantes partem do emissor com um ângulo ϕ em relação ao escoamento. O sinal incide sobre as partículas do fluido e a reflexão se faz com uma frequência modificada Δf , dada por

$$\Delta f = 2 f_0 \frac{\cos \phi}{a} V \quad (3.23)$$

onde f_0 é a frequência de emissão, a é a velocidade do som no meio e V é a velocidade média do escoamento. Essa última é diretamente medida pela variação da frequência e seu valor médio é empregado para a medição da vazão.

Por tempo de passagem- Também é baseado na variação da frequência de pulsos de ultrassom, mas com um arranjo diferente do anterior. Dois conjuntos emissores-receptores são montados em posições distintas na tubulação, separados por uma distância L e formando um ângulo ϕ , como mostra a próxima figura. As diferenças dos tempos entre os pulsos T_{12} e T_{21} refletem a velocidade do escoamento, seguindo a equação

$$V = K \frac{\Delta T}{T_{21} + T_{12}}, \text{ onde } K = \frac{2L}{\cos \phi} \quad (3.24)$$

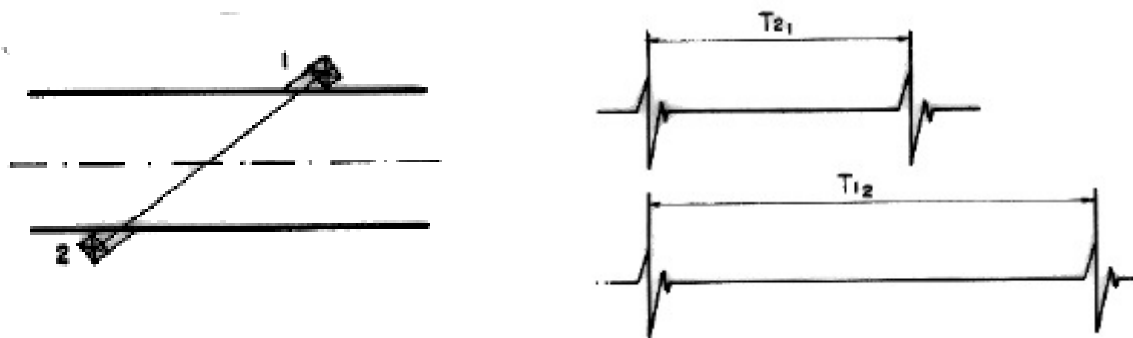


Fig 3.16- Esquema de medição de velocidade por tempo de passagem

Medidor tipo Vortex

Trata-se de uma medição para vazões de gases e líquidos usando o efeito de geração de vórtices por obstáculos em um escoamento, como mostra a figura. Os sensores percebem as ondas dos vortex e gerem um sinal em frequência proporcional à vazão.

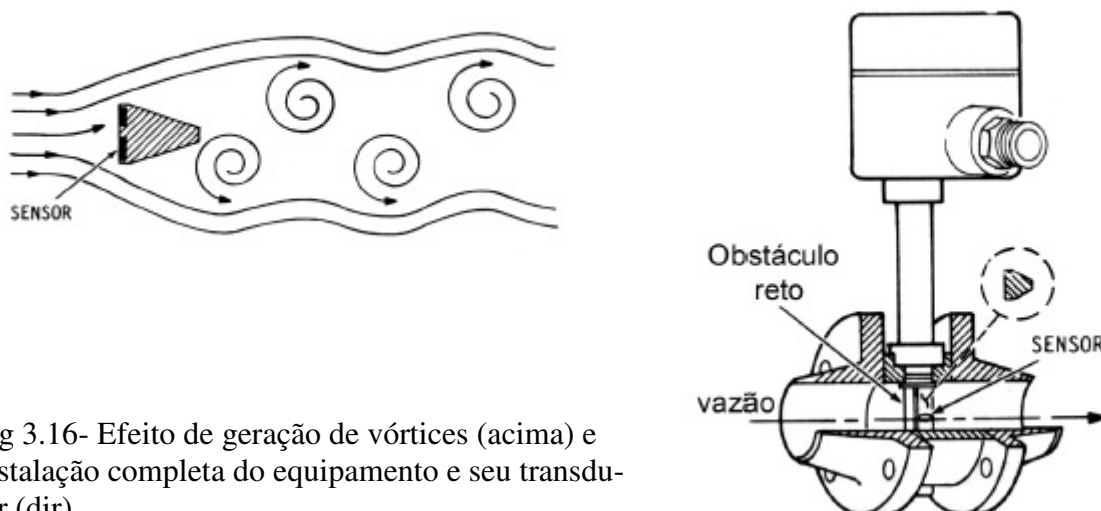


Fig 3.16- Efeito de geração de vórtices (acima) e instalação completa do equipamento e seu transdutor (dir)

Medidor Coriolis

O princípio de medição da vazão por efeito coriolis baseia-se na combinação de fenômenos de inércia e de aceleração centrípeta, e a próxima figura servirá para acompanhar sua descrição.

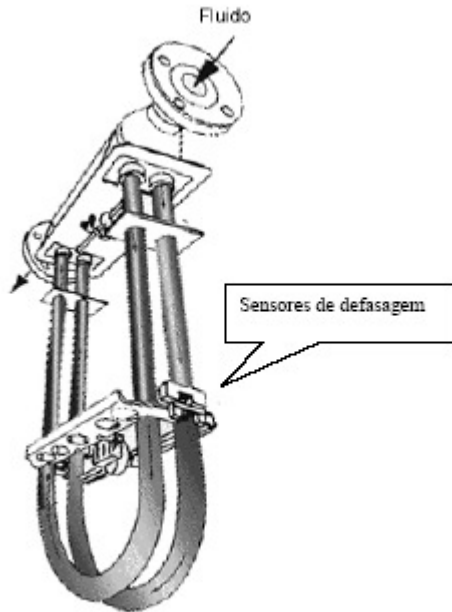


Fig 3.17- Medidor de vazão por efeito Coriolis

O escoamento a ser medido é separado em duas partes por meio de dois tubos paralelos, em forma de “U”, e por fim se juntam na sua descarga. Próximo da parte inferior de cada tubo em “U” existem eletroímãs que promovem sua oscilação em suas frequências naturais de vibração em amplitudes que não ultrapassam alguns milímetros. O escoamento do fluido faz surgir uma torção nos tubos, cuja defasagem permite a medição da vazão mássica. Esta defasagem é medida por sensores magnéticos instalados nas partes retas dos tubos em “U”.

4. Referências bibliográficas

- BENEDICT, R.P., 1984, Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements, 3^a edição, John Wiley & Sons, Nova Iorque.
- DELMÉE, G.J., 1983, Manual de Medição de Vazão, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo
- FOX, R.W. e MCDONALD, A.T., 1995, Introdução à Mecânica de Fluidos, Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro
- GOLDSTEIN, R. J., 1983, Fluid Mechanics Measurements, Hemisphere Publishing Corporation, Washington
- HOLMAN, J.P., 1996, Experimental Methods for Engineers, , McGraw-Hill
- OMEGA 1995, The Pressure, Strain and Force Handbook, Omega Engineering Inc., Stamford (www.omega.com)
- SMITH SCHNEIDER, P., 2007, Medição de Pressão em Fluidos, Apostila da disciplina de Medições Térmicas, Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre (www.geste.mecanica.ufrgs.br)
- VIANA, U.B., 1999. Instrumentação Básica II: Vazão, Temperatura e Analítica. SENAI / Companhia Siderúrgica de Tubarão, Vitória

Tipo	Classe	Faixa	Variação da faixa	Pressão máxima MPa	faixa de temperatura °C	viscosidade máxima cSt ($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	escala	indicação	incerteza padrão %	Material	perda de carga kPa	comprimento de linha cm	considerações especiais	alimentação	custo relativo
obstrução	Orifício	liq. 0,012→220 gás 23→43000	5:1	42	-270 → 1100	4000	raiz quadrada	remota pressão diferencial	1-2 fundo de escala de pressão diferencial	metais em geral	0,7 → 200	4 → 30	tubo reto: 10 Diam. montante 3 Diam. jusante	nenhuma	1,0
	Bocal	liq. 0,031→950 gás 45→240000	5:1	10	-50 → 800	4000	raiz quadrada	remota pressão diferencial	1-2 fundo de escala de pressão diferencial	bronze, aço, aço inox, ferro	0,7 → 140	2 → 60	tubo reto: 10 Diam. montante 3 Diam. jusante	nenhuma	1,4
	Venturi	liq. 0,03→950 gás 45→240000	5:1	10	-50 → 800	4000	raiz quadrada	remota pressão diferencial	1-2 fundo de escala de pressão diferencial	bronze, aço, aço inox, ferro, plástico	0,7 → 100	2 → 60	tubo reto: 10 Diam. montante 3 Diam. jusante	nenhuma	1,5
arrasto	rotâmetro de vidro	liq. $0,1 \times 10^{-3}$ → 16 gás 0,006 → 330	10:1	2	-45 → 200	100	linear	local ou remota (elétrica ou pneumática)	1-2 fundo de escala	metais em geral, plásticos e cerâmicos	0,05 → 7	0,6 → 10	montagem vertical	nenhuma	1,0
	rotâmetro de metal	liq. 0,03 → 250 gás 0,2 → 470	10:1	35	-180 → 870	100	linear	local ou remota (elétrica ou pneumática)	1-2 fundo de escala	metais em geral, plásticos e cerâmicos	0,3 → 70	1,2 → 30	montagem vertical	nenhuma	1,2
	turbina ou hélice	liq. $0,2 \times 10^{-3}$ → 3100 gás 0,2 → 140000 liq. limpo 0,02 → 63	15:1	105	-270 → 540	30	linear	remota elétrica	0,5 da leitura	alumínio, aço inox	14 → 70	0,3 → 90	qualquer	elétrica	5,0
			10:1												
			10:1	1	-15 → 150	2000		local ou remota elétrica	1 da leitura	bronze, aço, aço inox, ferro	7 → 140	1,2 → 15	preferência na horizontal	nenhuma	1,0
magnético		líquidos condutivos apenas $0,1 \times 10^{-3}$ → 3100	20:1	4	-130 → 180	1000	linear	remota elétrica	0,5 → 1 fundo de escala	plástico, aço inox	muito pequena	0,2 → 200	qualquer	elétrica	6,0

Tabela de características de diversos medidores de fluxo (Holman, 1996)

