

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

ALEX LUZ SALGADO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA VARIABILIDADE INDUZIDA
POR ACIDENTES DE LINHA NA MEDIÇÃO DE VAZÃO
ULTRASSÔNICA POR TEMPO DE TRÂNSITO**

VITÓRIA

2009

ALEX LUZ SALGADO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA VARIABILIDADE INDUZIDA
POR ACIDENTES DE LINHA NA MEDIÇÃO DE VAZÃO
ULTRASSÔNICA POR TEMPO DE TRÂNSITO**

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

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos

VITÓRIA
2009

ALEX LUZ SALGADO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA VARIABILIDADE INDUZIDA POR
ACIDENTES DE LINHA NA MEDIÇÃO DE VAZÃO ULTRASSÔNICA
POR TEMPO DE TRÂNSITO**

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

Aprovada em 16 de dezembro de 2009.

COMISSÃO EXAMINADORA

Rogério Ramos, DSc.
Universidade Federal do Espírito Santo – Orientador

Márcio Coelho de Mattos, DSc.
Universidade Federal do Espírito Santo

João Nazareno Nonato Quaresma, DSc.
Universidade Federal do Pará

Bruno Venturini Loureiro, DSc.
Faculdade do Centro Leste

A meus pais, que me deram a vida e sempre apoiaram as minhas escolhas.

A minha futura esposa, Lélia, por sempre estar incondicionalmente ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Foram várias as pessoas que participaram ativamente do desenvolvimento deste trabalho. Diretamente, participando dos experimentos e de todos os estudos, ou indiretamente, incentivando e enviando pensamentos positivos à realização do mesmo.

Agradeço de forma especial a três pesquisadores dedicados e, acima de tudo, interessados no sucesso do trabalho. São eles:

- meu orientador, Rogério Ramos, que desde o começo disponibilizou total atenção e dedicação ao estudo. Entendeu e orientou em minhas dificuldades e elogiou e parabenizou minhas conquistas.
- Márcio Coelho de Mattos, que disponibilizou seu tempo para este projeto.
- Leonardo Pereira Bastos, pela total atenção ao desenvolvimento do projeto, na preparação dos testes e desenvolvendo o sistema de aquisição de dados.

Agradeço a todo corpo docente e discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelo apoio.

Ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo – ANP, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP e do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT por meio do “Programa Institucional da UFES para o Setor Petróleo e Gás” – PRH29.

Ao professor Édson José Soares, coordenador do PRH29.

Aos meus amigos de graduação e mestrado que me ajudaram em momentos de necessidade. Em especial a Ramon Silva Martins, companheiro de pesquisa e incentivador do trabalho.

Aos meus pais, Edimar e Dora, que sempre apoiaram e incentivaram todas as investidas de seus filhos. À minha irmã, Aline, que mesmo de longe sempre apoiou tudo o que faço. Ao meu primo, Roberto Bruce, que sempre foi um grande incentivador e amigo nos momentos que eu mais precisei.

A minha noiva, Lélia, companheira sempre presente e grande incentivadora. À sua família, em especial ao meu sogro, Adailson, que sem perceber, me incentivou a voltar a estudar engenharia.

E, por fim, mas não com menor importância, a todos os amigos, parentes ou mesmo desconhecidos que, com uma palavra ou um simples gesto, iluminaram o caminho.

EPIGRAFE

RESERVADO À FICHA DE CATALOGAÇÃO

RESUMO

Este trabalho se dedica à medição de vazão com a pretensão de se lidar com as peculiaridades relacionadas ao assunto, analisando experimentalmente os efeitos de acidentes de linha na variabilidade da medição de vazão por ultrassom, acidentes estes, comumente encontrados em instalações industriais. Para isso, avaliou-se a influência de quatro tipos de acidentes, posicionados a diferentes distâncias em relação ao medidor por ultra-som por tempo de trânsito. Variou-se, também, a vazão. Foi utilizado um túnel de vento operando em ar atmosférico, induzido por um compressor. Os resultados demonstram o quão peculiar é a medição de vazão e o quanto deve ser estudado o assunto, pois foram observados comportamentos que diferem das observações mais inadvertidas e leigas sobre o assunto. Por exemplo, apesar do controle do escoamento induzido, observado no pequeno valor do desvio entre as médias dos dados coletados e a média geral (desvio máximo de 2%), observou-se, após vários testes, que os dados coletados na presença de um dos acidentes (duas curvas de 90° em planos ortogonais) apresentaram um comportamento diferente dos demais acidentes. Neste caso, o desvio padrão se mostrou maior para o caso onde a distância entre o medidor e o acidente se encontrava no seu maior comprimento, divergindo das recomendações de fabricantes e das normas, que determinam uma distância mínima a partir da qual a qualidade da medição pode ser considerada boa. Logo, as medições também estão sujeitas à dinâmica do escoamento, não podendo assim, garantir a qualidade da medição. O ideal seria a determinação do ponto onde ocorre a menor variabilidade ou uma variabilidade menor que à proposta pelo fabricante.

Palavras-chave: medição de vazão, medição ultrassônica, incerteza, tempo de trânsito.

ABSTRACT

This work is dedicated to flow measurement and aim to handle with peculiarities related to this subject, analyzing experimentally the effects installation on the variability of an measurement by ultrasonic flowmeter. Such installation effects are commonly found in industrial plants. To proceed this, it was evaluated the influence of four distinct types of installation, positioned at distinct distances from the ultrasonic flowmeter. . It was used a wind tunnel operating with atmospheric air, induced by a compressor and the flow level was varied as well by means of a valve. The results demonstrates how peculiar is the flow measurement as well as the amount of research necessary, since it was gotten different behaviors from those observed by inadvertent observers. For example, beside the flow was kept under control, as demonstrated by the small deviations between collected data (maximum deviation around 2%), after many runs it was observed from the installation composed by two elbows in orthogonal plans resulting a distinct behavior from the others installations. In this case, the standard deviation was greater when the installation was mounted at a longer distance from the flowmeter, diverging from the recommendations of fabricants and norms. Usually they recommend a minimal distance from which the measuring reaches good quality. So, the measurements are liable to the flow dynamics and the best place to install a flowmeter should be choose considering the variability induced by each configuration installation.

Keywords: flow measurement, ultrasonic measurement, uncertainty, transit time.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - ESQUEMA E DIMENSÕES BÁSICAS DE UM MEDIDOR DE VAZÃO POR ULTRA-SOM	27
FIGURA 2.2 - GERAÇÃO DE ONDAS A PARTIR DA VIBRAÇÃO INDUZIDA ELETRICAMENTE EM UM CRISTAL PIEZELÉTRICO.	29
FIGURA 2.3 - DISTRIBUIÇÃO DO ESPECTRO SONORO EM RELAÇÃO AO CAMPO AUDITIVO HUMANO	30
FIGURA 2.4 - CAMPO SÔNICO NAS PROXIMIDADES DO CRISTAL	31
FIGURA 2.5 - ATENUAÇÃO DO SOM NO AR X UMIDADE PARA VÁRIAS FREQUÊNCIAS [26]....	32
FIGURA 2.6 - ATENUAÇÃO DO SOM NO AR VERSUS FREQUÊNCIA [26].....	33
FIGURA 2.7 - ONDA ACÚSTICA (CONE DE SOM) TÍPICA DE UM TRANSDUTOR CILÍNDRICO [26].	33
FIGURA 2.8 - GRÁFICO BIDIMENSIONAL MOSTRANDO A FORMA DA ONDA ACÚSTICA PRODUZIDA POR UM TRANSDUTOR CILÍNDRICO (DIÂMETRO/COMPRIMENTO DE ONDA – 2) [26].....	34
FIGURA 2.9 - INTERFERÊNCIA ENTRE OS CONES DE SOM GERADOS PELOS TRANSDUTORES ULTRA-SÔNICOS.....	34
FIGURA 2.10 - PROCEDIMENTO PARA SE MEDIR A VELOCIDADE DO SOM UTILIZANDO UM MEDIDOR ULTRA-SÔNICO	38
FIGURA 2.11 - COMPARAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DO SOM ESTIMADA PELA EQUAÇÃO DA AGA 8 E A MEDIDA POR UM MEDIDOR ULTRA-SÔNICO [24].	39
FIGURA 2.12 - REPRESENTAÇÃO DO EFEITO DE EQUIPAMENTOS DE PROCESSO NA FORMAÇÃO DO ESCOAMENTO NO INTERIOR DE DUTOS	40
FIGURA 2.13 - PERFIL DE VELOCIDADES TURBULENTO NO INTERIOR DE DUTOS	40
FIGURA 2.14 - PERFIL TURBULENTO DAS VELOCIDADES MÉDIAS NO INTERIOR DE UM DUTO	41
FIGURA 2.15 - VELOCIDADES MÉDIA PARA ESCOAMENTO TURBULENTO NO INTERIOR DE UM DUTO, CONFORME HINZE. [12]	41
FIGURA 2.16 - REPRESENTAÇÃO DA TRANSFORMAÇÃO DO PERFIL PARABÓLICO DE VELOCIDADES EM UM PERFIL UNIFORME RETANGULAR, ATRAVÉS DO FATOR DE CORREÇÃO.....	43
FIGURA 2.17 - DIFERENÇA ENTRE OS PERFIS DE VELOCIDADE EM UM ESCOAMENTO LAMINAR VS. TURBULENTO.....	44

FIGURA 2. 18 - REPRESENTAÇÃO DA VELOCIDADE DO SINAL ULTRA-SÔNICO EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE INSTALAÇÃO DOS TRANSDUTORES.....	44
FIGURA 2. 19 - EFEITO DE ARRASTE DO SINAL ULTRA-SÔNICO NO ESCOAMENTO.....	45
FIGURA 3. 1 - EFEITO DE ARRASTO DO SINAL ULTRA-SÔNICO PELO ESCOAMENTO.....	53
FIGURA 3. 2 - EFEITO DE ARRASTO DO SINAL ULTRA-SÔNICO PELO ESCOAMENTO EM UM FLUXO UNIFORME.....	54
FIGURA 3. 3 - FATOR DE CORREÇÃO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS, SEGUNDO DIVERSAS PROPOSTAS [2].....	58
FIGURA 3. 4 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO PROCESSO.....	60
FIGURA 3. 5 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO ARRANJO 1.....	60
FIGURA 3. 6 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO ARRANJO 2.....	60
FIGURA 3. 7 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO ARRANJO 3.....	61
FIGURA 3. 8 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO ARRANJO 4.....	61
FIGURA 4. 1 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO TÚNEL DE VENTO.....	62
FIGURA 4. 2 - FOTOS DOS ACIDENTES DE LINHA APLICADOS NO ESTUDO EXPERIMENTAL.....	63
FIGURA 4. 3 - GEOMETRIA E ELEMENTOS DE UM TUBO DE PITOT DE NARIZ ELIPSÓIDE SEGUNDO ISO 3966 [32].....	64
FIGURA 4. 4 - MEDIDOR DE VAZÃO POR ULTRA-SOM (MEVUS).....	67
FIGURA 4. 5 - FOTO ILUSTRATIVA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO MODATA.....	68
FIGURA 5. 1 - GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A1, 5D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H	74
FIGURA 5. 2 – GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A2, 5D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H....	74
FIGURA 5. 3 - GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A3, 5D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H	75
FIGURA 5. 4 - GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A4, 5D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H	75
FIGURA 5. 5 - GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A1, 10D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H ..	75
FIGURA 5. 6 - GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A2, 10D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H ..	76
FIGURA 5. 7 - GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A3, 10D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H ..	76
FIGURA 5. 8 - GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A4, 10D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H ..	76
FIGURA 5. 9 - GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A1, 20D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H ..	77
FIGURA 5. 10 - GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A2, 20D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H ..	77
FIGURA 5. 11 - GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A3, 20D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H ..	77
FIGURA 5. 12 - GRÁFICO LEITURAS X VELOCIDADE – A4, 20D. (A) 100M ³ /H E (B) 150M ³ /H ..	78
FIGURA 5. 13 - GRÁFICO TRECHO RETO X MÉDIA DAS VELOCIDADES PARA TODOS OS ARRANJOS. VAZÃO: 100M ³ /H	78

FIGURA 5. 14 - GRÁFICO TRECHO RETO X MÉDIA DAS VELOCIDADES PARA TODOS OS ARRANJOS. VAZÃO: 150M ³ /H	79
FIGURA 5. 15 - GRÁFICO TRECHO RETO X DESVIO PADRÃO PARA TODOS OS ARRANJOS. VAZÃO: 100M ³ /H.....	79
FIGURA 5. 16 - GRÁFICO TRECHO RETO X DESVIO PADRÃO PARA TODOS OS ARRANJOS. VAZÃO: 150M ³ /H.....	79
FIGURA B. 1 – GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DAS MEDIÇÕES DO PITOT PARA TODOS OS ARRANJOS A 10D A VAZÃO CONSTANTE.	97
FIGURA A.A. 1 – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO N° 48/2009	102

LISTA DE TABELAS

TABELA 2. 1 - COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM (GÁS PERFEITO X AGA 10).....	37
TABELA 2. 2 - COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM (GÁS PERFEITO X AGA 10) A 25 °C.	37
TABELA 2. 3 - NÚMERO DE REYNOLDS EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA GÁS NATURAL A 20°C	43
TABELA 4. 1 - DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS INDICADOS NA FIGURA 4.1	62
TABELA 4. 2 - LEVANTAMENTO DIMENSIONAL DO TUBO DE PITOT ITMP 120 DA KIMO	64
TABELA 4. 3 - VERIFICAÇÃO CONFORMIDADE GEOMÉTRICA TUBO DE PITOT ITMP 120 DA KIMO (ISO 3966).....	65
TABELA 4. 4 - CÁLCULO DA RELAÇÃO D/D	66
TABELA 5. 1 - CONFIGURAÇÃO PADRÃO DO MEDIDOR.....	72
TABELA 5. 2 - MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA 100M ³ /H	73
TABELA B. 1 - RESULTADOS DE LEITURA DO PITOT. ARRANJO 1, A 10D COM 2 VOLTAS DE ABERTURA DA VÁLVULA	96
TABELA B. 2 - RESULTADOS DE LEITURA DO PITOT. ARRANJO 2, A 10D COM 2 VOLTAS DE ABERTURA DA VÁLVULA	96
TABELA B. 3 - RESULTADOS DE LEITURA DO PITOT. ARRANJO 3, A 10D COM 2 VOLTAS DE ABERTURA DA VÁLVULA	96
TABELA B. 4 - RESULTADOS DE LEITURA DO PITOT. ARRANJO 4, A 10D COM 2 VOLTAS DE ABERTURA DA VÁLVULA	97
TABELA C. 1 - VELOCIDADES COLETADAS PARA OS 4 ARRANJOS A DIFERENTES DISTÂNCIAS. VAZÃO: 100M ³ /H (CONTINUA).....	98
TABELA C. 2 - VELOCIDADES COLETADAS PARA OS 4 ARRANJOS A DIFERENTES DISTÂNCIAS. VAZÃO: 150M ³ /H (CONTINUA).....	100

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Comprimento do caminho acústico
α	Ângulo entre a visada direta (reta que vai de um transdutor a outro) e a direção principal do escoamento
t_{AB}	Tempo de trânsito do transdutor A ao transdutor B
t_{BA}	Tempo de trânsito do transdutor B ao transdutor A
c	Velocidade de propagação do som
V	Velocidade média ao longo do caminho acústico
d_e	Diâmetro efetivo do cristal.
f	Frequência ultra-sônica
λ	Comprimento de onda
K	Constante isentrópica do gás $k = \frac{c_p}{c_v}$ [adimensional]
P	Pressão absoluta do gás [Pa]
T	Temperatura do gás [K]
M	Massa molecular do gás [mol/kg] (metano: $M = 16.043$)
\bar{R}	Constante Universal dos Gases: 8314.5 N.m/kmol.K
R	Constante do gás: $R = \frac{\bar{R}}{M}$ [J/mol.K]
Z	Fator de Compressibilidade
ρ	Massa específica
μ	Viscosidade dinâmica do fluido [kg/m.s]
U	Velocidade do escoamento [m/s]
D	Diâmetro interno do duto [m]
Re	Número de Reynolds [adimensional]
K	Fator de correção
Q	Vazão volumétrica
A	Área da seção transversal
m	Vazão Mássica

\tilde{v}	Velocidade de escoamento a partir da qual a incerteza $\frac{\Delta k}{k}$ é preponderante em relação a $\frac{\Delta t}{t}$
$\frac{\Delta k}{k}$	Incerteza relativa do fator de correção k
Δt	Incerteza absoluta dos tempos de transito
ϕ	Ângulo entre as visada direta (reta que vai de um transdutor a outro) e a direção principal do escoamento
ds	Elemento de comprimento infinitesimal ao longo do caminho acústico
\vec{e}	Vetor unitário na direção da frente de onda
\vec{V}	Vetor velocidade do escoamento
(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 \mathbf{e}
$v(r)$	Perfil de velocidade na seção transversal do tubo
V_0	Velocidade no centro da tubulação
R	Raio máximo
r	Coordenada radial
n	Constante dependente do Número de Reynolds
σ_r^2	Variância da referência (associada ao instrumento e ao processo)
σ_{rm}^2	Variância da referência (associada ao instrumento)
σ_p^2	Variância do processo no que respeita à variável medida
σ_{ut}^2	Variância das medidas apresentadas pelo medidor ultrassônico
σ_u^2	Variância intrínseca do medidor ultrassônico

μ Média

σ Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO	18
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2	FUNDAMENTOS DA MEDIÇÃO ULTRASSÔNICA DE VAZÃO	27
2.1	CONCEPÇÃO BÁSICA DE UM MEDIDOR ULTRASSÔNICO	27
2.2	O EFEITO PIEZELÉTRICO	28
2.2.1	<i>Tipos de cristais</i>	29
2.2.2	<i>Características do Sinal Ultra-Sônico</i>	30
2.3	ATENUAÇÃO SÔNICA	32
2.4	A ONDA ACÚSTICA (CONE DE SOM)	33
2.5	O CÁLCULO DA VELOCIDADE DO SOM	35
2.5.1	<i>Conceitos Termodinâmicos</i>	35
2.6	MEDIDA DA VELOCIDADE DO SOM PELO MEDIDOR ULTRA-SÔNICO	38
2.6.1	<i>Análise da velocidade do som calculada vs. Medida</i>	39
2.6.2	<i>O escoamento através do medidor ultra-sônico</i>	40
2.6.3	<i>O Cálculo da Vazão</i>	43
2.6.4	<i>O efeito do escoamento na deformação do sinal ultra-sônico</i>	45
2.6.5	<i>Características Normalmente Associadas aos Medidores de Vazão Ultrassônicos</i>	46
2.6.6	<i>O Auto-Diagnóstico</i>	46
3	INCERTEZA DE MEDIÇÃO E ACIDENTES DE LINHA	50
3.1	SOBRE AS FONTES DE INCERTEZA	50
3.2	SOBRE A INCERTEZA DO FATOR DE CORREÇÃO	52
3.3	SOBRE OS ACIDENTES DE LINHA ANALISADOS NESTE TRABALHO	59
4	SOBRE O ESTUDO EXPERIMENTAL DA VARIABILIDADE DA MEDIÇÃO PARA ALGUNS ACIDENTES DE LINHA	62
4.1	SOBRE O APARATO EXPERIMENTAL	62
4.2	SOBRE O TUBO DE PITOT	63
4.2.1	<i>Justificativa da Utilização Inicial do Tubo de Pitot e de sua Exclusão</i>	65
4.3	SOBRE O MEDIDOR ULTRASSÔNICO UTILIZADO	67

4.3.1	<i>Módulo de Visualização e Aquisição de Dados – MODATA</i>	68
4.3.2	<i>Software de interface padrão Windows® - FLOWVIEW</i>	69
4.4	AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE NA AUSÊNCIA DO TUBO DE PITOT COMO REFERÊNCIA.....	69
5	ESTUDO EXPERIMENTAL DA VARIABILIDADE DA MEDIÇÃO PARA ALGUNS ACIDENTES DE LINHA	72
5.1	DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	72
6	CONCLUSÕES	81
6.1	QUANTO AOS OBJETIVOS DO TRABALHO.....	81
6.2	TRABALHOS FUTUROS	83
7	REFERÊNCIAS.....	84
	APÊNDICE A – ARTIGO SALGADO E RAMOS	87
	APÊNDICE B – RESULTADOS DE TESTES COM TUBO DE PITOT	96
	APÊNDICE C – RESULTADOS EXPERIMENTAIS MEVUS.....	98
	ANEXO A – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO NO. 48/2009.....	102

1 Introdução

1.1 Motivação e Objetivos do Trabalho

Durante 44 anos, a PETROBRAS foi detentora do monopólio de exploração e produção (E&P) de petróleo e gás natural no Brasil. Durante este período, foi responsável pela medição, arrecadação e distribuição de tributos ao Estado. Foi daí que surgiu a máxima: “Do Poço ao Posto”. Medições de quanto da matéria-prima passava de um processo para o outro era uma atividade secundária, afinal de contas, qualquer erro oriundo destas medições não faria tanta diferença, pois todo processo era dominado por uma só empresa.

Contudo, após a criação da Lei do Petróleo, o monopólio sobre hidrocarbonetos foi extinto e o processo não é mais dominado por uma só empresa, tornando extremamente importante, especialmente financeiramente, a medição correta do quanto de matéria-prima passa de um processo para outro (influenciando inclusive a arrecadação de royalties).

Hoje, a Petrobrás é uma concessionária, subordinada à ANP (1997 - Agência Nacional do Petróleo), que é uma autarquia da administração Pública Federal vinculada ao Ministério de Minas e Energia, cuja finalidade é promover a regulação, a contratação e a fiscalização das atividades econômicas integrantes da indústria do petróleo, de acordo com a lei, nas diretrizes do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), em conformidade com os interesses do país.

Com a criação da ANP, uma de suas atribuições foi a aplicação da legislação pertinente para distribuição dos recursos arrecadados com as Participações Governamentais.

Em 19 de junho de 2000 foi criada a Portaria Conjunta Nº 1 ANP/INMETRO – Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural [1], que:

- Regulamenta a medição de petróleo e gás natural na área de E&P e de transporte;
- Aprova o Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural;

- Estabelece os requisitos mínimos para os sistemas de medição de petróleo e gás;
- Define: medidores, calibração e incertezas;
- Tem como objetivo garantir resultados completos e acurados.

Contudo, o Brasil é extremamente defasado neste aspecto (medição de vazão). Poucos estudos foram realizados a respeito do assunto. O mercado brasileiro é carente em profissionais que entendam desta área.

O advento da Portaria Conjunta nº1/2000 [1] não coincidiu com a formação de mão-de-obra qualificada e competente, em número suficiente para lidar com as peculiaridades específicas dos problemas relacionados à medição de vazão em seus mais diversos aspectos.

As questões relacionadas à medição de vazão se tornam mais pertinentes na medida do desenvolvimento tecnológico dos novos medidores e das dificuldades observadas em escoamentos não-convencionais, como os multifásicos e os de fluidos não-newtonianos.

Uma das técnicas promissoras para medição de vazão de gás, por exemplo, é a tecnologia de medição ultrassônica, que vem sendo pesquisada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFES há alguns anos. A tecnologia tem a vantagem de aplicar um método não intrusivo, o que, além de gerar menor perturbação no escoamento medido, também não possui peças móveis, tornando o processo mais robusto. Para uma comparação entre diversos métodos de medição de vazão, e vantagens da medição ultrassônica, sugere-se a dissertação de mestrado de Ramos [2].

Uma das semelhanças entre a medição de vazão ultrassônica e as tecnologias de medição deprimogênia diz respeito ao fato de que a variável primária da medição é a velocidade, não a vazão volumétrica, nem a vazão mássica. No entanto, como se verá, a velocidade medida se refere à velocidade média do escoamento ao longo do caminho acústico, isto é, de uma linha entre os transdutores na qual a onda sonora percorre.

Sabe-se, contudo, que acidentes de linha induzem perturbações no escoamento, fazendo com que a velocidade medida sobre o caminho acústico sofra perturbações. O mesmo ocorre, por exemplo, com as placas de orifício e os tubos de Pitot, que exigem um escoamento perfeitamente desenvolvido para a correta medição da velocidade média.

Utilizar sistemas de medição ultrassônicas em plantas onde as tubulações têm muitos acidentes de linha pode representar, então, um problema a ser solucionado. Tome-se, por exemplo, o caso de plataformas de produção de petróleo, onde nem sempre é possível instalar trechos retos longos o suficiente para garantir um escoamento com perfil completamente desenvolvido.

Não obstante o problema apontado, as vantagens da medição ultrassônica ainda devem ser consideradas na aplicação de medição de vazão de gás em plataforma, sobretudo nas linhas de baixa pressão e baixa velocidade, onde a medição deprimogênica costuma apresentar-se inviável ou com incerteza elevada.

Via de regra, os acidentes de linha podem afetar a medição de duas formas, a saber:

- Introdução de erro sistemático, porque a velocidade média no ponto ou caminho de medição é alterada pelo acidente;
- Introdução de erro aleatório, por causa do aumento da turbulência na região de medição.

Nesta linha de ação, é válido, portanto, considerar um estudo experimental para:

- a) Avaliar os princípios de funcionamento do medidor de vazão por ultra-som;
- b) Avaliar o comportamento das medições (média e variabilidade) quando determinados tipos de acidentes são propositadamente inseridos na linha;
- c) Avaliar a incerteza global da medição nestas situações.

O foco desta dissertação é o segundo item da lista. Como se verá mais adiante, não se adentrou ao terceiro item, porque a correta avaliação da incerteza exige, por

óbvio, a aplicação de uma referência calibrada e rastreável, o que, infelizmente, não foi possível durante os experimentos realizados.

1.2 Revisão Bibliográfica

A motivação do presente trabalho advém da publicação da Portaria Conjunta ANP/INMETRO N.º 1 [1] que constitui uma regulamentação federal que impõe novos desafios às companhias e instituições que lidam com medição de vazão, especialmente aquelas que usam novas tecnologias, como medidores de vazão por ultra-som. Este regulamento descreve, pela primeira vez no Brasil, as condições e os procedimentos para a medição operacional e fiscal de hidrocarbonetos, bem como inclui a utilização do medidor de vazão por ultra-som como uma tecnologia aceitável para tais medições.

Por outro lado, a publicação da American Gas Association – AGA report n.º 9 [3] difunde informações sobre características básicas da tecnologia por ultra-som para medição de vazão de gás. Naquele tempo, o texto da AGA-9 [3] admitia que a tecnologia por ultrassom aplicada à medição de vazão ainda estava em estágio inicial e sugeria que mais estudos eram necessários com o objetivo de definir, com confiabilidade, várias características sobre o medidor ultrassônico como efeitos de instalação, necessidade de tubulações retas, tratamento de sinais, qualidade do perfil de velocidade na seção de medição, influência da composição do gás, etc.

A comunidade tecnológica e científica respondeu a este desafio com um grande número de conferências e artigos sobre tais efeitos característicos, como citados por Eren [4], Lansing [5], [6], [7] e [8], Ruppel e Peters [9] e Raisutis [10], entre outros.

Lynnworth e Liu [11] fizeram um estudo sobre o desenvolvimento da medição de vazão por ultra-som desde 1955. Eles explicam como o desenvolvimento desta tecnologia influenciou na medição de vazão mediante complicações presentes nas tubulações e nos tipos de fluidos.

Um importante complemento da AGA-9 [3] veio com a publicação da AGA Report n.º 10 [12], onde é descrita uma equação virial de estados que prediz a velocidade do

som para gás natural, tendo como dados de entrada: composição química, temperatura e pressão. A AGA10 [12] possui provavelmente a equação mais confiável e atualizada para simular tal propriedade com confiabilidade. Outros trabalhos dedicados a examinar o comportamento termofísico do gás natural podem ser encontrados em Burnstein et al. [13] e Estela-Uribe et al. [14].

Devido a tais esforços, a utilização de medidores de vazão por ultra-som para aplicações com gás natural tem crescido significativamente. Hoje, virtualmente qualquer companhia de petróleo usa tal tecnologia, seja para transferência de custódia, medição fiscal ou monitoramento operacional. Alguns benefícios desta tecnologia incluem:

- Exatidão: os medidores podem ser calibrados para uma incerteza de 0,3%;
- Grande faixa de medição: tipicamente mais de 50:1 (a faixa de medição típica para placas de orifício é 3:1, sendo 20:1 para turbinas). Onde 50:1, indica que o maior valor medido pelo medidor pode ser 50 vezes maior que o menor valor;
- Tolerância a gás úmido;
- Não intrusivo: não causa queda de pressão;
- Pouca manutenção: não há partes móveis;
- Auto-diagnóstico: dados para determinar a condição de operação do medidor.

Ramos [2] desenvolveu, desde sua concepção, projeto, modificações e testes, passando pelos aspectos construtivos mecânicos e eletrônicos, o protótipo MEVUS (Medidor de Vazão por Ultra Som). Neste trabalho, os resultados do medidor de vazão por ultra-som foram comparados com uma placa de orifício buscando uma correlação entre o mesmo e uma referência confiável.

Contudo, todos os resultados foram obtidos com utilização de trechos retos, sem a inclusão de acidentes de linha.

Ressalta-se que apesar dos experimentos contidos neste trabalho serem desenvolvidos em túnel de vento atmosférico (conforme será explicitado posteriormente), os resultados são também válidos para medição de gás de flare a

baixa pressão, no que tange aos aspectos termodinâmicos e de mecânica dos fluidos, conforme Salgado e Ramos [15] – Apêndice A.

Sobre os efeitos de acidentes de linha

Acidentes de linha presentes à montante e à jusante de medidores de vazão influenciam consideravelmente na qualidade da leitura do medidor. Estes acidentes modificam o perfil de velocidade do fluido em estudo, ocasionando erros na medição.

O estudo do efeito destes acidentes é importante para que se possa determinar a influência de cada tipo de acidente e propor correções para as leituras.

Nota-se que a literatura utiliza certas configurações comuns em aplicações reais, como: uma curva de 90°, duas curvas de 90° em planos distintos e em planos iguais. Estas configurações são comuns na indústria e recebem o maior número de estudo e proposta de correções de medição.

Um dos primeiros trabalhos que tiveram como foco a influência de acidentes de linha na medição de vazão foi proposto por Mattingly e Yeh nos anos 80. Em função de um projeto de patrocínio à pesquisa proposto pelo *National Bureau of Standards* – NBS (que depois passou a ser conhecido como *National Institute of Standards and Technology* - NIST) em parceria com várias empresas e com o Departamento de Comércio dos Estados Unidos da América os frutos deste estudo foram divulgados. Este programa de pesquisa visava melhorias tecnológicas nas indústrias americanas e propunha reuniões de dois em dois anos para a apresentação de resultados de pesquisas e discussão de melhorias. Em uma destas reuniões bienais, os membros notaram que seria útil o arquivamento destes resultados e passaram a fazer relatórios dos períodos de pesquisa.

Um destes relatórios gerou uma das primeiras aparições do assunto na literatura, em 1988. Este relatório [16] apresentava, entre outros resultados, análises de perfis de velocidade usando a tecnologia de velocimetria a laser Doppler (*Laser Doppler Velocimeter* – LDV) e a diminuição do efeito *swirl* no trecho seguinte ao acidente.

Além disso, eles observaram erros na medição em função dos diferentes acidentes de linha à montante do medidor.

A partir deste estudo, outros estudos foram desenvolvidos, utilizando os resultados de Mattingly e Yeh como referência e parâmetro de comparação.

Mattingly e Yeh [17] publicaram resultados originados dos efeitos de curvas e condicionadores de fluxo nas medições feitas por turbinas e placas de orifício. Neste trabalho, eles observam que as normas de instalação eram insuficientes em relação ao trecho reto sugerido. Observaram também que a presença do condicionador de fluxo gerava maior erro na medição, em algumas configurações.

Após esta publicação um dos primeiros artigos nesta área foi resultado do estudo de Branch [18], que identificou os efeitos de uma curva fechada (raio de curvatura pequeno) no coeficiente de descarga (razão entre a vazão real e a vazão teórica) de uma placa de orifício. A bancada de teste possibilitou que ele investigasse a influência da localização das tomadas de pressões ao redor da placa e notasse que este fator também influenciava na medição, embora ainda não soubesse explicar a causa.

Holm, Stang e Delsing [19] estudaram numericamente a reação do fator de calibração à alguns acidentes de linha. Os resultados experimentais, analíticos e numéricos são comparados e discutidos para uma faixa de diversos números de Reynolds. O resultado numérico pode ajudar no desenvolvimento de medidores ultra-sônicos capazes de se adaptar a condições diferentes de instalação e de corrigir os resultados obtidos.

Hilgenstock e Ernst [20] consideram os efeitos de instalação com ajuda do CFD (*computational fluid dynamics*). Os resultados obtidos por simulação numérica são muito mais abrangentes que os obtidos por investigações experimentais. Neste trabalho os autores encontraram resultados razoavelmente próximos aos encontrados experimentalmente utilizando modelos padrões de turbulência. Também consideraram como acidente uma curva de 90° e duas curvas de 90° em

planos ortogonais. O trabalho abrange também a influência que o *swirl* tem em medidores de vazão por ultra-som por tempo de trânsito.

Mickan et al. [21] desenvolveram um artigo que implica em uma investigação sistemática dos efeitos dos acidentes de linha a fim de encontrar maneiras eficientes de minimizar estes efeitos. Diversos acidentes de linha na presença, também, de condicionadores de fluxo foram estudados (todos eles a diversas distâncias do medidor). Erros de no máximo 1% foram encontrados.

Carlander e Delsing [22] também estudaram a influência de acidentes de linha. Neste caso eles expõem um medidor de vazão por ultra-som para água a cinco diferentes configurações (um experimento de referência, um cotovelo, dois cotovelos em planos ortogonais, uma redução no diâmetro da tubulação e um fluxo pulsante). Utilizaram-se números de Reynolds entre 25 e 110000. O erro e a mudança no desvio padrão das quatro configurações foram calculados e comparados com o experimento de referência. Os erros máximos estiveram entre 2 e 4%. Os resultados demonstraram que as configurações testadas introduzem um erro na medição maior que nas condições de referência (trecho reto). O trabalho demonstra que estas mudanças na instalação podem ser detectadas pelo aumento do nível de ruído comparado com o experimento referência. Os resultados demonstraram que para erros maiores que 1%, há um claro aumento no desvio padrão.

Grimley [23] apresenta resultados de três tipos de medidores de vazão por ultra-som comercialmente disponíveis utilizando configurações padrão de instalação. Os ensaios são destinados a verificação do desempenho do medidor em relação aos níveis exigidos pela AGA-9 [3]. Os testes incluem configurações de tubulação com um cotovelo de 90° e dois cotovelos de 90° combinados (no mesmo plano e em planos ortogonais). Além disso, os testes incluem a utilização ou não de condicionadores de fluxo em seu trecho reto.

Ruppel e Peters [9] analisaram experimentalmente dois tipos de instalações comuns em plantas industriais: uma curva de 90° e duas curvas, também de 90°. Mais uma vez os resultados são comparados a uma referência que, neste caso, é o venturi. Os autores fazem um levantamento dos erros para escoamentos em diversos números

de Reynolds, a diversas distâncias de trecho reto. Neste caso, os autores determinam o ângulo no qual o vórtice é formado devido aos acidentes de linha, relacionando-os com os erros observados no medidor de vazão por ultra-som.

Lansing et al. [24] definem e explicam o funcionamento, os benefícios e os problemas relacionados ao medidor de vazão por ultra-som, além de comentar sobre quais fatores devem ser considerados durante a instalação do medidor de vazão por ultra-som para garantir um bom desempenho do mesmo.

2 Fundamentos da Medição Ultrassônica de Vazão

2.1 Concepção básica de um medidor ultrassônico

A construção básica de um medidor de vazão por ultra-som é relativamente simples, como mostrado na Figura 2.1.

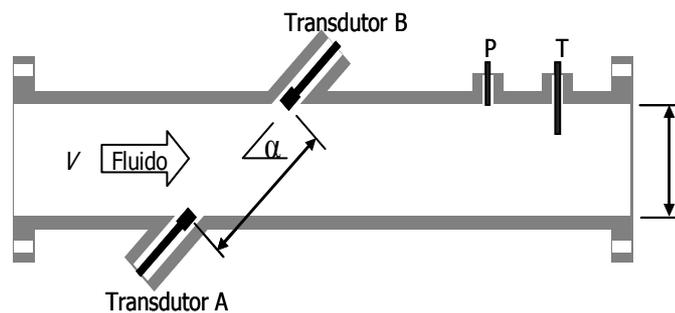


Figura 2.1 - Esquema e dimensões básicas de um medidor de vazão por ultra-som

Medidores ultra-sônicos são medidores de velocidade por natureza. Isto quer dizer que eles medem a velocidade do gás no interior do corpo de medição. Conhecendo a velocidade e a área da seção transversal, a vazão volumétrica pode ser adquirida.

O aspecto fundamental da medição de vazão por ultra-som depende do conhecimento exato do tempo de trânsito de um pulso ultra-sônico atravessando o fluido do transdutor A (a favor do fluxo) ao transdutor B (t_{AB}). Quando se completa esta medição, um novo pulso é lançado do transdutor B ao A, agora contra o fluxo, e este tempo de trânsito pode ser determinado (t_{BA}). O tempo de trânsito do sinal viajando à jusante é menor que o tempo de trânsito do sinal viajando à montante.

Uma vez que os tempos de trânsito são conhecidos, à montante e à jusante, as velocidades, v_{AB} e v_{BA} , respectivamente podem ser determinadas pelas Equações.

2.1 e 2.2:

$$v_{AB} = \frac{L}{t_{AB}} = c + V \cos \alpha \qquad v_{BA} = \frac{L}{t_{BA}} = c - V \cos \alpha \qquad (2.1, 2.2)$$

$$V = \frac{D}{\sin 2\alpha} \frac{t_{AB} - t_{BA}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \quad c = \frac{D}{2 \sin \alpha} \frac{t_{AB} + t_{BA}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \quad (2.3, 2.4)$$

Onde L , α , t_{AB} e t_{BA} são parâmetros conhecidos; V é associado à velocidade do fluido e c é a velocidade do som do gás. O sistema algébrico composto pelas Equações 2.1 e 2.2 pode ser facilmente resolvido para os parâmetros desconhecidos c e V , o que proporciona as Equações 2.3 e 2.4.

Pelas Equações 2.3 e 2.4 é possível medir a variável associada à velocidade do fluido, V , assim como a velocidade do som no gás fluindo. Infelizmente, determinar corretamente a vazão no medidor é uma tarefa um pouco mais difícil. A velocidade V mostrada na Equação 2.3 se refere à velocidade no caminho acústico. A velocidade necessária para determinação da vazão, também conhecida com velocidade média ou *bulk velocity*, é a média da velocidade do gás através da área do medidor. Na tubulação, o perfil da velocidade do gás nem sempre é uniforme e frequentemente é submetida a vórtices e também a um perfil de velocidade assimétrico. Isso faz com que a aquisição da velocidade média seja um pouco mais desafiadora.

Porém, é importante notar que o cálculo da velocidade do gás na Equação 2.3 é independente da velocidade do som calculada na Equação 2.4, ou seja, para computar a velocidade do som, a velocidade do gás não é necessária. Isso é verdade porque as medições do tempo de trânsito t_{AB} e t_{BA} são medidos dentro de alguns milissegundos em relação ao outro, e a composição do gás não muda significativamente durante este tempo. Também deve ser notada a simplicidade das Equações 2.3 e 2.4 que são dependentes somente de L , α , t_{AB} e t_{BA} .

2.2 O Efeito Piezelétrico

As ondas ultra-sônicas são geradas ou introduzidas no material através de um elemento emissor com uma determinada dimensão e que vibra com certa frequência. Tanto o elemento emissor quanto o receptor são denominados transdutores.

Diversos materiais (cristais) apresentam o efeito piezelétrico. Se for aplicada uma determinada pressão sobre uma lâmina desse tipo de cristal com um determinado formato, surgem cargas elétricas em sua superfície.

O efeito inverso também é verdadeiro: se forem aplicados dois eletrodos sobre as faces opostas de uma placa de cristal piezelétrico, de maneira a carregar as faces eletricamente, a placa comporta-se como se estivesse sobre pressão e diminui de espessura.

O cristal piezelétrico pode transformar a energia elétrica alternada em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica. Tal fenômeno é obtido aplicando-se eletrodos no cristal piezelétrico com tensão elétrica alternada, de maneira que o mesmo se contrai e se estende ciclicamente. A Figura 2.2 demonstra o fenômeno.

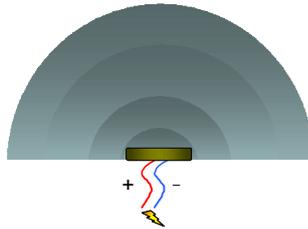


Figura 2. 2 - Geração de ondas a partir da vibração induzida eletricamente em um cristal piezelétrico.

2.2.1 Tipos de cristais

Os materiais piezelétricos disponíveis são: o Quartzo, o Sulfato de lítio, o titanato de bário e o Metaniobato de chumbo.

O Quartzo é um material piezelétrico mais antigo, translúcido e duro como o vidro, sendo cortado a partir de cristais originários no Brasil. Já o Sulfato de Lítio é um cristal sensível à temperatura e pouco resistente. O Titanato de Bário e o Metaniobato de chumbo são materiais cerâmicos que recebem o efeito piezelétrico através de polarização. Esses dois cristais são os melhores emissores, produzindo impulsos ou ondas de grande energia, se comparadas àquelas produzidas por cristais de quartzo.

2.2.2 Características do Sinal Ultra-Sônico

O espectro sonoro pode ser dividido em três zonas principais, cujos limites são definidos pela capacidade da audição humana. Assim, vibrações mecânicas com frequência entre 20 e 20.000 Hz, compreendem sinais sonoros que podem ser ouvidos e são chamadas, comumente, de som. Vibrações mecânicas com frequência abaixo de 20 Hz são conhecidas como infra-som e não são humanamente audíveis.

As frequências acima de 20.000 Hz, ou 20 kHz, compõem o ultra-som, também inaudível e é o espectro de frequência emitido pelos cristais piezelétricos quando excitados. Válvulas de controle de vazão também emitem ultra-som com frequências da ordem de 100 kHz. Essas considerações sobre o espectro de frequência podem ser visualizadas na Figura 2.3.

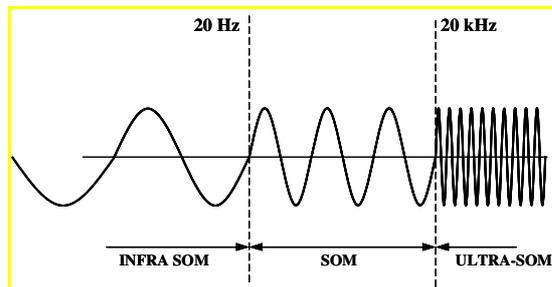


Figura 2. 3 - Distribuição do espectro sonoro em relação ao campo auditivo humano

Para o entendimento dos fenômenos que serão descritos a seguir, imagina-se que o cristal piezelétrico gerador de ondas ultra-sônicas, seja formado por infinitos pontos oscilantes de forma que cada ponto produz ondas que se propagam no meio.

Tal qual uma pedra caindo num lago de águas calmas produzirá ondas circulares na superfície, cada ponto do cristal também se comportará da mesma forma, ou seja, produzirá ondas esféricas no meio de propagação, como mostra a Figura 4. Os três pontos selecionados do cristal emitem ondas esféricas que se propagam no meio.

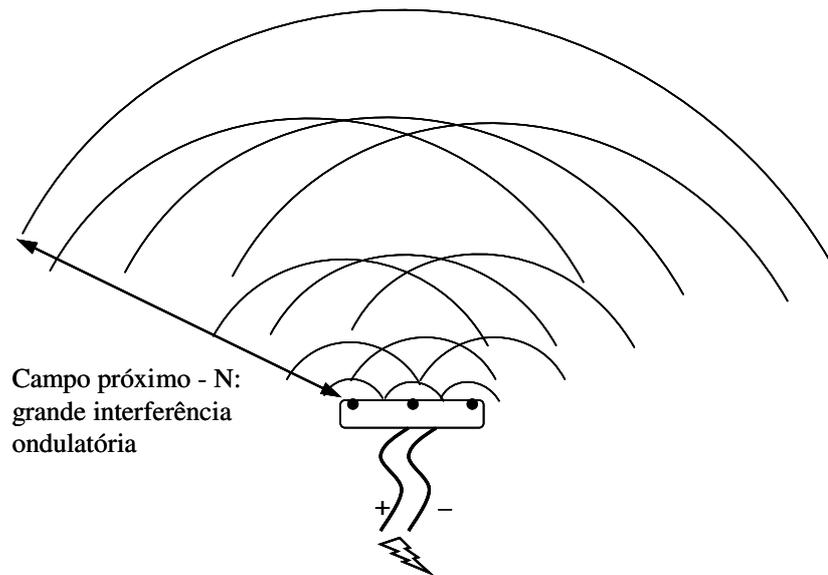


Figura 2. 4 - Campo sônico nas proximidades do cristal

Na Figura 2.4, nota-se que, nas proximidades do cristal existe uma interferência ondulatória muito grande entre as ondas provenientes dos pontos do cristal. À medida que nos afastamos do cristal, as interferências vão diminuindo e desaparecendo, tornando uma só frente de onda. A região próxima do cristal onde os fenômenos acima se manifestam denomina-se Campo Próximo com uma extensão N que depende do diâmetro do cristal e do comprimento de onda λ da vibração, podendo ser calculado pela Equação 2.5 [25]:

$$N = \frac{d_e^2}{4\ell} = \frac{f \cdot d_e^2}{4c} \quad (2.5)$$

onde:

d_e : diâmetro efetivo do cristal. É a área acusticamente efetiva do cristal, que depende da sua forma geométrica.

Para cristais circulares: $d_e = 0.97 \cdot d$ (d : diâmetro do cristal)

Para cristais retangulares: $d_e = 0.485 \cdot d$ (d : maior lado do cristal)

f : frequência ultra-sônica

λ : comprimento de onda

c : velocidade de propagação do som ($\lambda \cdot f$)

2.3 Atenuação Sônica

A onda sônica ao percorrer um meio qualquer sofre em sua trajetória efeitos de dispersão e absorção, resultando na redução da sua energia ao percorrer esse meio.

A dispersão deve-se ao fato do meio não ser totalmente homogêneo (variação da composição química e presença de resíduos, por exemplo).

O fenômeno da absorção ocorre sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico. É a energia cedida pela onda para que cada partícula do meio execute um movimento de oscilação, transmitindo a vibração às outras partículas do próprio meio.

Nas Figuras 2.5 e 2.6 encontram-se as atenuações tipicamente encontradas quando o meio de propagação é o ar. A Figura 2.5 mostra o aumento da atenuação em relação à umidade no ar, para várias freqüências, enquanto que na Figura 2.6, é mostrado o aumento da atenuação com o aumento da freqüência.

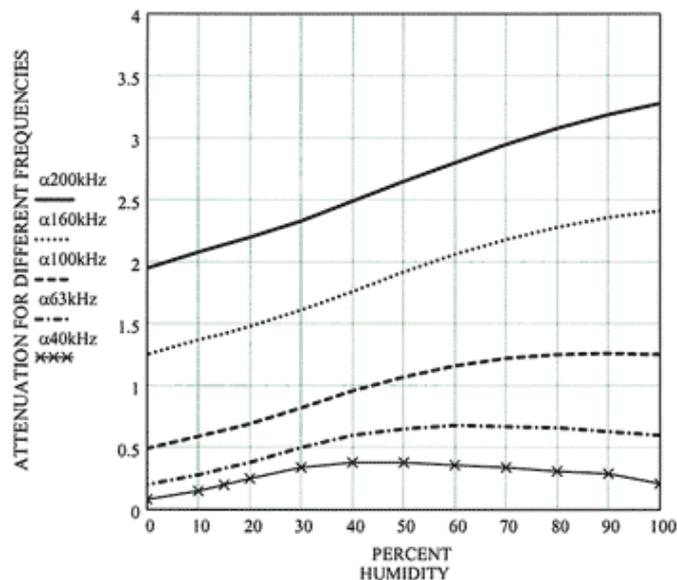


Figura 2. 5 - Atenuação do Som no Ar x Umidade para várias Frequências [26]

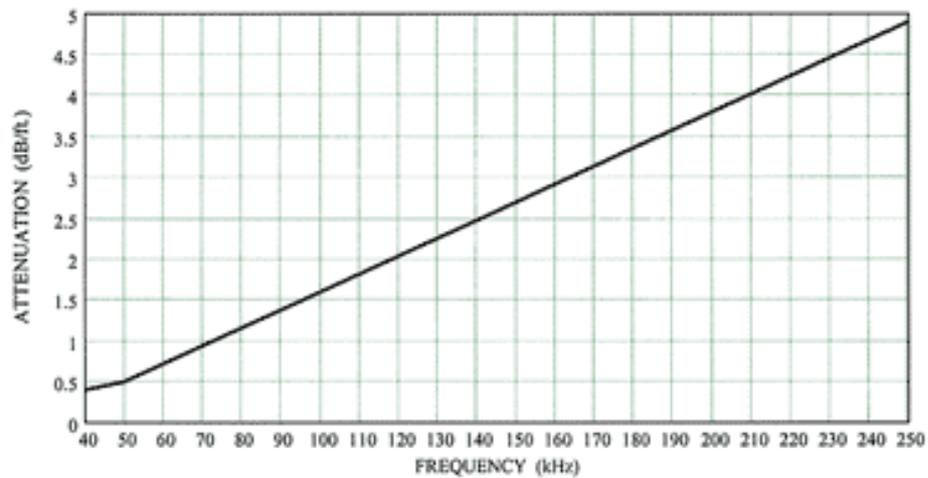


Figura 2. 6 - Atenuação do Som no Ar versus Frequência [26]

2.4 A Onda Acústica (cone de som)

A forma da onda acústica produzida pelo transdutor ultra-sônico quando excitado (Figuras 2.7 e 2.8) depende:

- da frequência de operação;
- do tamanho;
- da forma;
- das características de fase das superfícies vibrantes.

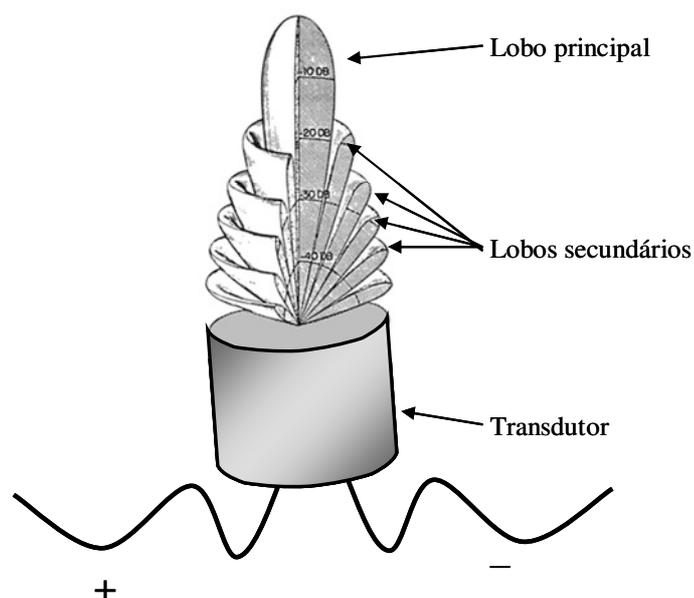


Figura 2. 7 - Onda acústica (cone de som) típica de um transdutor cilíndrico [26].

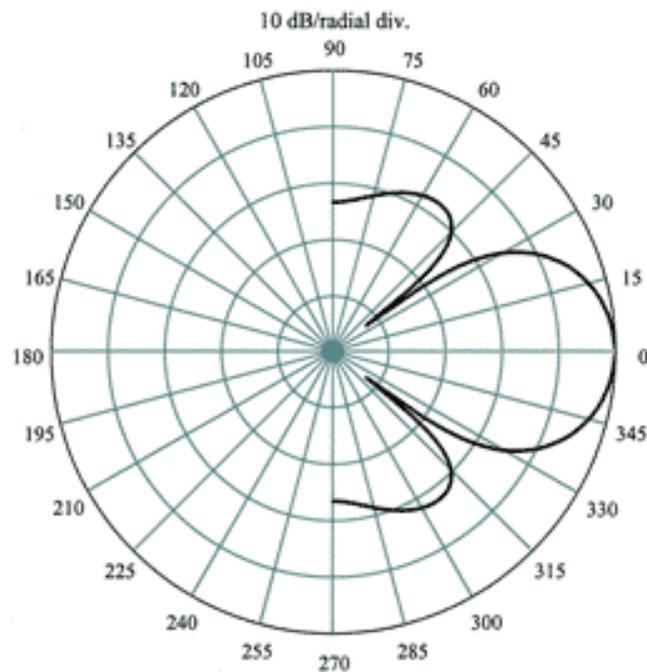


Figura 2. 8 - Gráfico bidimensional mostrando a forma da onda acústica produzida por um transdutor cilíndrico (Diâmetro/Comprimento de Onda – 2) [26]

O medidor de vazão de gás ultra-sônico por tempo de trânsito emite dois sinais ultra-sônicos, um a montante e outro a jusante, em um intervalo de tempo da ordem de milésimos de segundo. Assim, o desenvolvimento da onda acústica no interior do duto se desenvolve de uma forma similar a demonstrada na Figura 2.9.

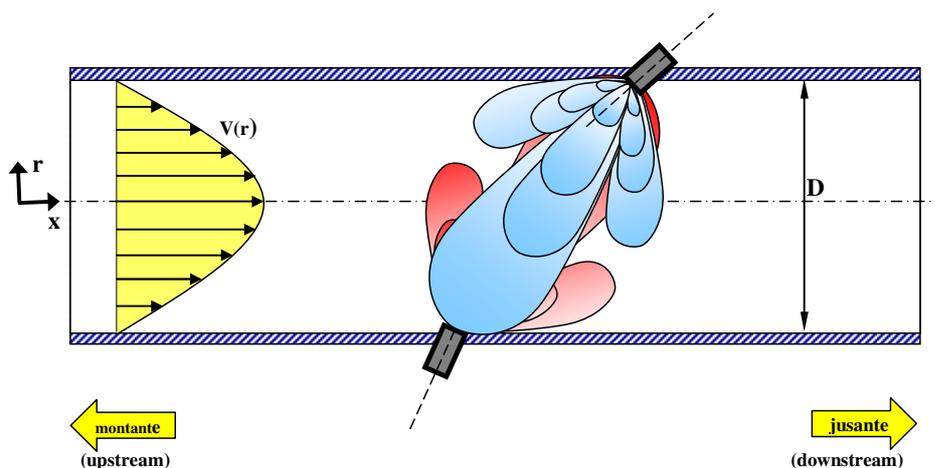


Figura 2. 9 - Interferência entre os cones de som gerados pelos transdutores ultra-sônicos

Uma análise da Figura 2.9 indica a necessidade de um sistema de aquisição e tratamento de sinais extremamente eficiente, a fim de distinguir entre os sinais

principais e secundários, bem como diferenciar os lobos principais dos secundários com precisão, o que só foi possível conseguir com a recente evolução dos sistemas de micro-informática.

2.5 O Cálculo da Velocidade do Som

2.5.1 Conceitos Termodinâmicos

A velocidade do som num gás é uma propriedade termodinâmica e pode ser calculada pela expressão:

$$c = \sqrt{k \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s} \quad (2.6)$$

Considerando o fluido como um gás perfeito, a relação entre pressão, temperatura e densidade é dada pela seguinte equação de estado:

$$\frac{P}{\rho} = R \cdot T \quad \Rightarrow \quad P \cdot v = R \cdot T \quad (2.7)$$

Assim, a derivada fica:

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = R \cdot T \quad (2.8)$$

Então, a velocidade do som para um gás perfeito se torna:

$$c = \sqrt{k \cdot R \cdot T} \quad (2.9)$$

Como o gás estudado pode não se comportar como gás perfeito, necessita-se conhecer seu “fator de compressibilidade Z”, que fornece a medida do afastamento do comportamento de gás perfeito (para o caso do trabalho em estudo, o fator de compressibilidade usado é igual a 1, isto é, considera-se o ar nas condições atmosféricas como gás perfeito):

$$c = \sqrt{k \cdot Z \cdot R \cdot T} \quad (2.10)$$

onde:

k : constante isentrópica do gás: $k = \frac{c_p}{c_v}$ [adimensional]

P : Pressão absoluta do gás [Pa]

T : Temperatura do gás [K]

M : Massa molecular do gás [mol/kg] (metano: $M = 16.043$)

\bar{R} : Constante Universal dos Gases: 8314.5 N.m/kmol.K

R : Constante do gás: $R = \frac{\bar{R}}{M}$ [J/mol.K]

Z : Fator de Compressibilidade

c : Velocidade do som no fluido [m/s]

ρ : Massa específica

Assim a equação da velocidade do som estimada se torna:

$$c = \sqrt{k \cdot Z \cdot T \cdot \frac{\bar{R}}{M}} \quad (2.11)$$

Exemplo de cálculo da velocidade do som do metano:

k : constante isentrópica do metano: $k = 1,299$ [adimensional]

P : Pressão absoluta do metano: $P = 101,1 \times 10^3$ Pa

T : Temperatura do gás: $T = 20^\circ\text{C} = 293,15\text{K}$

M : Massa molecular do metano: $M = 16,043$ mol/kg

\bar{R} : Constante Universal dos Gases: 8314,5 N.m/kmol.K

Z : Fator de Compressibilidade do metano para P e T : $Z = 1$

$$c = \sqrt{1.299 \cdot 1 \cdot 293.15 \cdot \frac{8314.5}{16.043}} = 444.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Em diversas bibliografias considera-se o ar atmosférico comportando como gás

perfeito, mas não se demonstra o motivo pelo qual é feita tal consideração. Supondo o ar atmosférico composto por 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio, foi feita uma comparação entre a velocidade do som calculada de acordo com a Equação 2.9 (gás perfeito) e a velocidade calculada pela AGA 10 [12]. Para isto, tomou-se uma variação de até 300% na temperatura e, posteriormente, de até 500% na concentração de oxigênio. Os resultados estão nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2. 1 - Comparação da velocidade do som (gás perfeito x AGA 10)

T [°C]	c [m/s] (Gás perfeito)	c [m/s] (AGA 10)	Dif [%]
10,0	338,31	337,95	-0,11%
15,0	341,29	340,92	-0,11%
20,0	344,24	343,85	-0,11%
25,0	347,16	346,77	-0,11%
30,0	350,06	349,65	-0,12%
40,0	355,79	355,35	-0,12%
Variação no range:	300,00%	5,17%	5,15%

Tabela 2. 2 - Comparação da velocidade do som (gás perfeito x AGA 10) a 25°C.

O2	N2	c [m/s] (Gás perfeito)	c [m/s] (AGA 10)	Dif [%]
5,0	95,0	350,83	350,78	-0,01%
10,0	90,0	349,69	349,51	-0,05%
15,0	85,0	348,54	348,26	-0,08%
20,0	80,0	347,39	347,01	-0,11%
21,0	79,0	347,16	346,77	-0,11%
25,0	75,0	346,24	345,78	-0,13%
30,0	70,0	345,08	344,56	-0,15%
Variação no range:	500,00%	-26,32%	-1,64%	-1,77%

Com estes resultados, observa-se que, mesmo com grandes variações de temperaturas, a diferença entre a velocidade do som calculada pela equação de gás perfeito e a calculada pela AGA 10 [12] não ultrapassa, aproximadamente, -0,1%. Além disso, grandes variações na concentração de oxigênio provocam alterações de, no máximo, -0,15% entre as velocidades do som calculadas pelos dois métodos

(Gás perfeito x AGA 10).

Sendo assim, a aproximação considerada neste trabalho e por diversas bibliografias pode ser considerada válida devido às diferenças desprezíveis encontradas no cálculo da velocidade do som pelos dois métodos e em diferentes condições de temperatura e concentrações químicas.

2.6 Medida da Velocidade do Som pelo Medidor Ultra-Sônico

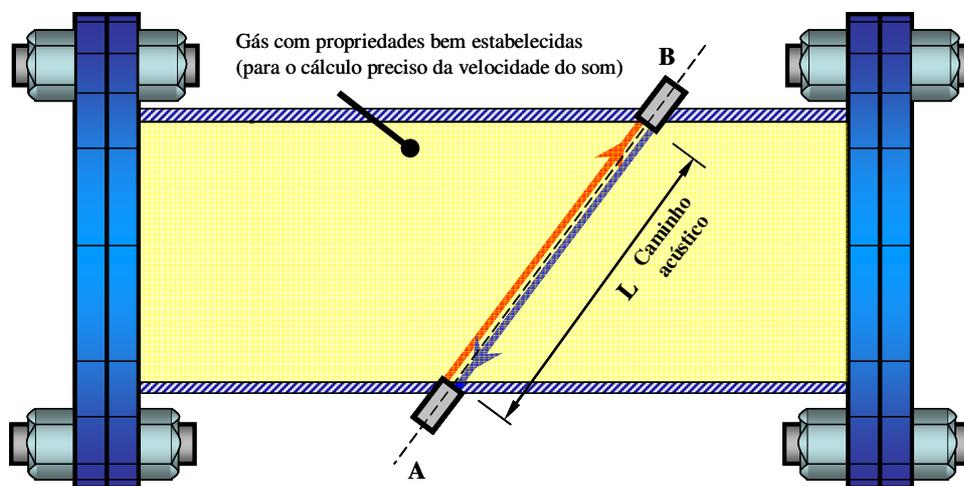


Figura 2. 10 - Procedimento para se medir a velocidade do som utilizando um medidor ultra-sônico

A velocidade da onda sonora pode ser calculada, na ausência de escoamento, pela seguinte expressão, obtida da Figura 2.10:

$$c = \frac{L}{t_{AB}} = \frac{L}{t_{BA}} = \text{velocidade do som medida} \quad (2.12)$$

Essa velocidade também pode ser estimada pelas equações de estado termodinâmicas, que dependem apenas das leituras de pressão, temperatura e composição do gás (AGA 8 [27]) e assim, a velocidade do som medida pelo aparelho pode ser comparada com a velocidade do som calculada pelas equações de estado.

Essa comparação serve como uma medida da qualidade do sinal ultra-sônico, isto é, se a diferença entre a medida e a estimada estiver fora de determinado critério, o

sinal ultra-sônico é rejeitado para o cálculo da velocidade de escoamento e da totalização da vazão.

2.6.1 Análise da velocidade do som calculada vs. Medida

A validade do procedimento de comparar a velocidade do som estimada vs. medida, pode ser conferida na Figura 2.11, onde se pode notar a excelente aderência entre os dados medidos e calculados pela equação de estado dado pela AGA 8 [27].

Observa-se que, de um modo geral, a comparação entre as velocidades do som medidas por 4 pares de transdutores e a velocidade prevista pela equação da AGA 8 [27] implica em um desvio de 0,3% aproximadamente. Na área onde o desvio da comparação excede esse valor, uma estratificação de temperatura é indicada como sendo a causa.

No caso de um ou mais transdutores apresentarem contaminação excessiva ou algum outro problema, esse tipo de gráfico pode indicar o impacto desse evento.

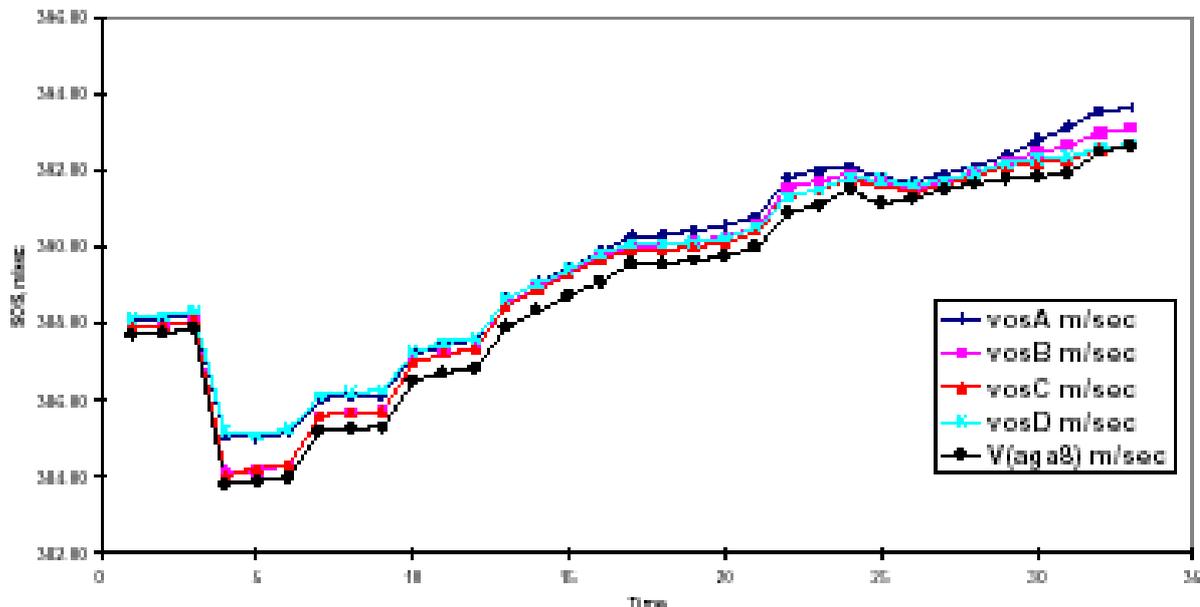


Figura 2. 11 - Comparação entre a velocidade do som estimada pela equação da AGA 8 e a medida por um medidor ultra-sônico [24].d)[24]

Características do canal de transmissão (caminho acústico):

- Sinal de baixa potência;

- Sinal com banda estreita;
- Alta absorção;
- Alta modulação e problemas de ruído em altas velocidades.

2.6.2 O escoamento através do medidor ultra-sônico

De um modo geral, os equipamentos típicos de uma planta de processo industrial, tais como bombas, compressores, sopradores, válvulas, enfim, todos aqueles equipamentos dedicados a elevar a pressão ou gerar vazão aumentam, concomitantemente, o nível de turbulência no interior dos dutos, tal como visto na Figura 2.12.

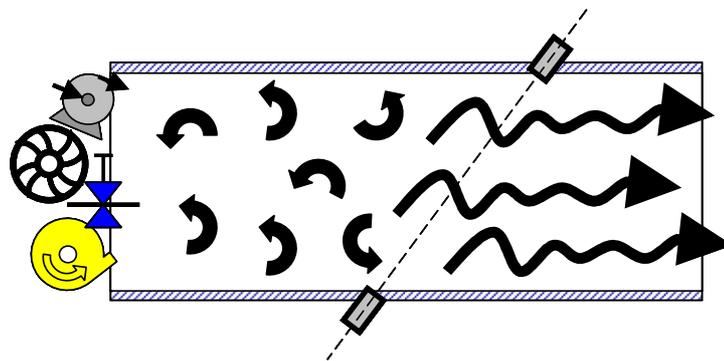


Figura 2. 12 - Representação do efeito de equipamentos de processo na formação do escoamento no interior de dutos

Eventualmente e sob determinadas condições, o escoamento passa a ter uma configuração mais estável e previsível.

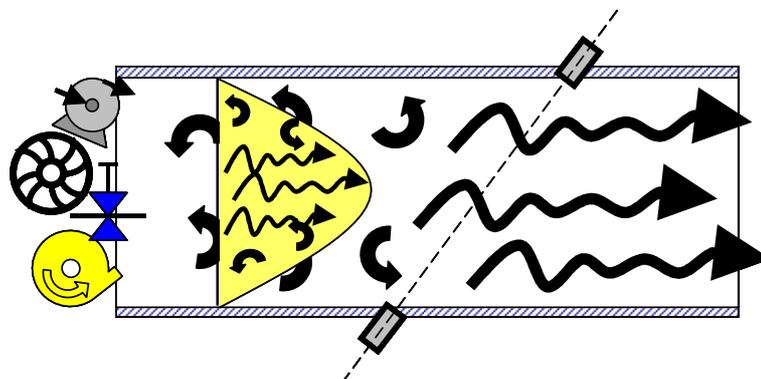


Figura 2. 13 - Perfil de velocidades turbulento no interior de dutos

Nessas condições, o perfil turbulento gerado possui a característica de velocidade zero ($V=0$) nas paredes do duto e a velocidade máxima no centro. De um modo geral, pode-se prever um perfil de velocidades médias, que será similar ao perfil de Hinze, como demonstrado na Figura 2.13 e 2.15.

Assim, o perfil de velocidades no interior dos dutos pode ser estabelecido com as velocidades médias estabelecidas pela turbulência, partindo de $V=0$ nas paredes e atingindo um máximo no centro, tal como na Figura 2.14.

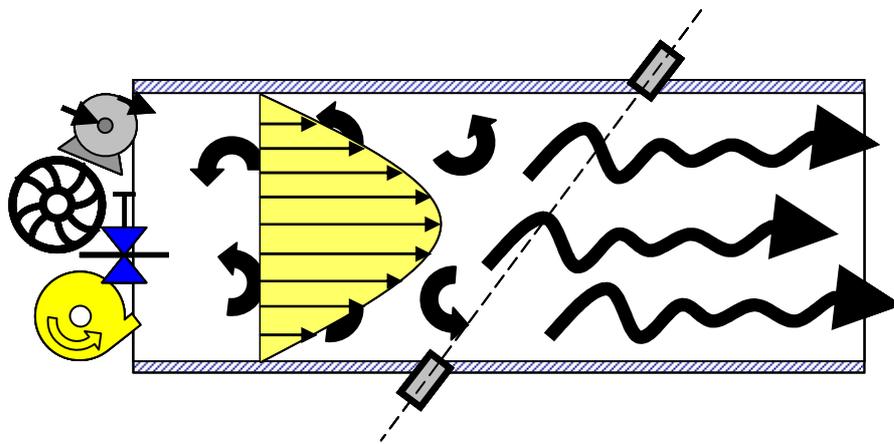


Figura 2. 14 - Perfil turbulento das velocidades médias no interior de um duto

O comportamento de tal tipo de perfil de velocidades é bastante conhecido e amplamente estudado em uma série de artigos técnico-científicos. No caso da recomendação da American Gas Association, referente a medidores de vazão ultrassônicos – AGA 9 [3] são recomendados os perfis de velocidades estudados por Hinze, cuja forma encontra-se na Figura 2.15 para vários números de Reynolds.

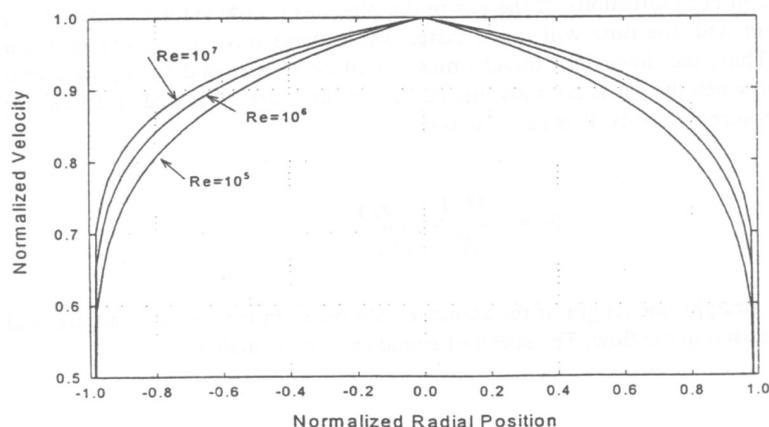


Figura 2. 15 - Velocidades média para escoamento turbulento no interior de um duto, conforme Hinze. [12]

O gráfico da figura foi obtido a partir da seguinte equação:

$$v(r) = v_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.13)$$

onde:

$$n = 2 \cdot \text{Log} \left(\frac{\text{Re}}{n} \right) - 0,8 \quad (2.14)$$

O número de Reynolds é um parâmetro hidrodinâmico de extrema importância na avaliação de escoamentos. A grosso modo, esse parâmetro fornece a medida da turbulência em um dado escoamento e é calculado por:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (2.15)$$

Onde:

ρ : massa específica do fluido [kg/m³]

μ : viscosidade dinâmica média do fluido [kg/m.s]

U : velocidade do escoamento [m/s]

D : diâmetro interno do duto [m]

Re : Número de Reynolds [adimensional]

Para um escoamento interno a um duto, a transição do escoamento laminar [28] para turbulento ocorre para um número de Reynolds acima de 2.300 ($Re > 2300$).

A Tabela 2.3 mostra os números de Reynolds calculados com as propriedades do gás natural a 20°C, para várias velocidades de escoamento, em dutos de diversos diâmetros.

Observe que a condição operacional para se obter um escoamento com $Re < 2300$ é bastante restrita, aparecendo na tabela apenas abaixo de 0,05 m/s.

Tabela 2. 3 - Número de Reynolds em função da velocidade do escoamento para gás natural a 20°C

Massa específica GN		0,9 kg/m ³		
Viscosidade GN		1,3E-05 N.s/m ²		
Velocidade do Escoamento (m/s)	Diâmetro do duto (pol)			
	12	20	40	
	Diâmetro do duto (m)			
	0,3048	0,508	1,016	
				Re
0,01	2,00E+02	3,00E+02	7,00E+02	
0,05	1,00E+03	2,00E+03	3,00E+03	
0,1	2,00E+03	3,00E+03	7,00E+03	
0,3	6,00E+03	1,00E+04	2,00E+04	
0,5	1,00E+04	2,00E+04	3,00E+04	
1	2,00E+04	3,00E+04	7,00E+04	
5	1,00E+05	2,00E+05	3,00E+05	
10	2,00E+05	3,00E+05	7,00E+05	

2.6.3 O Cálculo da Vazão

O sinal ultra-sônico emitido pelos transdutores viaja, então, através de um perfil de velocidades não-uniforme. Para que seja executado o cálculo da vazão, é necessário que a equação que representa o perfil turbulento seja operada por uma fórmula de transformação de modo seja obtido um perfil de velocidades uniforme que proporcione a mesma vazão do perfil original. Essa operação é representada pelo fator de correção do perfil de velocidades K e demonstrada na Figura 2.16.

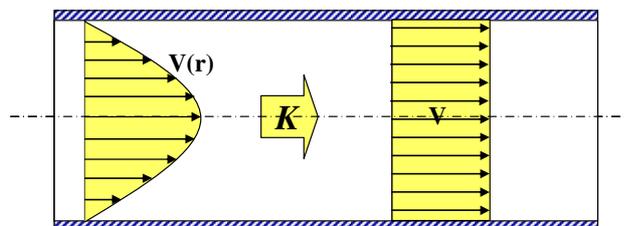


Figura 2. 16 - Representação da transformação do perfil parabólico de velocidades em um perfil uniforme retangular, através do fator de correção

Existem diversas propostas para o fator de correção K , sempre em função do número de Reynolds. No caso do relatório AGA-9 [3], é recomendado o seguinte funcional:

$$K = \frac{1}{1.12 - 0,011 \log(\text{Re})} \quad (2.16)$$

Aliás, é sabido que cada fabricante de medidores de vazão ultra-sônico possui seu próprio fator de correção do perfil de velocidades, embora a incerteza no cálculo

desse parâmetro componha a incerteza total da medição do aparelho.

A Figura 2.17 mostra a diferença entre os perfis de velocidade no escoamento.

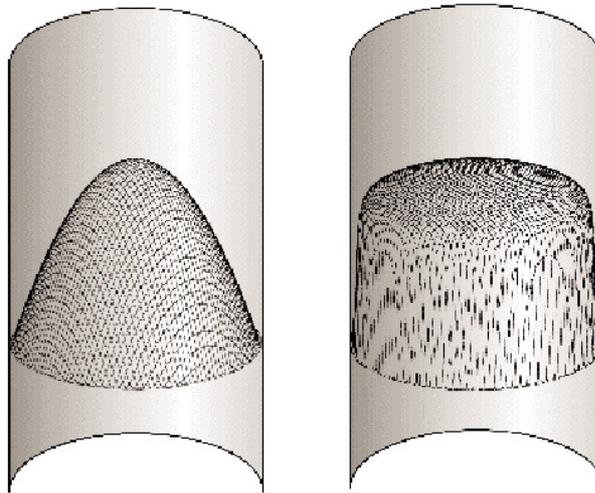


Figura 2.17 - Diferença entre os perfis de velocidade em um escoamento laminar vs. Turbulento

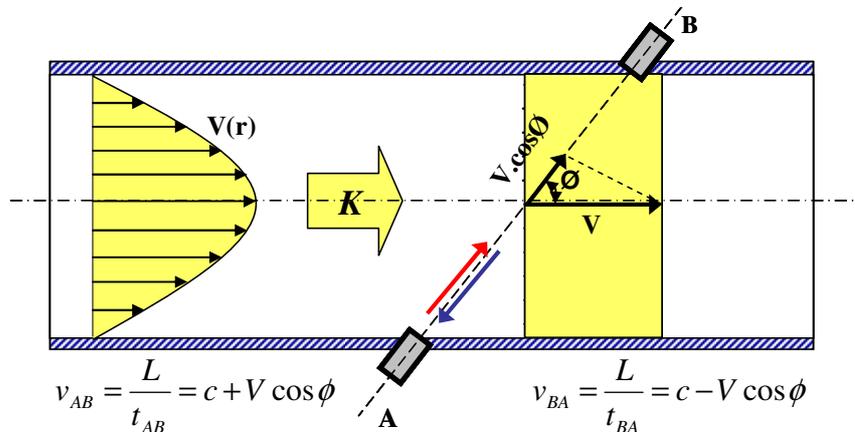


Figura 2.18 - Representação da velocidade do sinal ultra-sônico em relação ao ângulo de instalação dos transdutores

Agora, tratando com um perfil de velocidade constante em todo o diâmetro do duto, a velocidade do sinal ultra-sônico pode ser calculada como o rebatimento da velocidade do escoamento na direção entre os transdutores, conforme mostrado na Figura 2.18.

Nesse caso, a velocidade do sinal ultra-sônico a jusante difere da velocidade a montante pelo fato da primeira ser “carregada” pelo escoamento, enquanto que a segunda deve transitar contra o escoamento.

O sistema algébrico de duas equações (v_{AB} e v_{BA}) e duas incógnitas (c e v), visto na Figura 2.18 é resolvido como:

$$v = \frac{D}{\sin(2\phi)} \left(\frac{t_{AB} - t_{BA}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) \text{ e } c = \frac{L}{2} \left(\frac{t_{BA} + t_{AB}}{t_{BA} \cdot t_{AB}} \right) \quad (2.17a \text{ e } 2.17b)$$

Assim, a velocidade média do escoamento pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$\bar{v} = K \cdot v \quad (2.18)$$

E a vazão volumétrica, obtida através do seguinte produto:

$$Q = \bar{v} \cdot A \quad (2.19)$$

Assim, obtém-se a vazão mássica por:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (2.20)$$

2.6.4 O efeito do escoamento na deformação do sinal ultra-sônico

O efeito do carregamento do sinal ultra-sônico pelo escoamento, tanto a montante quanto a jusante, pode ser visualizado na Figura 2.19. Tal efeito é previsto pela AGA-9 [3] e é essa diferença entre os caminhos acústicos que determina a diferença entre os tempos de trânsito a montante e a jusante.

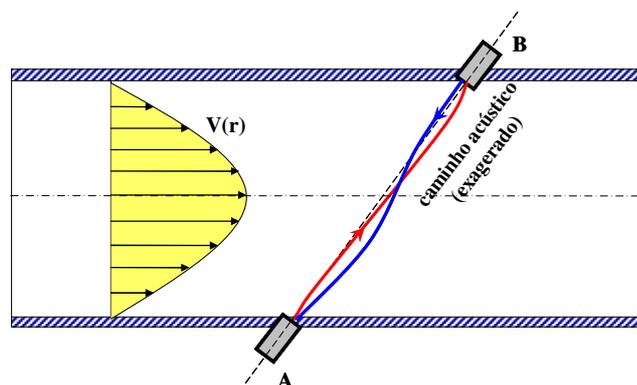


Figura 2. 19 - Efeito de arraste do sinal ultra-sônico no escoamento

2.6.5 Características Normalmente Associadas aos Medidores de Vazão Ultrassônicos

a) Vantagens típicas

- Precisão: pode ser calibrado com erro $<0,3\%$ (não é o caso de medidores em *flare* que alcançam incertezas típicas em torno de 2%);
- Larga faixa de medição: 50:1 ou mais;
- Naturalmente bidirecional, embora alguns não o sejam;
- Boa tolerância a umidade;
- Não intrusivo: não induz perda de carga localizada;
- Robustez e confiabilidade;
- Auto-diagnóstico das condições de operação;
- Baixa manutenção: não possui elementos móveis.

b) Desvantagens típicas

- Custo;
- Componentes eletrônicos e de transmissão de sinais sensíveis;
- Necessidade de pessoal de operação e manutenção altamente especializado:
 - Necessidade de interpretação dos dados;
 - Conhecimento do histórico do aparelho;
 - O serviço de manutenção deixa de ser meramente um “trocador de peças”.

2.6.6 O Auto-Diagnóstico

Esta parte do trabalho toma por base a publicação de Lansing, *et al* [24]. Um dos principais atributos dos medidores de vazão por ultra-som é a habilidade de monitorar a sua própria “saúde”, diagnosticando quaisquer problemas que possam ocorrer. As medidas que podem ser utilizadas para este auto-diagnóstico podem ser classificadas como internas ou externas. No primeiro caso, os indicadores derivam somente das medições internas do medidor. No segundo caso, os indicadores

internos são combinados com parâmetros derivados de fontes independentes para detectar condições de falha. Seguem alguns exemplos de medidas internas utilizadas para o auto-diagnóstico:

a) Ganho

Um dos indicadores mais comuns da “saúde do medidor”. Qualquer acréscimo no ganho indica um sinal fraco. O motivo pode estar associado à deterioração do transdutor, líquidos na linha ou ao acúmulo de sedimentos nos transdutores. Porém, deve-se considerar outros fatores que podem afetar a força do sinal, como pressão e velocidade do fluxo.

Contudo, os medidores de vazão por ultra-som normalmente possuem ganhos suficientes para superar a mais severa redução na força do sinal. Vale ressaltar que a quantidade de acúmulo de sedimentos nos transdutores para que ocorra falha no sinal, deve ser muito significativa, quantidade que geralmente excede as condições de operação da tubulação.

b) Qualidade do sinal

Todos os medidores desenvolvidos enviam diversos sinais de um transdutor para o outro antes de gerar o resultado. Idealmente, todos estes sinais deveriam ser recebidos e utilizados. Porém, alguns dos sinais podem estar distorcidos, fracos, ou podem não atender aos critérios de aceitação estabelecidos para o medidor ultrassônico. Quando isso acontece o sinal é rejeitado, pois podem distorcer os resultados. O nível de rejeição destes sinais geralmente é considerado como um indicador de performance.

Outras causas de rejeição dos sinais incluem ruídos na mesma região que o transdutor opera, excessiva velocidade do fluido em análise, o que causa extrema distorção nos sinais, e contaminação na face do transdutor.

Este parâmetro deve ser monitorado periodicamente. Contudo, monitorando os ganhos, esta condição pode ser identificada antes de se tornar um problema.

c) Razão sinal/ruído

Cada transdutor é capaz de receber informações de ruído originadas de outras fontes. Entre o intervalo de pulsos recebidos, o medidor controla estes ruídos e fornece uma indicação de ruído “de fundo”. Este ruído pode possuir a mesma frequência espectral ultra-sônica da transmitida pelo transdutor.

Esses níveis de ruído podem se tornar excessivos se uma válvula de controle for instalada muito próxima ao medidor e se a diferença de pressão for muito alta. Desta maneira, o medidor pode ter dificuldade em diferenciar o sinal do ruído. Monitorando o nível de ruído, o medidor pode alertar ao usuário se a qualidade do sinal pode ser reduzida.

Todos os medidores podem aceitar algum grau de ruído. Alguns mais que os outros. O mais importante é saber que o melhor momento de lidar com o ruído originado da válvula de controle é durante o projeto.

Há outras fontes que podem causar redução no sinal devido ao ruído, como: aterramento pobre, conexões elétricas de má qualidade entre equipamentos e transdutores, contaminação dos transdutores, etc. Porém, a maior razão para uma redução na razão sinal/ruído se dá devido a quedas de pressão de válvulas de controle.

Sendo assim, grandes quedas de pressão proporcionadas por válvulas de controle podem causar interferência na operação do medidor. Caso o ruído seja controlado, a possível causa de um mau funcionamento no medidor não está relacionada a válvula de controle.

d) Perfil de velocidade

O monitoramento do perfil de velocidade é possivelmente um dos recursos mais negligenciados nos medidores ultra-sônicos atuais. Esse recurso pode fornecer várias pistas das condições do sistema de medição.

Depois de instalado, é importante coletar o perfil de velocidades para servir como

parâmetro de comparação (*baseline*). Um bom projeto da estação de medição fornece um perfil relativamente uniforme. O perfil coletado poderá ser útil caso a performance do medidor seja questionada posteriormente.

O mais importante é conseguir um perfil de velocidades relativamente constante. Qualquer problema que ocorra na linha produzirá uma variação nas velocidades, que será facilmente detectada quando comparada com o *baseline*.

Vários problemas podem impactar no perfil de velocidades, como: bloqueio parcial de um condicionador de fluxo, danificações no mesmo, mudanças nas condições da tubulação (acidentes de linha), etc.

Os medidores de vazão por ultra-som atuais conseguem lidar com alguns níveis de assimetria no perfil de velocidades.

e) Velocidade do som

Provavelmente a ferramenta de diagnóstico mais usada e discutida. Ela se baseia na diferença entre a velocidade do som medida pelo aparelho e aquela estimada por equações de estado termodinâmicas.

Existem alguns fatores que podem afetar a leitura da velocidade do som, como: composição do gás ou variações na temperatura e na pressão.

Resumindo, esta ferramenta pode ser considerada a mais promissora para o usuário no que se refere ao auto-diagnóstico. A comparação entre as velocidades coletadas e as calculadas pelas equações de estado é uma importante ferramenta de manutenção.

3 Incerteza de Medição e Acidentes de Linha

3.1 Sobre as Fontes de Incerteza

Ramos [2] implementou análise criteriosa das fontes de incerteza na medição de vazão ultrassônica por tempo de trânsito. Em resumo, as fontes de incerteza poderiam dizer, em tese, respeito:

a) Às condições de instalação, a saber:

- correto alinhamento dos transdutores ultrassônicos;
- correta distância dos transdutores ultrassônicos;
- posicionamento tal que a aplicação do fator K seja adequada ao perfil de velocidade real do escoamento.

b) Às condições de operação, a saber:

- condições de limpeza dos transdutores ultrassônicos;
- condições de comunicação dos transdutores ultrassônicos.

c) Às condições de configuração, a saber:

- compatibilidade entre o fluido real e fluido de configuração do medidor;
- correta alimentação de pressão e temperatura.

Ramos [2] tratou também das correlações entre as diversas variáveis que podem influenciar a incerteza de medição e chegou à conclusão de que, durante o processo de medição:

- a variação aleatória do posicionamento dos transdutores é desprezível;
- a variação aleatória do alinhamento dos transdutores é desprezível;
- a variação aleatória da composição do fluido é desprezível.

Assim, duas variáveis se tornam muito importantes na determinação da incerteza da medição de vazão por tempo de trânsito, a saber:

- a variação aleatória do perfil de escoamento por causa da turbulência, que pode ser levada em conta através da consideração de uma incerteza associada ao fator de correção K ;
- a variação aleatória dos tempos de trânsito, que tem a ver com a robustez do sistema de medição destes tempos.

Ramos [2], após avaliações paramétricas da incerteza de medição, concluiu:

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 de correção. À medida que a diferença dos tempos de trânsito se aproxima da incerteza absoluta dos próprios tempos, a incerteza da velocidade passa a ser dominada pela incerteza dos tempos de trânsito. (RAMOS-2006, p. 55).

Estipula também a velocidade a partir da qual a incerteza de medição é dominada pela incerteza dos tempos de trânsito, apontando:

$$\tilde{v} = \frac{\sqrt{2 \frac{\Delta k}{k} \cdot L^2 + 4c^2 \cdot \Delta t^2} - L \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\Delta k}{k}}{2 \cdot \Delta t \cdot \cos \phi} \quad (3.1)$$

onde:

\tilde{v} : velocidade de escoamento a partir da qual a incerteza $\frac{\Delta k}{k}$ é preponderante em

relação a $\frac{\Delta t}{t}$

$\frac{\Delta k}{k}$: incerteza relativa do fator de correção k

Δt : incerteza absoluta dos tempos de trânsito

L : Distância entre os transdutores

ϕ : ângulo entre as visada direta (reta que vai de um transdutor a outro) e a direção principal do escoamento

3.2 Sobre a Incerteza do Fator de Correção

Outro aspecto que merece atenção diz respeito à Equação 2.17a, que calcula a velocidade do pulso sônico relacionada ao escoamento, porém a partir da informação em apenas uma posição.

Para se obter a velocidade média do escoamento, que multiplicada pela área resulta na vazão, Equação 2.19, torna-se necessário pressupor o conhecimento do perfil de velocidades, que é assumido ser turbulento e completamente desenvolvido. As relações mais genéricas que governam a interação entre a onda ultra-sônica e o escoamento no qual ela se desloca são as seguintes [29] e [30].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{e}}{c + \vec{V} \cdot \vec{e}} \right) = - \frac{\nabla c + e_x \cdot \nabla u_x + e_y \cdot \nabla u_y + e_z \cdot \nabla u_z}{c + \vec{V} \cdot \vec{e}} \quad \text{e} \quad \frac{d\vec{s}}{dt} = c \cdot \vec{e} + \vec{V} \quad (3.2)$$

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 (Equação 3.2) 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 fluxo é unidirecional e de módulo constante. Nestas condições a frente de onda segue, portanto, uma reta, isto é, o ângulo ϕ mostrado na Figura 3.1 é constante ao longo de todo o caminho acústico, permitindo escrever as equações que tratam do cálculo da velocidade de escoamento e da velocidade do som, a saber:

$$c + v \cdot \cos \phi = \frac{L}{t_{12}} \quad \text{e} \quad c - v \cdot \cos \phi = \frac{L}{t_{21}} \quad (3.3)$$

Nota-se que o caminho acústico se desvia de uma reta no caso da ocorrência de uma ou ambas condições seguintes:

- a velocidade do som varia ao longo do fluxo ($\nabla c \neq 0$);
- 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 3.2 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 3.1, que apresenta um perfil de velocidade de fluxo 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.

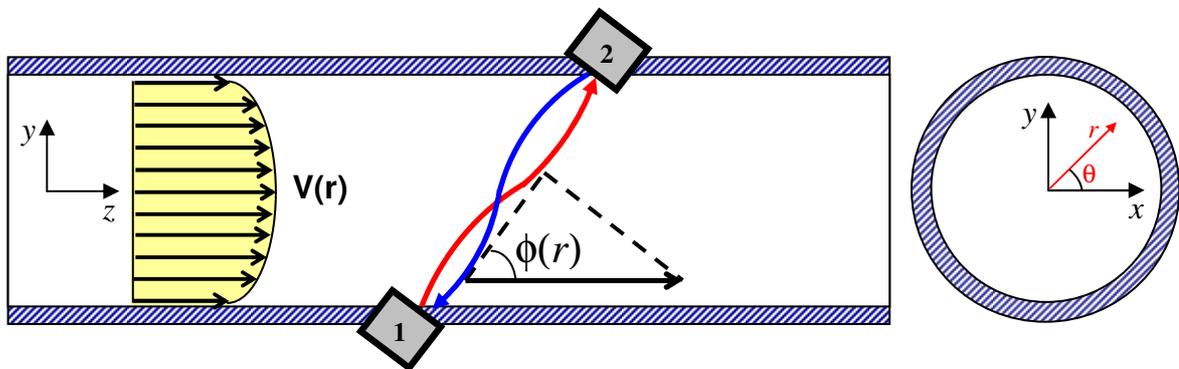


Figura 3. 1 - Efeito de arrasto do sinal ultra-sônico pelo escoamento

Neste caso as Equações 3.2 tomam a seguinte forma [29]:

$$\frac{d\phi}{dt} = -\cos^2 \phi \cdot \frac{d}{dr} [v(r)] \quad (3.4)$$

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 3.2 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 fluxo, o deslocamento lateral é praticamente nulo.

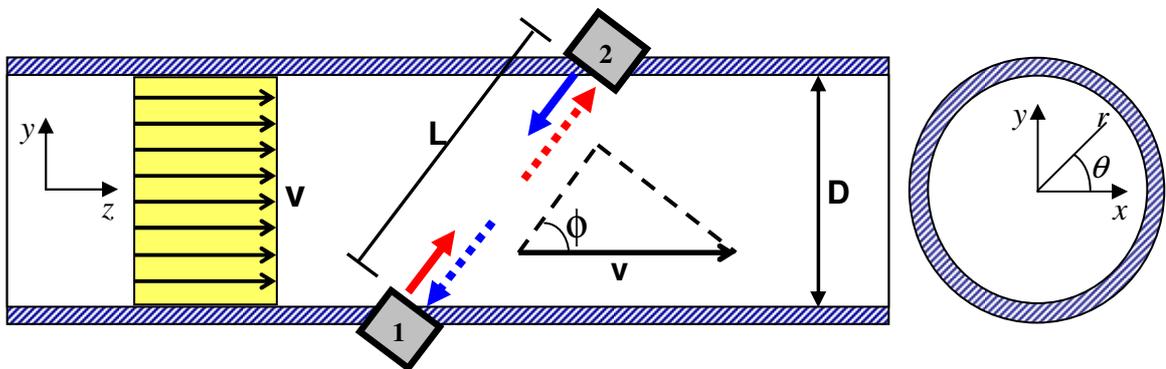


Figura 3. 2 - Efeito de arrasto do sinal ultra-sônico pelo escoamento em um fluxo uniforme

É possível construir um algoritmo simples, como também fez Ramos [2] para a computação numérica do perfil acústico. A integração é feita de forma acoplada, tanto no tempo como no espaço e leva em conta as seguintes hipóteses:

- Velocidade do som constante tanto no espaço quanto no tempo;
- Velocidade do escoamento unicamente na longitudinal do duto, embora variável ao longo do raio no corte longitudinal considerado;
- Perfil completamente desenvolvido, isto é, o perfil de velocidades está estabilizado.

Assim é possível obter o caminho acústico no plano selecionado de forma não muito trabalhosa. O plano do caminho acústico é o plano $y-z$. A forma mais genérica do perfil de velocidade deve levar em consideração sua variação nas coordenadas longitudinal (x) transversais ($y-z$). As coordenadas transversais podem também ser representadas na forma polar, pela coordenada radial (r) e pela coordenada transversal propriamente dita (ângulo ϕ).

Considere-se que, apesar da não uniformidade do perfil de velocidade, como exemplificado na Figura 19, o caminho acústico não se desvia sensivelmente da reta que une os dois transdutores. Isto equivale a dizer que, apesar da não uniformidade, o ângulo formado pela frente de onda e pela linha longitudinal do duto é igual à inclinação da linha que une os transdutores com relação à mesma longitudinal. Assim, computar os tempos de trânsito com a hipótese de velocidade constante equivale à substituição do perfil de velocidade pela velocidade média naquele caminho, o que, considerando que a velocidade média do escoamento no caminho a jusante e a montante são iguais, é expresso matematicamente pelas relações:

$$L = \int_0^{t_{12}} (c + v \cdot \cos \phi) \cdot dt = (c + \bar{v}_D \cdot \cos \phi) \cdot t_{12}, \text{ a jusante} \quad (3.5)$$

$$L = \int_0^{t_{21}} (c - v \cdot \cos \phi) \cdot dt = (c - \bar{v}_D \cdot \cos \phi) \cdot t_{21}, \text{ a montante} \quad (3.6)$$

onde o termo \bar{v}_D indica a velocidade média, na direção longitudinal do duto, ao longo do caminho acústico. 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 .

O sistema formado pelas Equações 3.5 e 3.6 é o mesmo da Equação 3.2, de forma que a velocidade calculada pela expressão

$$v = \frac{L}{2 \cos \phi} \cdot \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) = \frac{L}{2 \cos \phi} \cdot \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} \cdot t_{21}} \quad (3.7)$$

é a velocidade média do fluxo, na direção longitudinal, ao longo do caminho acústico. O termo \bar{v}_D é expresso por

$$\bar{v}_D = \frac{1}{D} \int_D v(r) \cdot dr \quad (3.8)$$

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

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

$$\bar{v}_A = \frac{1}{A} \iint_A v(r) \cdot dA \quad (3.9)$$

Um perfil de velocidade uniforme implica que a velocidade média calculada sobre o diâmetro, sobre a área transversal ou sobre qualquer outro caminho tem sempre o mesmo valor numérico. O mesmo não ocorre quando o perfil de velocidade não é uniforme. Quanto isto ocorre, para que se obtenha a velocidade média sobre a seção transversal do duto a partir da equação 3.7, é necessário corrigi-la adequadamente. Faz-se isto aplicando um fator de correção como abaixo.

$$\bar{v}_A = k \cdot v, \text{ com } k = \frac{\iint_A v(r) dA}{\int_D v(r) dr} \quad (3.10)$$

onde v é a velocidade computada pela Equação 3.7. De forma mais genérica, tem-se:

$$\bar{v}_A = k \cdot v, \text{ com } k = \frac{\iint v(r, \theta, x) dA}{\int_L v(r, \theta, x) d\ell} \quad (3.11)$$

A Equação 3.11 termina por revelar a natureza da incerteza associada ao fator de correção k . É que, dependendo da turbulência, o perfil estará longe de ser considerado constante ao longo do tempo e do espaço, mesmo durante o curto espaço de tempo em que dura a medição. A questão passa a ser, portanto, probabilística. Obviamente poder-se-á dizer que existe um perfil médio, o qual será adotado para determinada condição de escoamento, principalmente:

- fixadas as condições dinâmicas do escoamento, notadamente o número de Reynolds;
- fixadas as condições que permitem um perfil médio mais estável ao qual se possa associar um fator de correção médio.

Com base nas duas condicionantes anteriores, os fabricantes de medidores ultrassônicos têm fixado fatores de correção em função do número de Reynolds, desde que sejam observadas certas restrições de trecho reto entre o ponto de fixação do medidor e o acidente de linha mais próximo.

O perfil de Hinze é, de fato, um perfil teórico baseado na lei de potência. Nada impede, todavia, que o fator de correção seja proposto com base em outros modelos, levantamentos experimentais ou combinação de ambos. Por isto existem diversas proposições para fatores de correção diretamente em função do número de Reynolds, alguns dos quais foram reportados por Gol'tsov [31]. Apenas por comodidade, marcamos os modelos propostos por índices, sendo o índice nulo correspondente ao modelo exato de Hinze, expresso pela Equação 3.12, cujo perfil pode ser observado na Figura 15.

$$v(r) = v_0 \left(1 - \left|\frac{r}{R}\right|\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.12)$$

Onde:

V_0 : Velocidade no centro da tubulação

R: Raio máximo

r: Coordenada radial

n: Constante dependente do número de Reynolds

São eles:

$$\left. \begin{aligned} k_0 &= \frac{2n}{1+2n} \\ k_1 &= 0.873 + 0.0157 \cdot \log(\text{Re}) - 0.0004 \cdot \log^2(\text{Re}) \\ k_2 &= \left[1 + 0.01 \cdot \sqrt{6.25 + 431 \cdot \text{Re}^{-0.237}}\right]^{-1} \\ k_3 &= \left[1.125 - 0.0115 \cdot \log(\text{Re})\right]^{-1} \\ k_4 &= 0.889 + 0.0091 \cdot \log\left[\text{Re} + 0.0001 \cdot \log^2(\text{Re})\right] \\ k_5 &= \left[1.119 - 0.011 \cdot \log(\text{Re})\right]^{-1} \\ k_6 &= 0.889 + 0.009 \cdot \log(\text{Re}) + 0.0001 \cdot \log^2(\text{Re}) \\ k_7 &= \left[1.125 - 0.0115 \cdot \log(0.94 \text{Re})\right]^{-1} \\ k_8 &= 0.89 + 0.01 \cdot \log(\text{Re}) \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

A Figura 3.3 compara cada fator de correção da Equação 3.13. A diferença máxima entre os coeficientes previstos pelas expressões é, para escoamento turbulento, inferior a 3%, não ultrapassando 1.3 % para $Re \geq 10^4$. Nota-se, particularmente, que os fatores expressos por k_4 , k_7 e k_8 apresentam uma convergência mais estreita ainda.

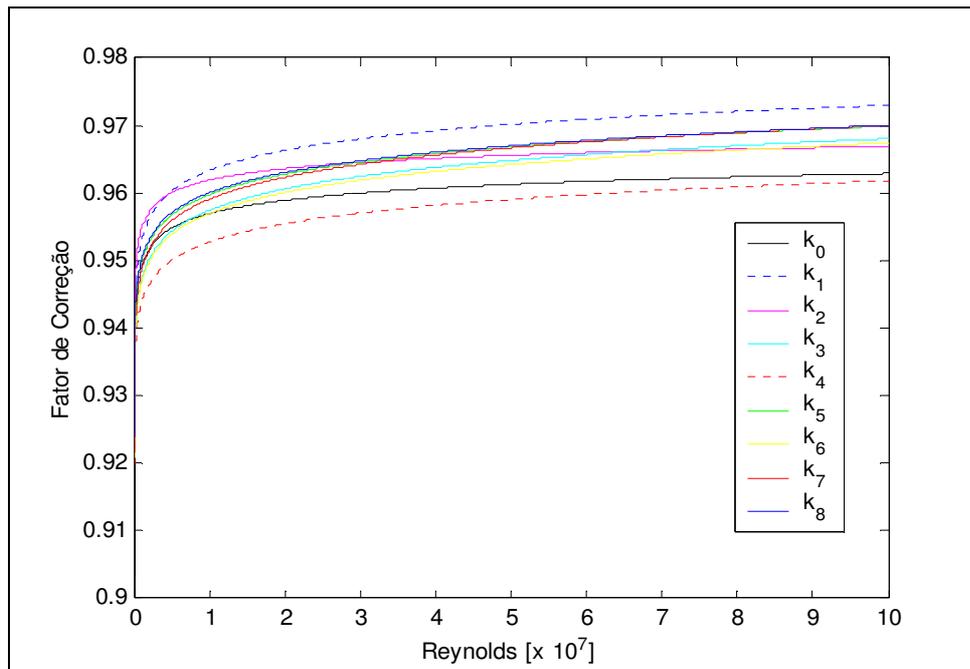


Figura 3. 3 - Fator de correção em função do número de Reynolds, segundo diversas propostas [2].

A própria gama de propostas para a adequação do fator, ainda que apenas para o modelo de Hinze, já indica a necessidade de associar a ele uma incerteza. O problema se torna ainda maior quando, por razões de restrição da planta, as variações do perfil de velocidade possam implicar maior variabilidade das medições.

Considere-se, por exemplo, que, por restrições da planta, o medidor não possa ser instalado de modo a obedecer a distância mínima pedida até ao acidente de linha mais próximo. Seja este acidente, por exemplo, uma curva. É de esperar que:

- O perfil de velocidade seja modificado em relação a um perfil completamente desenvolvido, gerando um fator de correção real diferente daquele calculado para as hipóteses de aplicação do medidor;
- A turbulência induzida pelo acidente de linha aumenta a variabilidade do perfil de velocidade em torno de seu perfil temporal médio.

A primeira consequência gera um erro sistemático e sua correção só pode ser feita através de novos estudos ou de uma comparação com uma referência rastreável. A segunda consequência, porém, diz respeito à incerteza do fator de correção e esta deve ser incorporada à incerteza final ainda que, porventura, o medidor sofresse a correção do erro sistemático apontado.

Neste ponto fica clara a importância do trabalho cujo desenvolvimento ora se apresenta. Consideremos, por exemplo, uma plataforma de produção de petróleo e gás natural. Uma planta como esta sofre sérias restrições no que respeita à observância de trechos retos longos, especialmente para tubulações de maior diâmetro. Nem sempre é fácil modificar a planta para a instalação dos medidores. Isto não significa, todavia, que a aplicação dos medidores deve ser simplesmente descartada, mesmo porque existem grandes vantagens que justificam sua escolha. O que se deve é desenvolver estudos que dêem base à sua utilização, seja:

- Pela correção do erro sistemático introduzido, o que exige a avaliação deste erro;
- Pela correção da incerteza associada ao fator de correção, o que exige a avaliação desta incerteza.

A correção do erro sistemático não era, desde a proposição do projeto de pesquisa, alvo do trabalho desta dissertação, devendo ele concentrar-se na avaliação da incerteza associada ao fator de correção no bojo de determinado conjunto de acidentes de linha. Por restrições enfrentadas durante os experimentos, este trabalho não pode avançar na determinação da incerteza, mas foi possível inferir algumas interferências dos acidentes de linha na variabilidade das medidas. Vale ressaltar que esta variabilidade está intrinsecamente relacionada à incerteza de medição.

3.3 Sobre os Acidentes de Linha Analisados neste Trabalho

Como dito na seção anterior, não será feita uma análise da incerteza do fator k propriamente dita. No entanto, através de experimentos controlados será avaliada a variabilidade da medição de vazão ultrassônica. A Figura 3.4 ilustra esquematicamente o processo, no qual o medidor **M** é posicionado à distância d do

acidente de linha **A**, à montante dele.

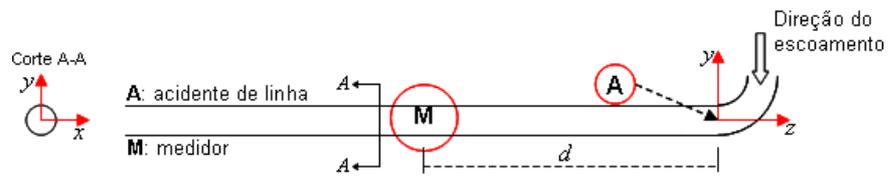


Figura 3.4 - Desenho esquemático do processo

Os acidentes de linha podem ser assim descritos (Figuras 3.5 a 3.8):

A1) Arranjo 1 - Trecho reto

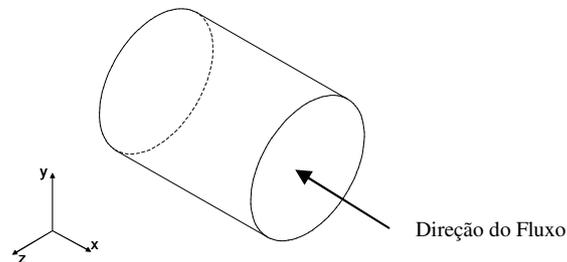


Figura 3.5 - Desenho esquemático do Arranjo 1

A2) Arranjo 2 – Duas curvas de 90° (raio de curvatura: 56,55mm) em planos ortogonais

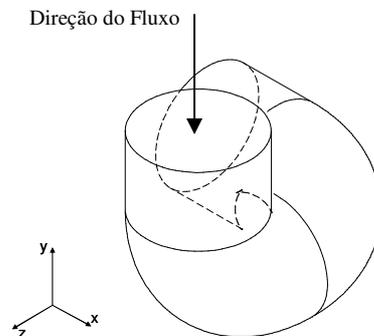
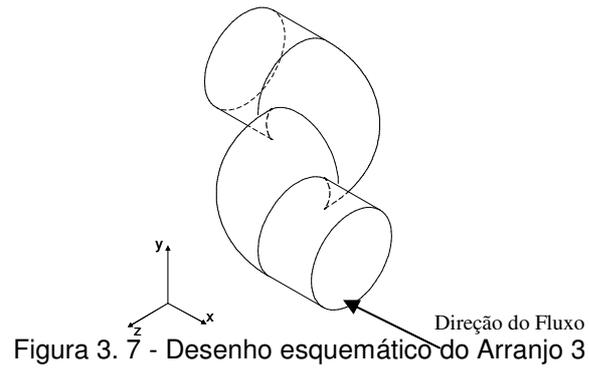


Figura 3.6 - Desenho esquemático do Arranjo 2

A3) Arranjo 3 – Duas curvas de 90° (raio de curvatura: 56,55mm) em planos iguais



A4) Arranjo 4 – Uma curva de 90° (raio de curvatura: 56,55mm)

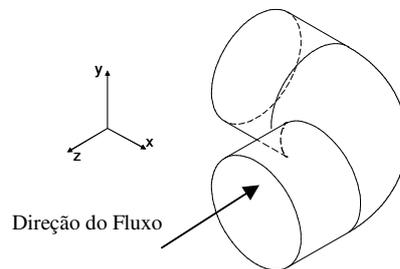


Figura 3. 8 - Desenho esquemático do Arranjo 4

Um conjunto de experimentos avaliará a interferência dos acidentes de linha descritos na variabilidade da medição ultrassônica de vazão, como será descrito no próximo capítulo.

4 Sobre o Estudo Experimental da Variabilidade da Medição para Alguns Acidentes de Linha

4.1 Sobre o Aparato Experimental

Para a realização dos experimentos, foi montada, no túnel de vento existente no Laboratório de Dinâmica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica, uma tubulação de PVC de acordo com o diagrama esquemático mostrado na Figura 4.1, estando a descrição dos elementos na Tabela 4.1.

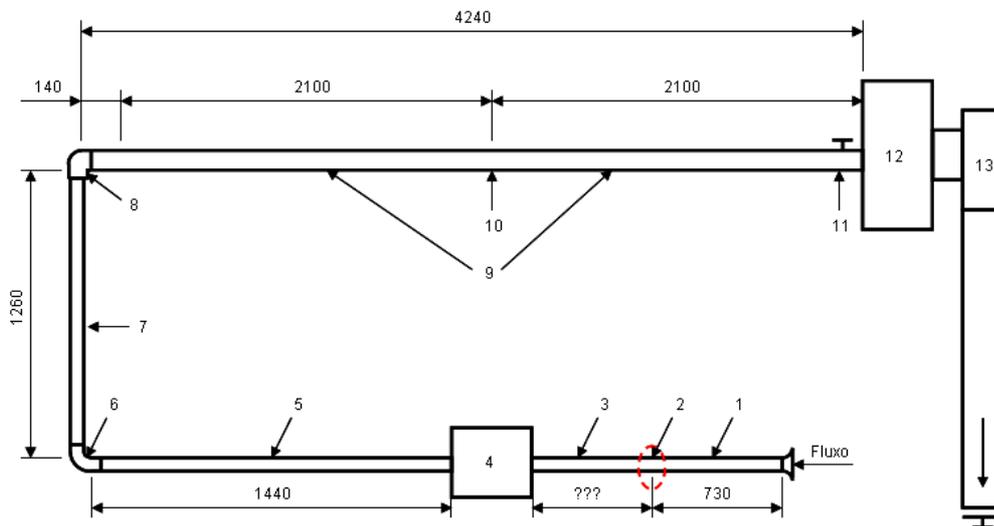


Figura 4. 1 - Diagrama esquemático do túnel de vento

Tabela 4. 1 - Descrição dos elementos indicados na Figura 4.1

Nº	Descrição
1	Trecho reto de entrada: tubo PVC DN75, comprimento 730 mm (10D)
2	Acidentes de linha conforme indicado no capítulo 3 e detalhado logo após esta tabela.
3	Trecho reto a montante do medidor ultrassônico, tubo PVC DN75, comprimento 5D a 20D
4	Medidor de vazão ultrassônico MEVUS-75 – DN75, 1 canal acústico.
5	Trecho reto a jusante do medidor ultrassônico, tubo PVC DN75, comprimento 1440 mm
6	Curva 90° (DN 75 SN NBR 5688)
7	Trecho reto, tubo PVC DN75, comprimento 1260 mm (17,5D)
8	Joelho 90°
9	Trecho reto, tubo PVC RIG 3 NT 0617, diâmetro interno 78,5 mm, comprimento 4240 mm
10	Tubo de Pitot (projeto inicial, que teve de ser abandonado durante os experimentos)
11	Válvula gaveta 125 S, 200 WOG – 3"
12	Plenum
13	Soprador WEQ tipo limit load, compressor de 7,5 HP, 1740 rpm

Os acidentes de linha indicados no item de número 2 do diagrama esquemático da Figura 4.1 são os seguintes, apresentados na Figura 4.2:

A1: Ausente (veja figura)

A2: 2 curvas 90° em planos ortogonais (DN 75 SN NBR 5688)

A3: 2 curvas 90° no mesmo plano (DN 75 SN NBR 5688)

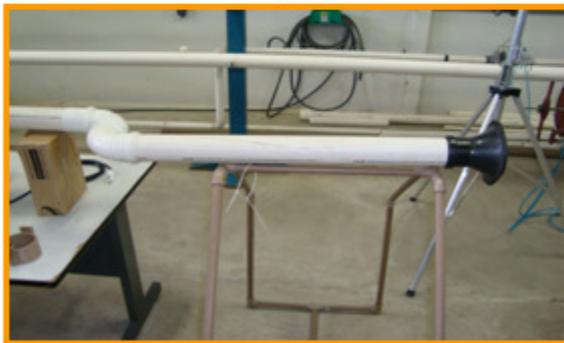
A4: 1 curva 90° (DN 75 SN NBR 5688)



(A1)



(A2)



(A3)



(A4)

Figura 4. 2 - Fotos dos acidentes de linha aplicados no estudo experimental

4.2 Sobre o Tubo de Pitot

Com o objetivo de possuir uma referência para o medidor de vazão por ultra-som – MEVUS, um tubo de Pitot foi instalado a aproximadamente $25,5D$ a jusante do acidente de linha 8.

A norma ISO 3966 [32] define os elementos e dimensões de um tubo de Pitot estático e os procedimentos a serem adotados para avaliar a vazão em um duto através das estimativas de velocidades locais obtidas por leituras de diferenças de

pressão. A forma preconizada que mais se adéqua ao modelo disponível ITMP 120 da KIMO é visualizada na Figura 4.3, que corresponde à Figura A.2 da norma.

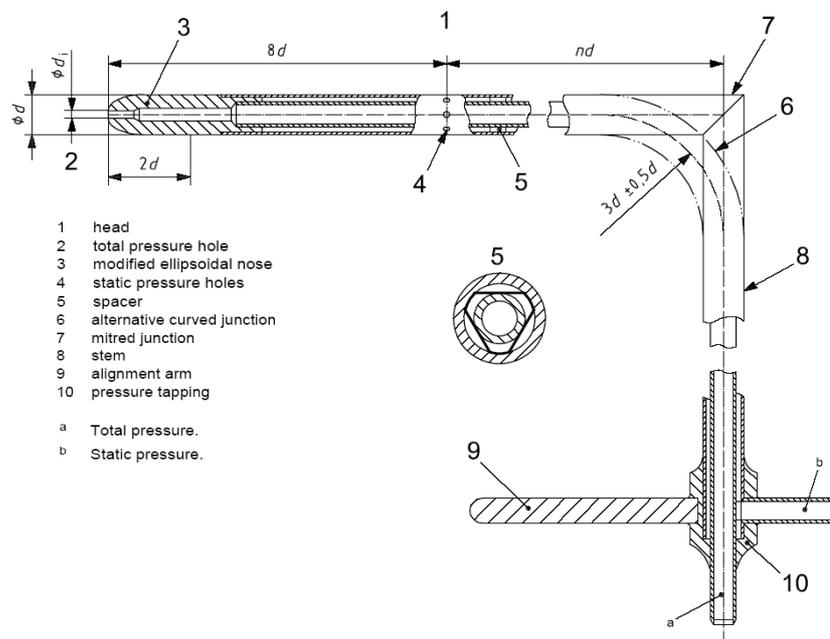


Figura 4. 3 - Geometria e elementos de um tubo de Pitot de nariz elipsóide segundo ISO 3966 [32]

Um levantamento dimensional do Pitot foi executado pelo Laboratório de Metrologia da UFES, em condições controladas de temperatura e com medidores rastreados, conforme consta no Relatório de Medição no. 48/2009 – ANEXO A. Os dados foram transcritos para a planilha da Tabela 4.2 e a verificação de conformidade dimensional com a norma encontra-se na Tabela 4.3. Como pode ser observado, dois itens não estão em conformidade.

Tabela 4. 2 - Levantamento dimensional do tubo de Pitot ITMP 120 da KIMO

Item	Elemento	Dimensão [mm]	Símbolo
1	Diâmetro da cabeça	6,00	d
2	Diâmetro da haste	6,00	d'
3	Extensão da haste	300,00	Lhaste
4	Extensão da cabeça	96,00	Lcabeça
5	Extensão do nariz	15,00	Lnariz
6	Furos de pressão estática:		
6.1	Diâmetro dos furos	2,00	Dfuro
6.2	Quantidade	6	Nfuro
6.3	Distância do topo do nariz	48,00	-
6.4	Distância até o eixo da haste	48,00	-
7	Raio entre cabeça e haste	18,00	R
8	Braço de alinhamento	Não existe	-

Tabela 4. 3 - Verificação conformidade geométrica tubo de Pitot ITMP 120 da KIMO (ISO 3966)

Item	Elemento	Símbolo	Localização na ISSO 3966/2008	Valor recomendado	Mod. ITPM 120	Verificação de conformidade
1	Tubo de Pitot	-	Appendix A	-	NPL com nariz elipsoidal modificado	Conforme
2	Extensão da haste	Lhaste	-	-	-	-
3	Extensão da cabeça	Lcabeça	5.1	15d - 25d	16d	Conforme
4	Extensão do nariz	Lnariz	Appendix A	= 2d	2,5d	Não-conforme
5	Furos de pressão estática:					
5.1	Diâmetro dos furos	Dfuro	5.2-d-1	≤ 1,6 mm	1,0 mm	Conforme
5.2	Quantidade	Nfuro	5.2-d-2	≥ 6	6	Conforme
5.3	Distância do topo do nariz	-	5.2-d-3	≥ 6d	8d	Conforme
5.4	Distância até o eixo da haste	-	5.2-d-4	≥ 8d	8d	Conforme
6	Raio entre cabeça e haste	R	5.2-f	= (3±0,5)d	3d	Conforme
7	Braço de alinhamento	-	5.2-g	Existe	Não existe	Não-conforme

4.2.1 Justificativa da Utilização Inicial do Tubo de Pitot e de sua Exclusão

A escolha do tubo de Pitot como referência, se deve ao fato de seu coeficiente de descarga se aproximar de 1 (um), ou seja, o valor lido por ele é muito próximo do valor real. Porém, de acordo com a norma ISO 3966 [32], o coeficiente de descarga do tubo de Pitot somente pode ser considerado igual a 1 (um) entre dois limites de velocidades. A velocidade mínima é limitada pelo número de Reynolds ($Re = 200$). Já a velocidade máxima, devido à compressibilidade, é limitada pelo número de Mach ($Ma = 0,25$).

Além disso, testes realizados em outra tubulação presente no laboratório apresentaram resultados satisfatórios quanto à variabilidade da medição, o que também levou a utilizá-lo como possível referência para este trabalho.

Ao calcular a velocidade mínima e máxima para um diâmetro médio de 75 mm, observa-se um grande intervalo de velocidade onde o coeficiente pode ser adotado como 1 (um). Para este diâmetro, a velocidade pode variar de 0,047 m/s a 86,96 m/s. O que o torna apto para diversos tipos de aplicações.

Porém, a Tabela 4.4 informa outra não-conformidade em relação à norma: a relação entre o diâmetro do Pitot (d) e o diâmetro da tubulação (D).

Tabela 4. 4 - Cálculo da relação d/D

Diâmetro Nominal	Diâmetro Interno	Diâm. Pitot/Diâm. Duto (d/D)	Satisfaz a norma? (d/D) _{max} = 0,04	V _{min} [m/s] (limitada por Re)	V _{max} [m/s] (limitada por Ma)	Q _{min} [m ³ /h]	Q _{max} [m ³ /h]	
75	mm	75 mm	0,0800	não	0,0425	86,96	0,68	1383,08
8	pol	185 mm	0,0324	não	0,0172	86,96	1,67	8415,27
12	pol	290 mm	0,0207	não	0,0110	86,96	2,62	20678,56
16	pol	364 mm	0,0165	sim	0,0088	86,96	3,28	32578,21
20	pol	435 mm	0,0138	sim	0,0073	86,96	3,92	46526,77

Com a montagem completa (Pitot e MEVUS), diversas aquisições foram realizadas, a fim de obter o perfil de velocidades através do tubo de Pitot. Todas as aquisições foram feitas com um trecho reto de montante da medição por ultra-som de 10D e com as 4 variações de acidentes de linha (item 2).

Para a obtenção do perfil de velocidades, o Pitot percorreu o interior do tubo de Ø78,5 mm, monitorando a velocidade do escoamento em diversas posições. De posse dos resultados – Apêndice B – observou-se uma variabilidade nas leituras de pressão acima de qualquer expectativa. Variabilidade essa, que inviabilizou a utilização do Pitot em questão como referência para o experimento.

A instalação experimental foi revisada a fim de se determinar se existiriam causas externas de uma variabilidade tão alta, a saber:

- Processo não controlado, isto é, verificar se o escoamento estava ocorrendo em processo não estacionário;
- Influências externas sobre o medidor, tais como vibrações excessivas, que levassem a leituras errôneas.

Procedidas as verificações, foram descartadas tais hipóteses. Provavelmente o tubo de Pitot está com uma sensibilidade muito elevada, fazendo que variações muito pequenas no processo levem a uma variação muito grande na resposta do Pitot.

Não foi possível configurar o Pitot, na instalação utilizada, para apresentar resposta compatível com o nível de incerteza de seu certificado de calibração. Por outro lado, o medidor ultrassônico descartava a hipótese de um processo não estacionário que justificasse uma variabilidade tão alta para o Pitot, cuja especificação indicava menor

incerteza que o próprio medidor ultrassônico. A utilização do Pitot como referência teve de ser descartada.

4.3 Sobre o Medidor Ultrassônico Utilizado

O MEVUS-75, cuja foto é apresentada na Figura 4.4, é um medidor de vazão de gás por ultrassom por tempo de trânsito. É fornecido em uma estrutura monobloco, bastando ao usuário conectá-lo à linha de gás e a um ponto de energia elétrica. O *spool* de medição é construído em PVC e os sensores em alumínio, conferindo ao MEVUS-75 alta resistência aos agentes oxidantes mais comuns. A conexão padronizada tipo bolsa com anéis de vedação proporciona uma instalação fácil, rápida e de qualidade. O *MEVUS-75* possui mostrador digital, onde podem ser visualizados até 4 (quatro) dados instantâneos, de forma simultânea ou alternada. O *MEVUS-75* possui entradas analógicas que podem ser utilizadas para medição simultânea de pressão e temperatura do fluido, permitindo a correção da medida para condições-padrão. Também permite comparação simultânea com outros medidores de vazão. É fornecido com um módulo de aquisição de dados integrado.

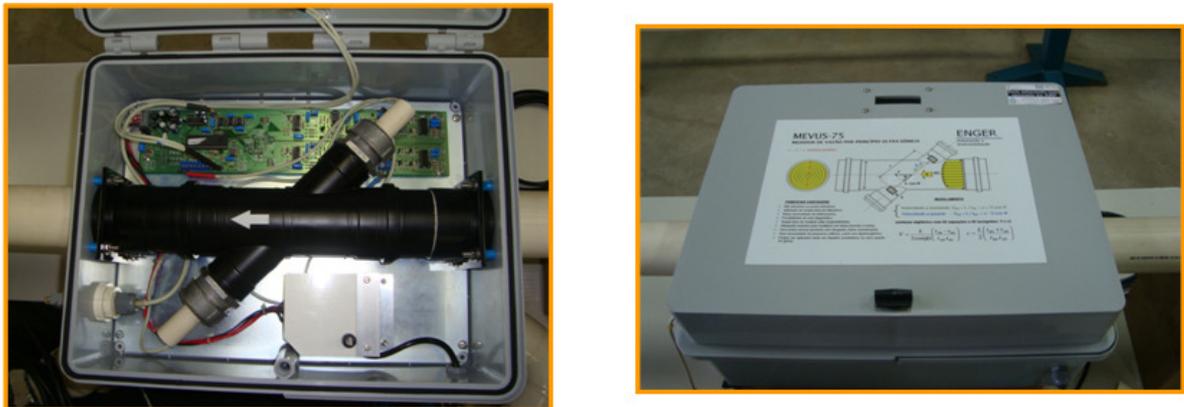


Figura 4. 4 - Medidor de vazão por ultra-som (MEVUS)

Principais características:

- Princípio: medição ultrassônica por tempo de trânsito
- Fluido: ar
- Range: 1:20
- Temperatura do fluido: 5 °C a 50 °C
- Diâmetro da tubulação: 75 mm nominal, 72 mm interno.
- Vazão máxima: 200 m³/h
- Pressão máxima: 1,4 BarA

- Freqüência de amostragem máxima de 1 Hz.

4.3.1 Módulo de Visualização e Aquisição de Dados – *MODATA*

O *MODATA* foi desenvolvido especificamente para armazenamento e visualização de dados referentes à medição de vazão. Possui entradas analógicas que podem ser utilizadas para medição simultânea da vazão, pressão e temperatura do fluido, permitindo a correção da medida para condições-padrão. Além disso, possibilita a comparação simultânea de vazão entre medidores. O *MODATA* é fornecido com *firmware* que permite sua utilização para diferentes princípios de medição, como o tubo de Pitot e o MEVUS. O *MODATA* possui mostrador digital, onde podem ser visualizados até quatro dados instantâneos, de forma simultânea ou alternada, previamente definidos pelo cliente.

Principais características:

- 4 entradas analógicas padronizadas;
- 2 portas de comunicação serial;
- Relógio de tempo real;
- Memória de 32 kBytes;
- 1 entrada de pulso;
- 1 mostrador digital;
- Resolução: 0,1% do fundo de escala;
- Freqüência de amostragem: 1 Hz max.

Acessórios:

- 1 fonte de alimentação;
- 1 cabo de comunicação serial;
- 1 sensor de temperatura (semicondutor).

A Figura 4.5 constitui de uma foto ilustrativa do MODATA.

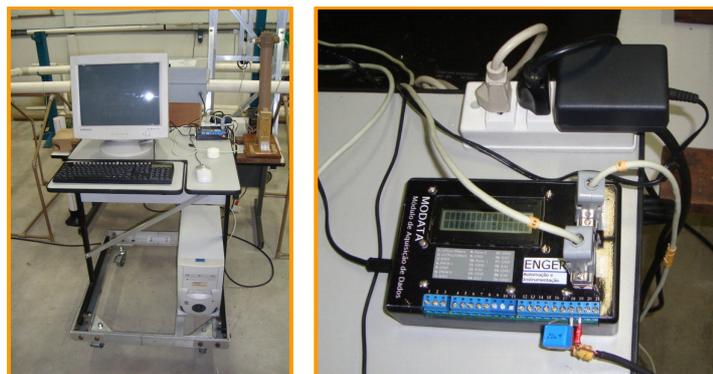


Figura 4. 5 - Foto ilustrativa do sistema de aquisição MODATA

4.3.2 Software de interface padrão Windows® - FLOWVIEW

O FLOWVIEW é a versão do software padrão Windows® desenvolvido especificamente para o MODATA. O FLOWVIEW é uma poderosa ferramenta de configuração e parametrização que permite ao usuário escolher e ajustar o modo de cálculo ao que melhor represente o escoamento monitorado por determinado elemento primário. Com o FLOWVIEW é possível associar cada entrada do MODATA a um dos modos de cálculo disponíveis, ajustar condições padrão de pressão e temperatura, composição do gás do escoamento, períodos de amostragem, unidades de medida, além de realizar a exportação e visualização dos dados armazenados. Com o FLOWVIEW todas as configurações, parametrizações, coeficientes e associações ficam eletronicamente registrados, minimizando a possibilidade de erros de registro e interpretação. As principais características do FLOWVIEW são:

Visualização de dados de: Vazão;

Vazão de referência;

Pressão estática;

Temperatura.

Parâmetros de configuração: Composição do gás;

Coefficientes do modo de cálculo;

Unidades de medida;

Condições-padrão de pressão e temperatura;

Período de amostragem.

4.4 Avaliação da Variabilidade na Ausência do Tubo de Pitot como Referência

Se a ausência do tubo de Pitot, que seria utilizado como referência, prejudica o estudo no que respeita à avaliação de erros sistemáticos, o prejuízo no que respeita aos erros aleatórios, que dizem respeito à incerteza, é bem menor. Suponhamos uma referência com incerteza muito pequena. Se esta referência estivesse correta e um conjunto de medidas apresentasse variabilidade maior que a incerteza da referência, seria possível, após criteriosa análise do sistema, expressar a variabilidade total das medidas apresentadas pela referência como:

$$\sigma_{rt}^2 = \sigma_{rm}^2 + \sigma_p^2 \quad (4.1)$$

onde: σ_{rt}^2 : variância da referência (associada ao instrumento e ao processo)

σ_{rm}^2 : variância da referência (associada ao instrumento)

σ_p^2 : variância do processo no que respeita à variável medida

Obviamente a Equação 4.1 pressupõe que as variabilidades do processo e do medidor de referência são independentes, razão pela qual deverá ser analisada a pertinência de tal hipótese. Convém lembrar, todavia que, via de regra, tal assertiva é aceitável para a maioria das situações práticas de laboratório, com base no próprio conceito de incerteza, isto é, de repetitividade, que pressupõe um processo sob controle. Asseguradas as condições de repetibilidade, assegura-se também, em geral, a razoabilidade da hipótese da Equação 4.1.

Acontece que a Equação 4.1 não vale apenas para a referência, mas pode ser aplicada a qualquer medidor para o qual se possa garantir a condição de repetitividade e de repetibilidade. Asseguradas estas condições para o medidor ultrassônico, pode escrever:

$$\sigma_{ut}^2 = \sigma_u^2 + \sigma_p^2 \quad (4.2)$$

onde: σ_{ut}^2 : variância das medidas apresentadas pelo medidor ultrassônico

σ_u^2 : variância intrínseca do medidor ultrassônico

σ_p^2 : variância do processo no que respeita à velocidade de escoamento

A aplicação conjunta dos dois medidores, Tubo de Pitot e MEVUS permitiria, com um conjunto de dados adequado, estimar:

- A variabilidade do processo, a partir da Equação 4.1. Isto seria possível porque a variância intrínseca do Pitot (associada à sua incerteza de medição) é conhecida e a variabilidade total das medidas poderia ser avaliada estatisticamente. Assim,

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{rt}^2 - \sigma_{rm}^2} ;$$

- A variância intrínseca do MEVUS, a partir da Equação 4.2. Isto seria possível porque a variância do processo (σ_p) já teria sido determinada no item anterior e a

variabilidade total das medidas seria avaliada estatisticamente. Assim,

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_{ut}^2 - \sigma_p^2}.$$

É preciso chamar a atenção para o fato de que o conjunto de experimentos que permite a estimativa descrita deve ser suficientemente controlado, atendidas determinadas condições de aplicação dos instrumentos de medição. Assim, por exemplo, seria essencial que houvesse um conjunto de experimentos nos quais o medidor ultrassônico fosse aplicado nas condições de uso pré-estabelecidas.

A ausência da referência faz que a variabilidade do processo não possa ser estimada e, por conseguinte, também a incerteza do medidor ultrassônico. Uma vez garantidas as condições de controle do processo, a influência dos acidentes sobre a variabilidade total das medidas pode ser estudada, embora não se possa analisar diretamente, ao menos do ponto de vista quantitativo, a influência sobre a incerteza de medição.

É o que foi feito a partir da impossibilidade de se utilizar o Tubo de Pitot como referência. Avalia-se, então, a influência dos acidentes de linha sobre a incerteza de medição através de sua influência sobre a variabilidade total das medidas realizadas. Para que as conclusões sobre a variabilidade total possam ser transferidas, em certa medida, para a incerteza de medição, são necessárias garantias de que o processo esteja sob controle, isto é, de que sua variabilidade não seja o componente principal da variabilidade das medidas realizadas com o MEVUS. Em outras palavras, é preciso garantir que

$$\sigma_p \ll \sigma_u \tag{4.3}$$

Comentários sobre a observância desta limitação nos experimentos realizados serão feitos oportunamente.

5 Estudo Experimental da Variabilidade da Medição para Alguns Acidentes de Linha

5.1 Descrição dos experimentos

Para a avaliação da variação na variabilidade dos dados medidos pelo MEVUS, foram analisados 4 tipos de acidentes de linha para diferentes comprimentos de trecho reto à montante do medidor, conforme indicado nas Figuras 4.1 e 4.2. A descrição dos acidentes de linha também consta dos dois capítulos anteriores, identificados como A1, A2, A3 e A4 (vide páginas 60 e 63).

Para a aquisição de dados, o MODATA, foi configurado da seguinte maneira, conforme Tabela 5.1:

Tabela 5. 1 - Configuração Padrão do medidor

Item	Elemento	Valor	Unidade
1	Parâmetros		
1.1	Temperatura Padrão	15	°C
1.2	Pressão Padrão	101,3	kPa
1.3	Peso Molecular Componente 1	28,01	
1.4	Constante Componente 1	1,4	
1.5	Percentual do componente 1	100	%
1.6	Peso Molecular Componente 2	-	
1.7	Constante Componente 2	-	
1.8	Percentual do componente 2	-	
2	MEVUS		
2.1	Elementos do Vetor de Média	10	
2.2	Tolerância da Velocidade do Son	10	%
2.3	Leituras por Medida	10	
2.4	Fator K	1	
2.5	Tempo entre Leituras	10	ms

Para cada acidente, duas vazões foram fixadas no MEVUS, 100 m³/h e 150 m³/h. Os acidentes de linha indicados foram propositalmente inseridos na instalação, a três distâncias do medidor ultrassônico, a saber:

- distância equivalente a 5 vezes o diâmetro da tubulação;
- distância equivalente a 10 vezes o diâmetro da tubulação;

- distância equivalente a 20 vezes o diâmetro da tubulação.

Cada configuração aquisitou dados por um período de 4 minutos, o que proporciona cerca de 120 leituras, visto que a cada dois segundos um valor médio de dez leituras era captado pelo MODATA.

Os dados são apresentados no Apêndice C. As Figuras 5.1 a 5.12 apresentam graficamente os registros para cada acidente de linha e para cada distância até o medidor ultrassônico, destacando a média e o desvio padrão das medidas.

O que se pode observar é que as médias variam muito pouco nos conjuntos de medidas, apresentando um desvio máximo inferior a 2% em relação a média geral, como condensado na Tabela 5.2. Considerando que parte desta variação se deve às diferentes perdas de carga (por causa dos acidentes), pode-se concluir que os escoamentos induzidos em cada caso se mantiveram sob controle para a finalidade dos testes.

Tabela 5. 2 - Média e desvio padrão para 100m³/h

Arranjo	5D		10D		20D	
	Média	Des.Pad	Média	Des.Pad	Média	Des.Pad
A1	7,294	1,690	7,202	0,825	7,092	0,668
A2	7,094	1,142	7,160	0,912	7,132	2,404
A3	7,183	0,507	7,244	0,497	7,335	0,371
A4	7,265	1,337	7,161	0,582	7,159	0,387
Média Geral = 7,193			Desvio Máximo = 1,96875			

Os gráficos das Figuras 5.1 a 5.12 comprovam que a variação das medidas em cada caso é, de fato, aleatória. Pode-se alegar que os dados da Figura 5.1 apresentam uma curva de tendência não aleatória, apontando que a vazão estaria diminuindo durante o experimento. O processo, neste caso, não seria estacionário. Uma análise da média móvel, todavia, revelará que, ao final da série histórica, a tendência seria de crescimento da vazão, de modo que o processo poderia ter uma variação em torno da média. Processos com variação restrita em torno da média não devem ser considerados necessariamente não estacionários. São, na verdade, processos em equilíbrio dinâmico. Equilíbrio dinâmico comporta, necessariamente, variações, desde que limitadas em torno do ponto de equilíbrio.

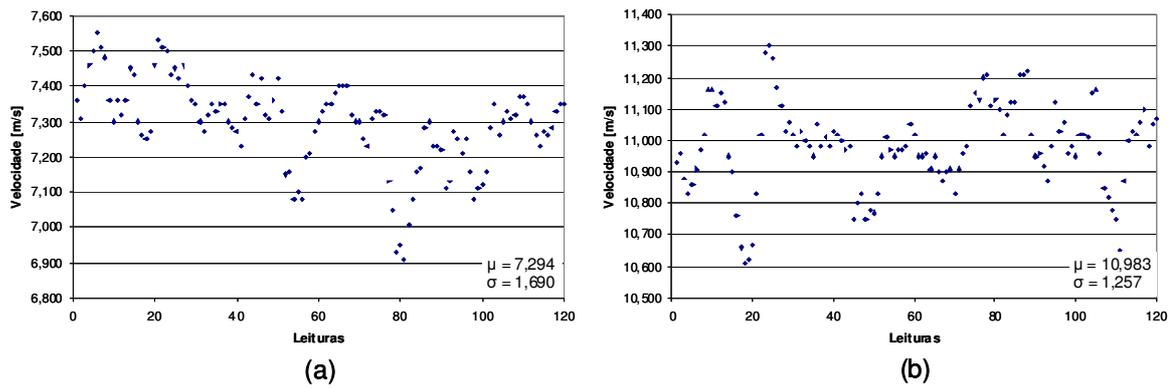


Figura 5. 1 - Gráfico Leituras x Velocidade – A1, 5D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

A Figura 5.1 plota as leituras de velocidades do MEVUS a uma vazão controlada de (a) 100m³/h e (b) 150m³/h a uma distância de 5D entre o arranjo A1 e o MEVUS. Os resultados apresentaram uma média e um desvio padrão de: (a) 7,294 e 1.690 (b) 10,983 e 1,257.

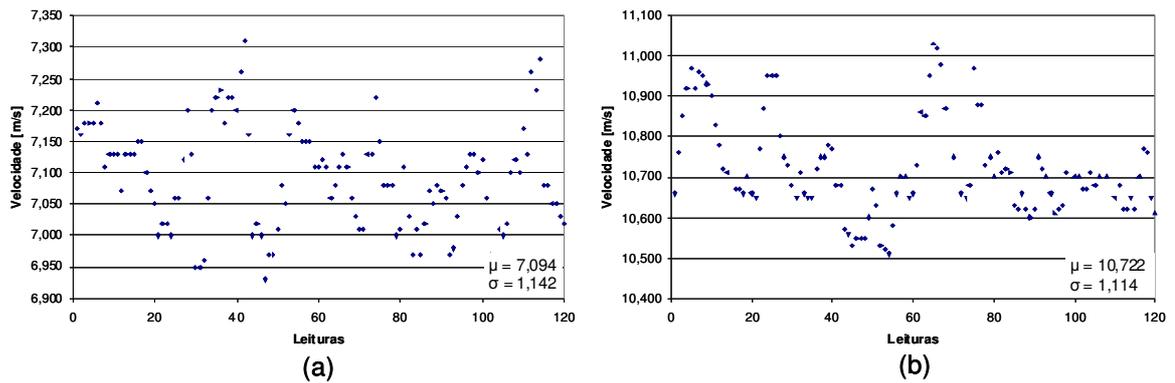


Figura 5. 2 – Gráfico Leituras x Velocidade – A2, 5D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

Os resultados para o arranjo A2, Figura 5.2, também a 5D, apresentaram um desvio padrão inferior ao apresentado para o arranjo A1. Estes resultados não seriam comumente esperados, pois os dados lidos na presença do arranjo A2 (mais complexo e que oferece maior perda de carga) apresentaram um desvio menor.

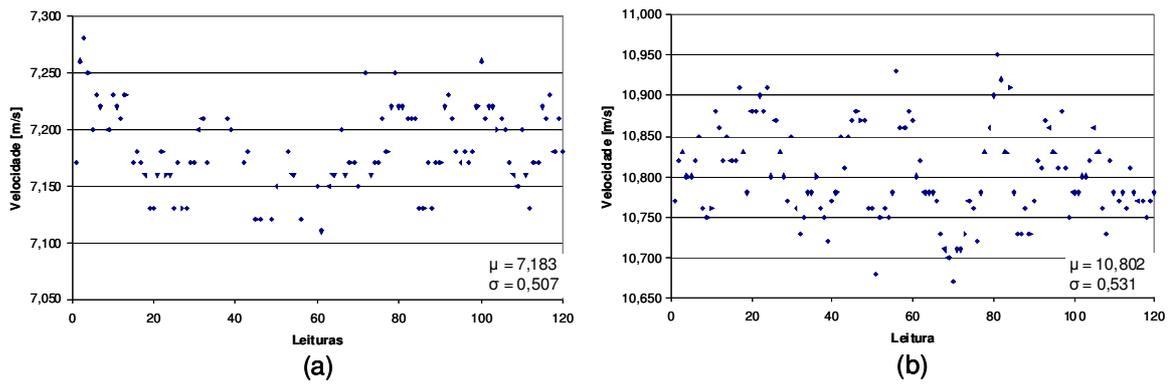


Figura 5. 3 - Gráfico Leituras x Velocidade – A3, 5D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

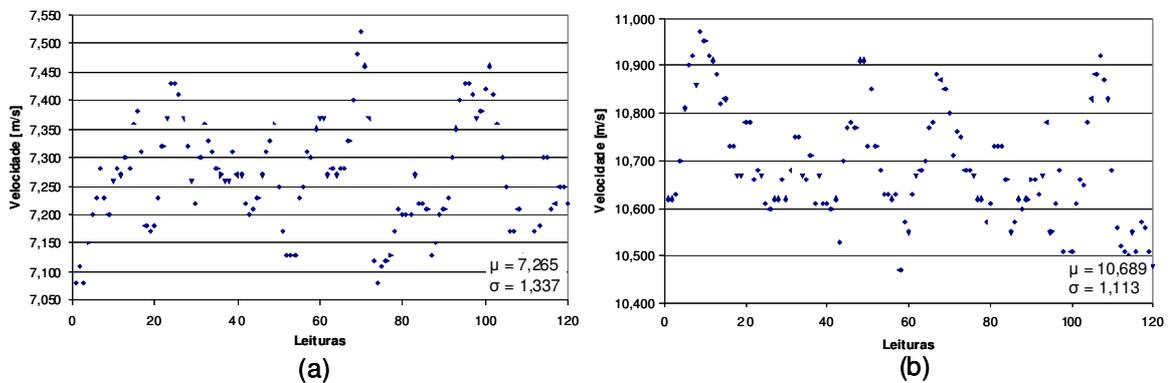


Figura 5. 4 - Gráfico Leituras x Velocidade – A4, 5D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

As Figuras 5.3 e 5.4 demonstram os mesmos resultados para os arranjos A3 e A4. Como pode se observar, o arranjo A3 apresenta o menor desvio padrão entre todos os arranjos a uma distância de 5D.

Os gráficos das Figuras 5.5 a 5.8 demonstram os resultados dos 4 arranjos para uma distância de 10D entre os acidentes e o MEVUS. Para esta distância, os desvios padrões se apresentaram menores que para 5D.

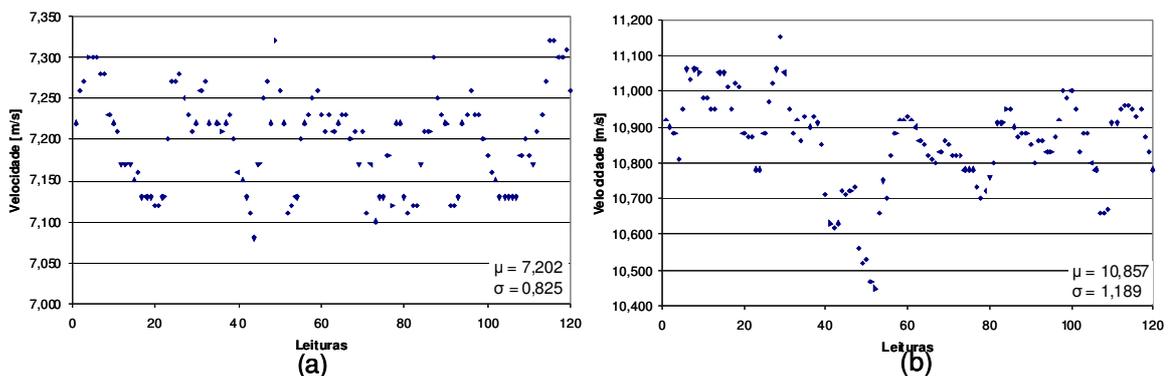


Figura 5. 5 - Gráfico Leituras x Velocidade – A1, 10D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

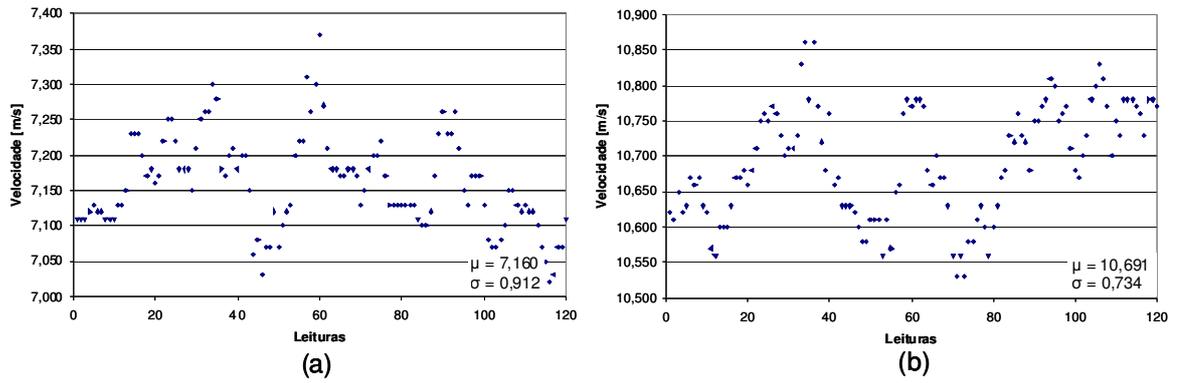


Figura 5.6 - Gráfico Leituras x Velocidade – A2, 10D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

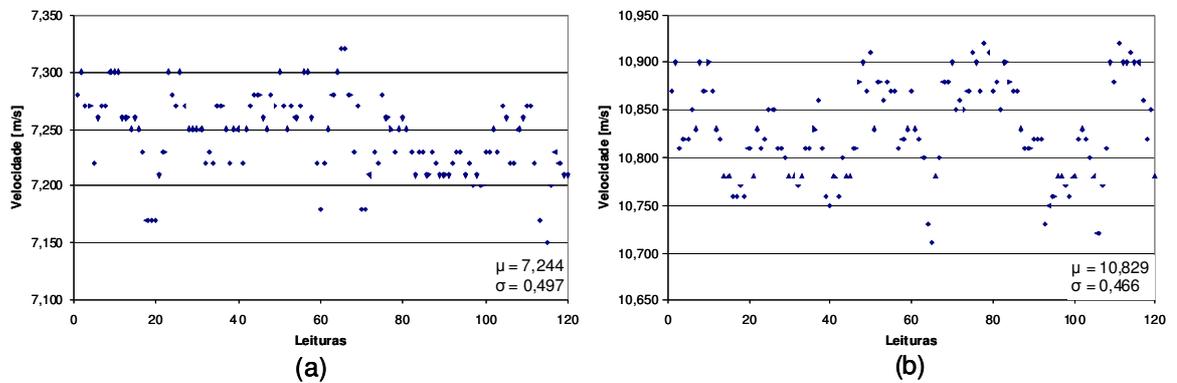


Figura 5.7 - Gráfico Leituras x Velocidade – A3, 10D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

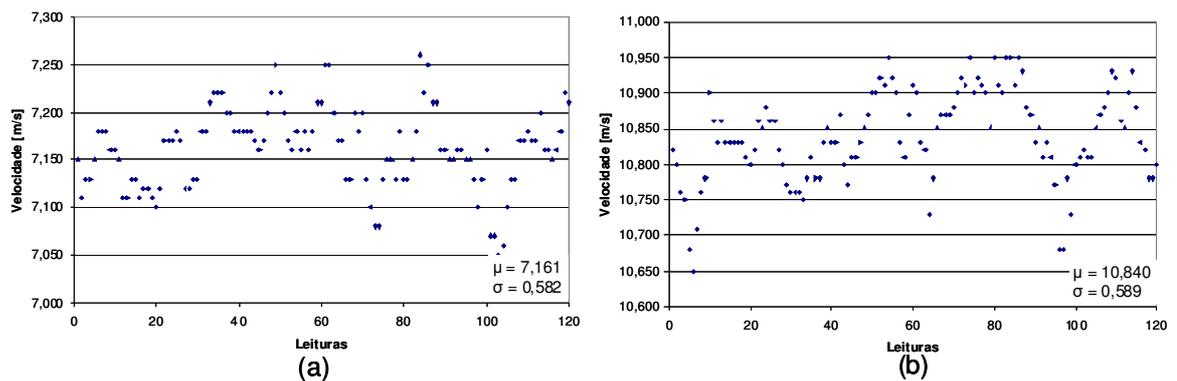


Figura 5.8 - Gráfico Leituras x Velocidade – A4, 10D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

Os gráficos das Figuras 5.9 a 5.12 apresentam os resultados das leituras de velocidade dos quatro arranjos a uma distância de 20D do MEVUS. Observa-se que para este caso, o arranjo A2 apresentou um desvio padrão maior que para os casos anteriores (5D e 10D).

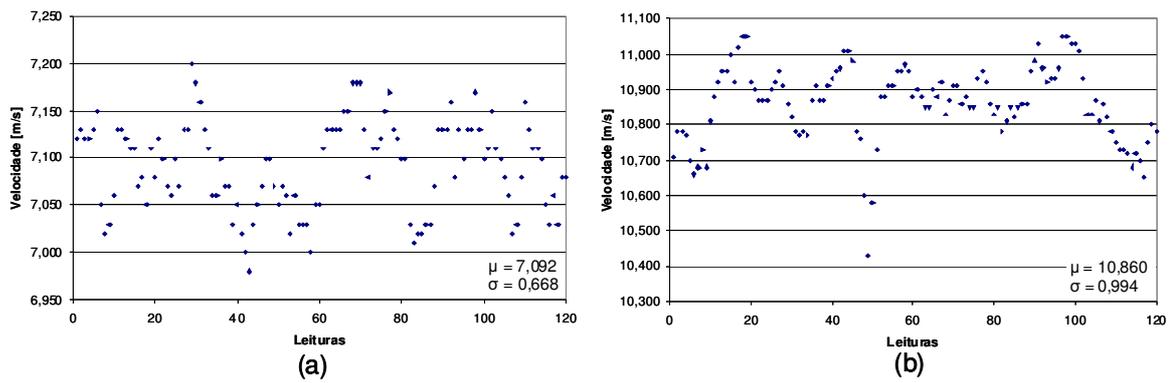


Figura 5. 9 - Gráfico Leituras x Velocidade – A1, 20D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

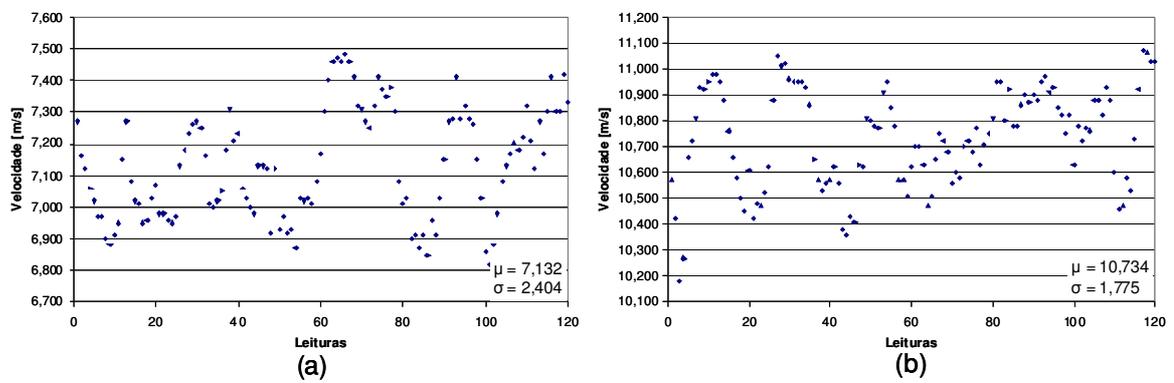


Figura 5. 10 - Gráfico Leituras x Velocidade – A2, 20D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

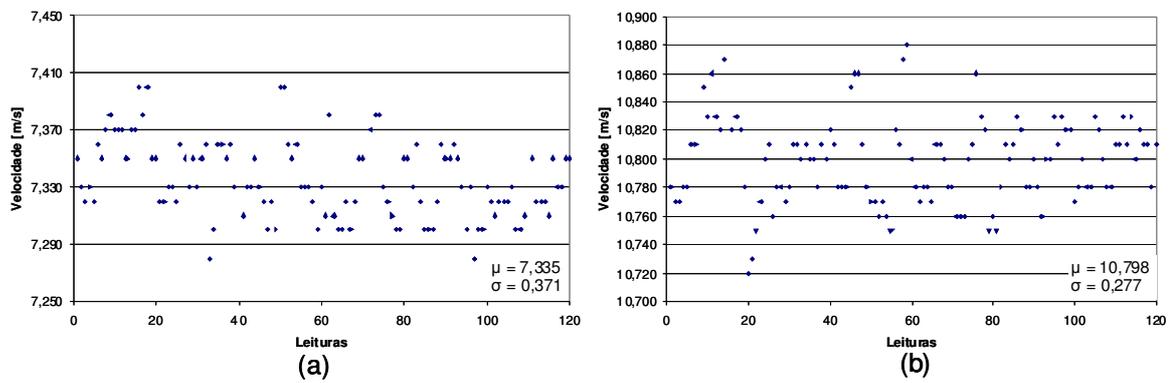


Figura 5. 11 - Gráfico Leituras x Velocidade – A3, 20D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

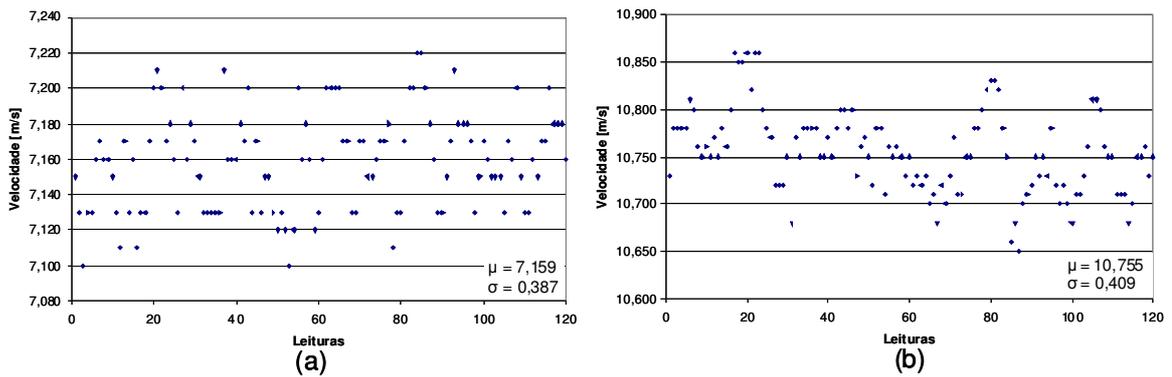


Figura 5. 12 - Gráfico Leituras x Velocidade – A4, 20D. (a) 100m³/h e (b) 150m³/h

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam, para cada acidente de linha, a velocidade média registrada pelo medidor ultrassônico em função da distância do acidente até ao ponto de medição (em diâmetros da tubulação). Não se deve tirar conclusão apressada, porque a velocidade média da linha sem acidente (A1) foi menor, em alguns casos, do que a velocidade média quando outros acidentes estavam presentes. É que, por melhor que fosse o controle de vazão, este foi feito através da abertura manual de válvula, de modo que seria muito dispendioso (em tempo) um ajuste tão preciso. O importante é que:

- o processo tenha sua variabilidade limitada para viabilizar o estudo da influência dos acidentes de linha;
- as velocidades médias de cada conjunto de dados sejam próximas para que se garanta que as dinâmicas dos escoamentos não sejam diferentes. Obvio que escoamentos com números de Reynolds muito distintos terão dinâmicas distintas.

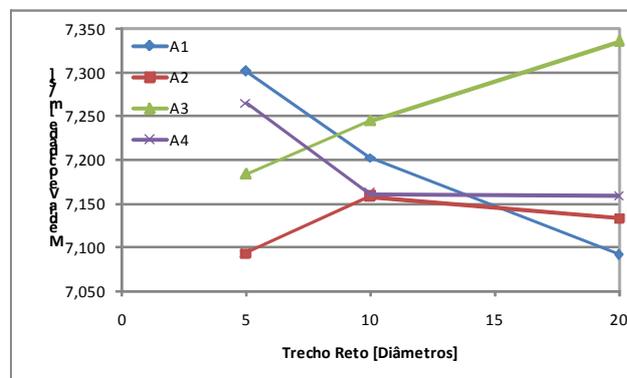


Figura 5. 13 - Gráfico Trecho Reto x Média das Velocidades para todos os arranjos. Vazão: 100m³/h

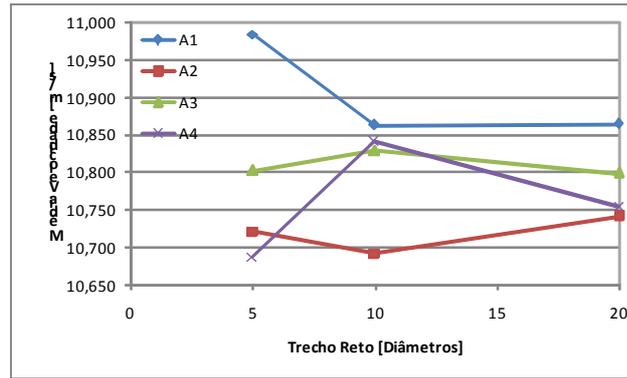


Figura 5. 14 - Gráfico Trecho Reto x Média das Velocidades para todos os arranjos. Vazão: 150m³/h

Os resultados das Figuras 5.15 e 5.16 chamam a atenção pelo fato de apresentarem resultados diferentes daqueles que seriam comumente esperados, a considerar:

- o que normalmente registram os manuais dos fabricantes de medidores de vazão;
- o que levam a entender as recomendações de diversas normas referentes a medidores e instalações de medição de vazão;

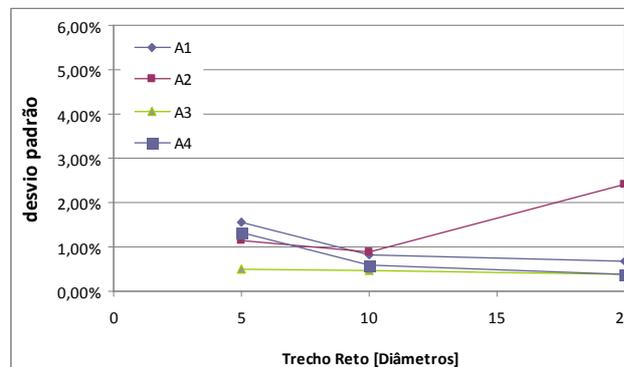


Figura 5. 15 - Gráfico Trecho Reto x Desvio Padrão para todos os arranjos. Vazão: 100m³/h

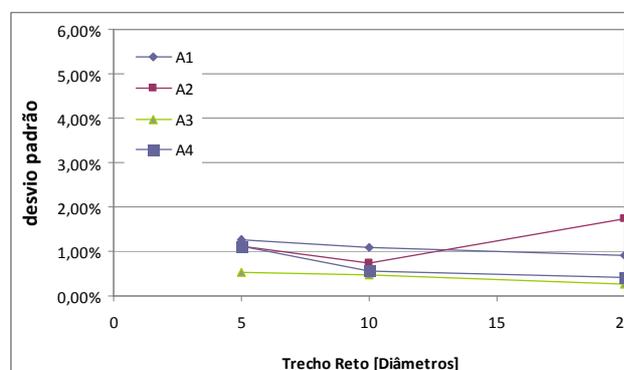


Figura 5. 16 - Gráfico Trecho Reto x Desvio Padrão para todos os arranjos. Vazão: 150m³/h

Tanto os fabricantes quanto as normas técnicas costumam estabelecer apenas uma distância mínima entre o medidor e o acidente de linha mais próximo, sem fazer referência específica a tipos de acidente. Costuma-se associar, até mesmo por indução dos textos das normas e dos manuais dos fabricantes, que as distâncias mínimas indicadas relacionam-se à garantia da incerteza associada ao medidor.

Os experimentos mostraram, para o acidente A2, variabilidade maior a 20D que nas distâncias menores (5D e 10D). O experimento foi repetido diversas vezes a fim de:

- identificar fenômenos externos ao escoamento que pudessem levar a tal variação, tais como vibrações excessivas;
- detectar variações de média móvel significativas que pudessem indicar problemas de controle do processo neste caso;
- detectar falhas de funcionamento do medidor que estivessem mais associadas ao escoamento induzido pelo acidente de linha A2.

O conjunto de medições, e suas repetições, não mostraram associação da variabilidade a problemas de processo, condições externas ou medição errada do medidor.

A variabilidade das medições do acidente A2 está, portanto, relacionada à própria dinâmica do escoamento induzido pelo acidente e, como mostram os experimentos, tal variabilidade não será necessariamente menor quanto mais afastado do acidente estiver o medidor.

O problema é importante quando se trata de plantas de produção de petróleo e gás, porque a quantidade de acidentes de linha em planos ortogonais é bem mais provável. Neste caso, os experimentos apontam que não basta respeitar uma distância mínima entre o acidente e o medidor. O ideal seria descobrir o ponto de variabilidade mínima, ou ao menos uma faixa na qual se garanta uma variabilidade menor que a máxima permitida.

6 Conclusões

6.1 Quanto aos Objetivos do Trabalho

Foram estabelecidos dois objetivos para esta dissertação:

- a) Avaliar o comportamento das medições (média e variabilidade) quando determinados tipos de acidentes são propositadamente inseridos na linha.
- b) Avaliar a incerteza global da medição nestas situações.

Conforme introduzido anteriormente neste trabalho, o segundo objetivo não foi avaliado devido a exigência de uma referência calibrada e rastreável para que se possa obter uma correta avaliação da incerteza.

Na tentativa da utilização de um tubo de Pitot como referência para o trabalho, observou-se uma variabilidade na coleta dos resultados acima da expectativa. Estes resultados inviabilizaram a utilização do medidor como referência. Após a análise criteriosa de possíveis influências externas que poderiam estar afetando a medição do Pitot, concluí-se que a sensibilidade do mesmo estava muito elevada.

Caso a referência pudesse ser utilizada em conjunto com o MEVUS, poderíamos determinar a variabilidade do processo pela Equação 4.1. Como a variabilidade do processo está relacionada tanto ao Pitot quanto ao MEVUS, a incerteza do MEVUS também poderia ser calculada pela Equação 4.2.

Com o descarte do uso do Pitot como referência, o trabalho se orientou a avaliar o comportamento das medições (média e variabilidade) quando determinados tipos de acidentes são inseridos na linha.

Através de experimentos controlados, foram coletados dados com a inserção de 4 tipos de acidentes de linha comumente encontrados em plantas industriais. Estes 4 tipos de acidentes, denominados “arranjos” (A1, A2, A3 e A4), tiveram a sua distância até o MEVUS variadas, alternando de 5D a 20D (5, 10 e 20D).

O conjunto de dados coletados demonstrou um comportamento não esperado mediante informações de distância entre os acidentes de linha e o medidor de vazão ultrassônico. No caso onde o acidente de linha se constituía de 2 curvas de 90° dispostas em planos ortogonais, a maior distância do acidente em relação ao medidor apresentou o maior desvio padrão.

Vale lembrar que as médias dos dados coletados variam muito pouco em relação à média geral, apresentando um desvio máximo inferior a 2%, concluindo a partir daí ir que os escoamentos induzidos em cada caso se mantiveram sob controle para a finalidade dos testes, já que parte desta variação se deve às diferentes perdas de carga oriundas dos acidentes.

Todo experimento foi repetido várias vezes a fim de detectar possíveis motivos para tal comportamento no arranjo A2, porém o conjunto de medições não mostrou associação da variabilidade a problemas de processo, condições externas ou medição errada do medidor.

Assim sendo, a variabilidade do arranjo A2 está relacionada à própria dinâmica do escoamento, o que não garante a redução da mesma com o afastamento do acidente em relação ao medidor.

Portanto, observou-se que não se deve apenas respeitar uma distância mínima entre o acidente e o medidor, e sim, deve-se determinar o ponto de menor variabilidade ou que possui uma variabilidade inferior à proposta pelo fabricante. Tudo isso, se deve ao fato de que cada tipo de acidente atribui ao escoamento uma característica única, o que pode inviabilizar os critérios de medição indicados em norma e manuais de fabricantes.

Resumindo, vale destacar:

- A idéia de que basta obedecer uma distância mínima entre o ponto de instalação do medidor e o acidente de linha mais próximo não deve ser aplicada sem uma análise prévia da situação real da planta;

- Particularmente para o acidente A2 (2 curvas a 90° em planos ortogonais), a variabilidade das medições a 20D foi maior que para 5 e 10D;
- O resultado do item anterior já excluí a possibilidade de o aumento da variabilidade a 20D dever-se ao processo. O controle do processo foi realizado de forma a garantir que a variabilidade das medições estivesse associada ao processo de medição e ao ponto de medição e não ao processo intrinsecamente;
- Vale ressaltar que o acidente A2 não é raro em plataformas de produção de petróleo e gás, o que justifica o estudo experimental realizado.

6.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros que complementem o realizado nesta dissertação, pode-se indicar:

- a) Repetição dos experimentos juntamente com uma referência rastreável de baixa incerteza para que, além do estudo da variância, também se possa analisar a influência dos acidentes de linha no erro sistemático introduzido por eles na medição. Analisar a inclusão um Condicionador de Fluxo na bancada;
- b) Influência da variação do ângulo do acidente de linha em relação ao plano horizontal, trabalho este que aumenta ainda mais a gama de possíveis acidentes presentes em plantas industriais. Além disso, poucos estudos foram realizados utilizando este tipo de variação;
- c) Simulação computacional das configurações estudadas nesta dissertação, a fim de obter resultados para comparação com os dados experimentais. Atenção especial poderá ser dada ao efeito *swirl* introduzido por alguns acidentes de linha;
- d) Os resultados do item anterior poderão ser aplicados na análise computacional da performance de medidores ultrassônicos na medição de escoamentos com efeito *swirl*.

7 Referências

- [1] ANP/INMETRO. Portaria Conjunta Nº 1, de 19.06.2000 - DOU 20.6.2000. [Acessado em: 21 de out. de 2009.] <http://www.anp.gov.br/>.
- [2] RAMOS, R. *Desenvolvimento de medidor de vazão de gás por ultra-som: modelagem, protótipo e testes*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória : s.n., 2006. Dissertação de Mestrado.
- [3] *Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters – Transmission Measurement Committee Report No. 9*. American Gas Association. Arlington, Virginia : s.n., 1998.
- [4] EREN, H. Accuracy in Real Time Ultrasonic Applications and Transit-Time Flow Meters. 1998, Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 568-572, Ottawa, Canada.
- [5] LANSING, J. Field Verification Procedures for Ultrasonic Gas Meters. 2000, Proceedings of the AGA Operations Conference, Colorado, 12p.
- [6] LANSING, J. Smart Monitoring & Diagnostics for Ultrasonic Gas Meters. 2000, Proceedings of the 18th. North Sea Flow Measurement Workshop, 15p.
- [7] LANSING, J. Benefits of Flow Calibrating Ultrasonic Meters. 2002, proceedings of the AGA Operations Conference, Chicago, Il, 10p.
- [8] LANSING, J. Ultrasonic Meter Station Design Considerations. 2004, proceedings of the AGA Design Considerations of Ultrasonic Flow Meters Conference, 17p.
- [9] RUPPEL, C.; PETERS, F. Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2004, Vol. 15, pp. 167-177.
- [10] RAIŠUTIS, R. Investigation of flow velocity profile in a metering section of an invasive ultrasonic flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2006, Vol. 17, pp. 201-206.
- [11] LYNNWORHT, L. C.; LIU, Y. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report. *Ultrasonics*. 2006, Vol. 44, pp. 1371-1378.
- [12] *Speed of Sound in Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases, Report N° 10*. American Gas Association, Washington, DC, 2003
- [13] BURNSTEIN, D.; IGMAN, D.; MICHLIN, Y. Correlation Between Gas Molecular Weight, Heating Value and Sonic Speed Under Variable Compositions of Natural Gas. 1999, ISA Transactions, V. 38, pp. 347-359.
- [14] ESTELA-URIBE, J.F., JARAMILLO, J., SALAZAR, M.A. AND TRUSLER, J.P.M.

Virial Equations of State for Natural Gas Systems, Fluid Phase Equilibria. 2003, V. 204, pp. 169-182.

- [15] SALGADO, A.; RAMOS, R. COB09 - 1510 - Perfect gas approach validation aiming estimation of thermophysical properties in flare flows considering operational data. *Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering*. Gramado, RS : s.n., 2009.
- [16] MATTINGLY, G. E.; YEH, T. T. *NBS' Industry-Government Consortium Research Program on Flowmeter Installation Effects: Summary Report with Emphasis on Research Period July - December 1987*. U. S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. 1988. pp. 1-82.
- [17] MATTINGLY, G. E.; YEH, T. T. Effects of pipe elbows and tube bundles on selected types of flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1991, Vol. 2, pp. 4-13.
- [18] BRANCH, J. C. The effects of an upstream short radius elbow and pressure tap location on orifice discharge coefficients. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1995, Vol. 6, pp. 157-162.
- [19] HOLM, M.; STANG, J.; DELSING, J. Simulation of flow meter calibration factors for various installation effects. *Measurement*. 1995, Vol. 15, pp. 235-244.
- [20] HILGENSTOCK, A.; ERNST, R. Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamics - CFD vs experiments? *Flow Measurement and Instrumentation*. 1996, Vol. 7, pp. 161-171.
- [21] MICKAN, B. et al. Systematic investigation of flow profiles in pipes and their effects on gas meter behaviour *Measurement*. 1997, Vol. 22, pp. 1-14.
- [22] CARLANDER, C.; DELSING J. Installation Effects on an Ultrasonic Flow Meter With Implications for Self Diagnostics. 2000, *Flow Measurement and Instrumentation*, V. 11, pp. 109-122.
- [23] GRIMLEY, T. A. Ultrasonic Meter Installation Configuration Testing. *AGA Operations Conference*. 2000, Denver, CO.
- [24] LANSING, J. et al. *Understanding and Using Ultrasonic Gas Flow Meters*. [20--]
- [25] Apostila ABENDE, Aplicação Industrial: Ensaio por Ultra-som. ANDREUCCI, R. 2003
- [26] *Massa Products Corporation*. [Acessado em 01/12/2009] <http://www.massa.com>.
- [27] *Compressibility and Supercompressibility for Natural Gas and Other Hydrocarbon Gases, Report N° 8*. American Gas Association, Washington, DC, 1994.
- [28] FOX, R. W.; MCDONALD, A.T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 6. ed. Rio de Janeiro : LTC, 2006.
- [29] BOONE, M.; VERMAAS, E. A New Ray-Tracing Algorithm for Arbitrary

Inhomogeneous and Moving Media, Including Caustics. 1991, Journal of Acoustical Society of America; Vol. 90-4.

- [30] DELSING, J. The Zero Flow Performance Flow Performance of a Sign-Around Type Flowmeter. 1990, IEEE Ultrasonic Symposium.
- [31] GOL'TSOV, S. A. Refined Mathematical Model of an Ultrasonic Flowmeter. 1998, Measurement Techniques; Vol. 41 – 6.
- [32] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/FDIS 3966: Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes. 2008.

APÊNDICE A – ARTIGO SALGADO E RAMOS

PERFECT GAS APPROACH VALIDATION AIMING ESTIMATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES IN FLARE FLOWS CONSIDERING OPERATIONAL DATA

Alex Salgado, alexluzs@gmail.com

Rogério Ramos, ramosrogerio@hotmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Abstract. *The aim of present work is to investigate the possibility and consequences to use the perfect gas modelling in order to predict some thermophysical properties of natural gas flowing in off-shore flare tubes. Such validation will propitiate the development of a fast and realible self-diagnostics software for ultrasonic flowmeter - UFM specific to flare metering. The validation is based on comparision of thermophysical properties simulated by AGA report no. 10 virial state equation (once gas composition and operational pressure and temperature data are known) and those properties obtained by the perfect gas classical approach. Once the thermophysical behaviour is validated, the thermodynamic property speed of sound - SOS may be calculated and used to check ultrasonic gas meters operation.*

Keywords: *ultrasonic flow meter, flare metering, self-diagnostics, sonic speed*

1. INTRODUCTION

The motivation of present work appeared with publication of Portaria Conjunta ANP/INMETRO n^o. 1 (2000) a federal regulation which imposes new challenges for Brazilian companies and institutions which deals with flow metering, especially those users of new technologies, as ultrasonic flow meters – UFM’s. That regulatory mark described, for the first time in Brazil, the conditions and proceedings for operational and fiscal metering of hydrocarbons flows as well as included the utilization of ultrasonic flow meter as a legal and creditable technology for such measurements.

On the other side, the publication of American Gas Association – AGA report no. 9 (1998) diffused information about basic features of ultrasonic technology for gas flow measurement. On those times, AGA-9 text admitted that ultrasonic technology applied to flow metering was still in early stage and suggested that more studies were needed in order to define, with confidence, many features about UFM’s like installation effects, necessity of straight tubes, noise treatments, quality of the velocity profile on the metering section, gas composition influence, etc.

Technological and scientific community answered this challenge with a large number of dedicated conferences and articles about such features effects, like were made by Eren (1998), Lansing (2000, 2002, 2004), Ruppel and Peters (2004) and Raisutis (2006) among others.

An important complement of AGA-9 report came with the publication of AGA report no. 10 (2003), where is described a virial state equation which predicts the speed of sound - SOS for natural gas, having as input data: chemical composition, temperature and pressure. AGA-10 report is probably the most updated and reliable equation to simulate such property with confidence, presenting uncertainties around 0,1% for the range of interest. Other works dedicated to examine thermophysical behavior of natural gas can be found in Burnstein *et al.* (1999) and Estela-Uribe *et al.* (2003).

Due to such efforts, the utilization of ultrasonic flow meters for natural gas applications has grown significantly. Today, virtually every oil company is using such technology, either for custody transfer or operational monitoring. Some benefits of this technology include the following:

- Accuracy: the meters can be calibrated to an uncertainty less than 0.3%;
- Large turndown: typically more than 50:1 (orifice plates offer typical turndowns around 3:1 and turbines, 20:1)
- Tolerant to wet gas;
- Non-intrusive: do not cause pressure drop;
- Low maintenance: there are no moving parts;
- Self-diagnostics: data for determining meter’s healthy is available.

The ability to diagnose the meter's health is an important feature of UFM's and this paper discuss and proposes a way to check the operational health of ultrasonic flow meter specifically to flare metering.

Ultrasonics flow measurements developments dedicated to flare applications specifically are found in the works of Mylvaganan (1989) and Folkestad and Mylvaganan (1989, 1993).

2. ULTRASONIC METER BASICS

The basic construction of an ultrasonic flow meter is relatively simple as shown in Fig. 1.

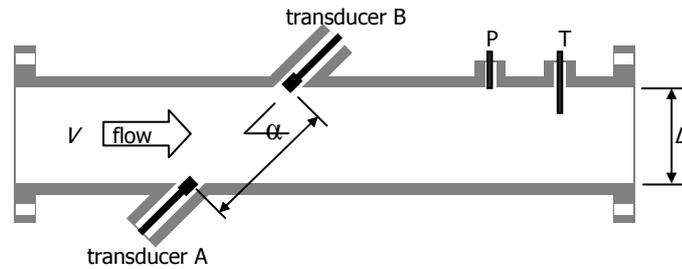


Figure 1 – Ultrasonic meter scheme and basic dimensions

Ultrasonic meters are velocity meters by nature. That is, they measure the gas velocity within the meter body. By knowing the velocity and the cross-sectional area, volume flow can be computed.

The fundamental of ultrasonic meter depends of precise known of the transit time of an ultrasonic pulse traveling with the flow from transducer A to transducer B (t_{AB}). When this measurement is completed, a new pulse is launched from transducer B to A, now against the flow, and this traveling time can be determined (t_{BA}). The transit time of the signal traveling downstream is less than the upstream signal time.

Once the traveling times are known, downstream and upstream signal velocities, (v_{AB} and v_{BA} , respectively) can be determined by Eqs. (1-2).

$$v_{AB} = \frac{L}{t_{AB}} = c + V \cos \alpha \quad (1)$$

$$v_{BA} = \frac{L}{t_{BA}} = c - V \cos \alpha \quad (2)$$

Where L , α , t_{AB} and t_{BA} are known; V is associated to flow velocity and c is the gas sound of speed - *SOS*. The algebraic system composed by Eqs. (1) and (2) of can be easily solved for the unknowns c and V , which gives:

$$V = \frac{D}{\sin 2\alpha} \frac{t_{AB} - t_{BA}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \quad (3)$$

$$c = \frac{D}{2 \sin \alpha} \frac{t_{AB} + t_{BA}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \quad (4)$$

Through Eqs. (3) and (4) it is possible to measure a variable associated to flow velocity V , as well as the speed of sound of flowing gas. Unfortunately, determining the correct flow rate within the meter is a bit more difficult task. The velocity V shown in Eq. (3) refers to the velocity on acoustic path. The velocity needed for computing flow rate, also known as bulk mean velocity, is the average gas velocity across meter's area. In the pipeline, gas velocity profiles are not always uniform and often it is submitted to some swirl and asymmetrical flow profile as well. This make computing the average velocity a bit more challenging and it is out of scope of the present text.

However, it is important to be noted that gas velocity calculation in Eq. (3) is independent of speed of sound calculated in Eq. (4) and to compute speed of sound, gas velocity is not required. This is true because the transit time measurements t_{AB} and t_{BA} are measured within a few milliseconds of each other, and gas composition does

not change significantly during this time. Also, it should be noted the simplicity of Eqs. (3) and (4) which are only dependent of L , α , t_{AB} and t_{BA} .

On the other hand, the thermodynamic speed of sound c can be obtained by state equations like AGA report no. 10 (2003), which only depends on chemical composition, pressure and temperature flow. Pressure and temperature flow are constantly monitored by P and T sensors respectively, installed next to the measurement section, as indicated in Fig. 1. Gas composition is more stable and it is monthly provided by oil platforms crew.

Such observation lead to conclude that comparison between measured and estimated speed of sound may be a way to check if transit times have been well measured and the flow velocity, by consequence since it uses the same parameters for its evaluation. Such self diagnoses procedure is especially attractive for measurement systems located on restricted access areas, like off-shore platforms.

This idea is not original at all and it was partially explored by some authors like Sakariassen (1997), Letton *et al.* (1998), Lansing (2000), Calander and Delsing (2000), Yeh *et al.* (2001) and Norli *et al.* (2005).

Now, aiming to evaluate a software able to compare SOS, after characterize gas flow composition, operational levels of pressure and temperature, it is proposed here a fast way to estimate thermodynamic sound velocity.

3. FLARE GAS CHARACTERIZATION

In order to characterize the gas flowing in flare lines, Tab. 1 show chromatographies from distinct off-shore platforms operating on Brazilian coast.

Table 1 – Gas cromatografias from off-shore platforms operating on Brazilian coast

	Platform A	Platform B	Platform C	Platform D	Platform E	Platform F
Gas constant R	8314,3	8314,3	8314,3	8314,3	8314,3	8314,3
Molecular weight M	19,12	20,74	22,09	22,37	22,79	29,47
Adiabatic constant k	1,2754	1,2552	1,2338	1,2505	1,2464	1,1929
Methane	89,44	84,59	75,90	72,82	70,82	62,88
Etane	5,10	6,12	10,79	12,96	14,57	9,78
Propane	1,67	4,47	7,24	8,72	9,31	10,72
i-butane	0,73	0,81	1,27	1,18	1,09	2,45
n-butane	0,79	1,64	2,06	1,98	1,91	5,72
i-pentane	0,40	0,41	0,43	0,33	0,28	1,66
n-pentane	0,30	0,53	0,48	0,36	0,32	2,21
n-hexane	0,35	0,39	0,26	0,19	0,14	1,74
n-heptane	0,30	0,33	0,15	0,00	0,11	1,43
n-octane	0,15	0,19	0,00	0,00	0,01	0,66
n-nonane	0,07	0,13	0,01	0,00	0,03	0,21
n-decane	0,02	0,07	0,00	0,00	0,02	0,03
C11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nitrogen	0,52	0,17	0,80	1,18	0,95	0,27
Carbon dioxide	0,16	0,15	0,61	0,28	0,44	0,24
Helium	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxigen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Data from Tab. 1 is provided for standard state ($T=20^{\circ}\text{C}$, $P=1$ barA). An important point to be noted in Tab.1 is decreasing methane concentration from platform A to F.

Operational data from flare platforms are shown in Fig. 2 (gas pressure) and Fig. 3 (gas temperature).

From Fig. 2, pressure in flare pipelines varies from 0.97 to 1.12 barA and as can be seen in Fig. 3, gas temperature is found in a range from 13 to 37°C , but most of them is around 25°C . By observation of Figs. 2 and 3, it is reasonable to consider a typical flare pressure as 1 barA and a typical flare temperature as 25°C , generally speaking.

4. PROPERTIES ESTIMATION OF FLARE GAS

The thermodynamic properties behavior of such gas mixture may be predicted by a state equation like AGA-10. Such simulations are shown in Figs. 4-8 for platform A data, as exemplification. Pressure range was made to vary from 0.5 to 10 barA and temperature range from 0 to 50°C . All simulations using AGA-10 were performed by means of software FLOWSOLVTM (2009), after previous validation of results and considering gas composition from Tab.1 and operational data from Fig.1,2.

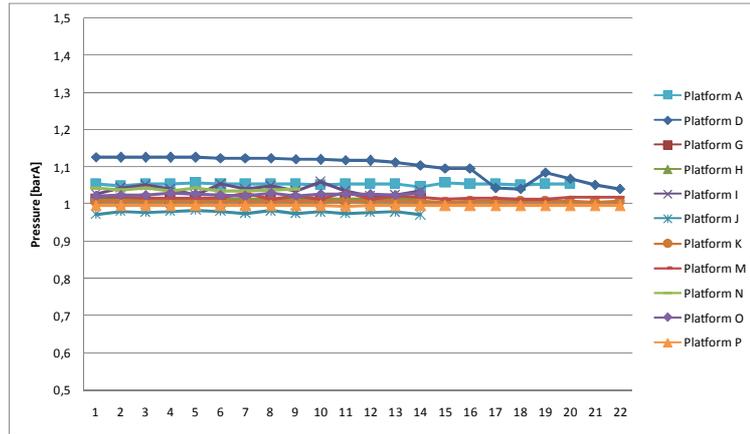


Figure 2 – Readings of gas pressure in flare tube [barA]

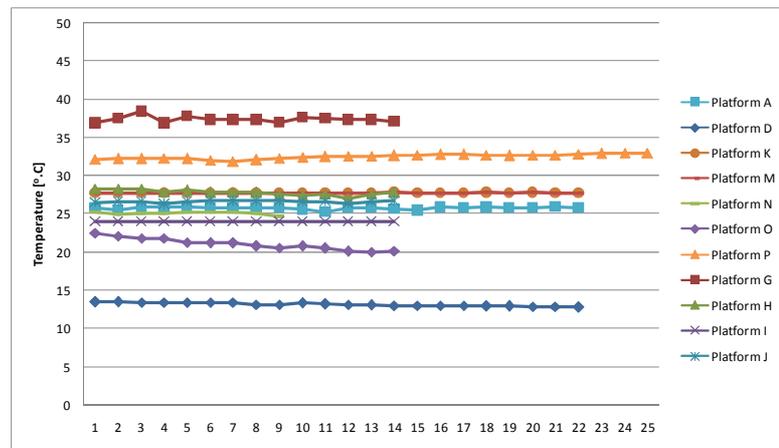


Figure 3 – Readings of gas temperature in flare tube [°C]

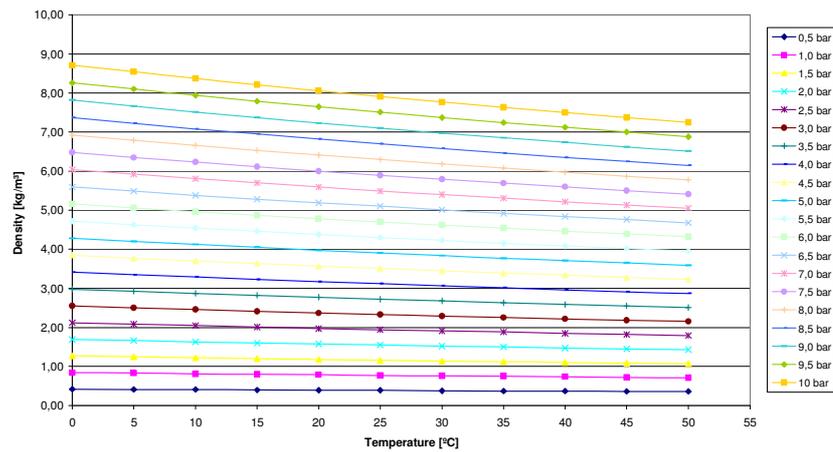


Figure 4 – Simulation of density for gas chromatography from platform A

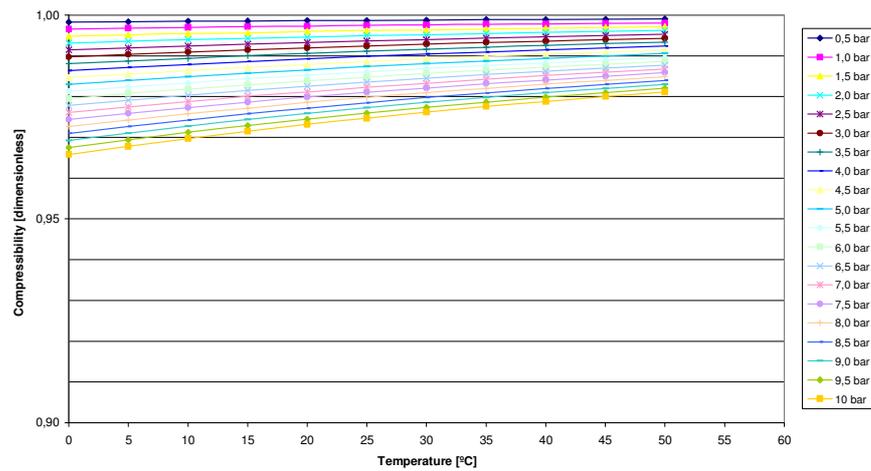


Figure 5 – Simulation of compressibility factor Z for gas chromatography from platform A

As expected, lower densities are simulated for lower pressures and higher temperatures as shown in Fig. 4. From Fig. 5, lower pressures and higher temperatures lead to a compressibility factor Z (dimensionless) tending to 1. At $T=25^{\circ}\text{C}$ and $P=1\text{bar}$, simulation gives $Z=0.9975$, which means a behavior very closed to perfect gas approach.

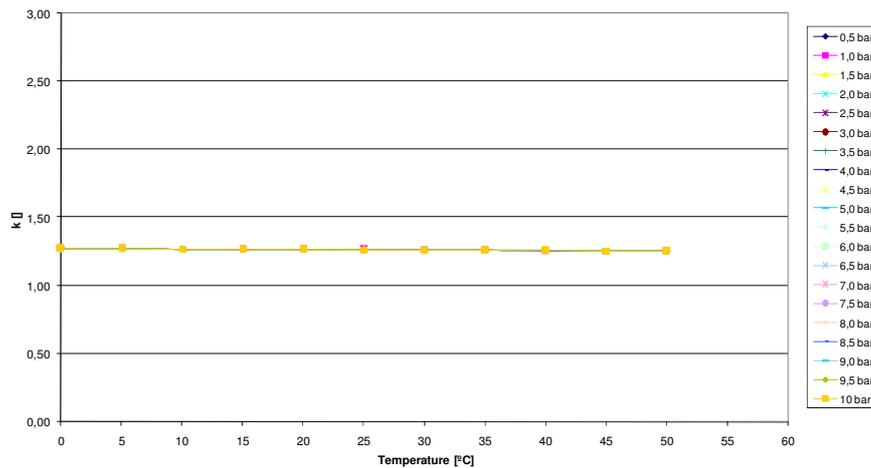


Figure 6 – Simulation of isentropic factor k for gas chromatography from platform A

The trend of isentropic factor $k=c_p/c_v$ kept almost uniform value, $k=1.27$, for all temperature and pressure simulated range, as demonstrated in Fig. 6. This value is much closed to the chromatographic data from platform A in Tab. 1 where $k=1,275$.

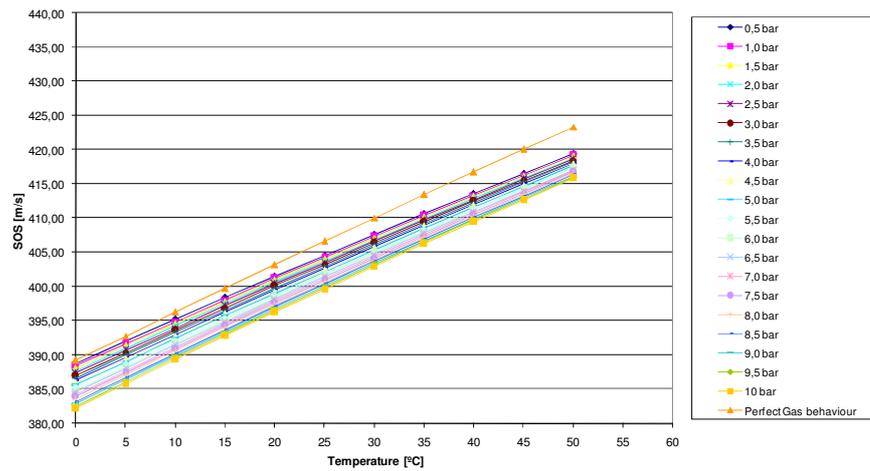


Figure 7 – Simulation of speed of sound - SOS for gas chromatography from platform A and perfect gas approach

Figure 7 shows the behavior of speed of sound: those simulated by AGA-10 and considering complete gas composition at different pressures and other considering perfect gas behavior which is given by classical formula Eq. (5), which is independent of pressure.

$$c_{perfect\ gas} = \sqrt{kRT} \tag{5}$$

In Eq. (5), c is the speed of sound SOS in m/s, k is dimensionless, R unit is kJ/kg.K and T may be given in Kelvin. It should be observed that AGA-10 and perfect gas present almost the same behavior, increasing with temperature and some influence of pressure variation, but lower pressure leads to a behavior more closed to perfect gas.

The differences of speed of sound obtained by AGA-10 and perfect gas simulations are distinguished in Fig. 8 for gas from platform A where can be see a maximum difference of 1.8% at $T=0^{\circ}C$ and $P=10barA$. At $T=25^{\circ}C$ and $P=1barA$, such difference keeps around 0.58%. Such differences are calculated as describe by Eq. (6):

$$dif = \frac{c_{perfect\ gas}(T) - c_{AGA-10}(P,T)}{c_{AGA-10}(P,T)} \times 100\% \tag{6}$$

Figure 9 shows the differences for gas from platform F with presents lowest methane concentration and so, surpassing perfect gas behavior, as can be noticed by differences levels reaching 6% at low temperatures. But at $T=25^{\circ}C$ and $P=1barA$, such difference still remains at 1,05%.

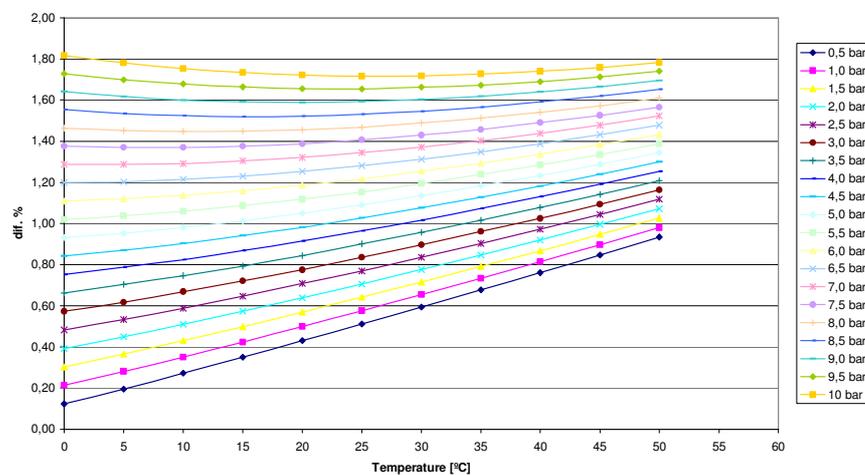


Figure 8 – Differences of speed of sound - SOS data obtained from AGA-10 simulation and considering perfect gas approach for gas chromatography from platform A.

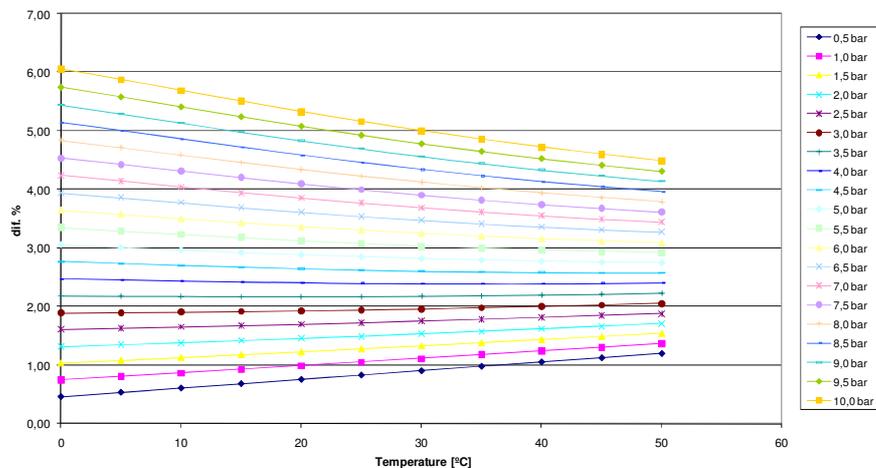


Figure 9 – Differences of speed of sound - SOS data obtained from AGA-10 simulation and considering perfect gas approach for gas chromatography from platform F.

The behavior described using Figs. 4-8 are similar for all chromatographies, but for a matter of synthesis, it is not shown here. Table 2 shows the differences at $T=25^{\circ}\text{C}$ and $P=1\text{ barA}$ and the maximum differences for gas from of platforms A to F. It is included the speed of sound difference of pure methane compared to perfect gas approach, as well. It should be observed that the differences at typical operational state is less than 2%, and the maximum difference is around 6% at 10barA, which is far from a typical operational condition for flares tubes as can be inferred from Fig. 2.

Such results, obtained from distinct sources at distinct gas compositions and operational conditions, leads to confirm that is possible to build software considering perfect gas modeling in order to predict speed of sound in flare lines. It should be observed that, in this case specifically, absolute value of speed of sound is not as significant as the behavior of relative differences, which are similar for a large range of operational conditions. Of course, such approach may not offer the more precise simulation, but certainly, it is faster for computational purposes than computations evaluated using AGA-10 equation.

Generically speaking, the differences in simulations tends to be lower as higher is the methane concentration, which is predictable since methane is the natural gas component presenting lowest critical point, so closer to perfect gas behavior at $T=25^{\circ}\text{C}$ and $P=1\text{ barA}$ than other gas concentrations.

Table 2 – Speed of sound differences between AGA-10 calculations and perfect gas approach for two thermodynamic states: typical operational condition and extreme pressure.

Platform	Difference [%] at 25°C and 1 barA	Maximum differences [%] at 10 barA
pure methane	0,09	0,87
A	0,58	1,82
B	0,59	2,26
C	0,10	2,21
D	0,89	3,11
E	0,87	3,22
F	1,05	6,05

In order to compare SOS simulations and readings, Fig. 10 show some plots for available data for platform A, measured direct by flare ultrasonic flow meter constituted by single acoustic path.

From Fig. 10, it is observed that differences between simulations keep less than 1% while differences between simulations and readings reach averaged values around 13%. It is important to notice that such differences are very stable, presenting averaged standard deviation around 0,22%. Such behavior and respective difference levels are observed for all operational readings available at different platforms, which means the best

SOS evaluation, performed by AGA-10, is very close to perfect gas approach considering flare flows, but both simulations presents a stable difference compared to SOS readings direct from flow measurement system.

Such behavior leads to conclude that, for long term readings it is possible to establish a typical difference between readings and perfect gas approach in order to propose the self-diagnoses software to check ultrasonic flow meter specific for flare metering operations.

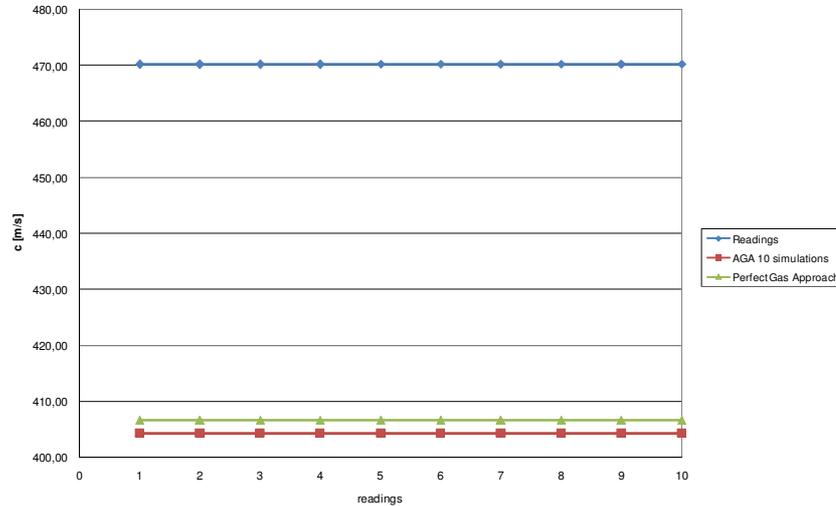


Figure 10 – Plots of operational readings of SOS measured at platform A compared with AGA-10 simulations and perfect gas approach.

Such software is based on the following logic: once the measured speed of sound c , obtained by Eq. (4), is checked against a simulated SOS, it can be said that pulses traveling times t_{AB} and t_{BA} are correct. But, as pointed out by Eq. (3), such pulses traveling times are used to calculate flow velocity v as well. So, it can be inferred that if the traveling times are correct, the flow meter health is satisfactory.

Present study still provides interesting theoretical perspectives about usage of atmospheric wind tunnels to calibrate ultrasonic flow meters for flare applications as well, as pointed out by Hill *et al.* (2002).

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their acknowledgements to Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Bio-Combustíveis – ANP through its human resources grants program – PRH/UFES no. 29 and Petróleo Brasileiro S.A. Company for the cession of its operational data.

6. REFERENCES

- Burnstein, D., Igman, D. and Michlin, Y., 1999, “Correlation Between Gas Molecular Weight, Heating Value and Sonic Speed Under Variable Compositions of Natural Gas”, ISA Transactions, V. 38, pp. 347-359.
- Carlander, C. and Delsing J., 2000, “Installation Effects on an Ultrasonic Flow Meter With Implications for Self Diagnostics”, Flow Measurement and Instrumentation, V. 11, pp. 109-122.
- Eren, H., 1998, “Accuracy in Real Time Ultrasonic Applications and Transit-Time Flow Meters”, Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 568-572, Ottawa, Canada.
- Estela-Uribe, J.F., Jaramillo, J., Salazar, M.A. and Trusler, J.P.M., 2003, “Virial Equations of State for Natural Gas Systems, Fluid Phase Equilibria, V. 204, pp. 169-182.
- FLOWSOLV™, 2009, <http://www.mysolv.com>, accessed at April 2009, SOLV Ltd, Scotland, UK.
- Folkestad, T. and Mylvaganam, K.S., 1989, “Chirp Excitation of Ultrasonic Probe for High Rangeability Gas Flowmetering”, Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, pp.1087-1092.
- Folkestad, T. and Mylvaganam, K.S., 1993, “Chirp Excitation of Ultrasonic Probes and Algorithm for Filtering Transit Times in High-Rangeability Gas Flow Metering”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, V. 40, pp. 193-215.

- Hill, J., Weber, A. and Weber, J., 2002, "Qualification of Ultrasonic Flow Meters for Custody Transfer of Natural Gas Using Atmospheric Air Calibration Facilities", Proceedings of the 20th. North Sea Flow Measurement Workshop, 12p.
- Lansing, J., 2000, "Field Verification Procedures for Ultrasonic Gas Meters", Proceedings of the AGA Operations Conference, Colorado, 12p.
- Lansing, J., 2000, "Smart Monitoring & Diagnostics for Ultrasonic Gas Meters", Proceedings of the 18th. North Sea Flow Measurement Workshop, 15p.
- Lansing, J., 2002, "Benefits of Flow Calibrating Ultrasonic Meters", proceedings of the AGA Operations Conference, Chicago, Il, 10p.
- Lansing, J., 2004, "Ultrasonic Meter Station Design Considerations", proceedings of the AGA Design Considerations of Ultrasonic Flow Meters Conference, 17p.
- Letton, C., Pettigrew, D., Renwick, B. and Watson, J., 1998, "An Ultrasonic Gas Flow Measurement System With Integral Self Checking", Proceedings of the 16th. North Sea Flow Measurement Workshop, 14p.
- Mylvaganam, K.S., 1989, "High-Rangeability Ultrasonic Gas Flow Metering for Monitoring Flare Gas", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, V. 36, pp. 144-149.
- Norli, P., Lunde, P. and Vestrheim, M., 2005, "Investigation of Precision Sound Velocity Measurement Methods as Reference for Ultrasonic Gas Flow Meters", Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 1443-1447.
- Portaria Conjunta ANP/INMETRO N° 1, 2000, "Dispõe sobre Medição de Petróleo e Gás Natural", Diário Oficial da União da República Federativa do Brasil, Brasília DF.
- Raisutis, R., 2006, "Investigation of the Flow Velocity Profile in a Metering Section of an Invasive Ultrasonic Flowmeter", Flow Measurement and Instrumentation, V. 17, pp. 201-206.
- Report AGA N° 9, 1998, "Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters", Ed. American Gas Association, Washington, DC.
- Report AGA N° 10, 2003, "Speed of Sound in Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases", Ed. American Gas Association, Washington, DC.
- Ruppel, C. and Peters, F., 2004, "Effects of Upstream Installations on the Reading of an Ultrasonic Flowmeter", Flow Measurement and Instrumentation, V. 15, pp. 167-177.
- Sakariassen, R., 1997, "On-line Quality Control of Ultrasonic Gas Flow Meters", Proceedings of the 15th. North Sea Flow Measurement Workshop, 14p.
- Yeh, T.T., and Mattingly, G.E., 1997, "Computer Simulations of Ultrasonic Flow Meter Performance in Ideal and Non-Ideal Pipeflows", Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting – FEDSM'97, 6p.
- Yeh, T.T., Espina, P.I. and Osella, S.A., 2001, "An Intelligent Ultrasonic Flow Meter for Improved Flow Measurement and Flow Calibration Facility", Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1741-1746, Budapest, Hungary.

7. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.

APÊNDICE B – RESULTADOS DE TESTES COM TUBO DE PITOT

Conforme discutido neste trabalho, foram realizados diversos testes com o tubo de Pitot servindo de referência, porém observou-se que o mesmo não poderia ser utilizado para tal fim. O motivo para exclusão do Pitot já foi colocado no corpo deste trabalho.

A Tabela B.1 demonstra os resultados de leituras do Pitot, a título de exemplificação, para o arranjo A1 a 10D de distância em relação ao MEVUS (a vazão dos testes foi fixada de acordo com a abertura da válvula, para este caso foram realizadas duas voltas). Os valores de H representam a posição do Pitot, em mm, dentro da tubulação. μ representa a média das leituras e σ representa o desvio padrão.

Tabela B. 1 - Resultados de leitura do Pitot. Arranjo 1, a 10D com 2 voltas de abertura da válvula

Posição	H1 9	H2 10	H3 15	H4 39	H5 54	H6 65	H6 65	H5 54	H4 39	H3 15	H2 10	H1 9
μ	6,220	7,272	4,384	5,713	5,997	6,739	6,025	5,787	6,043	5,553	4,984	6,171
σ	2,665	3,213	2,033	1,859	2,277	2,028	1,664	3,004	2,040	1,962	2,495	1,736
$\frac{\Delta \Delta p}{\Delta p}$	85,70%	88,38%	92,76%	65,09%	75,94%	60,17%	55,25%	103,83%	67,53%	70,66%	100,11%	56,26%

As Tabelas B.2 a B.4 completam os resultados para a distância de 10D com 2 voltas de abertura.

Tabela B. 2 - Resultados de leitura do Pitot. Arranjo 2, a 10D com 2 voltas de abertura da válvula

Posição	H1 9	H2 10	H3 15	H4 39	H5 54	H6 65	H6 65	H5 54	H4 39	H3 15	H2 10	H1 9
μ	7,173	6,884	7,274	6,830	6,836	6,367	7,070	7,202	7,839	5,362	6,854	6,843
σ	2,354	2,038	2,338	2,232	2,187	2,167	2,501	2,822	2,709	1,954	2,749	2,181
$\frac{\Delta \Delta p}{\Delta p}$	65,65%	59,20%	64,28%	65,35%	63,99%	68,05%	70,75%	78,38%	69,11%	72,88%	80,21%	63,75%

Tabela B. 3 - Resultados de leitura do Pitot. Arranjo 3, a 10D com 2 voltas de abertura da válvula

Posição	H1 9	H2 10	H3 15	H4 39	H5 54	H6 65	H6 65	H5 54	H4 39	H3 15	H2 10	H1 9
μ	7,057	6,543	7,810	7,720	5,886	7,830	7,430	7,997	6,684	6,621	6,697	5,982
σ	1,748	1,893	2,282	3,019	2,705	1,969	2,074	3,347	1,801	2,536	2,982	1,617
$\frac{\Delta \Delta p}{\Delta p}$	49,54%	57,87%	58,43%	78,21%	91,91%	50,30%	55,82%	83,71%	53,89%	76,61%	89,05%	54,07%

Tabela B. 4 - Resultados de leitura do Pitot. Arranjo 4, a 10D com 2 voltas de abertura da válvula

Posição	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H6	H5	H4	H3	H2	H1
	9	10	15	39	54	65	65	54	39	15	10	9
μ	5,725	4,749	7,095	7,277	7,890	5,902	5,643	7,261	7,878	6,564	6,365	5,421
σ	2,028	2,150	2,762	2,763	1,975	2,164	1,764	3,022	2,288	2,102	2,252	1,669
$\frac{\Delta \Delta p}{\Delta p}$	70,84%	90,55%	77,85%	75,93%	50,07%	73,32%	62,51%	83,23%	58,09%	64,03%	70,75%	61,56%

A Figura B.1 representa graficamente o valor de $\Delta\Delta p/\Delta p$ em relação à posição do tubo de Pitot dentro da tubulação. Este gráfico demonstra o comportamento instável da medição do tubo de Pitot. Outros testes realizados para diferentes vazões obtiveram o mesmo comportamento.

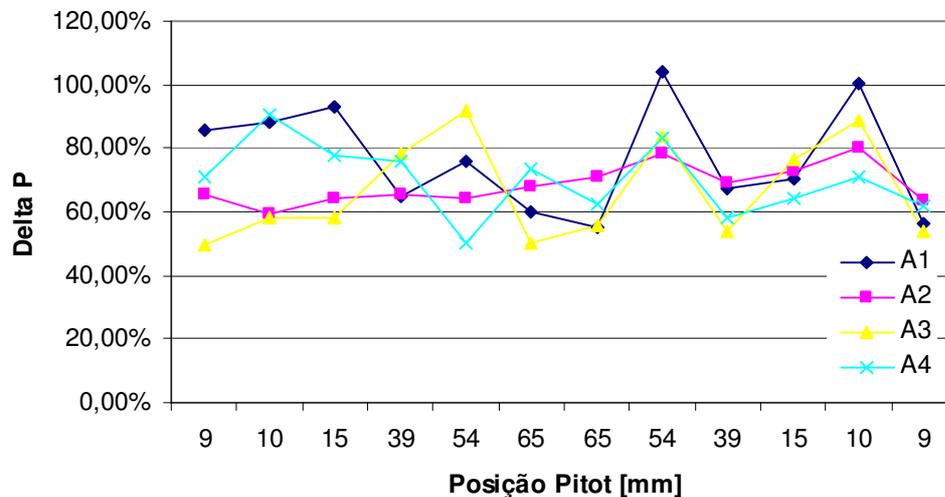


Figura B. 1 – Gráfico do comportamento das medições do Pitot para todos os arranjos a 10D a vazão constante.

APÊNDICE C – RESULTADOS EXPERIMENTAIS MEVUS

Este apêndice contém os dados coletados por uma bateria de testes do MEVUS.

Tabela C. 1 - Velocidades coletadas para os 4 arranjos a diferentes distâncias. Vazão: 100m³/h
(continua)

Acidente Distância	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
	5D				10D				20D			
μ	7,301	7,093	7,183	7,265	7,202	7,158	7,244	7,161	7,092	7,134	7,335	7,159
σ	0,114	0,081	0,036	0,097	0,059	0,062	0,035	0,042	0,047	0,172	0,027	0,028
$\Delta v/v$	1,56%	1,14%	0,50%	1,33%	0,82%	0,87%	0,48%	0,58%	0,67%	2,41%	0,37%	0,39%
Leituras												
1	7,36	7,17	7,17	7,08	7,22	7,11	7,28	7,15	7,12	7,27	7,35	7,15
2	7,31	7,16	7,26	7,11	7,26	7,11	7,30	7,11	7,13	7,16	7,33	7,13
3	7,40	7,18	7,28	7,08	7,27	7,11	7,27	7,13	7,12	7,12	7,32	7,10
4	7,46	7,18	7,25	7,15	7,30	7,12	7,27	7,13	7,12	7,06	7,33	7,13
5	7,50	7,18	7,20	7,20	7,30	7,13	7,22	7,15	7,13	7,02	7,32	7,13
6	7,55	7,21	7,23	7,23	7,30	7,12	7,26	7,18	7,15	6,97	7,36	7,16
7	7,51	7,18	7,22	7,28	7,28	7,12	7,27	7,18	7,05	6,97	7,35	7,17
8	7,48	7,11		7,23	7,28	7,11	7,27	7,18	7,02	6,90	7,37	7,16
9	7,36	7,13	7,20	7,20	7,23	7,11	7,30	7,16	7,03	6,88	7,38	7,16
10	7,30	7,13	7,23	7,26	7,22	7,11	7,30	7,16	7,06	6,91	7,37	7,15
11	7,36	7,13	7,22	7,28	7,21	7,13	7,30	7,15	7,13	6,95	7,37	7,13
12	7,32	7,07	7,21	7,27	7,17	7,13	7,26	7,11	7,13	7,15	7,37	7,11
13	7,36	7,13	7,23	7,30	7,17	7,15	7,26	7,11	7,12	7,27	7,35	7,17
14	7,45	7,13		7,28	7,17	7,23	7,25	7,13	7,11	7,08	7,37	7,13
15	7,43	7,13	7,17	7,36	7,15	7,23	7,26	7,13	7,11	7,02	7,37	7,16
16	7,30	7,15	7,18	7,38	7,16	7,23	7,25	7,11	7,07	7,01	7,40	7,11
17	7,26	7,15	7,17	7,31	7,13	7,20	7,23	7,12	7,08	6,95	7,38	7,13
18	7,25	7,10	7,16	7,18	7,13	7,17	7,17	7,12	7,05	6,96	7,40	7,13
19	7,27	7,07	7,13	7,17	7,13	7,18	7,17	7,11	7,11	7,03	7,35	7,17
20	7,46	7,05	7,13	7,18	7,12	7,16	7,17	7,10	7,08	7,07	7,35	7,20
21	7,53	7,00	7,16	7,23	7,12	7,17	7,21	7,12	7,12	6,98	7,32	7,21
22	7,51	7,02	7,18	7,32	7,13	7,22	7,23	7,17	7,10	6,98	7,32	7,20
23	7,50	7,02	7,16	7,37	7,20	7,25	7,30	7,17	7,07	6,96	7,33	7,17
24	7,43	7,00	7,16	7,43	7,27	7,25	7,28	7,17	7,06	6,95	7,33	7,18
25	7,45	7,06	7,13	7,43	7,27	7,22	7,27	7,18	7,10	6,97	7,32	7,16
26	7,42	7,06	7,17	7,41	7,28	7,18	7,30	7,17	7,07	7,13	7,36	7,13
27	7,46	7,12	7,13	7,37	7,25	7,18	7,27	7,12	7,13	7,18	7,35	7,20
28	7,40	7,20	7,13	7,32	7,23	7,18	7,25	7,12	7,13	7,23	7,33	7,16
29	7,36	7,13	7,17	7,26	7,21	7,15	7,25	7,13	7,20	7,26	7,35	7,18
30	7,35	6,95	7,17	7,22	7,22	7,21	7,25	7,13	7,18	7,27	7,33	7,17
31	7,30	6,95	7,20	7,30	7,26	7,25	7,25	7,18	7,16	7,25	7,35	7,15
32	7,27	6,96	7,21	7,36	7,27	7,26	7,22	7,18	7,13	7,16	7,36	7,13
33	7,32	7,06	7,17	7,33	7,22	7,26	7,23	7,21	7,11	7,01	7,28	7,13
34	7,35	7,20		7,31	7,31	7,30	7,22	7,22	7,06	7,00	7,30	7,13
35	7,33	7,22		7,28	7,22	7,28	7,27	7,22	7,06	7,02	7,36	7,13
36	7,35	7,23		7,27	7,21	7,18	7,27	7,22	7,10	7,05	7,36	7,13
37	7,35	7,18		7,26	7,22	7,17	7,25	7,20	7,07	7,18	7,35	7,21
38	7,30	7,22	7,21	7,26	7,23	7,20	7,22	7,20	7,07	7,31	7,36	7,16
39	7,28	7,22	7,20	7,31	7,20	7,21	7,25	7,18	7,03	7,21	7,33	7,16
40	7,27	7,20		7,27	7,16	7,18	7,25	7,18	7,05	7,23		7,16
41	7,23	7,26		7,27	7,15	7,20	7,22	7,18	7,02	7,06	7,31	7,18
42	7,31	7,31	7,17	7,22	7,13	7,20	7,25	7,18	7,00	7,03	7,33	7,17
43	7,37	7,16	7,18	7,20	7,11	7,15	7,27	7,18	6,98	7,00	7,33	7,20
44	7,43	7,00		7,21	7,08	7,06	7,28	7,17	7,03	6,98	7,35	7,13
45	7,35	7,02	7,12	7,23	7,17	7,08	7,28	7,16	7,05	7,13	7,33	7,17
46	7,42	7,00	7,12	7,27	7,25	7,03	7,26	7,17	7,07	7,13	7,32	7,13
47	7,32	6,93		7,31	7,27	7,07	7,25	7,20	7,10	7,12	7,30	7,15
48	7,31	6,97		7,33	7,22	7,07	7,28	7,22	7,10	6,92	7,32	7,15
49	7,36	6,97	7,12	7,36	7,32	7,12	7,27	7,25	7,07	7,12	7,30	7,13
50	7,42	7,01	7,15	7,25	7,26	7,07	7,30	7,22	7,05	6,93	7,40	7,12
51	7,33	7,08		7,17	7,22	7,10	7,27	7,20	7,07	6,97	7,40	7,13
52	7,15	7,05		7,13	7,11	7,12	7,25	7,17	7,06	6,92	7,36	7,12
53	7,16	7,16	7,18	7,13	7,12	7,13	7,27	7,16	7,02	6,93	7,35	7,10
54	7,08	7,20	7,16	7,13	7,13	7,20	7,26	7,18	7,06	6,87	7,36	7,12
55	7,10	7,18		7,23	7,20	7,22	7,27	7,16	7,03	7,03	7,33	7,20
56	7,08	7,15	7,12	7,25	7,22	7,22	7,30	7,18	7,03	7,02	7,33	7,16
57	7,20	7,15		7,31	7,23	7,31	7,30	7,16	7,03	7,03	7,33	7,18
58	7,21	7,15		7,30	7,25	7,26	7,26	7,18	7,00	7,01	7,32	7,16
59	7,27	7,11		7,35	7,26	7,30	7,22	7,21	7,05	7,08	7,30	7,12
60	7,30	7,11	7,15	7,37	7,23	7,37	7,18	7,21	7,05	7,17	7,33	7,13

Tabela C. 2 - Velocidades coletadas para os 4 arranjos a diferentes distâncias. Vazão: 150m³/h
(continua)

Acidente Distância	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
	5D				10D				20D			
μ	10,984	10,722	10,802	10,687	10,863	10,692	10,829	10,841	10,865	10,741	10,798	10,755
σ	0,138	0,119	0,057	0,120	0,119	0,078	0,050	0,061	0,100	0,185	0,030	0,044
$\Delta v/v$	2,51%	2,22%	1,06%	2,25%	2,19%	1,47%	0,93%	1,13%	1,84%	3,45%	0,55%	0,82%
Leituras												
1	10,93	10,66	10,77	10,62	10,92	10,62	10,87	10,82	10,71	10,57	10,78	10,73
2	10,96	10,76	10,82	10,62	10,90	10,61	10,90	10,80	10,78	10,42	10,77	10,78
3	10,88	10,85	10,83	10,63	10,88	10,65	10,81	10,76	10,78	10,18	10,77	10,78
4	10,83	10,92	10,80	10,70	10,81	10,62	10,82	10,75	10,77	10,27	10,78	10,78
5	10,86	10,97	10,80	10,81	10,95	10,63	10,82	10,68	10,70	10,66	10,78	10,78
6	10,91	10,92	10,82	10,90	11,06	10,67	10,85	10,65	10,66	10,72	10,81	10,81
7	10,97	10,96	10,85	10,92	11,03	10,66	10,83	10,71	10,68	10,81	10,81	10,80
8	11,02	10,95	10,76	10,86	11,06	10,67	10,90	10,76	10,73	10,93		10,76
9	11,16	10,93	10,75	10,97	11,05	10,63	10,87	10,78	10,68	10,92	10,85	10,75
10	11,16	10,90	10,76	10,95	10,98	10,62	10,90	10,90	10,81	10,95	10,83	10,76
11	11,11	10,83	10,88	10,92	10,98	10,57	10,87	10,86	10,88	10,98	10,86	10,75
12	11,15	10,78	10,86	10,91	10,95	10,56	10,83	10,83	10,92	10,98	10,83	10,77
13	11,12	10,72	10,82	10,88	10,95	10,60	10,82	10,86	10,95	10,95	10,82	10,75
14	10,95	10,71	10,85	10,82	11,05	10,60	10,78	10,83	10,95	10,88	10,87	10,78
15	10,90		10,82	10,83	11,05	10,60	10,78	10,83	11,00	10,76		10,76
16	10,76	10,67	10,82	10,73	11,01	10,63	10,76	10,83	10,92	10,66	10,82	10,80
17	10,66	10,67	10,91	10,73	10,95	10,67	10,76	10,83	11,02	10,58	10,83	10,86
18	10,61	10,66	10,83	10,67	11,02	10,67	10,77	10,83	11,05	10,50	10,82	10,85
19	10,62	10,70	10,78	10,67	11,01	10,68	10,76	10,81	11,05	10,45	10,78	10,85
20	10,67	10,66	10,88	10,78	10,88	10,66	10,81	10,80	10,92	10,61	10,72	10,86
21	10,83	10,65	10,88	10,78	10,87	10,68	10,78	10,82	10,90	10,42	10,73	10,82
22	11,02	10,77	10,90	10,66	10,87	10,71	10,83	10,86	10,87	10,48	10,75	10,86
23	11,28	10,87	10,88	10,68	10,78	10,75	10,81	10,85	10,87	10,47	10,77	10,86
24	11,30	10,95	10,91	10,67	10,78	10,76	10,82	10,88	10,87	10,52	10,80	10,80
25	11,26	10,95	10,80	10,61	10,88	10,75	10,85	10,86	10,90	10,62	10,81	10,78
26	11,17	10,95	10,87	10,60	10,97	10,77	10,85	10,86	10,92	10,88	10,76	10,77
27	11,11	10,80	10,83	10,62	11,02	10,76	10,81	10,82	10,95	11,05	10,78	10,72
28	11,03	10,75	10,80	10,62	11,06	10,73	10,81	10,80	10,91	11,01	10,78	10,72
29	11,06	10,73	10,77	10,66	11,15	10,70	10,80	10,77	10,86	11,02	10,77	10,72
30	11,02	10,68	10,85	10,62	11,05	10,71	10,78	10,76	10,82	10,96	10,78	10,75
31	10,98	10,65	10,76	10,68	10,95	10,71	10,78	10,76	10,78	10,95	10,81	10,68
32	11,03	10,71	10,73	10,75	10,88	10,73	10,77	10,76	10,77	10,95	10,81	10,77
33	11,00	10,66	10,75	10,75	10,92	10,83	10,78	10,75	10,78	10,95	10,80	10,75
34	10,98	10,65	10,78	10,67	10,86	10,86	10,81	10,78	10,77	10,93	10,81	10,78
35	10,95	10,65	10,78	10,66	10,93	10,78	10,81	10,81	10,87	10,86	10,80	10,78
36	11,05	10,72	10,80	10,71	10,90	10,86	10,83	10,78	10,91	10,65	10,80	10,78
37	10,98	10,75	10,76	10,61	10,93	10,77	10,86	10,78	10,87	10,57	10,78	10,78
38	11,01	10,75	10,75	10,67	10,91	10,72	10,81	10,83	10,87	10,53	10,81	10,75
39	10,98	10,78	10,72	10,61	10,85	10,68	10,76	10,85	10,91	10,56	10,80	10,75
40	11,03	10,77	10,77	10,61	10,71	10,76	10,75	10,83	10,93	10,57	10,82	10,77
41	11,02	10,68	10,78	10,60	10,63	10,66	10,78	10,83	10,95	10,62	10,81	10,75
42	11,00	10,68	10,85	10,62	10,62	10,67	10,76	10,87	10,96	10,56	10,78	10,78
43	10,97	10,57	10,81	10,53	10,63	10,63	10,80	10,80	11,01	10,38	10,78	10,80
44	10,98	10,56	10,85	10,70	10,72	10,63	10,78	10,77	11,01	10,36	10,78	10,80
45	10,75	10,53	10,87	10,77	10,71	10,63	10,78	10,81	10,98	10,43	10,85	10,78
46	10,80	10,55	10,88	10,78	10,72	10,62	10,81	10,81	10,78	10,41	10,86	10,80
47	10,83	10,55	10,87	10,77	10,73	10,60	10,88	10,83	10,76	10,63	10,86	10,73
48	10,75	10,55	10,87	10,91	10,56	10,58	10,90	10,85	10,60	10,62	10,81	10,76
49	10,78	10,60	10,76	10,91	10,52	10,58	10,87	10,87	10,43	10,81	10,78	10,77
50	10,77	10,67	10,76	10,73	10,53	10,61	10,91	10,90	10,58	10,80	10,77	10,75
51	10,83	10,63	10,68	10,85	10,47	10,61	10,83	10,90	10,73	10,78	10,77	10,72
52	10,95	10,53	10,75	10,73	10,45	10,61	10,88	10,92	10,88	10,77	10,76	10,78
53	11,01	10,52	10,76	10,68	10,66	10,56	10,86	10,91	10,88	10,91	10,77	10,78
54	10,97	10,51	10,75	10,63	10,75	10,61	10,88	10,95	10,91	10,95	10,76	10,71
55	10,95	10,58	10,78	10,63	10,70	10,57	10,87	10,92	10,91	10,85	10,75	10,76
56	10,97	10,66	10,93	10,62	10,82	10,65	10,87	10,90	10,95	10,78	10,82	10,75
57	10,97	10,70	10,86	10,63	10,88	10,66	10,81	10,83	10,95	10,57	10,81	10,76
58	10,98	10,70	10,86	10,47	10,92	10,76	10,82	10,81	10,97	10,57	10,87	10,75
59	11,05	10,65	10,88	10,57	10,92	10,78	10,83	10,87	10,95	10,51	10,88	10,73
60	11,02	10,66	10,87	10,55	10,93	10,77	10,87	10,91	10,88	10,62	10,80	10,75

Tabela C.2 - Velocidades coletadas para os 4 arranjos a diferentes distâncias. Vazão: 150m³/h (conclusão)

Acidente Distância	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
	5D				10D				20D			
61	10,95	10,73	10,80	10,63	10,92	10,78	10,83	10,90	10,90	10,70	10,78	10,72
62	10,95	10,86	10,82	10,67	10,90	10,78	10,82	10,83	10,88	10,70	10,77	10,73
63	10,96	10,85	10,78	10,68	10,86	10,77	10,80	10,82	10,85	10,63	10,78	10,72
64	10,91	10,95	10,78	10,70	10,85	10,68	10,73	10,73	10,85	10,47	10,78	10,73
65	10,95	11,03	10,78	10,77	10,82	10,66	10,71	10,78	10,90	10,51	10,77	10,70
66	10,90	11,02	10,77	10,78	10,81	10,70	10,78	10,85	10,88	10,65	10,81	10,71
67	10,87	10,98	10,73	10,88	10,80	10,67	10,80	10,87	10,92	10,75	10,81	10,68
68	10,90	10,87	10,71	10,87	10,83	10,67	10,88	10,87	10,83	10,72	10,80	10,72
69	10,91		10,70	10,85	10,86	10,63	10,88	10,87	10,87	10,68	10,78	10,70
70	10,83	10,75	10,67	10,80	10,85	10,56	10,90	10,88	10,91	10,56	10,78	10,73
71	10,91		10,71	10,71	10,82	10,53	10,85	10,90	10,91	10,60	10,76	10,77
72	10,96	10,66	10,71	10,76	10,82	10,56	10,86	10,92	10,86	10,58	10,76	10,71
73	10,98	10,65	10,73	10,75	10,82	10,53	10,85	10,91	10,88	10,70	10,76	10,71
74	11,11	10,68	10,77	10,68	10,78	10,58	10,87	10,95	10,85	10,72	10,80	10,75
75	11,15	10,97	10,76	10,68	10,78	10,58	10,91	10,90	10,85	10,68	10,81	10,75
76	11,13	10,88	10,72	10,67	10,78	10,61	10,90	10,92	10,93	10,77	10,86	10,78
77	11,20	10,88	10,78	10,62	10,73	10,63	10,87	10,91	10,95	10,63	10,83	10,78
78	11,21	10,73	10,83	10,62	10,70	10,60	10,92	10,90	10,92	10,71	10,82	10,80
79	11,11	10,75	10,86	10,57	10,72	10,56	10,91	10,85	10,86	10,75	10,75	10,82
80	11,13	10,70	10,90	10,61	10,76	10,60	10,87	10,95	10,83	10,81	10,76	10,83
81	11,10	10,76	10,95	10,73	10,80	10,63	10,88	10,91	10,85	10,95	10,75	10,83
82	11,02	10,71	10,92	10,73	10,91	10,67	10,85	10,90	10,78	10,95	10,78	10,82
83	11,08	10,72	10,83	10,73	10,91	10,68	10,90	10,95	10,81	10,80	10,81	10,78
84	11,12	10,71	10,91	10,66	10,95	10,73	10,88	10,95	10,85	10,92	10,80	10,75
85	11,12	10,63	10,78	10,55	10,95	10,72	10,87	10,91	10,82	10,78	10,81	10,66
86	11,21	10,62	10,73	10,57	10,90	10,76	10,87	10,95	10,85	10,78	10,83	10,68
87	11,21	10,66	10,73	10,62	10,87	10,73	10,83	10,93	10,86	10,86	10,82	10,65
88	11,22	10,62	10,76	10,60	10,88	10,72	10,81	10,88	10,86	10,90	10,78	10,70
89	11,02	10,60	10,73	10,62	10,88	10,68	10,81	10,87	10,95	10,87	10,78	10,71
90	10,95	10,62	10,77	10,66	10,85	10,75	10,82	10,83	10,98	10,90	10,80	10,72
91	10,96	10,75	10,82	10,66	10,80	10,75	10,82	10,85	11,03	10,88	10,78	10,75
92	10,92	10,72	10,81	10,63	10,86	10,77	10,82	10,81	10,96	10,95	10,76	10,73
93	10,87	10,70	10,87	10,67	10,86	10,78	10,73	10,83	10,92	10,97	10,80	10,75
94	10,98	10,66	10,86	10,78	10,83	10,81	10,75	10,81	10,93	10,91	10,80	10,73
95	11,12	10,61	10,83	10,55	10,83	10,80	10,76	10,77	10,93	10,93	10,83	10,78
96	11,03	10,62	10,81	10,61	10,87	10,75	10,78	10,68	10,96	10,85	10,81	10,72
97	11,06	10,63	10,88	10,68	10,92	10,76	10,78	10,68	11,05	10,82	10,83	10,70
98	10,96	10,71	10,81	10,51	11,00	10,77	10,77	10,78	11,05	10,75	10,82	10,72
99	10,98		10,75	10,43	10,98	10,71	10,76	10,73	11,03	10,82	10,82	10,70
100	10,95	10,70	10,78	10,51	11,00	10,68	10,78	10,80	11,03	10,63	10,77	10,68
101	11,02	10,70	10,78	10,61	10,95	10,67	10,82	10,81	11,01	10,78	10,78	10,71
102	11,02	10,67	10,80	10,66	10,83	10,70	10,83	10,82	10,93	10,72	10,80	10,71
103	11,01	10,67	10,80	10,65	10,88	10,73	10,82	10,81	10,83	10,77	10,78	10,73
104	11,15	10,71	10,82	10,78	10,88	10,78	10,80	10,81	10,83	10,76	10,78	10,76
105	11,16	10,68	10,86	10,83	10,80	10,80	10,78	10,85	10,87	10,88	10,83	10,81
106	10,96	10,70	10,83	10,88	10,78	10,83	10,72	10,87	10,81	10,88	10,82	10,81
107	10,85		10,76	10,92	10,66	10,81	10,77	10,88	10,86	10,82	10,80	10,80
108	10,82	10,70	10,73	10,87	10,66	10,77	10,81	10,90	10,82	10,93	10,78	10,76
109	10,78		10,82	10,83	10,67	10,70	10,90	10,93	10,78	10,88	10,78	10,75
110	10,75	10,65	10,78	10,68	10,91	10,75	10,88	10,92	10,75	10,60	10,81	10,75
111	10,65	10,68	10,77	10,56	10,91	10,73	10,92	10,86	10,73	10,46	10,81	10,71
112	10,87	10,62	10,78	10,52	10,95	10,78	10,90	10,85	10,73	10,47	10,83	10,71
113	11,00	10,62	10,76	10,51	10,96	10,78	10,90	10,90	10,72	10,58	10,81	10,71
114	11,03	10,65	10,81	10,50	10,96	10,78	10,91	10,93	10,68	10,53	10,83	10,68
115	11,02	10,62	10,78	10,55	10,95	10,77	10,90	10,88	10,72	10,73	10,80	10,70
116	11,06	10,70	10,77	10,51	10,93	10,76	10,90	10,83	10,70	10,92	10,82	10,75
117	11,10	10,77	10,77	10,57	10,95	10,73	10,86	10,82	10,65	11,07	10,81	10,75
118	10,98	10,76	10,75	10,56	10,87	10,78	10,82	10,78	10,75	11,06	10,81	10,76
119	11,05	10,65	10,77	10,51	10,83	10,78	10,85	10,78	10,80	11,03	10,78	10,73
120	11,07	10,61	10,78	10,48	10,78	10,77	10,78	10,80	10,78	11,03	10,81	10,75
121	11,11	10,65	10,82	10,46	10,85	10,77	10,82	10,80	10,90	11,02	10,82	10,70
122				11,16					10,90			

ANEXO A – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO N.º 48/2009



Pág. 1/2
RM N.º 048/09

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO - CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEM
LABORATÓRIO DE METROLOGIA

RELATÓRIO DE MEDIÇÃO N.º 048/09

OBJETO: TUBO DE PITOT

Interessado:	LABORATÓRIO DE MÁQUINAS DE FLUXO
Objeto:	Tubo de Pitot
Data da medição:	24/08/09
Fabricante:	Kimo Instruments
Código:	Kimo 120

1. OBJETIVO

Trata o presente relatório de apresentar os resultados da inspeção dimensional, realizada em um Tubo de Pitot Kimo 120.

2. PROCEDIMENTO

A Foto 1 mostra o Tubo de Pitot inspecionado com a indicação das seções onde foram realizadas as medições do diâmetro externo.

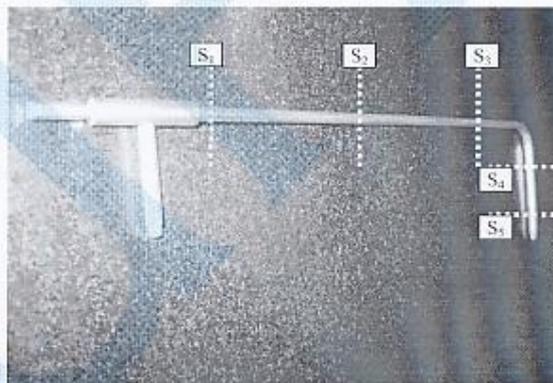


Foto 1 – Tubo de Pitot e as seções de medição dos diâmetros externos.

O diâmetro externo do tubo foi obtido a partir de quatro medições em cada uma das seções indicadas na Foto 1. O diâmetro externo do tubo foi determinado pela média aritmética das medições realizadas.