

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

ROGÉRIO BOLZAN MATHIAS

**INFLUÊNCIA DO PERFIL DE VELOCIDADE DO
ESCOAMENTO SOBRE A MEDIÇÃO ULTRA-SÔNICA DE
VAZÃO POR TEMPO DE TRÂNSITO**

VITÓRIA – ES
2010

ROGÉRIO BOLZAN MATHIAS

**INFLUÊNCIA DO PERFIL DE VELOCIDADE DO
ESCOAMENTO SOBRE A MEDIÇÃO ULTRA-SÔNICA DE
VAZÃO POR TEMPO DE TRÂNSITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Sistemas Mecânicos

VITÓRIA – ES
2010

ROGÉRIO BOLZAN MATHIAS

**INFLUÊNCIA DO PERFIL DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO SOBRE A
MEDIÇÃO ULTRA-SÔNICA DE VAZÃO POR TEMPO DE TRÂNSITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 17 de dezembro de 2010.

COMISSÃO EXAMINADORA

Profº Dr. Márcio Coelho de Mattos – Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Profº Dr. Rogerio Ramos
Universidade Federal do Espírito Santo

Profº Dr. Reginaldo Rosa Cotto de Paula
Instituto Federal do Espírito Santo

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Mathias, Rogério Bolzan, 1968-

Influência do perfil de velocidade do escoamento sobre a medição
ultra-sônica de vazão por tempo de trânsito / Rogério Bolzan Mathias. –
2010.

98 f. : il.

Orientador: Márcio Coelho de Mattos.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Medição de vazão. 2. Incerteza. 3. Ultra-som - Medição. 4.
Velocidade. I. Mattos, Márcio Coelho de. II. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621

AGRADECIMENTOS

Deus é meu rochedo, minha fortaleza e meu escudo. Dificuldades diversas encontrei, e, ao chegar ao final deste trabalho, quero, antes de mais nada, expressar um agradecimento por vencer tantas dificuldades e pelo meu chamado ter sido atendido.

Ser atendido na forma dedicada, responsável e paciente pelo professor orientador Márcio Coelho de Mattos foi fundamental para a superação dos obstáculos da caminhada.

Agradeço, também, pela amizade do meu colega de trabalho Humberto Barroncas Corrêa, que não poupou dedicação e esforço em todos os momentos dessa conquista.

Lembro do apoio que recebi de todos os funcionários, professores e do coordenador do PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, professor Cherlio Scandian, que direta e indiretamente se envolveram nesta conquista.

E dedico este trabalho aos meus pais Adhemar Mathias (*in memorian*) e Zulmira Bolzan Mathias, que sempre acreditaram nessa vitória.

RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade analisar a influência do perfil de velocidade na medição ultra-sônica de vazão por tempo de trânsito. Primeiramente é feita uma abordagem da técnica, com a modelagem do problema, e com as devidas considerações sobre a incerteza de medição. Em seguida, uma onda acústica em meio móvel é estudada, em relação à influência do perfil de velocidade sobre tempos de trânsito, arrasto da onda sonora e, conseqüentemente, no cálculo da vazão. Os resultados foram obtidos para um perfil de velocidade uniforme e um de Hinze [Ramos-2006], através de simulação numérica. Finalmente, foi estudado este mesmo comportamento para um perfil não uniforme de velocidade.

Palavras-Chave: Medição de vazão, medição ultra-sônica, perfil de velocidade, incerteza.

ABSTRACT

This study aims to examine the influence of velocity profile measurement by ultrasonic transit time flow. First of all, it is performed an approach technique, with the modeling problem, and it is analyzed the measurement uncertainty as well. Next, an acoustic wave in mobile environment is studied in relation to the influence of velocity profile on transit times, sound wave drag and, consequently, the flow calculation. The results were obtained considering uniform velocities and a Hinze profile, through numerical simulation. Finally, this same behavior was studied for a non-uniform velocity profile.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1.1: | Representação esquemática da medição de vazão por ultra-som (velocidade uniforme) | 26 |
| Figura 2.1: | Representação esquemática da medição de vazão por ultra-som (velocidade uniforme) adaptação de [Ramos-2006] | 30 |
| Figura 2.2: | Efeito de arrasto do sinal ultra-sônicos pelo escoamento | 34 |
| Figura 2.3: | Efeito de arrasto do sinal ultra-sônicos num escoamento uniforme | 34 |
| Figura 2.4: | Fator de correção em função do número de Reynolds, segundo diversas propostas | 37 |
| Figura 2.5: | Ampliação da figura 2.4, para $Re \leq 2.5 \cdot 10^7$ | 38 |
| Figura 3.1: | Frente de onda num meio em movimento | 49 |
| Figura 3.2: | Frente de onda num meio em movimento em duto circular | 50 |
| Figura 3.3: | Representação esquemática da medição de vazão por ultra-som (velocidade uniforme) adaptação de [Ramos-2006] | 52 |
| Figura 3.4: | Efeito do arrasto do sinal ultra-sônico pelo escoamento (receptor a jusante) | 53 |
| Figura 3.5: | Efeito do arrasto do sinal ultra-sônico pelo escoamento (receptor a montante) | 54 |
| Figura 3.6: | Campo acústico para o modo radial em um transdutor ultra-sônico piezelétrico (a) projeção em 3D. (b) curvas de contorno Fonte: [Moreira-2008] | 55 |
| Figura 3.7: | Campo acústico para o modo radial em um transdutor ultra-sônico piezelétrico (a) projeção em 3D. (b) curvas de contorno Fonte: [Moreira-2008] | 56 |
| Figura 3.8: | Ângulo para desvio nulo, com o receptor à jusante (>0) e à montante (-). Perfil Uniforme | 58 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 3.9: | Ângulo para desvio nulo, com o receptor à jusante (>0) e à montante ($-$).Perfil de Hinze | 59 |
| Figura 4.1: | Dupla curva em planos ortogonais. Adaptado de [Hilgenstock-1996] | 62 |
| Figura 4.2: | Perfil de velocidade axial (esquerda) e perfil de velocidade tangencial apresentado em 2D (direita). Adaptado de [Hilgenstock-1996]. | 63 |
| Figura 4.3: | Esquemática da velocidade axial em uma curva de 90° . Adaptado de [Hilgenstock-1996]. | 63 |
| Figura 4.4: | Perfil de velocidade axial no plano transversal a 0° | 63 |
| Figura 4.5: | Perfil de velocidade tangencial no plano transversal a 0° | 64 |
| Figura 4.6: | Perfil de velocidade axial no plano transversal a 45° | 64 |
| Figura 4.7: | Perfil de velocidade tangencial no plano transversal a 45° | 64 |
| Figura 4.8: | Perfil de velocidade axial no plano transversal a 90° | 65 |
| Figura 4.9: | Perfil de velocidade tangencial no plano transversal a 90° | 65 |
| Figura 4.10: | Perfil de velocidade axial no plano transversal a 135° | 65 |
| Figura 4.11: | Perfil de velocidade tangencial no plano transversal a 135° | 66 |
| Figura 4.12: | Perfil de velocidade axial no plano transversal a 0° | 71 |
| Figura 4.13: | Perfil de velocidade tangencial no plano transversal a 0° | 72 |
| Figura 4.14: | Perfil de velocidade axial no plano transversal a 0° | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------------|--|----|
| Tabela 1.1(a): | Informações sobre medidores de vazão [adaptado da referência 02] | 15 |
| Tabela 1.1(b): | Informações sobre medidores de vazão [adaptado da referência 02] | 16 |
| Tabela 1.2(a): | Informações sobre medidores de vazão [adaptado da referência 02] | 17 |
| Tabela 1.2(b): | Informações sobre medidores de vazão [adaptado da referência 02] | 18 |
| Tabela 1.2(c): | Informações sobre medidores de vazão [adaptado da referência 02] | 19 |
| Tabela 1.2(d): | Informações sobre medidores de vazão [adaptado da referência 02] | 20 |
| Tabela 2.3.1: | Incerteza relativa da velocidade de escoamento para o conjunto de parâmetros listados. Incerteza absoluta dos tempos de trânsito: 100 ns | 44 |
| Tabela 2.3.2: | Incerteza relativa da velocidade de escoamento para o conjunto de parâmetros listados. Incerteza absoluta dos tempos de trânsito: 10 ns | 44 |
| Tabela 3.1: | Variação do ângulo para desvio nulo | 61 |
| Tabela 4.1: | Valores da velocidade axial nos diversos planos transversais | 67 |
| Tabela 4.2: | Valores da velocidade tangencial nos diversos planos transversais | 68 |
| Tabela 4.3: | Valores do desvio devido à velocidade axial | 71 |
| Tabela 4.4: | Valores do desvio devido à velocidade tangencial | 72 |
| Tabela 4.5: | Valores do ângulo para desvio nulo para o perfil mapeado por Hilgenstock no diversos planos transversais e para diversas velocidades | 73 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabela 4.6: | Tempos de trânsito, velocidades e razões de velocidade para o perfil de Hinze | 76 |
| Tabela 4.7: | Tempos de trânsito para o perfil mapeado por Hilgenstock | 76 |
| Tabela 4.8: | Velocidades estimadas pela expressão 4.2 | 77 |
| Tabela 4.9: | Razões entre a velocidade estimada e a velocidade média do perfil | 77 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | Medição de Vazão: Substrato Histórico | 12 |
| 1.2 | Revisão Bibliográfica | 21 |
| 1.3 | Motivação e Objetivos do Trabalho | 25 |
| 1.4 | Estruturação da Dissertação | 28 |
| 2 | MEDIÇÃO ULTRA-SÔNICA DE VAZÃO POR TEMPO DE TRÂNSITO | 30 |
| 2.1 | Modelagem do Problema | 30 |
| 2.2 | Influência do Perfil de Velocidade | 35 |
| 2.3 | Considerações sobre a Incerteza de Medição | 39 |
| 3 | ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PERFIL DE VELOCIDADE SOBRE OS TEMPOS DE TRÂNSITO | 46 |
| 3.1 | Equações que Regem o Problema | 46 |
| 3.2 | Solução da Equação do Caminho Acústico | 48 |
| 3.3 | Comentários sobre o Problema Real: Múltiplas Frentes de Onda | 50 |
| 4 | SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS | 62 |
| 4.1 | Considerações Iniciais | 62 |
| 4.2 | Desvio do Caminho Acústico com Relação à Visada Direta Emissor-Receptor | 69 |
| 4.3 | Determinação do Ângulo para Desvio Nulo no Perfil Mapeado por Hilgenstock | 72 |
| 4.4 | Comparação das Velocidades Médias dos Perfis com as Calculadas Através dos Tempos de Trânsito | 74 |
| 5 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 78 |
| | REFERÊNCIAS | 81 |

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo introdutório visa a apresentar ao leitor uma revisão condensada da linha histórica da medição de vazão, destacando as principais contribuições científico-tecnológicas, seguida de uma revisão bibliográfica sobre medição de vazão por ultra-som. A exposição da motivação do trabalho e de sua organização completam o capítulo.

1.1 SUBSTRATO HISTÓRICO

Segundo Gerard Delmée [Delmée-2003], as primeiras medições de água teriam sido executadas por egípcios e romanos. A revolução industrial, juntamente com o crescimento dos aglomerados urbanos, levou à necessidade de técnicas mais eficazes na medição de vazão. Nesta época já estavam divulgados os estudos de:

- Leonardo da Vinci (1452-1519): realizou um trabalho intitulado “Sobre o movimento da água e das águas pluviais”.
- Galileu Galilei (1564-1642): trouxe sua participação aos fundamentos da medição de vazão;
- Torricelli (1608-1647): estabeleceu a equação sobre o escoamento livre da água através de orifícios;
- Daniel Bernoulli (1700-1782): formulou, em seu tratado de hidrodinâmica, publicado em 1738, a principal lei sobre o movimento dos líquidos, comumente chamada de “Equação de Bernoulli”;
- Leonardo Euler (1707-1783): estabeleceu as equações diferenciais gerais relativas ao movimento dos líquidos perfeitos;
- Henri Pitot (1695-1771): apresentou um trabalho descrevendo o instrumento que passou para a posteridade como “tubo de Pitot”, para medir a velocidade da água;

- Giovanni Venturi (1746-1822): em 1797, publicou o resultado dos seus estudos sobre o que ficou conhecido como “tubo de Venturi”;

Já no século XIX tivemos as seguintes contribuições significativas para a evolução da tecnologia da medição de vazão:

- Jean Poiseuille (1799-1869): escoamento em tubos capilares e viscosidade;
- George Stokes (1819-1903): trabalhos sobre a hidrodinâmica;
- Osborne Reynolds (1842-1912): número de Reynolds.

No século XX grandes contribuições à medição de vazão foram dadas por:

- Theodor Von Karman (1881-1963): seus estudos deram origem aos medidores tipo “Vórtex”;
- Michel Faraday (1791-1867): medidor eletromagnético;
- Gaspard Coriolis (1792-1843): medidor que aproveita os efeitos da aceleração complementar devida à “força de Coriolis”.

Os medidores de vazão podem ser classificados segundo seu princípio de medição, segundo a qual tem-se:

- Medidores de pressão diferencial:** correspondem às tecnologias mais antigas, são os mais usados na indústria por serem versáteis. O elemento primário, diretamente em contato com o fluido, é o primeiro elo de uma malha de medição.
- Medidores lineares:** são considerados lineares os medidores de vazão que produzem um sinal de saída diretamente proporcional à vazão. Eles se distinguem dos medidores de pressão diferencial, cuja saída inerente é quadrática em função da vazão.
- Medidores volumétricos:** também chamados de “medidores de deslocamento positivo”, destinam-se essencialmente à medição de volumes. A vazão pode ser calculada, derivando matematicamente o volume no tempo.
- Medidores em canais abertos:** destinam-se a vazões de líquidos que escoam por gravidade e apresentam uma superfície livre.

As tabelas 1.1 (a e b) e 1.2 (a-d), publicada pela Omega Engineering Inc. [Omega-2005], apresentam uma comparação entre as diversas tecnologias de medição de vazão, no que respeita à aplicabilidade, rangeabilidade, etc. Condensam um conjunto de informações gerais para uma vasta gama de medidores de vazão, incluindo limitações e faixas de trabalho para gases, líquidos e sólidos. Nelas se vê a versatilidade dos medidores de vazão ultra-sônicos por tempo de trânsito, os quais podem atender, na configuração geral, a quase todas as condições de aplicação, desde escoamentos intermitentes, em fluidos corrosivos, gás sujo, entre outras. Algumas limitações citadas na tabela 1.2 merecem comentários, a saber, (veja destaques em verde e vermelho nas tabelas):

- a) Inaplicável para vapor: Pode até não ser esta uma aplicação comum no mercado para ser enquadrada nas linhas gerais. Xiaolei Shirley [Shirley-2002] apresenta conclusões interessantes sobre teste realizados com medidores ultra-sônicos em linhas envolvendo vapor. Obviamente a aplicação exigirá um modelo desenvolvido para eficiência nas condições especificadas, principalmente pela faixa de temperatura. Apenas se deve ter em mente que a restrição mencionada deve ser entendida na via das regras gerais;
- b) Inaplicável para altas temperaturas: Também isto só vale para linhas gerais. Existem medidores ultra-sônicos desenvolvidos para temperaturas altas e já aplicados com sucesso em testes de laboratórios [Lynnworth-2000] [Walters-2002];
- c) Inaplicável para fluidos não-newtonianos: Embora ainda não aplicada em larga escala neste campo, a tecnologia ultra-sônica combinada com outras tecnologias (microondas ou sensores capacitivos) é a que parece ter melhor potencial para vencer as dificuldades de aplicação em fluidos não-newtonianos, sobretudo na indústria do petróleo [Thorn-1999]. As vantagens dos medidores ultra-sônicos sobre os demais, é o fato deles serem os mais propícios para novos desenvolvimentos nestes campos, já existindo, de fato, modelos desenvolvidos para petróleo líquido em escoamento monofásico [Yoder-2005].
- d) A rangeabilidade dos medidores ultra-sônicos pode ser muito maior que a referida na tabela 1.2, podendo ultrapassar 100:1 [Mylvaganam-1989 a-b]. O problema tem sido o alto custo destes aparelhos de alta rangeabilidade.

| FLOWMETER | PIPE SIZE, in. (mm) | GASES (VAPORS) | | | | | LIQUIDS | | | | | | | TYPICAL Accuracy, uncalibrated (Including transmitter) | TYPICAL Reynolds number ‡ or viscosity | TEMPERATURE °F (°C) | PRESSURE psig (kPa) | | | | | | | | | |
|--|---------------------|--|-------|-------|------------|-----------|-------------------------|---------------|--------------|-------|-----------|---|---------|--|--|---------------------|--|----------|----------|--------------|----------------|------------------|----------------------------|------------------------------------|--|--|
| | | STEAM | CLEAN | DIRTY | HIGH PRESS | LOW PRESS | CLEAN | HIGH VISCIOUS | LOW VISCIOUS | DIRTY | CORROSIVE | VERY CORROSIVE | FIBROUS | | | | | SLURRIES | ABRASIVE | REVERSE FLOW | PULSATING FLOW | HIGH TEMPERATURE | CRYOGENIC | SEMI-FILLED PIPES | NON-NEWTONIANS | OPEN CHANNEL |
| LINEAR SCALE TYPICAL RANGE 10:1 (Or better) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Magnetic* Positive Displacement | 0.1-72 (2.5-1800) | X | X | X | X | X | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ±0.5% of rate | R _D > 4,500 | 360 (180) | ± 1,500 (10,800) |
| Gas | <12 (300) | X | ✓ | X | ? | ✓ | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | ±1% of rate | - | 250 (120) | ± 1,400 (10,000) |
| Liquid | <12 (300) | X | X | X | X | X | ✓ | ✓ | ? | X | ? | X | X | X | X | X | ? | X | X | X | X | X | ±0.5% of rate | No R _D limit ≤ 8,000 cS | 600 (315) | ± 1,400 (10,000) |
| Turbine | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Gas | 0.25-24 (6-600) | SD | ✓ | X | ✓ | ✓ | X | X | X | X | X | X | X | X | SD | SD | ? | ? | X | X | ? | ? | ±0.5% of rate | - | -450-500 (268-260) | ± 3,000 (21,000) |
| Liquid | 0.25-24 (6-600) | X | X | X | X | X | ✓ | X | ? | X | ? | X | X | SD | SD | SD | ? | ? | X | X | ? | ? | ±0.5% of rate | R _p > 5,000, ±15 cS | -450-500 (268-260) | ± 3,000 (21,000) |
| Ultrasonic | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Time of Flight | >0.5 (12) | X | SD | SD | SD | SD | ✓ | ? | ? | X | ✓ | ✓ | ? | ? | ✓ | ✓ | X | ? | X | X | ? | ? | ±1% of rate to ff15% URV | R _D > 10,000 | -300-500 (-180-260) | Pipe rating |
| Doppler | >0.5 (12) | X | X | X | X | X | ? | ? | ? | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X | X | X | ? | X | ? | ±1% of rate to ff15% URV | R _D > 4,000 | -300-500 (-180-260) | Pipe rating |
| Variable-Area (Rotameter) | ≤3 (75) | ? | ✓ | X | X | ✓ | ✓ | X | ? | X | ? | ? | X | X | X | ? | ? | ? | X | X | X | X | ±1% of rate to ff10% URV | No R _D limit, < 100 cS | Glass: 400 (200) Metal: 1,000 (540) | Glass: 350 (2,400) Metal: 720 (5,000) |
| Vortex Shedding | 1.5-16 (40-400) | ✓ | ✓ | ? | ✓ | ✓ | ✓ | X | ? | ? | ? | X | X | X | X | X | ? | ? | X | X | X | X | ±0.75-1.5% of rate | R _D > 10,000, < 30 cP | 400 (200) | ± 1,500 (10,500) |
| Vortex Precession (Swirl) | <16 (400) | ✓ | ✓ | ? | ✓ | ✓ | ✓ | X | ? | X | ? | X | X | X | X | X | ? | X | X | X | X | X | ±0.5% of rate | R _D > 10,000, < 5 cP | 536 (280) | Pipe rating |
| Fluidic Oscillation (Coanda) | >1.5 (40) | X | X | X | X | X | ✓ | X | X | ? | ? | X | X | X | X | ? | ? | ? | X | X | X | X | ±2% of rate | R _D > 2,000, < 80 cS | 350 (175) | ± 720 (5,000) |
| Mass | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Coriolis | 0.25-6 (6-150) | ? | ? | ? | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ? | ? | ? | ✓ | ? | ? | ? | ? | X | ✓ | X | ? | ±0.15-10% of rate | No R _D limit | -400-800 (-224-427) | ± 5,700 (39,900) |
| Thermal Probe | <72 (1800) | X | ✓ | ? | ✓ | ✓ | ✓ | ? | ✓ | ? | ? | ? | ? | ? | X | ? | ? | X | X | ? | X | ? | ±1-2% URV | No R _D limit | 1,500 (816) | Pipe rating |
| Solids Flowmeter | <24 (600) | X | X | X | X | X | SD | X | ? | X | X | SD | SD | X | SD | SD | X | ✓ | X | X | ? | ? | ±0.5% of rate to ff14% URV | - | 750 (400) | ± 580 (4,000) |
| Correlation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Capacitance | <8 (200) | X | X | X | X | X | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X | ? | ? | X | ? | ? | X | ? | ? | No data available | No data available | 300 (149) | ± 580 (4,000) |
| Ultrasonic | >0.5 (12) | X | X | X | X | X | ? | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X | ? | X | X | X | ? | X | ? | ? | ±6% of ?? | No data available | -300-250 (-180-120) | Pipe rating |
| cP = centi Poise | | ? = Normally applicable (worth consideration) | | | | | URV = Upper Range Value | | | | | ‡ According to other sources, the minimum Reynolds number should be much higher | | | | | * Liquid must be electrically conductive | | | | | | | | | |
| cS = centi Stokes | | ✓ = Designed for this application (generally suitable) | | | | | X = Not applicable | | | | | | | | | | ** Range 10:1 for laminar, and 15:1 for target | | | | | | | | | |
| SD = Some designs | | | | | | | | | | | | | | | | | *** Newer designs linearize the signal | | | | | | | | | |

Tabela 1.1(b): Informações sobre medidores de vazão [adaptado de Aziz-1996].

| TYPE OF DESIGN | DIRECT MASS-FLOW SENSOR | DIFFERENTIAL PRESSURE-FLOW SENSOR | VOLUME DISPLACEMENT-FLOW SENSOR | VELOCITY-FLOW SENSOR | EXPECTED ERROR FROM VISCOSITY CHANGE | TRANSMITTER AVAILABLE | LINEAR OUTPUT | RANGEABILITY | PRESSURE LOSS THRU SENSOR | APPROX. STRAIGHT PIPE-RUN REQUIREMENT ^⑤ (UPSTREAM DIAM./DOWNSTREAM DIAM.) | FLOW RANGE ^⑨ | | | |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------|--------------------------|---------------------------|---|-------------------------|----------------|-------------------|---|
| | | | | | | | | | | | Solids Flow Units | Gas Flow Units | Liquid Flow Units | |
| Orifice (plate or integral cell) | ✓ | | | | H | ✓ | SR | 3:1 ^② | H | 20/5 | ----- | ----- | ----- | gpm—m ³ /hr ^③ SCFM—Sm ³ /hr |
| Segmental Wedge | ✓ | | | | M | ✓ | SR | 3:1 ^② | A | 20/5 | ----- | ----- | ----- | gpm—m ³ /hr |
| V-Cone Flowmeter | ✓ | | | | | ✓ | SR | 3:1 to 15:1 ^② | M | 2/5 | ----- | ----- | ----- | gpm—m ³ /hr ACFM—Sm ³ /hr |
| Target Meters | ✓ | | | | A | ✓ | SR | 15:1 | M | 20/5 | ----- | ----- | ----- | gpm—m ³ /hr ^④ SCFM—Sm ³ /hr |
| Venturi Tubes | ✓ | | | | H | ✓ | SR | 3:1 ^② | M | 15/5 | ----- | ----- | ----- | gpm—m ³ /hr ^③ SCFM—Sm ³ /hr |
| Flow Nozzles | ✓ | | | | H | ✓ | SR | 3:1 ^② | A | 20/5 | ----- | ----- | ----- | gpm—m ³ /hr ^③ SCFM—Sm ³ /hr |

| | | |
|----------------------------|--|---|
| ----- = Non-standard Range | ① = The data in this column is for general guidance only. | ⑤ = Varies with upstream disturbance. |
| L = Limited | ② = Inherent rangeability of primary device is substantially greater than shown. Value used reflects limitations of differential pressure sensing device when 1% of rate accuracy is desired. With multiple-range intelligent transmitters, rangeability can reach 10:1. | ⑥ = Can be more with high Reynolds number services. |
| SD = Some Designs | ③ = Pipe size establishes the upper limit. | ⑦ = Up to 100:1. |
| H = High | ④ = Practically unlimited with probe type design. | ⑧ = More for gas turbine meters. |
| A = Average | | ⑨ = Higher and lower flow ranges may be available. Check several manufacturers. |
| M = Minimal | | |
| N = None | | |
| SR = Square Root | | |

Tabela 1.2(a): Informações sobre medidores de vazão [adaptado de Aziz-1996].

| TYPE OF DESIGN | DIRECT MASS-FLOW SENSOR | DIFFERENTIAL PRESSURE-FLOW SENSOR | VOLUME DISPLACEMENT-FLOW SENSOR | VELOCITY-FLOW SENSOR | EXPECTED ERROR FROM VISCOSITY CHANGE | TRANSMITTER AVAILABLE | LINEAR OUTPUT | RANGEABILITY | PRESSURE LOSS THRU SENSOR | APPROX. STRAIGHT PIPE-RUN REQUIREMENT ^⑤ (UPSTREAM DIAM./DOWNSTREAM DIAM.) | FLOW RANGE ^⑨ | | | |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------|-------------------|---------------------------|---|-------------------------|--|--------------------------|-------------------|
| | | | | | | | | | | | cc/min | Sm ³ /hr or Am ³ /hr | gpm | Solids Flow Units |
| Pitot Tubes | ✓ | | | | M | ✓ | SR | 3:1 ^② | M | 30/5 | | gpm—m ³ /hr ^④ | SCFM—Sm ³ /hr | |
| Elbow Taps | ✓ | | | | M | ✓ | SR | 3:1 ^② | N | 25/10 | | gpm—m ³ /hr ^③ | SCFM—Sm ³ /hr | |
| Laminar Flowmeters | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | 10:1 ^② | H | 15/5 | | gpm—m ³ /hr | SCFM—Sm ³ /hr | |
| Magnetic Flowmeters | | | | ✓ | N | ✓ | ✓ | 30:1 ^⑦ | N | 5/3 | | gpm—m ³ /hr | | |
| Positive Displacement Gas Meters | | | ✓ | | | SD | ✓ | 10:1 to 200:1 | M | N | | | SCFM—Sm ³ /hr | |

| | | |
|--|--|---|
| - - - - = Non-standard Range L = Limited SD = Some Designs H = High A = Average M = Minimal N = None SR = Square Root | ① = The data in this column is for general guidance only. ② = Inherent rangeability of primary device is substantially greater than shown. Value used reflects limitations of differential pressure sensing device when 1% of rate accuracy is desired. With multiple-range intelligent transmitters, rangeability can reach 10:1. ③ = Pipe size establishes the upper limit. ④ = Practically unlimited with probe type design. | ⑤ = Varies with upstream disturbance. ⑥ = Can be more with high Reynolds number services. ⑦ = Up to 100:1. ⑧ = More for gas turbine meters. ⑨ = Higher and lower flow ranges may be available. Check several manufacturers. |
|--|--|---|

Tabela 1.2(b): Informações sobre medidores de vazão [adaptado de Aziz-1996].

Por fim, vale à pena destacar as principais vantagens dos medidores de vazão ultra-sônicos frente às demais tecnologias [Yoder-2005]:

- a) **Sobre os medidores com base em pressão diferencial:** Não são intrusivos ou, se muito, bem menos intrusivos, provocando, portanto, baixíssima ou nenhuma queda permanente de pressão na linha. Também precisam de menor intervenção para calibrações;
- b) **Sobre os medidores magnéticos:** Podem ser usados para medição de gás, vapor e líquidos não condutores;
- c) **Sobre os medidores de vórtex:** Não são intrusivos ou, se muito, bem menos intrusivos. Podem trabalhar em velocidades muito mais baixas;
- d) **Sobre os medidores de turbina:** Também ganham no quesito intrusão, uma vez que as turbinas são necessariamente muito intrusivas. Além, disto, os medidores ultra-sônicos não possuem partes móveis, tendo muito menos problemas com desgaste;
- e) **Sobre os medidores de Coriolis:** Podem ser aplicados em tubulação de médio e grande diâmetro, ao passo que os medidores de Coriolis são mais limitados a diâmetros menores.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A medição de vazão de fluidos é muito empregada nas atividades industriais. As aplicações vão desde medições mais simples, como medição de vazão de água em estações de tratamento e residências, até medição de gases industriais e combustíveis, que envolve técnicas mais complexas.

A tecnologia ultra-sônica de medição de vazão teve sua aplicação ampliada na última década, mostrando-se extremamente importante e eficaz devido à exatidão e facilidade na medição de vazão, especialmente em escoamento monofásico.

Muitos trabalhos foram publicados sobre a medição de vazão por ultra-som. Para as finalidades desta dissertação, os trabalhos foram agrupados em 3 classes, de acordo com o enfoque principal, como mostram as subseções seguintes:

1.2.1 DESENVOLVIMENTO DE MEDIDORES E TESTES PARA APLICAÇÕES ESPECÍFICAS

Wright [Wright-1998] analisa experimentalmente o desempenho do medidor ultra-sônico na medição de mistura gases quentes, concluindo que a correta aplicação do coeficiente de descarga, com base no Número de Reynolds, garante a performance do medidor, sobretudo para $Re < 3 \cdot 10^4$.

Baumann [Baumann-2000] analisa o desempenho de um medidor ultra-sônico quando instalado em condições tipicamente fora do padrão. No caso, a seção do canal em que foi instalado o medidor era variável, em vez de constante. Segundo o autor, ainda assim foi possível aplicar uma compensação que limitasse o erro sistemático.

Zanker [Zanker-2000] aborda o desempenho de um medidor ultra-sônico na medição de gás úmido, condição problemática comum na indústria do petróleo. O autor concluiu, com base nos resultados obtidos, que o medidor ultra-sônico seria capaz de trabalhar na medição deste tipo de gás. Não obstante tal conclusão, a medição de gás úmido continua a ser um desafio prático na indústria do petróleo.

Rabalais [Rabalais-2002], tendo analisado o desempenho de diversos medidores ultra-sônicos em tubulações de líquidos inflamáveis, bem como tubulações de escape de gases, destaca que o medidor ultra-sônico com base em tempo de trânsito pode trabalhar tanto em líquidos limpos como sujos (com bolhas e partículas sólidas).

Fyrippi [Fyrippi-2004], comparando o desempenho dos medidores eletromagnético, de coriolis e ultra-sônico na medição de fluidos não-newtonianos, aponta que o pior desempenho ficou com o medidor ultra-sônico, com desvios de até 15% da referência adotada. Deve-se atentar, todavia, que Yoder [Yoder-2005] destaca o bom desempenho de um medidor desenvolvido especificamente para medição de escoamento monofásico de petróleo. Entretanto, existe uma grande diferença entre o medidor testado por Fyrippi e aquele referido por Yoder. O primeiro possui um único canal acústico e o segundo possui dezoito. Trata-se, portanto, de produtos bem distintos.

Arantes [Arantes-2008] analisa, por comparação interlaboratorial, a influência do processo de calibração sobre a performance de um medidor ultra-sônico de 5 canais. Toma, para tanto, a razão entre a medida fornecida pelo medidor de teste e aquela fornecida pelo medidor de referência¹. Concluiu que, quando o medidor é instalado tendo um trecho reto de 40D a montante, os erros são consideravelmente reduzidos, e a repetição é melhorada. Quanto à influência do processo de calibração, os resultados foram inconclusivos.

Sum et al [Sun-2009] analisaram um protótipo de medidor ultra-sônico para aplicação em poços de petróleo. Assenta a dificuldade extra, dadas as características do escoamento e propriedades dos fluidos, de uma estimação precisa dos tempos de trânsito. Aplicaram, então, um processo de análise de correlação para mitigar os erros desta estimação, para que seja menor que 10 ns.

Wang [Wang-2009] discute a influência da temperatura na exatidão da medição de vazão por ultra-som. Propõe a aplicação de uma rede neural para fazer a compensação da temperatura, em vez de modelos termodinâmicos, asseverando que a técnica permite reduzir sensivelmente os efeitos da variação de temperatura sobre a medição de vazão por ultra-som.

Ramos [Ramos-2006] apresenta o desenvolvimento de um protótipo, batizado de MEVUS, para medidor de vazão ultra-sônico por tempo de trânsito voltado à medição de vazão de gás. Destaca em um capítulo a parte todo o aspecto teórico envolvido. E os resultados, aliados com a modelagem matemática mostram que o MEVUS apresenta performance satisfatória, e guardam excelente correlação com a velocidade do fluxo. Apostando que os medidores ultra-sônicos estejam cada vez mais popularizados e aplicados nos mais diversos setores da indústria e do comércio, ainda que seja necessária mais pesquisa e desenvolvimento de certos parâmetros, o estudo abordado por Ramos [Ramos-2006] deixa uma base para futuros trabalhos para medição multifásica e gás úmido.

¹ Esta razão é denominada, em calibração, como fator do medidor.

1.2.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA INTERAÇÃO ONDA ACÚSTICA E ESCOAMENTO

Yeh [Yeh-1997] descrevem o desempenho de medição de vazão com dois canais acústicos. Os modelos de computador com sensor duplo foram desenvolvidos utilizando tanto uma onda reta, quanto um caminho curvo. Os efeitos foram avaliados e os resultados indicaram que o caminho reto de propagação de onda é bastante adequado para números de Mach baixos. Os resultados destas simulações indicaram que a instalação, local e as orientações dos transdutores ultra-sônicos foram fundamentais para alcançar níveis satisfatórios de desempenho. Os resultados também sugerem que os medidores de fluxo multi-caminho provavelmente foram mais desejáveis para assegurar elevados níveis de exatidão da medição.

Já Gol'tsov [Gol'tsov-1998] apresenta um modelo matemático refinado de medição ultra-sônica de fluxo. O modelo faz com que seja possível medir a descarga de líquidos e gases em uma ampla faixa de números de Reynolds com um erro menor que 0,3%.

Mais recentemente Ostashev [Ostashev-2002], apresenta um conjunto completo de equações linearizadas. A dinâmica de fluidos foi considerada na geometria acústica em um meio em movimento. As equações foram resolvidas usando a série de Debye. Como resultados são apresentadas as equações: eikonal, dispersão, transporte, e a lei de conservação de energia acústica. A propagação do som tridimensional em meios móveis estratificados também é estudada.

Hilgenstock e Ernst [Hilgenstock-1996] analisam os efeitos da instalação tanto experimentalmente quanto por dinâmica dos fluidos computacional. Usando os modelos de turbulência padrões, uma razoável concordância entre os dados numéricos x experimentais foi obtida. O uso de modelos avançados melhoraram, sensivelmente, a concordância entre os dados numéricos e experimentais, mas, necessitam de maiores recursos computacionais. As influências das perturbações de fluxo em vários medidores ultra-sônicos foram numericamente investigadas.

1.2.3 DESEMPENHO

Wright [Wright-1998] pesquisam a respeito do desempenho de medidores de vazão por tempo de trânsito em mistura de gases aquecidos (ar, nitrogênio, dióxido de carbono, vapor d'água e argônio). Um medidor de vazão ultra-sônico foi testado para $1e3 \leq Re \leq 1e5$ em uma instalação vazão e composição controladas. Comparações entre as medidas experimentais e os modelos computacionais, usando perfis de velocidade foram apresentados e mostraram boa concordância qualitativa. Os efeitos da expansão térmica no comprimento do caminho acústico e o diâmetro da tubulação foram significativos ao longo da faixa de temperatura testadas.

Zanker [Zanker-2000] analisa o desempenho de um medidor ultra-sônico multicanal para medição de gás úmido, destacando a dificuldade que representa o desconhecimento, a priori, da fração parcial da fase líquida, bem como, da fração parcial do vapor dissolvido. Outro trabalho foi desenvolvido por Kegel [Kegel-2004], que apresenta uma revisão de resultados laboratoriais, com enfoque nos problemas de desempenho da medição ultra-sônica.

1.3 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO

A figura 1.1 apresenta, de forma esquemática, o aparato envolvido na medição de vazão por ultra-som. Dois transdutores ultra-sônicos, que agem tanto como emissores quanto como receptores, são montados ao longo da tubulação, na região de medição. O tempo de trânsito do sinal emitido do transdutor 1 para o transdutor 2 é medido, bem como o tempo de trânsito do sinal inverso, do transdutor 2 para o transdutor 1. Considerando que o som é uma onda mecânica cuja velocidade sofre interferência direta da velocidade do meio que a conduz, a onda emitida pelo transdutor 1 chega ao transdutor 2 em menor tempo que a onda emitida pelo transdutor 2 chega ao transdutor 1.

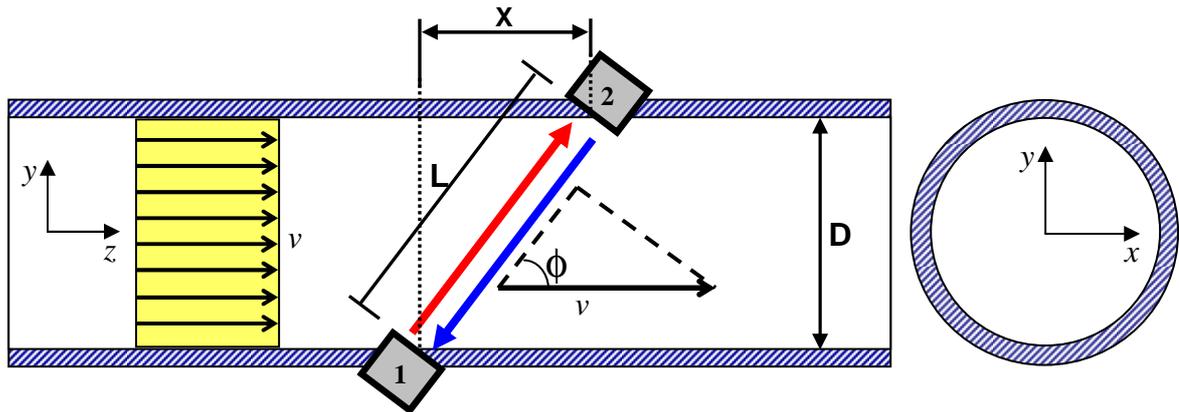


Figura 1.1: Representação esquemática da medição de vazão por ultra-som (velocidade uniforme) [Ramos-2006].

Considerando a projeção da velocidade do fluxo sobre o caminho da onda ultra-sônica, temos que, se $v \cdot \cos \phi < c$:

$$c + v \cdot \cos \phi = \frac{L}{t_{12}} \quad \text{e} \quad c - v \cdot \cos \phi = \frac{L}{t_{21}} \quad (1.1)$$

onde c : Velocidade do som no meio;

v : Velocidade do fluxo;

ϕ : Ângulo entre o caminho acústico e o fluxo;

L : Distância entre os transdutores ultra-sônicos;

t_{12} : Tempo de trânsito do sinal emitido pelo transdutor 1 para o transdutor 2;
Também chamado de tempo de trânsito a jusante (na direção do fluxo);

t_{21} : Tempo de trânsito do sinal emitido pelo transdutor 2 para o transdutor 1;
Também chamado de tempo de trânsito a montante (em contra fluxo).

Da equação (1.1) vem

$$c = \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{1}{t_{12}} + \frac{1}{t_{21}} \right) = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_{12} + t_{21}}{t_{12} \cdot t_{21}} \quad (1.2)$$

$$v = \frac{L}{2 \cos \phi} \cdot \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) = \frac{L}{2 \cos \phi} \cdot \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} \cdot t_{21}} \quad (1.3)$$

O cálculo da velocidade de escoamento pela equação (1.3) pressupõe um perfil de velocidade uniforme. Sabe-se, contudo, que este perfil não ocorre na prática. Além disto, a velocidade calculada pela equação (1.3) não representa nem mesmo a velocidade média na seção, mas apenas a velocidade média ao longo do caminho acústico percorrido pela onda ultra-sônica. Para resolver este problema, a vazão volumétrica é expressa na forma:

$$Q = k \cdot v \cdot A \quad (1.4)$$

onde k é um fator de correção que depende das condições de escoamento.

Considerando um perfil de velocidade completamente desenvolvido, o fator k passa a depender deste perfil. Cada fabricante tem estipulado uma expressão para o cálculo do fator k em função do número de Reynolds do escoamento. A equação (1.5) apresenta expressões diversas [Ramos-2006] para o fator de correção:

$$\left. \begin{aligned} k_0 &= \frac{2n}{1+2n} \\ k_1 &= 0.873 + 0.0157 \cdot \log(\text{Re}) - 0.0004 \cdot \log^2(\text{Re}) \\ k_2 &= \left[1 + 0.01 \cdot \sqrt{6.25 + 431 \cdot \text{Re}^{-0.237}} \right]^{-1} \\ k_3 &= \left[1.125 - 0.0115 \cdot \log(\text{Re}) \right]^{-1} \\ k_4 &= 0.889 + 0.0091 \cdot \log \left[\text{Re} + 0.0001 \cdot \log^2(\text{Re}) \right] \\ k_5 &= \left[1.119 - 0.011 \cdot \log(\text{Re}) \right]^{-1} \\ k_6 &= 0.889 + 0.009 \cdot \log(\text{Re}) + 0.0001 \cdot \log^2(\text{Re}) \\ k_7 &= \left[1.125 - 0.0115 \cdot \log(0.94 \text{Re}) \right]^{-1} \\ k_8 &= 0.89 + 0.01 \cdot \log(\text{Re}) \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

É certo que o fator k contribui para a incerteza da medição de vazão. Esta contribuição, todavia, não pode ser avaliada a partir das expressões empíricas da equação (1.5). A solução para uma avaliação aceitável da contribuição do fator k na incerteza da medição de vazão passa, então, pela avaliação da variabilidade do perfil de velocidade.

O perfil de velocidade, por sua vez, é afetado por:

- a) nível de turbulência do escoamento depende da temperatura, da pressão e das propriedades do fluido (viscosidade, massa específica, etc.);
- b) presença de acidentes de linha.

Nem sempre as propriedades do fluido são constantes numa linha de medição. Nem sempre é fácil, também, a observância de certas distâncias mínimas entre o ponto de instalação dos medidores e o acidente de linha mais próximo, principalmente em plataformas de produção de petróleo e gás natural. Portanto, em certas aplicações, entre elas as instalações de produção de petróleo e gás, o perfil de velocidade e, por consequência, o fator k , pode ser menos estável. Em outras palavras, pode ter uma variabilidade maior, afetando a incerteza da medição nestas situações.

O objetivo principal do presente trabalho é justamente lançar mais luz sobre como o perfil de velocidade pode afetar a medição dos tempos de trânsito, apresentando aspectos importantes a serem considerados quando se deseja descrever melhor a fenomenologia do processo. Neste sentido serão abordados aspectos como arrasto e refração do sinal ultra-sônico pelo escoamento e variação dos tempos de trânsito medidos em diferentes perfis de velocidade com a mesma velocidade média.

Objetivos adicionais são:

- Aplicar perfis de velocidade reais, conforme a literatura, na análise do problema.
- Utilizar o método analítico, onde couber, ou numérico, que melhor apresente o cálculo da vazão, para o objetivo principal apresentado.
- Desenvolver um simulador para o cálculo do tempo de trânsito.

1.4 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 faz um substrato histórico da medição de vazão, apresentando de forma cronológica a sua evolução. Há, também, uma revisão bibliográfica dando ênfase a medição de vazão ultra-sônica, e é feita uma comparação com outros métodos através da tabela 1. E fechando este capítulo é apresentada a motivação e objetivo.

No capítulo 2, apresentam-se uma modelagem do problema, descrevendo a equação do perfil de velocidades, considerando a sua influência para o cálculo da vazão, bem como as suas respectivas variações devido às perturbações do meio e acidentes de linha. Apresenta também algumas considerações analíticas sobre a incerteza de medição.

O capítulo 3 trata da análise da influência do perfil de velocidade sobre os tempos de trânsito, considerando uma onda acústica em meio móvel. Foi feita uma simulação numérica da equação de movimento da onda acústica e apresentados os resultados da mesma para perfil uniforme e perfil de Hinze.

O capítulo 4 apresenta uma análise da variabilidade do fator k e no capítulo 5 são mostrados os resultados e conclusões sobre a influência das perturbações do meio e dos acidentes de linha na medição de vazão ultra-sônica por tempo de trânsito.

2 MEDIÇÃO ULTRA-SÔNICA DE VAZÃO POR TEMPO DE TRÂNSITO

Este capítulo apresenta a modelagem do problema proposto na dissertação, destacando a influência do perfil de velocidade no cálculo da vazão. Apresentam-se também comentários sobre a incerteza da medição.

2.1 MODELAGEM DO PROBLEMA

A figura 2.1 representa esquematicamente o método de medição de vazão ultra-sônica por tempo de trânsito. Este método é definido partindo do princípio de que a velocidade média do fluido é determinada pela diferença do tempo de trânsito de dois sinais ultra-sônicos, propagando-se a jusante e a montante, ou seja, a favor e contra o escoamento. Ressalta-se, desde já, alguns elementos importantes:

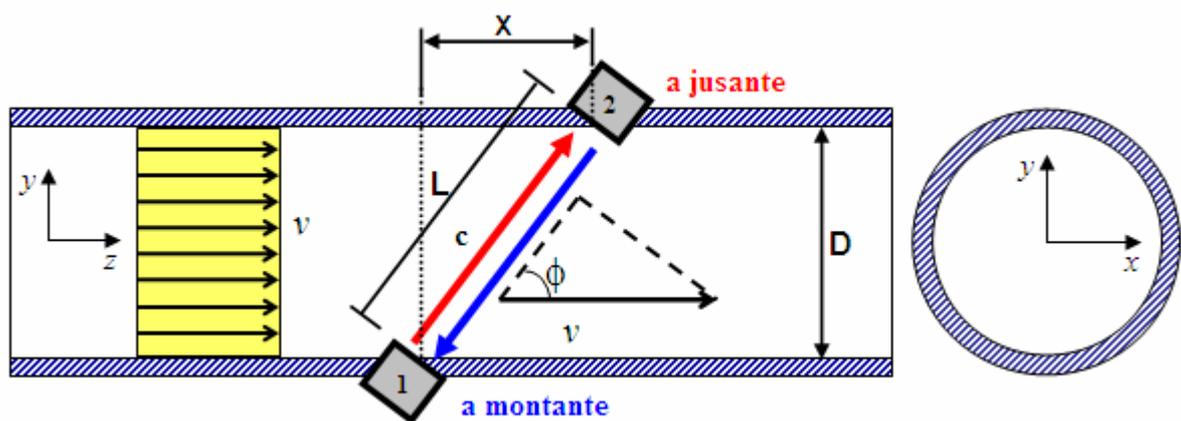


Figura 2.1: Representação esquemática da medição de vazão por ultra-som (velocidade uniforme) adaptação de [Ramos-2006].

- tubo com diâmetro D ;
- dois transdutores montados obliquamente, na região de medição;

- escoamento com perfil de velocidade uniforme;
- propagação da onda sonora no meio em movimento.

Dois transdutores ultra-sônicos, que agem tanto como emissores quanto como receptores, são montados ao longo da tubulação, na região de medição. O tempo de trânsito do sinal emitido do transdutor 1 para o transdutor 2 é medido, bem como o tempo de trânsito do sinal inverso, do transdutor 2 para o transdutor 1. Considerando que o som é uma onda mecânica cuja velocidade sofre interferência direta da velocidade do meio que a conduz, a onda emitida pelo transdutor 1 chega ao transdutor 2 em menor tempo que a onda emitida pelo transdutor 2 chega ao transdutor 1. Considerando a projeção da velocidade da velocidade sobre o caminho da onda ultra-sônica, temos que, se $v \cdot \cos \phi < c$:

$$c + v \cdot \cos \phi = \frac{L}{t_{12}} \quad \text{e} \quad c - v \cdot \cos \phi = \frac{L}{t_{21}} \quad (2.1)$$

- onde c : Velocidade do som no meio;
 v : Velocidade média do escoamento;
 ϕ : Ângulo entre o caminho acústico e a linha longitudinal do duto;
 L : Distância entre os transdutores ultra-sônicos;
 t_{12} : Tempo de trânsito do sinal emitido pelo transdutor 1 para o transdutor 2;
 Também chamado de tempo de trânsito a jusante (na direção do escoamento).
 t_{21} : Tempo de trânsito do sinal emitido pelo transdutor 2 para o transdutor 1;
 Também chamado de tempo de trânsito a montante (em contra escoamento).

Uma vez conhecidos os tempos de trânsito, as equações (2.1) podem ser resolvidas para a velocidade do som e velocidade do escoamento, obtém-se:

$$c = \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{1}{t_{12}} + \frac{1}{t_{21}} \right) = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_{12} + t_{21}}{t_{12} \cdot t_{21}} \quad (2.2)$$

$$v = \frac{L}{2 \cos \phi} \cdot \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) = \frac{L}{2 \cos \phi} \cdot \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} \cdot t_{21}} \quad (2.3)$$

Aplicando as relações $\cos \phi = \frac{X}{L}$ e $\sin \phi = \frac{D}{L}$, as equações (2.2) e (2.3) tomam as formas:

$$c = \frac{D}{2 \sin \phi} \cdot \left[\frac{1}{t_{12}} + \frac{1}{t_{21}} \right] \quad \text{e} \quad v = \frac{D}{\sin 2\phi} \cdot \left[\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right] \quad (2.4)$$

$$c = \frac{X}{2 \cos \phi} \cdot \left[\frac{1}{t_{12}} + \frac{1}{t_{21}} \right] \quad \text{e} \quad v = \frac{X}{2 (\cos \phi)^2} \cdot \left[\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right] \quad (2.5)$$

Um ponto a ser observado é o fato particular da configuração do transdutor ser aplicado numa configuração para $\phi = 90^\circ$. De fato, pelas equações (2.4), fica claro que nestas condições só será possível calcular a velocidade do som e o valor obtido para a velocidade média do escoamento seria sempre igual a zero, pois os tempos de trânsito a jusante e a montante seriam iguais.

Para o ângulo $\phi = 0^\circ$, a equação (2.5) mostra que é possível o cálculo da vazão. Porém, esta configuração traz outros problemas para a medição como, por exemplo, o posicionamento dos transdutores paralelos ao escoamento potencializando as perturbações no escoamento. E desta forma, prejudicando as vantagens dessa técnica de medição.

O que se procura com essa técnica de medição de vazão, é a medição não intrusiva no escoamento que se quer medir. Isso implica em mínima perturbação no processo de medição, além de não criar acidentes de linha. Também, devemos considerar, que tal configuração, o sinal ultra-sônico não varre todo o diâmetro do tubo. E assim não expressando com melhor exatidão os valores da vazão.

Vale ressaltar que as equações (2.1) são aplicáveis, assumindo um perfil de velocidade uniforme, o que na prática, sabemos não ocorrer, ainda que, o escoamento seja completamente desenvolvido. As relações que governam a interação entre a onda ultra-sônica e o meio pelo qual ela se desloca são as seguintes [Boone-1991] [Yeh-1997]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{e}}{c + \vec{V} \cdot \vec{e}} \right) = - \frac{\nabla c + e_x \cdot \nabla u_x + e_y \cdot \nabla u_y + e_z \cdot \nabla u_z}{c + \vec{V} \cdot \vec{e}} \quad \text{e} \quad \frac{d\vec{s}}{dt} = c \cdot \vec{e} + \vec{V} \quad (2.6)$$

onde: ds : elemento de comprimento infinitesimal ao longo do caminho acústico;

\vec{e} : vetor unitário na direção da frente de onda ;

\vec{V} : vetor velocidade local do fluxo ;

c : velocidade do som ;

(u_x, u_y, u_z) : componentes da velocidade em (x, y, z) ;

∇ : operador gradiente ;

(e_x, e_y, e_z) : cossenos diretores do vetor \vec{e}

A primeira das equações (2.6) se reduz a $\frac{d\vec{e}}{dt} = 0$ quando a magnitude da velocidade do som é constante ao longo do caminho acústico e a velocidade do escoamento é unidirecional e de módulo constante. Nestas condições a frente de onda segue, portanto, uma reta, isto é, o ângulo ϕ mostrado na figura 2.1 é constante ao longo de todo o caminho acústico, permitindo escrever as equação 2.1 e suas derivações, ou seja, as equações (2.2) a (2.5). Nota-se que o caminho acústico se desvia de uma reta no caso de uma ou ambas das seguintes condições:

- a velocidade do som varia ao longo do escoamento ($\nabla c \neq 0$);
- a velocidade do escoamento varia ao longo do meio ($\nabla u_x \neq 0$ e/ou $\nabla u_y \neq 0$ e/ou $\nabla u_z \neq 0$);

Assim, um escoamento uniforme e com velocidade do som constante no meio não desvia o caminho acústico de uma reta.

As equações (2.1) a (2.5) não são aplicáveis, em tese, se a velocidade for variável ao longo da seção do duto, ainda que a velocidade seja constante ao longo do tempo. Considere-se a figura 2.2, que apresenta um perfil de velocidade de escoamento variável ao longo da seção transversal do duto. Na verdade, a

velocidade está variando apenas ao longo da coordenada radial, mantendo-se constante ao longo da coordenada angular.

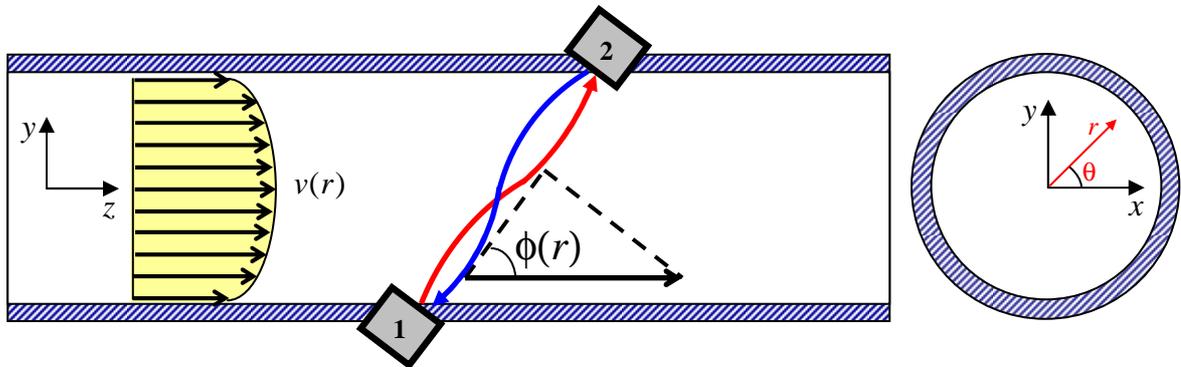


Figura 2.2: Efeito de arrasto do sinal ultra-sônicos pelo escoamento.

Neste caso as equações 2.6 tomam a seguinte forma [Boone-1991] :

$$\frac{d\phi}{dt} = -\cos^2 \phi \cdot \frac{d}{dr} [v(r)] \tag{2.7}$$

O caminho acústico pode agora ser numericamente computado, bem como o tempo de trânsito. Como já esperado, nota-se que se o perfil de velocidade for constante, $\frac{d\phi}{dt} = 0$, e o caminho acústico será, neste caso, uma reta. Deve-se chamar a atenção para o fato de que o escoamento uniforme pode conduzir a onda ultra-sônica, sem, no entanto, mudar sua direção de propagação. A figura 2.3 ilustra este fato. As setas sólidas indicam a onda emitida e as setas pontilhadas, a onda recebida, ambas deslocadas espacialmente, mas na mesma direção das respectivas ondas emitidas. Como a velocidade do som é muito maior que a velocidade do escoamento, o deslocamento lateral é praticamente nulo.

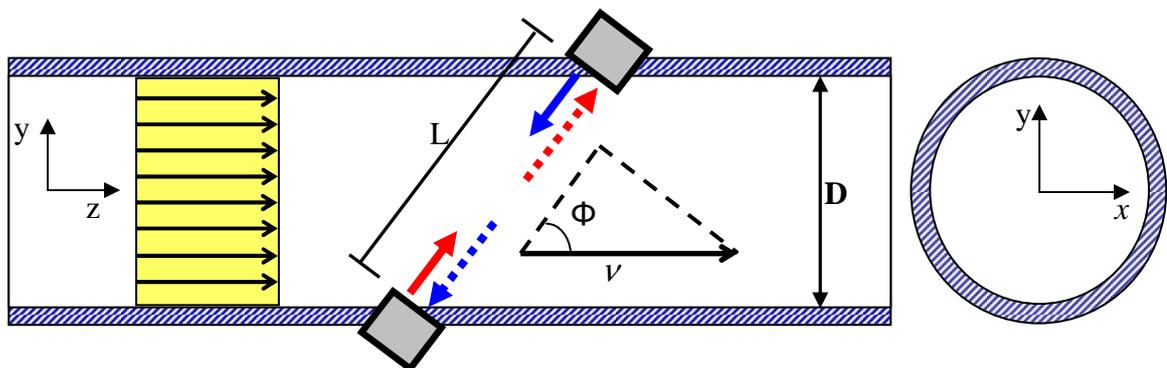


Figura 2.3: Efeito de arrasto do sinal ultra-sônicos num escoamento uniforme.

2.2 INFLUÊNCIA DO PERFIL DE VELOCIDADE NO CÁLCULO DA VELOCIDADE MÉDIA

Um ponto importante na medição de vazão ultra-sônica por tempo de trânsito é a influência do perfil de velocidade do escoamento. Até então, as equações desenvolvidas, como no caso de 2.1 a 2.5, consideram o perfil de velocidade constante.

Considera-se também, que o caminho acústico não se desvie muito da reta que une os dois transdutores, como é mostrado na figura 2.2, apesar da não uniformidade do perfil de velocidade. Neste caso, calcular os tempos de trânsito considerando a velocidade constante equivale à substituição do perfil de velocidade pela velocidade média naquele caminho. Assim, a distância L entre os dois transdutores é calculada pelas equações (2.8) e (2.9). O que, através de manipulação aritmética, nos leva ao valor da velocidade média do escoamento:

$$L = \int_0^{t_{12}} (c + v \cdot \cos \phi) \cdot dt = (c + \bar{v}_D \cdot \cos \phi) \cdot t_{12}, \text{ a jusante} \quad (2.8)$$

$$L = \int_0^{t_{21}} (c - v \cdot \cos \phi) \cdot dt = (c - \bar{v}_D \cdot \cos \phi) \cdot t_{21}, \text{ a montante} \quad (2.9)$$

onde: \bar{v}_D : indica a velocidade média do escoamento, na direção longitudinal do duto.

Considerando que o perfil de velocidade não se altera ao longo da longitudinal do duto, a velocidade média ao longo do caminho acústico é a mesma ao longo do diâmetro, daí o subscrito D .

As equações 2.8 e 2.9 formam o mesmo sistema de cálculo da equação (2.1). E a velocidade calculada pela equação 2.3 é a velocidade média do escoamento, na direção longitudinal, ao longo diâmetro. O termo \bar{v}_D é expresso por

$$\bar{v}_L = \frac{1}{D} \int_D v(r) \cdot dr \quad (2.10)$$

onde: $v(r)$ é exatamente o perfil de velocidade real na seção transversal do tubo.

Por outro lado, a velocidade média na seção transversal do duto é dada por

$$\bar{v}_A = \frac{1}{A} \iint_A v(r) \cdot dA \quad (2.11)$$

Quando o perfil de velocidade é constante, a velocidade média sobre qualquer área ou caminho é a mesma. Isto não ocorre quando o perfil de velocidades não é uniforme, o que leva à necessidade de se corrigir a equação 2.3 e suas derivações. Faz-se isto aplicando um fator de correção como abaixo:

$$\bar{v}_A = k \cdot v, \text{ com } k = \frac{\iint_A v(r) dA}{\int_D v(r) dr} \quad (2.12)$$

onde v é a velocidade computada pela expressão 2.3, e suas derivações. A vazão volumétrica é dada por $Q = \bar{v}_A \cdot A$, de forma que, da equação 2.3, tem-se:

$$Q = k \cdot v \cdot A \quad (2.13)$$

O fator k depende unicamente do perfil de velocidade. O problema agora é o conhecimento deste perfil. Existem diversas proposições para fatores de correção, alguns dos quais foram reportados por Gol'tsov [Gol'tsov-1998]:

$$\left. \begin{aligned}
 k_0 &= \frac{2n}{1+2n} \\
 k_1 &= 0.873 + 0.0157 \cdot \log(\text{Re}) - 0.0004 \cdot \log^2(\text{Re}) \\
 k_2 &= \left[1 + 0.01 \cdot \sqrt{6.25 + 431 \cdot \text{Re}^{-0.237}} \right]^{-1} \\
 k_3 &= \left[1.125 - 0.0115 \cdot \log(\text{Re}) \right]^{-1} \\
 k_4 &= 0.889 + 0.0091 \cdot \log \left[\text{Re} + 0.0001 \cdot \log^2(\text{Re}) \right] \\
 k_5 &= \left[1.119 - 0.011 \cdot \log(\text{Re}) \right]^{-1} \\
 k_6 &= 0.889 + 0.009 \cdot \log(\text{Re}) + 0.0001 \cdot \log^2(\text{Re}) \\
 k_7 &= \left[1.125 - 0.0115 \cdot \log(0.94 \text{Re}) \right]^{-1} \\
 k_8 &= 0.89 + 0.01 \cdot \log(\text{Re})
 \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

A figura 2.4 compara cada fator de correção da equação (2.14). A diferença máxima entre os coeficientes previstos pelas expressões é, para escoamento turbulento, inferior a 3%, não ultrapassando 1.3 % para $\text{Re} \geq 10^4$. Nota-se, particularmente, que os fatores expressos por k_4 , k_7 e k_8 apresentam uma convergência mais estreita ainda. A figura 2.5 apresenta uma ampliação da figura 2.4 para a faixa de $\text{Re} \leq 2.5 \cdot 10^7$.

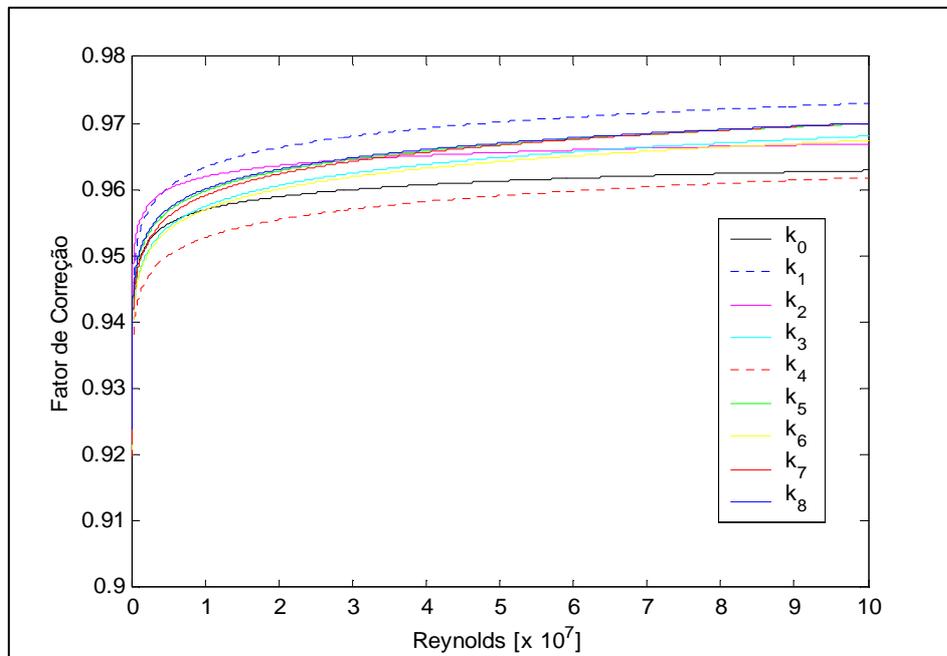


Figura 2.4: Fator de correção em função do número de Reynolds, segundo diversas propostas[Ramos-2006].

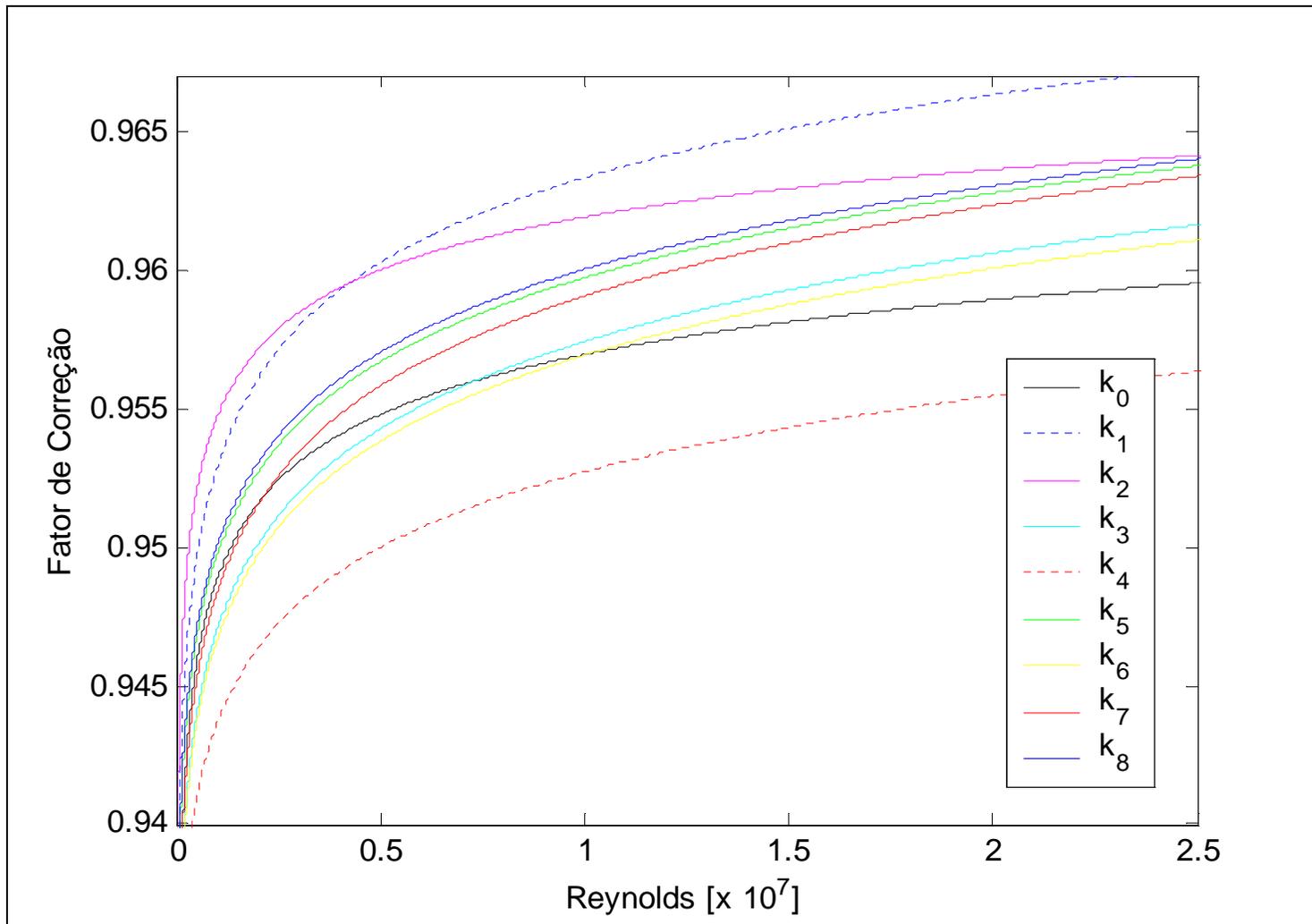


Figura 2.5: Ampliação da figura 2.4, para $Re \leq 2.5 \cdot 10^7$ [Ramos-2006].

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A busca pela melhor exatidão do processo de medição de vazão ultra-sônica por tempo de trânsito, leva a destacar este tópico, algumas considerações sobre a incerteza de medição destacando as variáveis envolvidas no processo, ressaltando a importância da minimização da incerteza nos tempos de trânsito e do fator de correção k .

Falar sobre incerteza de medição é falar sobre o cálculo da velocidade média de escoamento, que é de grande importância para o valor da vazão, e neste caso a incerteza do cálculo da velocidade média do escoamento depende de alguns fatores:

- do próprio perfil de velocidade;
- da geometria do arranjo do medidor e correta determinação do ângulo ϕ ;
- não exatidão na medição dos tempos de trânsito.

Daí desenvolve-se a seguinte sequência para estimação da incerteza:

$$V = k \cdot \frac{L}{2 \cos \phi} \cdot \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) = k \cdot \frac{L}{2 \cos \phi} \cdot \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} \cdot t_{21}} \quad (2.15)$$

Esta é a expressão para a estimação da velocidade de escoamento. E o tempo de trânsito é o parâmetro que apresenta maior sensibilidade no cálculo da incerteza:

Definindo $\tau_- = \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{21} \cdot t_{12}}$ e $X = \cos \phi$ resulta:

$$V = \frac{k}{2} \cdot \frac{L}{X} \cdot \tau_- \quad (2.16)$$

Aplicando a regra de propagação de incertezas entre variáveis explícitas tem-se:

$$\Delta V^2 = \left(\frac{\partial V}{\partial k} \cdot \Delta k \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial L} \cdot \Delta L \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial X} \cdot \Delta X \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \tau_-} \cdot \Delta \tau_- \right)^2$$

que resulta:

$$\Delta V^2 = \left(\frac{L \cdot \tau_-}{2X} \cdot \Delta k \right)^2 + \left(\frac{k \tau_-}{2X} \cdot \Delta L \right)^2 + \left(\frac{kL \tau_-}{2} \cdot \Delta X \right)^2 + \left(\frac{kL}{2X} \cdot \Delta \tau_- \right)^2 \quad (2.17)$$

Dividindo tudo por V^2 , tem-se:

$$\left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 = \left(\frac{\Delta k}{k} \right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta X}{X} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau_-}{\tau_-} \right)^2 \quad (2.18)$$

Tomando a respectiva expressão para o termo τ_- escreve-se:

$$\left(\frac{\Delta \tau_-}{\tau_-} \right)^2 = \left(\frac{t_{21}}{t_{21} - t_{12}} \right)^2 \left(\frac{\Delta t_{12}}{t_{12}} \right)^2 + \left(\frac{t_{12}}{t_{21} - t_{12}} \right)^2 \left(\frac{\Delta t_{21}}{t_{21}} \right)^2 \quad (2.19)$$

Estas expressões demonstram, que para o cálculo da incerteza, os termos de cada fonte parecem ter o mesmo peso. Mas a expressão 2.19, demonstra o quanto a incerteza dos tempos de trânsito é dominante. E no caso de velocidades mais baixas, os tempos de trânsito serem bastante próximos, então:

- a diferença dos tempos de trânsito é da ordem de dezenas ou centenas de nanossegundos. Assim, as razões $\left(\frac{t_{21}}{t_{21} - t_{12}} \right)$ e $\left(\frac{t_{12}}{t_{21} - t_{12}} \right)$ costumam ficar na ordem de 10^2 a 10^5 .

Por outro lado, a velocidade do som é calculada pela expressão:

$$c = \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{1}{t_{12}} + \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (2.20)$$

Definindo $\tau_+ = \frac{t_{21} + t_{12}}{t_{21} \cdot t_{12}}$ tem-se:

$$c = \frac{L}{2} \cdot \tau_+ \quad (2.21)$$

$$\Delta c^2 = \left(\frac{\partial c}{\partial L} \cdot \Delta L \right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial \tau_+} \cdot \Delta \tau_+ \right)^2 = \left(\frac{\tau_+}{2} \cdot \Delta L \right)^2 + \left(\frac{L}{2} \cdot \Delta \tau_+ \right)^2 \quad (2.22)$$

Dividindo tudo por c^2 , fica:

$$\left(\frac{\Delta c}{c} \right)^2 = \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau_+}{\tau_+} \right)^2 \quad (2.23)$$

Tomando as respectivas expressões para τ_+ temos

$$\left(\frac{\Delta \tau_+}{\tau_+} \right)^2 = \left(\frac{t_{21}}{t_{21} + t_{12}} \right)^2 \left(\frac{\Delta t_{12}}{t_{12}} \right)^2 + \left(\frac{t_{12}}{t_{21} + t_{12}} \right)^2 \left(\frac{\Delta t_{21}}{t_{21}} \right)^2 \quad (2.24)$$

Ao contrário do que ocorre com a incerteza do termo τ_- , a incerteza do termo τ_+ é bem mais baixa. Aqui os multiplicadores das incertezas dos tempos, isto é, $\left(\frac{t_{12}}{t_{21} + t_{12}} \right)$ e $\left(\frac{t_{21}}{t_{21} + t_{12}} \right)$, de trânsito são menores que a unidade, fazendo que as incertezas destes tempos de trânsito sejam, durante sua propagação, filtradas quanto à velocidade do som.

A expressão completa para a propagação de incertezas na expressão do cálculo de velocidade (expressão 2.17) é $[r(x, y)]$ é o coeficiente de correlação entre x e y :

$$\begin{aligned} \Delta V^2 = & \left(\frac{\partial V}{\partial k} \cdot \Delta k \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial L} \cdot \Delta L \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial X} \cdot \Delta X \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \tau_-} \cdot \Delta \tau_- \right)^2 \\ & + 2 \cdot \frac{\partial V}{\partial \tau_-} \cdot \frac{\partial V}{\partial L} \cdot r(L, \tau_-) \cdot \Delta \tau_- \cdot \Delta L \quad + 2 \cdot \frac{\partial V}{\partial L} \cdot \frac{\partial V}{\partial X} \cdot r(L, X) \cdot \Delta L \cdot \Delta X \\ & + 2 \cdot \frac{\partial V}{\partial \tau_-} \cdot \frac{\partial V}{\partial X} \cdot r(\tau_-, X) \cdot \Delta \tau_- \cdot \Delta X \quad + 2 \cdot \frac{\partial V}{\partial L} \cdot \frac{\partial V}{\partial k} \cdot r(L, k) \cdot \Delta L \cdot \Delta k \\ & + 2 \cdot \frac{\partial V}{\partial \tau_-} \cdot \frac{\partial V}{\partial k} \cdot r(\tau_-, k) \cdot \Delta \tau_- \cdot \Delta k \quad + 2 \cdot \frac{\partial V}{\partial k} \cdot \frac{\partial V}{\partial X} \cdot r(k, X) \cdot \Delta k \cdot \Delta X \end{aligned} \quad (2.25)$$

O coeficiente de correlação mede o quanto uma perturbação numa variável está estatisticamente relacionada a uma perturbação na outra. Assim, sabe-se que as

seguintes variáveis não são correlacionadas, pois uma perturbação em uma não implica nenhuma perturbação na outra:

- o comprimento L e o ângulo ϕ (embutido na variável X);
- o fator k e o comprimento L ;
- o fator k e o ângulo ϕ

Deve-se analisar o grau de correlação entre os tempos de trânsito (embutidos na variável τ_-) e as demais variáveis:

$$c + v \cdot \cos \phi = \frac{L}{t_{12}} \quad \text{e} \quad c - v \cdot \cos \phi = \frac{L}{t_{21}} \quad (2.26)$$

Os tempos de trânsito e a distância L são inversamente proporcionais. Da mesma relação vem que, sendo L e ϕ independentes, os tempos de trânsito estão correlacionados ao ângulo ϕ . Assim:

$$r(\tau_-, L) = r(\tau_-, X) = 1.$$

Para a análise do coeficiente de correlação $r(\tau_-, k)$ considera-se um escoamento com velocidade média constante na seção. Portanto, $r(\tau_-, k) = 1$. Desta forma, a incerteza relativa da velocidade do escoamento é expressa por:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 = & \left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta X}{X}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau_-}{\tau_-}\right)^2 \\ & + 2 \cdot \left(\frac{\Delta \tau_-}{\tau_-}\right) \cdot \left(\frac{\Delta L}{L}\right) + 2 \cdot \left(\frac{\Delta \tau_-}{\tau_-}\right) \cdot \left(\frac{\Delta X}{X}\right) + 2 \cdot \left(\frac{\Delta \tau_-}{\tau_-}\right) \cdot \left(\frac{\Delta k}{k}\right) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Para a velocidade do som:

$$\left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2 = \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau_+}{\tau_+}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{\Delta \tau_+}{\tau_+}\right) \cdot \left(\frac{\Delta L}{L}\right) \quad (2.28)$$

A partir de agora analisa-se o peso da incerteza de cada variável na incerteza total, ou seja, a análise paramétrica da incerteza. Trata-se de uma análise quantitativa,

para isso, fixa-se a incerteza absoluta, pois a incerteza relativa de cada parâmetro é dependente da própria velocidade. Dentre as variáveis envolvidas no cálculo da velocidade média do escoamento, duas são fixadas independentes da velocidade média do escoamento: L e o ângulo ϕ . Desta forma a sua incerteza relativa é independente da velocidade média do escoamento. As outras são o fator de correção k e os tempos de trânsito, que dependem da própria velocidade média do escoamento. A incerteza relativa do fator k é, a rigor, dependente da própria velocidade média do escoamento. Em geral, considera-se o fator k fixo, com exceção para certos valores de Reynolds.

Deve-se dar atenção especial para a incerteza dos tempos de trânsito. Avalia-se a incerteza dos tempos de trânsito como um intervalo, onde a variável pode ser encontrada em torno do valor esperado. Esta atenção especial, diz respeito à medição do tempo que é feita através de circuito eletrônico com resolução finita. Dependendo deste contador de tempo, é possível que este erro seja assimétrico em torno do valor esperado. Considera-se, que a incerteza fornecida já tenha considerado esta particularidade [NFOGM-2001] e [Inmetro-2003].

A tabela 2.3.1 mostra a variação da incerteza relativa da velocidade em função da própria velocidade para um gás natural típico (rico em metano):

- massa específica: $0.975 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- viscosidade dinâmica: $1.34 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
- diâmetro interno do duto: 0.3048 m
- ângulo ϕ : 45°
- adotam-se 4 velocidades para o escoamento: 0.1 m/s , 1 m/s , 10 m/s , 100 m/s
- a incerteza relativa do fator de correção k , 3 valores: 1% , 2% e 3% .
- a incerteza da distância L e do ângulo ϕ , um único valor: 0.1% .
- incerteza dos tempos de trânsito foi considerada de 100 ns .

| Velocidade (m/s) | Incerteza tempos de trânsito | | Incerteza relativa da velocidade $\frac{\Delta v}{v}$ | | |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|----------------------------|----------------------------|
| | $\frac{\Delta t_{12}}{t_{12}}$ | $\frac{\Delta t_{21}}{t_{21}}$ | $\frac{\Delta k}{k} = 1\%$ | $\frac{\Delta k}{k} = 2\%$ | $\frac{\Delta k}{k} = 3\%$ |
| 0,1 | 0,01% | 0,01% | 40,8% | 41,4% | 41,9% |
| 1 | | | 4,7% | 5,4% | 6,2% |
| 10 | | | 1,3% | 2,3% | 3,3% |
| 100 | | | 1,1% | 2,1% | 3,1% |

Tabela 2.3.1: Incerteza relativa da velocidade de escoamento para o conjunto de parâmetros listados. Incerteza absoluta dos tempos de trânsito: 100 ns.

A tabela 2.3.2 apresenta a incerteza para os mesmos dados de escoamento. Neste caso, no entanto, a incerteza absoluta dos tempos de trânsito é de 10 ns.

| Velocidade (m/s) | Incerteza | | $\frac{\Delta v}{v}$ | | |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | $\frac{\Delta t_{12}}{t_{12}}$ | $\frac{\Delta t_{21}}{t_{21}}$ | $\frac{\Delta k}{k} = 1\%$ | $\frac{\Delta k}{k} = 2\%$ | $\frac{\Delta k}{k} = 3\%$ |
| 0,1 | 0,001% | 0,001% | 4,7% | 5,4% | 6,2% |
| 1 | | | 1,3% | 2,3% | 3,3% |
| 10 | | | 1,1% | 2,1% | 3,1% |
| 100 | | | 1,1% | 2,1% | 3,1% |

Tabela 2.3.2: Incerteza relativa da velocidade de escoamento para o conjunto de parâmetros listados. Incerteza absoluta dos tempos de trânsito: 10 ns.

Conclusões:

- vê-se que a incerteza dos tempos de trânsito assume papel fundamental em baixas velocidades.
- em altas velocidades a incerteza fica dominada principalmente pelo fator de correção k .
- na verdade a regra básica é a seguinte: Se a diferença dos tempos de trânsito é muito maior que a incerteza absoluta da medição dos próprios tempos, então a incerteza da velocidade será dominada pela incerteza do fator k .

É possível equacionar a velocidade limite na qual a incerteza relativa da velocidade passa a ser dominada pelo fator de correção ou pelos tempos de trânsito.

Considerando as equações (2.19) a (2.26), e supondo $\Delta t_{21} = \Delta t_{12}$, conclui-se que:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \tau_-}{\tau_-} = \frac{\Delta k}{k} &\Rightarrow \left(\frac{\Delta t}{t_{21} - t_{12}} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{t_{21}}{t_{12}} \right)^2 + \left(\frac{t_{12}}{t_{21}} \right)^2 \right] = \left(\frac{\Delta k}{k} \right)^2 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left(\frac{\Delta t}{t_{21} - t_{12}} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{c - v \cdot \cos \phi}{c + v \cdot \cos \phi} \right)^2 + \left(\frac{c + v \cdot \cos \phi}{c - v \cdot \cos \phi} \right)^2 \right] = \left(\frac{\Delta k}{k} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\frac{\Delta \tau_-}{\tau_-} = \frac{\Delta k}{k} \Rightarrow 2 \cdot \left(\frac{\Delta t}{t_{21} - t_{12}} \right)^2 \approx \frac{\Delta k}{k} \Rightarrow \frac{\Delta t}{t_{21} - t_{12}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\Delta k}{k} \quad (2.30)$$

A velocidade a partir da qual a incerteza do fator de correção passa a predominar sobre a incerteza dos tempos de trânsito é dada por:

$$\tilde{v} \approx \frac{\sqrt{2 \cdot \left(\frac{\Delta k}{k} \right)^2 \cdot L^2 + 4 \cdot c^2 \cdot \Delta t^2} - \sqrt{2} \cdot L \cdot \left(\frac{\Delta k}{k} \right)}{2 \cdot \Delta t \cdot \cos \phi} \quad (2.31)$$

3 INFLUÊNCIA DO PERFIL DE VELOCIDADE NA DETECÇÃO DO SINAL ULTRA-SÔNICO

Este capítulo aborda a influência do perfil de velocidade sobre o caminho acústico. Isto é importante porque a medição dos tempos de trânsito depende da detecção do sinal ultra-sônico pelo receptor, o que depende de quanto a onda acústica é arrastada e refratada pelo meio móvel em questão, isto é, pelo escoamento.

3.1 EQUAÇÕES QUE REGEM O PROBLEMA

Quatro equações dinâmicas regem o transporte de uma onda acústica por um meio móvel, a saber:

- A equação que descreve o comportamento da onda acústica no meio

$$\frac{dv}{dt} + \frac{\nabla P}{\rho} = 0 \quad (3.1-a)$$

- A equação que rege o deslocamento do fluido no meio

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (3.1-b)$$

- As equações que descrevem as propriedades do meio

$$P = P(\rho, S) \quad (3.1-c)$$

$$\frac{dS}{dt} = 0 \quad (3.1-d)$$

Nas equações 3.1 (a-d), todas as variáveis são funções das coordenadas espaciais (x, y, z) , e:

- v é a velocidade do fluido;
- p é a pressão;
- ρ é a massa específica;
- S é a entropia;
- $\frac{d[\cdot]}{dt} = \frac{\partial[\cdot]}{\partial t} + v \cdot \nabla[\cdot]$ é a derivada material.

Obviamente algumas hipóteses estão embutidas nestas equações:

- As equações já são fruto de linearizações
- A energia acústica é conservada
- Propriedades constantes e não variam com a temperatura

Uma onda acústica provoca flutuações em todas as variáveis, de modo que, para análise destas flutuações, pode-se supor:

$$\left. \begin{aligned} v &= \bar{v} + w \\ P &= \bar{P} + p \\ \rho &= \bar{\rho} + \eta \\ S &= \bar{S} + s \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

A substituição da equação 3.2 nas equações 3.1 resulta

$$\frac{dw}{dt} + (w \cdot \nabla)\bar{v} + \frac{\nabla p}{\bar{\rho}} - \frac{\eta \nabla \bar{P}}{\bar{\rho}^2} = 0 \quad (3.3-a)$$

$$\frac{d\eta}{dt} + (w \cdot \nabla)\bar{\rho} + \bar{\rho} \nabla \cdot w + \eta \nabla \cdot \bar{v} = 0 \quad (3.3-b)$$

$$p = c^2 \eta + hs \quad (3.3-c)$$

$$\frac{ds}{dt} + (w \cdot \nabla)\bar{S} = 0 \quad (3.3-d)$$

onde $h = \left. \frac{\partial \bar{P}}{\partial S} \right|_{\rho}$ e $h = \left. \frac{\partial \bar{P}}{\partial \rho} \right|_S$ é a velocidade do som adiabática.

3.2 SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DO CAMINHO ACÚSTICO

A solução das equações 3.3 pode ser escrita na forma:

$$\left. \begin{aligned} p(\mathbf{r}, t) &= \exp[-j\omega t + jK_0\psi(\mathbf{r})] \cdot p_0(\mathbf{r}) \\ \eta(\mathbf{r}, t) &= \exp[-j\omega t + jK_0\psi(\mathbf{r})] \cdot \eta_0(\mathbf{r}) \\ w(\mathbf{r}, t) &= \exp[-j\omega t + jK_0\psi(\mathbf{r})] \cdot w_0(\mathbf{r}) \\ s(\mathbf{r}, t) &= \exp[-j\omega t + jK_0\psi(\mathbf{r})] \cdot s_0(\mathbf{r}) \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

onde: $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$ é o vetor posição;

ω é a frequência da onda sonora;

$\psi(\mathbf{r})$ é seu eikonal.

Sabe-se que o problema de propagação de uma onda sonora tem solução única apenas quando a propagação se dá em meio infinito. Num meio finito, porém, infinitas soluções são possíveis, cada uma correspondente a frequência de propagação da onda sonora. Obviamente a frequência de propagação da onda dependerá das características do meio, materiais e geometrias. Estas características estão, nas equações (3.4), embutidas na constante k_0 .

A substituição de (3.4) nas equações (3.3) resulta que a função $\psi(\mathbf{r})$ satisfaz

$$\frac{c}{c(\mathbf{r})} - \frac{v(\mathbf{r}) \cdot \nabla \psi(\mathbf{r})}{c(\mathbf{r})} = |\nabla \psi(\mathbf{r})| \quad (3.5)$$

Apenas para melhor visualização, supõe-se um escoamento unidirecional uniforme de velocidade v no qual se desloca uma onda acústica de velocidade c , como mostra a figura 3.1. O vetor \mathbf{n} é normal à frente de onda e o vetor \mathbf{u} é tangente ao caminho acústico.

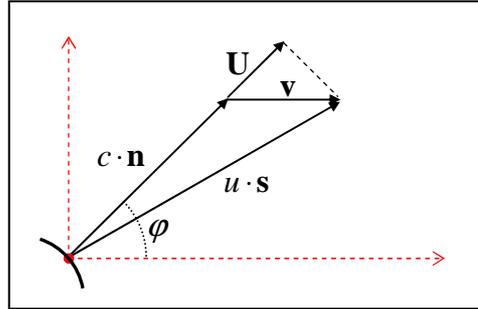


Figura 3.1: Frente de onda num meio em movimento.

Obviamente tem-se:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u} &= c\mathbf{n} + \mathbf{v} \\ \mathbf{U} &= (c + \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

O importante, para os fins deste trabalho, é compreender o que acontece, ao longo do tempo, com os vetores unitários na direção da frente de onda (\mathbf{n}) e na direção do caminho acústico (\mathbf{s}). Com estas informações é possível:

- Traçar a geometria do caminho acústico;
- Computar o tempo decorrido entre dois pontos do caminho acústico num determinado meio.

Para obter-se a solução do caminho acústico, integra-se a equação de Eikonal (equação 3.6), podendo-se escrever:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{\mathbf{B}}{B} + \frac{\mathbf{v}}{c} \quad (3.7-a)$$

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = -\frac{c_0(\nabla c)}{c^2} - \frac{\nabla(\mathbf{B} \cdot \mathbf{v})}{c} \quad (3.7-b)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = B + \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{v}}{c} \quad (3.7-c)$$

onde $\mathbf{B} = \nabla \psi(\mathbf{r})$ e $\mathbf{r}(t)$ determina o caminho acústico da onda sonora.

3.3 COMENTÁRIOS SOBRE O PROBLEMA REAL: MÚLTIPLAS FRENTES DE ONDA

3.1.1. ANÁLISE GEOMÉTRICA DO CAMINHO ACÚSTICO NUM ESCOAMENTO HOMOGENEO UNIDIRECIONAL COM PERFIL DE HINZE

A figura 3.2 apresenta o caminho acústico de uma onda movendo-se num escoamento em duto circular. Nestas condições, a equação 3.7-c, após manipulações, resulta:

$$\frac{c}{\cos \varphi} + v = \text{constante} \quad (3.8)$$

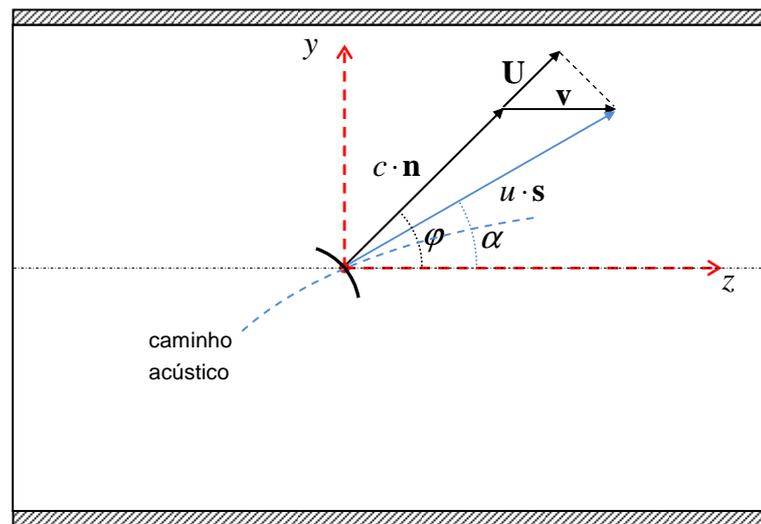


Figura 3.2: Frente de onda num meio em movimento em duto circular.

O perfil de velocidade de Hinze, definido para um escoamento turbulento em duto circular, é dado pela seguinte equação:

$$v(y) = v_0 \left(1 - \left| \frac{y}{r} \right| \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.9)$$

onde:

$v_0 \rightarrow$ velocidade no centro do duto (máxima);

$y \rightarrow$ coordenada radial (origem no centro do duto circular);

$r \rightarrow$ raio do duto circular;

$n \rightarrow$ expoente que caracteriza a dinâmica do escoamento, e que depende do número de Reynolds, conforme a seguinte equação: $n = 2 \log \left(\frac{Re}{n} \right) - 0.8$;

Supondo que o transdutor emissor esteja localizado nas coordenadas $(z, y) = (-r, -r)$, emitindo uma onda ultra-sônica a um ângulo $\varphi = 45^\circ$. Aplicando-se a equação 3.7 e levando-se em conta que $v(-r) = 0$, tem-se:

$$\frac{c}{\cos \varphi} + v(y) = \frac{c}{\sqrt{2}} \quad (3.10)$$

Assim, o ângulo da frente de onda obedece à seguinte equação:

$$\frac{c}{\cos \varphi} + v(y) = \frac{c}{\sqrt{2}} \Rightarrow \cos \varphi = \left[\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{v(y)}{c} \right]^{-1} \Rightarrow \sin \varphi = \sqrt{1 - \left[\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{v(y)}{c} \right]^{-2}} \quad (3.11)$$

Na figura 3.2, podemos escrever:

$$v_z = c \cos \varphi + v(y) \quad v_y = c \sin \varphi$$

Assim, o caminho acústico obedece:

$$z = z_0 + \int_0^{\tau} v_z dt = -r + \int_0^{\tau} \left[c \cos \varphi + v(y) \right] \cdot \frac{dy}{c \sin \varphi} = -r + \int_{-r}^{y^*} \left[\frac{c \cos \varphi + v(y)}{c \sin \varphi} \right] dy \quad (3.12)$$

de forma que se tem:

$$z(r) = z^* = -r + \int_{-r}^r \left[\frac{c \cos \varphi + v(y)}{c \sin \varphi} \right] dy \quad (3.13)$$

A equação 3.13 é resolvida sem complicações através de integração numérica, devendo-se recordar que $\cos \varphi$ e $\sin \varphi$ são dados pelas equações 3.11. O tempo de trânsito na trajetória de $(-r, -r)$ a (r, z^*) pode ser computado da seguinte forma:

$$v_y = \frac{dy}{dt} = c \sin \varphi \Rightarrow \Delta t = \int_{-r}^r \frac{dy}{c \sin \varphi}, \quad (3.14)$$

Deve-se agora recordar a configuração tradicional de um medidor ultra-sônico por tempo de trânsito, comentada nos capítulos 1 e 2, que é reproduzido na figura 3.3.

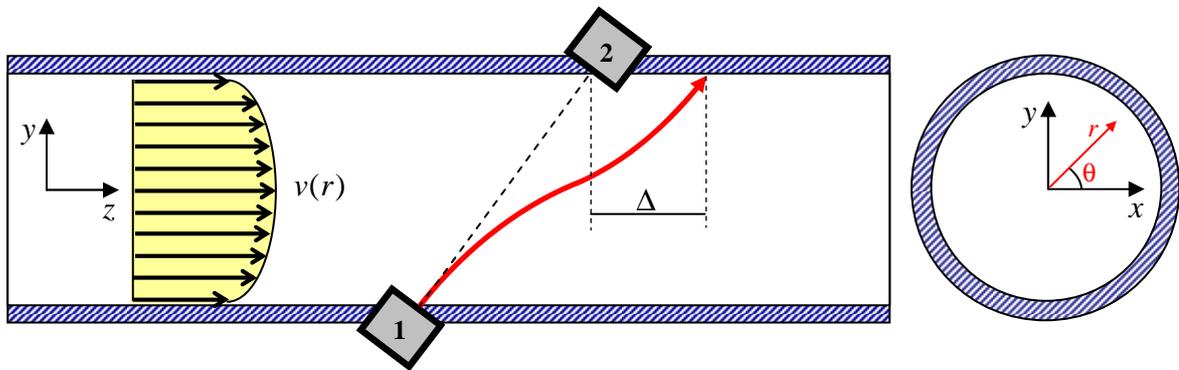


Figura 3.3: Representação esquemática da medição de vazão por ultra-som (velocidade uniforme) adaptação de [Ramos-2006].

O efeito do arrasto da onda ultra-sônica está representado pela variável Δ . Se a visada direta entre o emissor o receptor estiver a 45° da linha longitudinal do duto, tem-se:

$$\Delta = z^* - r \Rightarrow \Delta = \int_{-r}^r \left[\frac{c \cos \varphi + v(y)}{c \sin \varphi} \right] dy - d, \quad (3.15)$$

onde d é o diâmetro da tubulação.

A figura 3.4 apresenta a variação de Δ em função da velocidade média do escoamento, para um perfil de Hinze, considerando como meio móvel um gás natural típico com as seguintes propriedades:

massa específica $\rho = 0.975 \text{ kg/m}^3$

viscosidade dinâmica $\mu = 1.34 \text{ Ns/m}^2$

Considera-se uma tubulação de 12 polegadas de diâmetro (também característico), têm-se todos os parâmetros para o cálculo do número de Reynolds, a saber:

$$Re = \frac{\rho \bar{v} d}{\mu} \quad (\bar{v} = \text{velocidade média do escoamento})$$

Aplicando-se o conceito de velocidade média ao perfil de Hinze tem-se

$$\bar{v} = \frac{1}{\pi r^2} \int_A v_0 \left(1 - \left|\frac{y}{r}\right|\right)^{\frac{1}{n}} dA = \frac{v_0}{\pi r^2} \int_{-r}^r \left(1 - \left|\frac{y}{r}\right|\right)^{\frac{1}{n}} (2\pi r dr) \Rightarrow \bar{v} = \frac{2n^2 v_0}{(n+1)(1+2n)} \quad (3.16)$$

A equação 3.16 fornece o valor do parâmetro v_0 a partir da velocidade média e do expoente n , este obtido a partir da velocidade média e do número de Reynolds, conforme a equação (3.8).

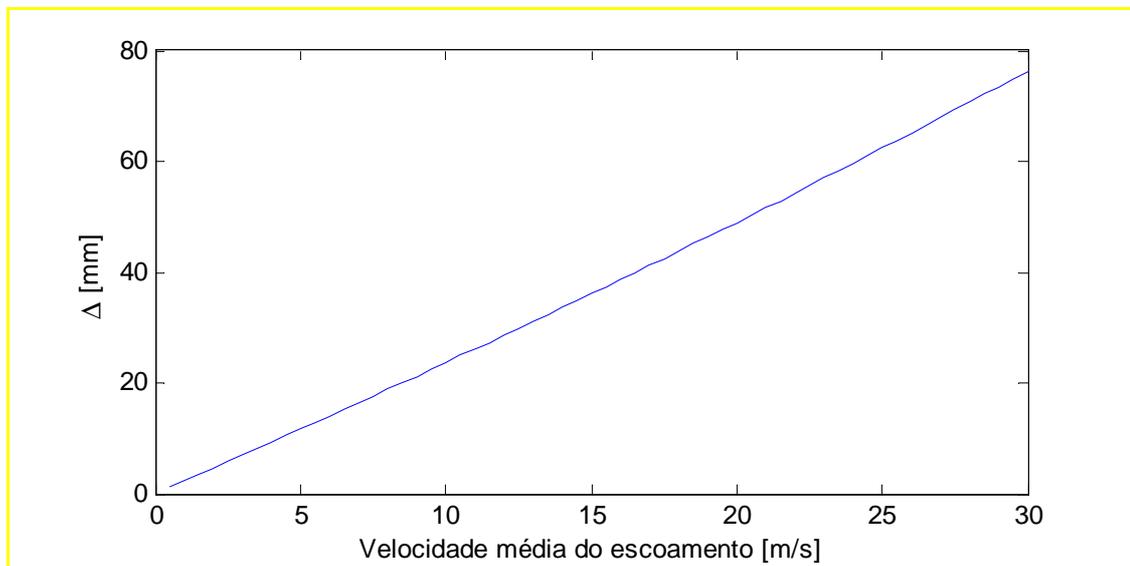


Figura 3.4: Efeito do arrasto do sinal ultra-sônico pelo escoamento (receptor a jusante).

Como se pode ver, na figura 3.4, o efeito do arrasto sobre o sinal ultra-sônico o desvia consideravelmente da linha da visada direta. Repara-se que, no caso analisado, pode-se considerar que o desvio Δ varia linearmente com a velocidade até 30 m/s.

É importante analisar o que acontece quando o sinal ultra-sônico é emitido contra o escoamento. Neste caso, basta considerar $\varphi_0 = 135^\circ$ e a equação 3.10 deverá ser escrita como:

$$\frac{c}{\cos \varphi} + v(y) = \frac{-c}{\sqrt{2}} \quad (3.17)$$

Assim, tem-se, na sequência

$$\cos \varphi = - \left[\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{v(y)}{c} \right]^{-1} \Rightarrow \sin \varphi = \sqrt{1 - \left[\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{v(y)}{c} \right]^{-2}} \quad (3.18)$$

Assim, o caminho acústico continua sendo computado pela equação (3.12), na qual os termos $\cos \varphi$ e $\sin \varphi$ são dados, agora, pelas equações (3.18), em vez de pelas equações (3.12). Uma forma mais prática e direta consiste em apenas mudar o sinal da velocidade de escoamento, de positivo para negativo.

A figura 3.5 apresenta o desvio, em relação à visada direta, do sinal ultra-sônico quando emitido contra o escoamento. O meio é o mesmo considerado na figura 3.4. O sinal negativo para o desvio indica apenas que, na parede da tubulação, o sinal estará antes do receptor, ao passo que, na figura 3.4, ela chegará à direita do receptor.

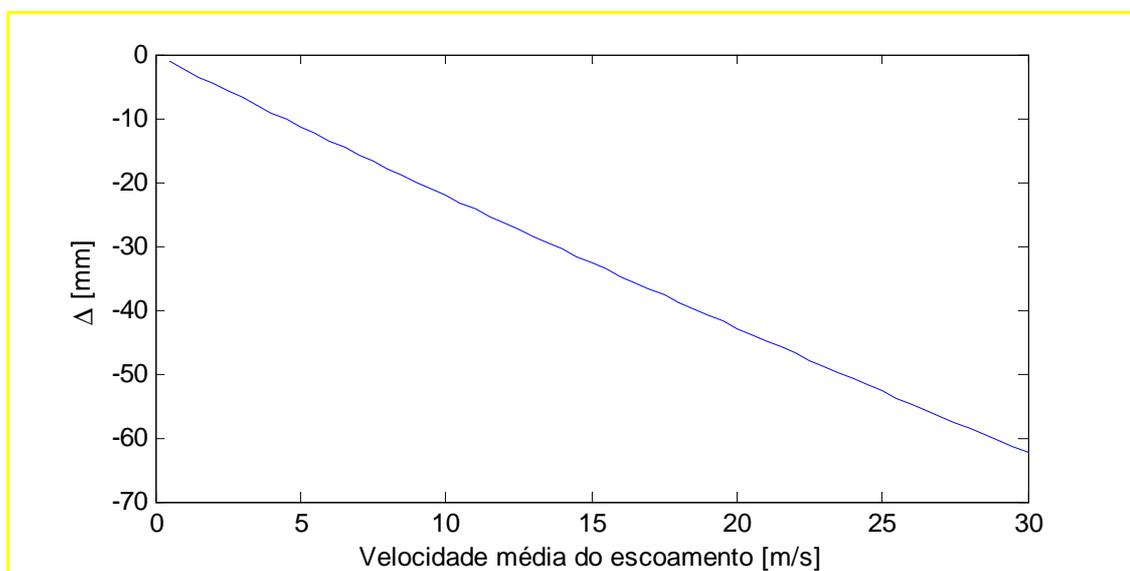


Figura 3.5: Efeito do arrasto do sinal ultra-sônico pelo escoamento (receptor a montante).

3.1.2. PROBLEMAS PARA O CÁLCULO DOS TEMPOS DE TRÂNSITO: FRENTES DE ONDA SECUNDÁRIAS E ÂNGULO DE RESGATE

A equação 3.14 é a utilizada para o cálculo do tempo de trânsito entre o emissor e o receptor. Já vimos que, usualmente, o receptor é localizado na visada direta da frente de onda gerada pelo emissor, isto é, o vetor normal à frente de onda, \mathbf{n} , aponta, no instante inicial, para o receptor. As figuras 3.4 e 3.5 mostram, todavia, que, para velocidades mais altas, o sinal emitido não chegará ao receptor, mas afastar-se-á significativamente dele.

Entretanto, o princípio de operação dos medidores ultra-sônicos de vazão por tempo de trânsito baseiam-se justamente na hipótese de que o receptor captará o sinal emitido. Mas como isto ocorrerá, se o sinal emitido não chegar ao receptor, como mostram as figuras 3.4 e 3.5?

Para tentar elucidar este ponto, recorremos ao funcionamento dos transdutores ultra-sônicos. Uma frente de onda perfeita é emitida em meios infinitos, hipótese significativamente distante para as dimensões comerciais dos transdutores ultra-sônicos. Por sua geometria circular, os transdutores ultra-sônicos comerciais emitem frentes de onda distintas, apesar de uma delas ser a principal. As figuras 3.6 (a e b) ilustram a geometria do fenômeno. Na verdade, quando um transdutor é excitado, o campo sônico de sua resposta varia de acordo com o modo de vibração do cristal,

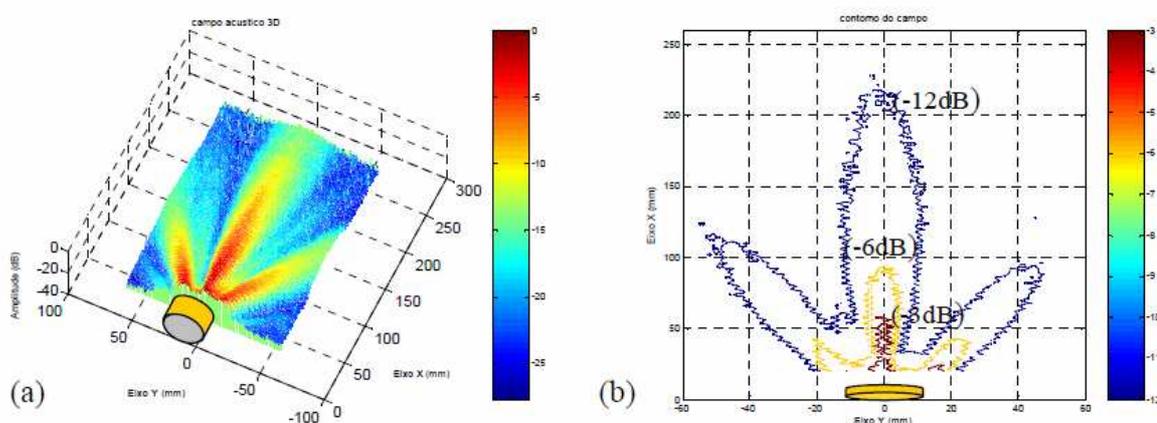
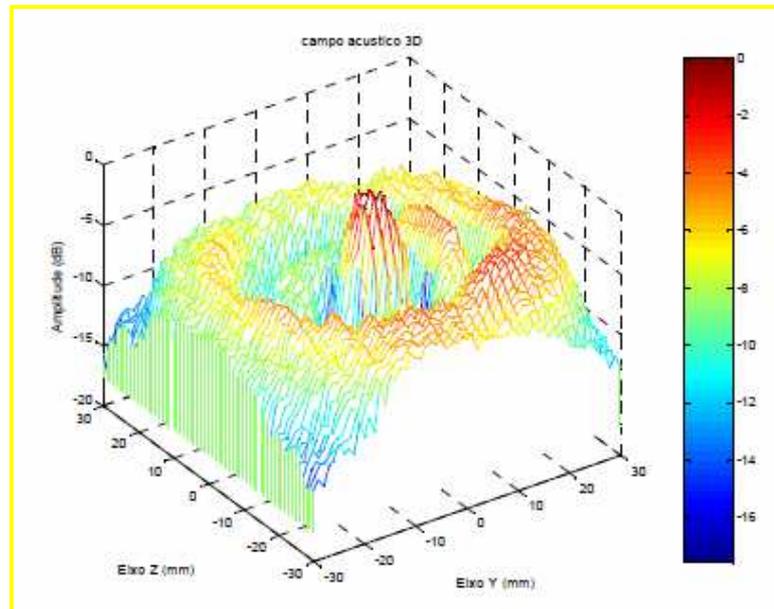


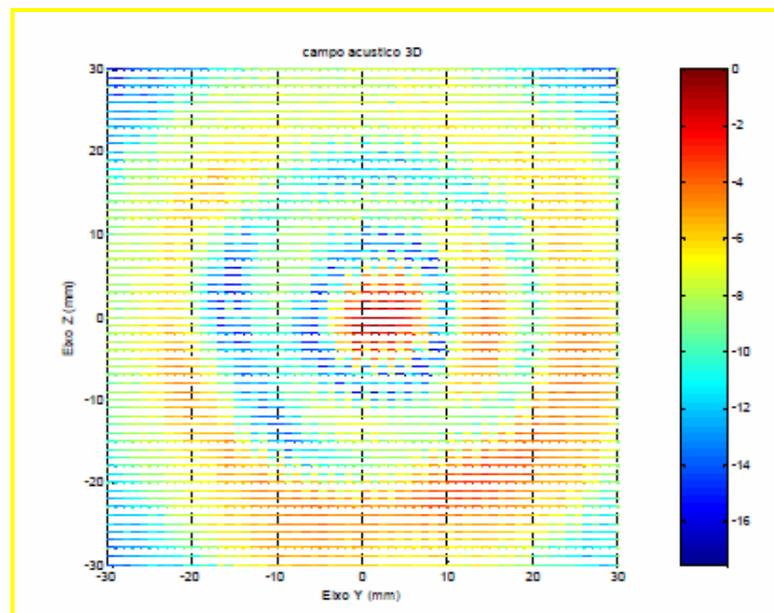
Figura 3.6: Campo acústico para o modo radial em um transdutor ultra-sônico piezolétrico (a) projeção em 3D. (b) curvas de contorno

Fonte: [Moreira-2008].

apresentando frentes de onda secundárias, como se pode ver na figura 3.6. Nas figuras 3.7 (a e b) pode-se ver o mesmo fenômeno, mas num modo de vibração diferente, e em outro ângulo de visualização.



(a)



(b)

Figura 3.7: Campo acústico para o modo radial em um transdutor ultra-sônico piezelétrico (a) projeção em 3D. (b) curvas de contorno

Fonte: [Moreira-2008].

O que deve ocorrer é que o receptor detecta, não a frente principal gerada pelo transdutor ultra-sônico, mas uma das frentes secundárias. Deve-se observar que

todas as frentes têm a mesma frequência, pois são frutos do mesmo modo de vibração do cristal piezelétrico do emissor.

Para resolver o problema do cálculo do tempo de trânsito é preciso, portanto, fazer algumas considerações. Volta-se à figura 3.3 e considera-se um sinal ultra-sônico emitido pelo transdutor 1 para o transdutor 2. Adota-se, para o ângulo de emissão do transdutor 1 (φ_0) um valor tal que o caminho acústico chegue exatamente no transdutor 2, que agirá, por ora como receptor. Obviamente este ângulo φ_0 dependerá do perfil de velocidade do escoamento. Semelhantemente, quando o transdutor 2 for o emissor e o transdutor 1 for o receptor, adotar-se-á um novo ângulo φ_0 , igualmente dependente do perfil de velocidade, de modo que o caminho acústico chegue exatamente no ponto do receptor.

Neste caso, as considerações constantes do parágrafo anterior implicam escolher um ângulo φ_0 que resulte $\Delta = 0$. Assim, pela equação 3.15 deseja-se:

$$\int_{-r}^r \left[\frac{c \cos \varphi + v(y)}{c \sin \varphi} \right] dy = d, \quad (3.19)$$

No entanto, em vez de adotar as equações 3.11 para obter-se $\cos \varphi$ e $\sin \varphi$, deve-se observar que aquelas relações só valem para uma emissão a $\varphi_0 = 45^\circ$ para uma velocidade nula na parede da tubulação, como é o perfil de Hinze. Não custa recordar que todos os perfis de velocidade baseados na Lei de Potência, levarão a uma velocidade nula na parede da tubulação.

3.1.3. ÂNGULO DE RESGATE NO PERFIL UNIFORME

A equação (3.8) mostra que, num perfil uniforme, a direção da frente de onda não muda, isto é, $\varphi = \varphi_0$ é constante ao longo do caminho acústico. A equação 3.15 resulta que o desvio do sinal acústico com relação à visada direta a 45° é:

$$\Delta = \int_{-r}^r \left[\frac{c \cos \varphi + v(y)}{c \sin \varphi} \right] dy - d = \left(\frac{c \cos \varphi_0 + v}{c \sin \varphi_0} - 1 \right) \cdot d \quad (3.20)$$

Para que o desvio Δ seja nulo, o ângulo de resgate deve ser:

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} \text{sen}^{-1} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \quad (3.21)$$

A figura 3.8 apresenta os resultados da equação 3.21 para velocidades até 30 m/s, apresentando também as equações que representam o ajuste linear da variação de φ_0 com a velocidade. As funções que fornecem o ajuste estão na equação 3.22.

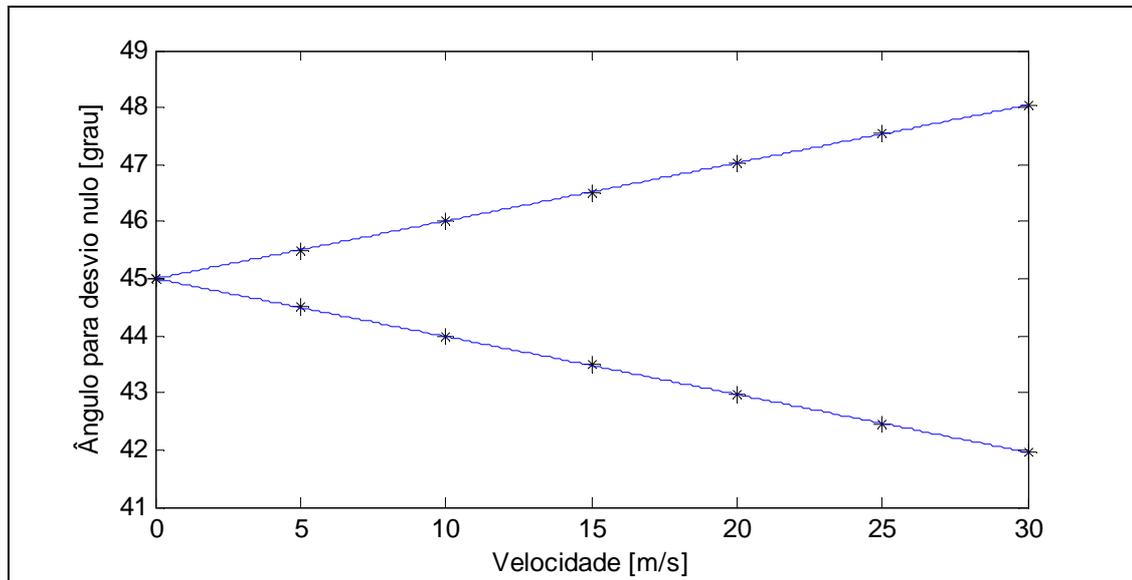


Figura 3.8: Ângulo para desvio nulo, com o receptor à jusante (> 0) e à montante ($-$) no caso de um Perfil Uniforme.

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{4} + \frac{1.77v}{1000} \quad \text{receptor a jusante} \quad (3.22)$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{4} - \frac{1.77v}{1000} \quad \text{receptor a montante}$$

3.1.4. ÂNGULO DE RESGATE NO PERFIL DE HINZE

Para o perfil de Hinze, se o ângulo de emissão da onda ultra-sônica é φ_0 , a equação (3.7) levará a

$$\cos \varphi = \left[\cos \varphi_0 - \frac{v(y)}{c} \right]^{-1} \Rightarrow \sin \varphi = \sqrt{1 - \left[\cos \varphi_0 - \frac{v(y)}{c} \right]^{-2}} \quad (3.22)$$

que são as expressões a serem substituídas na equação 3.18.

A figura 3.9 apresenta, em função da velocidade de escoamento, a variação do ângulo φ_0 que leva o caminho acústico ao receptor. Este ângulo é denominado de ângulo para desvio nulo. Nota-se que, para o meio considerado, o ângulo de resgate desvia-se linearmente do valor do valor de referência 45° .

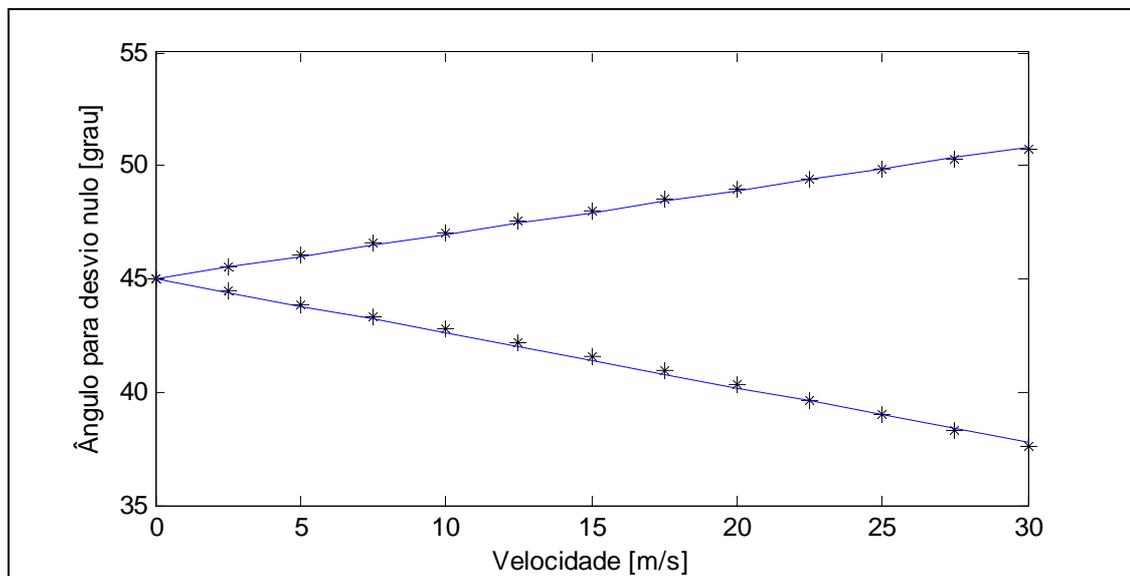


Figura 3.9: Ângulo para desvio nulo, com o receptor a jusante (> 0) e a montante (< 0).
Perfil de Hinze.

Com base na figura 3.9 pode-se equacionar o ângulo de resgate, para o meio e tubulação considerados, e velocidade de escoamento até 30 m/s, como:

$$\begin{aligned}\varphi_0 &= \frac{\pi}{4} + \frac{3.4v}{1000} \quad \text{receptor a jusante} \\ \varphi_0 &= \frac{\pi}{4} - \frac{4.2v}{1000} \quad \text{receptor a montante}\end{aligned}\tag{3.24}$$

onde os coeficientes angulares das retas foram determinados segundo o critério dos mínimos quadrados, impondo-se passagem pelo ponto (0,0).

Portanto, nas simulações envolvendo perfil de Hinze, os ângulos iniciais de emissão do sinal acústico podem ser calculados pelas expressões 3.24. Deve-se notar que se supõe sempre que a visada direta fica a 45° do eixo da tubulação.

Deve-se reparar que a variação do ângulo para desvio nulo nos perfis uniforme e de Hinze não é desprezível, como se pode ver nas equações 3.22 e 3.24. Assim, não se aconselha a aplicação de uma expressão geral quando não se conhece, a priori, certas características do perfil.

O desvio considerável, no que respeita ao ângulo para desvio nulo, do perfil de Hinze com relação ao perfil uniforme, mesmo a despeito do alto número de Reynolds, advém da derivada muito elevada do perfil de velocidade (com relação à coordenada radial) na parede da tubulação. É de se perguntar, portanto, o que poderia ocorrer com o ângulo para desvio nulo quando o sinal não é emitido exatamente na parede, mas um pouco para dentro da tubulação, o que, na tabela 3.1, chama-se de inserção. Seria o ângulo para desvio nulo muito sensível a esta perturbação?

A tabela 3.1 apresenta a variação do ângulo para desvio nulo num escoamento de gás natural típico em tubulação de 12" com velocidade média de 30 m/s. A inserção dos transdutores varia de zero a 5% do diâmetro. Como se pode ver, a variação do ângulo neste caso não é muito sensível à inserção. Interessante notar que o ângulo para desvio nulo cresce levemente quando a inserção aumenta, quando, à primeira vista, ele deveria se apresentar reduzido. Isto ocorre porque se, por um lado, a derivada do perfil de velocidade é reduzida quando há inserção, por outro, a velocidade média do escoamento no caminho acústico aumenta, já que os trechos

de velocidade de escoamento próxima de zero, isto é, na parede da tubulação, ficam fora do caminho acústico.

| Inserção ($10^{-3} d$) | φ_0 |
|--------------------------|-------------|
| 0 | 50.73 |
| 10 | 50.77 |
| 20 | 50.80 |
| 30 | 50.82 |
| 40 | 50.84 |
| 50 | 50.86 |

Tabela 3.1: Variação do ângulo para desvio nulo.

Com relação à tabela 3.1, deve-se esclarecer que, obviamente, a partir de determinada inserção, o ângulo para desvio nulo sofrerá redução. É que, a partir de determinada inserção, a variação da velocidade não compensará a variação da derivada do perfil. No entanto, isto só ocorrerá para inserções muito grandes (superiores a 30% do diâmetro), não compatíveis com aplicações práticas do medidor ultra-sônico.

4 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se resultados obtidos por simulação numérica. O objetivo é entender o que pode ocorrer com o caminho acústico num perfil de velocidade obtido experimentalmente. Utiliza-se, para este propósito, o trabalho de Hilgenstock [Hilgenstock-1996]. Os resultados complementam aqueles do capítulo anterior.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Hilgenstock [Hilgenstock-1996] apresenta resultados experimentais e numéricos referentes a escoamento em um tubulação com duas curvas de 90° em planos ortogonais, conforme mostra a figura 4.1.

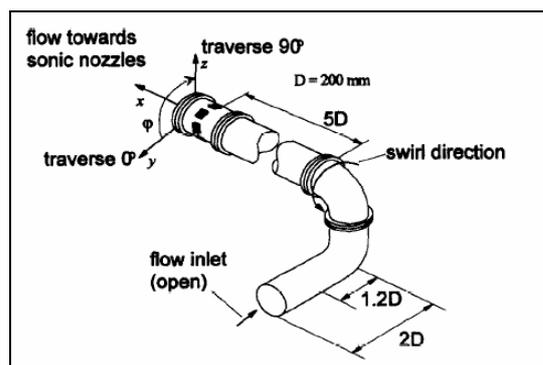


Figura 4.1: Dupla curva em planos ortogonais. Adaptado de [Hilgenstock-1996].

A presença das duas curvas em planos ortogonais induz um efeito rotacional no escoamento a jusante da segunda curva, além de uma assimetria, por causa da aceleração centrípeta, no perfil de velocidade axial. O efeito rotacional se manifesta pela presença de uma velocidade tangencial. Estes efeitos podem ser visualizados nas figuras 4.2 e 4.3.

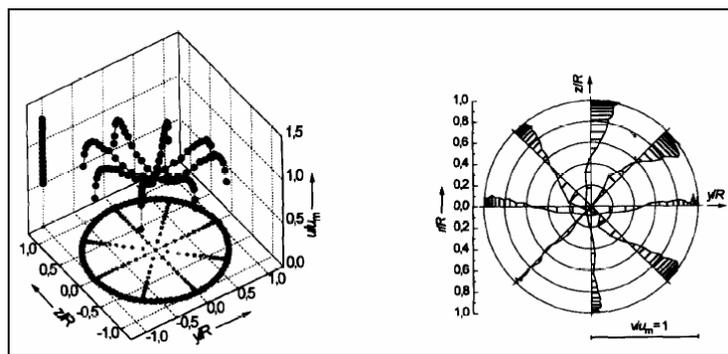


Figura 4.2: Perfil de velocidade axial (esquerda) e perfil de velocidade tangencial apresentado em 2D (direita). Adaptado de [Hilgenstock-1996].

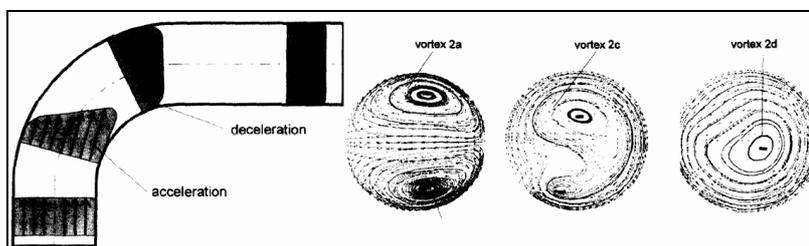


Figura 4.3: Esquemática do velocidade axial em uma curva de 90°. Adaptado de [Hilgenstock-1996].

É de se esperar que as velocidades, tanto axial quanto tangencial variem a depender do plano transversal considerado para a análise. Hilgenstock analisou estas velocidades em vários planos transversais, a saber: 0°, 45°, 90° e 135°. As figuras 4.4 a 4.7 apresentam os perfis de velocidade nos diversos planos transversais, tanto para a velocidade axial quanto para a tangencial.

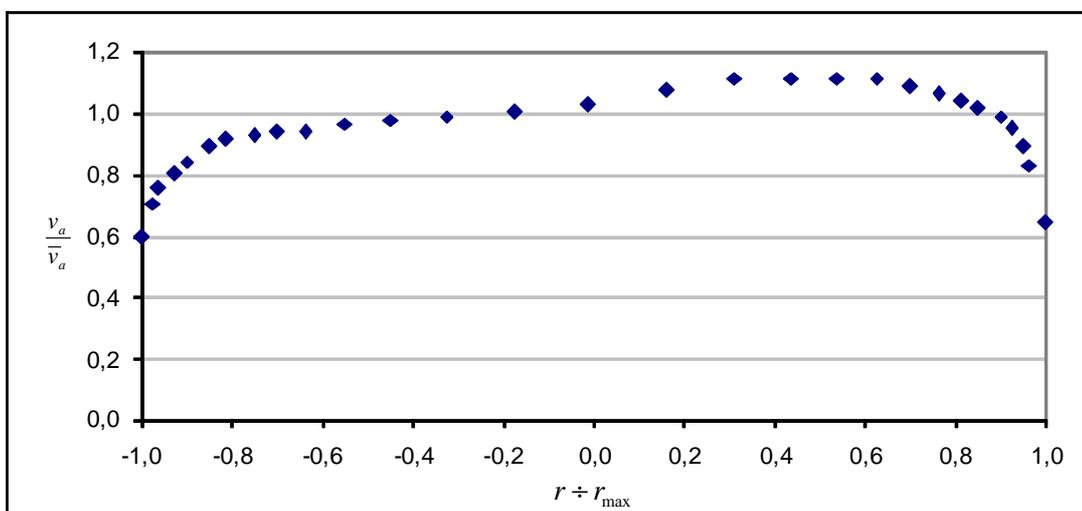


Figura 4.4: Perfil de velocidade axial no plano transversal a 0°

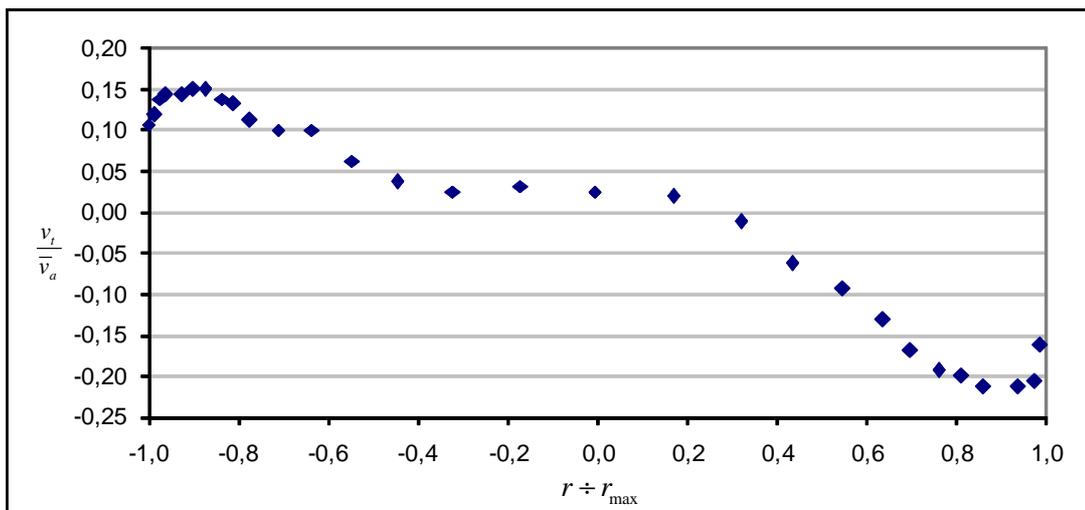


Figura 4.5: Perfil de velocidade tangencial no plano transversal a 0°

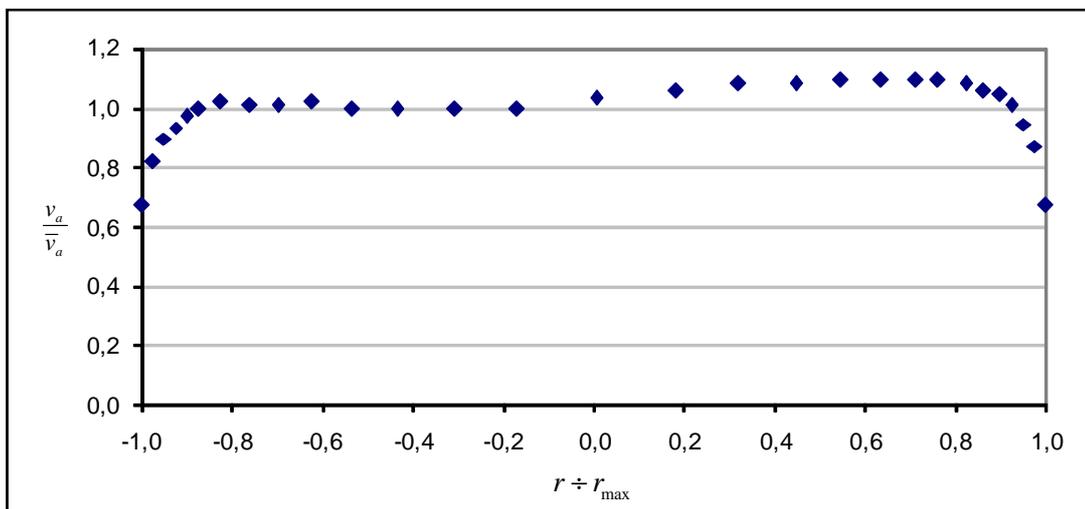


Figura 4.6: Perfil de velocidade axial no plano transversal a 45°

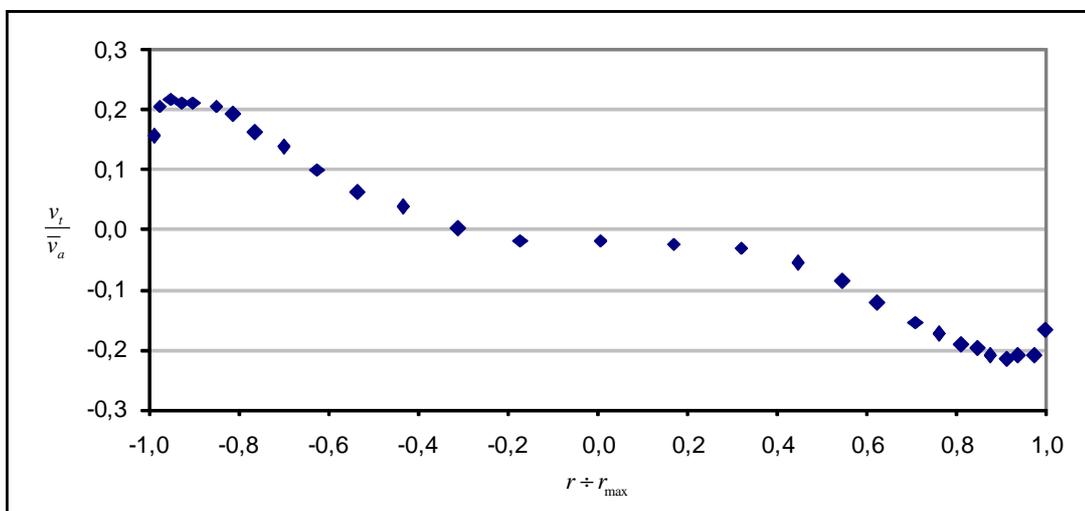


Figura 4.7: Perfil de velocidade tangencial no plano transversal a 45°

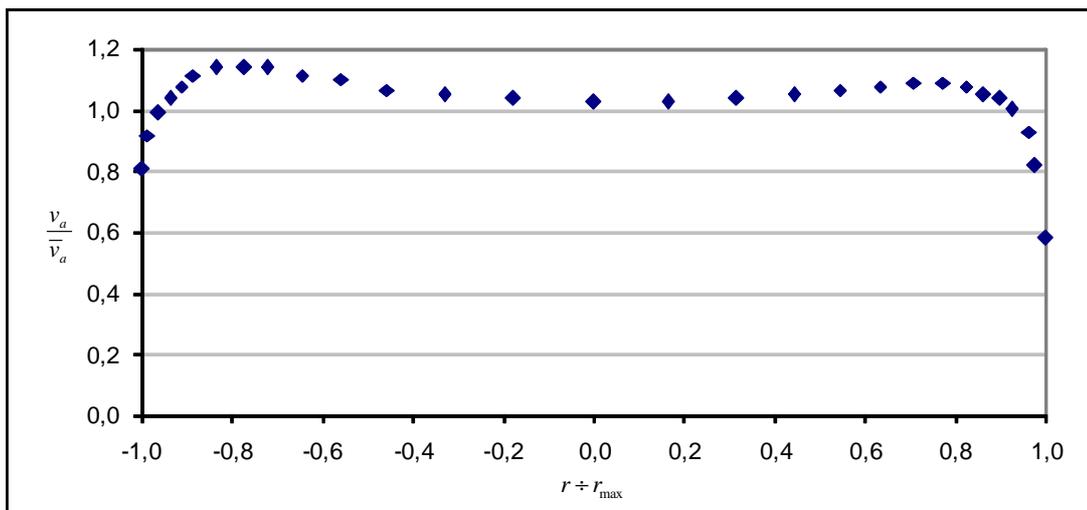


Figura 4.8: Perfil de velocidade axial no plano transversal a 90°

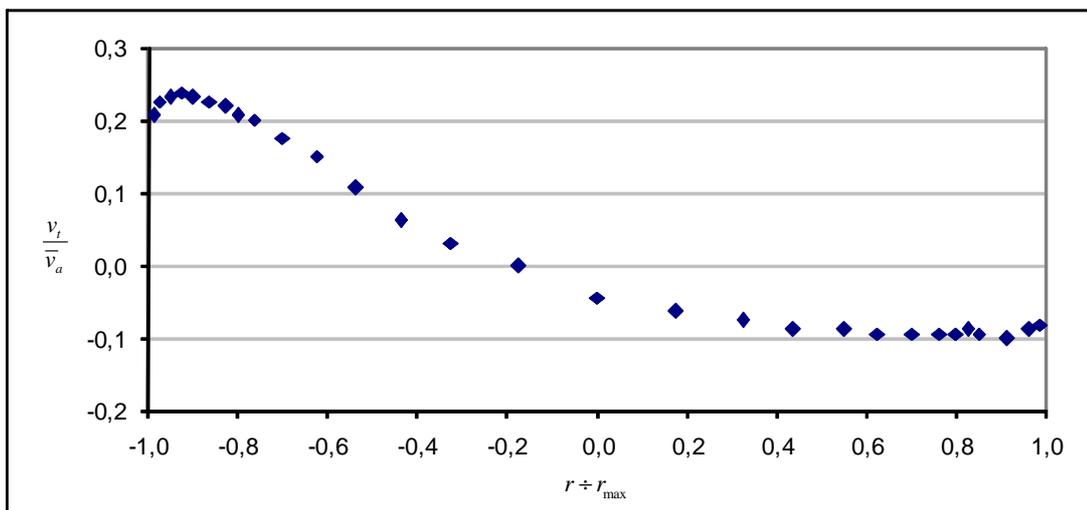


Figura 4.9: Perfil de velocidade tangencial no plano transversal a 90° .

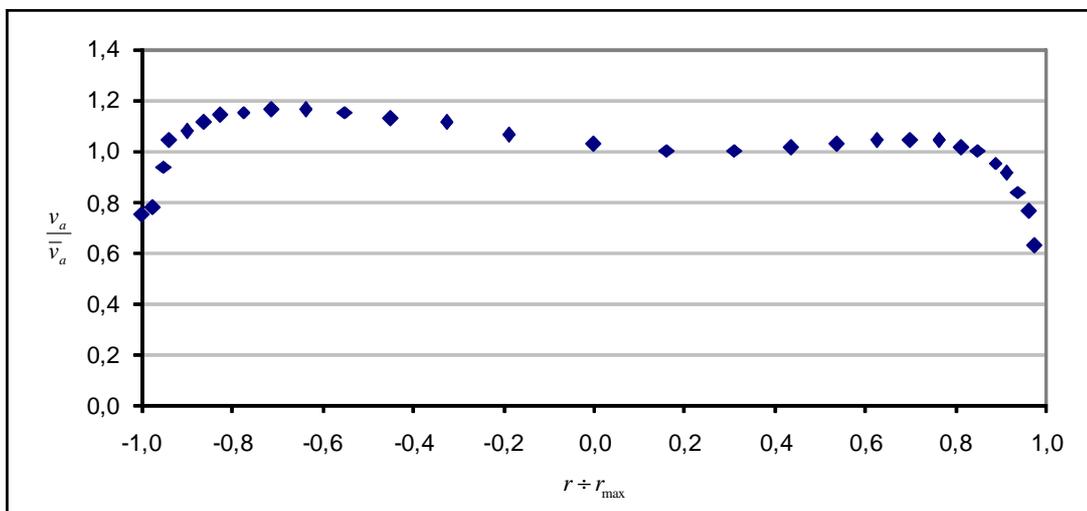


Figura 4.10: Perfil de velocidade axial no plano transversal a 135°

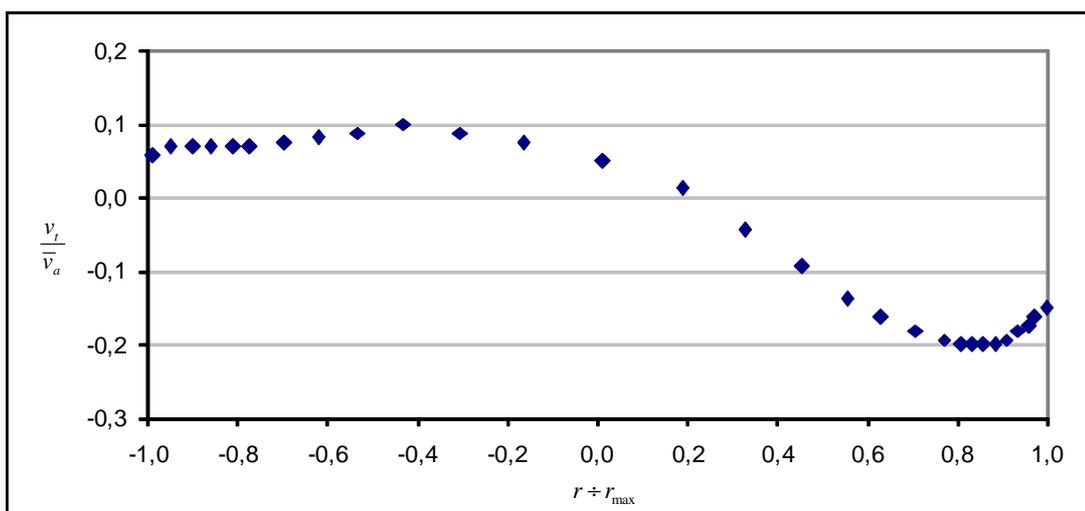


Figura 4.11: Perfil de velocidade tangencial no plano transversal a 135°

Os valores utilizados nas figuras 4.4 a 4.11 foram obtidos, experimentalmente por Hilgenstock[Hilgenstock-1996]. Embora os valores não tenham sido explicitamente fornecidos no trabalho acima citado, eles podem ser estimados pela digitalização dos gráficos daquele trabalho. As estimativas resultantes da digitalização são as constantes das tabela 4.1-a e 4.1-b, que são utilizados para determinar os perfis de velocidade aplicados nas simulações numéricas deste capítulo.

Repara-se nas figuras 4.4 a 4.11, bem como na tabelas 4.1, que os valores da velocidade máxima tangencial não ultrapassam 25% da respectiva velocidade axial média.

| Plano transversal 0° | | Plano transversal 45° | | Plano transversal 90° | | Plano transversal 135° | |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| $\frac{v_a}{\bar{v}}$ | $\frac{r}{r_{\max}}$ | $\frac{v_a}{\bar{v}}$ | $\frac{r}{r_{\max}}$ | $\frac{v_a}{\bar{v}}$ | $\frac{r}{r_{\max}}$ | $\frac{v_a}{\bar{v}}$ | $\frac{r}{r_{\max}}$ |
| -1.000 | 0.000 | -1.000 | 0.000 | -1.000 | 0.000 | -1.000 | 0.000 |
| -0.975 | 0.704 | -0.962 | 0.671 | -0.975 | 0.802 | -0.988 | 0.750 |
| -0.963 | 0.753 | -0.962 | 0.820 | -0.975 | 0.914 | -0.950 | 0.900 |
| -0.925 | 0.802 | -0.950 | 0.894 | -0.962 | 0.988 | -0.950 | 0.950 |
| -0.900 | 0.840 | -0.925 | 0.932 | -0.937 | 1.037 | -0.938 | 1.038 |
| -0.850 | 0.864 | -0.899 | 0.969 | -0.911 | 1.074 | -0.900 | 1.075 |
| -0.813 | 0.864 | -0.874 | 0.994 | -0.886 | 1.111 | -0.863 | 1.113 |
| -0.750 | 0.864 | -0.824 | 1.019 | -0.835 | 1.136 | -0.825 | 1.138 |
| -0.700 | 0.864 | -0.761 | 1.006 | -0.772 | 1.136 | -0.775 | 1.150 |
| -0.638 | 0.864 | -0.698 | 1.006 | -0.722 | 1.136 | -0.713 | 1.163 |
| -0.550 | 0.877 | -0.623 | 0.994 | -0.646 | 1.123 | -0.638 | 1.163 |
| -0.450 | 0.901 | -0.535 | 0.981 | -0.557 | 1.099 | -0.550 | 1.163 |
| -0.325 | 0.938 | -0.434 | 0.981 | -0.456 | 1.074 | -0.450 | 1.138 |
| -0.175 | 1.000 | -0.308 | 0.994 | -0.329 | 1.062 | -0.325 | 1.125 |
| -0.013 | 1.025 | -0.170 | 1.006 | -0.177 | 1.037 | -0.175 | 1.075 |
| 0.163 | 1.099 | 0.000 | 1.031 | 0.000 | 1.025 | 0.000 | 1.025 |
| 0.313 | 1.123 | 0.182 | 1.068 | 0.165 | 1.025 | 0.163 | 1.000 |
| 0.438 | 1.136 | 0.321 | 1.081 | 0.316 | 1.025 | 0.313 | 0.988 |
| 0.538 | 1.136 | 0.447 | 1.081 | 0.443 | 1.037 | 0.438 | 0.988 |
| 0.625 | 1.148 | 0.547 | 1.081 | 0.544 | 1.049 | 0.538 | 0.988 |
| 0.700 | 1.148 | 0.635 | 1.081 | 0.646 | 1.074 | 0.625 | 1.000 |
| 0.763 | 1.148 | 0.711 | 1.093 | 0.709 | 1.086 | 0.700 | 1.000 |
| 0.813 | 1.136 | 0.774 | 1.093 | 0.772 | 1.086 | 0.763 | 1.013 |
| 0.850 | 1.111 | 0.824 | 1.081 | 0.823 | 1.074 | 0.825 | 1.000 |
| 0.900 | 1.074 | 0.862 | 1.056 | 0.861 | 1.049 | 0.863 | 0.975 |
| 0.925 | 0.951 | 0.899 | 1.043 | 0.899 | 1.037 | 0.888 | 0.950 |
| 0.950 | 0.889 | 0.925 | 1.006 | 0.962 | 1.000 | 0.913 | 0.913 |
| 0.988 | 0.802 | 0.950 | 0.944 | 0.962 | 0.926 | 0.963 | 0.625 |
| 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 |

Tabela 4.1: Valores da velocidade axial nos diversos planos transversais.

| Plano transversal 0° | | Plano transversal 45° | | Plano transversal 90° | | Plano transversal 135° | |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| $\frac{v_a}{\bar{v}}$ | $\frac{r}{r_{\max}}$ | $\frac{v_a}{\bar{v}}$ | $\frac{r}{r_{\max}}$ | $\frac{v_a}{\bar{v}}$ | $\frac{r}{r_{\max}}$ | $\frac{v_a}{\bar{v}}$ | $\frac{r}{r_{\max}}$ |
| -1.000 | 0.000 | -1.000 | 0.000 | -1.000 | 0.000 | -1.000 | 0.000 |
| -0.987 | 0.119 | -0.975 | 0.205 | -0.975 | 0.226 | -0.949 | 0.069 |
| -0.975 | 0.138 | -0.950 | 0.217 | -0.950 | 0.233 | -0.899 | 0.069 |
| -0.962 | 0.144 | -0.925 | 0.211 | -0.925 | 0.239 | -0.861 | 0.069 |
| -0.925 | 0.144 | -0.899 | 0.211 | -0.900 | 0.233 | -0.810 | 0.069 |
| -0.899 | 0.150 | -0.849 | 0.205 | -0.863 | 0.226 | -0.772 | 0.069 |
| -0.874 | 0.150 | -0.811 | 0.193 | -0.825 | 0.220 | -0.696 | 0.075 |
| -0.836 | 0.138 | -0.761 | 0.161 | -0.800 | 0.208 | -0.620 | 0.081 |
| -0.811 | 0.131 | -0.698 | 0.137 | -0.763 | 0.201 | -0.532 | 0.088 |
| -0.774 | 0.113 | -0.623 | 0.099 | -0.700 | 0.176 | -0.430 | 0.100 |
| -0.711 | 0.100 | -0.535 | 0.062 | -0.625 | 0.151 | -0.304 | 0.088 |
| -0.635 | 0.100 | -0.434 | 0.037 | -0.538 | 0.107 | -0.165 | 0.075 |
| -0.547 | 0.063 | -0.308 | 0.000 | -0.438 | 0.063 | 0.013 | 0.050 |
| -0.447 | 0.038 | -0.170 | -0.019 | -0.325 | 0.031 | 0.190 | 0.013 |
| -0.321 | 0.025 | 0.006 | -0.019 | -0.175 | 0.000 | 0.329 | -0.044 |
| -0.170 | 0.031 | 0.170 | -0.025 | 0.000 | -0.044 | 0.456 | -0.094 |
| -0.006 | 0.025 | 0.321 | -0.031 | 0.175 | -0.063 | 0.557 | -0.138 |
| 0.170 | 0.019 | 0.447 | -0.056 | 0.325 | -0.075 | 0.633 | -0.163 |
| 0.321 | -0.013 | 0.547 | -0.087 | 0.438 | -0.088 | 0.709 | -0.181 |
| 0.434 | -0.063 | 0.623 | -0.124 | 0.550 | -0.088 | 0.772 | -0.194 |
| 0.547 | -0.094 | 0.711 | -0.155 | 0.625 | -0.094 | 0.810 | -0.200 |
| 0.635 | -0.131 | 0.761 | -0.174 | 0.700 | -0.094 | 0.835 | -0.200 |
| 0.698 | -0.169 | 0.811 | -0.193 | 0.763 | -0.094 | 0.861 | -0.200 |
| 0.761 | -0.194 | 0.849 | -0.199 | 0.800 | -0.094 | 0.886 | -0.200 |
| 0.811 | -0.200 | 0.874 | -0.211 | 0.825 | -0.088 | 0.911 | -0.194 |
| 0.862 | -0.213 | 0.912 | -0.217 | 0.850 | -0.094 | 0.937 | -0.181 |
| 0.937 | -0.213 | 0.937 | -0.211 | 0.913 | -0.101 | 0.962 | -0.175 |
| 0.975 | -0.206 | 0.975 | -0.211 | 0.963 | -0.088 | 0.975 | -0.163 |
| 1.000 | -0.000 | 1.000 | -0.000 | 1.000 | -0.000 | 1.000 | -0.000 |

Tabela 4.2: Valores da velocidade tangencial nos diversos planos transversais.

Como o caminho acústico percorre a tubulação tanto radialmente quanto axialmente, um mapeamento completo da variação da velocidade deveria incluir o transiente do perfil de velocidade, o que não é fornecido no trabalho de Hilgenstock, pois o plano radial em que são analisados os perfis de velocidade está sempre localizado na mesma posição axial, isto é, a 5D da última curva.

Julga-se razoável, porém, para os propósitos deste capítulo, considerar o perfil como estacionário. É possível, mesmo com esta hipótese:

- Comparar o desvio e os tempos de trânsito com aqueles obtidos pelo perfil de Hinze e perfil uniforme, na mesma velocidade média.
- Fazer inferência sobre a influência da velocidade tangencial no respectivo desvio do caminho acústico.

Para uma avaliação do desvio do sinal ultra-sônico, pode-se considerar dois desvios independentes, axial e tangencial, já que estamos considerando ambos os perfis como estacionários. Isto é consequência direta da linearização da equação que rege o problema e é hipótese válida quando a velocidade do escoamento é muito menor que a velocidade do som no meio [Ostashev-2002].

4.2 DESVIO DO CAMINHO ACÚSTICO COM RELAÇÃO À VISADA DIRETA EMISSOR-RECEPTOR

Para analisar o caminho acústico do sinal ultra-sônico quando sujeito à interferência de um perfil de velocidade com as componentes axial e transversal, lança-se mão de situação semelhante estudada por Ostashev [Ostashev-2002].

A hipótese de Ostashev, aplicada na propagação de ondas acústicas na atmosfera e no oceano, em ambientes de escala muitíssimo maior que as tubulações, supõe que, quando a variação da massa específica, da velocidade do som e da velocidade do meio são muito maiores numa direção do que nas demais, pode-se assumir que o meio é estratificado apenas numa direção.

A hipótese de Ostashev pode ser aplicada no caso da propagação do sinal ultra-sônico entre o emissor e o receptor no processo de medição de vazão. Vejamos:

- a) A velocidade tangencial é muito menor que a velocidade axial, em todos os planos transversais. A velocidade tangencial média, quando considerada em módulo, não ultrapassa nas tabelas 4.1 e 4.2, a 15% da velocidade axial média;

- b) Some-se a isto o fato de que a velocidade média tangencial esperada é zero sob a hipótese de regime permanente, pois o volume de controle é fechado nesta direção. Isto reduz ainda mais o peso da velocidade tangencial diante da velocidade axial, pois seu valor médio, considerados os dados experimentais, não ultrapassa a 6% da velocidade axial.
- c) O fato de a velocidade tangencial mudar de sinal ao longo do caminho acústico reduz o efeito de refração da onda acústica, pois a refração da derivada positiva é, ao menos em parte, compensada pela refração da derivada negativa posteriormente. Num perfil simétrico os efeitos, tanto da refração quanto do arrasto, serão nulos.

Uma forma de aferir numericamente as hipóteses de Ostashev para o escoamento mapeado por Hilgenstock consiste em computar o desvio do sinal ultra-sônico quando submetido, isoladamente, aos dois perfis de escoamento, axial e tangencial. Apenas se deve tomar o cuidado de que, ao analisar o comportamento do sinal ultra-sônico no escoamento tangencial, as condições de contorno do caminho acústico não serão as mesmas aplicadas no escoamento axial.

Considera-se inicialmente o escoamento axial. Neste caso ter-se-á situação semelhante àquelas analisadas no capítulo 2, apenas modificando-se os perfis uniforme e de Hinze pelo perfil mapeado por Hilgenstock. Para a simulação numérica, o perfil de velocidade será obtido por interpolação linear dos pontos mapeados por Hilgenstock. A resolução espacial será a mesma aplicada no capítulo 3, isto é, $\Delta r = 10^{-3} d$.

A figura 4.12 apresenta o desvio Δ (com relação à visada direta) para velocidades até 30 m/s, no plano transversal a zero grau. O meio é o mesmo considerado nos capítulos 2 e 3, a saber:

- massa específica: $0.975 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- viscosidade dinâmica: $1.34 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
- diâmetro interno do duto: 0.3048 m
- ângulo de emissão inicial: 45°

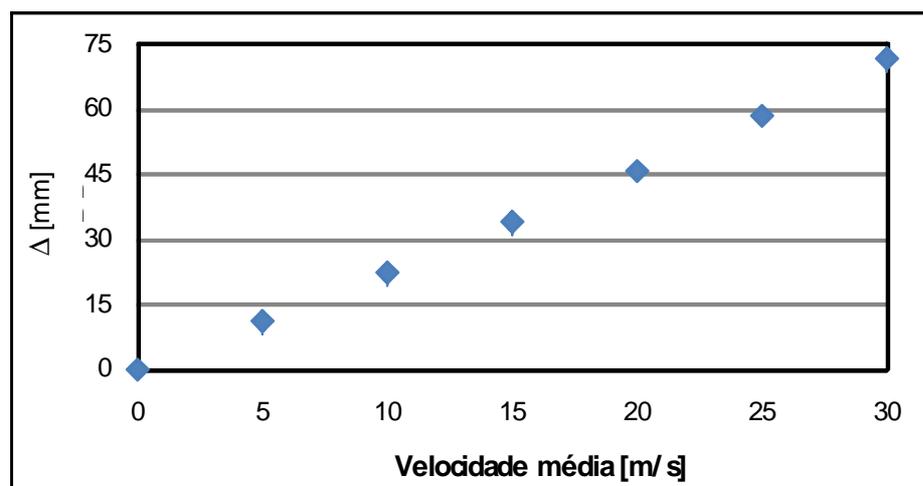


Figura 4.12: Perfil de velocidade axial no plano transversal a 0°

A tabela 4.3 apresenta os desvios para diversas velocidades nos vários planos transversais mapeados por Hilgenstock. A resolução espacial foi, neste caso, apenas por comodidade, $\Delta \ell = 10^{-3} \sqrt{2} \cdot d$. Os resultados não sofreriam nenhuma alteração significativa se adota-se a resolução $10^{-3} d$.

| Velocidade | Plano Transversal | | | |
|------------|-------------------|------------|------------|-------------|
| | 0° | 45° | 90° | 135° |
| 0 | - | - | - | - |
| 5 | 10.9 | 11.0 | 11.4 | 11.2 |
| 10 | 22.1 | 22.4 | 23.2 | 22.9 |
| 15 | 33.8 | 34.1 | 35.4 | 34.9 |
| 20 | 45.9 | 46.4 | 48.2 | 47.5 |
| 25 | 58.4 | 59.1 | 61.4 | 60.5 |
| 30 | 71.5 | 72.3 | 75.2 | 74.1 |

Tabela 4.3: Valores do desvio devido à velocidade axial.

A figura 4.13 apresenta o desvio provocado pela velocidade tangencial, no plano transversal a zero grau. A tabela 4.4 apresenta um conjunto de valores de desvio, devidos à velocidade tangencial, nos planos mapeados por Hilgenstock.

Observa-se que, comparativamente, o desvio devido à velocidade tangencial é, de fato, desprezível diante daquela induzido pela velocidade axial. Este desvio nem mesmo seria suficiente para evitar a detecção do sinal pelo receptor, isto é, ela ainda deixaria o sinal dentro da região na qual o receptor o pudesse detectar.

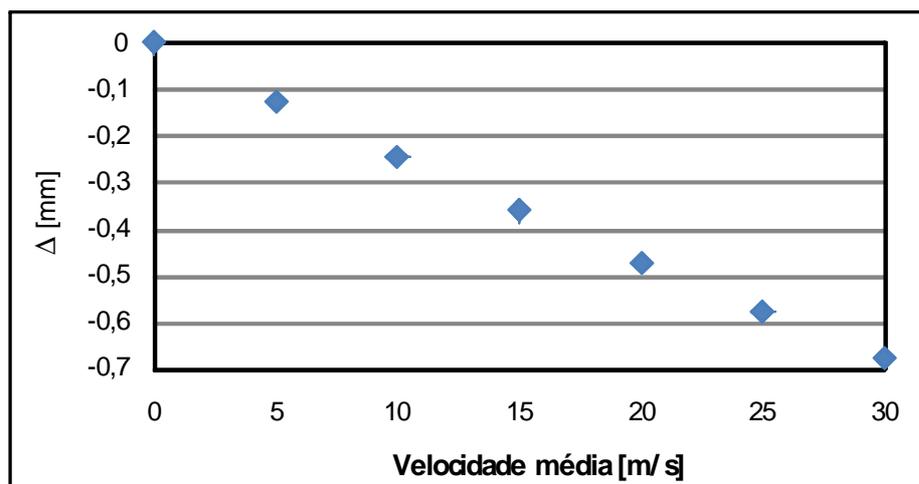


Figura 4.13: Perfil de velocidade tangencial no plano transversal a 0°

| Velocidade | Plano Transversal | | | |
|------------|-------------------|------------|------------|-------------|
| | 0° | 45° | 90° | 135° |
| 0 | - | - | - | - |
| 5 | -0.13 | -0.16 | 0.15 | -0.13 |
| 10 | -0.25 | -0.31 | 0.30 | -0.26 |
| 15 | -0.36 | -0.46 | 0.46 | -0.38 |
| 20 | -0.47 | -0.60 | 0.62 | -0.50 |
| 25 | -0.58 | -0.74 | 0.79 | -0.62 |
| 30 | -0.68 | -0.87 | 0.96 | -0.72 |

Tabela 4.4: Valores do desvio devido à velocidade tangencial.

Os resultados das figuras 4.12 e 4.13, bem como das tabelas 4.3 e 4.4, indicam que pode-se preocupar apenas com a velocidade axial, ao menos do ponto de vista do desvio do sinal ultra-sônico.

4.3 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO PARA DESVIO NULO NO PERFIL MAPEADO POR HILGENSTOCK

No caso do perfil mapeado por Hilgenstock, a determinação do ângulo para desvio nulo deverá ser feita através de simulação numérica, ajustando-se o ângulo de emissão inicial do sinal ultra-sônico até que o desvio seja nulo. A tabela 4.5 apresenta os valores do ângulo para desvio nulo em diversas velocidades, com o receptor a montante e a jusante, bem como para os vários planos transversais. A figura 4.14 apresenta os resultados do plano transversal a zero grau. Ajustando-se

uma função linear aos dados da figura 4.14, pode-se escrever:

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{4} + \frac{3.2v}{1000} \quad \text{receptor a jusante} \tag{4.1}$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{4} - \frac{4.0v}{1000} \quad \text{receptor a montante}$$

Interessante comparar a equação 4.1 com sua correspondente no perfil de Hinze, no caso, a equação 3.19. Vê-se que as diferenças dos ângulos para desvio nulo são muito pequenas, ao menos para o caso simulado.

| Velocidade [m/s] | Plano transversal 0° | | Plano transversal 45° | | Plano transversal 90° | | Plano transversal 135° | |
|------------------|----------------------|---------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|------------------------|---------|
| | jusante | montant | jusante | montant | jusante | montant | jusante | montant |
| 0.0 | 45.00 | 45.00 | 45.00 | 45.00 | 45.00 | 45.00 | 45.00 | 45.00 |
| 2.5 | 45.50 | 44.49 | 45.50 | 44.49 | 45.52 | 44.47 | 45.51 | 44.49 |
| 5.0 | 45.99 | 43.97 | 46.00 | 43.96 | 46.03 | 43.92 | 46.02 | 43.97 |
| 7.5 | 46.47 | 43.44 | 46.48 | 43.43 | 46.53 | 43.37 | 46.51 | 43.44 |
| 10.0 | 46.94 | 42.90 | 46.96 | 42.88 | 47.03 | 42.80 | 47.00 | 42.90 |
| 12.5 | 47.40 | 42.35 | 47.43 | 42.32 | 47.51 | 42.22 | 47.48 | 42.35 |
| 15.0 | 47.86 | 41.79 | 47.89 | 41.75 | 47.98 | 41.62 | 47.95 | 41.79 |
| 17.5 | 48.30 | 41.21 | 48.34 | 41.17 | 48.45 | 41.02 | 48.41 | 41.21 |
| 20.0 | 48.74 | 40.62 | 48.78 | 40.57 | 48.91 | 40.39 | 48.86 | 40.62 |
| 22.5 | 49.18 | 40.02 | 49.22 | 39.96 | 49.36 | 39.75 | 49.30 | 40.02 |
| 25.0 | 49.60 | 39.40 | 49.65 | 39.33 | 49.80 | 39.10 | 49.74 | 39.40 |
| 27.5 | 50.02 | 38.76 | 50.07 | 38.69 | 50.23 | 38.42 | 50.17 | 38.76 |
| 30.0 | 50.43 | 38.11 | 50.48 | 38.03 | 50.66 | 37.73 | 50.59 | 38.11 |

Tabela 4.5: Valores do ângulo para desvio nulo para o perfil mapeado por Hilgenstock no diversos planos transversais e para diversas velocidades.

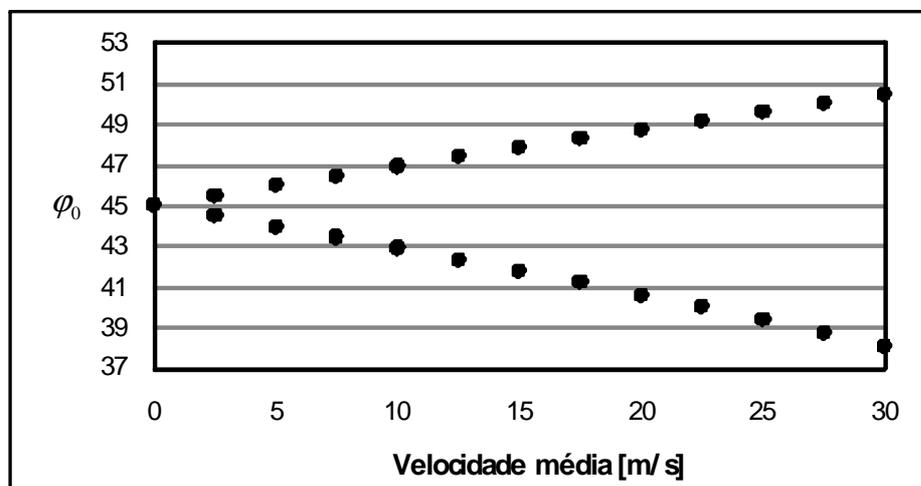


Figura 4.14: Perfil de velocidade axial no plano transversal a 0° .

4.4 COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES MÉDIAS DOS PERFIS COM AS VELOCIDADES CALCULADAS ATRAVÉS DOS TEMPOS DE TRÂNSITO

Como comentado no capítulo 2, as expressões utilizadas para a estimativa da velocidade do escoamento, bem como da velocidade do som no meio pressupõem que a velocidade do escoamento seja constante ao longo do caminho acústico. Assim, para o perfil de velocidade uniforme, o desvio entre os valores da simulação e da estimativa é nulo, razão pela qual não será, nesta seção, explorado o perfil de velocidade uniforme. Serão analisados, porém, os dois outros perfis tratados, até aqui, neste trabalho, a saber:

- o perfil teórico de Hinze;
- o perfil mapeado por Hilgenstock[Hilgenstock-1996].

Aplicando-se o algoritmo de simulação numérica do caminho acústico são computados os tempos de trânsito a jusante e a montante, como os quais se estimam a velocidade de escoamento e a velocidade do som. Apenas deve-se atentar que, para a computação dos tempos de trânsito, foi estabelecido que:

o sinal ultra-sônico sempre será emitido num ângulo tal que resulte desvio nulo com relação à visada direta emissor-receptor

Como ocorre desvio do sinal emitido com relação à posição do receptor, é verdade que este poderá captar sinais em diversos ângulos de emissão, para cada qual haverá um tempo de trânsito. Para comparação, é necessário, portanto, que uma condição seja fixada e julga-se razoável a condição de desvio nulo. Deve-se também ressaltar os demais parâmetros do caso simulado, a saber:

- massa específica: $0.975 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- viscosidade dinâmica: $1.34 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
- diâmetro interno do duto: 0.3048 m
- ângulo de emissão inicial: 45°
- velocidade do som no meio: 400 m/s

4.4.1 COMPARAÇÃO PARA O PERFIL DE HINZE

A tabela 4.6 apresenta os tempos de trânsito, a jusante e a montante, para diversas velocidades médias, conforme resultado da simulação numérica. A tabela 4.7 apresenta as respectivas velocidades estimadas pelas equações 2.2 e 2.3, que repetimos abaixo, na equação 4.2.

$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{1}{t_{12}} + \frac{1}{t_{21}} \right) = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_{12} + t_{21}}{t_{12} \cdot t_{21}} \\ v &= \frac{L}{2 \cos \phi} \cdot \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) = \frac{L}{2 \cos \phi} \cdot \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} \cdot t_{21}} \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

A tabela 4.6 apresenta os valores das estimativas da velocidade de escoamento e da velocidade do som computada pela equação 4.2. Apresenta também as velocidades estimadas, para o escoamento e para o som, bem as razões entre as velocidades estimadas e as correspondentes velocidades utilizadas como parâmetro da simulação. Recordando o capítulo 2, vemos a vazão volumétrica é, na verdade expressa por:

$$Q = k \cdot v \cdot A$$

onde o fator k expressa justamente a correção devida à diferença da velocidade estimada pela expressão 4.2 (velocidade média no caminho acústico) e a velocidade média na seção de medição (velocidade média na área). É fácil verificar que a razão de velocidade indicada na tabela 4.6 corresponde ao inverso do fator k . Assim, os resultados da tabela 4.6 quando mostram $r_v^{-1} \approx 0.95$, indicam um fator k um pouco abaixo da maioria das estimativas previstas pela equação 2.14.

É importante destacar o fato, uma vez que o ângulo de emissão para o qual o receptor detecta o sinal do emissor não é necessariamente aquele que resulta desvio nulo. Na verdade o receptor tem uma região finita (não infinitesimal) dentro da qual ela capta o sinal. Assim, os tempos de trânsito com os quais a velocidade é computada não são necessariamente aqueles que levam a desvio nulo.

| Velocidade [m/s] | Tempos de trânsito | | Velocidades Estimadas | | Razão de Velocidades | |
|------------------|--------------------|---------------|-----------------------|-----------|----------------------|-------|
| | t_{12} [ns] | t_{21} [ns] | v [m/s] | c [m/s] | r_v | r_c |
| 0.0 | 1078 | 1078 | 0.00 | 399.86 | - | 1.00 |
| 2.5 | 1073 | 1083 | 2.62 | 399.87 | 1.05 | 1.00 |
| 5.0 | 1068 | 1088 | 5.25 | 399.90 | 1.05 | 1.00 |
| 7.5 | 1063 | 1093 | 7.87 | 399.94 | 1.05 | 1.00 |
| 10.0 | 1058 | 1098 | 10.50 | 400.00 | 1.05 | 1.00 |
| 12.5 | 1053 | 1104 | 13.37 | 399.90 | 1.07 | 1.00 |
| 15.0 | 1049 | 1109 | 15.72 | 399.80 | 1.05 | 1.00 |
| 17.5 | 1044 | 1115 | 18.59 | 399.74 | 1.06 | 1.00 |
| 20.0 | 1040 | 1120 | 20.93 | 399.67 | 1.05 | 1.00 |
| 22.5 | 1035 | 1126 | 23.80 | 399.65 | 1.06 | 1.00 |
| 25.0 | 1031 | 1132 | 26.38 | 399.44 | 1.06 | 1.00 |
| 27.5 | 1026 | 1138 | 29.24 | 399.45 | 1.06 | 1.00 |
| 30.0 | 1022 | 1143 | 31.57 | 399.45 | 1.05 | 1.00 |

Tabela 4.6: Tempos de trânsito, velocidades e razões de velocidade para o perfil de Hinze.

4.4.2 COMPARAÇÃO PARA O PERFIL MAPEADO POR HILGENSTOCK

A tabela 4.7 apresenta os tempos de trânsito, a jusante e a montante, para diversas velocidades médias, conforme resultado da simulação numérica. A tabela 4.8 apresenta as respectivas velocidades estimadas pelas 4.2, ao passo que a tabela 4.9 apresenta as razões entre as velocidades estimadas e as respectivas velocidades utilizadas na simulação. Repara-se que, ao contrário do perfil de Hinze, as velocidades estimadas são menores que as velocidades médias do perfil.

| Velocidade [m/s] | Plano transversal 0° | | Plano transversal 45° | | Plano transversal 90° | | Plano transversal 135° | |
|------------------|----------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|------------------------|---------------|
| | t_{12} [ns] | t_{21} [ns] | t_{12} [ns] | t_{21} [ns] | t_{12} [ns] | t_{21} [ns] | t_{12} [ns] | t_{21} [ns] |
| 0.0 | 1078 | 1078 | 1078 | 1078 | 1078 | 1078 | 1078 | 1078 |
| 2.5 | 1073 | 1082 | 1073 | 1082 | 1073 | 1082 | 1073 | 1082 |
| 5.0 | 1068 | 1087 | 1068 | 1087 | 1069 | 1087 | 1069 | 1087 |
| 7.5 | 1064 | 1092 | 1064 | 1092 | 1064 | 1091 | 1064 | 1092 |
| 10.0 | 1059 | 1097 | 1059 | 1097 | 1060 | 1096 | 1060 | 1096 |
| 12.5 | 1055 | 1102 | 1055 | 1102 | 1056 | 1101 | 1055 | 1101 |
| 15.0 | 1050 | 1107 | 1051 | 1107 | 1051 | 1106 | 1051 | 1106 |
| 17.5 | 1046 | 1112 | 1046 | 1112 | 1047 | 1110 | 1047 | 1111 |
| 20.0 | 1042 | 1118 | 1042 | 1117 | 1043 | 1115 | 1043 | 1116 |
| 22.5 | 1037 | 1123 | 1038 | 1122 | 1039 | 1120 | 1039 | 1121 |
| 25.0 | 1033 | 1128 | 1034 | 1128 | 1035 | 1125 | 1034 | 1126 |
| 27.5 | 1029 | 1134 | 1030 | 1133 | 1031 | 1130 | 1030 | 1131 |
| 30.0 | 1025 | 1139 | 1025 | 1138 | 1027 | 1136 | 1026 | 1137 |

Tabela 4.7: Tempos de trânsito para o perfil mapeado por Hilgenstock [Hilgenstock-1996].

| Velocidade [m/s] | Plano transversal 0° | | Plano transversal 45° | | Plano transversal 90° | | Plano transversal 135° | |
|------------------|----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|------------------------|-----------|
| | v [m/s] | c [m/s] | v [m/s] | c [m/s] | v [m/s] | c [m/s] | v [m/s] | c [m/s] |
| 0.0 | 0.00 | 399.86 | 0.00 | 399.86 | 0.00 | 399.86 | 0.00 | 399.86 |
| 2.5 | 2.36 | 400.06 | 2.36 | 400.06 | 2.36 | 400.06 | 2.36 | 400.06 |
| 5.0 | 4.99 | 400.08 | 4.99 | 400.08 | 4.72 | 399.89 | 4.72 | 399.89 |
| 7.5 | 7.35 | 399.93 | 7.35 | 399.93 | 7.09 | 400.11 | 7.35 | 399.93 |
| 10.0 | 9.97 | 399.99 | 9.97 | 399.99 | 9.44 | 399.97 | 9.44 | 399.97 |
| 12.5 | 12.32 | 399.87 | 12.32 | 399.87 | 11.80 | 399.85 | 12.07 | 400.05 |
| 15.0 | 14.95 | 399.96 | 14.67 | 399.76 | 14.42 | 399.94 | 14.42 | 399.94 |
| 17.5 | 17.30 | 399.87 | 17.30 | 399.87 | 16.52 | 400.02 | 16.77 | 399.84 |
| 20.0 | 19.88 | 399.62 | 19.64 | 399.79 | 18.87 | 399.94 | 19.12 | 399.76 |
| 22.5 | 22.51 | 399.76 | 21.98 | 399.73 | 21.22 | 399.87 | 21.46 | 399.70 |
| 25.0 | 24.85 | 399.71 | 24.56 | 399.51 | 23.56 | 399.82 | 24.08 | 399.85 |
| 27.5 | 27.43 | 399.51 | 26.90 | 399.47 | 25.90 | 399.78 | 26.43 | 399.81 |
| 30.0 | 29.76 | 399.49 | 29.53 | 399.66 | 28.48 | 399.58 | 29.00 | 399.62 |

Tabela 4.8: Velocidades estimadas pela expressão (4.2).

| Velocidade [m/s] | Plano transversal 0° | | Plano transversal 45° | | Plano transversal 90° | | Plano transversal 135° | |
|------------------|----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|------------------------|-------|
| | r_v | r_c | r_v | r_c | r_v | r_c | r_v | r_c |
| 0.0 | - | 1.00 | - | 1.00 | - | 1.00 | - | 1.00 |
| 2.5 | 0.95 | 1.00 | 0.95 | 1.00 | 0.95 | 1.00 | 0.95 | 1.00 |
| 5.0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.94 | 1.00 | 0.94 | 1.00 |
| 7.5 | 0.98 | 1.00 | 0.98 | 1.00 | 0.95 | 1.00 | 0.98 | 1.00 |
| 10.0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.94 | 1.00 | 0.94 | 1.00 |
| 12.5 | 0.99 | 1.00 | 0.99 | 1.00 | 0.94 | 1.00 | 0.97 | 1.00 |
| 15.0 | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 1.00 | 0.96 | 1.00 | 0.96 | 1.00 |
| 17.5 | 0.99 | 1.00 | 0.99 | 1.00 | 0.94 | 1.00 | 0.96 | 1.00 |
| 20.0 | 0.99 | 1.00 | 0.98 | 1.00 | 0.94 | 1.00 | 0.96 | 1.00 |
| 22.5 | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 1.00 | 0.94 | 1.00 | 0.95 | 1.00 |
| 25.0 | 0.99 | 1.00 | 0.98 | 1.00 | 0.94 | 1.00 | 0.96 | 1.00 |
| 27.5 | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 1.00 | 0.94 | 1.00 | 0.96 | 1.00 |
| 30.0 | 0.99 | 1.00 | 0.98 | 1.00 | 0.95 | 1.00 | 0.97 | 1.00 |

Tabela 4.9: Razões entre a velocidade estimada e a velocidade média do perfil.

Independentemente da questão relacionada ao ângulo de emissão do sinal ultrassônico, a comparação das tabelas 4.6 e 4.9 indica que a presença do acidente pode afetar significativamente a estimativa da velocidade, tanto que, no caso do perfil mapeado por Hilgenstock[Hilgenstock-1996], o fator k correspondente seria maior que a unidade, ao passo que, para um perfil completamente desenvolvido, prevê-se, via de regra um fator de correção menor que a unidade.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho explora aspectos da modelagem do problema de medição ultra-sônica de vazão por tempo de trânsito, podendo ser resumido da seguinte forma:

- contextualização das tecnologias de medição de vazão;
- modelagem e discussão da problemática da concepção da medição ultra-sônica de vazão por tempo de trânsito;
- modelagem e discussão dos aspectos dinâmicos da medição ultra-sônica de vazão por tempo de trânsito;
- Avaliação parcial do desempenho da metodologia de cálculo da vazão;

Quando se diz que a avaliação do desempenho se refere à metodologia de cálculo, com isso se quer dizer que não nos envolvemos com a performance do medidor em si, a qual envolve aspectos de confiabilidade, sensibilidades diversas e operacionalidades, entre outros. O desempenho avaliado diz unicamente respeito à exatidão da velocidade calculada através dos tempos de trânsito medidos e a velocidade média do perfil de velocidade na qual a onda acústica foi propagada.

A principal contribuição do trabalho está na discussão dos fenômenos envolvidos na medição ultra-sônica de vazão por tempo de trânsito, principalmente:

- Na avaliação do desvio do caminho acústico com relação à visada direta emissor-receptor;
- Na avaliação dos tempos de trânsito.

Para tanto, utiliza-se simulação numérica de um modelo matemático da dinâmica do problema.

Os resultados obtidos lançam luz sobre algumas questões tecnológicas importantes

no que respeita à medição por tempo de trânsito, a saber:

- a) Que, provavelmente, nem sempre será a frente de onda principal da onda acústica emitida aquela detectada pelo emissor;
- b) Como o ângulo de emissão das frentes de onda secundárias dependem da geometria do transdutor, a determinação deste ângulo deve ser feita por estudo experimental. Sendo feito por ferramentas teórico-numéricas, envolve a modelagem da dinâmica de vibração do transdutor ultra-sônico, campo que ultrapassa os objetivos do trabalho;
- c) Na simulação numérica pode-se computar, para cada perfil de velocidade, o ângulo emissão que resultará desvio nulo, com relação ao receptor, do sinal ultra-sônico. Na prática, todavia, os ângulos de emissão do cristal são predeterminados por seus modos de vibrar. Assim, para cada fabricante, pode haver um ângulo de emissão diferente para a frente de onda captada pelo receptor;
- d) Isto está de acordo com o fato de que cada fabricante utiliza uma expressão diferente para estimar o fator de correção do resultado que sai da equação 4.2. Não existe um fator melhor. Existe apenas o fator que ajusta o medidor daquele fabricante, com suas características operacionais próprias.
- e) É importante que o perfil de velocidade seja controlado de alguma forma, o que, em geral, se faz pela exigência de trechos retos a montante e a jusante do acidente de linha mais próximo. O perfil mapeado por Hilgenstock mostra, por exemplo, que a velocidade estimada pela equação 4.1 é inferior à velocidade média real do perfil, ao passo que, em trechos retos com escoamento plenamente desenvolvido, aquele resultado é superior à velocidade média real.

Salienta-se que os resultados acima são muito importantes para o aprimoramento do protótipo MEVUS (Medidor de Vazão de Gás por Ultra-Som), desenvolvido na dissertação de Rodrigo Ramos [Ramos-2006], bem como para planejamento de estudos experimentais.

Próximos passos desta linha de pesquisa devem ser:

- Uma primeira análise, não muito complexa (os algoritmos de simulação podem ser adaptados sem muita dificuldade), consiste em estabelecer uma região de

detecção do sinal ultra-sônico pelo receptor. Diversos ângulos de emissão permitirão a detecção da onda, cada qual resultando em tempos de trânsito distintos e, conseqüentemente, em estimativas distintas de velocidade. Será importante conhecer como os ângulos de emissão (a montante e a jusante) afetarão a velocidade estimada.

- Aumento do número de perfis avaliados, com outros acidentes de linha, a fim de que se possa avaliar, ainda que só com base em resultados numéricos, a variabilidade do fator k . Isto permitirá algumas inferências sobre a contribuição do fator k na incerteza de medição, como comentado no capítulo 2.
- As hipóteses de Ostashev [Ostashev-2002] são, segundo o autor, aplicadas em problemas de escala bem maior que escoamento em tubulação, como a propagação de ondas sonoras na atmosfera e nos oceanos. Ainda assim, pode-se proceder a simulação numérica sem as hipóteses de Ostashev, principalmente em escoamentos com perfis de velocidade muito complexos.
- Por último, mas não por fim, observa-se a simulação envolvendo múltiplos canais acústicos.

REFERÊNCIAS

- 1 [Angrisani-2006] Angrisani, L. & Moriello, R. S.; Estimating Ultrasonic Time-of-Flight Through Quadrature Demodulation; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 55, No. 1, February 2006.
- 2 [Aziz-1996] Aziz, E. et al; An ultrasonic Flowmeter Designed According to Smart Sensors Concept; Electrotechnical Conference, 8th Mediterranean; 1996.
- 3 [Baumann-2000] Baumann, S. and Vaterlaus, H.; Applications of Multipath Ultrasonic Flowmeters: Hot-Tapping and Rectangular, Tapered Conduits; International Group for Hydraulic Efficiency Measurement; Toronto, Canada; 2000.
- 4 [Boone-1991] Boone, M. & Vermaas, E.; A New Ray-Tracing Algorithm for Arbitrary Inhomogeneous and Moving Media, Including Caustics; Journal of Acoustical Society of America; Vol. 90-4; 1991.
- 5 [Brown-1998] Brown, M.; Custody Transfer Implementation of Multipath Ultrasonic Meters; AGA Operating Section Operations Conference; Seattle; 1998.
- 6 [Carlander-1999] Carlander, C. & Delsing, J.; Installation effects on an ultrasonic flow meter with implications for self diagnostics; Flow Measurement and Instrumentation 11; 109–122; 1999.
- 7 [Carlson-2002] Carlson, J.; Ultrasonic Characterization of Materials and Multiphase Flows – Doctoral Thesis; Luleå University of Technology; Luleå; Sweden; 2002.
- 8 [Finep-2005] Chamada Pública MCT/FINEP – Ação Transversal - RBT 05/ 2005; Financiadora de Estudos e Projetos; Abril 2005.

- 9 [Dane- 199] Dane, H. J.; Ultrasonic Measurement of Unsteady Gas Flow; Flow Measurement Instrumentation Vol. 8; 1997
- 10 [Delmee-2003] Delmee, G.; Manual de Medição de Vazão; 3ª Ed.; Edgard Blücher; 2003.
- 11 [Delsing-1990] Delsing, J.; The Zero Flow Performance Flow Performance of a Sign-Around Type Flowmeter; IEEE Ultrasonic Symposium; 1990;
- 12 [Drenthen-2002] Drenthen, J. G & de Boer, G.; The Manufacturing of Ultrasonic Gas Flow Meters; Flow Measurement and Instrumentation 12; 89-99; 2002.
- 13 [Eren-2002] Eren, H. et al; Processing Ultrasonic Signal to Identify Fluid Contents in Transit Time FlowMeters; IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference; Budapest; May 2002.
- 14 [Eren-1998] Eren, Halit; Accuracy in Real Time Ultrasonic Applications and Transit Time Flow Meters; IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference; May 1998.
- 15 [NTSI-2000] Field Instrumentation; Norwegian Technology Standards Institution; April 2000.
- 16 [Shell-2006] Flare Waste Gas Flow Rate and Composition Measurement Methodologies Evaluation; Texas Commission on Environmental Quality; Prepared by Shell Global Solutions; Draft Version; 2006.
- 17 [Folkestad-1993] Folkestad, T. & Mylvaganam, K. S.; Chirp Excitation of Ultrasonic Probes and Algorithm for Filtering Transit Time in High-Rangeability Gas Flow Metering; IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control; Vol. 40-3; 1993.
- 18 [Fyrippi-2004] Fyrippi, I. et al; Flowmetering of Non-Newtonian Liquids; Flow Measurement and Instrumentation 15; 131–138; 2004.
- 19 [Gol'tsov-1998] Gol'tsov, S. A.; Refined Mathematical Model of an Ultrasonic Flowmeter; Measurement Techniques; Vol. 41 – 6; 1998.

- 20 [Grimaldi-2006] Grimaldi, D.; Time-of-flight measurement of Ultrasonic Pulse Echoes Using Wavelet Networks; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 55, No. 1, February 2006.
- 21 [Grimley-1997] Grimley, T.; Performance Tests of 12-Inch Multipath Ultrasonic Flow Meters; Proceedings of the Natural Gas Conference Emerging Technologies for the Natural Gas Industry; San Antonio, TX; 1997.
- 22 [Grimley-1996] Grimley, T; Multipath Ultrasonic Flowmeter Performance; The North Sea Flow Measurement Workshop, Peebles, Scotland; 1996.
- 23 [Inmetro-2003] Guia para a Expressão da Incerteza de Medição; Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial; 3ª Edição 2003.
- 24 [NFOGM-2001] Handbook of Uncertainty Calculations: Ultrasonic Fiscal Gas Metering Station; The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement; 2001.
- 25 [Hans-2002] Hans, V & Skvarek, V; Signal Processing of Ultrasound Modulated by Gas Flow; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, No. 6, December 2002.
- 26 [Hilgenstock-1996] Hilgenstock, A. and Ernst R.; Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamics CFD x experiments; Numerical Simulation Section, Rihrgas AG, Halterner Strasse 125, D-46284 Dorsten, Germany-1996.
- 27 [Holm-1995] Holm, M. et al.; Simulation of Flowmeters Calibration Factors for Various Installations Effects; Measurement Vol. 15; 1995.
- 28 [Jakevičius-2003] Jakevičius, L. & Butkus, J.; The Use of Ultrasonic Pulse Method for Describing Dynamic Processes in Gas Flows; Ultragarsas, Nr.1 (46). 2003.
- 29 [Kegel-2004] Kegel, T.; Ultrasonic Meter Performance Issues - A Review of Recent Laboratory Results; Technical Report – Colorado Engineering Experiment Station; 2004;

- 30 [Kono-2006] Kono, S. et al; Development of Intelligent Domestic Ultrasonic Gas Meters; 23rd World Gas Conference, Amsterdam 2006.
- 31 [Kupnik-2006] Kupnik, M. et al.; Adaptive Pulse Repetition Frequency Technique for an Ultrasonic Transit-Time Gas Flowmeter for Hot Pulsating Gases; IEEE Sensors Journal, Vol. 6; 2006.
- 32 [Lin-2005] Lin, Y. & Hans, V.; Self Monitoring Ultrasonic Gas Flow Meter; Journal of Physics Conference Series 13; 81-85; 2005.
- 33 [EESIFLO-2006] Low Flow Flowmeter: Prototypes of Non-Contact Flow Sensing Units for Small Line Ultra Low Flow; "http://www.flowmeterdirectory.com/flowmeter_low_flow.html"; 2006. Acesso em: xxx
- 34 [Lunde-2003] Lunde, P. et al; Signal Modeling Using the Flosim System Model in Ultrasonic Instrumentation for Industrial Applications; Norwegian Signal Processing Symposium; Bergen; Norway; 2003.
- 35 [Lynnworth-2000] Lynnworth, L.; Transit Time Ultrasonic Flowmeters Stretch Their Application Reach; Control Solutions Special Issue on Flow, 2000.
- 36 [Mandard-2005] Mandard, E. et. al; Transit Time Ultrasonic Flowmeter: Velocity Profile Estimation; IEEE Ultrasonics Symposium 2005; 2005.
- 37 [AGA-1998] Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters by Multipath Ultrasonic Meters – Transmission Measurement Committee Report No. 9; American Gas Association; Arlington, Virginia; 1998.
- 38 [Moore-2000] Moore, P. I. et. al; Ultrasonic Transit-time Flowmeters Modelled With Theoretical Velocity Profiles: Methodology; Measurement Science Technology Vol. 11; 2000.
- 39 [Moreira-2008] Moreira, Danilo Conti; Construção e caracterização do campo acústico de transdutores ultra-sônico pizeletricos de polarização variável, São carlos SP, UFSCar 2008.

- 40 [Mylvaganam-1989] Mylvaganam, K. S.; Chirp Excitation of Ultrasonic Probe for High-Rangeability Gas Flow Metering; Proc. IEEE Ultrasonic Symposium; Montreal; 1989.
- 41 [Mylvaganam-1989] Mylvaganam, K. S.; High-Rangeability Ultrasonic Gas Flowmeter for Monitoring Flare Gas; IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control; Vol. 36-2; 1989.
- 42 [Nygaard-2000] Nygaard, G.; Integration of Impedance Measurements With Transit Time Measurements for Ultrasonic Gas Mass Flow Metering: Model and Experiments with Transducers in Different Vibration Modes; IEEE Ultrasonic Symposium; 2000.
- 43 [Ostashev-2002] Ostashev, Vladimir E.; Geometrical Acoustics in Moving Media; NOAA/Environmental Technology Laboratory, 325 Broadway, New Mexico State University, 2002.
- 44 [Phan-1997] Phan, V.; Ultrasonic Measurement of Velocities in Multiphase Flow; Technical Report; Stanford University – Department of Petroleum Engineering; 1997.
- 45 [Rabalais-2002] Rabalais, R. A.; Ultrasonic Flow Measurement: Technology and Applications in Process and Multiple Vent Stream Situations; Proceedings of the Texas A&M Symposium; 2002.
- 46 [Raisutis-2006] Raisutis, R.; Investigation of the Flow Velocity Profile in a Metering Section of an Invasive Ultrasonic Flowmeter; Flow Measurement and Instrumentation 17; 201–206; 2006.
- 47 [Ramos-2006] Ramos, R.; Desenvolvimento de Medidor de Vazão de Gás por Ultra-Som; Universidade Federal do Espírito Santo, PPGMEC-Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica-2006.
- 48 [DEGT-2006] Raw Gas Transmission System Measurement Policy; Duke Energy Gas Transmission; Shipper handbook; 2006.

-
- 49 [Ruppel-2004] Ruppel, C. & Peters, F; Effects of Upstream Installations on the Reading of an Ultrasonic Flowmeter; Flow Measurement and Instrumentation 15; 167–177; 2004.
- 50 [NTSI-2000] Safety and Automation Systems; Norwegian Technology Standards Institution; May 2000.
- 51 [Schneider-2003] Schneider, F; Quantitative Analysis of the Cross-Correlation Ultrasonic Flow Meter by Means of System Theory; Measurement Science and Technology 14; 573-582; 2003.
- 52 [Shirley-2002] Shirley, X. et al; Ultrasonic Clamp-on Flow Measurement of Natural Gas, Steam and Compressed Air; Control Solutions Special Issue on Flow; 2002.
- 53 [AGA-2002] Speed of Sound in Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases – Transmission Measurement Committee Report No. 10; American Gas Association; Arlington, Virginia; 2002.
- 54 [Takamoto-2001] Takamoto, M. et al; New Measurement Method for Very Low Liquid Flow Rates Using Ultrasound; Flow Measurement and Instrumentation 12; 267-273; 2001.
- 55 [Thorn-1999] Thorn, R. et al; “Three-Phase Flow Measurement in the Offshore Oil Industry: Is there a Place for Tomography?”; 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, Greater Manchester, April 14-17, 1999.
- 56 [Omega-2005] Transactions on Measurement and Control Vol. 4: Flow and Level Measurement; Omega Engineering Inc.; 2005;
- 57 [FCN-2001] Ultrasonic Flowmeters: The Fastest Growing Market; Flow Control Network; Pages 26-30; November 2001.
- 58 [Vulovic-1995] Vulovic, F.; Installation Effects on a Multipath Ultrasonic Flowmeter Designed for Profile Disturbances; North Sea Flow Measurement Workshop; Lillehammer; 1995.

-
- 59 [Wada-2006] Wada, S. et al; Pattern Recognition and Signal Processing of Ultrasonic Echo Signal on Two-phase Flow; Flow Measurement and Instrumentation 17; 207–224; 2006.
- 60 [Walters-2002] Walters, J.; Transit-time Ultrasonic Flowmeters for Gases: Parts 1 to 5; 41st Annual Canadian Gas Association Gas Measurement School; Grand Okanagan, Kelowna BC, Canada; 2002.
- 61 [Wright-1998] Wright, J. D.; The Performance of Transit Time Flowmeters in Heated Gas Mixtures; ASME Fluids Eng. Division Summer Meeting; Washington DC; 1998.
- 62 [Yeh-1997] Yeh, T. T. & Mattingly, G. E.; Computer Simulations of Ultrasonic Flow Meter Performance in Ideal and Non-ideal Pipe Flows; Proceedings of the 11th FLOMEKO – Conference; Groningen , The Netherlands , May 12- 14. Gasunie Research, 1997.
- 63 [Yoder-2005] Yoder, J.; Many Paths to Successful Flow Measurement: Ultrasonic Flowmeters; Flow Control; February 2005.
- 64 [Yoder-2002] Yoder, J.; Ultrasonic Flowmeter Market is Expected to Grow Strongly; Pipeline and Gas Journal; Pages 1-4; April 2002.
- 65 [Zanker-2000] Zanker, K.; The Performance of a Multi-path Ultrasonic Meter With Wet Gas; 18th North Sea Flow Measurement Workshop; 2000.