

## 2 Fundamentação teórica

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos oriundos da mecânica dos fluidos aplicados na medição de vazão, o princípio de funcionamento dos medidores ultrassônicos que operam por diferença de tempos de trânsito, além da influência das condições do escoamento no funcionamento destes medidores.

### 2.1. Conceitos

#### 2.1.1. Fluido

De acordo com Fox & McDonald [9], fluido é uma matéria que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento, não importa o quão pequena ela possa ser. De acordo com esta definição, podem ser considerados fluidos os gases, os vapores e os líquidos.

#### 2.1.2. Massa específica e densidade

A *massa específica*  $\rho$  de uma mistura homogênea é a razão entre sua massa  $m$  e o volume  $V$  ocupado por esta massa. Desta forma, pode-se dizer que a massa específica mede o grau de concentração de uma massa em determinado volume.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

No Sistema Internacional de Unidades, SI, [10] a unidade de massa específica é o  $\text{kg/m}^3$ , porém é bastante comum esta propriedade ser expressa em  $\text{g/cm}^3$ . A relação entre estas unidades é:

$$1 \text{ g/cm}^3 = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

*Densidade* é a razão entre a massa específica de uma determinada substância e a massa específica de uma substância de referência, sendo, por este motivo, uma grandeza adimensional. Em geral, a densidade dos gases é determinada tomando como referência a massa específica do ar na temperatura de 21,1°C e a 101 325 Pa de pressão. A densidade de substâncias nos estados líquido e sólido é determinada, em geral, tomando como referência a massa específica da água a 4°C e 101 325 Pa.

A propriedade massa específica é encontrada em algumas literaturas pelos termos *densidade específica* ou *densidade absoluta*. Estes termos foram originados a partir da tradução equivocada do termo “*density*”, que é o correspondente na língua inglesa para o termo massa específica.

### 2.1.3. Viscosidade

Considere a Fig. 5, onde um fluido está contido sobre duas placas paralelas distantes entre si de um comprimento infinitesimal  $dy$ . Uma das placas permanece em repouso enquanto a outra se move retilineamente com velocidade constante igual a  $v$ .

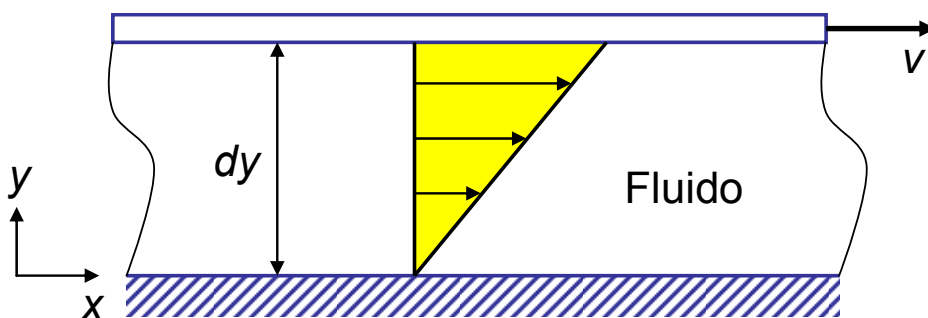


Figura 5 – Deformação de um fluido

A tensão de cisalhamento  $\tau_{xy}$  aplicada pela placa em movimento em relação ao fluido, para o caso de fluidos newtonianos, é dada por:

$$\tau_{xy} = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

Define-se *viscosidade absoluta* ou *viscosidade dinâmica* de um fluido,  $\mu$ , a constante que representa sua resistência à deformação. Assim, quanto maior a viscosidade, maior será a necessidade de energia para escoar o fluido.

Os fluidos não newtonianos têm comportamento não linear entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade, e em virtude disto a Eq. (3) não se aplica.

A relação entre a viscosidade absoluta e a massa específica de um fluido é definida como *viscosidade cinemática*,  $\nu$ .

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

No SI [10] a unidade para a viscosidade é o Pa.s (N.s/m<sup>2</sup>), e a unidade para viscosidade cinemática é o m<sup>2</sup>/s. Entretanto, é comum em problemas de engenharia a utilização do *centipoise (cP)* para a viscosidade dinâmica e do *centistoke (cSt)* para viscosidade cinemática. As relações para conversão entre estas unidades são:

$$1 \text{ Pa.s} = 10^3 \text{ centipoise}$$

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^6 \text{ centistoke}$$

#### 2.1.4. Coeficiente adiabático

Para definir o coeficiente adiabático é necessário definir primeiramente o *calor específico C* que, de acordo com Van Wylen [11], é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma determinada substância de um grau por unidade de massa.

Uma análise da equação de estado dos gases ideais (Eq. (5)) permite definir duas formas especiais distintas de aumento da temperatura: a) considerando o volume constante, ou lei de Gay-Lussac; (b) considerando a pressão constante, ou lei de Charles.

$$p \cdot \frac{V}{m} = R \cdot T \quad (5)$$

onde  $R$  é a constante universal dos gases ( $R = 8,314 \text{ 472 J/mol.K}$  [13]).

Desta forma, o calor específico pode se apresentar também de duas formas especiais distintas: calor específico a volume constante  $C_v$ ; e calor específico à pressão constante  $C_p$ .

O *coeficiente adiabático*,  $\kappa$ , é definido como a razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a volume constante, ou seja:

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v} \quad (6)$$

### 2.1.5. Número de Reynolds

Desenvolvido por Osborne Reynolds no final do século XIX, o *número de Reynolds*,  $Re$ , é um parâmetro adimensional largamente empregado na mecânica dos fluidos e representa a razão entre duas das forças encontradas nos fluidos em escoamento: as forças de inércia e as forças viscosas. Para um fluido escoando no interior de uma tubulação de seção transversal circular,  $Re$  pode ser calculado pela expressão:

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot D}{\mu} \quad (7)$$

onde  $\bar{v}$  é a velocidade média do escoamento e  $D$  representa o diâmetro interno do tubo por onde escoo o fluido.

O número de Reynolds indica quais forças são predominantes no escoamento, e em virtude disto é um critério que permite determinar seu regime: se laminar, de transição, ou turbulento.

Os limites mais aceitos na literatura para se determinar o regime do escoamento em tubulações lisas, seja para líquidos, gases ou vapores são: 2000 e 4000. Assim, para valores menores que 2000 o escoamento será laminar e para valores maiores que 4000 o escoamento será turbulento. Entre estes dois valores o escoamento é considerado como de transição.

As Fig. 6 e 7 mostram, respectivamente, representações de escoamentos em regime laminar e turbulento completamente desenvolvidos no interior de

tubos circulares. Em regime laminar o perfil do escoamento é um parabolóide representado pela Eq. (8) e a velocidade no centro do tubo (velocidade máxima,  $v_{max}$ ) é duas vezes a velocidade média do escoamento (Fig. 8). Sob regime turbulento o perfil da velocidade do escoamento se apresenta achatado e a velocidade no centro do tubo é cerca de 1,2 vezes a velocidade média.

$$v_r = v_{max} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (8)$$

onde:

$v_r$  = velocidade na cota  $r$

$r$  = distância radial a partir do centro

$R$  = raio do tubo

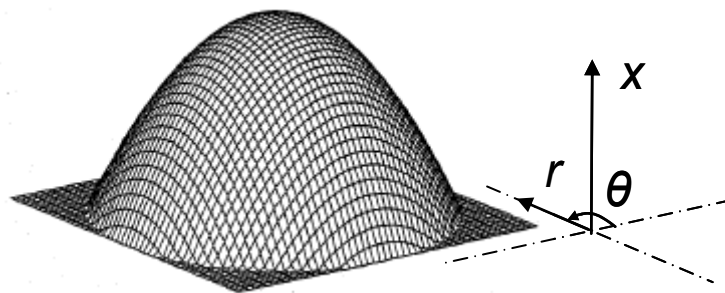


Figura 6 – Representação gráfica de um perfil de escoamento em regime laminar.

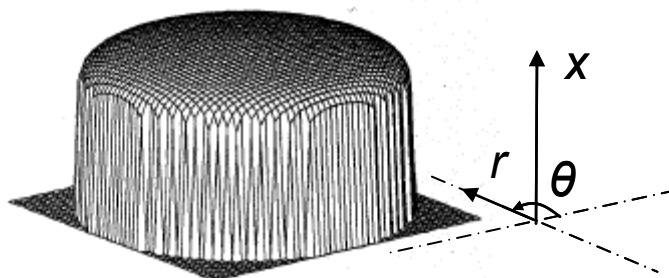


Figura 7– Representação gráfica de um perfil de escoamento em regime turbulento.

Além de permitir a determinação do regime do escoamento de um fluido, o número de Reynolds constitui a base para estudo do comportamento de sistemas reais pelo uso de modelos físicos reduzidos. Pode-se dizer então que dois sistemas são dinamicamente semelhantes se o Número de Reynolds for o mesmo para ambos.

### 2.1.6. Perfil de velocidade

O perfil de escoamento (ou perfil de velocidades) do fluido que escoar através de uma tubulação cilíndrica tem fundamental influência sobre a medição de vazão quando se empregam as principais tecnologias disponíveis atualmente, tais como os medidores deprimogênicos (p. ex. a placa de orifício) e os medidores ultrassônicos.

Para o caso dos medidores deprimogênicos, as equações estão baseadas em experimentos realizados sob condições de regime turbulento e escoamento completamente desenvolvido [14].

De acordo com Fox e McDonald [9], um escoamento pode ser uni, bi, ou tridimensional em função do número de coordenadas espaciais necessárias para se especificar o campo de velocidade. A Fig. 8 representa um perfil de escoamento unidimensional, uma vez sua velocidade varia apenas em função do diâmetro do tubo.

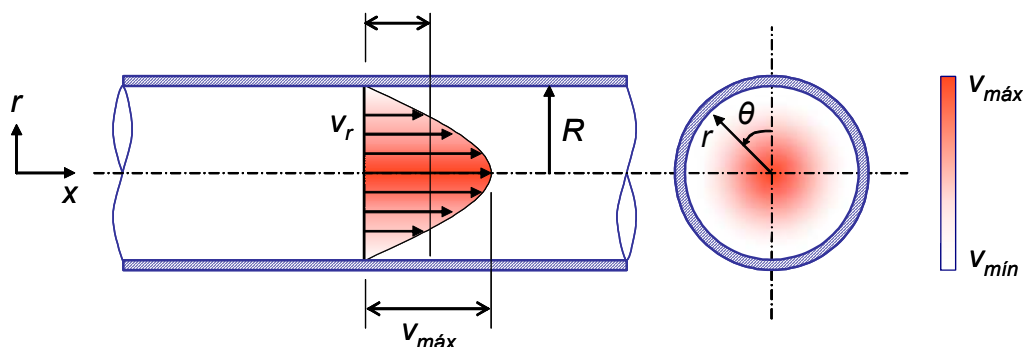


Figura 8 - Perfil de escoamento unidimensional.

As Fig. 9, 10 e 11 representam perfis de escoamento com distorções conhecidas, respectivamente, como turbilhonamento (do inglês *swirl*), assimetria e escoamento cruzado (do inglês *cross flow*). O *swirl* é a condição onde o escoamento se dá em forma de uma espiral. Normalmente ocorre devido a utilização de duas curvas em planos distintos a montante do medidor. A assimetria é a condição onde a velocidade máxima não ocorre no centro do tubo. Sua causa mais freqüente são válvulas parcialmente fechadas ou qualquer obstrução na tubulação. *Cross flow* é uma condição causada normalmente por uma curva na tubulação a montante que resulta em dois vórtices com sentidos de rotação contrários. Da mesma forma que para a Fig. 8, nas Fig. 9, 10 e 11 a

cor mais escura representa a região de máxima velocidade, e a cor mais clara a região de velocidade mínima.

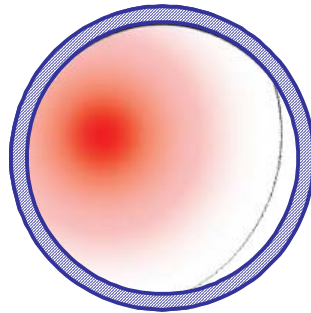


Figura 9 – Escoamento com perfil assimétrico.

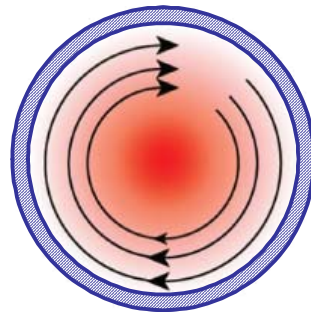


Figura 10 – Escoamento com *swirl*.

Conforme será visto adiante, estes tipos de distorção, apesar de serem características do escoamento, influenciam fortemente a exatidão do medidor em operação. Também serão vistos os requisitos mínimos para instalação de medidores ultrassônicos previstos na AGA 9 [7], cuja finalidade é garantir que as incertezas estejam dentro dos limites especificados.

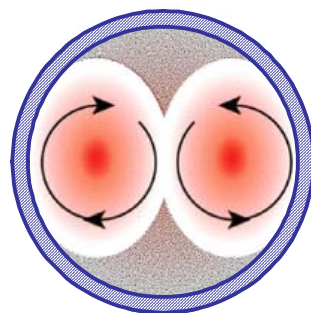


Figura 11 – Escoamento com *cross flow*.

### 2.1.7. Fator de compressibilidade

De acordo com Van Wylen [11], um gás perfeito é aquele que se comporta de acordo com a Eq. (6), que pode ser aplicada com razoável exatidão para gases reais e vapores que apresentem pressões muito baixas.

A discussão em torno da exatidão da equação de estado do gás ideal introduz o conceito do *fator de compressibilidade*  $Z$ . O fator de compressibilidade é um parâmetro que expressa o afastamento do comportamento de um gás real em relação ao gás ideal, e pode ser determinado da seguinte forma:

$$Z = \frac{P.V}{n.R.T} \quad (9)$$

onde  $n$  é o número de moles do gás.

Nos sistemas de medição de gás natural modernos o fator de compressibilidade é atualizado instantaneamente nos computadores de vazão a partir de sua composição e de algoritmos disponíveis na AGA 8 [12].

## 2.2. Princípio de funcionamento de medidores ultrassônicos

Medidores ultrassônicos utilizam os tempos de trânsito de ondas sonoras emitidas entre dois transdutores cuja distância entre si é conhecida, para calcular a velocidade média do escoamento entre os dois.

### 2.2.1. A onda sonora

De acordo com Santin [15], as ondas sonoras são ondas mecânicas que consistem na oscilação de partículas atômicas ou moleculares de uma substância em torno da sua posição de equilíbrio. De acordo com a frequência desta oscilação, o som pode ser classificado como infrassom, som audível e ultrassom, em referência à capacidade auditiva do ser humano, que pode ouvir sons com frequência na ordem de 20 a 20 000 Hz. A Fig. 12 simboliza o espectro das frequências sonoras.



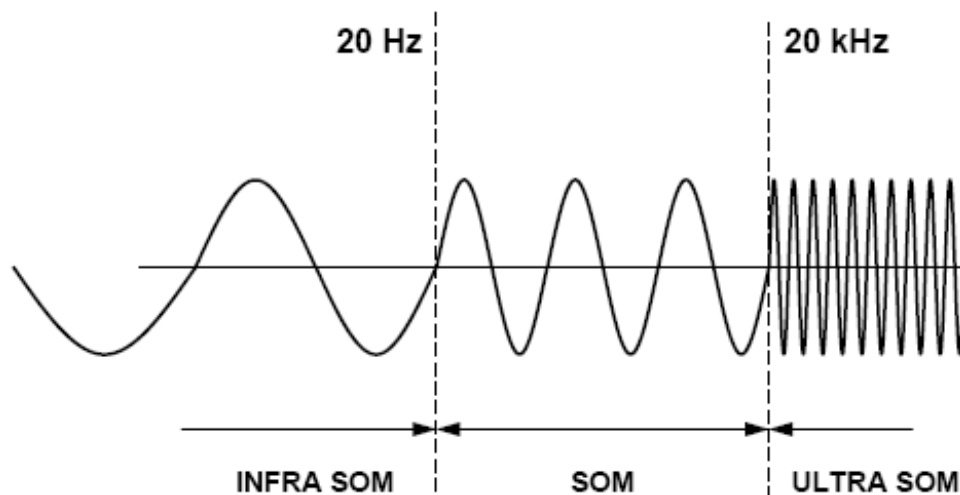


Figura 12 – Espectro de frequências sonoras

As ondas ultrassônicas comportam-se da mesma forma que ondas sonoras audíveis, ou seja, é necessário um meio elástico (que pode ser sólido, líquido ou gasoso) para que haja propagação. Sua velocidade de propagação depende exclusivamente das propriedades do meio, além disto a onda ultrassônica está sujeita a reflexão, refração e difração.

A maneira mais usual de geração de ondas ultrassônicas é através do efeito piezométrico, característica observada em alguns cristais. O efeito piezométrico consiste na geração de uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades do material, originada a partir de uma deformação mecânica. O contrário também é observado, ou seja, se uma diferença de potencial elétrico é aplicada entre duas faces opostas de um cristal, será observada uma deformação do mesmo.

Submetendo as faces opostas de um cristal piezométrico a uma corrente elétrica alternada com frequência maior do que 20 kHz será observada uma vibração mecânica na mesma frequência desta corrente elétrica, gerando-se, assim, uma onda ultrassônica. A geometria dos cristais piezométricos é calculada de forma que sua frequência natural de vibração seja igual à frequência da corrente elétrica de excitação, maximizando, desta forma, sua amplitude de vibração e, conseqüentemente, a energia propagada.

Medidores ultrassônicos para gás natural utilizam frequências de excitação variando entre 50 e 500 kHz.

### 2.2.2. Cálculo da vazão para medidores ultrassônicos de trajetória única

Medidores de vazão que utilizam o princípio do ultrassom são, em sua essência, medidores de velocidade. Seu princípio de funcionamento consiste em emitir pulsos ultrassônicos em uma mesma direção, porém em sentidos contrários, no interior de um tubo, como mostra a Fig. 13.

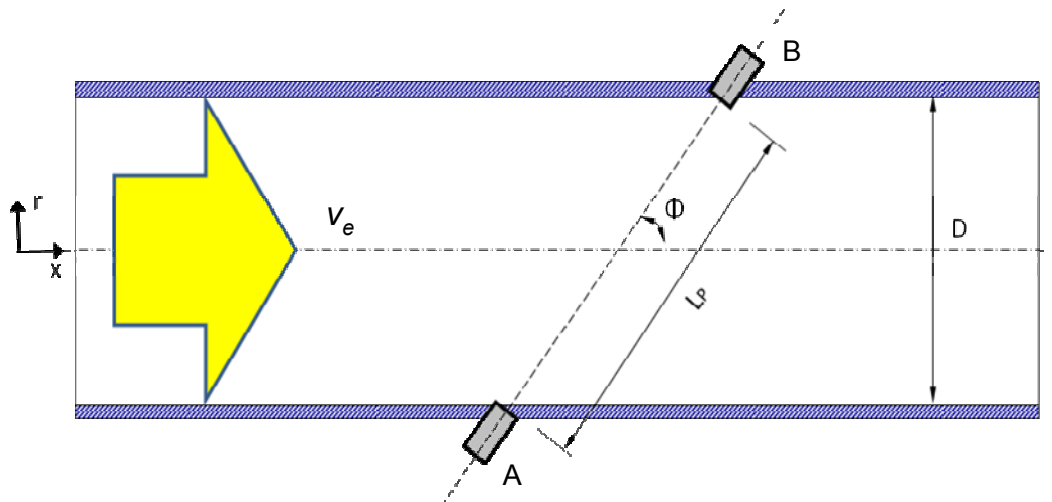


Figura 13 – Princípio de funcionamento de medidores ultrassônicos.

Os transdutores A e B representados na Fig. 13 são formados por cristais piezelétricos e operam tanto como emissores quanto como receptores dos sinais ultrassônicos. A medição realizada é a dos tempos de trânsito dos pulsos ultrassônicos lançados de A para B – aqui denominados  $t_{AB}$  – e de B para A – denominados  $t_{BA}$ .

Medidos  $t_{AB}$  e  $t_{BA}$  e conhecido o caminho acústico  $L_p$ , pode-se determinar as velocidades dos pulsos ultrassônicos lançados em ambos os sentidos, ou seja, de A para B –  $v_{AB}$  – e de B para A –  $v_{BA}$  – respectivamente.

Assim, considerando que a velocidade do fluido ao longo da seção transversal do tubo é constante e igual a  $v_e$ , tem-se:

$$v_{AB} = \frac{L_p}{t_{AB}} = c + v_e \cdot \cos \phi \quad (10)$$

e,

$$v_{BA} = \frac{L_p}{t_{BA}} = c - v_e \cdot \cos \phi \quad (11)$$

onde  $c$  é a velocidade do som no fluido contido no interior do tubo.

Subtraindo (10) de (11), tem-se:

$$\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} = \frac{2 \cdot v_e \cdot \cos \phi}{L_p} \quad (12)$$

Explicitando a velocidade média do escoamento  $v_e$ :

$$v_e = \frac{L_p}{2 \cdot \cos \phi} \cdot \left( \frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \quad (13)$$

Uma análise da Eq. (13) revela que a medição da velocidade do escoamento depende apenas dos parâmetros geométricos do medidor e da medição dos tempos de trânsito a favor (para jusante) e contra (para montante) o escoamento.

Conforme visto no item 2.1.5 (Fig. 6 e 7), escoamentos reais em tubulações tem velocidades variando ao longo da seção transversal do duto. Em virtude disto a Eq. (13) permite calcular apenas a velocidade média do escoamento ao longo do segmento de reta contido na trajetória acústica  $L_p$  entre seus dois transdutores, sendo, portanto, uma medição discreta. Para se determinar a vazão é necessário relacionar os tempos de trânsito  $t_{AB}$  e  $t_{BA}$  com a velocidade média do escoamento ao longo de toda a seção transversal.

Considerando um escoamento turbulento e completamente desenvolvido, a Eq. (13) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$v_m = C_n \cdot \left( \frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \quad (14)$$

onde  $v_m$  é a velocidade média do escoamento ao longo de toda a seção transversal e  $C_n$  é dado por:

$$C_n = \frac{L_p}{2 \cdot \cos \phi} \cdot K_n \quad (15)$$

$K_n$  é o fator que relaciona a velocidade média do escoamento com a velocidade calculada no caminho acústico contido entre os dois transdutores. Para escoamentos em tubos rugosos, este fator pode ser determinado pela equação [16], que é obtida integrando-se o perfil adimensional de velocidade turbulenta.

$$\frac{1}{K_n} = \frac{2}{\text{Re}} \left[ \left( \frac{\text{Re} \cdot \sqrt{\frac{f}{8}}}{2} - 10,8 \right) \left( \frac{1}{\sqrt{\frac{f}{8}}} + 1,8 \right) + 27 \cdot \ln \left( \frac{\text{Re} \cdot \sqrt{\frac{f}{8}}}{2} - 5,93 \right) \right]_n \quad (16)$$

Sendo  $f$  o fator de atrito, determinado através da equação de Colebrook e White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 - 2 \cdot \log \left( 2 \cdot \frac{K_s}{D} + \frac{18,7}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (17)$$

onde  $K_s$  é a rugosidade absoluta da parede interna do tubo.

Na prática, o valor de  $C_n$  é obtido através de calibração em laboratório, e a instalação de medidores ultrassônicos deve atender a requisitos previstos em normas e recomendações dos fabricantes visando garantir que o perfil de velocidade do escoamento em seu interior esteja o mais próximo possível das condições de calibração. Condições de escoamento em situações reais são uma importante fonte de erros, não somente de medidores ultrassônicos, como também dos demais princípios de medição que necessitam de um perfil de velocidade completamente desenvolvido.

Apesar do princípio físico de funcionamento dos medidores ultrassônicos ser conhecido há séculos, sua aplicação somente foi possível devido à evolução da eletrônica, que possibilitou a medição dos tempos de trânsito com exatidão suficientemente grande, considerando que a onda sonora viaja no interior de tubulações de até 3".

### 2.2.3. Cálculo da vazão para medidores ultrassônicos de múltiplas trajetórias

Medidores ultrassônicos com apenas um par de transdutores tem sua exatidão fortemente influenciada pelas condições de escoamento e outros fatores externos como, por exemplo, ruídos na mesma frequência de transmissão dos pulsos ultrassônicos. A influência dos ruídos no funcionamento do medidor será mais bem discutida no item 2.3.3.

Com a finalidade de aumentar a exatidão dos medidores de forma a permitir sua aplicação em pontos de medição de maior importância, surgiram novas configurações onde se utilizam mais de um par de transdutores.

Atualmente são comercializados medidores com configurações que utilizam 1 a 8 pares de transdutores, sendo que existem, em laboratório, medidores com até 12 pares.

Grande parte dos fabricantes utiliza medidores com quatro ou mais pares de transdutores ultrassônicos com o objetivo de atender os requisitos de incerteza exigidos para transferência de custódia e medição fiscal. Nestes medidores, cada par de transdutores determinará a velocidade média  $\bar{v}_i$  do escoamento apenas no segmento de reta contido entre eles, conforme discutido no item 2.2.2.

A velocidade média do escoamento  $v_m$  em toda a seção transversal do tubo será dada, de acordo com o valor da integral obtida pelos polinômios de Gauss-Legendre. Assim:

$$v_m = \sum_{i=1}^n w_i \cdot v_i \quad (18)$$

onde  $w_i$  são os fatores de ponderação que dependem da técnica de integração aplicada pelo fabricante, e  $v_i$  é a velocidade média na trajetória acústica  $i$ .

### 2.3. Ferramentas de diagnóstico

O desempenho dos medidores ultrassônicos depende, principalmente, da exatidão na medição dos tempos de trânsito entre seus pares de transdutores.

O princípio de funcionamento dos medidores ultrassônicos mostra que o cálculo da velocidade do escoamento independe da velocidade do som. Entretanto, a velocidade do som depende das características do gás, como sua composição e temperatura. O fato da velocidade de escoamento não depender da velocidade do som é verdade em virtude das medições dos tempos de trânsito serem realizadas em milissegundos, e a composição ou temperatura do gás não varia significativamente durante este período [17].

Com exceção do tempo de trânsito, todos os demais dados de entrada para a determinação da velocidade do escoamento e da velocidade do som são geométricos (comprimento do caminho acústico e ângulo formado entre o caminho acústico e a geratriz do tubo) e podem ser considerados constantes.

Um dos principais atributos dos medidores modernos é sua capacidade de autodiagnóstico dos problemas que podem lhe ocorrer. Neste sentido, medidores de múltiplos feixes são os únicos com esta capacidade, comparando tanto medições entre diferentes cordas quanto o diagnóstico de cada corda individualmente.

De acordo com John Lansing [17] alguns dos diagnósticos mais comuns nos medidores modernos são:

### 2.3.1. Ganho

O Ganho é uma característica apresentada por um dispositivo amplificador ou atenuador, que consiste em modificar a amplitude de um sinal aplicado à sua entrada. Assim, sendo  $X_{in}$  o valor de uma variável qualquer de entrada e  $X_{out}$  seu valor de saída, define-se o ganho,  $G$ , como:

$$G = \frac{X_{out}}{X_{in}} \quad (19)$$

O ganho é uma grandeza adimensional, porém comumente é expressa em decibels (dB), que é uma razão definida por:

$$G_{dB} = 20 \cdot \log \left( \frac{X_{out}}{X_{in}} \right) \quad (20)$$

O Ganho é um dos mais simples indicadores de bom funcionamento do medidor, pois indica se o equipamento está sujeito a condições que atenuam o sinal ultrassônico. Esta indicação é feita pelo nível de amplificação necessária para o que sinal recebido atinja uma amplitude adequada para ser processada pela eletrônica do medidor. Assim, um acréscimo no ganho significa que o sinal ultrassônico está sendo atenuado.

A velocidade do escoamento, por exemplo, influencia o ganho de forma diretamente proporcional. Assim, um aumento na velocidade implica em maior atenuação do sinal resultando em um aumento do ganho.

A metodologia e a apresentação do ganho variam de fabricante para fabricante, mas independentemente disto, o importante é obter valores próximos em todas as cordas para uma mesma condição de escoamento. Os fatores de maior influência sobre o ganho do sinal ultrassônico são a pressão e a velocidade do escoamento, e os medidores modernos tem ajuste automático do ganho em todos os canais.

Qualquer incremento no ganho em qualquer um dos canais pode indicar uma redução do sinal. Isto pode ocorrer, por exemplo, em função de uma deterioração do transdutor ou em virtude da presença de líquidos na linha.

A fim de evitar interpretações equivocadas de possíveis falhas é importante conhecer a influência que a pressão e a velocidade de escoamento do gás tem sobre o ganho. Em geral, o ganho é inversamente proporcional à pressão, e em casos de maior exatidão, também à temperatura. Desta forma, uma redução na pressão acarretará um aumento no ganho. Na maioria das aplicações, entretanto, a pressão do escoamento não apresenta variações significativas.

### **2.3.2. Qualidade do sinal**

A qualidade do sinal de medidores ultrassônicos é comumente denominada *performance*, porém não deve ser confundida com a exatidão do medidor. Todos os medidores ultrassônicos modernos realizam a medição dos tempos de trânsito, e conseqüentemente, da vazão instantânea, através do lançamento de múltiplos pulsos ultrassônicos através de cada uma de suas cordas. Idealmente, todos os pulsos lançados deveriam ser recebidos e utilizados no cálculo da vazão instantânea. A eletrônica dos medidores modernos, entretanto, é programada para rejeitar pulsos distorcidos e/ou

atenuados que poderiam comprometer o resultado da medição de vazão. Os critérios para a rejeição dos pulsos são estabelecidos pelo fabricante. Desta forma, a qualidade do sinal (ou *performance*) indica o nível de rejeição ou aceitação dos pulsos ultrassônicos em cada uma das cordas, e é representado, em geral, de forma percentual.

Outros motivos pelos quais o pulso pode ser rejeitado pela eletrônica do medidor são: a existência de ruídos na mesma faixa de frequência do medidor, distorções causadas por excesso de velocidade, e contaminação na face do transdutor.

Tipicamente, em condições normais de operação a qualidade do sinal deve ser de 100%. Com o aumento da velocidade é esperada uma redução deste valor, podendo chegar a menos de 50% quando a velocidade do escoamento se aproxima do limite máximo da faixa de medição do equipamento. Em geral, esta redução na qualidade do sinal não representa grandes impactos na exatidão do medidor. Entretanto, se este valor estiver abaixo de 25% pode-se dizer que o medidor não está operando na sua melhor capacidade, e uma investigação deve ser realizada.

Além disto, através do monitoramento contínuo desta ferramenta de diagnóstico é possível identificar, por exemplo, uma redução na qualidade do sinal de apenas uma corda, o que indica uma falha iminente em seus transdutores. Monitorando também o ganho é possível identificar um possível aumento da velocidade do escoamento, a contaminação dos transdutores ou um excesso de ruído.

### **2.3.3. Relação sinal-ruído**

Relação sinal-ruído ou razão sinal-ruído (freqüentemente abreviada por SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*) é um conceito de engenharia elétrica também usado em diversos outros campos que envolvem medidas de um sinal em meio ruidoso. É definido como a razão da potência de um sinal e a potência do ruído sobreposto a este sinal.

Em outras palavras, a relação sinal-ruído compara o nível do sinal desejado com o nível do ruído de fundo. Quanto mais alta for a relação sinal-ruído, menor é o efeito do ruído de fundo sobre a detecção ou medição do sinal. A relação sinal-ruído pode ser calculada pela expressão:



$$SNR = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{ruído}}} = \left( \frac{Am_{\text{signal}}}{Am_{\text{ruído}}} \right)^2 \quad (21)$$

onde  $P$  é a potência média do sinal e  $Am$  é o valor quadrático médio (RMS) da sua amplitude.

A relação sinal-ruído nos medidores ultrassônicos representa um limite de qualidade aceitável para o sinal. Além disso, também fornece informações valiosas para a verificação das condições de funcionamento do medidor e alerta para possíveis problemas iminentes. Normalmente, valores fora dos limites estabelecidos pelo fabricante geram alarmes para o operador.

Conforme dito anteriormente, os transdutores de um medidor são, ao mesmo tempo, emissores e receptores dos pulsos ultrassônicos; neste sentido, cada transdutor é capaz de captar ruídos de fontes estranhas ao invés dos pulsos lançados por seu transdutor correspondente, e processar tais informações.

Medidores modernos monitoram o ruído de fundo captado no intervalo entre os pulsos lançados por seu transdutor correspondente. Ruídos são causados, principalmente, por válvulas de controle instaladas muito próximas ao medidor ou pressões diferenciais muito elevadas, e podem estar no mesmo espectro da frequência de trabalho do próprio medidor. Quando isto ocorre, o medidor pode ter dificuldade de diferenciar o sinal do ruído, e em casos extremos o ruído pode submergir o sinal ultrassônico de forma que o medidor fique inoperante. As Fig. 14 e 15 mostram, respectivamente, um sinal típico captado por um transdutor e um sinal com excesso de ruído. Na Fig. 14 podem-se identificar duas faixas distintas: a primeira, com sinal de baixa amplitude, representa o ruído captado pelo transdutor receptor. A segunda faixa, de maior amplitude, representa o sinal ultrassônico lançado pelo transdutor emissor.



Figura 14 – Sinal típico de um transdutor ultrassônico [17].

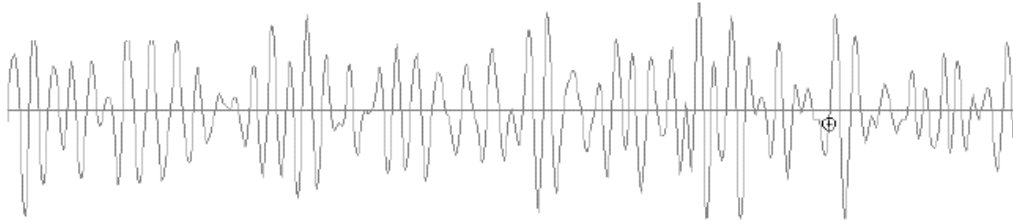


Figura 15 – Sinal com excesso de ruído [17].

Todos os medidores modernos, em maior ou menor escala, são capazes de filtrar algum grau de ruído. Entretanto, problemas relacionados ao ruído devem ser analisados durante o projeto de instalação do medidor, avaliando a proximidade de válvulas de controle ou outras interferências que possam causar ruídos capazes de prejudicar seu funcionamento. Em casos extremos, pode-se alterar o projeto do próprio medidor, de forma que o mesmo opere em espectros de frequência diferentes daqueles produzidos pelos elementos de tubulação próximos.

#### **2.3.4. Velocidade do escoamento**

Conforme visto anteriormente, os medidores ultrassônicos indicam, na verdade, a velocidade média do escoamento no segmento de reta que liga dois transdutores adjacentes. A AGA 9 [7] define alguns requisitos que medidores de múltiplas trajetórias devem possuir, dentre eles a capacidade de exibir a velocidade de escoamento em cada uma de suas cordas.

Essa capacidade é uma importante ferramenta de diagnóstico, pois permite avaliar as condições do escoamento ao qual o medidor está submetido, e não apenas as condições do próprio medidor.

A AGA 9 [7] define ainda os requisitos de instalação dos medidores, cuja finalidade é garantir um perfil de escoamento completamente desenvolvido e uniforme, ou o mais próximo disto, no interior do medidor. Este documento prevê ainda a possibilidade de instalação de condicionadores e retificadores de fluxo, que tem por objetivo reduzir os efeitos dos elementos de tubulação a montante do medidor.

Conforme descrito no item 3.2.5, o monitoramento do perfil de velocidades permite identificar quaisquer alterações nas condições do escoamento, que podem ser causadas, por exemplo, por um bloqueio parcial no condicionador de fluxo ou a abertura parcial de uma válvula de bloqueio.

### 2.3.5. Velocidade do som

É provável que o monitoramento da velocidade do som seja a ferramenta de diagnóstico mais discutida e utilizada nas aplicações de medidores ultrassônicos.

A velocidade do som teórica no fluido escoando no interior do medidor pode ser determinada através dos conceitos de Termodinâmica. De acordo com Savidge [18], a velocidade do som  $c$  pode ser calculada por:

$$c = \left[ \kappa \cdot R \cdot T \left\{ Z + \rho \left( \frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \right\} \right]^{1/2} \quad (22)$$

ou:

$$c = \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_S \right]^{1/2} \quad (23)$$

onde  $T$  é a temperatura termodinâmica do gás e  $S$  sua entropia.

A partir das Eq. (10) e (11) é possível explicitar a velocidade do som determinada no fluido pelo medidor. Medidores modernos calculam a velocidade do som no fluido escoando em cada uma de suas cordas. Isto permite realizar duas verificações distintas a partir dos mesmos dados: (a) a comparação com a velocidade do som teórica em cada uma das cordas, e (b) a comparação entre as velocidades calculadas em cada uma de suas cordas.

Tanto a medição da velocidade média do escoamento quanto a medição da velocidade do som em cada corda depende, basicamente, da medição dos tempos de trânsito das ondas sonoras ao longo do caminho acústico. A importância do monitoramento da velocidade do som, portanto, está no fato de que este pode ser um indicativo em caso de distúrbios na medição dos tempos de trânsito.

Medidores modernos utilizam cronômetros de alta frequência para uma medição com boa exatidão dos tempos de trânsito. Tomando como exemplo um medidor de diâmetro nominal igual 12", os tempos de trânsito médios são da

ordem de dezenas de nanosegundos para velocidades de escoamento no início da faixa de medição, podendo chegar a 100 milisegundos quando a velocidade do escoamento está próxima ao final da faixa de medição. Cabe ressaltar que, se não existe escoamento no interior do medidor, a diferença entre os tempos de trânsito das ondas sonoras lançadas pelos transdutores adjacentes de uma mesma trajetória acústica deve ser, idealmente, igual a zero.