

2 Fundamentos teóricos

Este capítulo descreve os fundamentos básicos da medição de vazão por ultra-som, os fatores que influenciam no desempenho de medidores desta tecnologia e os sistemas de comprovação metrológica (sistemas de calibração) utilizados para estabelecer a confiança nos resultados de uma medição.

2.1 Princípio geral de medição de vazão por ultra-som

Segundo [15], o princípio básico usado nos medidores de vazão ultra-sônicos é que o som se propagando no sentido do escoamento do fluido será mais rápido do que o som se propagando no contra-fluxo.

Os tempos de trânsito e a diferença de tempo são funções da velocidade do fluido. A medição pode ser realizada ou medindo-se os tempos de trânsito diretamente ou usando medição de frequência ou fase. Medidores de vazão ultra-sônicos são, essencialmente, bi-direcionais.

A vazão volumétrica (q_v) é determinada pelo produto da área da seção transversal (A) e a velocidade média axial do fluido $\overline{V}$.

$$q_v = A \times \overline{V}_a \quad (1)$$

2.1.1 Tipos de medição de vazão por ultra-som

A medição de vazão de fluidos por meio de tecnologia baseada em ultra-som possui três tipos de técnicas que tem sido empregadas, como descrito em [16]. São elas:

- a) Efeito Doppler
- b) Correlação Cruzada
- c) Tempo de Trânsito

2.1.1.1

Medição por ultra-som — efeito Doppler

A cerca deste princípio, encontramos em [16] que o efeito Doppler se baseia no fato que, quando uma onda de ultra-som de frequência f_t é transmitida no meio do fluxo, descontinuidade tais como bolhas de gás ou partículas sólidas carregadas pelo líquido dispersam a onda de ultra-som. A intensidade de ultra-som recebida no transdutor receptor, dispersa (refletida e difratada) pelas partículas em deslocamento ou descontinuidades, está associada à frequência Doppler defasada por uma quantidade δf , dado por:

$$\delta f = f_t - f_r = f_t \left(\frac{v \cos \theta_r}{c_f} + \frac{v \cos \theta_t}{c_f} \right) \quad (2)$$

onde f_r é a frequência Doppler defasada, v é a velocidade da descontinuidade com relação ao eixo da linha, θ_t e θ_r são os ângulos de transmissão e recepção, e c_f é a velocidade do som no meio do fluxo, como ilustrado na Fig. 21. Essa concepção é bastante dependente das descontinuidades, além da incerteza ser função de efeitos de turbulência, distribuição espacial das descontinuidades, vibração, escorregamento fluido-partícula, etc. Ainda segundo [16], a medição por esta tecnologia apresenta valores típicos de incerteza em torno de 15% do valor indicado e repetitividade de 2% do fundo de escala.

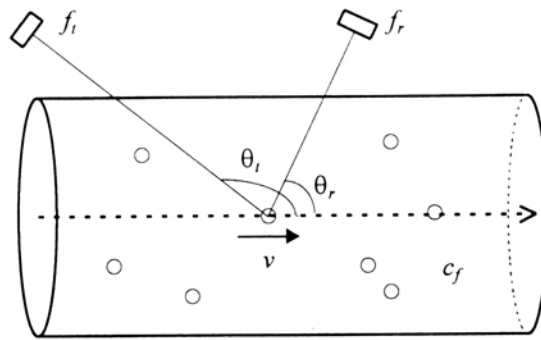


Figura 14 — Princípio de Funcionamento dos Medidores Tipo Doppler

De acordo com a afirmativa de [15], os medidores que utilizam esse princípio são adequados para medição de fluido com partículas capazes de refletir ondas acústicas.

2.1.1.2

Medição por ultra-som — correlação cruzada

Os medidores baseados em correlação cruzada, segundo [16], medem o tempo de trânsito do fluxo entre dois sensores instalados perpendicularmente à parede do tubo e espaçados por uma distância conhecida, conforme mostra a Fig. 22.

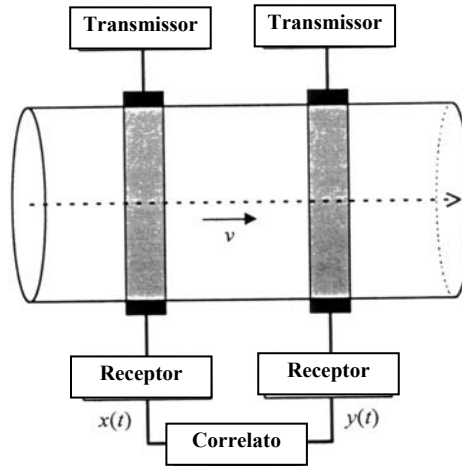


Figura 15 — Diagrama esquemático de um medidor ultra-sônico por correlação cruzada

Uma propriedade qualquer do fluido é utilizada para modular aleatoriamente os sinais dos sensores a montante e a jusante. O resultado são dois “ruídos” similares deslocados por um período de tempo $\tau_m = \ell / v$ onde ℓ é a distância entre os sensores e v a velocidade do fluxo. A defasagem ou tempo é determinada pelo cômputo da função correlação cruzada, conforme se segue:

$$R_{xy}(\ell, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t + \tau) y(t) dt \quad (3)$$

onde, $x(t + \tau)$ é o sinal a montante defasado no tempo τ , $y(t)$ é o sinal a jusante, e T é o tempo de integração. No caso idealizado R_{xy} apresenta um pico distinto quando $\tau = \tau_m$.

O uso de medidores do tipo ultra-sônico operando por correlação cruzada ainda está em desenvolvimento, graças ao potencial de medição não-intrusiva de fluxos multifásicos com incertezas superiores às atingidas pela técnica Doppler.

2.1.1.3

Medição por ultra-som — tempo de trânsito

De acordo com [16], os medidores que operam pela técnica de tempo de trânsito (*transit time*) são baseados na medição do tempo de propagação de ondas acústicas num meio onde ocorre o escoamento de um determinado fluido. A velocidade ao longo de um raio é dada pela velocidade do som no vácuo, mais a componente da velocidade do fluido ao longo do raio, conforme pode ser observado na geometria radial na Fig. 23.

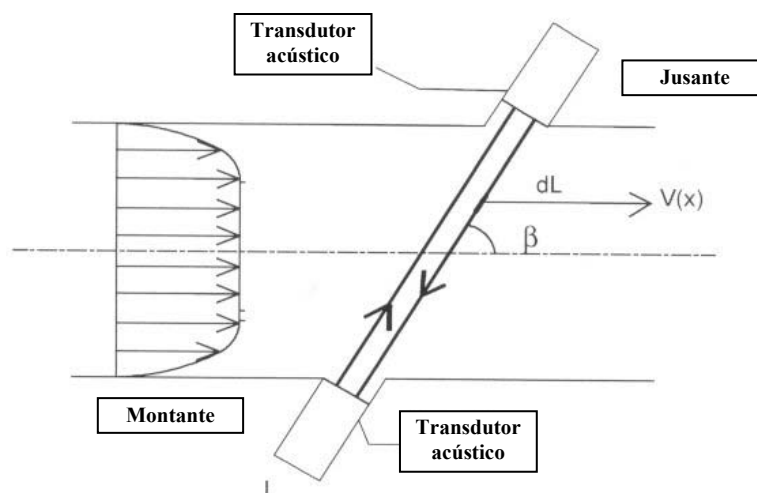


Figura 16 — Princípio de funcionamento dos medidores tipo tempo de trânsito

Como descrito na Introdução deste trabalho, o medidor ultra-sônico do tipo tempo de trânsito foi utilizado como instrumento de pesquisa para avaliação dos objetivos desta dissertação. Sendo assim, estaremos detalhando neste capítulo:

- a) Princípio da geração de sinais ultra-sônicos
- b) Concepção e arranjo do medidor
- c) Princípio de funcionamento
 - 1) Método da diferença de tempo de trânsito
 - Método de tempo de trânsito direto
 - Método da frequência de repetição do pulso (*sing-around*)
 - Método de deslocamento de fase
 - 2) Cálculo da vazão volumétrica (q_v)
 - Utilizando apenas arranjos de trajetórias diamétricas
 - Utilizando apenas multi-trajetoria em planos paralelos
- d) Fatores que influenciam a medição
- e) Requisitos de instalação
- f) Sistemas de calibração

De acordo com o descrito em [15], os medidores que utilizam esse princípio são adequados para medição de fluidos relativamente limpos, ou seja, sem partículas em suspensão.

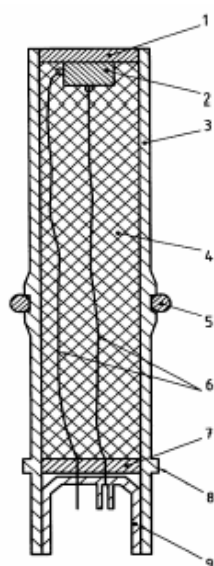
2.1.2

Geração dos sinais ultra-sônicos

Os sinais ultra-sônicos necessários para a medição da vazão são gerados e recebidos por transdutores ultra-sônicos (p.ex. usando cristais piezoelétricos).

Transdutores piezoelétricos empregam cristais ou cerâmicas que vibram quando uma tensão elétrica alternada é aplicada a seus terminais. O elemento vibratório gera deste modo ondas de pressão longitudinais (ondas de som) no fluido. Como o efeito piezoelétrico é reversível, ondas de som incidindo em tais elementos piezoelétricos produzirão sinais elétricos em seus terminais.

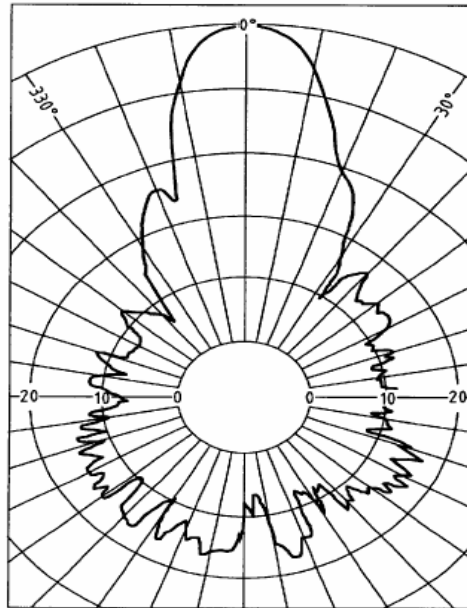
As propriedades acústicas do transdutor (padrão do feixe, frequência de ressonância, largura de faixa, etc...) dependem fortemente da construção do transdutor. A Fig. 17 mostra uma configuração de transdutor e o padrão do feixe de um transdutor é mostrado na Fig. 18.



- 1) Possível camada de ajuste
- 2) Elemento piezoelétrico
- 3) Invólucro do transdutor
- 4) Material de suporte
- 5) Anel de vedação
- 6) Cabos
- 7) Possível selo de pressão
- 8) Flange de montagem
- 9) Tomada para o cabo do transdutor

Nota: o material do invólucro do transdutor pode ser metal, plástico, etc. dependendo da aplicação.

Figura 17 — Configuração de um transdutor piezoelétrico.

**Notas:**

- a) O transdutor emprega uma camada de ajuste.
- b) Uma divisão da escala radial no diagrama polar corresponde a 10 dB.

Figura 18 — Padrão do feixe medido de um transdutor com diâmetro de saída de 2 cm em uma frequência de operação de 162 kHz.

2.1.3 Concepções e arranjos do medidor

De acordo com [14], o estágio atual de medidores ultra-sônicos possui as seguintes características:

- a) Dispositivo primário: um tubo de medição e o transdutor ultra-sônico com arranjos específicos de trajetórias acústicas e métodos específicos para fixação dos transdutores no conduto.
- b) Dispositivo secundário: Unidade de controle para processamento de sinal que compreende toda ou parte da eletrônica necessária. A unidade de controle compreende o equipamento eletrônico requerido para operar os transdutores, fazer as medições e prover meios para processamento dos dados medidos e, para visualização e armazenamento de resultados.

2.1.4 Arranjo de transdutor ultra-sônico

No mínimo dois transdutores são empregados em um medidor de vazão ultra-sônico, usando o método “tempo de trânsito”.

Os transdutores serão inseridos no duto em contato com o fluido ou fixados na parede externa do duto, como mostrado na Fig. 19c (arranjo “*clamp-on*”)¹.

Transdutores ultra-sônicos inseridos no conduto são montados num ângulo oblíquo ou normal a parede do duto. Em qualquer caso o ângulo entre a direção axial do fluxo e a(s) linha(s) reta(s) entre os transdutores nunca deve ser 90°. Os transdutores podem avançar para o duto ou estarem retraídos dentro da parede do conduto. As Fig. 19a à 19d ilustram arranjos típicos de transdutores.

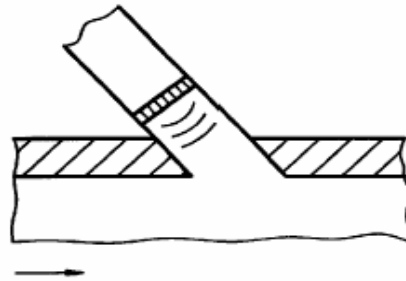


Figura 19a — Transdutor em contato com o fluido (retraído)

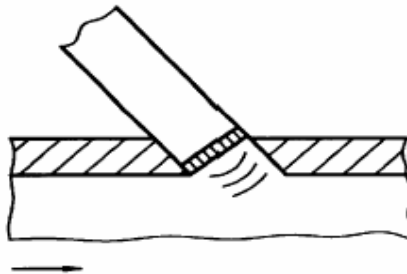


Figura 19b — transdutor em contato com o fluido (faceado)

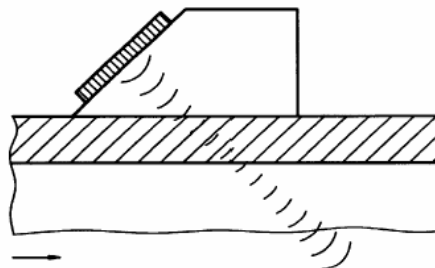


Figura 19c — transdutor montado do lado externo do tubo (arranjo clamp-on)

¹ Arranjo “*clamp-on*” é aplicável somente para medições de líquidos.

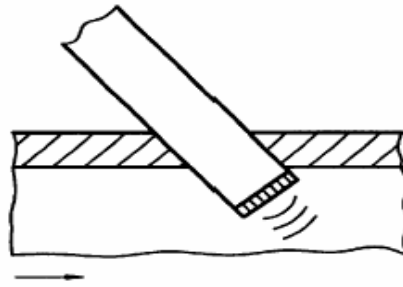


Figura 19d — transdutor intrusivo no fluxo

2.1.4.1 Arranjo de trajetória única

A transmissão acústica entre os transdutores também pode ser direta ou indireta. O uso da parede interna do tubo como refletor (ver Fig. 19a, 19b e 19c) ajuda a aumentar o comprimento da trajetória acústica, o que implica em que os transdutores podem ser montados tanto no mesmo “lado” como em “lados opostos” do tubo (ver Fig. 19a, 19b e 19c).

Em um medidor de trajetória única com transmissão direta, os transdutores podem ser posicionados ao longo de um diâmetro inclinado ou uma corda inclinada (ver Fig. 19d e 19e). Para dutos menores, os transdutores podem ser montados axialmente como mostrado na Fig. 27f. As Fig. 20a à 20f ilustram arranjos de trajetória única.

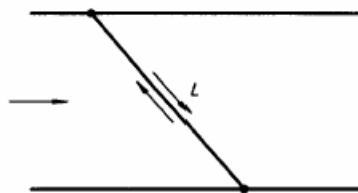


Figura 20a — Transmissão direta

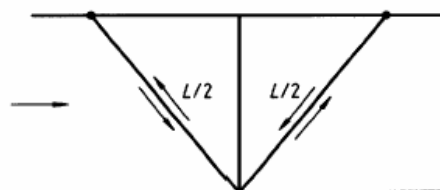


Figura 20b — Transmissão indireta (refletida na parede do tubo: trajetória em “V”)

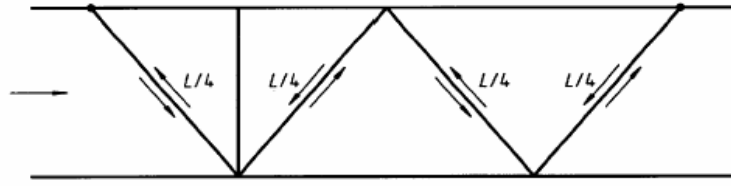


Figura 20c — Transmissão indireta (refletida na parede do tubo: trajetória em “W”)



Figura 20d — Diâmetro inclinado



Figura 20e — Corda inclinada

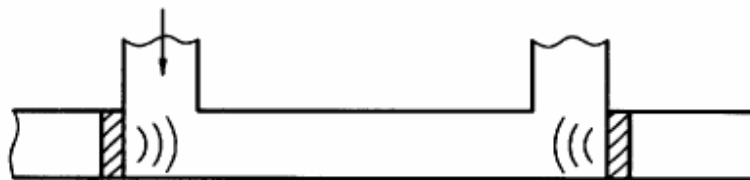


Figura 20f — Transdutores montados axialmente

2.1.4.2

Cálculo da vazão usando trajetória simples

De acordo com [14], a velocidade média do fluido medida ao longo da trajetória acústica é dada pela Eq. 16, e a vazão volumétrica é dada pela Eq. 31. Combinando ambas para um duto de diâmetro interno D , com $A = \pi D^2 / 4$, teremos:

$$q_v = k_h \frac{\pi}{4} D^2 \frac{L^2}{2d} \frac{\Delta t}{t_1 \cdot t_2} \quad (4)$$

onde, q_v é a vazão volumétrica; k_h = fator de correção da distribuição de velocidade; D = diâmetro da seção de medição; L = comprimento de influência; d = distância de influência; $\Delta t = t_1 - t_2$; t_1 = tempo de trânsito no sentido de fluxo; t_2 = tempo de trânsito no sentido contrário ao fluxo.

2.1.4.3

Arranjo de trajetória múltipla

Um medidor de trajetórias múltiplas baseia-se normalmente na transmissão direta ao longo de duas ou mais cordas ou diâmetros inclinados. Os transdutores podem ser arranjados de muitas maneiras diferentes de forma a minimizar a sensibilidade ao turbilhonamento e outros distúrbios no perfil de velocidades do escoamento. Exemplos de arranjos de trajetória múltipla são mostrados nas Fig. 21a à 21d e incluem:

- Arranjos de plano único
- Arranjos cruzados simétricos
- Arranjos cruzados assimétricos
- Arranjo em pares casados

Os arranjos cruzados facilitam o arranjo mecânico em configurações que empreguem um grande número de trajetórias.

Um medidor de trajetórias múltiplas pode também se basear em uma rede de trajetórias acústicas espaçadas.

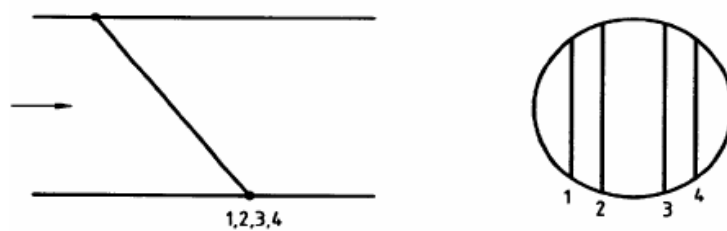


Figura 21a — Plano único

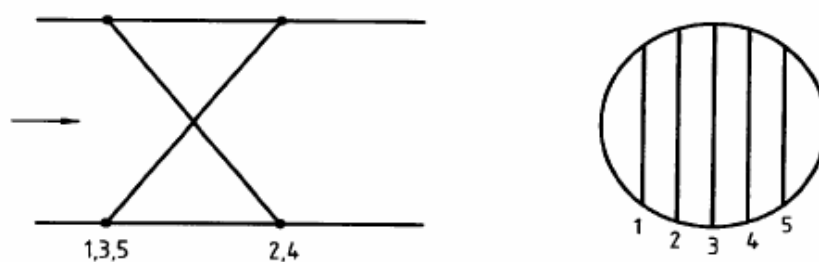
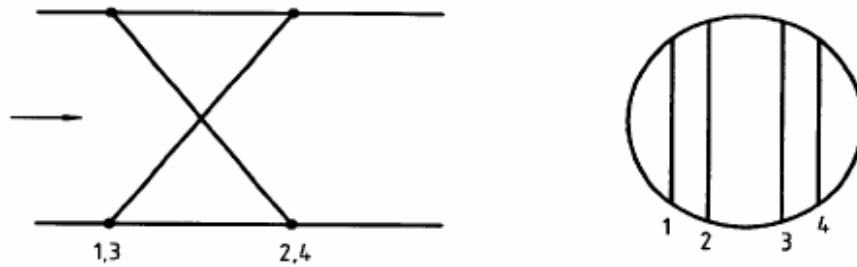
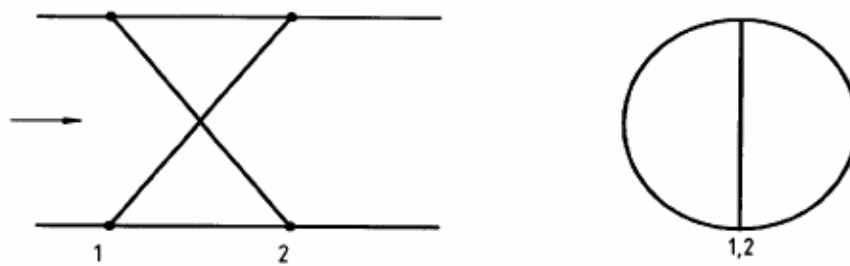


Figura 21b — Cruzado simétrico

**Figura 21c** — Cruzado assimétrico**Figura 21d** — Par casado

2.1.4.4

Cálculo da vazão usando trajetórias múltiplas

A vazão volumétrica pode ser obtida pela medição em várias trajetórias, pela integração aproximada, dada pela Eq. 23 com a Eq. 16, onde teremos:

$$q_v = \frac{\pi}{4} D^2 \sum_{i=1}^n w_i \frac{L_i^2}{2d_i} x \frac{\Delta t}{t_{1i} t_{2i}} \quad (5)$$

2.2

Medição ultra-sônica de vazão pelo método de tempo de trânsito

A medição de líquidos por meio de medidores ultra-sônicos pela técnica de tempo de trânsito tem aumentado ao longo dos anos a sua aplicação, tanto na distribuição de derivados do petróleo e gás natural, como na indústria de petróleo cru, principalmente devido aos aspectos das quais este tipo de tecnologia oferece vantagens, como por exemplo, a ausência de partes móveis em contato com o fluido. Podem ainda encontrar aplicação em outros fins desde que observadas as recomendações dos fabricantes e normas de referência.

2.2.1

Princípio de medição ultra-sônica por tempo de trânsito

Conforme descrito em [13] os medidores ultra-sônicos do tipo tempo de trânsito utilizam transdutores acústicos que podem enviar e receber pulsos acústicos de alta frequência. Os transdutores acústicos estão localizados de tal maneira que a geração de pulsos acústicos viaja diagonalmente através da tubulação. A medição é baseada no fato de que o pulso acústico que viaja diagonalmente através do tubo no sentido do fluxo leva menos tempo que o pulso acústico que viaja no sentido oposto ao fluxo. A vazão volumétrica está demonstrada na Eq. 4. A diferença de tempo entre os dois pulsos acústicos é proporcional à velocidade média ao longo do caminho acústico, como mostra a Fig. 22. Na Eq. 4 pode-se verificar as grandezas representadas na Fig. 22.

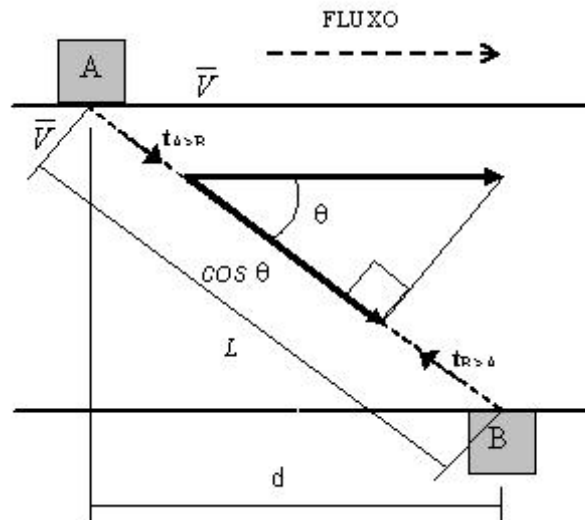


Figura 22 — Medição ultra-sônica pelo método de tempo de trânsito

O tempo de trânsito no sentido de fluxo (posição A para posição B, conforme Fig. 22) é dado por:

$$t_{A>B} = \frac{L}{c + \bar{V} \cos \theta} \quad (6)$$

onde “c” é a velocidade do som no líquido; L é o comprimento da trajetória acústica; $\bar{V}$ é a velocidade média na seção do tubo.

O tempo de trânsito no sentido contrário ao de fluxo (posição B para posição A, conforme Fig. 22) é dado por:

$$t_{B>A} = \frac{L}{c - \bar{V} \cos \theta} \quad (7)$$

onde “c” é a velocidade do som no líquido

Das Eq. 6 e 7 obtemos a Eq. 8, para a velocidade média $\bar{V}$, determinada pela expressão:

$$\bar{V} = \frac{L}{2 \cos \theta} \times \frac{t_{B>A} - t_{A>B}}{t_{A>B} - t_{B>A}} \quad (8)$$

Os medidores multi-trajetória empregam transdutores molhados, que são acondicionados em estojos na parede da tubulação. Os transdutores são considerados molhados desde que eles entram em contato com o fluido que está sendo medido, embora o elemento ativo seja usualmente encapsulado numa caixa metálica. Existem dois tipos principais de medidores multi-trajetória:

- a O tipo feixes paralelos, mostrado na Fig. 23, utiliza técnicas de integração numérica (exemplo: método de integração de Gauss)² para localizar as trajetórias e dar peso a cada velocidade de trajetória.

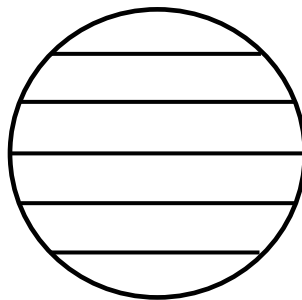


Figura 23 — Configuração do tipo feixes paralelos

- b O tipo feixe matricial, feito de trajetórias radiais (igual ao raio da tubulação) e diametrais (igual ao diâmetro da tubulação) — ver Fig. 24, emprega redes de trajetórias acústicas refletidas. Estas redes de trajetórias acústicas dão informações adicionais sobre as velocidades e distorções no escoamento. A velocidade média axial do fluido, e, portanto, a vazão volumétrica, é processada pela combinação das diferentes informações recebidas pelas diferentes trajetórias.

² No documento [14] relacionado na bibliografia pode-se encontrar a aplicação deste método.

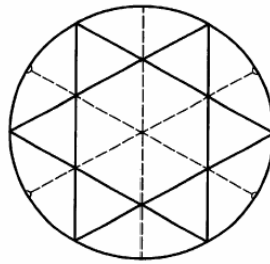


Figura 24 — Configuração matricial de trajetórias acústicas

2.2.1.1

Medidor de vazão ultra-sônico — definição

É um medidor de vazão que gera sinais ultra-sônicos e os recebe depois deles terem sido afetados pelo escoamento, de modo que o resultado observado pode ser usado como uma medida de vazão.

Um medidor de vazão ultra-sônico consiste de transdutores ultra-sônicos e equipamentos que avaliam a medição de vazão dos sinais ultra-sônicos emitidos e recebidos e converte estes sinais para um sinal de saída padrão proporcional a vazão.

2.2.1.2

Totalizador de vazão — definição

É um dispositivo para medição de volume por meio da integração temporal da vazão volumétrica.

2.2.2

Método da diferença de tempo de trânsito

Em [14] define-se como sendo o método de medição de vazão no qual a velocidade média³ ($\bar{V}$) do fluido ao longo da trajetória acústica⁴ é determinada pela diferença do tempo de trânsito de dois sinais ultra-sônicos, propagando-se a montante e a jusante cobrindo a mesma distância no fluido em escoamento.

³ A velocidade média $\bar{V} = V_m$

⁴ Trajetória acústica= trajetória real do sinal ultra-sônico entre os transdutores.

2.2.2.1**Método do tempo de trânsito direto**

A velocidade de propagação (c) será a soma da velocidade do som (c_o) e a componente ($\bar{V} \cdot \cos \phi$) da velocidade do fluido na direção da trajetória acústica (ver Fig. 22).

$$c = c_o \pm \bar{V} \cdot \cos \phi \quad (9)$$

Se os transdutores ultra-sônicos são montados dentro do tubo de medição e faceando com a parede interna do mesmo, sinais ultra-sônicos podem se propagar a montante e a jusante no fluido em escoamento. Os tempos de trânsito dos pulsos ultra-sônicos a jusante e a montante no escoamento do fluido são dados por:

$$t_1 = \frac{L}{c_o - \bar{V} \cdot \cos \phi} \quad (10)$$

$$t_2 = \frac{L}{c_o + \bar{V} \cdot \cos \phi} \quad (11)$$

$$\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} = \frac{2 \cdot \bar{V} \cdot \cos \phi}{L} \quad (12)$$

onde,

$$\cos \phi = \frac{d}{L} \quad (13)$$

$$\bar{V} = \frac{L^2}{2d} \cdot \frac{\Delta t}{t_1 \cdot t_2} \quad (14)$$

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (15)$$

Se os transdutores estão afastados da parede do tubo, o comprimento de influência (L) é substituído pelo comprimento da trajetória (L_p). Os tempos de trânsito (t_1) e (t_2) são definidos como os sinais dos tempos de trânsito ao longo de L_p .

$$\bar{V} = \frac{L_p^2}{2d} \cdot \frac{\Delta t}{t_1 \cdot t_2} \quad (16)$$

A Eq. 16 compensa diretamente o tempo no qual o sinal percorre nos alojamentos dos transdutores, considerando-se que a velocidade do som no fluido estacionário retido nos alojamentos é a mesma que no fluido em escoamento.

As equações 18, 13 e 12 são apropriadas para montagem do transdutor em contato com o fluido e faceando a parede interna do tubo (não retraídos). Para transdutores retraídos, L tem que ser substituído por L_p (ver Eq. 23).

2.2.2.2

Método da Frequência de repetição do pulso (“Sing-around”)

Ao invés dos tempos de trânsito direto $\{t_1\}$ e $\{t_2\}$ como acima, no caso do método da frequência de repetição de pulsos, duas frequências $\{f_1\}$ e $\{f_2\}$ são medidas. Estas ocorrem quando um pulso ultra-sônico atinge o receptor e dispara um novo sinal ao emissor.

$$f_2 - f_1 = \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} = \frac{\Delta t}{t_1 \cdot t_2} \quad (17)$$

Ao invés da Eq. 3, segue que:

$$\bar{V} = \frac{L^2}{2d} \cdot (f_2 - f_1) \quad (18)$$

2.2.2.3

Métodos de Deslocamento de Fase

Os métodos de deslocamento de fase podem ser do tipo:

2.2.2.3.1

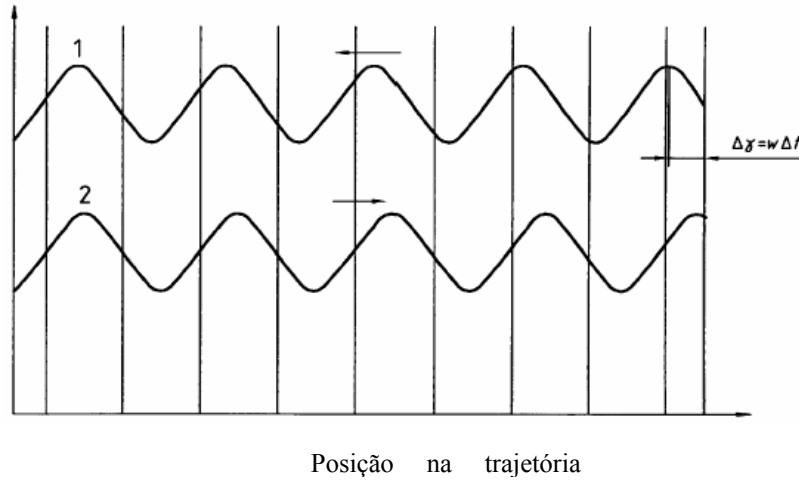
Método “Diferença de Fase”

Ao invés da medição direta do tempo de trânsito, os ângulos de fase γ_1 e γ_2 de dois sinais contínuos com frequência cíclica podem ser usados para determinar t_1 e t_2 (ver Fig. 24):

$$\omega = 2\pi f \quad (19)$$

$$\gamma_1 = \omega t_1 = 2\pi f t_1 \quad (20)$$

$$\gamma_2 = \omega t_2 = 2\pi f t_2 \quad (21)$$



1- Sinal a montante; 2 - Sinal a jusante

Figura 25 — Fases dos sinais ultra-sônicos a montante e a jusante

Das Eq. 23, 24 e 14 segue que:

$$\bar{V} = \frac{L^2 \pi \cdot f}{d} \cdot \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 \gamma_2} \quad (22)$$

2.2.2.3.2

Método “Controle de Fase”

A frequência constante $\{f\}$ pode ser substituída em ambas as direções por frequências variáveis $\{f_1\}$ e $\{f_2\}$. Através do controle de fase é possível ter sinais em ambas as direções com comprimento de onda constante e fases idênticas, onde $\{m\}$ é preferencialmente um inteiro.

Neste caso, os tempos de trânsito serão:

$$t_1 = \frac{m}{f_1} \quad t_2 = \frac{m}{f_2} \quad \frac{\Delta t}{t_1 \cdot t_2} = \frac{1}{m} (f_2 - f_1) \quad (23)$$

Ao invés da Eq. 2, segue que:

$$\bar{V} = \frac{L^2}{2md} (f_2 - f_1) \quad (24)$$

Desde que o “deslocamento de fase lambda” (*lambda-locked-loop*) ajusta $\lambda = L/m$, segue que:

$$\bar{V} = \frac{\lambda L}{2d} (f_2 - f_1) \quad (25)$$

A comprimento de onda λ depende da velocidade instantânea do som no fluido em repouso (c_o) bem como da velocidade do fluido. Mesmo se o “deslocamento de fase lambda” (*lambda-locked-loop*) for interrompido (ex. por perda de sinal ou mudança na direção de transmissão do sinal), a malha pode ser restabelecida com um número diferente de ciclos, por exemplo, com um valor de m diferente. O valor de m fornecido é o mesmo em ambas as direções de transmissão; λ pode ser determinado por $\lambda = \frac{c_o}{f}$ (26)

$$\text{onde } \bar{f} = \frac{f_1 + f_2}{2}. \quad (27)$$

Assim:

$$\bar{V} = \frac{c_o L}{2fd} \cdot (f_2 - f_1) \quad (28)$$

2.2.3

Cálculo da vazão volumétrica (q_v) utilizando arranjo de trajetórias diametrais

A vazão volumétrica q_v é determinada por:

$$q_v = A \cdot \bar{V}_a \quad (29)$$

No método de tempo de trânsito é determinada apenas a média das velocidades do fluido ao longo da trajetória acústica ($\bar{V}$).

Para se determinar a velocidade axial média do fluido ($\bar{V}_a$) através da seção transversal (A) e conseqüentemente a vazão volumétrica (q_v), um fator de correção da distribuição de velocidades (K_h) deve ser conhecido. O fator K_h é resultado do perfil de velocidades no tubo de medição e é dado por:

$$k_h = \frac{\bar{V}_a}{\bar{V}} \quad (30)$$

$$\text{Então substituindo teremos: } q_v = k_h \cdot A \cdot \bar{V} \quad (31)$$

O valor de k_h é função do número de Reynolds (Re_D) (ver Fig. 26) e pode ser calculado aproximadamente para um perfil de velocidade plenamente desenvolvido em um escoamento axi-simétrico sem movimento rotacional. O valor de k_h para um escoamento na transição laminar - turbulento é duvidoso, pois apenas conhecemos o valor de k_h para a condição de escoamento laminar e turbulento. Medidores com arranjos diametrais empregando correção de perfil dinâmico requerem que os valores de rugosidade da parede interna, diâmetro e viscosidade sejam assumidos de forma que o número de Reynolds (Re_D) e, conseqüentemente k_h , possam ser calculados baseados no valor de V medido⁵.

2.2.4

Cálculo da vazão volumétrica (qv) utilizando arranjo multi-trajetórias em planos paralelos

Quando $\bar{V}$ é medido em diferentes planos paralelos, usando-se um arranjo de trajetórias acústicas múltiplas, $\bar{V}_a$ pode ser avaliado usando-se técnicas de integração apropriadas sobre a área da seção transversal A . Por exemplo, um conjunto de tempos de trânsito (t_{1i}) e (t_{2i}), medidos a montante e a jusante em n planos paralelos, e calculando as velocidades resultantes $\bar{V}_i$ a vazão volumétrica pode ser calculada usando-se :

$$q_v = A \cdot \sum_{i=1}^n w_i \bar{V}_i \quad (32)$$

Onde, as velocidades V_i são calculadas nos planos i ($i=1$ até $i=n$) e w_i depende da técnica de integração utilizada.

⁵ V é a velocidade pontual do fluido em escoamento

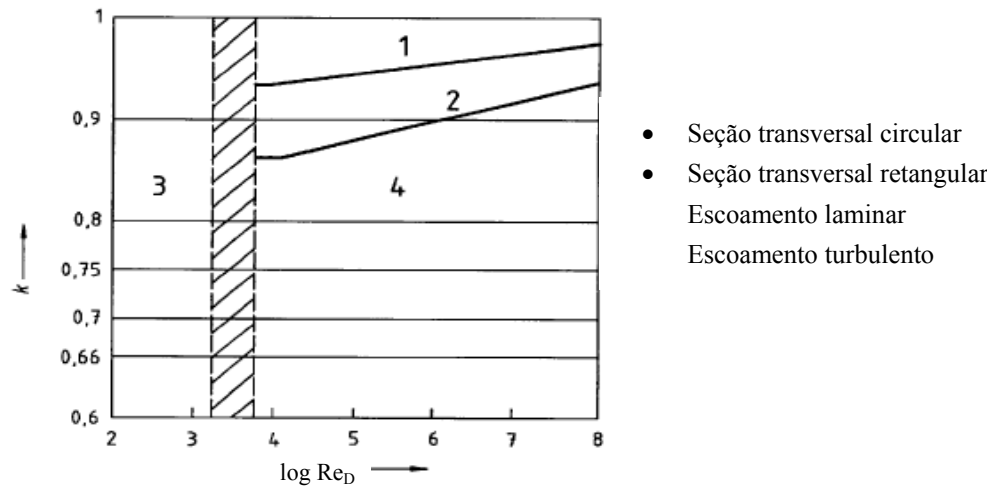


Figura 26 — Valor aproximado para kh em função de Re_D

Arranjos multi-trajetórias ajudam a reduzir os erros na estimativa da velocidade do escoamento devido ao perfil de velocidades.

2.3

Fatores que influenciam na exatidão e na repetitividade de medidores ultra-sônicos pelo método de tempo de trânsito

Para tratar dos fatores que afetam esta tecnologia de medição, estão listados abaixo alguns destes fatores, em conformidade com os documentos [14] e [13] deste trabalho:

- Perturbação do fluxo — causam erros na medição de $\bar{V}$ e no cálculo de $\bar{V}_a$;
- Falhas na detecção de sinal, que podem ser causadas por ruído elétrico, fluxo cruzado e vórtices, escoamento multifásico, depósito de contaminantes nos transdutores, gradientes extremos de densidade e ruídos gerados por equipamentos (válvulas de controle);
- Existência de componentes transversais ao escoamento;
- Escoamento pulsante;
- Instabilidade na vazão durante a corrida de calibração;
- O atraso na geração de pulso pelo medidor (*delay*);
- Não uniformidade na saída de pulsos do medidor;
- Volumes provados insuficientes para atender ao número de pulsos mínimo (10.000) recomendado em [12];
- Sistemas de calibração projetados tipicamente para medidores mecânicos, por exemplo, o deslocamento positivo (DP).

Com relação aos fatores relativos à detecção de sinal, encontra-se registrado em [14] que as medições de velocidade podem ser influenciadas consideravelmente caso os sinais acústicos se deteriore. Neste caso a detecção do sinal se torna dificultada, o que pode levar a erros na medição do tempo de trânsito e, portanto à redução na exatidão da medição. Pode-se ainda levar à inconsistência no reconhecimento do correto ponto de determinação do tempo (“*timing point*”) devido a variações na amplitude recebida, forma de onda distorcida ou ruído. Sinais deteriorados, entretanto, podem ser rejeitados por meio de testes de validação apropriados. Três fontes de deterioração de sinal podem ser encontradas: problemas elétricos, problemas induzidos pelo escoamento e problemas acústicos.

Geralmente, a melhor maneira de se identificar os problemas é por meio de auto-diagnóstico, dispositivos de auto-verificação e indicações de alarme. Problemas induzidos pelo fluxo são resolvidos pela cuidadosa localização do medidor e do controle das condições do fluido.

Os problemas com sinais acústicos são resolvidos obtendo-se uma alta relação sinal-ruído. Desta forma, o ruído randômico de fundo (elétrico, induzido pelo fluxo, acústico) será geralmente filtrado. O ruído autogerado pode ser mais difícil de ser detectado e pode não ser filtrado, causando assim erros na medição do tempo de trânsito.

2.4

Requisitos de instalação

Para assegurar a qualidade da medição ultra-sônica pelo método de tempo de trânsito são necessários alguns cuidados, conforme descrito no API MPMS 5.8 [13]. São eles:

- a) O trecho reto à montante do medidor deve, preferencialmente, estar provido de um retificador de fluxo, quando o seu comprimento for inferior a vinte diâmetros da tubulação (20 DN) e não inferior a dez diâmetros (10 DN);
- b) Para o trecho reto à jusante do medidor, o comprimento mínimo deve ser de cinco diâmetros (5 DN), para garantir o desempenho esperado;
- c) Os diâmetros internos dos trechos retos de medição devem ser o mesmo do medidor;
- d) Cuidados devem ser tomados quanto à instalação de válvulas que gerem pulsação excessiva no escoamento;

2.5

Sistemas de calibração

Apesar das normas e regulamentações recomendarem a calibração de medidores de vazão nas condições de operação, normalmente laboratórios são utilizados para a comprovação metrológica destes equipamentos. As recomendações encontradas em [14] alertam para as diferenças entre *meter factor*⁶ (*MF*), quando medidores são calibrados em laboratório em condições diferentes das condições de uso.

Em conformidade com [12], algumas recomendações para sistemas de calibração são apresentados a seguir.

Em linhas gerais a norma API MPMS 4.8 [12] trata de sistemas que utilizam para calibração, por exemplo, provadores do tipo tubo convencional, tanques provadores e medidores padrão. Também aborda os seguintes aspectos de cada sistema:

- a) Princípio de operação
- b) Descrição dos equipamentos utilizados
- c) Inspeção do sistema
- d) Procedimento de operação
- e) Avaliação dos resultados
- f) Problemas comuns na operação desses sistemas

Para os objetivos do presente trabalho, apenas os sistemas de calibração do tipo tanque provador e calibração com medidor padrão estão sendo apresentados.

2.5.1

Sistema Tanque provador

Um tanque provador (*tank prover*) é um vaso calibrado usado para medir o volume que passa por um medidor. O volume conhecido do tanque provador é comparado com o volume indicado pelo medidor para determinar a exatidão ou o fator de calibração do medidor (*meter factor*). Por isso são considerados sistemas de calibração direta.

⁶ O *MF* é o quociente entre o valor de referência e o valor indicado pelo medidor, obtido numa calibração e que deve ser utilizado como um multiplicador para correção dos valores indicados por um medidor.

Os tanques provadores podem ser do tipo aberto (opera com pressão atmosférica) e do tipo fechado. A Fig. 27 apresenta um tanque provador do tipo aberto e seus acessórios.

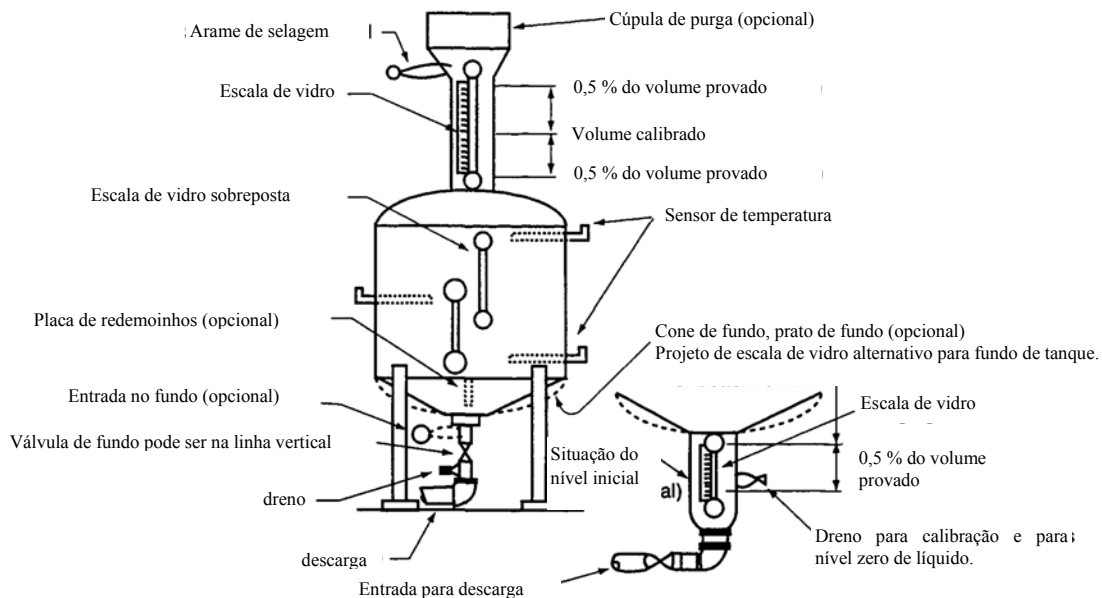


Figura 27 — Tanque provador do tipo aberto

Uma das características do sistema tanque provador é que a vazão de cada corrida inicia e termina em zero. Deste modo, o medidor sofre os efeitos de início e parada de fluxo.

Ainda segundo o API MPMS 4.8, é importante estabelecer procedimentos para que as corridas sejam feitas sem interrupção, para garantir a repetitividade entre as consecutivas corridas de calibração.

A vazão durante as corridas de calibração devem reproduzir as condições normais de operação, isto é, fluxo contínuo.

A repetitividade entre duas corridas deve ficar dentro de 0,05%.

2.5.2 Sistema com medidor padrão (master meter)

Um sistema de calibração que utiliza um medidor padrão (*master meter*) como referência é considerado um sistema indireto de comprovação metrológica. Este medidor padrão deve ser calibrado contra um sistema de comprovação direta, como por exemplo, um tanque provador.

A calibração por meio de medidores padrão podem aumentar a incerteza. Para minimizar os efeitos da transferência de incertezas devido a este método, uma calibração em linha nas condições de operação deve ser realizada.

Um medidor padrão deve ser selecionado com critérios metrológicos baseados em recomendações aplicáveis.

2.6

Considerações normativas sobre os sistemas de calibração

As normas API MPMS apresentam uma série de requisitos para seleção de sistemas de medição e calibração, que estão descritos nos subitens a seguir.

2.6.1

API MPMS 4.8 — System Prover-Operation of Proving Systems

Esta norma [12] descreve os requisitos gerais para sistemas de calibração, bem como os cuidados devem ser tomados para garantir uma avaliação metrológica confiável:

1º) uma calibração utilizando medidor padrão deve ocorrer dentro de uma faixa de 10% da vazão do medidor a ser calibrado;

2º) o método de início e final de corrida de calibração na condição de fluido em repouso (vazão zero) pode ser utilizado.

Seguindo ainda o recomendado em [12], uma breve inspeção deve ser realizada a fim de garantir que somente um líquido está passando pelos medidores e que não há vazamento no sistema.

A Repetitividade do *MF* (*Meter Factor*) deve seguir o seguinte critério de aceitação, de acordo com [12]: Repetitividade $\leq 0,05$ % entre valores de 5 corridas consecutivas.

$$\text{Repetitividade (\%)} = \frac{(\text{erro máximo} - \text{erro mínimo})}{\text{erro mínimo}} \times 100 \quad (33)$$

onde, o erro máximo e o erro mínimo representam os valores encontrados de erro relativo, conforme definição do Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM).

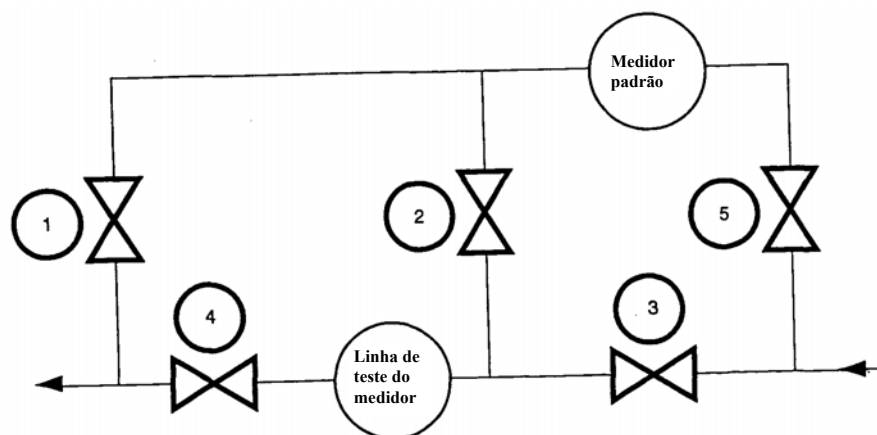
Sobre o regime de escoamento, pode-se considerar que do início ao final da corrida de calibração não pode haver qualquer tipo de interrupção ou retardo na geração de sinal (*delay*).

A vazão deve estar relativamente estabilizada por toda a corrida para se efetuar o cálculo do *MF* (*meter factor*).

No mínimo 10.000 pulsos devem ser coletados durante cada corrida de calibração.

O medidor padrão deve ser instalado o mais próximo possível do medidor a ser calibrado para minimizar as diferenças de temperatura e pressão.

A Fig. 28 apresenta um sistema de calibração típico utilizando um medidor padrão



Notas: 1, 2 e 3 — duplo bloqueio e alívio; 4 e 5 — válvula de bloqueio.

Figura 28 — Sistema típico com medidor padrão (master meter).

Na calibração com *master meter*, deve-se realizar cinco corridas de calibração consecutivas para determinar a repetitividade.

2.6.2

API MPMS 4.5 — System Prover — Master Meter Provers.

Esta recomendação normativa [11] trata de sistema de calibração utilizando medidor padrão.

Um sistema de calibração típico está demonstrado através da Fig. 28.

Neste documento está descrito também que a vazão pode variar, no máximo, em 10% da vazão esperada para cada corrida de calibração.

Na determinação do fator do medidor padrão os resultados entre as corridas subsequentes deve estar dentro de 0,02%.

Corridas utilizando medidor padrão do tipo deslocamento positivo (DP) devem coletar no mínimo 10000 pulsos.

Uma estimativa do desvio padrão entre as corridas são apresentadas na tabela 1, conforme item 7.4 do API MPMS 4.5.

Tabela 1 — Estimativa do desvio padrão para uma série de calibração

Nº de corridas de calibração	Estimativa do desvio padrão (%)
2	0,013
3	0,007
4	0,005
5	0,004

2.6.3

API MPMS 5.8 — Measurement of Liquid Hydrocarbons by Ultrasonic Flowmeters Using Transit Time Technology

Esta recomendação normativa [13] descreve os princípios de operação de medidores ultra-sônicos de líquido utilizando o método de tempo de trânsito.

Esta norma adverte os usuários desses medidores para as diferenças entre *meter factor (MF)* obtidos através de calibrações em laboratório e *MF* obtidos no local de operação.

Este capítulo do API descreve ainda as condições de verificação de desempenho para medidores ultra-sônicos pelo método de tempo de trânsito.

No Capítulo 3 são apresentados os Procedimentos Experimentais utilizados em cada laboratório, para desenvolvimento do presente estudo.