

2

Fundamentos Teóricos

2.1.

Medidor Ultrassônico de Tempo de Trânsito

Este item apresenta um levantamento de características dos medidores ultrassônicos de tempo de trânsito, que é o objeto desta pesquisa, com o objetivo de fundamentar as simulações e, também, identificar fatores de influência.

O medidor de tempo de trânsito mede a diferença entre o tempo que o pulso ultrassônico leva ao se propagar a favor do escoamento e o tempo ao se propagar contra o escoamento. Há, no mercado, medidores de vazão ultrassônicos com outros princípios de operação¹.

A maioria dos medidores ultrassônicos para a indústria do petróleo é do tipo tempo de trânsito. Devido a sua robustez e exatidão, estão ocupando mais espaços a cada ano. Podem ser utilizados na medição fiscal e de transferência de custódia, pois seguem a exigência de erro máximo admissível de 0,2% da OIML R-117 (2007) na medição de vazão de líquidos, e de 0,5% da OIML R-137 (2006) na medição de vazão de gás natural.

Medidores Doppler aparecem na indústria como uma opção quando há partículas ou bolhas de gás em suspensão no líquido. Outros tipos de medidores ultrassônicos não são usuais na indústria do petróleo.

2.1.1.

Princípio de Medição

Os medidores ultrassônicos de tempo de trânsito dispõem de transdutores com cristais piezelétricos que enviam e recebem pulsos acústicos de alta frequência, transversalmente à tubulação. O pulso que segue na direção do

¹ O medidor ultrassônico Doppler mede a variação na frequência de um sinal ultrassônico que é refletido por partículas em suspensão ou bolhas de gás. O medidor de vórtices ultrassônico gera vórtices no escoamento e mede, com tecnologia ultrassônica, o tempo de propagação do vórtice entre os sensores. O medidor ultrassônico de correlação cruzada mede, com tecnologia ultrassônica, o tempo de propagação entre dois sensores de um padrão no escoamento e, no processamento de sinal, utiliza correção cruzada (Vaterlaus et al., 1999).

escoamento (na Figura 2-1, de T1 para T2) percorre a distância entre os transdutores em um intervalo de tempo menor do que o pulso que segue na direção oposta (de T2 para T1). A diferença entre os tempos de propagação será proporcional à velocidade média dos elementos presentes na trajetória, no tempo em que o pulso cruzar a tubulação.

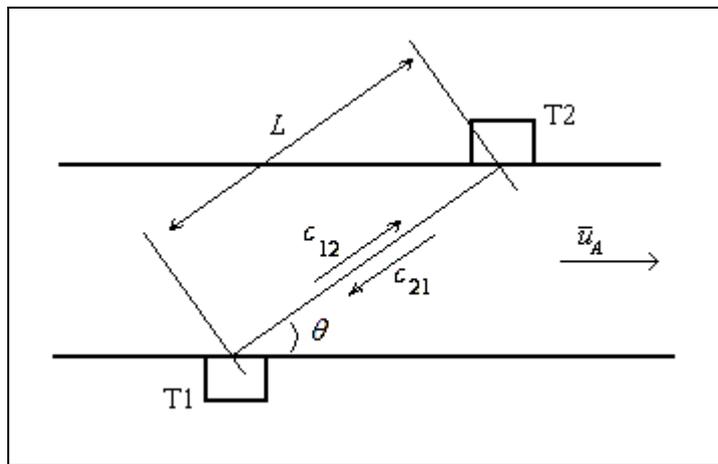


Figura 2-1: Esquema de um medidor ultrassônico de tempo de trânsito.

São definidos os seguintes parâmetros: a distância entre os transdutores (L); o ângulo de inclinação (θ); a velocidade do som no fluido (c_0); a velocidade de propagação do pulso ultrassônico na direção do escoamento (c_{12}) e na direção contrária (c_{21}); e os tempos de propagação do pulso ultrassônico, na direção do escoamento (t_{12}) e na direção contrária (t_{21}). Para escoamento completamente desenvolvido, o cálculo da velocidade média do fluido na trajetória (\bar{u}_T) considera apenas a componente axial de velocidade:

$$c_{12} = \frac{L}{t_{12}} = c_0 + \bar{u}_T \cos \theta \quad (2-1)$$

$$c_{21} = \frac{L}{t_{21}} = c_0 - \bar{u}_T \cos \theta \quad (2-2)$$

$$t_{12} = \frac{L}{c_0 + \bar{u}_T \cos \theta} \quad (2-3)$$

$$t_{21} = \frac{L}{c_0 - \bar{u}_T \cos \theta} \quad (2-4)$$

$$\bar{u}_T = \frac{L}{2 \cos \theta} \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} t_{21}} \quad (2-5)$$

Mas \bar{u}_T não é, necessariamente, igual à velocidade média na seção transversal (\bar{u}_A). Para chegar à \bar{u}_A , são utilizados fatores de correção. Alguns medidores conseguem avaliar, a partir de \bar{u}_T e de propriedades do fluido, se o escoamento é laminar, turbulento ou de transição e, com base em processamentos específicos de cada fabricante, calcula \bar{u}_A . Para obter maior exatidão, é recomendável que o medidor seja calibrado nas condições de operação.

É usual escrever a equação de \bar{u}_T em função da diferença entre os tempos de propagação (Δt):

$$\Delta t = t_{21} - t_{12} \quad (2-6)$$

$$\bar{u}_T = \frac{L}{2 \cos \theta} \frac{\Delta t}{t_{12} t_{21}} \quad (2-7)$$

A velocidade do som (c_0) pode ser determinada em função de t_{12} e t_{21} e independe de \bar{u}_T :

$$c_0 = \frac{L}{2} \frac{t_{12} + t_{21}}{t_{12} t_{21}} \quad (2-8)$$

O medidor ultrassônico de tempo de trânsito é constituído basicamente de pares de transdutores. Cada par de transdutores forma um canal acústico. Menores incertezas de medição são obtidas com medidores com mais de um canal de acústico. Nesse caso, são denominados de medidores multicanais, em oposição aos medidores monocanais.

2.1.2.

Construção do Medidor de Tempo de Trânsito

O medidor de vazão ultrassônico inclui um ou mais pares de transdutores, o trecho de medição e uma unidade de processamento que responsável pela geração e recebimento do pulso ultrassônico, sincronismo, contagem de pulsos, processamento e preparação do sinal de saída (digital, de pulsos ou analógico).

Os transdutores dos medidores ultrassônicos são fixados no duto de forma que o pulso ultrassônico trafegue com uma inclinação que permita a medição da diferença de tempo de trânsito.

Em função da fixação do medidor na linha, são identificados dois tipos de medidores ultrassônicos: o medidor tipo *clamp-on* ou medidor de abraçadeira (cujos transdutores são fixados externamente, podendo o duto estar inclusive em

operação durante sua instalação) e o medidor tipo carretel (cujos transdutores fazem parte de uma estrutura fixa, montada em um trecho de duto com flanges).

A montagem dos medidores *clamp-on* no duto é simples e de baixo custo, enquanto que os medidores de carretel exigem a despressurização do duto e interrupção da operação para a sua instalação.

Em 2008, 60% dos medidores ultrassônicos vendidos no mundo eram de carretel e 30% *clamp-on*² (Yoder, 2009).

A Figura 2-2 mostra o posicionamento do transdutor do medidor *clamp-on* e a Figura 2-3 indica a trajetória do pulso ultrassônico. Ao atravessar a parede do duto, o sinal ultrassônico sofre refração (ISO 12765, 1998).

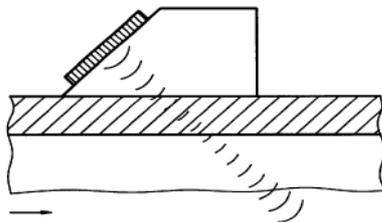


Figura 2-2: Posicionamento externo ao duto de transdutor de medidor ultrassônico do tipo *clamp-on* (ISO 12765).

Na instalação do *clamp-on*, os transdutores podem ser posicionados do mesmo lado da tubulação ou em lados opostos. Se estiverem do mesmo lado, o pulso ultrassônico passa por uma reflexão na superfície interna do duto.

Como mostra a Figura 2-4, os medidores de carretel podem ter seus transdutores retraídos, intrusivos ou faceando a parede interna do duto. O transdutor retraído apresenta uma cavidade que protege o transdutor, mas favorece o acúmulo de material.

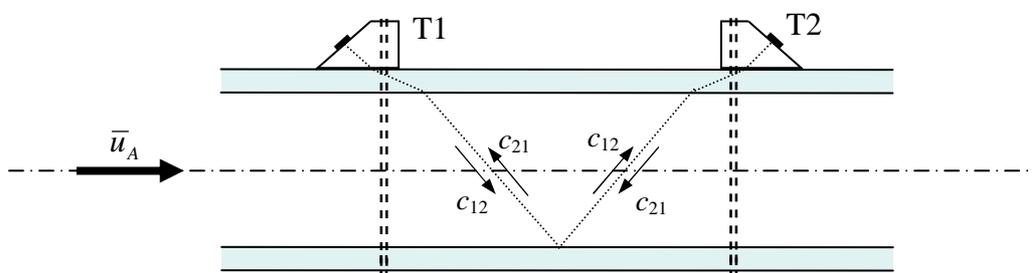
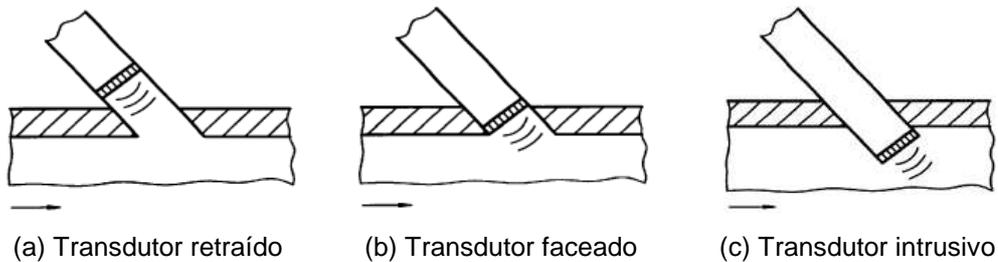


Figura 2-3: Posicionamento dos transdutores (T1 e T2), com abraçadeiras e trajetória com refração e reflexão (medidor *clamp-on*).

² Os 10% restantes são medidores ultrassônicos de inserção que podem ser instalados com o duto em operação, mas não são tão portáteis como o *clamp-on*, pois exigem a perfuração da tubulação.



(a) Transdutor retraído (b) Transdutor faceado (c) Transdutor intrusivo
 Figura 2-4: Posicionamento de transdutores em medidor de carretel (ISO 12765).

Os medidores de carretel, com os transdutores fixos, podem ser calibrados em laboratório, ter rastreabilidade e obter aprovação de modelo pelo Inmetro, e são mais robustos do que os medidores *clamp-on*.

O sensor do medidor de carretel pode estar em contato com o fluido ou estar isolado por uma placa metálica. Esse isolamento proporciona maior segurança e facilidade na remoção, instalação e manutenção dos transdutores. Entretanto, quando o casamento da impedância acústica entre o fluido e a superfície do sensor não for favorável, o contato direto do sensor com o fluido minimiza a perda na potência do sinal e melhora a relação sinal-ruído.

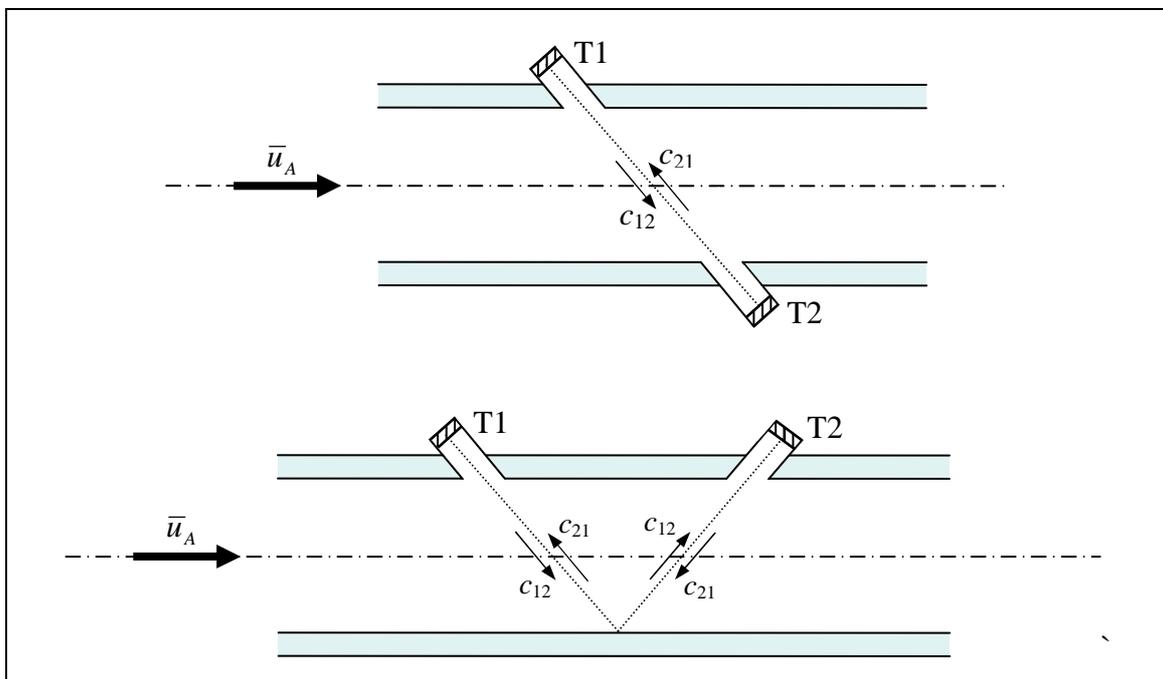


Figura 2-5: Trajetória direta (acima) e com reflexão (abaixo) de medidor ultrassônico de carretel.

Os medidores de carretel podem apresentar um arranjo com os transdutores posicionados na tubulação de forma que o pulso siga diretamente de

um transdutor ao outro, ou que o pulso seja refletido na parede interna da tubulação, como apresentado na Figura 2-5.

2.1.3.

Propagação da Onda Ultrassônica

O medidor de vazão ultrassônico determina a velocidade média do fluido com base na propagação de um sinal ultrassônico no fluido em movimento.

A Figura 2-6 apresenta o desenho de um transdutor de medidor ultrassônico com indicação da posição do cristal piezoeletrico e o desenho do corpo do medidor, com os cabos dos transdutores à unidade de processamento.

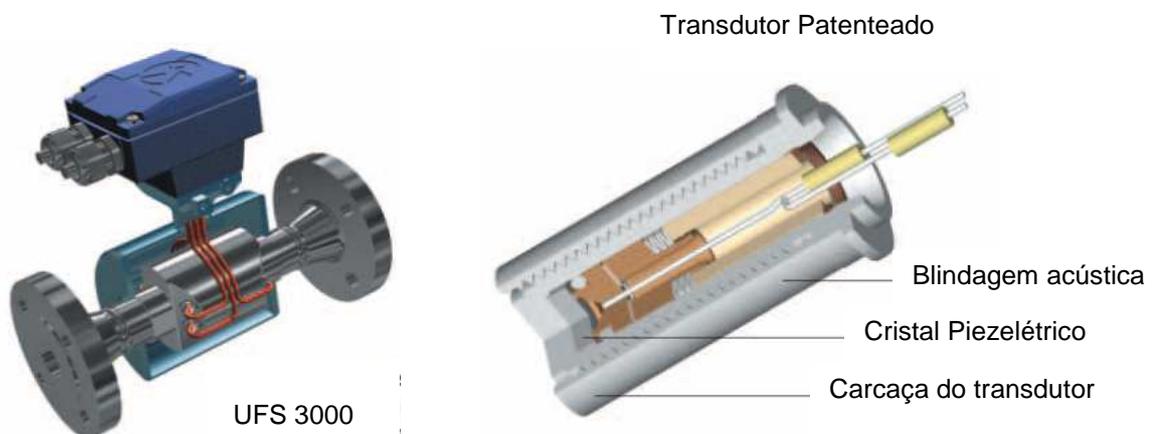


Figura 2-6: Medidor ultrassônico de 3 canais: (esquerda) posição dos transdutores; e (direita) transdutor (Krohne, 2005).

O diagrama de irradiação de um transmissor indica sua capacidade em concentrar energia numa determinada região do espaço. Quanto mais agudo for o ângulo do cone de propagação formado pelo lóbulo principal, mais estreito será o feixe, maior será a densidade de potência na direção de máxima irradiação, maior será a diretividade do transmissor e melhor será a relação sinal-ruído. A Figura 2-7 apresenta um diagrama de irradiação de um transdutor de medidores de tempo de trânsito.

O som é uma onda mecânica que se propaga em meios sólidos, líquidos ou gasosos e as ondas ultrassônicas são ondas sonoras com frequência acima de 20kHz. O período da onda (T) é o tempo que a onda gasta para percorrer uma distância igual ao comprimento de onda (λ). A frequência da onda (f) é o número de períodos de onda que passam por um determinado ponto em um segundo. A velocidade de propagação (c) corresponde a:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad (2-9)$$

A Figura 2-8 mostra, de forma simplificada, duas possibilidades de detecção do início do pulso: no cruzamento da linha de zero ou a partir de um limiar. No caso dos medidores ultrassônicos, o pulso chega ao transdutor-receptor com ruído e nem todos os pulsos são detectados. A porcentagem de pulsos detectados é calculada estatisticamente pelos fabricantes e, se for baixa, pode contribuir para a incerteza dos resultados. Um atraso na identificação do início da onda sonora também contribui para a incerteza de medição. A frequência do medidor ultrassônico fica na faixa de 1 a 8 MHz e, portanto, um erro em um período de onda corresponde a 1 a 8 μ s.

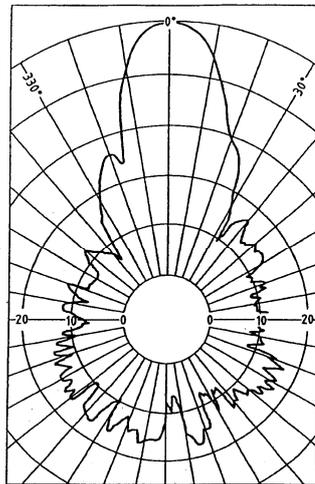


Figura 2-7: Diagrama de irradiação de transdutor ultrassônico com diâmetro externo de 2 cm e frequência de 162 kHz (ISO 12765).

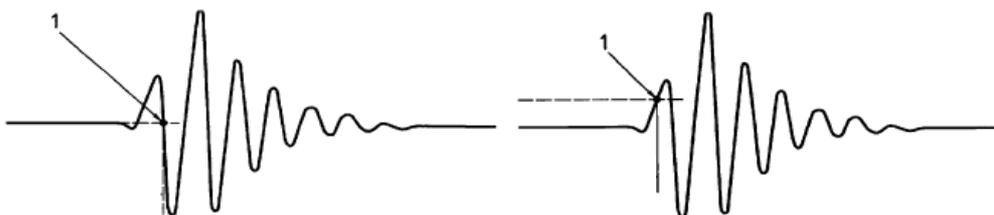


Figura 2-8: Esquema de um pulso ultrassônico. A posição "1" indica opções de pontos de marcação o início do pulso (ISO 12765).

A velocidade do som é função da densidade do meio e varia com a pressão e temperatura. No ar, a 20°C, é igual a aproximadamente 343 m/s e, na água, a 20°C, a velocidade do som é de, aproximadamente, 1495 m/s. A velocidade do som fica em torno de 400 m/s para o gás natural e 1250 m/s para o diesel. Os

medidores ultrassônicos de tempo de trânsito pressupõem que a densidade do fluido é constante no trecho de medição.

A equação geral para velocidade de propagação (c) de uma onda sonora, em meio gasoso, líquido ou sólido, para processo isentrópico é:

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} \quad (2-10)$$

onde, p = pressão; ρ = massa específica; e s = entropia.

Para líquidos, a eq. (2-10) usa o módulo de elasticidade (E_v):

$$E_v = \frac{dp}{(d\rho/\rho)} \quad (2-11)$$

$$c = \sqrt{E_v/\rho} \quad (2-12)$$

Para gás ideal, a eq. (2-10) pode ser simplificada e escrita em função da razão entre o calor específico a pressão constante e a temperatura constante ($\kappa = c_p/c_v$), constante universal dos gases (R) e temperatura (T):

$$c = \sqrt{\kappa RT} \quad (2-13)$$

A equação da velocidade de propagação do som em gases reais descrita na norma AGA 10, analisada e indicada por Savidge (2002), é:

$$c = \left[\frac{c_p}{c_v} \frac{RT}{M_r} \left(Z + \rho \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-14)$$

onde: M_r = massa molar; Z = fator de compressibilidade.

Savidge (2002) descreve também o processo de cálculo da velocidade do som adaptado para ser utilizado por medidores ultrassônicos em tempo real. Um diagnóstico utilizado para os medidores ultrassônicos é a comparação da velocidade do som medida com a velocidade do som calculada.

2.1.4.

Desvio do Pulso Ultrassônico

O medidor ultrassônico de tempo de trânsito foi apresentado no item 2.1.1 de forma simplificada, considerando que a trajetória do pulso ultrassônico é uma linha reta que liga as faces dos dois transdutores. Essa simplificação se baseia na diferença significativa entre a velocidade média do escoamento, que fica na faixa

de 0,5 a 10 m/s, e a velocidade do som, que com hidrocarbonetos fica entre 400 a 1500 m/s.

Em análise mais completa, a velocidade de propagação do pulso no fluido em movimento (\vec{c}) é descrita como a soma vetorial da velocidade de propagação do som (\vec{c}_0) e a velocidade do escoamento (\vec{u}):

$$\vec{c} = \vec{c}_0 + \vec{u} \quad (2-15)$$

A Figura 2-9 representa o pulso ultrassônico que em um dado instante t se propaga de T1 a T2. A velocidade do fluido é função da posição (x, y, z) e do tempo (t). Para facilitar a análise, são consideradas as hipóteses:

- Escoamento unidirecional: $u = u(x)$;
- Escoamento em regime permanente: $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$;
- Escoamento axialmente simétrico.

Então, o módulo de \vec{c} (c) é calculado pelo módulo de \vec{c}_0 (c_0), módulo de \vec{u} (u) e do ângulo de inclinação (θ), como mostra a Figura 2-10 e as equações abaixo (ISO 12765):

$$c = \left(c_0^2 - u^2 \sin^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}} + u \cos \theta \quad (2-16)$$

Utilizando a definição de número de Mach (Ma):

$$\text{Ma} = \frac{u}{c_0} \quad (2-17)$$

$$c = c_0 \left(1 - \text{Ma}^2 \sin^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}} + u \cos \theta \quad (2-18)$$

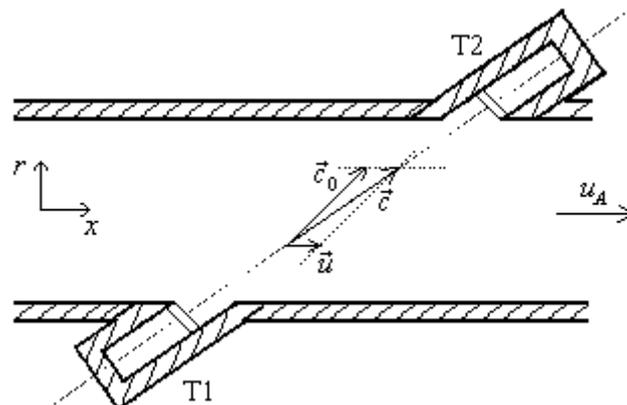


Figura 2-9: Esquema de um medidor ultrassônico de tempo de trânsito

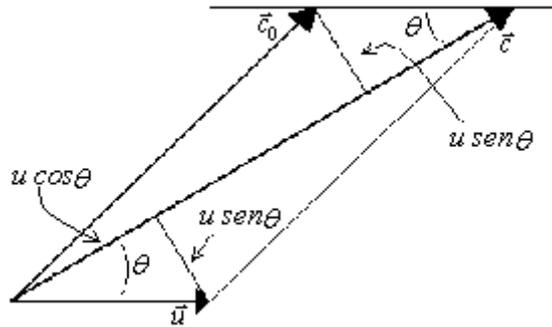


Figura 2-10: Esquema indicando o cálculo da velocidade de propagação do pulso ultrassônico no sentido do escoamento

No caso geral, o vetor \vec{u} varia em módulo ao longo da seção transversal, então \vec{c} varia em módulo e direção, e a trajetória percorrida pela onda sonora não será uma reta e o comprimento real da trajetória será maior do que a reta de comprimento L que aparece na Figura 2-1.

Se $u \ll c_0$, a eq. (2-18) para c pode ser simplificada:

$$c = c_0 + u \cos \theta \quad (2-19)$$

A direção do pulso também varia em função de u e c_0 . Se o número de Mach do escoamento não puder ser desprezado e a posição dos transdutores não for corrigida, a trajetória será desviada e o pulso não atingirá o outro transdutor, como indicado na Figura 2-11. O desvio do pulso ultrassônico é influenciado pela direção do escoamento e aumenta com a velocidade do fluido.

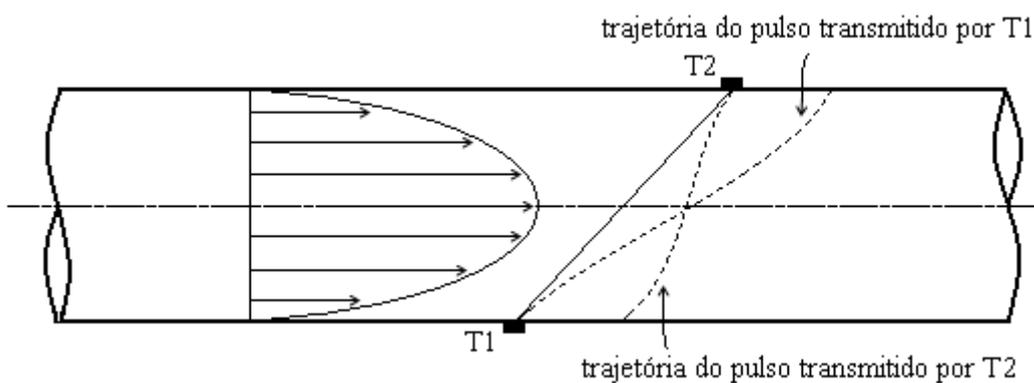


Figura 2-11: Representação do desvio do pulso ultrassônico devido ao próprio escoamento

Mylvaganam (1989), para minimizar o efeito do desvio nas trajetórias, introduz o conceito de ângulo de compensação (ϕ) que, como ilustrado na Figura 2-12, altera a inclinação de T1 e T2.

Com a utilização de ϕ , a inclinação dos transdutores com relação ao eixo do duto, não será mais igual a θ . O ângulo de abertura de T1 (θ_1) tem que garantir que o pulso que sai de T1 chegue a T2; e o ângulo de abertura de T2 (θ_2), garantir que o pulso que sai de T2 chegue a T1:

$$\theta_1 = \theta + \phi \quad (2-20)$$

$$\theta_2 = \theta - \phi \quad (2-21)$$

Mylvaganam (1989) utiliza o ângulo de compensação do desvio do pulso ultrassônico para orientação dos transdutores visando corrigir o problema do desvio do pulso em escoamentos com velocidade elevada, como ocorre com as medições de vazão no *flare*. O ângulo ϕ varia em função de Ma.

Butkus et al. (2004) apresentaram um estudo sobre a utilização de transdutores eletroacústicos com padrão de diretividade controlável em medidores ultrassônicos de tempo de trânsito para gás, visando melhorar a exatidão e aumentar a faixa desses medidores. Existe um comprometimento entre potência do sinal, largura do feixe ultrassônico e exatidão do medidor. Para melhorar a exatidão é necessário aumentar a potência transmitida e diminuir a largura do feixe; entretanto, para aumentar a faixa do medidor, é necessário aumentar a largura do feixe, o que leva a diminuir a potência transmitida. Em um medidor com diâmetro de 16 polegadas (0,4 m) em escoamento turbulento de ar e velocidade média de 60m/s, o ângulo de compensação de desvio (ϕ) chega a 9,13° e 7,50°, para θ igual a, respectivamente, 60° e 45°. Como a largura do feixe ultrassônico é de apenas $\pm 1,87^\circ$, concluíram que, para operar com faixa ampla (de 0,05 a 60 m/s), é necessário utilizar o transdutor com padrão de diretividade controlável.

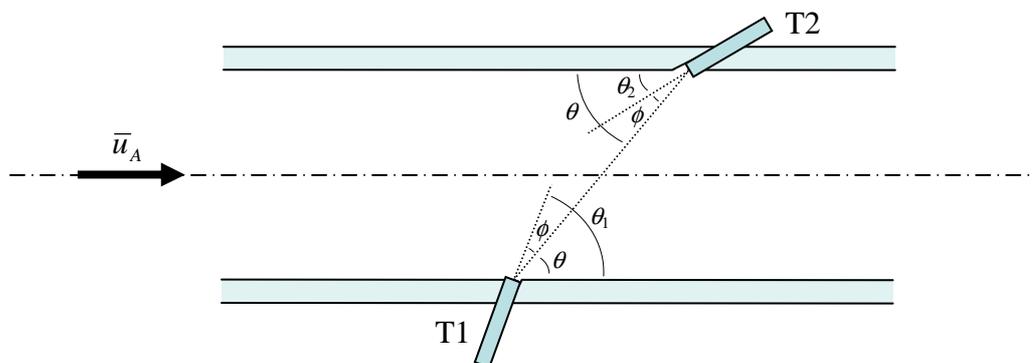


Figura 2-12: Ângulo de compensação (ϕ) e ângulos de abertura de T1 (θ_1) e T2 (θ_2).

2.1.5.

Cavidade do Transdutor

A Figura 2-13 mostra uma reta de comprimento L unindo os pontos centrais das faces dos transdutores. Comumente com os transdutores são retraídos, e L é maior do que a distância L_D que, como mostra a figura, é limitada pelo diâmetro interno do duto. A eq. (2-7), utilizada na descrição dos ultrassônicos, não considera essa distinção.

Quando $L > L_D$, a face do transdutor fica numa cavidade, na qual pode haver microturbulências, ou acúmulo de produto, ou contaminantes, o que também contribui para aumentar a incerteza de medição.

Se L_D passa pelo eixo do duto, a projeção de L_D na seção transversal do duto é igual a D (diâmetro do duto). No caso geral, em que $L > L_D$, a projeção da trajetória na seção transversal do duto será maior que D .

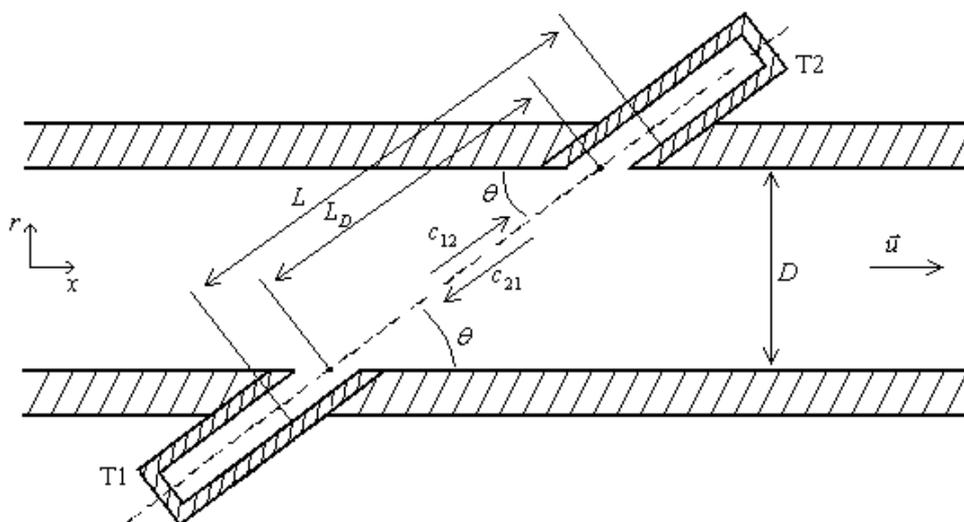


Figura 2-13: Diferença no comprimento da trajetória devido às cavidades dos transdutores.

2.1.6.

Medição do Tempo de Trânsito

A medição de tempo de trânsito pode ser realizada pela medição direta de tempo, medição de frequência e medição de diferença de fase (ISO 12765). A medição direta de tempo é o método mais utilizado pelos medidores ultrassônicos, pois apresenta melhor exatidão, com menor tempo de resposta e maior confiabilidade.

Pelo método direto, o pulso ultrassônico é transmitido alternadamente por T2 e por T1, são realizadas as medições de tempo de propagação (t_{21} e t_{12}), é calculada a diferença Δt e, a partir de Δt , é calculada a velocidade média na trajetória \bar{u}_T . A ordem de grandeza dos intervalos de tempo resultantes da diferença entre os tempos de propagação é pequena para os métodos usuais de medição de tempo. Apenas na década de 60, com a evolução da eletrônica, o medidor ultrassônico de tempo de trânsito conseguiu incerteza aceitável na indústria (Brassier, 2000).

A equação para a diferença de tempo de trânsito (Δt) é determinada a partir da eq. (2-6), eq. (2-3) e eq. (2-4):

$$\Delta t = \frac{2 L \bar{u}_T \cos \theta}{c_0^2 - \bar{u}_T^2 \cos^2 \theta} \quad (2-22)$$

Para $\bar{u}_T \ll c_0$:

$$\Delta t = \frac{2 L \bar{u}_T \cos \theta}{c_0^2} \quad (2-23)$$

A eq. (2-23) mostra que os intervalos de tempo serão menores para produtos com velocidade do som mais elevada. Nas medições de vazão de água, os intervalos de tempo serão menores do que na medição de vazão de ar. O intervalo será menor quando o escoamento estiver com velocidade mais baixa.

Na medição de vazão de água a 20°C ($c_0 \cong 1495$ m/s), com medidor de vazão ultrassônico ($D = 0,15$ m; e $\theta = 60^\circ$), se a velocidade média \bar{u}_T for igual a 1 m/s, o tempo de trânsito será da ordem de 100 μ s, e a diferença de tempo de trânsito (Δt) é da ordem de 67 ns. Uma resolução de 0,1% em Δt fica na faixa de 100 ps.

Na medição de tempo, a técnica usual toma como base de referência um oscilador de quartzo que tem frequência de oscilação (f_{osc}) igual a 64 MHz, o que leva à resolução de 15,6 ns na medição de tempo. Para melhorar a resolução de Δt , os medidores ultrassônicos utilizam a técnica de acumulação de pulsos, com três contadores e um oscilador (de 64 MHz), e inclui os seguintes passos:

- a) Os contadores são zerados;
- b) Quando T1 emite um pulso ultrassônico, o Contador 1 passa a contar oscilações de 64 MHz e, quando o pulso chega a T2, a contagem é interrompida;

- c) Quando T2 emite um pulso ultrassônico, o Contador 2 passa a contar oscilações de 64 MHz e, quando o pulso chega a T1, a contagem é interrompida;
- d) A cada emissão e recepção de pulsos, o Contador 3 é incrementado;
- e) As ações b, c e d acima são repetidas, sem zerar os contadores, por um período de tempo específico de cada modelo de medidor.

Desta forma, para o cálculo de Δt , o número de oscilações ocorridas com o pulso ultrassônico na direção do escoamento (N_1) é contabilizado pelo Contador 1; o número de oscilações ocorridas com o pulso ultrassônico na direção contrária ao escoamento (N_2), contabilizada pelo Contador 2; e o número de emissões e recepções do pulso ultrassônico (N_3), pelo Contador 3. São calculados t_{12} e t_{21} :

$$t_{12} = \frac{N_1}{N_3 f_{osc}} \quad (2-24)$$

$$t_{21} = \frac{N_2}{N_3 f_{osc}} \quad (2-25)$$

A resolução na medição de tempo de trânsito com um pulso é igual ao inverso da frequência de oscilação, e com a acumulação de pulsos será:

$$Res = \frac{1}{N_3 f_{osc}} \quad (2-26)$$

O tempo de cálculo de cada Δt (τ) é especificado pelo fabricante e fica em torno de 200 ms. Desta forma, o número de pulsos emitidos e recebidos (N_3) é função de τ , t_{12} e t_{21} :

$$N_3 = \frac{\tau}{t_{12} + t_{21}} \quad (2-27)$$

A partir da eq. (2-3) e eq. (2-4), e considerando que $\bar{u}_T \ll c_0$, soma dos tempos de propagação é calculada:

$$t_{12} + t_{21} = \frac{2L}{c_0} \quad (2-28)$$

E a resolução (Res) é determinada em função de parâmetros conhecidos:

$$Res = \frac{2L}{\tau c_0 f_{osc}} \quad (2-29)$$

A resolução da eq. (2-29) está em segundos. A resolução em percentual ($Res\%$) é obtida a partir da eq. (2-29) e da eq. (2-23):

$$Res\% = 100 \frac{Res}{\Delta t} = 100 \frac{c_0}{\tau f_{osc} \bar{u}_T \cos \theta} \quad (2-30)$$

Para $f_{osc} = 64$ MHz, $\theta = 60^\circ$, $c_0 = 1495$ m/s, $\tau = 0,2$ s e $\bar{u}_T = 0,5$ m/s, a eq. (2-30) indica resolução de 0,047%. Para o medidor apresentar erro máximo de 0,2%, como é o caso de medidores de transferência de custódia de hidrocarbonetos líquidos, a $Res\%$ não deverá ultrapassar 0,05%.

Pela eq. (2-30) os parâmetros que têm maior flexibilidade para melhorar a resolução são τ e \bar{u}_T . Mas o tempo τ não pode ser muito grande, pois impacta a frequência de atualização da informação de saída dos medidores. A resolução será maior quanto menor for a velocidade do escoamento.

Vaterlaus et al. (1999) descreveram o método de medição dos tempos de trânsito de um medidor ultrassônico com tempo de medição de 30 ms, diâmetro de 150 mm e tempo de propagação esperado de 116 μ s. A resolução na medição de tempo ficou em 60 ps, o que corresponde a uma resolução na medição de velocidade igual a 0,8 mm/s. Uma vez que a faixa de operação do medidor de 0,05 a 17 m/s, a resolução máxima (que ocorre na vazão mínima) será de 0,16%.

2.1.7.

Medidor Multicanal

2.1.7.1.

Descrição dos Multicanais

Os medidores ultrassônicos monocanais são muito sensíveis ao perfil de velocidade do escoamento. Os medidores ultrassônicos utilizados na medição de transferência de custódia e na medição fiscal são, necessariamente, multicanais. Também é usual a denominação: medidor monotrajetória e multitrajetória.

A trajetória faz referência ao caminho do pulso ultrassônico. Neste item, e nas simulações realizadas, a trajetória é representada por uma linha reta com início e fim na parede do duto, sem cavidades.

É usual rebater as trajetórias em uma seção transversal para análise do medidor. A trajetória que passa no eixo do duto aparecerá como um diâmetro. A Figura 2-14 mostra a projeção das trajetórias para os medidores de dois e três

canais. As duas trajetórias do medidor (a) e uma das trajetórias do medidor (c) cruzam o eixo.

As trajetórias são denominadas paralelas quando seu rebatimento na seção transversal gera linhas, como em (b) e (c) da Figura 2-14.

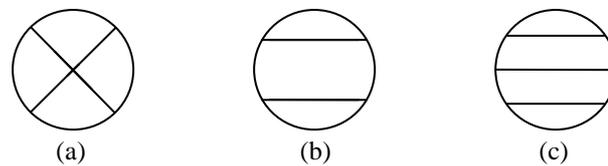


Figura 2-14: Rebatimento, na seção transversal, das trajetórias de medidores ultrassônicos com diferentes arranjos.

Alguns medidores apresentam as trajetórias em um único plano. O medidor da Figura 2-15 tem canais paralelos em um único plano. A figura à esquerda mostra o posicionamento dos transdutores e as cavidades geradas pela própria construção do medidor. A figura à direita apresenta uma vista externa do medidor.

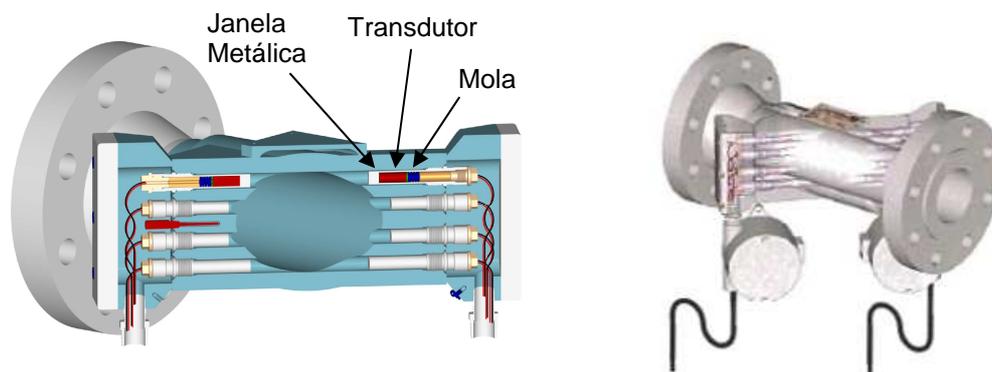


Figura 2-15: Medidor de 4 canais em plano único: (esquerda) posicionamento dos transdutores; (direita) vista externa (Caldon, 2007).

O esquema da Figura 2-16 mostra a posição relativa dos transdutores de um medidor ultrassônico de três canais. As trajetórias são paralelas e, se rebatidas na seção transversal seguem o desenho (c) da Figura 2-14. As trajetórias do medidor da Figura 2-16 não estão no mesmo plano: a trajetória central cruza o plano das outras trajetórias, formando um arranjo em planos cruzados. Um desenho desse medidor é apresentado na Figura 2-6.

O medidor da Figura 2-17 é um medidor de oito canais e os transdutores são posicionados em planos cruzados. Nesse medidor, além de as trajetórias estarem em planos cruzados, elas também se cruzam. Cada par de trajetórias que

se cruzam, denominadas trajetórias casadas, formam um par casado. Os medidores da Figura 2-15 e da Figura 2-16 não possuem trajetórias casadas.

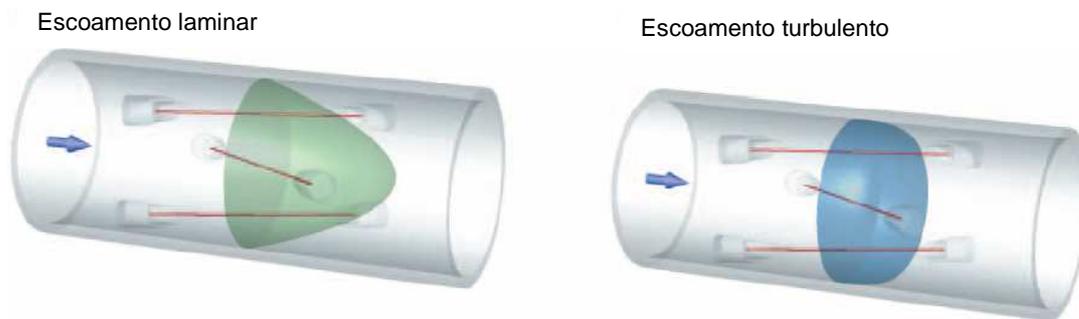


Figura 2-16: Posição relativa dos transdutores de medidor ultrassônico de 3 canais em arranjo com planos cruzados (Krohne, 2005).

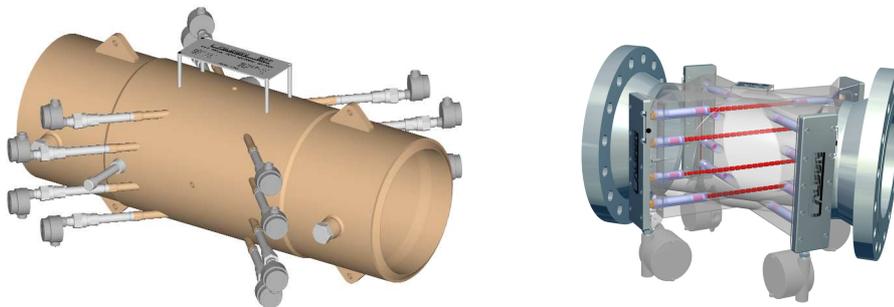


Figura 2-17: Medidor de 8 canais em planos cruzados: (esquerda) posição dos transdutores, (direita) canais em corte (Estrada et al., 2004).

Outros arranjos para medidores ultrassônicos aparecem na literatura, como o triângulo duplo ou a estrela de cinco pontas (Moore et al., 2000b) ou o arranjo assimétrico (Brown et al., 2006a).

A linha perpendicular ao eixo da tubulação, que passa pelo centro das trajetórias, como aparece na Figura 2-18, é uma referência usual na simulação e no cálculo do escoamento dos medidores com canais paralelos. Essa linha tem um diâmetro de comprimento, pertence ao plano da seção transversal da tubulação que passa pelo centro das trajetórias e, se o medidor tem planos cruzados, ela é a interseção desses planos.

O medidor multicanal é menos sensível a perfis assimétricos e vórtices, pois cobre uma maior porção da seção transversal e agrega mais informações. Entretanto, o número de diferenças de tempo de trânsito calculado pelo medidor independe do número de canais do medidor, pois devido à interferência que um canal gera no outro, enquanto um canal está transmitindo e recebendo pulsos, os outros aguardam. O medidor ultrassônico trabalha com varredura, ou seja, um

canal opera de cada vez, seguindo uma ordem própria e após ter sido calculada a diferença de tempo de trânsito do último canal, a operação retorna ao primeiro. A interferência entre canais é denominada *crosstalk*, e pode ser transmitida pelo fluido, pelo corpo do medidor ou pela parede da tubulação (Hogendoorn et al., 2009).

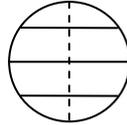


Figura 2-18: Esquema de medidor ultrassônico com indicação da linha de centro.

2.1.7.2.

Equação da Velocidade para Medidor com Canais Paralelos

Para calcular a velocidade média dos medidores ultrassônicos com canais paralelos, o método de integração mais utilizado é a integração de Gauss usando os polinômios de Legendre. A integração de uma variável $g(\eta)$ pelo método de Gauss-Legendre toma por base a seguinte igualdade:

$$\int_{-1}^1 g(\eta) d\eta = \sum_{j=1}^m (W_j g(\eta_j)) \quad (2-31)$$

onde, m é o número de raízes, η_j é a j -ésima raiz do polinômio e W_j é o peso da j -ésima raiz.

Para m de 1 a 5, os polinômios de Legendre são (Abramowitz, 1965):

$$P_1(\eta) = \eta \quad (2-32)$$

$$P_2(\eta) = \frac{1}{2}(3\eta^2 - 1) \quad (2-33)$$

$$P_3(\eta) = \frac{1}{2}(5\eta^3 - 3\eta) \quad (2-34)$$

$$P_4(\eta) = \frac{1}{8}(35\eta^4 - 30\eta^2 + 3) \quad (2-35)$$

$$P_5(\eta) = \frac{1}{8}(63\eta^5 - 70\eta^3 + 15\eta) \quad (2-36)$$

A função peso é calculada por:

$$W_j = \frac{2(1-\eta_j^2)}{25[P_{m-1}(\eta_j)]^2} \quad (2-37)$$

Os zeros e os pesos dos polinômios para m de 1 a 5 estão na Tabela 2-1.

Para aplicar Gauss-Legendre nos medidores ultrassônicos com canais paralelos, considera-se que a velocidade média na seção transversal (\bar{u}_A) pode ser calculada pela integral da velocidade de trajetórias ao longo da linha (de comprimento de um diâmetro) que passa pelo centro das trajetórias (Figura 2-18):

$$\bar{u}_A = \frac{1}{2R} \int_{-R}^R \bar{u}_T(r) dr \quad (2-38)$$

Para $\eta = r/R$:

$$\bar{u}_A = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \bar{u}_T(\eta) d\eta \quad (2-39)$$

Assim, por Gauss-Legendre:

$$\bar{u}_{GL} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (W_j \bar{u}_T(\eta_j)) \quad (2-40)$$

Tabela 2-1: Zeros e pesos dos polinômios de Legendre (Abramowitz, 1965).

m	η_j	W_j
2	+/-0,577350	1,000000
3	0,000000	0,888889
	+/-0,774597	0,555556
4	+/-0,339981	0,652145
	+/-0,861136	0,347855
5	0,000000	0,568889
	+/-0,538469	0,478629
	+/-0,906180	0,236927

Os medidores ultrassônicos podem seguir diferentes métodos de integração. Brown et al. (2009), por exemplo, apresentam um medidor ultrassônico de tempo de trânsito com canais paralelos que utiliza o método de integração de Gauss-Jacobi.

2.1.8.

Instalação e Calibração

A norma API 5.8 (2005) para medidores de vazão ultrassônicos de hidrocarbonetos líquidos e a norma AGA 9 para medidores de vazão ultrassônicos de gás natural incluem recomendações de instalação. São recomendações nos projetos da indústria e são exigidas em regulamentos da ANP e Inmetro e em contratos de venda de produtos.

Os sistemas de medição com medidores ultrassônicos têm de incluir trechos retos a montante e a jusante do medidor devido à sensibilidade do medidor aos perfis de escoamento.

A API 5.8 recomenda utilizar trecho reto a montante do medidor com comprimento igual ou maior que 10 DN (diâmetros nominais) e incluir condicionador de escoamento. Em instalações sem condicionador, o trecho reto a montante deve ser igual ou maior que 20 DN. Recomenda que o arranjo de instalação utilizado na calibração siga o arranjo da instalação de operação. O trecho reto a jusante deve ter comprimento de 5 DN e a tomada de pressão e o poço de temperatura devem ficar imediatamente após o trecho a jusante, como indicado na Tabela 2-2.

Tabela 2-2: Resumo das recomendações de instalação das normas API e AGA para sistemas de medição com medidores ultrassônicos.

Item de Instalação	API 5.8 (líquido)	AGA 9 (gás natural)
Trecho Reto a Montante	sem Cond.Esc.: 20 DN com Cond.Esc.: 10 DN	20 DN (com Cond.Esc.)
Trecho Reto a Jusante	5 DN	5 DN
Tomada de Pressão	imediatamente após o trecho reto a jusante	no corpo do medidor
Poço de Temperatura	imediatamente após o trecho reto a jusante	2 a 5 DN a jusante (unidirecional) 3 a 5 DN (bidirecional)

A AGA 9 recomenda comprimento de trecho reto a montante do medidor de, no mínimo, 20 DN e exige a utilização de condicionador de escoamento tipo placa perfurada a 10 DN do medidor. O trecho reto a jusante deve ter 5 DN. O poço de temperatura deve estar situado de 2 DN a 5 DN a jusante do medidor, para escoamento unidirecional. Para escoamento bidirecional, o poço deve estar distante do medidor de 3 DN a 5 DN. A tomada de pressão fica no corpo do medidor.

A utilização de trechos retos e condicionador de escoamento tem por objetivo garantir perfil de velocidade completamente desenvolvido no trecho de medição nas instalações de operação e nas instalações dos laboratórios de calibração. Assim, a incerteza de medição devido a diferenças entre a instalação de calibração e operação é minimizada.

Na indústria do petróleo, os sistemas de medição de líquidos, para apresentar erro máximo admissível de 0,3%, incluem a calibração no local de operação, tendo como referência medidor padrão, ou provador (volume padrão), ou dispendo de um conjunto de válvulas que permite a utilização de sistema de calibração móvel. As menores incertezas são obtidas utilizando provador como padrão. O volume do provador é determinado em função da resolução do medidor que, para medidores tipo turbina ou deslocamento positivo, está relacionado basicamente com o número de pulsos por unidade de volume, que é função do volume correspondente a uma rotação do rotor.

Os medidores ultrassônicos não têm partes móveis e sua resolução envolve a resolução na medição dos tempos, outras características específicas como processamento de sinais e relação sinal-ruído, e mesmo a configuração do fabricante e do usuário. Por não ter partes móveis, o medidor ultrassônico consegue um intervalo entre calibrações maior do que medidores tipo turbina ou deslocamento positivo. Entretanto, o medidor ultrassônico para ser calibrado exige um volume significativamente maior do que os medidores de outras tecnologias (API 5.8).

Para não ter de aumentar o volume do provador na calibração do medidor ultrassônico, pode ser utilizado provador com medidor mestre de transferência, ou utilizar apenas um medidor mestre. O medidor mestre, no entanto, necessita de calibração frequente, e aumenta a complexidade da gestão da medição e a incerteza do sistema (API 4.8, 2002).

Os sistemas de medição de vazão de gás natural apresentam erro máximo admissível (EMA) maior do que o EMA dos sistemas de medição de vazão de líquidos. A própria compressibilidade do gás já dificulta a medição de vazão. Os sistemas de medição de gás não incluem provadores e são aceitas, mesmo para transferência de custódia ou medição fiscal, instalações cuja calibração do medidor é feita apenas em laboratório. Desta forma, a necessidade de volumes maiores para a calibração dos medidores não aumenta significativamente o custo do sistema de medição quando comparado com outras tecnologias e a questão maior passa a ser a avaliação da influência da instalação e as possibilidades de diagnóstico.

Sobre medição de medidores ultrassônicos de líquidos em laboratórios, Arantes (2007) avaliou as calibrações de um medidor ultrassônico de tempo de

trânsito realizadas em dois diferentes laboratórios, ambos acreditados, operando em conformidade com as especificações técnicas de instalação do fabricante e segundo exigências de normas e recomendações internacionais. Os resultados foram distintos e em um dos circuitos de calibração o medidor não atingiu o desempenho exigido pela metrologia legal. A pesquisa investigou o efeito, na calibração, de uma válvula e uma curva longa de 90° a montante do trecho de medição.

A indústria tem investido no desenvolvimento e melhoria dos métodos de calibração de medidores de vazão ultrassônicos como nas investigações em metrologia de Silva (2008), Dias (2007), e Marchetti (2009).

Os medidores de vazão passam por uma primeira calibração (*fingerprint*). Para os medidores turbina e deslocamento positivo é determinado o *fator-k* do medidor (*k-factor*), que indica o número de pulsos de saída que o medidor transmite por unidade de volume. Esses medidores de vazão volumétricos emitem um ou um número fixo de pulsos a cada volta completa do rotor.

Os medidores ultrassônicos chega à vazão a partir da velocidade média do perfil. Assim, o *fator-k* não é um parâmetro intrínseco aos medidores ultrassônicos, ao contrário, o medidor é configurado para emitir um pulso quando acumula um dado volume e essa configuração pode ser alterada pelo usuário. O medidor ultrassônico é configurado pelos fabricantes com fatores para correção de distorções, devido, por exemplo, ao número de Reynolds (*Re*) ou rugosidade e, nas calibrações iniciais, esses fatores são ajustados para melhorar a exatidão.

Os medidores ultrassônicos menos exatos só dispõem de um único fator para posicionar toda sua curva de calibração de forma a minimizar os erros. Os medidores que conseguem melhor exatidão permitem o armazenamento de diferentes fatores ao longo de toda a faixa calibrada para o ajuste da curva por faixas de vazão, ou mesmo utilizam curvas de ajuste.

Outro fator usual em medição de vazão é o *meter factor*, ou fator do medidor (*MF*), que é determinado quando o medidor é calibrado. O *MF* é calculado pela relação entre a vazão média do padrão dividida pela vazão média do medidor, ou pela relação entre o volume do padrão dividido pelo volume do medidor, pois cada medição deve ser realizada com a vazão e volume do padrão constantes. Após a calibração, o *MF* é utilizado para corrigir os resultados de vazão ou de volume totalizado indicados pelo medidor.

Os parâmetros de desempenhos de medidores de vazão são muitas vezes determinados tomando por base o *MF* (API 12.2.3, 2002), o que pode parecer conflitante com as recomendações internacionalmente aceitas em metrologia que indicam a utilização da grandeza (ISO/GUM, 2008). Pode ser provado que o resultado é correto.

Na indústria, para que o resultado de uma medição de vazão seja confiável, precisa que as instalações e procedimentos dos sistemas de operação e calibração estejam aprovados e acreditados, e seguindo as normas e regulamentos pertinentes.

2.1.9.

Diagnóstico

Os medidores ultrassônicos disponibilizam diversos parâmetros de diagnóstico, alguns comuns a todos os medidores, como relação sinal-ruído, ganho, velocidade do som e velocidade média em cada canal, mas outros são definidos em função do arranjo do medidor.

A análise dos parâmetros para fins de diagnóstico é feita por comparação dos valores obtidos pelo medidor em operação com valores indicados pelo fabricante ou valores usualmente encontrados em outras instalações semelhantes ou, também, pelo acompanhamento de valores históricos.

Uma dificuldade para o usuário é a identificação do parâmetro de diagnóstico, pois cada fabricante define uma nomenclatura própria.

Zanker & Brown (2000) descrevem um projeto de pesquisa que teve como objetivo avaliar o desempenho de medidores ultrassônicos na medição de vazão de gás natural úmido, o que significa medir vazão de um gás natural que contém uma fração de volume de líquido (LVF) desconhecida. São indicadas as funções de diagnóstico do medidor ultrassônico (Daniel, 4 canais) que são mais afetadas pela presença de mistura de líquido no gás:

- a) Velocidade do som (VOS): Verifica se os quatro canais estão indicando o mesmo valor (com variações de até 1%). Na medição de gás, a presença de líquido reduz a VOS.
- b) Ganho: Mede a atenuação do sinal. O controle automático de ganho (AGC) é usado para compensar variações na pressão e velocidade. A presença de líquido no gás aumenta o ganho.

c) Desvio Padrão (StdDev): Verifica a qualidade do sinal detectado. É uma avaliação estatística com base nas medições de tempos de trânsito realizada por canal do medidor. A presença de líquido aumenta o StdDev.

d) Relação sinal-ruído (S/N): Também verifica a qualidade do sinal. A presença de líquido na mistura aumenta a S/N.

Lansing (2001) discute a capacidade de diagnóstico de medidores ultrassônicos de gás natural da Daniel e apresenta os seguintes parâmetros de diagnóstico:

a) Ganho: Os medidores dispõem de controle de ganho em cada canal e o ganho é aumentado com diminuição da pressão, aumento da velocidade, contaminação ou deterioração do transdutor, obstrução das portas dos transdutores ou presença de líquido na linha.

b) Qualidade do Sinal: Os pulsos ultrassônicos são enviados de um transdutor ao outro, mas nem todos conseguem ser identificados na recepção e um número significativo é descartado. Qualidade do sinal é a relação entre pulsos aceitos e o total de pulsos enviados.

c) Relação Sinal-Ruído: A causa de nível elevado de ruído pode ser falha no aterramento ou na conexão elétrica entre transdutor e eletrônica, interferência eletromagnética ou de rádio frequência, interferência da proteção catódica, contaminação do transdutor ou problemas nos componentes eletrônicos da unidade de processamento. A causa mais comum para ruído elevado é a queda de pressão nas válvulas de controle ou nas válvulas redutoras de pressão.

d) Perfil de Velocidade: O registro das velocidades em cada canal é utilizado na avaliação do desempenho quando questionado.

e) Velocidade do Som: Erro na velocidade do som leva a erro na medição de velocidade do escoamento e sua verificação é uma forma de conferir a medição de tempo, mas a velocidade do som é bastante sensível à temperatura, além da composição do gás e da pressão.

A utilização dos parâmetros de diagnóstico dos canais paralelos é mais recente. Nesse caso, os algoritmos precisam identificar as trajetórias que, em geral, são numeradas de forma sequencial como apresentado no esquema da Figura 2-19 para um medidor de 4 canais paralelos.

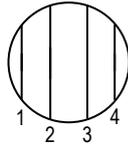


Figura 2-19: Numeração de medidor de 4 canais paralelos.

Zanker (2003) apresenta, para o medidor ultrassônico de gás natural de quatro canais da marca Daniel, os parâmetros de diagnóstico: assimetria (F_{ass}), fluxo cruzado (F_{fc}) e condição do escoamento (F_{ce}).

$$F_{ass} = \frac{\bar{u}_{T1} + \bar{u}_{T2}}{\bar{u}_{T3} + \bar{u}_{T4}} \quad (2-41)$$

$$F_{fc} = \frac{\bar{u}_{T1} + \bar{u}_{T3}}{\bar{u}_{T2} + \bar{u}_{T4}} \quad (2-42)$$

$$F_{ce} = \frac{\bar{u}_{T2} + \bar{u}_{T3}}{\bar{u}_{T1} + \bar{u}_{T4}} \quad (2-43)$$

Segundo Zanker, em perfeitas condições de escoamento, $F_{ass} = 1$; $F_{fc} = 1$; $F_{ce} = 1,17$. É usual ter para estes parâmetros variações de $\pm 2\%$, o que é suficiente para dizer que o perfil de escoamento está próximo do perfil completamente desenvolvido.

Zanker (2003) indica também a utilização do desvio padrão das diferenças de tempo de trânsito (Δt) como um parâmetro de diagnóstico. Comumente, cada diferença de tempo de trânsito (Δt) disponibilizada pelo medidor resulta de uma média de cerca de 20 medições de Δt consecutivas. O desvio padrão desses 20 valores de Δt é denominado de flutuação na velocidade ou turbulência. A turbulência, em geral, fica entre 2 a 5% da velocidade média no canal, com as médias em 3% nas trajetórias mais internas e 4% nas trajetórias mais externas. Se houver flutuações ou pulsações no escoamento, o parâmetro de turbulência pode subir 2% a 5% do valor para o escoamento estável.

A velocidade do som (VOS) medida pelo ultrassônico é outro parâmetro de diagnóstico indicado por Zanker (2003). O medidor calcula, para cada canal, a VOS (C_j) seguindo a eq. (2-8), com os parâmetros L_j , t_{12i} e t_{21i} . A VOS do medidor, então, corresponde à VOS média (C), de acordo com as equações abaixo:

$$C_j = \frac{L_j}{2} \frac{t_{12j} + t_{21j}}{t_{12j} t_{21j}} \quad (2-44)$$

$$C = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_4}{4} \quad (2-45)$$

A VOS pode ser utilizada no diagnóstico por diferentes análises:

- Comparação da VOS média (C) com o valor calculado pela AGA 10.
- Comparação entre si das VOS medidas nos canais (C_j).
- Acompanhamento da diferença entre a VOS de cada canal e a VOS média.
- Verificação da coerência das VOS entre trajetórias de diferentes comprimentos.
- Correção da estratificação do escoamento por diferença de temperatura.

Estrada et al. (2004) indicam os seguintes parâmetros de diagnóstico para o medidor Caldon de 4 canais:

- a) Planicidade: O parâmetro planicidade (*flatness*) tem por fim a avaliação do perfil de velocidade e corresponde à soma da velocidade nas trajetórias externas dividida pela soma da velocidade nas trajetórias internas. Uma variação de 0,05 na planicidade indica uma variação de 0,1% no fator do medidor.
- b) Velocidade do Som: A velocidade do som é medida em cada canal e a comparação de cada uma com o conjunto das outras pode ser um indicativo de corrosão, incrustação ou acúmulo de material.
- c) Relação Sinal-Ruído: Se a relação sinal-ruído do pulso ultrassônico que chega ao transdutor não for suficiente para a identificação do pulso, o ganho³ é aumentado. Se o ganho atinge um nível máximo é emitido um alarme. O valor do ganho ou a relação sinal-ruído indica alterações no fluido ou acúmulo de material.
- d) Paridade: Se para cada par de transdutores não houver a correspondência do pulso que segue no sentido do escoamento e o pulso no sentido inverso, com uma frequência que compromete a exatidão do medidor, um alarme é emitido.
- e) *Clock*: O *clock* é verificado por um *clock* independente.

A proposta dos fabricantes é utilizar os parâmetros de desempenho como uma indicação de que o medidor opera com a exatidão apresentada na calibração, mas a utilização dos parâmetros não substitui a calibração. O histórico dos

³ Na eletrônica, ganho é o aumento de potência na transmissão de um sinal.

parâmetros de desempenho pode ser utilizado para prevenção de falhas. Os parâmetros podem ser utilizados em auditorias (Estrada et al., 2004).

Oliveira et al. (2007) descrevem parâmetros de diagnóstico utilizados pelo medidor de 5 trajetórias da Krohne. A identificação das trajetórias nos medidores de 5 canais é semelhante à de 4 canais (Figura 2-19), com o canal 3 passando pelo eixo do duto, seguido pelo canal 4 e o canal 5 mais próximo à parede:

a) Assimetria (X_1): Compara a velocidade média na metade superior da tubulação com a velocidade média na metade inferior, idealmente se aproxima de 1:

$$X_1 = \frac{\bar{u}_{T1} + \bar{u}_{T2}}{\bar{u}_{T4} + \bar{u}_{T5}} \quad (2-46)$$

b) Escoamento Cruzado (X_2): Compara as velocidades em dois planos em ângulo reto, duas velocidades em cada plano, e idealmente se aproxima de 1.

$$X_2 = \frac{\bar{u}_{T1} + \bar{u}_{T4}}{\bar{u}_{T2} + \bar{u}_{T5}} \quad (2-47)$$

c) Turbilhonamento (X_3): Compara a velocidade média nas trajetórias internas com velocidade média nas externas, como indicador do turbilhonamento.

$$X_3 = \frac{\bar{u}_{T2} + \bar{u}_{T4}}{\bar{u}_{T1} + \bar{u}_{T5}} \quad (2-48)$$

d) Rugosidade: Detecta aumento da rugosidade pelo seu efeito no perfil de velocidade, utiliza o parâmetro X_3 , que, enquanto não variar com o tempo, indica que a rugosidade permaneceu constante.

e) Estratificação do Escoamento: Compara a valores de velocidade do som.

f) Turbulência: Calcula pelo valor médio quadrático das flutuações de velocidade.

O parâmetro de turbilhonamento é utilizado pela Krohne na avaliação do número de Reynolds para identificação do fator de correção de perfil.

Para medidor de 4 canais da Caldon, Brown et al. (2009) indicam, como parâmetro de diagnóstico mais utilizado para avaliar se o escoamento é laminar, de transição ou turbulento, a razão de planeza FR (*flatness ratio*) definida como:

$$FR = \frac{\bar{u}_{T1} + \bar{u}_{T4}}{\bar{u}_{T2} + \bar{u}_{T3}} \quad (2-49)$$

Em resumo, os parâmetros de diagnóstico se baseiam no ganho, desvio padrão, relação sinal/ruído, velocidade do som média e em cada canal e velocidade do escoamento em cada canal.

Nas simulações computacionais de medidores ultrassônicos, são calculadas as velocidades médias em cada canal e, portanto, os parâmetros definidos por uma razão que inclui as velocidades de escoamento nos canais podem também ser simulados.

2.2.

Equações para Análise dos Medidores Ultrassônicos

Este item apresenta as equações utilizadas nas planilhas Excel e nas simulações do CFX e, também, o desenvolvimento das equações que relacionam a velocidade dos canais com a velocidade do escoamento.

O principal propósito é o escoamento viscoso, turbulento e incompressível. O modelo laminar foi incluído, pois é utilizado na avaliação da metodologia.

Para gases, a restrição de escoamento incompressível limita o número de Mach (Ma) do escoamento em no máximo 0,3, com transferência de calor desprezível (Fox & McDonald, 2001). Para o gás natural, essa restrição corresponde à velocidade máxima de 120 m/s, que fica acima das velocidades máximas na indústria do petróleo. No presente trabalho não está sendo considerada transferência de calor.

Apesar dos próximos capítulos incluírem perfis assimétricos devido a acidentes a montante, as equações deste item abrangem apenas escoamento completamente desenvolvido, em regime permanente, em duto circular. Também, as forças de campo são desprezadas, e o fluido é newtoniano.

2.2.1.

Determinação do Perfil de Velocidade

2.2.1.1.

Modelo Laminar

O perfil de velocidade de um escoamento completamente desenvolvido laminar em um duto circular pode ser expresso em função da distância r do ponto em referência ao eixo do tubo (Fox & McDonald, 2001):

$$u = u_{max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] = 2\bar{u}_A \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2-50)$$

Com o parâmetro $\eta = r/R$:

$$u = u_{max} (1 - \eta^2) \quad (2-51)$$

2.2.1.2.

Perfil de Velocidade Turbulento baseado na Lei de Potência

O perfil de velocidade empírico baseado na lei de potência para escoamento turbulento axissimétrico descreve de forma simples a velocidade u em função do raio R , da distância r ao eixo do duto do ponto em referência, com as variáveis normalizadas com a velocidade máxima u_{max} e o raio R do duto (Fox & McDonald, 2001):

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2-52)$$

O expoente n varia com o número de Reynolds (Re). Schlichting (1968) tomou por base a investigação experimental de J. Nikuradse sobre fator de atrito e perfil de velocidades para avaliar valores de n mais apropriados para serem utilizados na lei de potência em função de Re . Os valores indicados por Schlichting aparecem na Tabela 2-3 e no gráfico da Figura 2-20.

Tabela 2-3: Relação entre n e Re , para a lei de potência $1/n$.

n	6,0	6,6	7,0	8,8	10	10
Re	4×10^3	$2,3 \times 10^4$	$1,1 \times 10^5$	$1,1 \times 10^6$	2×10^6	$3,2 \times 10^6$

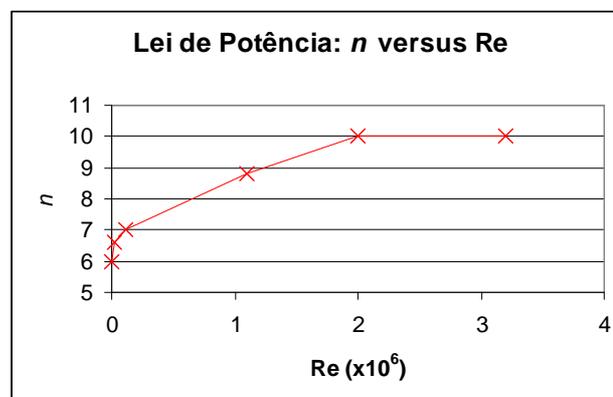


Figura 2-20: Relação entre n e Re pela lei de potência.

No transporte de petróleo e derivados, o escoamento em geral tem número de Reynolds na faixa de 5×10^4 a $1,5 \times 10^5$ e é usual utilizar $n = 7$. No transporte de gás, com números de Reynolds na faixa de $7,0 \times 10^5$ poderia ser utilizado $n = 8$. Os perfis teóricos de Salami (1984) e Moore et al. (2000b) utilizam n igual a 7 e 9.

A relação entre a velocidade máxima (u_{max}) e a velocidade média na seção transversal (\bar{u}_A) pode ser obtida pela definição de velocidade média na seção transversal, a partir da velocidade u e a área da seção transversal (A):

$$\bar{u}_A = \frac{1}{A} \int u \, dA \quad (2-53)$$

$$\bar{u}_A = \frac{2n^2}{(1+n)(1+2n)} u_{max} \quad (2-54)$$

A eq. (2-52) é relativamente simples, mas a derivada da velocidade no eixo do tubo não é definida, o que implica uma indefinição também na tensão de cisalhamento.

A variação de n com Re é uma desvantagem da lei de potência, mas como mostra a Figura 2-20, n tende a um valor constante para Re elevado. Segundo Schlichting (1968), a tendência assintótica de n em função de Re nas expressões da distribuição de velocidades e da tensão de cisalhamento indica que deveriam conter o logaritmo de Re .

2.2.1.3.

Perfil Universal de Velocidade

Schlichting (1968) observa que o modelo logarítmico é coerente com o modelo de turbulência de comprimento de mistura de Prandtl. Com base nos resultados dos experimentos de J. Nikuradse, indica a forma da lei universal de distribuição de velocidades, em logaritmo Neperiano (\ln) ou na base 10 (\log):

$$u^+ = 2,5 \ln(y^+) + 5,5 \quad (2-55)$$

$$u^+ = 5,75 \log(y^+) + 5,5$$

A eq. (2-55) é conhecida como equação de Nikuradse.

A variável u^+ , adimensional, corresponde à velocidade u normalizada pela velocidade de atrito (u_τ) e a variável y^+ , também adimensional, corresponde à distância à parede (y_p) normalizada pela viscosidade cinemática (ν) e por u_τ .

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (2-56)$$

$$y^+ = \frac{y_p u_\tau}{\nu} \quad (2-57)$$

A distância y_p é função de R (raio do tubo) e r (distância radial):

$$y_p = R - r \quad (2-58)$$

A velocidade de atrito (u_τ) é definida em função da tensão de cisalhamento na parede do tubo (τ_0) e da massa específica (ρ):

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2-59)$$

Para calcular τ_0 é necessário conhecer o fator de atrito (f)

$$\tau_0 = \frac{f}{4} \frac{\rho \bar{u}_A^2}{2} \quad (2-60)$$

A velocidade u_τ pode ser obtida diretamente com f e \bar{u}_A :

$$u_\tau = \bar{u}_A \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (2-61)$$

O fator f é função do número de Reynolds (Re).

O cálculo de Re é imediato, a partir da viscosidade cinemática (ν), velocidade média (\bar{u}_A) e diâmetro do duto (D):

$$Re = \frac{\rho \bar{u}_A D}{\mu} = \frac{\bar{u}_A D}{\nu} \quad (2-62)$$

Entretanto, a correlação entre f e Re é empírica.

Kays & Crawford (1993) apresentam a equação de Kármán-Nikuradse para tubos lisos e escoamento turbulento completamente desenvolvido descreve o fator de atrito (f) como função do número de Reynolds (Re):

$$\frac{1}{\sqrt{f/8}} = 2,46 \ln(Re \sqrt{f/8}) + 0,30 \quad (2-63)$$

O perfil de Nikuradse não consegue igualar a zero a derivada da velocidade no centro do duto (para $y = R$).

Kays & Crawford (1993) para contornar o problema da velocidade no centro do duto propõem uma alteração da equação de Nikuradse:

$$u^+ = 2,5 \ln \left(y^+ \frac{1,5 \left(1 + \frac{r}{R} \right)}{1 + 2 \left(\frac{r}{R} \right)^2} \right) + 5,5 \quad (2-64)$$

Bogue & Metzner (1963) também apresentam uma equação para a distribuição de velocidade para escoamento turbulento em tubo liso, com base em dados experimentais. Essa equação inclui a distância adimensional à parede do tubo (ξ), a função de correção empírica $c(\xi, f_f)$, e uma equação para fator de fricção (f_f), conforme descrito a seguir:

$$u^+ - c(\xi, f_f) = 5,57 \log(y^+) + 5,57 \quad (2-65)$$

$$\xi = \frac{y_p}{R} \quad (2-66)$$

$$c(\xi, f_f) = 0,05 \sqrt{\frac{2}{f_f}} e^{-\frac{(\xi-0,8)^2}{0,15}} \quad (2-67)$$

O fator de fricção (f_f) é obtido a partir do fator de atrito (f):

$$f_f = \frac{f}{4} \quad (2-68)$$

As equações do perfil de velocidade (eq. (2-55), eq. (2-64) e eq. (2-65)) foram desenvolvidas e são válidas apenas no núcleo do escoamento turbulento, onde a tensão de cisalhamento viscoso pode ser desprezada. Muito próximo da parede, a tensão de cisalhamento viscoso predomina e o perfil de velocidades segue a relação viscosa linear:

$$u^+ = y^+ \quad (2-69)$$

Para as equações se ajustarem nos dados experimentais, além da subcamada viscosa e do núcleo turbulento, é identificada uma camada de transição.

Fox & McDonald (2001) indica a região de transição entre $y^+ = 5-7$ e $y^+ = 30$. Schlichting (1968) situa a região de transição entre $y^+ = 5$ e $y^+ = 70$.

No presente trabalho foi utilizado um modelo mais simples, incluindo apenas a subcamada viscosa e o núcleo turbulento, com o limite em $y^+ = 10,8$.

2.2.1.4.

Perfil Universal de Velocidade para Tubos Rugosos

Para escoamento turbulento em tubos rugosos, é definido o número de Reynolds de rugosidade (Re_k), função de Re e rugosidade na parede do duto (k_s):

$$Re_k = \frac{u_\tau k_s}{\nu} = \frac{k_s}{D} Re \sqrt{f/8} \quad (2-70)$$

Em escoamento turbulento em tubos rugosos, White (1979) identifica três regimes em função da rugosidade da parede: para $Re_k < 5$ (parede hidrodinamicamente lisa, com a rugosidade contida na subcamada viscosa); $5 < Re_k < 70$ (rugosidade intermediária, onde o efeito de Re é moderado); e $Re_k > 70$ (escoamento totalmente rugoso, com o fator de atrito f independente de Re , e a viscosidade não é uma variável importante).

Calogirou et al. (2001) indica para o cálculo da velocidade do escoamento:

$$u^+ = 2,5 \ln\left(\frac{y}{k_s}\right) + \frac{1}{\sqrt{f/8}} + 4,3 - 2,5 \ln\left(\frac{R}{k_s}\right) \quad (2-71)$$

Para calcular o fator de atrito f com Re e k_s , Calogirou et al. (2001) apresenta a expressão de Colebrook e White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 - 2 \log\left(\frac{k_s}{R} + \frac{18,7}{Re \sqrt{f}}\right) \quad (2-72)$$

Também, a expressão de Zagarola e Smits (1998), que segundo Calogirou et al. (2001) ajusta melhor dados experimentais mais modernos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,065 - 1,884 \log\left(\frac{k_s}{R} + \frac{18,7}{Re \sqrt{f}}\right) \quad (2-73)$$

2.2.2.

Velocidade pelas Equações Médias de Navier-Stokes

2.2.2.1.

Equação Geral dos Modelos RANS

A decomposição de Reynolds consiste em considerar que a velocidade no escoamento turbulento pode ser decomposta em um valor médio no tempo (\bar{u}) acrescido da flutuação (u'): $u = \bar{u} + u'$.

A equação diferencial para conservação de massa, ou de continuidade, é:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2-74)$$

Os modelos de turbulência, que seguem as equações de Navier-Stokes e incluem médias no tempo, são denominados modelos RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). As equações para escoamento turbulento, fluido newtoniano e propriedades constantes apresentam a seguinte forma (Hinze, 1975):

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \\ = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] + \frac{\partial(-\overline{\rho u'_i u'_j})}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2-75)$$

A tensão de Reynolds $(-\overline{\rho u'_i u'_j})$ pode ser avaliada por modelos de viscosidade turbulenta, por analogia com a tensão laminar:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2-76)$$

onde, k é a energia cinética turbulenta; μ_t é a viscosidade turbulenta; ρk é a pressão dinâmica associada aos turbilhões; e δ_{ij} é o delta de Kroneker.

Energia cinética turbulenta (k) é definida por:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i'^2} \quad (2-77)$$

Define-se, também, viscosidade efetiva (μ_{ef}):

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t \quad (2-78)$$

Para simplificar a eq. (2-75), define-se a pressão modificada (P)

$$P = \bar{p} + \frac{2}{3} \mu_{ef} \left(\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) + \frac{2}{3} \rho k \quad (2-79)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{ef} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2-80)$$

As simulações no presente trabalho supõem escoamento turbulento, incompressível, com propriedades constantes, em regime permanente, sem forças de corpo, e fluido newtoniano com propriedades constantes. Assim, a eq. (2-74), eq. (2-75), eq. (2-79) e eq. (2-80) são simplificadas:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-81)$$

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial (-\overline{\rho u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (2-82)$$

$$P = \bar{p} + \frac{2}{3} \rho k \quad (2-83)$$

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{ef} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2-84)$$

A viscosidade turbulenta pode ser estimada a partir da velocidade característica (V_c) e do comprimento característico (L_c) da escala de movimento:

$$\mu_{ef} \approx \rho V_c L_c \quad (2-85)$$

Para determinar a viscosidade turbulenta podem ser utilizados modelos algébricos; modelos de uma equação diferencial; ou modelos de duas equações diferenciais.

2.2.2.2.

Modelos de Duas Equações Diferenciais

Os modelos de duas equações incluem duas equações de transporte a mais, para calcular as propriedades turbulentas do escoamento. O presente trabalho utilizou os modelos disponíveis no CFX, principalmente os modelos k-epsilon e RNG-k-epsilon. O k-epsilon é o modelo mais utilizado na indústria. O RGN-k-epsilon tem sido utilizado nas pesquisas com medidores ultrassônicos (Mattingly & Yeh, 1999; Moore et al., 2000a).

Além do k-epsilon e RNG-k-epsilon, os modelos k-omega e SST também foram utilizados no desenvolvimento e avaliação da metodologia.

Os modelos de duas equações avaliam a viscosidade turbulenta pela equação para a energia cinética (k) e uma combinação do tipo $k^a \ell^b$, onde ℓ é o comprimento característico. A dissipação das turbulências (ε) e a frequência das turbulências (ϖ) são duas combinações possíveis:

$$\varepsilon = k^{3/2} \ell^{-1} \quad (2-86)$$

$$\varpi = k^{1/2} \ell^{-1} \quad (2-87)$$

As equações apresentadas a seguir são as equações utilizadas no software CFX (ANSYS, 2009). O operador vetorial ∇ , gradiente de campo escalar, e $\nabla \bullet$, divergente de um vetor, são utilizados para facilitar a visualização do conjunto de equações. Para o modelo k-epsilon, os valores de k e ε são obtidos pelas seguintes equações diferenciais de transporte:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \bullet \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (2-88)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \bullet \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (2-89)$$

onde, \mathbf{U} é o vetor velocidade ($U_{x,y,z}$); σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ são constantes.

P_k representa a produção de turbulências devido a forças viscosas. É modelada por:

$$P_k = \mu_t \nabla \mathbf{U} : (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \bullet \mathbf{U} (3 \mu_t \nabla \mathbf{U} + \rho k) \quad (2-90)$$

Na eq. (2-88) e eq. (2-89) é previsto mais uma parcela no caso de presença de empuxo, o que não é utilizado no presente trabalho.

Para fluido incompressível, $\nabla \bullet \mathbf{U}$ é pequeno e o termo à direita na eq. (2-90) tem contribuição insignificante na produção. Para fluido compressível, $\nabla \bullet \mathbf{U}$ só é significativo nas regiões com grande divergente de velocidade (ANSYS, 2009). A eq. (2-90), no caso de fluido incompressível, fica simplificada:

$$P_k = \mu_t \nabla \mathbf{U} : (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T) \quad (2-91)$$

A viscosidade turbulenta é calculada a partir de k e ε :

$$\mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (2-92)$$

onde, c_μ é constante.

O modelo RNG k-epsilon é baseado no método de *dynamic renormalization group* (RNG) para turbulências hidrodinâmicas, desenvolvido por Yakhot & Orszag (1986).

As equações de geração e dissipação turbulenta do modelo RNG k-epsilon são idênticas às equações do modelo k-epsilon e a diferença está na constante $C_{\varepsilon 1}$ da equação de ε , que é substituída pelo coeficiente $C_{\varepsilon 1\text{RNG}}$ (ANSYS, 2009):

$$C_{\varepsilon 1\text{RNG}} = 1,42 - f_\eta \quad (2-93)$$

$$f_{\eta} = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4,38}\right)}{1 + \beta_{\text{RNG}} \eta^3} \quad (2-94)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu\text{RNG}} \varepsilon}} \quad (2-95)$$

onde: $C_{\varepsilon\text{IRNG}}$ é um coeficiente; e β_{RNG} e $C_{\mu\text{RNG}}$ são constantes.

O modelo k-omega apresenta como uma vantagem o tratamento próximo à parede para baixos números de Reynolds. Tem por princípio o cálculo de k e ω por equações diferenciais de transporte. A viscosidade turbulenta (μ_t) é determinada pela energia cinética turbulenta (k) e frequência turbulenta (ω):

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (2-96)$$

O modelo indicado no CFX como k-omega é o modelo Wilcox k-omega, desenvolvido por Wilcox. Há também disponível o modelo BSL (*baseline k-omega*) e o modelo SST (*Shear Stress Transport*), que são variações do Wilcox k-omega.

2.2.3.

Equação para o Fator do Medidor

2.2.3.1.

Equação Geral

O medidor ultrassônico de tempo de trânsito mede a velocidade média ao longo da trajetória (\bar{u}_T) para, então, calcular a velocidade média na seção transversal (\bar{u}_A). Assim, determina-se a equação que correlaciona estas velocidades médias (ISO 12765).

A Figura 2-21 mostra a seção transversal de um duto de raio R . A trajetória aparece como uma linha de comprimento L , distante r_0 do centro do duto.

Considerando a velocidade $u(r)$, a velocidade média ao longo de uma trajetória é a integral de $u(r)$ de $-L/2$ a $L/2$. Ao longo da linha, o parâmetro r está no intervalo $r_0 \leq r \leq R$.

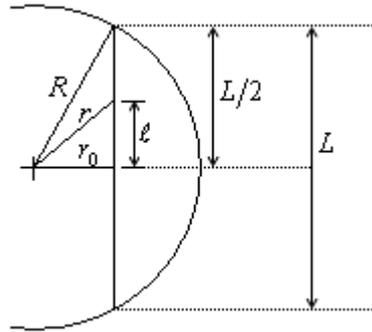


Figura 2-21: Esquema para a determinação da velocidade média no canal acústico

O comprimento da linha L é determinado por:

$$L = 2 \sqrt{R^2 - r_0^2} \quad (2-97)$$

A partir da distância normalizada por R :

$$a = \frac{r_0}{R} \quad (0 < a < 1) \quad (2-98)$$

$$L = 2 R \sqrt{1 - a^2} \quad (2-99)$$

Sendo ℓ a distância de um ponto da trajetória ao centro desta e sendo $\eta = r/R$, o parâmetro adimensional ℓ' é:

$$\ell' = \frac{\ell}{R} = \sqrt{\eta^2 - a^2} \quad (0 < \ell' < \sqrt{1 - a^2}) \quad (2-100)$$

As equações das velocidades médias \bar{u}_T e \bar{u}_A são:

$$\bar{u}_T = \frac{1}{L/2} \int_0^{L/2} u(\ell) d\ell = \frac{1}{\sqrt{1 - a^2}} \int_0^{\sqrt{1 - a^2}} u(\ell') d\ell' \quad (2-101)$$

$$\bar{u}_A = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2 \pi r u(r) dr = 2 \int_0^1 \eta u(\eta) d\eta \quad (2-102)$$

2.2.3.2.

Escoamento Laminar

A partir da eq. (2-50) e eq. (2-101), chega-se a \bar{u}_T para escoamento laminar:

$$\bar{u}_T = \frac{1}{\sqrt{1 - a^2}} \int_0^{\sqrt{1 - a^2}} 2 \bar{u}_A (1 - \eta^2) d\ell' = \frac{4}{3} \bar{u}_A (1 - a^2) \quad (2-103)$$

Assim, \bar{u}_A pode ser obtida diretamente da velocidade \bar{u}_T pela equação:

$$\bar{u}_A = \frac{3}{4(1-a^2)} \bar{u}_T \quad (2-104)$$

A relação (k_{med}) entre as velocidades médias \bar{u}_A e \bar{u}_T é função apenas da distância adimensional da linha ao centro do duto:

$$k_{med} = \frac{\bar{u}_A}{\bar{u}_T} = \frac{3}{4(1-a^2)} \quad (2-105)$$

2.2.3.3.

Escoamento Turbulento em Tubos Lisos

A partir de:

$$y_p = R - r = R \left(1 - \sqrt{\ell'^2 + a^2} \right) \quad (2-106)$$

$$R^+ = \frac{R u_\tau}{\nu} = \frac{\text{Re} \sqrt{f/8}}{2} \quad (2-107)$$

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} = R^+ \left[1 - \sqrt{\ell'^2 + a^2} \right] = R^+ (1 - \eta) \quad (2-108)$$

Reescreve-se a eq. (2-101) em sua forma adimensional (\bar{u}_T^+):

$$\bar{u}_T^+ = \frac{\bar{u}_T}{u_\tau} = \frac{\bar{u}_T}{\bar{u}_A \sqrt{f/8}} = \frac{1}{\sqrt{1-a^2}} \int_0^{\sqrt{1-a^2}} u^+(\ell') d\ell' \quad (2-109)$$

Para $a = 0$ e considerando a eq. (2-108):

$$\bar{u}_T^+ = \frac{1}{R^+} \int_0^{R^+} u^+(y^+) dy^+ \quad (2-110)$$

Com a eq. (2-55), de Nikuradse, apresentada por Schlichting (1968):

$$\bar{u}_T^+ = \frac{1}{R^+} \int_0^{10,8} y^+ dy^+ + \frac{1}{R^+} \int_{10,8}^{R^+} (2,5 \ln(y^+) + 5,5) dy^+ \quad (2-111)$$

Resolvendo as integrais, chega-se a:

$$\bar{u}_T^+ = 2,5 \ln(R^+) + 3 - \frac{38,33}{R^+} \quad (2-112)$$

Então, com a eq. (2-107), eq. (2-109), eq. (2-112), chega-se ao k_{med} :

$$k_{med} = \frac{\bar{u}_A}{\bar{u}_T} = \frac{1}{\bar{u}_T^+ \sqrt{f/8}} = \frac{1}{\left(2,5 \ln \left(\frac{\text{Re} \sqrt{f/8}}{2} \right) + 3 - \frac{76,66}{\text{Re} \sqrt{f/8}} \right) \sqrt{f/8}} \quad (2-113)$$

A eq. (2-105) indica que, no escoamento laminar, o k_{med} é função apenas de a , ou seja, independe de Re ; mas a eq. (2-113) mostra que, no escoamento turbulento, k_{med} é também função de Re .

2.2.3.4.

Escoamento Turbulento em Tubos Rugosos

A partir da eq. (2-110) e da eq. (2-71) apresentada por Calogirou et al. (2001) para escoamento turbulento em tubos rugosos:

$$\bar{u}_T^+ = \frac{1}{R^+} \int_0^{10,8} y^+ dy^+ + \frac{1}{R^+} \int_{10,8}^{R^+} \left(2,5 \ln(y^+) + \frac{1}{\sqrt{f/8}} + 4,3 - 2,5 \ln(R^+) \right) dy^+ \quad (2-114)$$

Resolvendo a integral:

$$\bar{u}_T^+ = \frac{1}{R^+} \left((R^+ - 10,8) \left(\frac{1}{\sqrt{f/8}} + 1,8 \right) + 27 \ln(R^+) - 5,93 \right) \quad (2-115)$$

Então, pela eq. (2-107), eq. (2-109), eq. (2-112), chega-se ao k_{med} para escoamento turbulento em tubo rugoso:

$$k_{med} = \frac{\bar{u}_A}{\bar{u}_T} = \frac{Re}{2 \left(\left(\frac{Re \sqrt{f/8}}{2} - 10,8 \right) \left(\frac{1}{\sqrt{f/8}} + 1,8 \right) + 27 \ln \left(\frac{Re \sqrt{f/8}}{2} \right) - 5,93 \right)} \quad (2-116)$$

A eq. (2-116) indica que também para tubo rugoso k_{med} é função do número de Reynolds e do fator de atrito. Também, k_{med} é função de a , que na eq. (2-116) está igualado a zero.

O gráfico da Figura 2-22 mostra k_{med} em função de Re , a partir da eq. (2-105) e da eq. (2-116). Em escoamento interno, em duto de seção circular, o escoamento de transição fica entre 1800 e 2300. No caso dos medidores ultrassônicos, pelo catálogo de fabricantes, a faixa de transição, que é a faixa em que o medidor apresenta um resultado menos previsível em uma calibração, que depende do medidor, podendo ficar entre 1.000 a 4.000, ou 1.000 a 10.000.

A rugosidade do aço comercial fica em torno de 55 μm , a rugosidade do aço com grandes incrustações fica em 0,007 m, e a rugosidade do alumínio fica em 4 μm . Para tubo liso, o comportamento de k_{med} pode ser avaliado pela Figura 2-22, considerando-se rugosidade igual a zero.

Os medidores de transferência de custódia são calibrados com o produto de trabalho e a maioria reconhece com razoável aproximação o número de

Reynolds do escoamento. O medidor operacional, entretanto, sendo calibrado apenas com água se operar próximo à região de transição, pode apresentar erros significativos quando em operação.

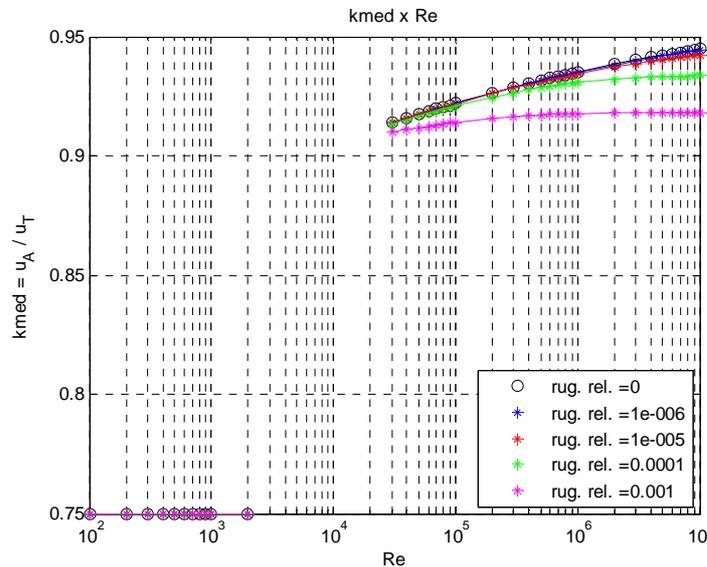


Figura 2-22: Gráfico de k_{med} para escoamento laminar e turbulento em tubo rugoso.

Antunes (2009) destaca que, para um mesmo Re , se o coeficiente hidráulico do escoamento não for o mesmo, o perfil de velocidade pode variar o que levaria um medidor ultrassônico a gerar resultados diferentes.

2.2.4.

Avaliação Numérica de Medidores Ultrassônicos

Neste item são descritas pesquisas que analisaram os medidores ultrassônicos através de simulação numérica. A simulação de um sistema real consiste em criar um modelo computacional, visando entender seu comportamento, ou avaliar suas possibilidades ou limitações.

Alguns modelos mais simples tomam por base o perfil de velocidade, podendo incluir perfis axissimétricos, como os perfis da lei de potência, ou os logarítmicos, e perfis assimétricos, como os perfis de velocidade teóricos de Salami (1984). Modelos mais complexos utilizam CFD em softwares próprios ou comerciais.

Independentemente do modelo computacional utilizado, o medidor ultrassônico tem sido representado por linhas que indicam as trajetórias dos

pulsos. Então, a velocidade média nessas linhas é calculada como sendo a velocidade média que seria medida pelo medidor ultrassônico naquele canal.

2.2.4.1.

Avaliação por Perfis de Velocidade

Zanker (1999) utilizou o perfil da lei de potência e, também, um perfil teórico de velocidade, assimétrico, correspondente ao perfil após uma curva de 90°. Analisou o efeito de Re e da rugosidade sobre medidores com uma e com quatro trajetórias. Concluiu que em medidores com apenas uma trajetória as correções devido a Re e à rugosidade ficam na faixa de 4% a 8%, mas verificou que as correções determinadas com perfis completamente desenvolvidos, se aplicadas a perfis em desenvolvimento podem estar aumentando o erro ao invés de reduzi-lo. Para medidores de 4 trajetórias, as correções para Re e rugosidade ficaram em 0,06%. Indica que a orientação do medidor de vazão com relação ao perfil de velocidade assimétrico, ou seja, a inclinação do medidor com relação a uma curva a montante, deve ser considerada na avaliação dos resultados.

Yeh & Mattingly (1997) utilizaram em sua análise a equação de vórtice de Taylor que simula efeitos de vórtices axialmente assimétricos, equação que também é utilizada por Brown et al. (2006a). Por este modelo, não há garantia de que a velocidade na parede seja zero.

Bastante completos são os perfis teóricos apresentados por Salami (1984). Sua equação, integrável ao longo de toda a seção transversal, relaciona a velocidade normalizada em cada ponto da seção transversal com a distância normalizada ao eixo e o ângulo de inclinação da trajetória. O perfil apresenta diversas possibilidades para a assimetria, sempre com a velocidade zero na parede, com a camada laminar próxima à parede e tornando-se turbulento conforme se aproxima do centro. Esta equação mostrou conformidade com as evidências experimentais.

Moore et al. (2000b) descreveram um método para modelar e analisar o efeito de perfis de escoamento assimétrico em medidores ultrassônicos de tempo de trânsito. Utilizam os perfis teóricos assimétricos de Salami (1984). Definem a posição das trajetórias na seção transversal e calculam a integral da velocidade de cada trajetória (v_{path}). Para chegar à velocidade do escoamento que seria indicada

pelo medidor (v_{meas}), procuram utilizar o método de integração dos medidores. Indicam a integração pelo método de Gauss, Tchebychev e *tailored*.

Para analisar a sensibilidade do medidor ao perfil analítico assimétrico, é calculada a velocidade que o medidor simulado indicaria em diferentes posições angulares. Para cada uma dessas posições calcula o fator H ($H = v_{act}/v_{meas}$), a sensibilidade do medidor é a diferença entre H_{max} e H_{min} ($S = H_{max} - H_{min}$) e o parâmetro de orientação (T) é o somatório das faixas (em radianos) da seção transversal em que H é menor do que um dado percentual. Diferentes arranjos de medidores foram analisados, o que poderia ser utilizado para identificar qual arranjo seria mais ou menos sensível a um dado perfil. Uma das conclusões foi que, de modo geral, o aumento do número de trajetórias diminui a sensibilidade do medidor à orientação com relação ao escoamento.

Yeh & Mattingly (1997) investigaram a sensibilidade dos medidores ao perfil de escoamento para perfis de velocidade gerados por diferentes equações (lei de potência, Bogue-Metzner, Reichardt, logarítmica, Gilmont, inclinação em Y, vórtice de 1ª ordem, vórtice de 2ª ordem (dois vórtices), e vórtice de 2ª ordem e inclinação em Y) para Re de 10^4 a 3×10^6 .

Mesmo considerando apenas os perfis axissimétricos, o resultado foi sensível ao perfil utilizado. Para um mesmo Re, as diferenças em função do perfil utilizado ficaram entre 1% até 2%.

Com os perfis com vórtices ou inclinação em Y, apenas os que incluem vórtice de 2ª ordem indicaram influência da orientação do medidor (do ângulo com relação à seção transversal). Também Moore et al. (2002) concluíram que, sempre que o perfil de velocidade for assimétrico, considerações sobre a localização e a orientação do medidor de vazão são críticas.

Mattingly & Yeh (1999) descrevem o teste realizado no Laboratório de Medição de Água do NIST para avaliar os medidores tipo *clamp-on* de diferentes fabricantes. Foi utilizado o padrão gravimétrico do NIST e as condições da instalação aproximavam do ideal. As características do escoamento no trecho de tubulação do teste foram medidas utilizando um LDV (velocímetro a *laser* por efeito Doppler) para a maior e a menor vazão de teste, o que correspondia a Re igual a 5×10^5 e 3×10^6 .

O escoamento foi condicionado visando chegar à condição de escoamento ideal, completamente desenvolvido. Mattingly & Yeh avaliaram que a distribuição de velocidade que melhor se aproximou do perfil completamente desenvolvido foi a distribuição de Bogue-Metzner.

2.2.4.2.

Avaliação por CFD

Yeh & Mattingly (1997) apresentaram os resultados de uma simulação numérica de medidor ultrassônico de tempo de trânsito de um canal, em diferentes condições de instalação, para escoamento laminar e escoamento turbulento com $Re = 10^4$ a 3×10^6 . Utilizaram o software comercial CFX e avaliaram a influência de um joelho no resultado da medição. Os resultados indicaram um elevado grau de sensibilidade ao perfil de escoamento. O desempenho do medidor é função da distância do canal ao eixo do duto, da inclinação do canal com relação ao eixo, da inclinação do canal na seção transversal e da distância do canal ao acidente. Para escoamento com um joelho, as indicações do medidor dependem da orientação e localização da instalação do medidor e próximo ao joelho, as variações podem chegar a 35% devido aos efeitos do escoamento cruzado. Para algumas posições, não há inclinação no plano da seção transversal que forneça o desempenho ideal do medidor. Os resultados confirmam que as localizações e orientações dos medidores são críticas na exatidão do medidor e sugerem a utilização de medidores multicanais.

Mattingly & Yeh (1999) apresentaram o resultado da simulação numérica com o software CFX. A geometria era um cilindro, a malha da seção transversal com 532 elementos foi extrudada, e a malha do domínio totalizava 50.008 elementos hexaédricos. A modelagem do escoamento foi configurada em regime permanente, com número de Reynolds elevado (430.000) e modelo turbulento RNG k-epsilon. A simulação computacional da técnica ultrassônica utilizou uma linha reta passando pelo eixo do duto.

Mattingly & Yeh (1999) avaliam que, utilizando como referência a velocidade máxima, para Re igual $4,3 \times 10^5$, uma frente plana leva até 42D para se desenvolver; um perfil assimétrico, 69D; e no caso de existirem vórtices, o comprimento necessário ultrapassa os 99D. Foi considerado que a diferença

máxima aceita no parâmetro de referência é de 1%. Também, quanto maior for o Re , maior será o trecho reto necessário.

Jeanney & Piguet (2000) descrevem a simulação numérica que teve por objetivo estimar o erro na medição de vazão por medidores ultrassônicos e por placa de orifício, introduzido por distúrbios no escoamento. Utilizaram um software próprio de dinâmica de fluidos computacional (CFD) de três dimensões (3-D). As configurações avaliadas são: duas curvas em planos distintos e uma representação do circuito da usina nuclear da *Electricité de France* (EDF). As simulações e testes experimentais foram realizados para definir fatores e reduzir os erros devido aos distúrbios no escoamento. Analisaram a resposta do medidor em diferentes posições axiais e angulares. Compararam o perfil de velocidade traçado por CFD com o perfil medido com o LDV a dois diâmetros a jusante das curvas. O fator teórico utilizado pelo fabricante do medidor ultrassônico é função apenas de Re , mas chegava a erros de 20%, o que foi melhorado pelo uso dos fatores definidos pela simulação numérica, que caiu para menos de 2% em algumas posições angulares. A simulação numérica foi coerente com o resultado experimental em 9 dos 12 pontos avaliados a 2D, entre -180° a $+180^\circ$.

2.3.

Base Metrológica na Medição de Vazão e Volume

2.3.1.

Metrologia Legal e Metrologia Científica na Medição de Vazão

A Convenção do Metro é uma organização internacional de metrologia científica que tem por objetivo formar uma referência comum para cientistas e engenheiros. O Brasil é representado pelo Inmetro. O *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) é o segmento da Convenção do Metro encarregado de estabelecer os padrões fundamentais, conservar protótipos internacionais, efetuar a comparação entre padrões nacionais e internacionais, e tem como missão assegurar a unificação mundial das medidas físicas.

O BIPM constituiu o JCGM (*Joint Committee for Guides in Metrology*) para elaboração e revisão de Guias de Metrologia incluindo dois grupos de trabalho: o WG1, responsável pelo *Guide to the Expression of Uncertainty in*

Measurement, abreviado para ISO/GUM (ISO, 2008), e o WG2, responsável pelo *International Vocabulary of Metrology*, abreviado para ISO/VIM (ISO, 2007). As versões em português foram publicadas pelo Inmetro sob o título *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*, abreviado para GUIA (Inmetro, 2003), e *Vocabulário Internacional de Metrologia*, abreviado para VIM (Inmetro, 2009). O objetivo é formar uma linguagem única na medição.

A OIML (*Organisation Internationale de Métrologie Légale*) é uma organização intergovernamental, com o propósito de promover a harmonização global dos procedimentos de metrologia legal. O Brasil como país associado é representado pelo Inmetro. Um foco da metrologia legal envolve a aprovação de modelo de sistemas de medição e dos medidores utilizados nesses sistemas. Também, todos os sistemas de medição sujeitos à inspeção são submetidos a verificação inicial e a verificações periódicas.

Segundo o VIM, a calibração abrange:

- a) Numa primeira etapa e sob condições especificadas, estabelece uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidas por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas.
- b) Numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação para a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação.

Os medidores de vazão medem diretamente vazão mássica, vazão volumétrica, volume totalizado ou massa totalizada. Na calibração, a grandeza utilizada como referência é volume, massa, ou vazão média. Desta forma, os parâmetros indicados no certificado só são válidos para a medição associada a uma quantidade igual ou maior à quantidade utilizada na calibração. Para quantidades menores, não é possível garantir que os resultados se apliquem.

O erro máximo admissível e o erro de repetitividade são parâmetros utilizados na indicação do desempenho de medidores de vazão e aparecem em catálogos, folhas de dados, regulamentações, normas e certificados de aprovação de modelo. A incerteza é um parâmetro que, associado ao resultado da medição, caracteriza a dispersão de valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando, está diretamente ligada ao desvio padrão do resultado da medição. O erro máximo admissível, o erro de repetitividade e a incerteza de medição devem ser determinados sempre que o medidor for calibrado.

Os parâmetros de desempenho estão sempre associados a uma faixa de vazão especificada (de q_{min} a q_{max}), que é a faixa na qual o fabricante garante que o medidor consegue atingir o desempenho especificado. Para medidores de vazão, q_{min} é sempre maior que zero. É interessante que a faixa de operação do medidor esteja contida na faixa especificada (ou faixa de trabalho).

A quantidade mínima mensurável de um sistema de medição definida pela RTM-64 é o menor volume de líquido para o qual a medição atende às características metrológicas estabelecidas nas exigências regulamentadas. Existem critérios que definem essa quantidade mínima em função de características da instalação do sistema de medição e a quantidade utilizada na calibração é um aspecto a ser considerado.

O planejamento de uma calibração é função dos objetivos a serem alcançados. Uma calibração do fabricante para identificar os fatores do medidor (*fingerprint*) pode ter como objetivo utilizar volumes maiores para que o resultado não sofra influência da quantidade de referência. Entretanto, em outra calibração do mesmo medidor para, por exemplo, validar seu uso em uma dada aplicação, a calibração pode ser realizada buscando a quantidade mínima que o medidor consegue manter o desempenho especificado.

2.3.2.

Erro de Medição e Erro Máximo Admissível

Erro de medição, ou simplesmente erro, é definido como a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência (VIM, 2009). Em uma calibração, as diferenças entre o resultado do mensurando e o resultado do padrão são erros. Na última versão do VIM, o vocábulo desvio não aparece na lista de definições.

O erro sistemático pode ser minimizado pelo processo de calibração do medidor. O resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda, tão somente uma estimativa do valor do mensurando por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos. Uma vez que o erro sistemático não pode ser perfeitamente conhecido, a compensação não pode ser completa. Também, um efeito sistemático não reconhecido não pode ser levado em consideração na

avaliação da incerteza do resultado de uma medição, porém contribui para seu erro (GUIA).

O erro máximo admissível (EMA) é o valor extremo do erro de medição, com respeito a um valor de referência conhecido, aceito por especificações ou regulamentos para uma dada medição, instrumento de medição ou sistema de medição (VIM). Indica os limites de aceitação de um dado instrumento de medição. A OIML R-117 e o RTM-64, que são os regulamentos, internacional e nacional para sistemas de medição de vazão de líquidos, definem as classes de exatidão para os medidores de vazão, associadas ao erro máximo admissível, como descrito na Tabela 2-4. O melhor desempenho é conseguido na classe de exatidão 0.3, com erro máximo admissível do medidor igual a 0,2%.

Tabela 2-4: Erro máximo admissível, repetitividade e incerteza de medidores de vazão de líquidos em função da classe de exatidão.

	Classe de Exatidão			
	0.3	0.5	1.0	1.5
EMA do Sistema	0,3%	0,5%	1,0%	1,5%
EMA do Medidor	0,2%	0,3%	0,6%	1,0%
Repetitividade	0,12%	0,2%	0,4%	0,6%
Incerteza Expandida na Aprovação de Modelo	0,06%	0,1%	0,2%	0,3%
Incerteza Expandida nas Verificações	0,10%	0,17%	0,33%	0,5%

Na aprovação de modelo, os erros do medidor devem ser determinados em, no mínimo, seis vazões nominais distribuídas em uma faixa de medição em intervalos regulares. Em cada vazão, os erros devem ser determinados pelo menos três vezes de maneira independentes. Cada erro não deve ser superior ao erro máximo admissível. A OIML R-117 e o RTM-64 exigem que na determinação dos erros, a incerteza expandida das medições de volume ou massa seja inferior a um quinto do erro máximo admissível em aprovação de modelo, e um terço do erro máximo admissível em outras verificações. (ver Tabela 2-4)

O regulamento internacional de metrologia legal aplicável à medição de vazão de gás natural é a OIML R-137. Até o momento não há regulamento correspondente do Inmetro. A Tabela 2-5 indica o erro máximo admissível do medidor de vazão de gás. Existem várias diferenças entre a apresentação do erro máximo admissível para gás e para líquido. No líquido, o erro máximo está

associado a uma única faixa especificada, enquanto que no gás há uma vazão de transição (q_t) tal que de q_{min} a q_t o erro máximo admissível sempre é maior do que de q_t a q_{max} .

Tabela 2-5: Erro máximo admissível de medidores de vazão de gás em função da classe de exatidão pela OIML R-137.

Atividade	Vazão q	Classe de Exatidão		
		0.5	1	1.5
Aprovação de Modelo e Verificação Inicial	$q_{min} \leq q \leq q_t$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 3\%$
	$q_t \leq q \leq q_{max}$	$\pm 0,5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 1,5\%$
Em Serviço	$q_{min} \leq q \leq q_t$	$\pm 2\%$	$\pm 4\%$	$\pm 6\%$
	$q_t \leq q \leq q_{max}$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 3\%$

Outra diferença nessas tabelas se refere ao significado do nome das classes de exatidão. No líquido, o nome da classe está associado ao sistema de medição, enquanto que no gás, está associado à faixa de menor erro máximo admissível do medidor. O melhor desempenho para o medidor de vazão de gás natural é conseguido na classe de exatidão 0.5, com erro máximo admissível do medidor igual a 0,5%.

2.3.3.

Repetitividade

A repetitividade, segundo o VIM, é o grau de concordância entre valores medidos, obtidos por medições repetidas e independentes sob o mesmo procedimento, mesmo operador, mesmo equipamento utilizado sob as mesmas condições, mesmo local, durante um curto espaço de tempo.

A OIML R-117 e o RTM-64 definem repetitividade (ou erro de repetitividade) como a diferença entre o maior e o menor resultado de uma série de medições sucessivas de uma mesma quantidade, realizadas nas mesmas condições. Para qualquer quantidade igual ou maior que cinco vezes a quantidade mínima medida, o erro de repetitividade não deve ser maior que dois quintos do erro máximo admissível. Assim, para medidores com classe de exatidão 0.3, a repetitividade não deve ser maior que 0,12% (ver Tabela 2-4).

Os valores de repetitividade, pela OIML, Inmetro, API, ISO, são apresentados em percentual, o que é seguido pelos laboratórios de calibração. Pela

OIML e Inmetro, o valor relativo da repetitividade é a diferença entre a maior e a menor quantidade medida, dividida pelo valor indicado pelo padrão.

Em algumas situações que não envolvem aprovação de modelo, a diferença do maior para o menor valor é dividida pela média das quantidades medidas ou pelo valor mínimo da quantidade medida.

Pela definição da ISO 3534-2 (2006), o limite de repetitividade indica a faixa para da diferença absoluta esperada (com uma probabilidade de aproximadamente 95%) entre dois valores finais, cada um representando uma série de resultados de medição.

A API 13.1 (2006) define repetitividade como o range de incerteza devido a erros randômicos para a diferença entre duas medições e associa a repetitividade (*Repe*) ao desvio padrão $s(y)$ da diferença absoluta entre duas medições repetidas com distribuição normal:

$$Repe = t_{95,n-1} \sqrt{2} s(y) \quad (2-117)$$

onde, $t_{95,n-1}$ é o coeficiente t de Student para probabilidade de 95% para uma amostra de tamanho n .

A API 12.2.3 indica que nas provas dos medidores de vazão, a repetitividade (*Repe%*) seja determinada pela diferença entre valores mínimos e máximos, conforme a equação:

$$Repe\% = \frac{Max - Min}{Min} \times 100 \quad (2-118)$$

Max e *Min* podem estar indicando o volume máximo e o volume mínimo de uma série de volumes medidos, quando calibrados utilizando-se um padrão de volume fixo. É previsto também que *Max* e *Min* correspondam ao valor máximo e valor mínimo dos fatores do medidor (*MF*).

Seguindo a API 12.2.3, na prova do medidor, a repetitividade dos resultados não deve exceder a 0,05%. No caso de o medidor que estiver sendo provado seja um medidor mestre de prova (que será utilizado como padrão em provas de outros medidores), a repetitividade não deve exceder a 0,02%.

Conforme a API 4.8, na calibração do provador, a equação de cálculo da repetitividade segue também o padrão da eq. (2-118), com *Max* e *Min* correspondendo ao volume máximo e mínimo medido pelo provador. Na calibração do provador, a repetitividade não deve exceder 0,02%.

A repetitividade de um conjunto de resultados pode diferir não só devido à equação utilizada, mas também devido os método de obtenção e seleção dos dados.

A API 12.2.3 apresenta exemplos de sequências de corridas⁴ usuais na indústria: selecionar 5 corridas consecutivas em 6 corridas consecutivas realizadas; 5 corridas em 6 corridas consecutivas; 5 corridas consecutivas em 10 corridas consecutivas; 3 conjuntos de 5 corridas; quaisquer 5 corridas consecutivas; 3 corridas consecutivas; 2 conjuntos de 10 corridas. Por outro lado, na metrologia legal, não é aceito o descarte de um ou mais valores, apenas pelo fato de colocarem um conjunto de dados fora da faixa de repetitividade esperada.

A AGA 9, aplicável à medição de gás natural com medidores ultrassônicos multicanais, indica para os medidores de vazão, repetitividade máxima de: $\pm 0,2\%$ para vazões entre q_t e q_{max} , e $\pm 0,4\%$ para vazões entre q_{min} e q_t . As vazões q_{max} , q_{min} e q_t são especificadas pelo fabricante. A AGA 9 indica, para a faixa total de repetitividade, o valor médio menos a repetitividade até o valor médio mais a repetitividade.

A Tabela 2-6 mostra os resultados de uma calibração de um medidor de vazão utilizando um provador convencional como padrão. Foram realizadas 5 corridas. A média dos volumes medidos é $14.036,2 \text{ m}^3$ e o volume do padrão é 14.036 m^3 . A repetitividade é calculada pelos diferentes algoritmos. Esse exemplo mostra que os valores obtidos para repetitividade podem diferir significativamente em função da equação utilizada. Nessa tabela, as variáveis *Max*, *Min* e *Pad* representam, respectivamente, a quantidade máxima, a quantidade mínima e a quantidade indicada pelo padrão.

Todas as equações utilizadas da Tabela 2-6 calculam a dispersão, mas há equações que passam a idéia de uma faixa que inclui o valor médio menos a repetitividade e o valor médio mais a repetitividade, enquanto em outras passa o conceito de a repetitividade como a faixa total que envolve a média. O valor da repetitividade pode mudar de forma significativa em função do procedimento e da equação utilizados.

⁴ Cada corrida disponibiliza um valor de medição para o medidor em calibração e um valor para o provador.

Tabela 2-6: Calibração de medidor de vazão e repetitividade em função do algoritmo utilizado (Volume do padrão: 14.036 m³).

Resultado da Calibração		Repetitividade (%)	
Corrida	Volume (m ³)	Equação	Resultado
1	14.033	$s(y)$	0,015
2	14.037	$2 s(y)$	0,031
3	14.036	$2\sqrt{2} s(y)$	0,044
4	14.036	$t_{95,n-1} s(y)$	0,043
5	14.039	$t_{95,n-1} \sqrt{2} s(y)$	0,061
Média	14.036,2	$t_{95,n-1} 2 s(y)$	0,086
		$(Max-Min) / Pad$	0,043
		$(Max-Min) / (2 Pad)$	0,021
		$(Max-Min) / Min$	0,043
		$(Max-Min) / (2Min)$	0,021

2.3.4.

Incerteza de Medição

A incerteza de medição é um parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (GUIA).

A análise da incerteza de sistemas de medição de vazão é incluída nas normas ANSI/ASME MFC-2M (1983) e ISO 5168 (2005). O caso particular de incerteza associada à medição de gás natural com placa de orifício é descrito no AGA 3.1 (1993). A norma AGA 9 inclui recomendações para cálculo da incerteza de sistemas de medição de gás natural com medidores ultrassônicos.

O GUIA indica que a incerteza seja determinada pelo desvio padrão do mensurando, que pode ser analisado como variável aleatória ou distribuição de probabilidade. Independentemente de o método de avaliação da incerteza tomar por base a análise estatística de séries de observações (avaliação do Tipo A) ou outros meios que não a análise estatística de séries de observações (avaliação do Tipo B), o parâmetro base para o cálculo de incerteza é o desvio padrão, nas unidades do mensurando.

Sendo Y o mensurando, determinado a partir de n outras grandezas X_1, X_2, \dots, X_n , através da relação funcional f , então: $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Sendo y a estimativa do mensurando Y e usando as estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_n , o resultado da medição que é a estimativa y é dado por: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Incerteza padrão é a incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio padrão ($u(x_i) = s(x_i)$).

Se $y = f(x_i)$, a incerteza padrão de y é igual à raiz quadrada positiva da soma das variâncias ou covariâncias dessas grandezas ponderadas de acordo com o peso da grandeza no resultado da medição. Nesse caso, a incerteza é denominada de incerteza padrão combinada ($u_c(y)$).

No caso em que todas as grandezas de entrada (x_i) podem ser consideradas independentes, as covariâncias podem ser desprezadas, o que em geral pode ser aplicado nas medições de vazão.

A derivada parcial de f com relação à x_i é denominada de coeficiente de sensibilidade de Y com relação a x_i (c_i):

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (2-119)$$

Assim, a incerteza padrão combinada de Y , $u_c(y)$, é determinada a partir das incertezas padrão $u(x_i)$ e dos coeficientes de sensibilidade c_i :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \right) = \sum_{i=1}^n (c_i^2 u^2(x_i)) \quad (2-120)$$

A parcela de incerteza em y devido à x_i , ou seja, $c_i u(x_i)$, é representada por $u_i(y)$ e, assim:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n u_i^2(y) \quad (2-121)$$

A partir de $u_c(y)$, é definido o intervalo em torno do qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição que poderiam ser atribuídas ao mensurando. Assim, é definida a incerteza expandida (U) que corresponde à incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência (k):

$$U = k u_c(y) \quad (2-122)$$

O fator de abrangência e, portanto, o intervalo de U está sempre associado a uma dada probabilidade de abrangência (p) ou nível da confiança do intervalo.