



Gabriel Apolinário Alexandre Ferreira

**Caracterização metrológica de um medidor clamp-on para
calibração “in situ” de medidor de vazão em escoamento
em desenvolvimento**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Metrologia (Área de concentração:
Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Mauricio Nogueira Frota
Co-orientador: Prof. Alcir de Faro Orlando

Rio de Janeiro
Dezembro de 2015



Gabriel Apolinário Alexandre Ferreira

**Caracterização metrológica de um medidor clamp-on para
calibração “in situ” de medidor de vazão em escoamento
em desenvolvimento**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Aprovada pela
Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Mauricio Nogueira Frota

Orientador

Programa de Pós-graduação em Metrologia - PUC-Rio

Prof. Alcir de Faro Orlando

Co-Orientador

Programa de Pós-graduação em Metrologia - PUC-Rio

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Programa de Pós-graduação em Metrologia - PUC-Rio

Prof. Elisabeth Costa Monteiro

Programa de Pós-graduação em Metrologia - PUC-Rio

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do
Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de dezembro de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Gabriel Apolinário Alexandre Ferreira

Graduado em Engenharia Mecatrônica pela Universidade Federal de Uberlândia em 2010. Engenheiro no setor de Óleo e Gás com experiência na área de metrologia, qualidade e gestão de ativos.

Ficha Catalográfica

Alexandre Ferreira, Gabriel Apolinário

Caracterização metrológica de um medidor clamp-on para calibração “in situ” de medidor de vazão em escoamento em desenvolvimento / Gabriel Apolinário Alexandre Ferreira; orientador: Mauricio Nogueira Frota; co-orientador: Alcir de Faro Orlando. – 2015.

88 f. : il. (color.); 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, 2015.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia. 3. Clamp-on. 4. Vazão. 5. Padrão de medição itinerante. 6. Calibração. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Frota, Mauricio Nogueira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD: 398.1

À minha família.

Agradecimentos

Indubitavelmente, agradeço ao meu irmão, à minha mãe e ao meu pai por me formarem como ser humano.

Aos meus orientadores, Dr. Alcir de Faro Orlando e Dr. Mauricio Nogueira Frota, pela paciência, sapiência e confiança até o último momento.

Ao Evemero Callegario, pelo precioso suporte técnico na execução dos experimentos.

À Petrobras, por estimular a produção e desenvolvimento do conhecimento através do suporte financeiro e infraestrutura.

À equipe administrativa do Programa de Pós Graduação em Metrologia da PUC-Rio, Márcia Ribeiro e Paula Guimarães por todo o suporte necessário.

Aos meu amigos José Daniel e Victor Andrade, por terem sido fiéis e fundamentais no apoio que uma amizade exige.

Aos meus chefes Hércules Medeiros e Maurício Casado, por incentivarem a minha qualificação profissional e que, principalmente, pudessem se esforçar para me liberar das minhas atribuições profissionais.

E finalmente a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Alexandre Ferreira, Gabriel Apolinário; Frota, Mauricio Nogueira; Orlando, Alcir de Faro. **Caracterização metrológica de um medidor clamp-on para calibração “in situ” de medidor de vazão em escoamento em desenvolvimento.** Rio de Janeiro, 2015. 88p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Medidores do tipo *clamp-on*, com trajetória ultrassônica única, são muito sensíveis ao perfil de velocidade do escoamento para medição de vazão e devem ser utilizados, para maior confiabilidade metrológica, quando o escoamento está completamente desenvolvido. Esta não é a condição normal de utilização em plataformas de petróleo, onde pequenos trechos retos estão normalmente disponíveis. Estudos numérico e experimental comprovaram que para trajetórias ultrassônicas simétricas, a média aritmética dos valores indicados pelo medidor de vazão praticamente independe dos componentes não-axiais de velocidade do escoamento em desenvolvimento em trechos retos com comprimento superior a dez diâmetros da tubulação. A trajetória única foi assegurada por meio de um dispositivo mecânico introduzido que posiciona o plano dos sensores em ângulos de 45° em relação à horizontal, assim permitindo medições em outras trajetórias ultrassônicas, procedimento que mostrou minimizar a incerteza associada à medição de vazão. A caracterização metrológica deste procedimento de medição, qualifica o medidor para ser utilizado como padrão itinerante em calibração “in situ” de medidores de vazão, o que evita a sua retirada para calibração em laboratório. A metodologia alternativa de calibração proposta foi validada experimentalmente em *loop* especialmente construído na PUC-Rio para reproduzir as condições de medição em campo.

Palavras-chave

Metrologia; *clamp-on*; vazão; padrão de medição itinerante; calibração

Abstract

Alexandre Ferreira, Gabriel Apolinário; Frota, Mauricio Nogueira (Advisor); Orlando, Alcir de Faro (Co-advisor). **Metrological characterization of a clamp-on meter for “in situ” calibration of flow meter operating under developing flow conditions.** Rio de Janeiro, 2015. 88p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Clamp-on type flow meters, with one single ultrasonic path, are very sensitive to the velocity profile in flow rate measurement and must be used, for greater metrological reliability, when the flow is completely developed. This is not the normal condition of use on oil production platforms, where small straight pipelines are usually available. Numerical and experimental studies have shown that for symmetric ultrasonic paths, the arithmetic mean of the values indicated by the flow meter is practically independent of non-axial velocity components in developing flows in straight pipeline equivalent lengths larger than ten pipeline diameters. The single path was secured by means of an introduced mechanical device that positions the sensor plane every 45° angle to the horizontal, thus allowing measurements at other ultrasonic paths, procedure that showed to minimize the uncertainty associated with the flow measurement. The metrological characterization of this measurement procedure, qualifies the meter to be used as a “in situ” traveling calibration standard of flow meters, which prevents its removal for calibration in laboratory. The alternative methodology calibration proposed was validated experimentally in loop especially built at PUC-Rio to reproduce the field measurement conditions.

Keywords

Metrology; *clamp-on*; flow rate; travelling measurement standard; calibration

Sumário

1	Introdução	16
1.1.	Definição do problema da pesquisa	16
1.2.	Objetivos: geral e específicos	19
1.3.	Estrutura da dissertação	19
2	Fundamentos teóricos da medição ultrassônica	20
2.1.	Tecnologias de medição ultrassônica de vazão	21
2.2.	Medição ultrassônica de vazão por tempo de trânsito	22
2.3.	Arranjo e instalação do transdutor	23
2.4.	Medidor ultrassônico de vazão do tipo <i>clamp-on</i>	25
2.5.	Parâmetros de influência na medição de vazão por <i>clamp-on</i>	26
2.6.	Calibração de medidores de vazão	27
3	Erro de medição de vazão	30
3.1.	Medição de vazão com medidores ultrassônicos <i>clamp-on</i>	30
3.2.	Trajectoria ultrassônica como função da velocidade do escoamento	33
3.3.	Velocidade média do escoamento	34
3.4.	Erro associado ao medidor (trajetória única)	35
3.5.	Erro associado ao medidor (trajetórias defasadas de 180°)	36
3.6.	Erro associado ao medidor (trajetórias defasadas de 90°)	37
4	Metodologia de execução e resultados	39
4.1.	Bancada de testes - circuito hidráulico	39
4.2.	Execução do experimento	40
4.2.1.	Parâmetros de configuração dos equipamentos	41
4.2.2.	Montagem dos transdutores do <i>clamp-on</i>	42
4.2.3.	Tratamento dos dados e estimativa da incerteza da calibração	43
4.3.	Resultados da simulação numérica	44
4.3.1.	Estimativa do erro associado ao medidor ultrassônico	44
4.3.1.1.	Estimativa do erro associado ao medidor ultrassônico (180°)	47

4.3.1.2. Estimativa do erro associado ao medidor ultrassônico (90°)	48
4.3.2. Comparação entre erros do medidor (trajetórias de 90° e 180°)	48
4.4. Resultados experimentais	49
4.4.1. Resultados para trajetória única	49
4.4.2. Resultados para trajetórias combinadas defasadas de 180°	53
4.4.3. Resultados para trajetórias combinadas defasadas de 90°	57
4.4.4. Calibração do medidor de vazão Krohne	59
4.4.4.1. Avaliação metrológica para configuração C2 do <i>clamp-on</i>	60
4.4.4.2. Avaliação metrológica para configuração D1 do <i>clamp-on</i>	61
4.4.5. Comparação das calibrações do medidor Krohne	63
4.4.6. Conformidade com API MPMS 4.5	63
4.4.7. Utilização do <i>clamp-on</i> como padrão itinerante	65
 5 Conclusões e recomendações	 67
5.1. Conclusões	67
5.2. Recomendações para desdobramentos do trabalho	68
 Referências bibliográficas	 69
 Anexo A: Resultados das medições: Configuração C2 (12D)	 73
 Anexo B: Resultados das medições: Configuração D1 (12D)	 75
 Anexo C: Resultados das medições: Configuração D1 (35D)	 77
 Anexo D: Certificado de calibração do Caldon 280Ci	 80

Lista de figuras

Figura 1 - Medidor do tipo <i>clamp-on</i> modelo Fluxus F601 da Flexim	18
Figura 2 - Técnicas de medição de vazão por feixes ultrassônicos	21
Figura 3 - Medição da velocidade do escoamento pelo tempo de trânsito direto	23
Figura 4 - Sensores invasivos, não-invasivos, intrusivos e não-intrusivos [15]	23
Figura 5 - Representações de transdutor em contato com o fluido	24
Figura 6 - Arranjos <i>clamp-on</i> (a) e medidor <i>clamp-on</i> Sitrans (b)	24
Figura 7 - Transmissão direta (à esquerda) e indireta (à direita)	24
Figura 8 - Refração em diferentes meios de propagação acústica [15]	25
Figura 9 - Trajetória do feixe ultrassônico: montagem indireta do <i>clamp-on</i>	26
Figura 10 - Arranjo da tubulação do circuito hidráulico no LAME	31
Figura 11 - Medição de dois feixes ultrassônicos	32
Figura 12 - Vista à jusante da tubulação e nomenclatura dos ângulos	32
Figura 13 - Esquema da vista frontal e vista lateral direita do tubo	33
Figura 14 - Esquema geral de instalação do circuito hidráulico	39
Figura 15 - Variação axial da distância entre os transdutores (Lei de Snell)	42
Figura 16 - Fixação e alinhamento dos transdutores [32]	43
Figura 17 - Trecho do certificado de calibração do Caldon	44
Figura 18 - Estimativa do erro percentual para trajetória única	47
Figura 19 - Estimativa do erro percentual para duas trajetórias (180°)	47
Figura 20 - Estimativa do erro percentual para duas trajetórias (90°)	48
Figura 21 - Erro sistemático para trajetória única (12D)	51
Figura 22 - Erro sistemático para trajetória única (35D)	51
Figura 23 - <i>Meter Factor</i> para trajetória única	52
Figura 24 - Incerteza para trajetória única	52
Figura 25 - Erro sistemático para duas trajetórias (180° e C2-12D)	54
Figura 26 - Erro sistemático para duas trajetórias (180° e D1-12D)	54
Figura 27 - Erro sistemático para duas trajetórias (180° e D1-35D)	55
Figura 28 - Incerteza expandida para duas trajetórias defasadas de 180°	55
Figura 29 - Calibração do medidor Flexim modelo G704 no CEESI	56
Figura 30 - Erro sistemático para duas trajetórias defasadas de 90° (12D)	58

Figura 31 - Erro sistemático para duas trajetórias defasadas de 90° (35D)	58
Figura 32 - Incerteza expandida para duas trajetórias defasadas de 90°	59
Figura 33 - Erro sistemático do Krohne para configuração C2 do <i>clamp-on</i>	60
Figura 34 - <i>Meter Factor</i> de calibração do Krohne (Configuração C2)	61
Figura 35 - Incerteza de medição do Krohne (Configuração C2)	61
Figura 36 - Erro sistemático do Krohne (Configuração D1)	62
Figura 37 - <i>Meter Factor</i> de calibração do Krohne (Configuração D1)	62
Figura 38 - Incerteza de medição do Krohne (Configuração D1)	63
Figura 39 - Desvios entre os máximos e mínimos do <i>Meter Factor</i>	64

Lista de tabelas

Tabela 1 - Penalidades aplicadas pela ANP às operadoras de óleo e gás [3]	17
Tabela 2 - Distância à montante para instalação de um medidor <i>clamp-on</i>	31
Tabela 3 - Pares analisados de posições angulares combinadas (180°)	32
Tabela 4 - Velocidade axial média u_x simulada (m/s)	45
Tabela 5 - Velocidade radial média u_y simulada (m/s)	45
Tabela 6 - Velocidade radial média u_z simulada (m/s)	46
Tabela 7 - Estimativa do erro percentual para trajetória única	46
Tabela 8 - Estimativa do erro para duas trajetórias (180°)	47
Tabela 9 - Estimativa do erro para duas trajetórias (90°)	48
Tabela 10 - Erro, <i>meter factor</i> e incerteza (12D)	50
Tabela 11 - Erro, <i>meter factor</i> e incerteza (35D)	50
Tabela 12 - Erro, <i>meter factor</i> e incerteza (12D e 180°)	53
Tabela 13 - Erro, <i>meter factor</i> e incerteza (35D e 180°)	54
Tabela 14 - Erro, <i>meter factor</i> e incerteza (12D e 90°)	57
Tabela 15 - Erro, <i>meter factor</i> e incerteza (35D e 90°)	57
Tabela 16 - Calibração do Krohne <i>versus clamp-on</i> (C2-12D)	60
Tabela 17 - Calibração do Krohne <i>versus clamp-on</i> (D1-12D)	62
Tabela 18 - Desvios dos fatores de calibração	64
Tabela 20 - Medições na posição 0°, configuração C2 e distância 12D	73
Tabela 21 - Medições na posição 180°, configuração C2 e distância 12D	73
Tabela 22 - Medições na posição 45°, configuração C2 e distância 12D	73
Tabela 23 - Medições na posição 225°, configuração C2 e distância 12D	73
Tabela 24 - Medições na posição 90°, configuração C2 e distância 12D	74
Tabela 25 - Medições na posição 270°, configuração C2 e distância 12D	74
Tabela 26 - Medições na posição 135°, configuração C2 e distância 12D	74
Tabela 27 - Medições na posição 315°, configuração C2 e distância 12D	74
Tabela 28 - Medições na posição 0°, configuração D1 e distância 12D	75
Tabela 29 - Medições na posição 180°, configuração D1 e distância 12D	75
Tabela 30 - Medições na posição 45°, configuração D1 e distância 12D	75
Tabela 31 - Medições na posição 225°, configuração D1 e distância 12D	75

Tabela 32 - Medições na posição 90°, configuração D1 e distância 12D	76
Tabela 33 - Medições na posição 270°, configuração D1 e distância 12D	76
Tabela 34 - Medições na posição 135°, configuração D1 e distância 12D	76
Tabela 35 - Medições na posição 315°, configuração D1 e distância 12D	76
Tabela 36 - Medições na posição 0°, configuração D1 e distância 35D	77
Tabela 37 - Medições na posição 180°, configuração D1 e distância 35D	77
Tabela 38 - Medições na posição 45°, configuração D1 e distância 35D	77
Tabela 39 - Medições na posição 225°, configuração D1 e distância 35D	78
Tabela 40 - Medições na posição 90°, configuração D1 e distância 35D	78
Tabela 41 - Medições na posição 270°, configuração D1 e distância 35D	78
Tabela 42 - Medições na posição 135°, configuração D1 e distância 35D	79
Tabela 43 - Medições na posição 315°, configuração D1 e distância 35D	79

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
A	área da seção transversal da tubulação	m^2
$c_{transdutor}$	velocidade do feixe sonoro no envólucro do transdutor	m/s
$c_{paredetubulação}$	velocidade do feixe sonoro na parede da tubulação	m/s
c_{fluido}	velocidade do feixe sonoro no fluido	m/s
D	diâmetro interno da tubulação	m
k	fator de abrangência	-
k_h	fator expresso em função do regime do escoamento	-
L	distância entre os transdutores	m
q_v	vazão volumétrica	m^3/h
R	raio interno da tubulação	m
t_{12}	tempo de viagem do feixe sonoro do transdutor 1 ao 2	s
t_{21}	tempo de viagem do feixe sonoro do transdutor 2 ao 1	s
u_c	incerteza padrão combinada	-
\bar{v}	velocidade média do fluido ao longo da trajetória acústica	m/s
\bar{v}_A	velocidade axial média do fluido	m/s
v_x	velocidade do escoamento na direção x	m/s
v_y	velocidade do escoamento na direção y	m/s
v_z	velocidade do escoamento na direção z	m/s

Lista de Siglas

Sigla	Descrição
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	American Petroleum Institute
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	Organização Internacional para Normalização
LAME	Laboratório de Avaliação Metrológica e Energética
NBR	Norma Brasileira
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

1

Introdução

Na busca de uma alternativa tecnológica para viabilizar a calibração “in situ” de medidores de vazão de líquidos, portanto evitando a indesejável interrupção do escoamento durante a retirada do medidor para ser calibrado em laboratório, esta pesquisa de mestrado desenvolveu e validou uma metodologia que viabiliza a calibração de medidores operacionais fixos do tipo ultrasônico fazendo uso de um medidor do tipo *clamp-on* utilizado como padrão itinerante. Na superação desse desafio de caráter essencialmente metrológico, o trabalho desenvolveu-se em consonância com o desenvolvimento de um projeto de P&D (Convênio PETROBRAS nº 07, Termo de Cooperação nº 050.0022728.06.4 - SAP 4600301052), que implantou na PUC-Rio o *Laboratório para avaliação do desempenho de medidores de volume deslocado e vazão de líquidos e gases* (LAME).

A pesquisa de mestrado iniciou-se com o estudo comparativo do padrão itinerante com outro padrão, também ultrassônico, de hierarquia metrológica superior. Resguardada a legislação metrológica aplicável, notadamente nos aspectos que definem as aplicações para fins de medição fiscal e de transferência de custódia, os dados experimentais produzidos foram confrontados com resultados da simulação numérica do escoamento desenvolvido para as condições estudadas. O trabalho experimental desenvolvido permitiu avaliar a influência de diferentes fatores de instalação no desempenho dos medidores instalados em série em um *loop* no circuito de líquido (água) do Laboratório de Avaliação Metrológica e Energética (LAME) na PUC-Rio.

1.1.

Definição do problema da pesquisa

Em conformidade com o que determina o Regulamento Técnico de Medição (RTM) de Petróleo e Gás Natural, aprovado pela Resolução Conjunta ANP/Inmetro nº. 1 de 10 de junho de 2013, os medidores de vazão de petróleo e gás natural devem ser submetidos a calibração em uma periodicidade definida de

acordo com sua aplicação e tecnologia. Entretanto, algumas instalações projetadas anteriormente à publicação deste RTM não possuem mecanismos para calibração em campo ou remoção de seus medidores para calibração em laboratório acreditado, fato que gera consequências legais e contratuais quando se discute a necessidade de remoção desses medidores para serem submetidos a uma nova calibração, o que possui impacto econômico, dada a necessidade de interrupção da medição.

O Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural (RTM) introduzido pela Portaria Conjunta nº 1, de 19 de Junho de 2000 (substituído pela Resolução Conjunta ANP/Inmetro nº.1, de 10 de junho de 2013) introduz cláusulas específicas relativas à calibração de medidores de vazão instalados em sistemas de transporte do setor de óleo e gás operados no Brasil. O não cumprimento deste regulamento está sujeito às penalidades previstas na Lei nº 9.847, de 26 de outubro de 1999.

A Tabela 1 detalha as penalidades aplicadas pelo não cumprimento do item 6.4 do RTM de 2000: “*Calibração de Medidores em Linha*”, entre os anos de 2010 e 2012.

Tabela 1 - Penalidades aplicadas pela ANP às operadoras de óleo e gás [3]

RELACÃO DE PROCESSOS INSTAURADOS PARA APLICAÇÃO DE MULTAS EM 2011 - 2014:

Núcleo de Fiscalização da Medição da Produção - NFP



Nº do Processo	Nº do Auto de Infração	Data Emissão	Autuado	CNPJ	Motivo	Valor da Multa (Aplicada)	Valor da Multa (Recolhida)	Situação
48610.00844/2010-01	808-106-1033-319172 ⁹¹	14/06/2010	Shell Brasil Ltda.	23.452.596/0001-23	Descumprimento dos itens 5.1, 6.2.3, 6.4.1, 6.4.6, 6.3.3, 10.3.1 do Regulamento Técnico de Medição ⁹²	R\$ 7.500.000,00	R\$ 5.250.000,00	Pago com desconto legal
48610.00844/2010-48	808-106-1033-319170 ⁹¹	14/06/2010	Petróleo Brasileiro S.A.	33.000.167/0001-01	Itens 5.1, 5.2, 6.4.6, 7.2.5, 8.3.3, 10.2.4 do Regulamento Técnico de Medição ⁹² ; inciso II e IV do art. 48 e art. 58 do decreto 2.705/1998	R\$ 30.142.000,00	R\$ 0,00	Sub judice (Processo Judicial nº 0046434-58/2012.4.02.5101)
48610.00909/2010-91	808-106-1033-319174	22/06/2010	Petróleo Brasileiro S.A.	33.000.167/0001-01	Infração itens 6.4.7, 7.2.5, 8.2.1, 8.2.1.5; inciso II e IV do art. 48 e art. 58 do decreto 2.705/1998	R\$ 45.750.000,00	R\$ 0,00	Sub judice (Processo Judicial nº 0009949-25/2013.4.02.5101)
48610.011776/2010-39	808-106-1033-319178 ⁹¹	06/08/2010	Petróleo Brasileiro S.A.	33.000.167/0001-01	Descumprimento dos itens 6.4.1, 7.2.5; inciso II e IV do art. 48 e art. 58 do decreto 2.705/1998	R\$ 6.000.000,00	R\$ 0,00	Sub judice (Processo Judicial nº 0047621-04/2012.4.02.5101)
48610.011493/2010-31	808-106-1033-319177	06/08/2010	Petróleo Brasileiro S.A.	33.000.167/0001-01	Infração itens 6.4.1, 6.4.14, 7.2.5, 7.3.1, 10.2.4, 10.3.1 do RTM; inciso II e IV do art. 48 e art. 58 do decreto 2.705/1998	R\$ 33.612.000,00	R\$ 0,00	Sub judice (Processo Judicial nº 0006940-55/2013.4.02.5101)
48610.015166/2010-59	808-110-1033-319181 ⁹¹	11/10/2010	Petróleo Brasileiro S.A.	33.000.167/0001-01	Descumprimento dos itens 6.4.5, 7.2.5, 8.2.1; inciso II e IV do art. 48 e art. 58 do decreto 2.705/1998	R\$ 16.760.000,00	R\$ 24.338.288,89	Sub judice (Processo nº 0029379-02/2013.4.02.5101) - Processo Judicial Encerrado
48610.015942/2010-22	808-110-1033-319179	11/10/2010	Devon Energy do Brasil Ltda.	02.873.528/0001-09	Itens 6.4.5 e 6.4.10 do RTM	R\$ 9.750.000,00	R\$ 6.825.000,00	Pago com desconto legal
48610.015942/2010-22	808-111-1033-319184	26/11/2010	Petróleo Brasileiro S.A.	33.000.167/0001-01	Infração itens 5.1, 6.4.1, 6.4.6, 7.1.12, 7.3.1, 10.2.4; inciso II e IV do art. 48 e art. 58 do decreto 2.705/1998	R\$ 19.642.000,00	R\$ 0,00	Sub judice (Processo Judicial nº 0008961-04/2013.4.02.5101)
48610.007495/2011-11	808-109-1133-319193	11/09/2011	Petrobras	33.000.167/0001-01	Violação itens 4.1, 4.2, 5.1, 5.7, 6.2.3, 6.3.6, 6.4.1, 6.4.6, 7.1.12, 7.1.3, 1, 8.2.1.4, 8.2.2, 10.2.4 e 10.2.5 do RTM; e inciso II e IV do art. 48 e art. 58 do decreto 2.705/1998	R\$ 17.933.800,00	R\$ 10.635.660,00	Pago Parcialmente com desconto legal. Análise do Recurso Administrativo do restante.
Totais 2010 e 2011 →						R\$ 186.119.800,00	R\$ 49.048.949,89	
48610.007637/2011-91	808-102-1233-319206	06/02/2012	Petrobras	33.000.167/0001-01	Violação itens 4.2, 5.1, 5.2, 6.3.3, 6.4.1, 6.4.6, 7.1.7, 7.1.10, 7.1.12, 7.2.5, 7.3.1, 8.2.1, 8.2.1.5, 8.3.2 e 10.2.4 (II) e (III) do RTM; e inciso II e IV do art. 48 e art. 58 do decreto 2.705/1998	R\$ 38.933.500,00	R\$ 22.283.450,00	Pago Parcialmente com desconto legal. Em análise de Recurso para as infrações 2 e 5, 8, 10 e 39
48610.007494/2011-42	808-109-1133-319209	16/03/2012	Petrobras	33.000.167/0001-01	Violação itens 5.1, 5.7, 6.3.2, 6.3.3, 6.3.6, 6.4.1, 7.1.6, 7.1.10, 7.1.11, 7.1.12, 7.3.1, 8.2.3, 8.2.5, 8.3.1 e 10.2.4 do RTM; e inciso II e IV do art. 48 e art. 58 do decreto 2.705/1998	R\$ 32.275.216,04	R\$ 22.592.651,23	Pago com desconto legal
48610.008294/2012-14	808-112-1233-319213	18/12/2012	OGX	08.926.302/0001-09	Violação itens 5.1, 6.3.3, 6.3.6, 6.4.13, 6.4.15, 7.1.12, 7.3.1 e 10.1.3 do RTM	R\$ 4.596.060,00	R\$ 0,00	Aguardando Pagamento
Totais 2012 →						R\$ 75.804.776,04	R\$ 44.876.101,23	

Uma possível solução para a calibração dos medidores que não podem ser removidos é a utilização de outro medidor de vazão padrão que seja itinerante, e que o processo de calibração seja “in situ”.

Para atender esta lacuna técnica o medidor de vazão do tipo *clamp-on* surge como opção para ser o padrão itinerante devido à sua principal característica: ser não-intrusivo, ou seja, os sensores são instalados externamente à tubulação sem

que seja necessário interromper o escoamento. A característica de ser não-intrusivo pode ser observada na Figura 1, em que os sensores estão instalados na superfície externa da tubulação, sem contato com o fluido em escoamento.



Figura 1 - Medidor do tipo *clamp-on* modelo Fluxus F601 da Flexim

Todavia, por muito tempo, a utilização do *clamp-on* com uma trajetória ultrassônica como padrão de calibração não foi considerada já que extrapolava os limites de incerteza e exatidão de aplicações fiscais e de transferência de custódia definidos no RTM. Entretanto, o desempenho metrológico do *clamp-on* pode ser melhorado combinando-se as suas trajetórias ultrassônicas.

Não há literatura que explore especificamente os efeitos de instalação e operacionais combinando pares de trajetórias ultrassônicas de um medidor de trajetória ultrassônica única que estejam defasados em 90° ou 180° , assim como proposto na norma BS 8452 e em Sanderson e Yeung (2002).

Diante do desafio enfrentado pelo setor de óleo e gás no cumprimento regulatório e na garantia da qualidade, surge a motivação deste trabalho, de desenvolver uma metodologia de calibração que permita utilizar um padrão intinerante e não-intrusivo do tipo *clamp-on* como padrão de itinerante na calibração dos medidores fixos.

Especificamente, esta dissertação de mestrado almeja contribuir com os seguintes benefícios:

- Elimina possíveis não conformidades pelo não atendimento aos itens de periodicidade de calibração;
- Assegura cumprimento de cláusulas contratuais e comerciais de fornecimento e abastecimento;
- Reduz custos operacionais e de manutenção relativos à movimentação de medidores de vazão para calibração em laboratórios.

1.2.

Objetivos: geral e específicos

Contribuindo para resolver o impasse criado pelo Regulamento Técnico de Medição (RTM) de Petróleo e Gás Natural, de instalações projetadas que não possuem mecanismos para calibração em campo ou remoção de seus medidores para calibração em laboratório acreditado, este trabalho foi concebido com o objetivo de propor uma metodologia para calibração desses medidores. A metodologia proposta faz uso de um medidor ultrassônico do tipo *clamp-on*, utilizado como padrão itinerante na medição de líquido, permitindo corrigir efeitos associados à instalação do medidor na linha.

Para alcançar este objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram perseguidos:

- Comparar os resultados experimentais obtidos em laboratório com resultados da simulação numérica existente.
- Validar a metodologia de calibração “in situ” utilizando um medidor ultrassônico do tipo *clamp-on* em comparação com outro medidor ultrassônico de maior hierarquia metrológica, visando atender aos requisitos legais aplicáveis.

1.3.

Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, incluindo esta introdução, que define os objetivos geral e específicos, a motivação e metodologia utilizada no seu desenvolvimento.

O capítulo 2 desenvolve os fundamentos teóricos da medição ultrassônica de vazão com foco nos medidores ultrassônicos de vazão do tipo *clamp-on*.

O capítulo 3 caracteriza a validação metrológica do medidor do tipo *clamp-on*, comparando-o com um padrão de calibração. Apresenta, também, a estrutura física para a validação da metodologia de calibração “in situ”.

O capítulo 4 apresenta procedimento experimental aplicado e discute os resultados da pesquisa experimental, comparando-os aos resultados disponíveis da simulação numérica de um escoamento similar ao estudado.

O capítulo 5 discute as conclusões do trabalho e encaminha sugestões para desdobramentos futuros do mesmo.

2

Fundamentos teóricos da medição ultrassônica

Dentre todas as tecnologias existentes para medição de vazão é inegável a importância da tecnologia ultrassônica dada a evolução durante os seus mais de 50 anos de desenvolvimento. Tal importância se reflete de forma evidente em estatísticas de vendas e participação no mercado. Conforme documentado na literatura (Lynnworth e Liu, 2006), em 2006, os medidores ultrassônicos representavam cerca de 10% do mercado, tendo crescido de 9,6% até 2011, representando um faturamento de cerca de 632 milhões de dólares em vendas, com tendência de continuar crescendo até 2016 [6].

Diante desses dados e do impacto técnico e econômico que deles resultam, acredita-se que a medição ultrassônica de vazão terá posição de destaque dentre as tecnologias de medição, fato que pode ser comprovado pelo crescente acervo publicações científicas e documentos normativos (e.g.: NBR 16198, API MPMS Chapter 5.8, AGA 9, ISO/TR 12765, ISO 12242, ISO 17089-1, ISO 17089-2 e BS 8452) sobre o tema. Essas publicações abordam aspectos de instalação e operação de sistemas de medição de líquidos e gases assim como tecnologias de medição ultrassônica de vazão empregas para tais fins.

A utilização desta tecnologia também é estritamente regulamentada do ponto de vista metrológico e sua utilização devidamente caracterizada para cada sistema de medição. No cenário brasileiro, compete (i) ao Inmetro introduzir portarias de aprovação de modelos de instrumentos de medição para medidores ultrassônicos de vazão e (ii) à ANP, a legislação para o setor de óleo, gás e biocombustíveis, por meio do Regulamento Técnico de Medição, que orienta o uso desta tecnologia de medição para fins fiscais e transferência de custódia.

Os medidores ultrassônicos de vazão podem ser divididos em *carretel* (*spool*) e *clamp-on* de acordo com a NBR 16198. Este último tipo de medidor é o objeto de estudo deste capítulo.

2.1. Tecnologias de medição ultrassônica de vazão

A NBR 16198 adota a definição clássica de vazão volumétrica (q_v), em função da área da seção transversal do tubo (A) e da velocidade axial média (\bar{v}_A), ou seja:

$$q_v = A \cdot \bar{v}_A \quad (1)$$

em que a velocidade axial média do fluido é definida por:

$$\bar{v}_A = k_h \cdot \bar{v} \quad (2)$$

Nesta expressão, \bar{v} denota a velocidade média do fluido ao longo da trajetória acústica e k_h um fator expresso em função do regime do escoamento, caracterizado pelo Número de Reynolds [7] [17];

A determinação de \bar{v} irá depender de alguns fatores, notadamente da técnica empregada, das condições de instalação do medidor, do fluido a ser medido e de características do escoamento relacionadas à presença de sólidos e gases no fluido.

Dentre as diferentes técnicas utilizadas na determinação da velocidade, três são as que se destacam e amplamente dominam o mercado. Estas técnicas são:

- Tempo de trânsito
- Efeito Doppler
- Correlação cruzada

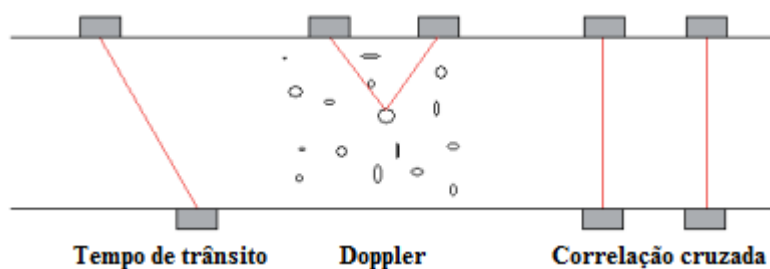


Figura 2 - Técnicas de medição de vazão por feixes ultrassônicos

Fonte: NBR 16198

Na medição por efeito Doppler, o transdutor emissor envia um feixe ultrassônico com frequência conhecida, feixe esse que é afetado por bolhas de gás ou sólidos presentes no líquido, permitindo que a velocidade do fluido seja determinada pela variação da frequência do sinal. Esta é a tecnologia utilizada pelo medidor DigitalFlow DF868 da GE para aplicações industriais.

Já na medição por correlação cruzada, a velocidade do fluido é estimada pela correlação cruzada entre os sinais gerados pelo emissor e receptor, viabilizado pela análise do ruído do sinal devido a uma modulação do feixe ultrassônico ocasionada por partículas sólidas, bolhas de gás ou mesmo turbulência dentro do tubo. O medidor DigitalFlow CTF878 é um exemplo de sistema que utiliza esta tecnologia em ambientes industriais.

Nos catálogos de cada um dos equipamentos citados é possível encontrar mais detalhes do campo de utilização destas tecnologias. Sanderson e Yeung (2002) caracterizam em detalhe as limitações e desvantagens destas tecnologias perante a utilização do tempo de trânsito, o que motivou o uso desta tecnologia no trabalho experimental desenvolvido nesta pesquisa de mestrado.

O foco deste trabalho recai sobre a medição ultrassônica de vazão pela técnica do tempo de trânsito, já que é largamente disseminada na indústria, possui níveis de exatidão e precisão superiores a outras tecnologias convencionais e que desta forma pode trazer os resultados satisfatórios [16].

2.2.

Medição ultrassônica de vazão por tempo de trânsito

No que concerne a técnica de medição ultrassônica de vazão por tempo de trânsito é possível encontrar outras subdivisões definidas pela NBR 16198;

- Método do tempo de trânsito direto;
- Método de repetição de pulso;
- Método de deslocamento de fase;
 - Método de diferença de fase;
 - Método de controle de fase;

Dentre essas possibilidades, o método do tempo de trânsito direto é o que se destaca pela disseminação comercial pois apresenta os melhores desempenhos metrológicos e o que é utilizado nos medidores disponíveis no LAME.

Com base na norma API MPMS 5.8, e no esquema ilustrado na Figura 3, a velocidade medida do escoamento pode ser definida pela eq. (3):

$$\bar{v}_A = \frac{L^2}{2D} \cdot \frac{(t_{12} - t_{21})}{t_{12} \cdot t_{21}} \quad (3)$$

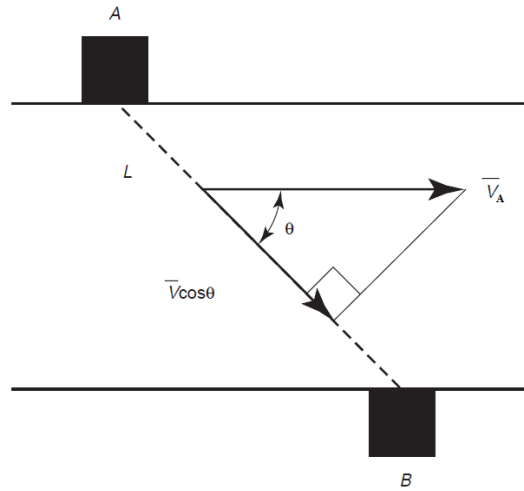


Figura 3 - Medição da velocidade do escoamento pelo tempo de trânsito direto

Fonte: Adaptado de API MPMS 5.8

Nesta equação,

- L : distância entre os transdutores;
- D : diâmetro interno da tubulação;
- t_{12} : tempo de viagem do feixe sonoro do transdutor 1 ao 2;
- t_{21} : tempo de viagem do feixe sonoro do transdutor 2 ao 1;

2.3.

Arranjo e instalação do transdutor

O transdutor (definido na NBR 16198 como o elemento que converte energia acústica em sinais elétricos e vice-versa) pode ser instalado de forma invasiva, não-invasiva, intrusiva ou não-intrusiva [15], tal qual ilustrado na Figura 4.

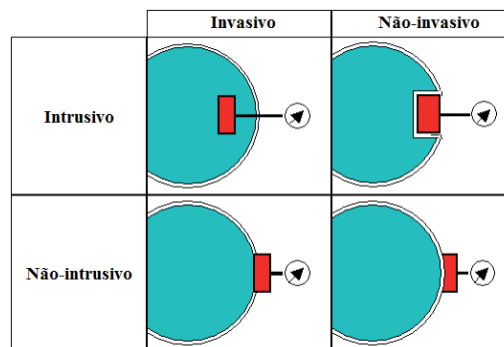


Figura 4 - Sensores invasivos, não-invasivos, intrusivos e não-intrusivos [15]

Medidores invasivos ainda podem ser classificados como medidores retraídos, faceados e intrusivos, conforme representado na Figura 5.

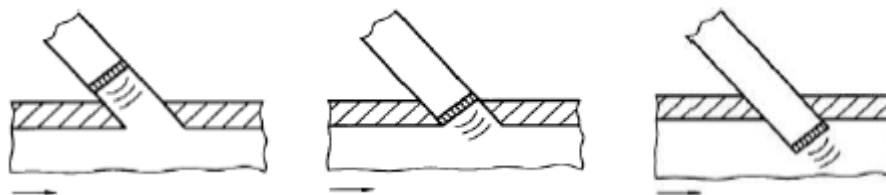


Figura 5 - Representações de transdutor em contato com o fluido (à esquerda: retraído; no centro: em contato com o fluido (faceado); à direita: intrusivo [NBR 16198])

A NBR 16198 dispõe, também, sobre outro arranjo típico, o arranjo *clamp-on*, que denota uma montagem de transdutores na forma não-invasiva.

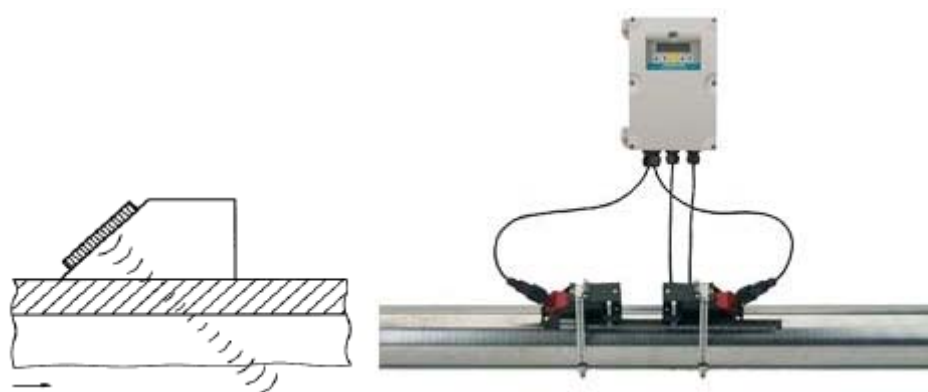


Figura 6 - Arranjos *clamp-on* (a) e medidor *clamp-on* Sitrans (b)
Fonte: FST020 da Siemens

Diferentemente dos medidores invasivos, o arranjo dos transdutores é feito do lado externo do tubo. Os pares de transdutores podem ser posicionados de lados opostos (transmissão direta), ou mesmo lado da tubulação (transmissão indireta).



Figura 7 - Transmissão direta (à esquerda) e indireta (à direita)

Na transmissão indireta, a parede do tubo é utilizada como refletor, o que ajuda a aumentar o comprimento da trajetória acústica.

O arranjo para transmissão direta ou indireta não precisa ser feito somente para arranjos do tipo *clamp-on*, mas por qualquer outro que faça uso da tecnologia da medição por tempo de trânsito.

De um modo geral, os fabricantes de medidores do tipo *clamp-on* admitem qualquer uma das duas montagens, desde que seja informado na configuração dos medidores.

2.4.

Medidor ultrassônico de vazão do tipo *clamp-on*

A metodologia do tempo de trânsito é diferenciada entre medidores do tipo carretel (intrusivo) e do tipo *clamp-on* (não-intrusivo), de forma que é necessário incluir a influência dos meios de propagação do feixe ultrassônico. Estas influências podem ser modeladas pela Lei de Snell.

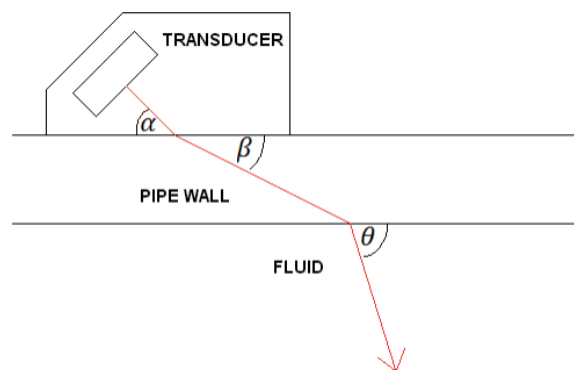


Figura 8 - Refração em diferentes meios de propagação acústica [15]

O feixe ultrassônico é refratado quando passa por dois meios acústicos diferentes fazendo com que o ângulo do feixe seja desviado de acordo com o índice de refração do meio. No caso da Figura 8 a aplicação da Lei de Snell resulta na seguinte equação:

$$\frac{\cos \alpha}{c_{\text{transdutor}}} = \frac{\cos \beta}{c_{\text{parede tubulação}}} = \frac{\cos \theta}{c_{\text{fluido}}} \quad (4)$$

Em que:

- a) $c_{\text{transdutor}}$: velocidade do feixe sonoro dentro do envólucro do transdutor;
- b) $c_{\text{parede tubulação}}$: velocidade do feixe sonoro dentro da parede da tubulação;
- c) c_{fluido} : velocidade do feixe sonoro dentro da parede no fluido.

A montagem dos transdutores de forma indireta (reflexiva), conforme ilustrado na Figura 9, resulta na seguinte equação para o cálculo da vazão volumétrica [16]:

$$Q_v = \frac{k_h \cdot \pi \cdot c_{\text{fluido}} \cdot c_{\text{transdutor}} \cdot D \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_{\text{fluido}} \cdot \sin \alpha}{c_{\text{transdutor}}} \right)^2} (t_{12} - t_{21})}{16 \cdot \sin \alpha} \quad (5)$$

Nesta equação,

- a) D : diâmetro interno da tubulação;
- b) k_h : fator que relaciona a velocidade média do escoamento e a velocidade média do feixe ultrassônico;
- c) t_{12} : tempo de viagem do feixe sonoro do transdutor 1 ao 2;
- d) t_{21} : tempo de viagem do feixe sonoro do transdutor 2 ao 1;

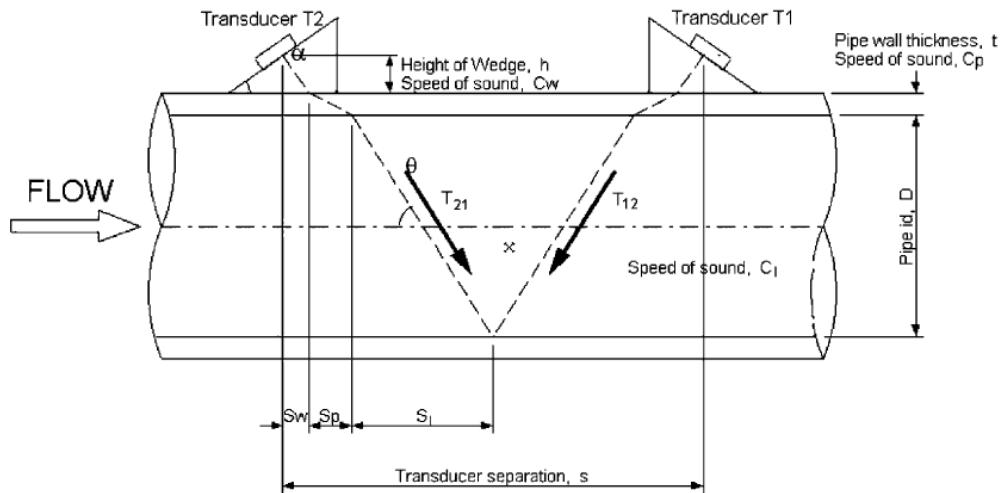


Figura 9 - Trajetória do feixe ultrassônico: montagem indireta do *clamp-on*
Fonte: Sanderson e Yeung (2002)

2.5.

Parâmetros de influência na medição de vazão por *clamp-on*

A medição ultrassônica de vazão por medidores do tipo *clamp-on* pela técnica de tempo de trânsito produz resultados confiáveis quando os efeitos a seguir listados são adequadamente tratados [16]:

- a) Efeitos de instalação;
- b) Efeitos de tubulação;
- c) Efeitos do fluido;
- d) Efeitos das condições operacionais;
- e) Efeitos específicos do fabricante;

Os trabalhos disponíveis na literatura abrangem todos os efeitos de influência relacionados aos medidores do tipo *clamp-on*.

Os efeitos de instalação podem ser vistos em Kumar et al. (2011), em que é analisada a exatidão do medidor montado em variadas distâncias do início do trecho reto de tubulação e diferentes perturbações.

Os efeitos de fluido podem ser vistos em Al-Lababidi e Sanderson (2005) que analisam os efeitos de uma vazão pulsante de um fluido bifásico em uma tubulação horizontal.

Efeitos de tubulação e condições operacionais são apresentados em Mahadeva et al. (2009) em que são retratados os resultados em tubulações com diâmetros e espessuras diferentes, posicionamentos axiais e laterais dos sensores, e efeitos de temperatura do fluido.

Os efeitos específicos de fabricantes também podem ser encontrados na literatura, como em Keitmann-Curdes e Funck (2008), em que é demonstrado uma metodologia de calibração de um fator acústico para determinação do ângulo do feixe ultrassônico na tubulação.

2.6.

Calibração de medidores de vazão

O Regulamento Técnico de Medição (RTM) estabelece que a calibração de um medidor de vazão pode ser feita em um laboratório acreditado ou na própria instalação com um padrão definido, seja um provador por deslocamento, um tanque de calibração ou um medidor padrão.

Quando a calibração é feita em campo, o RTM indica as normas técnicas que devem ser seguidas no processo de calibração de um medidor de vazão em comparação a um padrão de calibração em campo. Estas normas são as do capítulo 4 da API (*American Petroleum Institute*) ou as da série ISO 7278, em que são abordados sistemas de prova (calibração) de medidores volumétricos.

A API mantém um manual de referência internacional e solidez em práticas que envolvem a determinação quantitativa e qualitativa de petróleo e gás natural, este manual é o de medição *Manual of Petroleum Measurement Standards* (MPMS). O capítulo 4 deste manual serve como guia para projeto, instalação, calibração e operação de sistemas de calibração fixos e móveis.

Os métodos de calibração que se destacam são os provadores por deslocamento (API MPMS 4.2), tanque de calibração (API MPMS 4.3) e medidores mestre (API MPMS 4.5).

Como o objetivo do trabalho é avaliar a viabilidade do medidor ultrassônico de vazão do tipo *clamp-on* como sendo um padrão de calibração (medidor mestre)

itinerante, a norma em que a sua utilização seria aplicável é a relacionada a medidores mestre (API MPMS 4.5), ou *Master Meters*.

Medidores mestre com linearidade e repetibilidade dentro de critérios mutuamente acordados, recomendados ou regulamentados devem ser utilizados como padrão de calibração. Entretanto a utilização de medidores mestre é uma calibração indireta, pois estes devem ser calibrados com provadores de deslocamento ou tanques de calibração em algum momento.

Durante o processo de calibração de medidores mestre determinadas premissas previstas na API MPMS 4.5 devem ser cumpridas para que os resultados obtidos sejam metrologicamente confiáveis:

- a) Condições de calibração sejam similares às de operação (vazão, pressão, temperatura, densidade e viscosidade);
- b) Medidor padrão seja instalado o mais próximo possível do medidor a ser calibrado;
- c) Correção das medidas por meio de uma referência, quando aplicável;
- d) Medidores padrão e a ser calibrado devem ser instalados a jusante de qualquer ponto de eliminação de vapor e sistemas de proteção contra impurezas;
- e) Medidores padrão e a ser calibrado instalados e operados em conformidade com a norma API MPMS 5.8;
- f) Diferença máxima de 0,02% entre os maiores e menores valores do fator de calibração;
- g) Geração de pelo menos 10000 unidades de volume discretos para o medidor padrão e o em operação;

O último critério é aplicado mais estritamente a medidores que possuem uma saída direta de pulsos que é correlacionada ao volume medido e que normalmente não possuem unidade eletrônica, como por exemplo medidores do tipo turbina e deslocamento positivo. Em medidores que possuem unidades eletrônicas, como ultrassônicos e coriolis, o fator de conversão de pulsos por unidade de volume é determinado eletronicamente.

O Regulamento Técnico de Medição (RTM) traz os critérios estabelecidos na API MPMS 4.5 além de definir a quantidade de testes sucessivos que concordam com os requisitos da norma. Para medidores mestre devem ser realizados cinco, de seis testes consecutivos em que a diferença máxima entre os fatores do medidor calculados não seja maior que 0,02%, independentemente da aplicação.

Já para medidores em operação, em comparação com medidores mestre, devem ser realizados três testes consecutivos em que a diferença máxima entre os fatores do medidor calculados não seja maior que 0,05% quando se tratar de medição fiscal ou transferência de custódia, e 0,4% em caso de medição de apropriação.

3

Erro de medição de vazão

Os medidores de vazão são normalmente calibrados em condições de escoamento completamente desenvolvido, determinando-se a relação entre a vazão volumétrica do escoamento e a velocidade média ao longo da trajetória ultrassônica. Esta última também é função dos componentes não axiais de velocidade quando o escoamento está em desenvolvimento, e a relação determinada experimentalmente não é mais válida, resultando em um erro de medição de vazão. Este capítulo apresenta o *loop* líquido para avaliação de medidores de volume deslocado além de detalhar o modelo do erro de indicação do medidor *clamp-on* posicionado em vários ângulos de inclinação em relação à horizontal, a partir dos valores numericamente calculados de componentes de velocidade. A avaliação é feita para trajetória ultrassônica única e combinadas em 90° e 180°.

3.1.

Medição de vazão com medidores ultrassônicos *clamp-on*

A medição de vazão feita com medidores do tipo *clamp-on*, com trajetória ultrassônica única, é feita a uma distância mínima do início do trecho reto de tubulação de modo a garantir que o escoamento está completamente desenvolvido. Neste caso, os componentes não axiais de velocidade são desprezíveis. Em situações reais, entretanto, estas distâncias podem não ser respeitadas, e a existência de componentes não axiais de velocidade provoca um erro na medição de vazão. Para que os níveis de incerteza possam ser melhorados a presente dissertação mostrou que o uso da média das medições feitas com no mínimo dois pares de transdutores, de forma que seus feixes ultrassônicos sejam perpendiculares reduz significativamente a influência dos componentes não axiais de velocidade sobre a vazão, para trechos retos com comprimento equivalente de, pelo menos, dez diâmetros de tubulação.

Sendo assim, o trecho reto a montante do medidor pode ser reduzido caso se leve em consideração a média das medidas de dois feixes ultrassônicos.

Com a utilização de apenas um feixe ultrassônico, as distâncias mínimas recomendadas, de acordo com as perturbações a justante do medidor, são:

Tabela 2 - Distância à montante para instalação de um medidor *clamp-on*

Fonte: BS 8452

Perturbação	Incerteza menor que	Incerteza menor que
	2%	5%
Contração cônica	5D	0
Expansão cônica	20D	5D
Curva única de 90°	20D	15D
Duas curvas de 90° em “U”	25D	10D
Duas curvas de 90° em planos perpendiculares	50D	20D
Válvula tipo borboleta com 2/3 de abertura	20D	10D
Válvula tipo globo com 2/3 de abertura	15D	5D
Válvula tipo gaveta com 2/3 de abertura	20D	5D

O trecho reto a montante do medidor pode ser reduzido com a instalação de um condicionador de fluxo de acordo com as recomendações feitas na norma API MPMS 5.8, o que não é o caso do LAME, que possui, a montante dos medidores, uma instalação que se assemelha a duas curvas de 90° em planos perpendiculares, o que requeriria, de acordo com a Tabela 2, o mínimo 50 diâmetros internos de tubulação de distância entre a perturbação e o medidor.

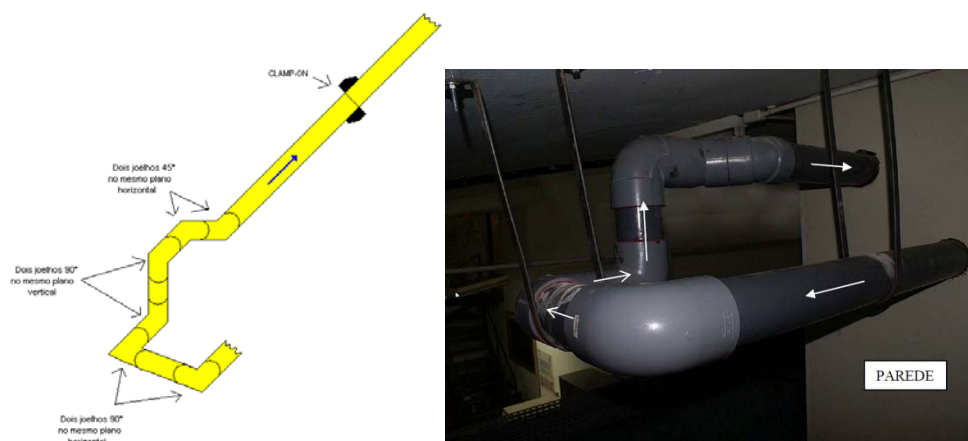


Figura 10 - Arranjo da tubulação do circuito hidráulico no LAME

Pode-se provar que as médias dos canais com montagem perpendiculares (defasados 90° conforme recomendado pela norma BS 8452) podem melhorar os níveis de exatidão e incerteza, mas que a média de montagens defasadas em 180°

são ainda mais satisfatórias, produzindo melhores resultados, como é provado em 4.3.1 e 4.3.2.

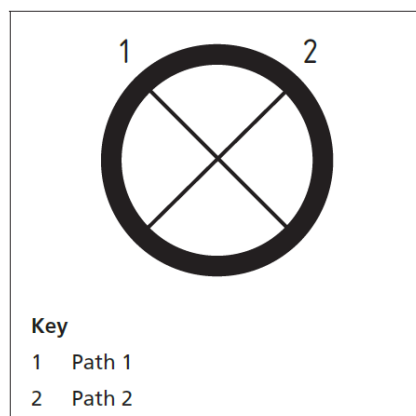


Figura 11 - Medição de dois feixes ultrassônicos

Fonte: BS 8452

Para o desenvolvimento deste trabalho, a combinação de trajetórias numéricas e experimentais foi feita de acordo com a convenção adotada pela Figura 12, a vista à jusante da seção transversal da tubulação.

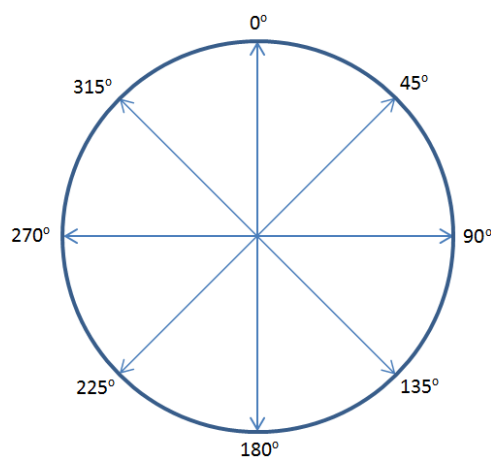


Figura 12 - Vista à jusante da tubulação e nomenclatura dos ângulos

Como o medidor *clamp-on* utilizado é de trajetória ultrassônica única, o seu desempenho foi medido, para cada posição indicada pela Figura 12, girando-se o par de transdutores externamente à tubulação. Em seguida os pares ultrassônicos foram combinados conforme a Tabela 3, emulando-se um medidor ultrassônico de duas trajetórias.

Tabela 3 - Pares analisados de posições angulares combinadas (180°)

Pares de posição
0° - 180°

45° - 225°

90° - 270°

135° - 315°

O detalhamento da execução experimental é descrito em 4.2.

3.2.

Trajetória ultrassônica como função da velocidade do escoamento

O módulo da velocidade (v) do escoamento, para um escoamento incompressível em regime permanente, em um ponto é dado por:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (6)$$

Sendo v_x , v_y e v_z as velocidades nos eixos x , y e z de um determinado ponto do escoamento.

Sendo a trajetória do feixe ultrassônico é definida pelos pontos P_1 e P_2 o vetor (\vec{v}_{12}) que une os pontos P_1 e P_2 é definido pela diferença entre os vetores \vec{v}_2 e \vec{v}_1 :

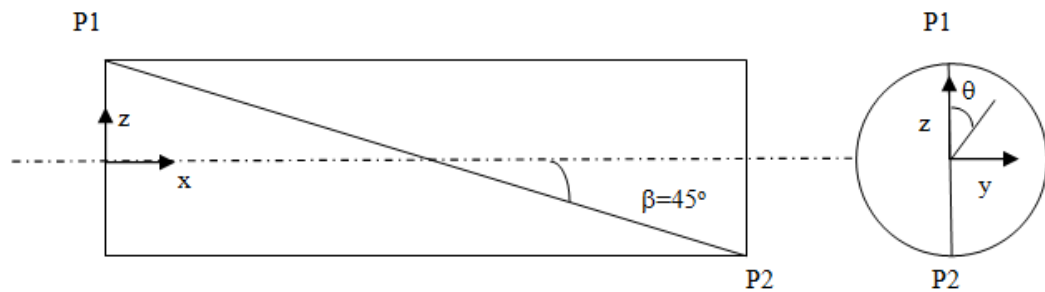


Figura 13 - Esquema da vista frontal e vista lateral direita do tubo

Sendo o \vec{v}_2 e \vec{v}_1 determinados da seguinte forma:

$$\vec{v}_1 = R \cdot \sin \theta \cdot \vec{e}_y + R \cdot \cos \theta \cdot \vec{e}_z - L / 2 \cdot \vec{e}_x \quad (7)$$

$$\vec{v}_2 = L / 2 \cdot \vec{e}_x - R \cdot \sin \theta \cdot \vec{e}_y - R \cdot \cos \theta \cdot \vec{e}_z \quad (8)$$

Portanto \vec{v}_{12} é:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 = L \cdot \vec{e}_x - 2R \cdot \sin \theta \cdot \vec{e}_y - 2R \cdot \cos \theta \cdot \vec{e}_z \quad (9)$$

Em que seu módulo é:

$$v_{12} = \sqrt{L^2 + 4.R^2} \quad (10)$$

Porém,

$$2R = L.\tan\beta \quad (11)$$

Sendo assim:

$$v_{12} = \frac{2R}{\sin\beta} = \frac{L}{\cos\beta} \quad (12)$$

Sendo o seguinte vetor unitário na direção da trajetória do feixe ultrassônico:

$$\vec{v}_l = \cos\beta.\vec{e}_x - \sin\beta.\sin\theta.\vec{e}_y - \sin\beta.\cos\theta.\vec{e}_z \quad (13)$$

O vetor velocidade do escoamento é:

$$\vec{v} = u_x.\vec{e}_x + u_y.\vec{e}_y + u_z.\vec{e}_z \quad (14)$$

Sendo assim, a projeção do vetor velocidade do escoamento (\vec{v}) sobre o vetor trajetória do feixe ultrassônico (\vec{v}_l) é:

$$v = \vec{v}.\vec{v}_l = \cos\beta.u_x - \sin\beta.\sin\theta.u_y - \sin\beta.\cos\theta.u_z \quad (15)$$

3.3. Velocidade média do escoamento

Considerando L a distância entre o emissor e o receptor, o medidor indica a velocidade média espacial \bar{v} ao longo da trajetória ultrassônica, definida pela variável l .

$$\bar{v} = \frac{1}{L} \int_{l=0}^L v.dl \quad (16)$$

Portanto as velocidades médias em cada direção são:

$$\bar{u}_x = \frac{1}{L} \int_{l=0}^L u_x.dl \quad (17)$$

$$\bar{u}_y = \frac{1}{L} \int_{l=0}^L u_y.dl \quad (18)$$

$$\bar{u}_z = \frac{1}{L} \int_{l=0}^L u_z.dl \quad (19)$$

Portanto:

$$\bar{v} = \cos \beta \cdot \bar{u}_x - \sin \beta \cdot \sin \theta \cdot \bar{u}_y - \sin \beta \cdot \cos \theta \cdot \bar{u}_z \quad (20)$$

Tem sido mostrado semi-empiricamente e utilizado pelos fabricantes de medidores *clamp-on* que a relação entre a velocidade média na seção transversal e a velocidade axial média ao longo da trajetória é apenas função do número de Reynolds quando o escoamento é completamente desenvolvido. Neste caso, $\bar{u}_y = \bar{u}_z = 0$, e a velocidade média indicada pelo medidor é proporcional à velocidade axial média ao longo da trajetória, pela eq. (20). Desta forma, a velocidade média na seção transversal pode ser calculada pelas correlações desenvolvidas.

Quando o escoamento não é completamente desenvolvido, a velocidade média indicada pelo medidor também é função dos outros componentes de velocidade. Outras trajetórias podem ser utilizadas para fornecer equações em número suficiente, para se calcular, juntamente com a eq. (20), a velocidade axial média ao longo da trajetória. Quando isto não é possível, o medidor apresenta um erro sistemático, difícil de ser quantificado durante a medição. Sua estimativa, entretanto, pode ser feita calculando-se por um software comercial (CFX) o perfil de velocidade em cada seção de um duto, a partir de uma curva onde o perfil é uniforme. Desta forma, a velocidade média ao longo de uma dada trajetória pode ser integrada, simulando o medidor ultrassônico.

Dividindo a eq. (20) por $\cos \beta$, pode-se escrever uma expressão para o erro de indicação do medidor (E). Este é definido como a diferença entre a velocidade indicada pelo medidor e a velocidade axial do escoamento.

$$E = \frac{\bar{v}}{\cos \beta} - \bar{u}_x = -\tan \beta \cdot (\sin \theta \cdot \bar{u}_y + \cos \theta \cdot \bar{u}_z) \quad (21)$$

3.4.

Erro associado ao medidor (trajetória única)

Considerando $\beta = 45^\circ$ para todas as trajetórias,

- Trajetória 1: $\theta = 0^\circ$

$$E_1 = \frac{2}{\sqrt{2}} \bar{v}_1 - \bar{u}_{x1} = -\bar{u}_{z1} \quad (22)$$

- Trajetória 2: $\theta = 45^\circ$

$$E_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} \bar{v}_2 - \bar{u}_{x2} = -\frac{\sqrt{2}}{2} (\bar{u}_{y2} + \bar{u}_{z2}) \quad (23)$$

- Trajetória 3: $\theta = 90^\circ$

$$E_3 = \frac{2}{\sqrt{2}} \bar{v}_3 - \bar{u}_{x3} = -\bar{u}_{y3} \quad (24)$$

- Trajetória 4: $\theta = 135^\circ$

$$E_4 = \frac{2}{\sqrt{2}} \bar{v}_4 - \bar{u}_{x4} = -\frac{\sqrt{2}}{2} (\bar{u}_{y4} - \bar{u}_{z4}) \quad (25)$$

- Trajetória 5: $\theta = 180^\circ$

$$E_5 = \frac{2}{\sqrt{2}} \bar{v}_5 - \bar{u}_{x5} = +\bar{u}_{z5} \quad (26)$$

- Trajetória 6: $\theta = 225^\circ$

$$E_6 = \frac{2}{\sqrt{2}} \bar{v}_6 - \bar{u}_{x6} = +\frac{\sqrt{2}}{2} (\bar{u}_{y6} + \bar{u}_{z6}) \quad (27)$$

- Trajetória 7: $\theta = 270^\circ$

$$E_7 = \frac{2}{\sqrt{2}} \bar{v}_7 - \bar{u}_{x7} = +\bar{u}_{y7} \quad (28)$$

- Trajetória 8: $\theta = 315^\circ$

$$E_8 = \frac{2}{\sqrt{2}} \bar{v}_8 - \bar{u}_{x8} = +\frac{\sqrt{2}}{2} (\bar{u}_{y8} - \bar{u}_{z8}) \quad (29)$$

3.5.

Erro associado ao medidor (trajetórias defasadas de 180°)

Faz-se então a média dos erros das trajetórias defasadas em 180° .

- Trajetórias 1 e 5:

$$E_{15} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_1 + \bar{v}_5}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x1} + \bar{u}_{x5}}{2} = -\left(\frac{\bar{u}_{z1} - \bar{u}_{z5}}{2} \right) \quad (30)$$

- Trajetórias 2 e 6:

$$E_{26} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_2 + \bar{v}_6}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x2} + \bar{u}_{x6}}{2} = -\frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{\bar{u}_{y2} - \bar{u}_{y6}}{2} + \frac{\bar{u}_{z2} - \bar{u}_{z6}}{2} \right) \quad (31)$$

- Trajetórias 3 e 7:

$$E_{37} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_3 + \bar{v}_7}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x3} + \bar{u}_{x7}}{2} = - \left(\frac{\bar{u}_{y3} - \bar{u}_{y7}}{2} \right) \quad (32)$$

- Trajetórias 4 e 8:

$$E_{48} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_4 + \bar{v}_8}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x4} + \bar{u}_{x8}}{2} = - \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{\bar{u}_{y4} - \bar{u}_{y8}}{2} - \frac{\bar{u}_{z4} - \bar{u}_{z8}}{2} \right) \quad (33)$$

3.6.

Erro associado ao medidor (trajetórias defasadas de 90°)

Faz-se então a média dos erros das trajetórias defasadas em 90° (feixes ultrassônicos perpendiculares).

- Trajetórias 1 e 3:

$$E_{13} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_1 + \bar{v}_3}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x1} + \bar{u}_{x3}}{2} = - \left(\frac{\bar{u}_{z1} + \bar{u}_{z3}}{2} \right) \quad (34)$$

- Trajetórias 2 e 4:

$$E_{24} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_2 + \bar{v}_4}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x2} + \bar{u}_{x4}}{2} = - \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{\bar{u}_{y2} + \bar{u}_{y4}}{2} + \frac{\bar{u}_{z2} - \bar{u}_{z4}}{2} \right) \quad (35)$$

- Trajetórias 3 e 5:

$$E_{35} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_3 + \bar{v}_5}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x3} + \bar{u}_{x5}}{2} = - \left(\frac{\bar{u}_{y3} - \bar{u}_{y5}}{2} \right) \quad (36)$$

- Trajetórias 4 e 6:

$$E_{46} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_4 + \bar{v}_6}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x4} + \bar{u}_{x6}}{2} = - \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{\bar{u}_{y4} - \bar{u}_{y6}}{2} - \frac{\bar{u}_{z4} + \bar{u}_{z6}}{2} \right) \quad (37)$$

- Trajetórias 5 e 7:

$$E_{57} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_5 + \bar{v}_7}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x5} + \bar{u}_{x7}}{2} = + \left(\frac{\bar{u}_{z5} + \bar{u}_{z7}}{2} \right) \quad (38)$$

- Trajetórias 6 e 8:

$$E_{68} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_6 + \bar{v}_8}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x6} + \bar{u}_{x8}}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{\bar{u}_{y6} + \bar{u}_{y8}}{2} + \frac{\bar{u}_{z6} - \bar{u}_{z8}}{2} \right) \quad (39)$$

- Trajetórias 7 e 1:

$$E_{71} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_7 + \bar{v}_1}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x7} + \bar{u}_{x1}}{2} = + \left(\frac{\bar{u}_{y7} - \bar{u}_{z1}}{2} \right) \quad (40)$$

- Trajetórias 8 e 2:

$$E_{82} = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{v}_8 + \bar{v}_2}{2} \right) - \frac{\bar{u}_{x8} + \bar{u}_{x2}}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{\bar{u}_{y8} - \bar{u}_{y2}}{2} - \frac{\bar{u}_{z8} + \bar{u}_{z2}}{2} \right) \quad (41)$$

4

Metodologia de execução e resultados

Descreve-se neste capítulo o circuito hidráulico no Laboratório de Avaliação Metrológica e Energética (LAME) da PUC-Rio para avaliação de desempenho funcional e metrológico de medidores de vazão.

Adicionalmente são abordados e descritos neste capítulo os métodos metrológicos para validação de uma metodologia para utilização do medidor do tipo *clamp-on* como padrão itinerante.

Também se apresenta e discute os dados experimentais e os compara com a teoria descrita no capítulo 3 e os dados disponíveis da simulação numérica de um escoamento analogamente estudado para o medidor *clamp-on*.

Com os resultados da calibração do medidor *clamp-on* em comparação com o Caldon, o medidor Krohne foi calibrado para emular a calibração “in situ” de um medidor de vazão tendo o *clamp-on* como padrão itinerante.

4.1.

Bancada de testes - circuito hidráulico

O circuito hidráulico utilizado como bancada de testes para os experimentos é o representado pela Figura 14.

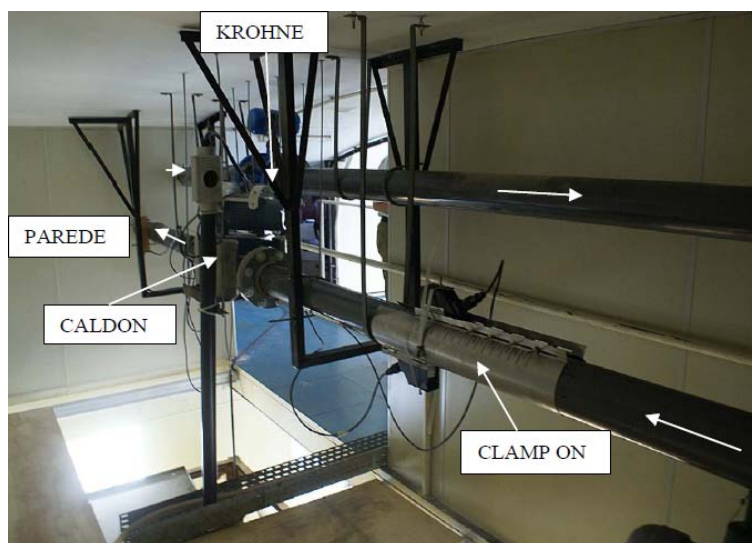


Figura 14 - Esquema geral de instalação do circuito hidráulico

Os principais equipamentos deste sistema são:

- Um medidor *clamp-on* Sitrans FUS 1020 do fabricante Siemens. O modelo dos transdutores é o 1011HNFS-C2HUT1-S2.
- Um medidor UFM 530 do fabricante Krohne de 2 trajetórias acústicas.
- Um medidor Caldon 280Ci da Cameron, com 8 trajetórias acústicas, de hierarquia metrológica mais alta que o do *clamp-on* (incerteza menor que $\pm 0,2\%$). O Caldon possui portaria de aprovação de modelo emitida pelo Inmetro, em que autoriza a operação do medidor entre 5,9 m³/h e 330 m³/h para diâmetro nominal de 100 mm. O medidor localizado a cerca de 45,8 diâmetros (45,8D) da curva mais próxima a montante.
- Um computador de vazão modelo 6000 do fabricante OMNI, que também possui portaria de aprovação de modelo emitida pelo Inmetro.

Como fluido de trabalho foi utilizada a água da rede hidráulica da PUC-Rio filtrada por um filtro de areia dentro do circuito hidráulico. Durante o experimento a água foi transferida entre as torres de água disponíveis no laboratório, passando em sequência pelos medidores *clamp-on*, Caldon e Krohne. Esta água era bombeada por uma bomba do tipo parafuso.

4.2. Execução do experimento

A vazão média para cada uma das medidas tomadas em cada um dos ângulos representados pela Figura 12 foi baseada após uma totalização de no mínimo 1 m³ (em cumprimento ao critério de 10000 unidades de volume discretos da API MPMS 4.5), já que a vazão volumétrica proporcionada pela bomba foi de aproximadamente 30 m³/h e o fator que relaciona pulsos de saída por metro cúbico para o Caldon e o *clamp-on* são de, respectivamente, 12600 pulsos por m³ e 22000 pulsos por m³.

Os transdutores foram montados em uma condição em que o ângulo entre feixe ultrassônico e o escoamento correspondesse a aproximadamente 45°.

Antes de iniciar qualquer medida em um ângulo novo o medidor *clamp-on* recebeu o “ajuste de zero”, que consiste em ajustar a vazão para 0 m³/h com a tubulação preenchida e bloqueada, conforme preconizado na API MPMS 5.8.

4.2.1.

Parâmetros de configuração dos equipamentos

Como os medidores de vazão e o computador possuem parâmetros de configuração, esta foi feita baseada em aspectos reais de montagem. A única exceção se aplica ao Caldon, pois este não possui configuração que seja acessível ao usuário de forma a modificar parâmetros de desempenho. A configuração é feita por senha de serviço disponível apenas por pessoas autorizadas a executar serviços no equipamento.

A configuração do computador de vazão foi concentrada principalmente na configuração da relação entre pulsos de saída do medidor com o volume totalizado e na configuração do produto, a água. A algoritmo de utilização para cálculos de compensação do volume medidor de água pelo computador de vazão é o da norma API MPMS 11.4.1.

O fator que relaciona pulsos por unidade de volume é configurado em cada uma das eletrônicas dos medidores, diferentemente, por exemplo, de um medidor do tipo turbina, em que esta relação se dá em função do giro do rotor interno com o transdutor magnético que é estimulado com a passagem deste rotor, gerando pulsos de saída [17].

O medidor *clamp-on* é o equipamento com maior número de parâmetros de entrada [32] e que tiveram maior atenção quando configurados. Os parâmetros de destaque na configuração são relacionados à:

- Tubulação:
 - Material;
 - Espessura;
 - Diâmetro externo;
- Fluido
 - Tipo de fluido;
 - Velocidade do som no fluido;
 - Viscosidade;
 - Densidade;
- Transdutor
 - Modelo;
 - Tipo;
 - Tipo de montagem;

Para se verificar a influência de parâmetros de configuração da eletrônica do medidor nos resultados de medição, o *clamp-on* foi testado com duas

configurações distintas do sensor na eletrônica: o instalado fisicamente e o com uma aplicação de instalação parecida, ou seja, as medições foram testadas em configurações C2 e D1 dos sensores.

Os sensores do *clamp-on*, nas configurações C2 e D1, foram testados a uma localização a aproximadamente 12 diâmetros (12D) da curva mais próxima a montante e em seguida, somente a configuração D1, a uma distância de 35D da curva mais próxima.

4.2.2. Montagem dos transdutores do *clamp-on*

Assim como os parâmetros de configuração, a montagem física do transdutor é algo relevante caso a avaliação da incerteza e exatidão se mantenham em níveis aceitáveis.

Nas publicações (Mahadeva et al., 2009; Mahadeva et al., 2008; MA et al., 2012) é possível constatar a influência na exatidão devido a desvios axiais e laterais de posição em relação à posição calculada pela lei de Snell.

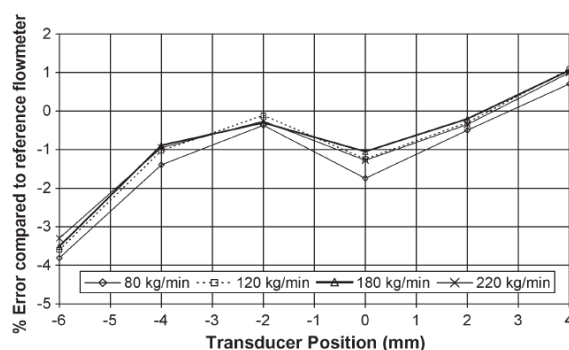


Figura 15 - Variação axial da distância entre os transdutores (Lei de Snell)

Fonte: Mahadeva et al. (2009)

Apesar da análise da exatidão ser abordada com grande importância, a incerteza da medição é o fator preponderante na análise dos resultados, de forma que os transdutores foram instalados em posições aproximadas. Os erros de exatidão podem ser corrigidos pelo fator do medidor (*Meter Factor*) previsto no Regulamento Técnico de Medição (RTM) e na API MPMS 4.5.

Para eliminar efeitos de deslocamentos laterais dos transdutores uma barra de fixação fornecida juntamente com o medidor foi utilizada.

A cada rotação do medidor a superfície em que os sensores foram instalados foi preparada de acordo com a recomendação do manual de instalação do

medidor. A superfície foi limpa de impurezas para se garantir contato direto com a tubulação.

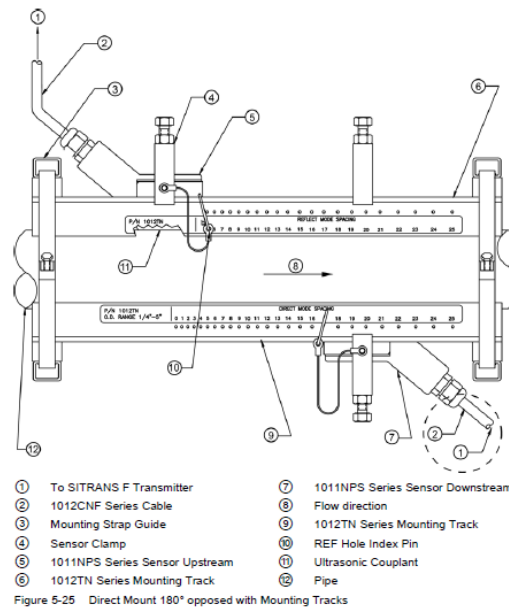


Figura 16 - Fixação e alinhamento dos transdutores [32]

4.2.3.

Tratamento dos dados e estimativa da incerteza da calibração

O critério de Chauvenet foi aplicado nas amostras na identificação de valores espúrios ou duvidosos do fator do medidor (*Meter Factor*) a fim de que se minimizassem os erros no tratamento estatístico dos dados.

A estimativa da incerteza de medição pode ser feita de acordo com a seguinte equação [4] [33]:

$$U = \sqrt{U_M^2 + (k \cdot u_{MF})^2} \quad (42)$$

Sendo:

- U_M : incerteza padrão combinada do medidor padrão;
- k : fator de abrangência. Determinado em função do número de graus de liberdade da amostra;
- u_{MF} : incerteza padrão combinada do *Meter Factor* do medidor a ser calibrado;

De acordo com o certificado de calibração o *Meter Factor* para o padrão de calibração (Caldon) na vazão de 31 m³/h é de 1,0003 e a a estimativa da incerteza expandida é de 0,043% do valor medido com um fator de abrangência de 2 para um nível de confiança de 95,45% (Figura 7).


				Serial Number: 100714001 Model: LEFM 280CI		ID: 4.026 * K-factor: 12800 pulse/m3	Test Fluid: Exosol D80, Drakeol 5				Average MF 1.0000 Linearity ±0.05%						
				Temperature (°C)		Pressure (bar)		Ref Volume		Indicated Volume							
				MUT	Prover / MM	MUT	Prover / MM	Visc (cS)	m³	Pulses	m³	m³/h	Re	MF			
8/10/2010	5:18 PM	TMM	39715	20.02	20.02	2.40	2.40	12.19	2.52853	31847	2.52754	31.7	8.902	1.0004			
8/10/2010	5:24 PM	TMM	39716	19.95	19.95	2.40	2.40	12.23	2.52853	31855	2.52817	31.7	8.975	1.0001			
8/10/2010	5:30 PM	TMM	39717	20.05	20.05	2.39	2.39	12.18	2.52853	31848	2.52762	31.7	8.913	1.0004	1.0003	0.03%	0.043%

Figura 17 - Trecho do certificado de calibração do Caldon

A incerteza padrão da repetibilidade do *Meter Factor* é calculada conforme eq. (43):

$$u_{MF} = s_{MF} \quad (43)$$

Sendo s_{MF} o desvio padrão dos valores do *Meter Factor* para determinada posição do medidor *clamp-on*.

Vale ressaltar que a eq. (42) não possui o denominador \sqrt{n} (n elementos da amostra) pois isso só será válido se o resultado é oriundo da média das médias. No presente caso o *Meter Factor* médio é determinado por *Meter Factor* individuais determinados por apenas uma leitura.

O *Meter Factor* médio para duas trajetórias simétricas, i e j , pode ser escrito como:

$$MF_{i,j} = \frac{MF_i + MF_j}{2} \quad (44)$$

A incerteza do *Meter Factor* médio pode ser expressa como,

$$U_{MF_{i,j}} = \frac{1}{2} \sqrt{(U_{MF_i})^2 + (U_{MF_j})^2} \quad (45)$$

4.3. Resultados da simulação numérica

4.3.1. Estimativa do erro associado ao medidor ultrassônico

O escoamento numa tubulação de diâmetro de 4", com velocidade média na seção transversal de 1,212 m/s, foi simulado através do software CFX pela equipe executora do projeto de P&D para a Petrobras. A distância da seção transversal da perturbação a montante varia de 5D a 70D. Os resultados da simulação das velocidades do escoamento nas direções axial (x) e radiais (y e z) das diferentes posições da seção, em diferentes posições angulares, podem ser observadas da Tabela 4 à Tabela 6.

A Tabela 4 mostra que para uma distância equivalente de 70D a velocidade axial média varia na faixa $1,284 \pm 0,006$ m/s, com um nível de confiança de 95,45%. Isto significa que o escoamento está quase completamente desenvolvido. Este valor é diferente da velocidade média na seção transversal (1,212 m/s), que é calculado como a relação entre a vazão volumétrica e a área da seção transversal. A relação entre os dois valores é obtida por calibração do medidor *clamp-on*, sendo função do número de Reynolds do escoamento. Uma análise da eq. (22) à eq. (29) mostra que quando o escoamento está completamente desenvolvido, a velocidade axial média do escoamento, eq. (17), é igual à relação entre a velocidade medida pelo medidor (\bar{v}) e $\cos\beta$. Durante o processo de medição multiplica-se este valor pelo fator determinado na calibração do medidor para obtenção da velocidade média da seção transversal e, portanto, vazão. Para o escoamento em desenvolvimento, considera-se que a velocidade axial média (\bar{u}_x) é igual a $\left(\frac{\bar{v}}{\cos\beta} \right)$. O erro, definido como a diferença entre estes dois valores, normalizado pela velocidade axial média, é função das velocidades não axiais.

Tabela 4 - Velocidade axial média u_x simulada (m/s)

	5D	10D	20D	30D	40D	50D	60D	70D
0°	1,144930	1,227370	1,181770	1,201870	1,234210	1,259020	1,274960	1,282410
45°	1,194310	1,252510	1,251010	1,260050	1,272410	1,280240	1,283670	1,284420
90°	1,196380	1,246660	1,269250	1,276760	1,286430	1,289800	1,289350	1,287840
135°	1,202280	1,246380	1,239990	1,244140	1,256330	1,268300	1,277420	1,282040
180°	1,157010	1,223190	1,181220	1,202910	1,234910	1,259830	1,275880	1,283280
225°	1,201850	1,246360	1,251490	1,259830	1,272180	1,280330	1,284040	1,284860
270°	1,196090	1,247050	1,269300	1,276920	1,286650	1,289910	1,289320	1,287720
315°	1,194500	1,253140	1,239840	1,244620	1,256670	1,268120	1,276840	1,281360

Tabela 5 - Velocidade radial média u_y simulada (m/s)

	5D	10D	20D	30D	40D	50D	60D	70D
0°	-0,000760	0,000092	0,000139	-0,000019	-0,000022	-0,000047	-0,000077	-0,000089
45°	-0,079833	-0,046024	-0,019062	-0,009218	-0,004836	-0,002663	-0,001470	-0,000798
90°	0,005702	0,003583	0,003528	0,002667	0,001841	0,001173	0,000674	0,000345
135°	0,082886	0,051097	0,023226	0,012228	0,006852	0,003884	0,002093	0,001059
180°	-0,000326	0,000141	0,000127	-0,000001	-0,000002	-0,000031	-0,000065	-0,000081
225°	-0,078934	-0,046083	-0,019024	-0,009180	-0,004817	-0,002649	-0,001458	-0,000791
270°	-0,000568	0,004946	0,003375	0,002529	0,001782	0,001155	0,000672	0,000345
315°	0,084077	0,050941	0,023224	0,012279	0,006881	0,003898	0,002098	0,001058

Tabela 6 - Velocidade radial média u_z simulada (m/s)

	5D	10D	20D	30D	40D	50D	60D	70D
0°	-0,223936	-0,103669	-0,044983	-0,022905	-0,012059	-0,006390	-0,003168	-0,001440
45°	-0,071530	-0,049714	-0,018855	-0,009046	-0,004746	-0,002370	-0,000994	-0,000297
90°	0,006094	-0,003518	0,000294	0,000076	0,000035	0,000237	0,000399	0,000416
135°	-0,080615	-0,054352	-0,022969	-0,012001	-0,006644	-0,003559	-0,001708	-0,000710
180°	-0,210604	-0,103792	-0,045010	-0,022741	-0,011979	-0,006360	-0,003160	-0,001438
225°	-0,076406	-0,049727	-0,018888	-0,009130	-0,004790	-0,002390	-0,001004	-0,000305
270°	0,006160	-0,003546	0,000267	0,000073	0,000031	0,000231	0,000393	0,000411
315°	-0,076155	-0,054246	-0,022972	-0,011967	-0,006639	-0,003563	-0,001712	-0,000713

A partir dos dados simulados e utilizando os conceitos estabelecidos no item 3.4 é possível estimar o erro de indicação do medidor ultrassônico de trajetória única (Tabela 7 e Figura 8). Pode-se observar que o erro absoluto é menor do que 0,11% a partir de 70D.

Tabela 7 - Estimativa do erro percentual para trajetória única

	5D	10D	20D	30D	40D	50D	60D	70D
0°	19,56%	8,45%	3,81%	1,91%	0,98%	0,51%	0,25%	0,11%
45°	8,96%	5,40%	2,14%	1,02%	0,53%	0,28%	0,14%	0,06%
90°	-0,48%	-0,29%	-0,28%	-0,21%	-0,14%	-0,09%	-0,05%	-0,03%
135°	-9,62%	-5,98%	-2,63%	-1,38%	-0,76%	-0,41%	-0,21%	-0,10%
180°	-18,20%	-8,49%	-3,81%	-1,89%	-0,97%	-0,50%	-0,25%	-0,11%
225°	-9,14%	-5,44%	-2,14%	-1,03%	-0,53%	-0,28%	-0,14%	-0,06%
270°	-0,05%	0,40%	0,27%	0,20%	0,14%	0,09%	0,05%	0,03%
315°	9,49%	5,94%	2,63%	1,38%	0,76%	0,42%	0,21%	0,10%

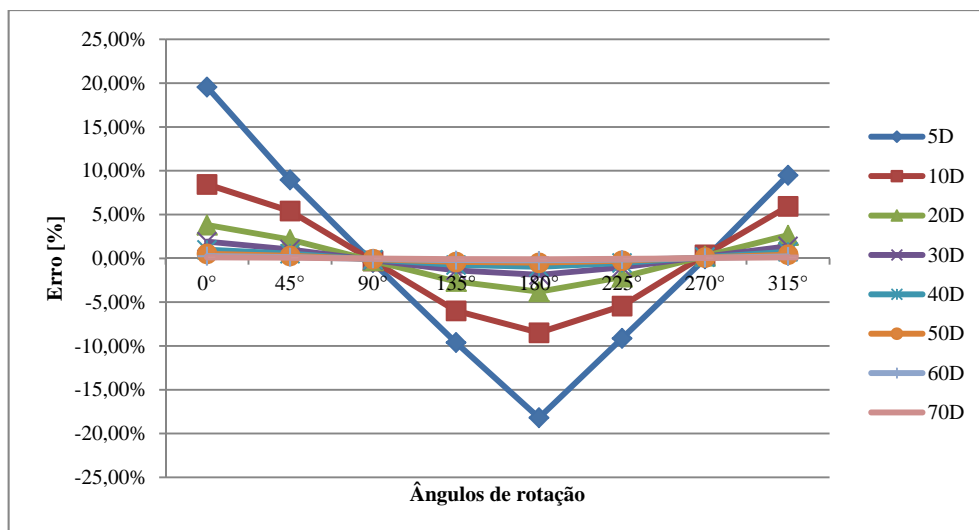


Figura 18 - Estimativa do erro percentual para trajetória única

4.3.1.1.

Estimativa do erro associado ao medidor ultrassônico (180°)

Com os conceitos do item 3.5, a estimativa do erro do medidor ultrassônico com duas trajetórias é determinada, e de acordo com os resultados da Tabela 8 (e Figura 19), pode-se observar que ele é menor do que 0,05% a partir de 10D.

Tabela 8 - Estimativa do erro para duas trajetórias (180°)

	5D	10D	20D	30D	40D	50D	60D	70D
0° - 180°	0,68%	-0,02%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
45° - 225°	-0,09%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
90° - 270°	-0,26%	0,05%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
135° - 315°	-0,07%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

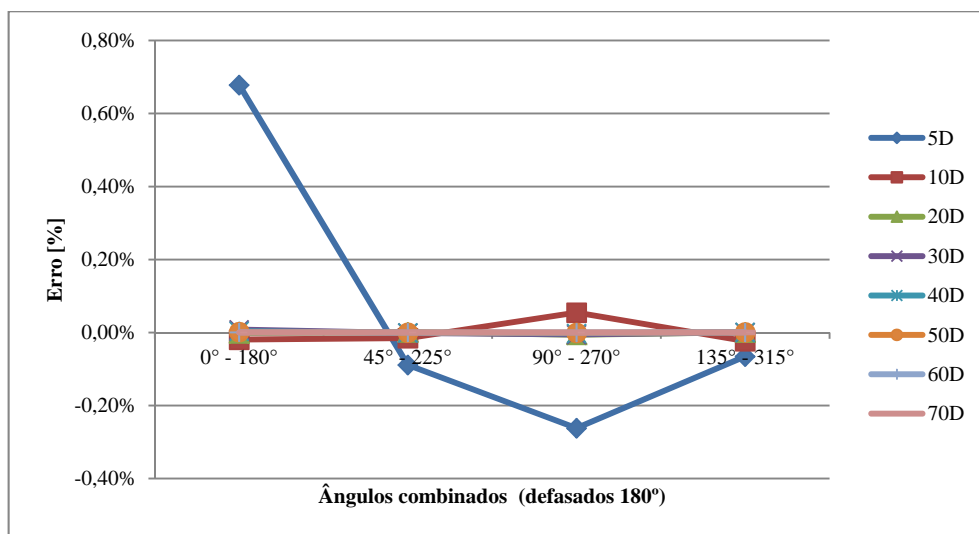


Figura 19 - Estimativa do erro percentual para duas trajetórias (180°)

4.3.1.2.

Estimativa do erro associado ao medidor ultrassônico (90°)

Com os conceitos do item 3.6, a estimativa do erro do medidor ultrassônico com duas trajetórias é determinada, e de acordo com os resultados da Tabela 9 (e Figura 20), pode-se observar que ele é menor do que 5,71% a partir de 10D, inferior ao obtido com trajetória única.

Tabela 9 - Estimativa do erro para duas trajetórias (90°)

	5D	10D	20D	30D	40D	50D	60D	70D
0° - 90°	9,54%	4,08%	1,76%	0,85%	0,42%	0,21%	0,10%	0,04%
45° - 135°	-0,33%	-0,29%	-0,25%	-0,18%	-0,11%	-0,07%	-0,04%	-0,02%
90° - 180°	-9,34%	-4,39%	-2,04%	-1,05%	-0,56%	-0,30%	-0,15%	-0,07%
135° - 225°	-9,38%	-5,71%	-2,39%	-1,20%	-0,65%	-0,35%	-0,17%	-0,08%
180° - 270°	-9,12%	-4,04%	-1,77%	-0,85%	-0,42%	-0,21%	-0,10%	-0,04%
225° - 315°	0,17%	0,25%	0,25%	0,17%	0,11%	0,07%	0,04%	0,02%
270° - 0°	-0,02%	0,20%	0,13%	0,10%	0,07%	0,04%	0,03%	0,01%
315° - 45°	4,74%	2,97%	1,32%	0,69%	0,38%	0,21%	0,11%	0,05%

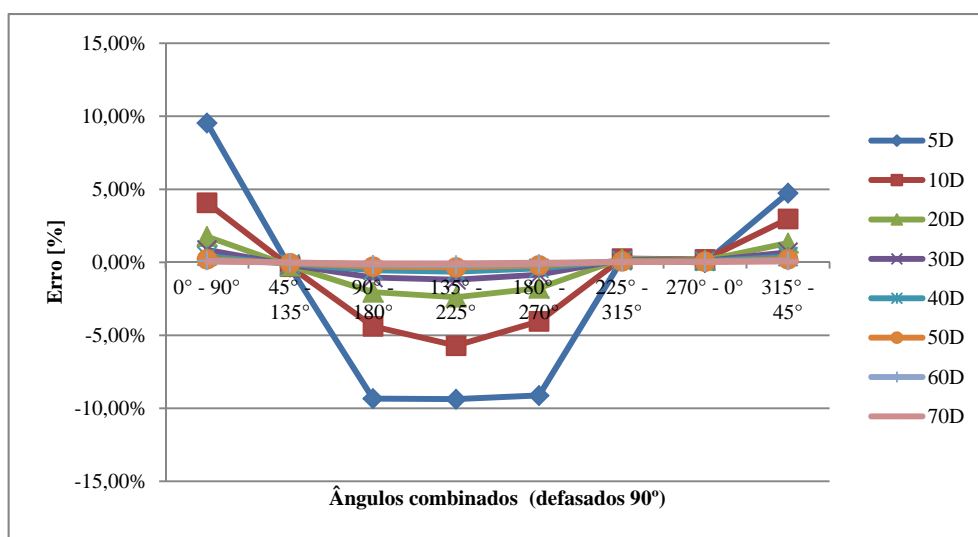


Figura 20 - Estimativa do erro percentual para duas trajetórias (90°)

4.3.2.

Comparação entre erros do medidor (trajetórias de 90° e 180°)

Pode-se portanto observar que o uso de duas trajetórias diminui sensivelmente o erro na velocidade axial para trajetórias combinadas com defasagem de 180° entre os feixes ultrassônicos, sendo os erros menores do que

0,05% a partir de 10D, contrapondo o 5,71% de erro a partir de 10D de trajetórias combinadas com defasagem de 90°.

Isto se deve ao fato de que trajetórias simétricas combinadas diminuem a influência dos componentes radiais de velocidade do escoamento, o que não ocorre quando os feixes ultrassônicos estão perpendiculares [34] (defasagem de 90°).

4.4. Resultados experimentais

4.4.1. Resultados para trajetória única

Nos testes realizados no loop de vazão do LAME/PUC-Rio, ajustado para uma vazão nominal de bomba de 30 m³/h, foram colocados em série medidores intrusivos Caldon (referência) e Krohne, e o medidor não intrusivo *clamp-on*, posicionado com um ângulo de inclinação. Em cada corrida, as vazões indicadas pelos medidores foram integradas por um computador de vazão durante um intervalo de tempo de 5 (cinco) minutos. Os volumes totalizados para cada um dos medidores *clamp-on* e Krohne foram usados para calcular o erro percentual e o fator do medidor (*Meter Factor*) em relação ao volume totalizado do medidor Caldon.

Na distância equivalente de 12D do início do trecho reto de tubulação foram realizadas 6 repetições para cada tipo de corrida caracterizada por cada uma das 8 posições selecionadas do medidor *clamp-on* da Figura 12 e cada um dos 2 tipos de sensor do medidor (C2 e D1), totalizando assim 16 corridas, com 6 repetições cada. As médias do erro percentual do fator do medidor para cada corrida foram calculadas e apresentadas na Tabela 10 e na Tabela 11. Da mesma forma, foi calculada a repetibilidade (*U*) do fator do medidor (95,45%) e, para comparação, o erro médio do fator do medidor em relação ao valor calculado numericamente pelo software CFX.

Analogamente à distância de 12D, porém somente para o sensor D1, na distância de 35D foram realizadas 20 repetições para a posição de 90° e 9 para as demais.

Os valores medidos de volume são apresentados nos Anexos A, B e C.

A Tabela 10 e a Tabela 11 mostram que a repetibilidade (U) do fator do medidor (95,45%) para os dois sensores somente é maior do que 2% para uma posição de 45°. O valor calculado de repetibilidade também pode ser considerado sua incerteza de medição para um intervalo de totalização de 5 minutos, se o fator do medidor for corrigido, pois a contribuição da incerteza de medição de vazão com o medidor Caldon (menor que $\pm 0,2\%$) é desprezível. O uso do sensor D1 permite uma correção menor do fator do medidor do que para o sensor C2.

Comparando-se a Tabela 10 e a Tabela 11 pode-se também observar que a variação do fator do medidor com o ângulo de inclinação é bem menor para 35D, indicando que nesta posição o escoamento está quase completamente desenvolvido.

Tabela 10 - Erro, *meter factor* e incerteza (12D)

Posições	C2 _{12D}			D1 _{12D}			Erro simulação 10D [%]
	Erro _(C2-12D) [%]	MF _(C2-12D)	U _(C2-12D) [%]	Erro _(D1-12D) [%]	MF _(D1-12D)	U _(D1-12D) [%]	
0°	-6,39	1,06825	0,88	3,75	0,96383	0,48	8,45
45°	-5,84	1,06199	0,40	3,25	0,96858	2,28	5,40
90°	-11,22	1,12647	1,69	-1,26	1,01272	0,56	-0,29
135°	-16,97	1,20435	0,55	-8,05	1,08761	0,85	-5,98
180°	-19,84	1,24746	1,06	-11,85	1,13443	0,48	-8,49
225°	-18,84	1,23221	0,57	-9,68	1,10713	1,05	-5,44
270°	-11,86	1,13458	0,92	-4,83	1,05078	0,93	0,40
315°	-7,69	1,08335	0,96	2,00	0,98039	0,85	5,94

Tabela 11- Erro, *meter factor* e incerteza (35D)

Posições	D1 _{35D}			Erro simulação 30D [%]
	Erro _(D1-35D) [%]	MF _(D1-35D)	U _(D1-35D) [%]	
0°	2,71	0,97358	0,53	1,91
45°	4,47	0,95723	1,33	1,02
90°	4,62	0,95588	1,16	-0,21
135°	3,98	0,96173	1,01	-1,38
180°	2,79	0,97291	1,17	-1,89
225°	4,72	0,95495	0,84	-1,03
270°	4,16	0,96008	0,72	0,20
315°	3,08	0,97009	0,94	1,38

Graficamente, a representação dos dados pode ser encontrada da Figura 21 à Figura 24.

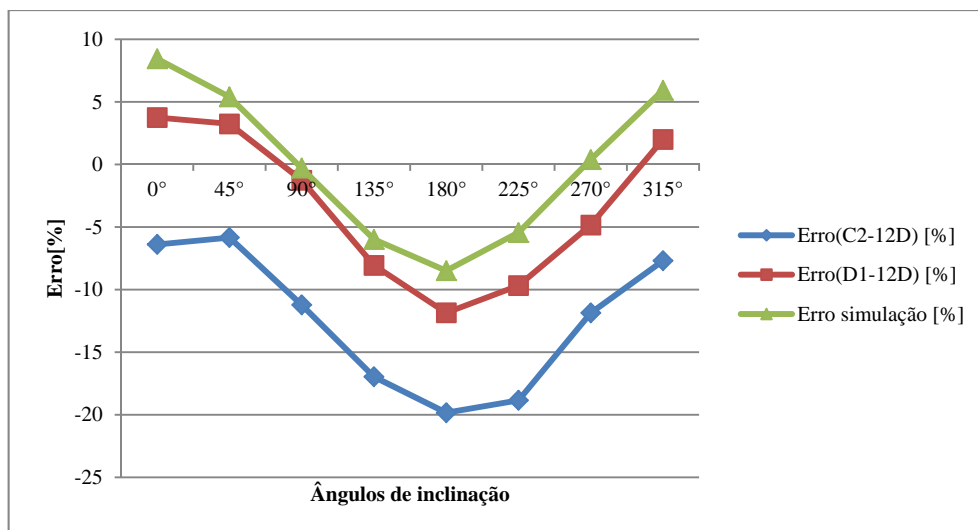


Figura 21 - Erro sistemático para trajetória única (12D)

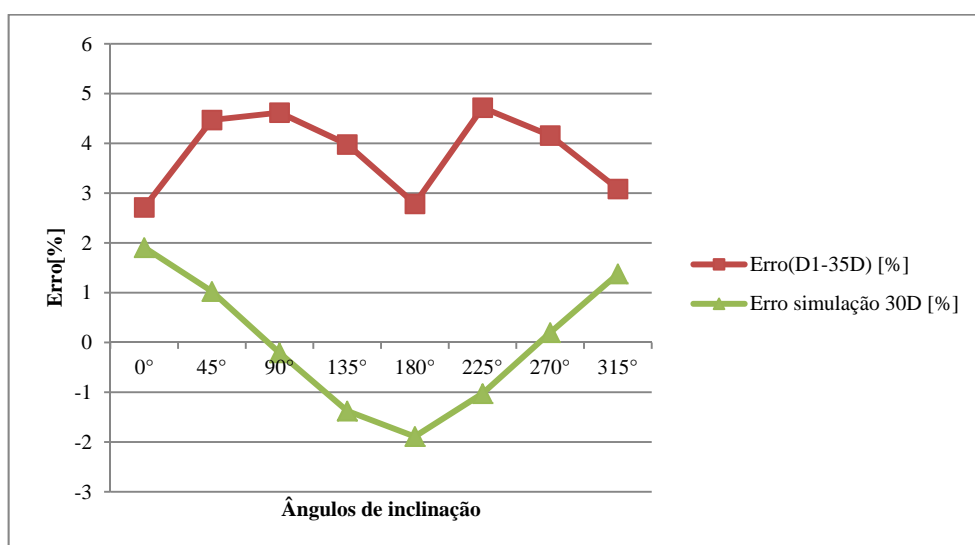


Figura 22 - Erro sistemático para trajetória única (35D)

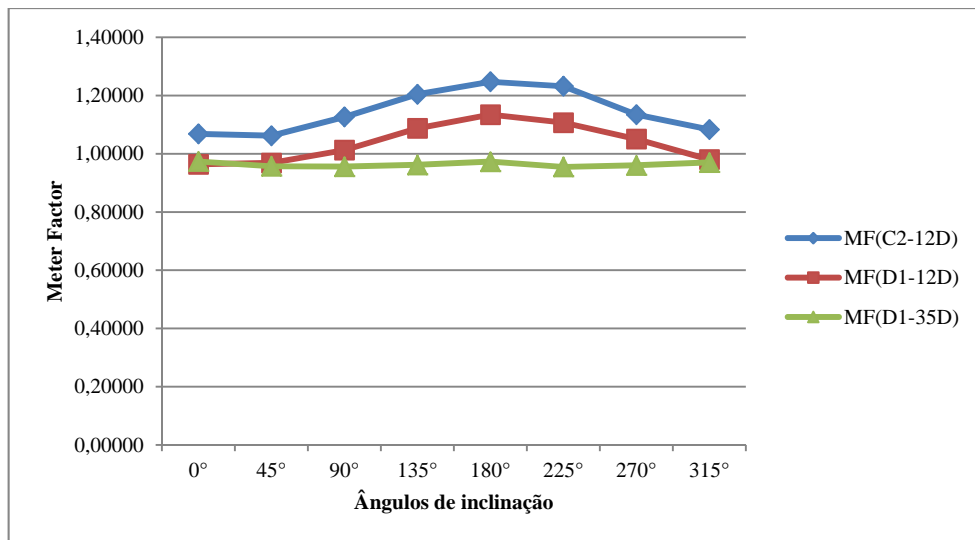


Figura 23 - *Meter Factor* para trajetória única

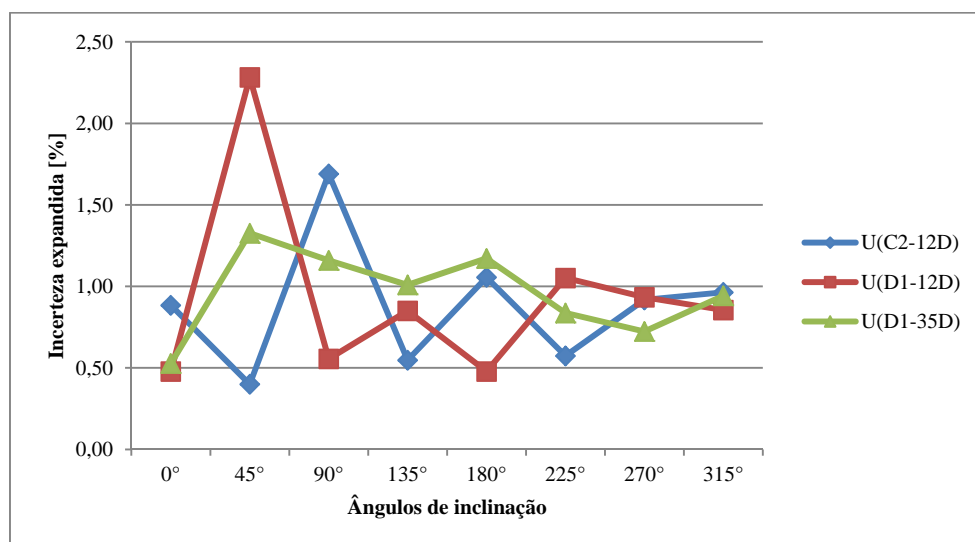


Figura 24 - Incerteza para trajetória única

Com base no exposto é possível afirmar que há coerência do erro sistemático entre os dados experimentais e a simulação numérica através da harmonia das formas das curvas. Assim como o exposto no capítulo 3, a avaliação dos erros combinados em pares diametralmente opostos é necessária para confirmar a simulação numérica.

De acordo com a Figura 23 pode-se observar que o *Meter Factor* varia ligeiramente com o ângulo da trajetória para distância 12D, indicando que o escoamento não está completamente desenvolvido. O *Meter Factor* neste caso também é afetado pela capacidade de medição do medidor Caldon, pois a vazão

está próxima à capacidade mínima de medição, que é 30 m³/h, o que é a capacidade máxima da bomba utilizada.

Ainda de acordo com Figura 23 pode-se concluir que para posições mais distantes da perturbação (35D), o *Meter Factor* se aproxima a 1, indicando que o escoamento está mais desenvolvido.

A Figura 24, para 12D, mostra que os menores valores de incertezas expandidas da vazão do *clamp-on* na configuração C2 estão associados os ângulos recomendados pela norma BS 8452, Figura 11, (45°, 135°, 225° e 315°), alcançando níveis mínimos de 0,48%. Já para a configuração D1 os menores valores de incertezas expandidas do *clamp-on* estão associados aos ângulos diferentes dos recomendados Figura 11.

Diferentes parâmetros de configuração resultam em diferentes resultados de medição, o que reforça a necessidade de correta configuração do medidor *clamp-on* no processo de medição.

4.4.2.

Resultados para trajetórias combinadas defasadas de 180°

No sentido de se confrontar os dados experimentais com os simulados e comprovar a teoria proposta neste trabalho a combinação dos ângulos diametralmente opostos (defasados de 180°) foi realizada.

Os resultados desta combinação para as configurações C2 e D1 nas distâncias de 12D e 35D são encontrados na Tabela 12 e Tabela 12, e graficamente representados da Figura 25 à Figura 28.

Tabela 12 - Erro, *meter factor* e incerteza (12D e 180°)

Ângulos de inclinação	C2 _{12D}			D1 _{12D}			Erro simulação 10D [%]
	Erro _(C2-12D) [%]	MF _(C2-12D)	U _(C2-12D) [%]	Erro _(D1-12D) [%]	MF _(D1-12D)	U _(D1-12D) [%]	
0° - 180°	-13,11	1,15786	0,69	-4,05	1,04913	0,34	-0,019
45° - 225°	-12,34	1,14710	0,35	-3,21	1,03786	1,26	-0,015
90° - 270°	-11,54	1,13052	0,96	-3,04	1,03175	0,54	0,055
135° - 315°	-12,33	1,14385	0,55	-3,03	1,03400	0,60	-0,024

Tabela 13 - Erro, *meter factor* e incerteza (35D e 180°)

Ângulos de inclinação	D1 _{35D}			Erro simulação 30D [%]
	Erro _(D1-35D) [%]	MF _(D1-35D)	U _(D1-35D) [%]	
0° - 180°	2,75	0,97325	0,64	0,0076
45° - 225°	4,60	0,95609	0,78	-0,0014
90° - 270°	4,39	0,95798	0,68	-0,0054
135° - 315°	3,53	0,96591	0,69	0,0002

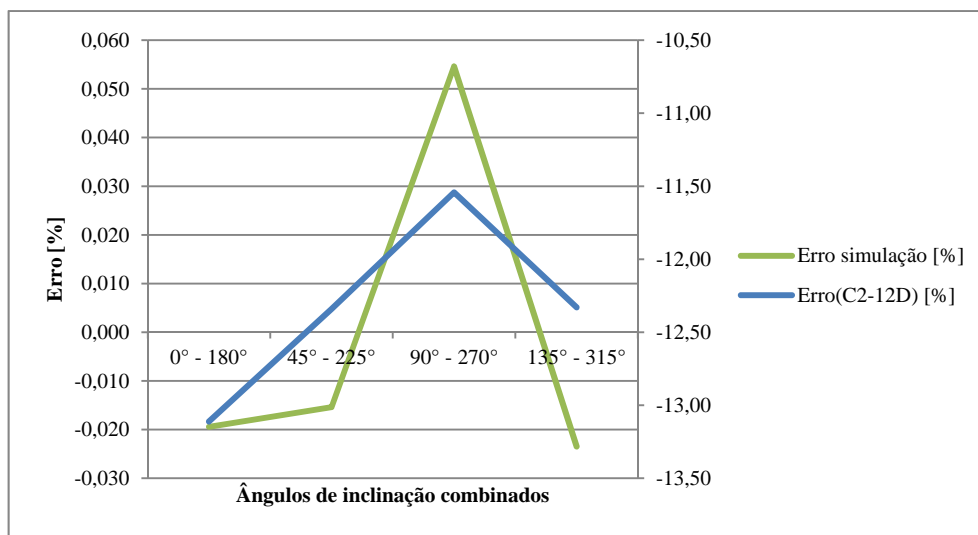


Figura 25 - Erro sistemático para duas trajetórias (180° e C2-12D)

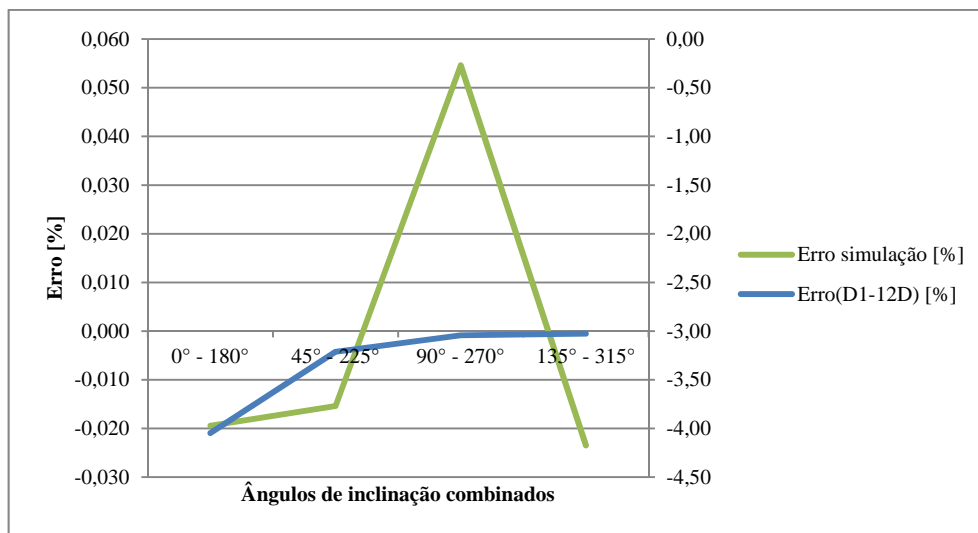


Figura 26 - Erro sistemático para duas trajetórias (180° e D1-12D)

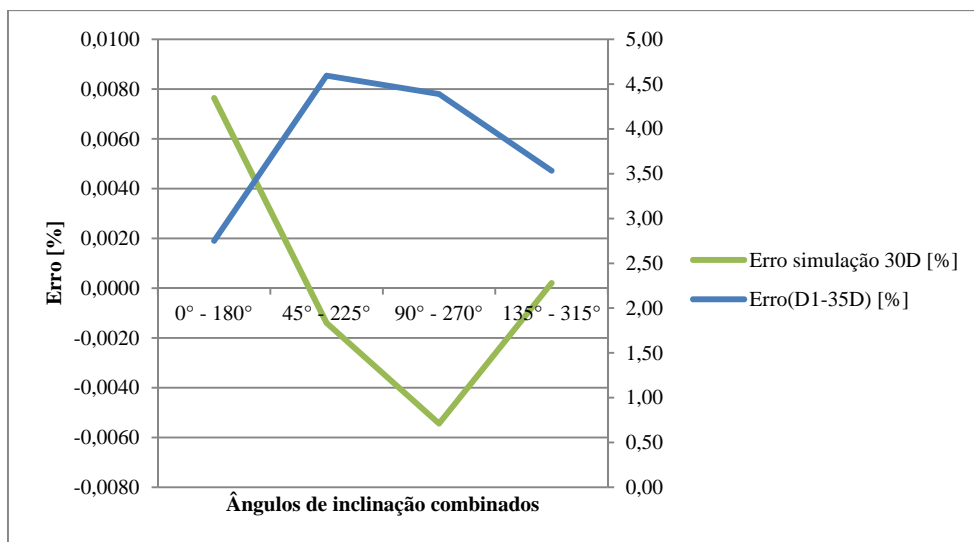


Figura 27 - Erro sistemático para duas trajetórias (180° e D1-35D)

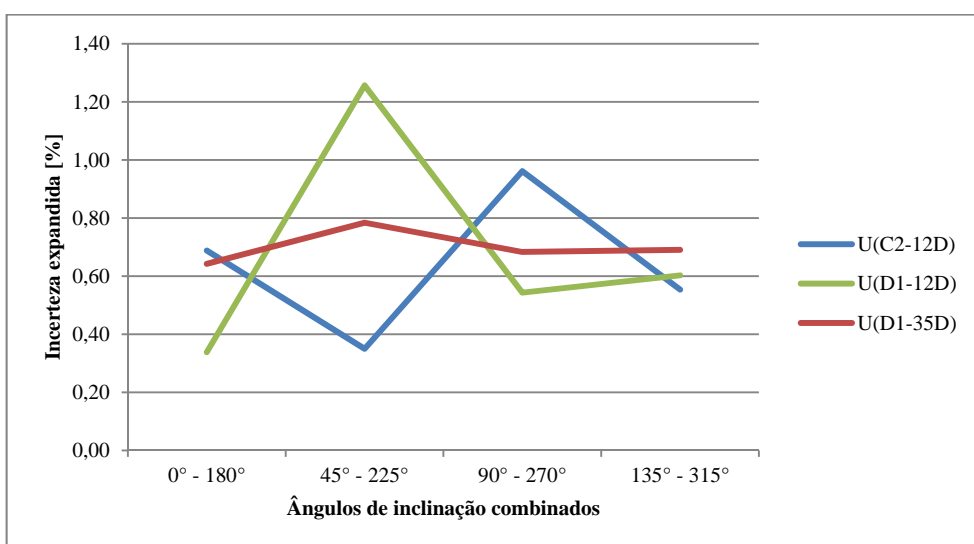


Figura 28 - Incerteza expandida para duas trajetórias defasadas de 180°

Através dos resultados obtidos é possível concluir que a Figura 25 e a Figura 26 corroboram a teoria proposta dado o formato das curvas dos erros experimentais e teóricos. Os erros sistemáticos são reduzidos com trajetórias simétricas combinadas.

Já a Figura 28 mostra que os menores valores de incertezas expandidas do *Meter Factor* do *clamp-on*, na configuração C2, estão associados às posições combinadas inclinadas em 45° da linha horizontal do escoamento, ou seja, 45°-225° e 135°-315°. As estimativas das incertezas expandidas de calibração do *clamp-on* foi 0,35% para o par 45°-225° e 0,55% para o par 135°-315°.

Observa-se que a incerteza da vazão e do *Meter Factor* com trajetórias combinadas é menor do que para trajetória únicas.

Diferentes parâmetros de configuração resultam em diferentes resultados de medição.

Em condições de escoamento completamente desenvolvido, a incerteza de medição com duas trajetórias é inferior a 0,8% (Tabela 13).

Em resumo, a combinação de trajetórias e a correta configuração dos medidores do tipo *clamp-on* promovem dados metrologicamente mais confiáveis, já que se notou uma redução do nível de incerteza, pois a maior incerteza observada para a configuração C2 reduziu em 1,76 vezes e para a configuração D1 em 1,81 vezes em seus picos máximos.

Comercialmente está disponível no mercado um medidor *clamp-on* FLEXIM modelo G704, com duas trajetórias ultrassônicas. Ele foi calibrado em 2016 no laboratório do CEESI (*Colorado Engineering Experiment Station Inc*), acreditado pela Rede NVLAP, com resultados rastreáveis ao NIST (*National Institute of Standards and Technology*), para condição de escoamento completamente desenvolvido, com dois fluidos: (a) Exxsol D80 (2,62 cS) e (b) Drakeol5 (19,9 cS), cujos resultados são vistos na Figura 29. A linearidade foi medida em $\pm 0,39\%$, e o espalhamento médio foi medido em 0,31%, abaixo portanto dos resultados obtidos, com o medidor Siemens FUS 1020.

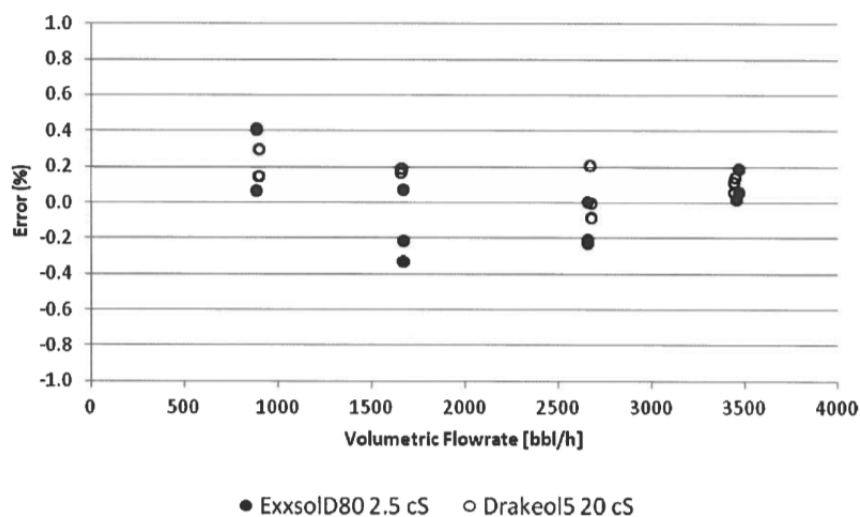


Figura 29 - Calibração do medidor Flexim modelo G704 no CEESI

4.4.3.

Resultados para trajetórias combinadas defasadas de 90°

Visando confrontar os dados de trajetórias combinadas defasadas de 180°, a análise dos dados de trajetórias combinadas defasadas de 90° foi realizada.

Os resultados desta combinação para as configurações C2 e D1 nas distâncias de 12D e 35D são encontrados na Tabela 12 e Tabela 13, e graficamente representados da Figura 25 à Figura 28.

Tabela 14 - Erro, *meter factor* e incerteza (12D e 90°)

Ângulos de inclinação	C2 _{12D}			D1 _{12D}			Erro simulação 10D [%]
	Erro _{C2-12D} [%]	MF _{C2-12D}	U _{C2-12D}	Erro _{D1-12D} [%]	MF _{D1-12D}	U _{D1-12D}	
0° - 90°	-8,80612	1,09736	0,95	1,24871	0,98827	0,37	4,07951
45° - 135°	-11,40246	1,13317	0,34	-2,40221	1,02809	1,22	-0,28874
90° - 180°	-15,53037	1,18696	1,00	-6,55267	1,07357	0,37	-4,38638
135° - 225°	-17,90627	1,21828	0,40	-8,86497	1,09737	0,68	-5,70904
180° - 270°	-15,84874	1,19102	0,70	-8,34076	1,09260	0,52	-4,04436
225° - 315°	-13,26867	1,15778	0,56	-3,83712	1,04376	0,68	0,24984
270° - 0°	-9,12450	1,10141	0,46	-0,53937	1,00731	0,47	4,42154
315° - 45°	-6,76486	1,07267	0,48	2,62564	0,97448	0,43	5,67014

Tabela 15 - Erro, *meter factor* e incerteza (35D e 90°)

Ângulos de inclinação	D1 _{35D}			Erro simulação 30D [%]
	Erro _(D1-35D) [%]	MF _(D1-35D)	U _(D1-35D) [%]	
0° - 90°	3,66669	0,96473	0,64	0,84844
45° - 135°	4,22610	0,95948	0,83	-0,17607
90° - 180°	3,70295	0,96439	0,82	-1,04972
135° - 225°	4,34991	0,95834	0,66	-1,20236
180° - 270°	3,47263	0,96650	0,69	-0,84624
225° - 315°	3,90175	0,96252	0,63	0,17488
270° - 0°	3,43638	0,96683	0,36	0,09902
315° - 45°	3,77794	0,96366	0,47	0,68872

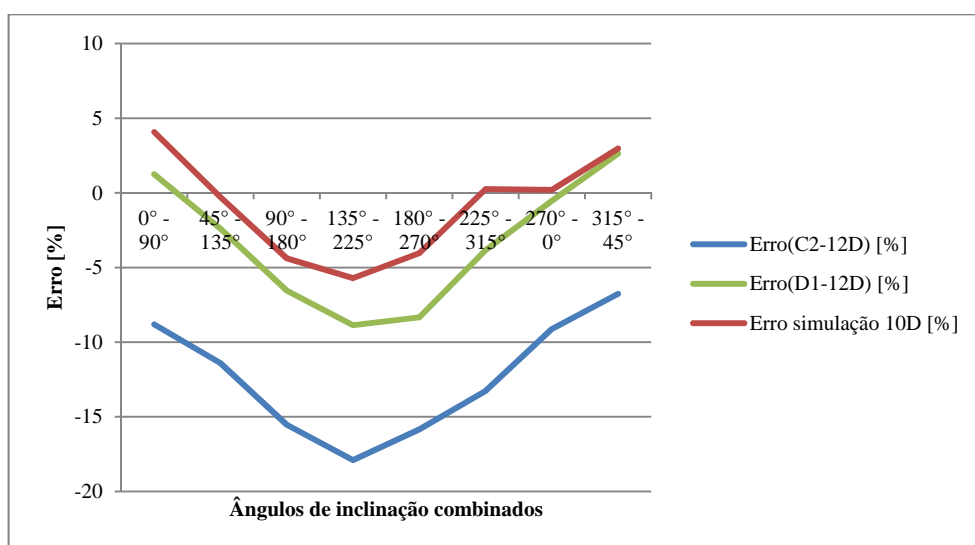


Figura 30 - Erro sistemático para duas trajetórias defasadas de 90° (12D)

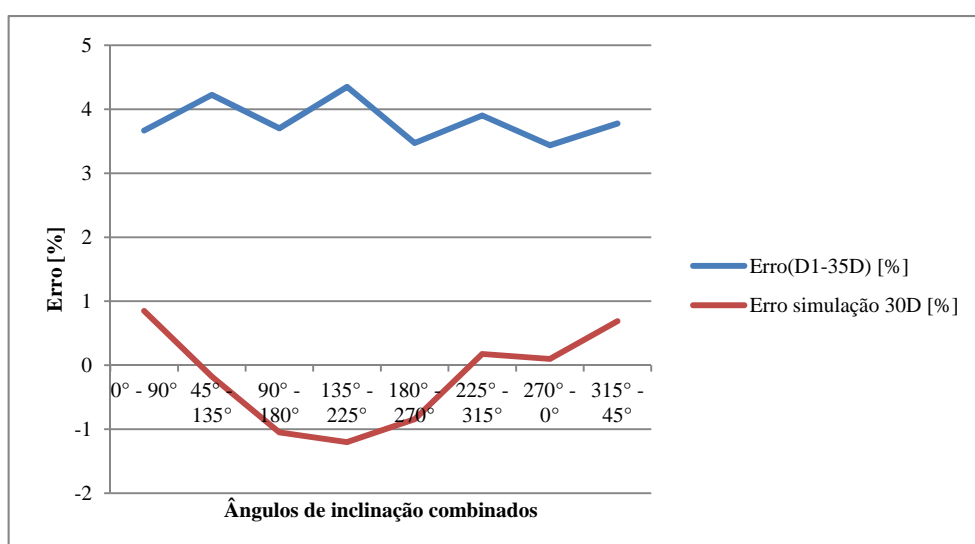


Figura 31 - Erro sistemático para duas trajetórias defasadas de 90° (35D)

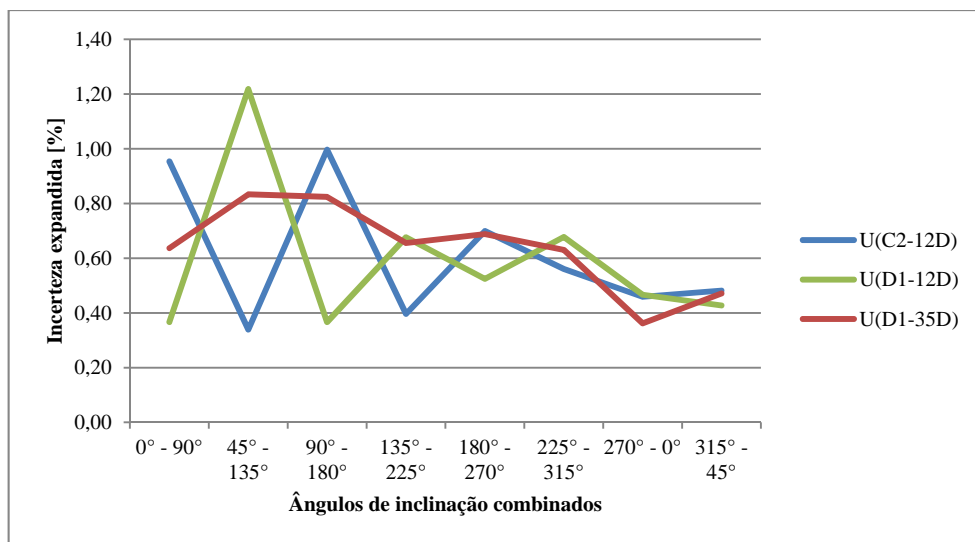


Figura 32 - Incerteza expandida para duas trajetórias defasadas de 90°

Em síntese, comparando-se metrologicamente as duas abordagens de trajetórias combinadas, a alternativa de combinação de 180° corresponde a dados metrologicamente superiores às combinações de 90° em níveis incerteza expandida e, principalmente, de exatidão conforme previsto na teoria.

4.4.4. Calibração do medidor de vazão Krohne

Após calibração entre o medidor *clamp-on* e o Caldon, esse serviu de padrão itinerante de transferência para calibração do Krohne simulando uma calibração *in-situ* de um medidor em linha que não pode ser localmente calibrado ou removido para calibração, em condições de inexistência de trecho reto de tubulação suficientemente longo para garantia de um escoamento completamente desenvolvido. Como resultado da calibração do *clamp-on*, dois pares de trajetórias se destacaram pelo desempenho metrológico, principalmente relativos à incerteza da calibração: os pares 45°-225° e 135°-315°.

Sendo assim, as características metrológicas do *clamp-on* para estes pares foram transportadas na calibração do medidor Krohne. A avaliação de cada um dos pares foi feita separadamente considerando cada uma das configurações do medidor *clamp-on*, ou seja, C2 e D1.

Os medidores Caldon, *clamp-on* e Krohne foram colocados em série e os volumes, medidos ao mesmo tempo, foram utilizados para calibrar o medidor *clamp-on* em comparação com o Caldon, e o medidor Krohne contra o *clamp-on*.

4.4.4.1.

Avaliação metrológica para configuração C2 do *clamp-on*

A Tabela 16 e a Figura 33 apresentam os resultados obtidos com o *clamp-on*, na configuração C2, sendo o padrão itinerante nos pares de ângulos combinados de 45°-225° e 135°-315° e posicionado à distância de 12D da perturbação.

Avalia-se o erro sistemático, o fator do medidor (MF) e a incerteza expandida da calibração do Krohne.

Tabela 16 - Calibração do Krohne *versus clamp-on* (C2-12D)

Ângulos de inclinação	45° - 225°			135° - 315°		
	Erro _(45°-225°) [%]	MF _(45°-225°)	U _(45°-225°) [%]	Erro _(135°-315°) [%]	MF _(135°-315°)	U _(135°-315°) [%]
0°	0,0005	1,13766	0,79	0,0005	1,13444	0,89
45°	0,0003	1,14672	0,65	0,0003	1,14347	0,78
90°	0,0015	1,08080	1,24	0,0015	1,07773	1,31
135°	0,0004	1,00827	0,67	0,0004	1,00541	0,79
180°	0,0006	0,97427	0,76	0,0006	0,97151	0,87
225°	0,0001	0,98618	0,48	0,0001	0,98339	0,64
270°	0,0004	1,07232	0,70	0,0004	1,06928	0,82
315°	0,0012	1,12123	1,16	0,0012	1,11805	1,23

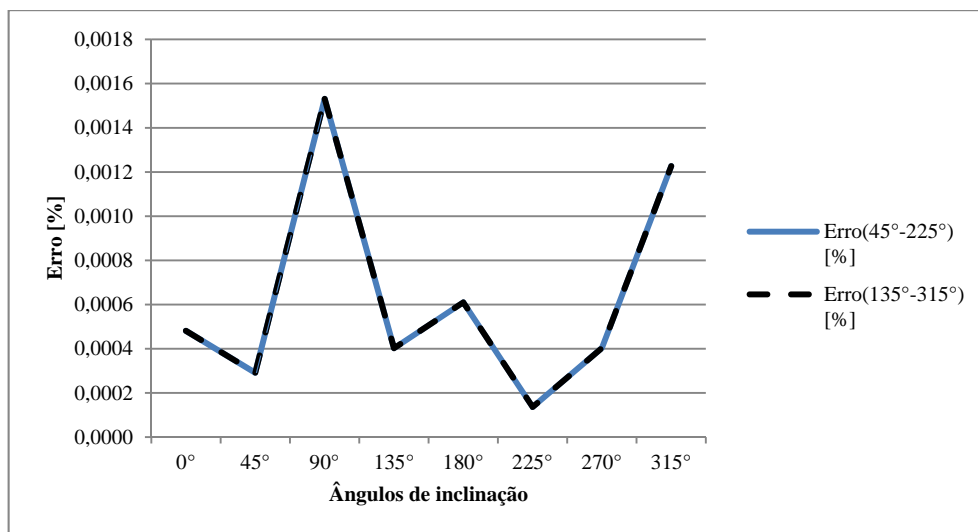


Figura 33 - Erro sistemático do Krohne para configuração C2 do *clamp-on*

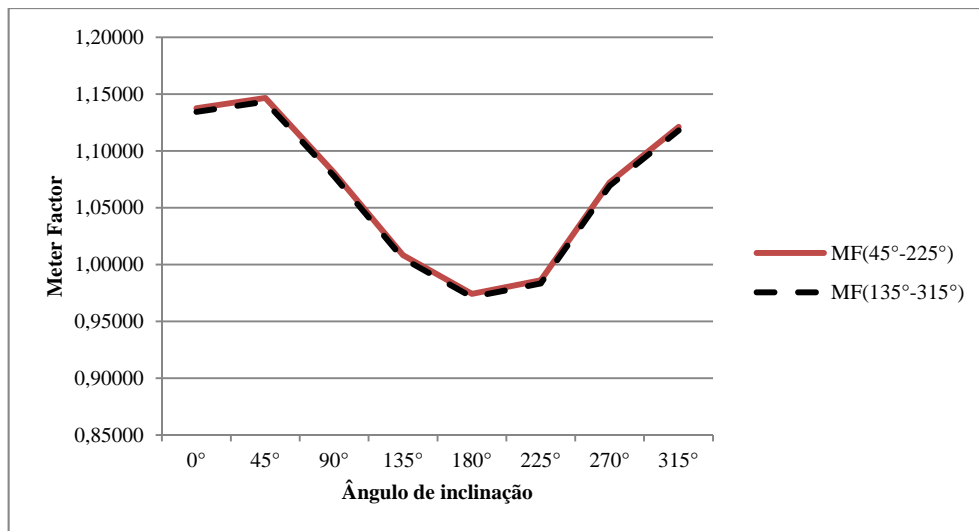


Figura 34 - Meter Factor de calibração do Krohne (Configuração C2)

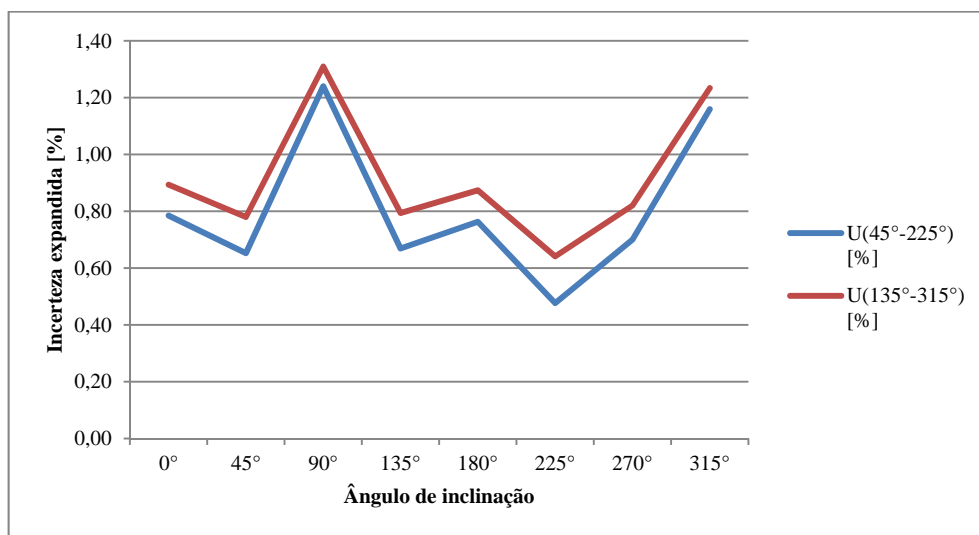


Figura 35 - Incerteza de medição do Krohne (Configuração C2)

4.4.4.2.

Avaliação metrológica para configuração D1 do *clamp-on*

A Tabela 17 e a Figura 34 apresentam os resultados obtidos com o *clamp-on*, na configuração C2, sendo o padrão itinerante nos pares de ângulos combinados de 45°-225° e 135°-315° e posicionado à distância de 12D da perturbação.

Avalia-se o erro sistemático, o fator do medidor (MF) e a incerteza expandida da calibração do Krohne.

Tabela 17 - Calibração do Krohne *versus clamp-on* (D1-12D)

Ângulos de inclinação	45° - 225°			135° - 315°		
	Erro _(45°-225°) [%]	MF _(45°-225°)	U _(45°-225°) [%]	Erro _(135°-315°) [%]	MF _(135°-315°)	U _(135°-315°) [%]
0°	0,0002	1,13736	2,41	0,0002	1,13313	0,98
45°	0,0003	1,12988	2,45	0,0003	1,12568	1,09
90°	0,0006	1,08498	2,51	0,0006	1,08094	1,21
135°	0,0004	1,00941	2,43	0,0004	1,00565	1,05
180°	0,0001	0,96686	2,38	0,0001	0,96326	0,92
225°	0,0004	0,99204	2,45	0,0004	0,98835	1,09
270°	0,0004	1,04538	2,44	0,0004	1,04150	1,06
315°	0,0000	1,11676	2,37	0,0000	1,11261	0,89

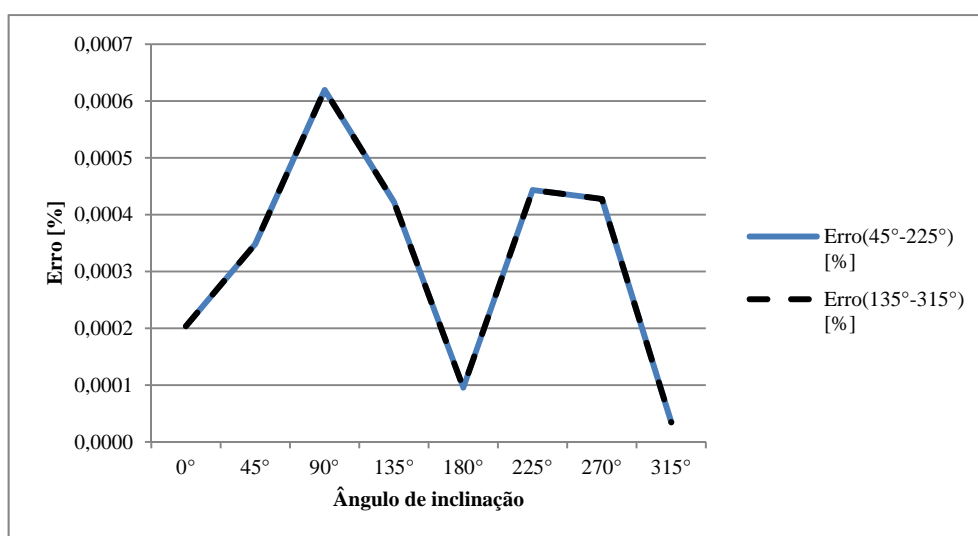


Figura 36 - Erro sistemático do Krohne (Configuração D1)

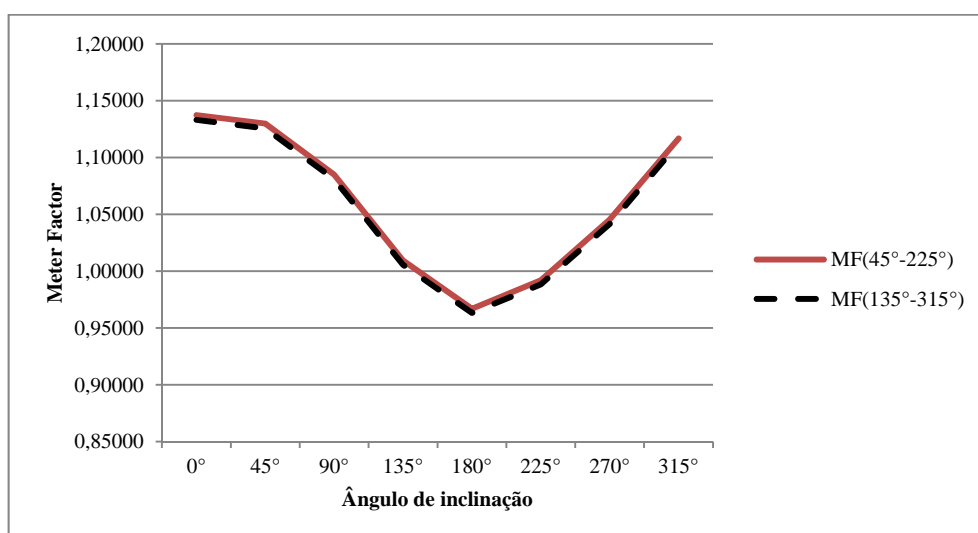


Figura 37 - Meter Factor de calibração do Krohne (Configuração D1)

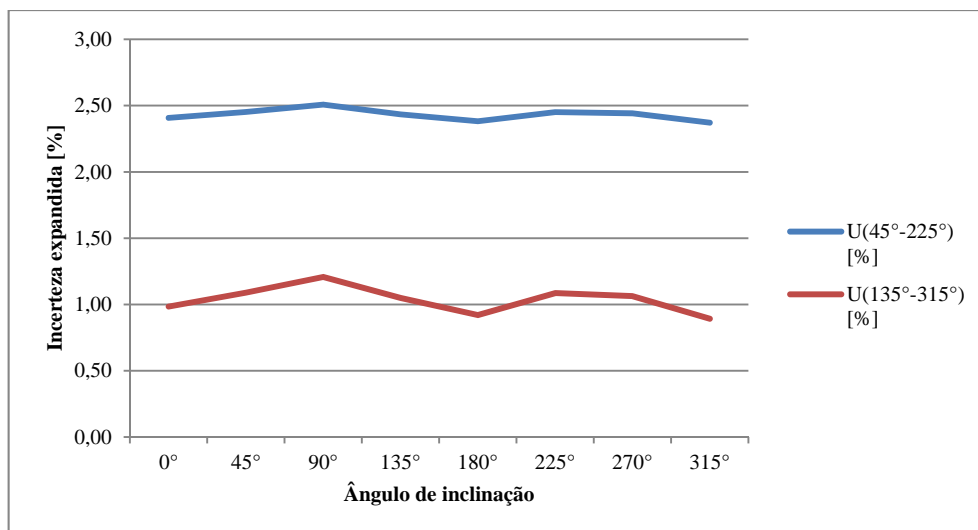


Figura 38 - Incerteza de medição do Krohne (Configuração D1)

4.4.5. Comparação das calibrações do medidor Krohne

A configuração C2 reforça a necessidade da correta configuração de um medidor no processo de medição, pois independentemente da combinação de ângulos do medidor *clamp-on* (45°-225° ou 135°-315°), os resultados de relacionados aos erros sistemáticos, *Meter Factor* e incertezas permanecem suficientemente iguais.

Na configuração D1 os resultados de erros sistemáticos, *Meter Factor* são suficientemente iguais, todavia a incerteza varia conforme o par combinado.

4.4.6. Conformidade com API MPMS 4.5

O atendimento à API MPMS 4.5 é mandatório segundo o RTM para validar a calibração de medidores que sejam caracterizados como padrão de referência, os medidores mestre. A diferença máxima de 0,02% entre os maiores e menores valores do fator de calibração é uma das características mais difíceis de serem cumpridas devido a diversos fatores, que incluem principalmente as condições de escoamento, instalação e equipamentos utilizados.

Desta forma a repetibilidade em cada uma das posições angulares, para trajetórias ultrassônicas únicas, foi avaliada, conforme pode ser visto na Tabela 18 e representado graficamente pela Figura 39.

Tabela 18 - Desvios dos fatores de calibração

Ângulos de inclinação	Desv. Fator (C2-12D)	Desv. Fator (D1-12D)	Desv. Fator (D1-35D)
0°	0,709%	0,554%	0,600%
45°	0,414%	1,981%	1,629%
90°	1,333%	0,443%	2,405%
135°	0,437%	0,687%	1,260%
180°	0,836%	0,418%	1,422%
225°	0,456%	0,920%	1,081%
270°	0,827%	0,956%	1,057%
315°	0,814%	0,780%	1,086%

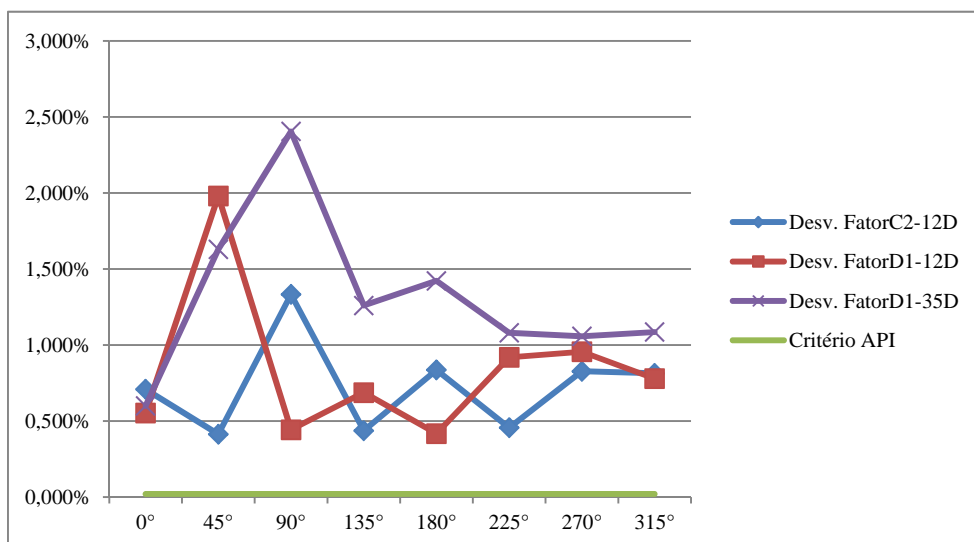


Figura 39 - Desvios entre os máximos e mínimos do *Meter Factor*

Os desvios encontrados entre os maiores e menores valores do *Meter Factor* para a configuração C2 estão 0,414% e 1,333% e para a configuração D1 estão entre 0,418% e 1,981%, acima do critério estabelecido pela API MPMS 4.5, que é de 0,02%.

Todavia, na configuração C2, os desvios do *Meter Factor* em um processo de calibração do *clamp-on*, para os ângulos recomendados pela Figura 11 (45°, 135°, 225° e 315°) os desvios se aproximam de 0,4%, o que possibilita a utilização deste medidor em uma medição de apropriação de acordo com o Regulamento Técnico de Medição (RTM).

4.4.7.

Utilização do *clamp-on* como padrão itinerante

Diante do exposto no desenvolvimento experimental, o medidor *clamp-on* de um feixe ultrassônico pode, sob determinadas condições, ser utilizado com trajetórias combinadas como padrão itinerante para calibração “in situ”.

Todavia, como também exposto no desenvolvimento experimental, as seguintes considerações devem ser tomadas para que os resultados da medição sejam metrologicamente confiáveis:

- i. Seguir as exigências, quando cabíveis, das normas de referência referente à calibração de medidores ultrassônicos;
- ii. Priorizar a utilização de medidores com dois ou mais feixes ultrassônicos dispostos em posições diametralmente separadas para se garantir a combinação dos *Meter Factors*;
- iii. Configurar os parâmetros da eletrônica com os dados fiéis de instalação;
- iv. Instalar os sensores conforme recomendação do fabricante;
- v. Realizar o “ajuste de zero” antes do processo de medição;

Dadas as diferenças dos resultados das configurações do *clamp-on*, fica evidente que diferentes parâmetros geram resultados metrologicamente distintos.

Já o “ajuste de zero” está presente em uma das principais normas de referência para medição ultrassônica de líquido (API MPMS 5.8) e foi evidenciado durante o processo de medição no circuito hidráulico do LAME. Desta forma é indubitavelmente necessário o “ajuste de zero” seja realizado em linhas com características similares às que serão calibradas ou que seja feito em reproduções da instalação em campo em laboratório.

Ainda que as incertezas observadas com trajetórias diametralmente combinadas tenham sido reduzidas frente a trajetórias únicas, os níveis de incerteza ainda estão além dos permitidos para aplicações fiscais e de transferência de custódia de líquido exigidos pelo Regulamento Técnico de Medição (RTM), que é 0,3%. O menor valor de incerteza encontrado foi de 0,35% (95,45%) para o par 45°-225° na avaliação da combinação dos ângulos diametralmente opostos (defasados de 180°).

Mesmo com incertezas mais elevadas das requeridas para medição fiscal de líquidos, o medidor *clamp-on* com duas trajetórias pode ser utilizado como padrão itinerante para calibração “in situ” de medidores com trecho reto disponível de

tubulação maior do que o comprimento equivalente de 10D, e que não possam ser retirados e enviados para um laboratório de calibração por razões técnica ou econômica.

Apesar do nível de incerteza ser acima do exigido para aplicações fiscais e transferência de custódia de líquido, o medidor *clamp-on* pode ser utilizado como padrão itinerante para outras aplicações, em que o valor da incerteza são mais brandos, como por exemplo, aplicações operacionais, em que é aceitável que a incerteza de medição exceda 0,3% e podendo chegar até 2%.

Supõe-se que o medidor *clamp-on* também possa ser utilizado como padrão intinerante em sistemas de medição de gás, já que a exigência para exatidão e incerteza são mais brandas do que a medição com líquido, sendo respectivamente, 0,5% e 1,5%.

Estes níveis, por exemplo, foram alcançados quando se analisa a incerteza para a Figura 28, em que o pico está em 0,96% (95,45%) para a configuração C2. Já a exatidão pode ser avaliada pela Figura 25 em que a aplicação do *Meter Factor* médio do par 45°-225° ou 135°-315° podem reduzir o erro para índices menores do que 0,5%.

Entretanto na medição de gás há fatores que têm relevante influência na avaliação da incerteza, como a composição gasosa relacionada às condições de operação, assim como o coeficiente de descarga. Estes fatores não foram objeto de estudo deste trabalho.

5

Conclusões e recomendações

5.1.

Conclusões

Esta pesquisa de mestrado avaliou o desempenho metrológico de um medidor do tipo *clamp-on* através do uso de duas trajetórias ultrassônicas e sua utilização como padrão itinerante para calibração “in situ” de medidores quando o escoamento está em desenvolvimento, com trechos retos de tubulação maiores do que um comprimento equivalente de 10D e que não possam ser retirados da tubulação e enviados para um laboratório de calibração por impossibilidade técnica ou econômica.

Tendo em vista os resultados consolidados pela pesquisa foi possível concluir que os objetivos originalmente formulados foram atingidos.

Concernente ao **primeiro objetivo específico** de *comparar os resultados experimentais obtidos em laboratório com resultados da simulação numérica existente*, dados experimentais mostraram que o uso de duas trajetórias ultrassônicas com ângulos de inclinação em relação à horizontal de 180° para o medidor *clamp-on* confirmaram os resultados esperados pela simulação numérica, reduzindo significativamente a influência dos componentes não axiais de velocidade sobre a medição de vazão, a partir de uma distância equivalente de 10 diâmetros de trecho reto de tubulação com erros sistemáticos reduzidos.

Por fim, o **segundo objetivo específico** - *validar a metodologia de calibração “in situ” utilizando um medidor ultrassônico do tipo clamp-on em comparação com outro medidor ultrassônico de maior hierarquia metrológica, visando atender aos requisitos legais aplicáveis* – conclui-se que apesar da combinação trajetórias simétricas especialmente aquelas propostas neste trabalho, 45°-225° e 135°-315°, as incertezas da vazão de, respectivamente 0,35% e 0,55% estão além do limite permitido pelo Regulamento Técnico de Medição (RTM), que é de 0,3% para aplicações fiscais e de transferência de custódia. Adicionalmente a repetibilidade de 0,02% requisitada entre fatores de calibração

pela API MPMS 4.5 não foi atingida, tendo o menor valor observado o de 0,414% para a posição de 45° na configuração C2.

A média de posições simétricas de feixes ultrassônicos de um medidor *clamp-on* pode reduzir os erros sistemáticos e os níveis de incerteza. Verifica-se que a utilização deste medidor, mais especificamente o utilizado neste trabalho, como padrão itinerante para calibração “in situ” de medidores de líquidos quando o escoamento está em desenvolvimento só é factível para aplicações que não requeiram reduzidos níveis de incerteza, elevada exatidão e desvios dos fatores de calibração exigidos para medição fiscal e transferência de custódia.

5.2.

Recomendações para desdobramentos do trabalho

Recomenda-se como possíveis desdobramentos futuros desta pesquisa os seguintes itens:

- Utilizar o gás natural como fluido a ser medido por um medidor do tipo *clamp-on*.
- Estudar os erros sistemáticos e as incertezas de medição do *clamp-on* para posições mais próximas e distantes da perturbação, variando-se entre 5D e 70D;
- Comparar o *clamp-on* com um provador de deslocamento ou tanque de calibração, em um loop líquido, para pleno atendimento à API MPMS 4.5 e redução dos níveis de incerteza;
- Confrontar dados experimentais e teóricos para vazões superiores a 30 m³/h.

Referências bibliográficas

- 1 AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria Conjunta ANP/Inmetro N° 001**, de 19 de junho de 2000.
- 2 AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Resolução Conjunta ANP/ Inmetro N° 001**, de 10 de junho de 2013.
- 3 Portal ANP. Disponível em: <www.anp.gov.br/?dw=64681>. Acesso em 28 de outubro de 2015.
- 4 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5168: Measurement of fluid flow -- Procedures for the evaluation of uncertainties**. 2005.
- 5 LYNNWORTH, L. C.; LIU, Y., **Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005**, Ultrasonics, vol. 44, pp. 1371–1378, 2006.
- 6 Sensores online. Disponível em: <<http://www.sensormag.com/sensors-products/flow/news/ultrasonic-flowmeter-market-exceeds-600-million-worldwide-14436>>. Acesso em 25 de outubro de 2015.
- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16198: Medição de vazão de fluidos em condutos fechados - Métodos usando medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito - Diretrizes gerais de seleção, instalação e uso**. 2013
- 8 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API MPMS 5.8: Measurement of Liquid Hydrocarbons by Ultrasonic Flow Meters**. 2014.
- 9 AMERICAN GAS ASSOCIATION. **AGA Report. 9: Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters**. 2007

- 10 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STARDANDIZATION. **ISO/TR 12765: Measurement of fluid flow in closed conduits – Methods using transit-time ultrasonic flowmeters.** 1998.
- 11 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STARDANDIZATION. **ISO 12242: Measurement of fluid flow in closed conduits -- Ultrasonic transit-time meters for liquid.** 2012.
- 12 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STARDANDIZATION. **ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas -- Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement.** 2010.
- 13 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STARDANDIZATION. **ISO 17089-2: Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas -- Part 2: Meters for industrial applications.** 2012.
- 14 BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8452: Use of clamp-on (externally mounted) ultrasonic flow-metering techniques for fluid applications. Guide.** 2010.
- 15 National Measurement System. **Good practice guide - an introduction tonon-invasive ultrasonic flow metering.** Disponível em: http://www.tuvnel.com/_x90lbm/An_Introduction_to_Non-Invasive_Ultrasonic_Flow_Metering.pdf >. Acesso em 15 de outubro de 2015.
- 16 SANDERSON, M. L.; YEUNG, H., **Guidelines for the use of ultrasonic non-invasive metering techniques**, Flow Meas. Instrum., vol. 13, no. 4, pp. 125–142, Aug. 2002.
- 17 DELMÉE, G. J., **Manual de medição de vazão**, 3º edição, Editora Edgard Blucher.
- 18 KUMAR, K.; FARANDE, U.; SAHOO, G. C., **Installation Effects of a Clamp-On Transit Time Ultrasonic Flow Meter**, 2011, Central Water and Power Research Station, Maharashtra, Índia.

- 19 AL-LABABIDI, S.; SANDERSON, M.L.; **Non-Invasive Technique of Clamp-On Transit Time Ultrasonic and Conductivity Sensors for Gas/Liquid Flow Measurements in Horizontal Pipes Under Slug Flow Conditions**, 12th International Conference on Multiphase Production Technology, 25-27 May, Barcelona, Spain, 2005.
- 20 MAHADEVA, D. V.; BAKER, R. C.; WOODHOUSE, J.; **Further Studies of the Accuracy of Clamp-on Transit-Time Ultrasonic Flowmeters for Liquids**, in **IEEE transactions on instrumentation and measurement**, 2009, pp. 1602–1609.
- 21 KEITMANN-CURDES, O.; FUNCK, B.; **New Calibration Method for Ultrasonic Clamp-On Transducers**, IEEE International Ultrasonics Symposium, 2008, pp. 517–520.
- 22 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API MPMS 4.2: Displacement Provers**. 2011.
- 23 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API MPMS 4.4: Tank Provers**. 2010.
- 24 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API MPMS 4.5: Master-Meter Provers**. 2011.
- 25 ISO GUM. Avaliação de dados de medição: **Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008**. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012.
- 26 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria Inmetro/Dimel nº 0049**, de 01 de fevereiro de 2011.
- 27 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria Inmetro/Dimel nº 0048**, de 09 de março de 2012.
- 28 MAHADEVA, D. V.; BAKER, R. C.; WOODHOUSE, J.; **Studies of the accuracy of clamp-on ultrasonic flowmeters**, IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf., 2008, pp. 969–973.
- 29 MA, L.; LIU, J.; WANG, J.; **Study of the accuracy of ultrasonic flowmeters for liquid**, AASRI Conference on Modelling, Identification and Control., vol. 14, pp. 14–20, 2012.

- 30 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API MPMS 11.4.1: Properties of Reference Materials, Part 1—Density of Water and Water Volume Correction Factors for Calibration of Volumetric Provers**. 2013.
- 31 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API MPMS 20.1: Allocation Measurement**. 2011.
- 32 Siemens. **Sitrans F - Ultrasonic flowmeters – SITRANS FST020 IP65 NEMA 4X – 7M3570 – Operating Instructions**. 2014.
- 33 Souza, F. S., **Desenvolvimento de uma metodologia para a calibração de uma turbina utilizada para medição do volume deslocado de ar e determinação da sua incerteza de medição**, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2007.
- 34 ORLANDO, A. F., **Relatório 4 : PRÉ-OPERAÇÃO**, PETROBRAS, 2013.

Anexo A: Resultados das medições: Configuração C2 (12D)

Tabela 19 - Medições na posição 0°, configuração C2 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,418	3,041	2,623	31,476	0,300	2,745	2,445	29,340	0,358	2,826	2,468	29,616
2	5 min	3,041	5,666	2,625	31,500	2,745	5,194	2,449	29,388	2,826	5,299	2,473	29,676
3	5 min	5,666	8,280	2,614	31,368	5,194	7,647	2,453	29,436	5,299	7,763	2,464	29,568
4	5 min	0,418	3,032	2,614	31,368	0,243	2,697	2,454	29,448	0,373	2,853	2,480	29,760
5	5 min	3,032	5,645	2,613	31,356	2,697	5,142	2,445	29,340	2,853	5,321	2,468	29,616
6	5 min	5,645	8,256	2,611	31,332	5,142	7,593	2,451	29,412	5,321	7,787	2,466	29,592

Tabela 20 - Medições na posição 180°, configuração C2 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,438	3,056	2,618	31,416	0,237	2,333	2,096	25,152	0,353	2,824	2,471	29,652
2	5 min	3,056	5,669	2,613	31,356	2,333	4,423	2,090	25,080	2,824	5,287	2,463	29,556
3	5 min	5,669	8,280	2,611	31,332	4,423	6,523	2,100	25,200	5,287	7,752	2,465	29,580
4	5 min	0,415	3,038	2,623	31,476	0,256	2,351	2,095	25,140	0,359	2,833	2,474	29,688
5	5 min	3,038	5,650	2,612	31,344	2,351	4,443	2,092	25,104	2,833	5,300	2,467	29,604
6	5 min	5,650	8,261	2,611	31,332	4,443	6,546	2,103	25,236	5,300	7,767	2,467	29,604

Tabela 21 - Medições na posição 45°, configuração C2 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,413	3,044	2,631	31,572	0,265	2,738	2,473	29,676	0,349	2,818	2,469	29,628
2	5 min	3,044	5,666	2,622	31,464	2,738	5,206	2,468	29,616	2,818	5,287	2,469	29,628
3	5 min	5,666	8,275	2,609	31,308	5,206	7,664	2,458	29,496	5,287	7,747	2,460	29,520
4	5 min	0,443	3,068	2,625	31,500	0,342	2,811	2,469	29,628	0,363	2,841	2,478	29,736
5	5 min	3,068	5,686	2,618	31,416	2,811	5,282	2,471	29,652	2,841	5,309	2,468	29,616
6	5 min	5,686	8,307	2,621	31,452	5,282	7,751	2,469	29,628	5,309	7,778	2,469	29,628

Tabela 22 - Medições na posição 225°, configuração C2 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,397	3,028	2,631	31,572	0,243	2,372	2,129	25,548	0,350	2,827	2,477	29,724
2	5 min	3,028	5,648	2,620	31,440	2,372	4,497	2,125	25,500	2,827	5,304	2,477	29,724
3	5 min	5,648	8,259	2,611	31,332	4,497	6,614	2,117	25,404	5,304	7,767	2,463	29,556
4	5 min	0,424	3,037	2,613	31,356	0,296	2,420	2,124	25,488	0,359	2,829	2,470	29,640
5	5 min	3,037	5,656	2,619	31,428	2,420	4,549	2,129	25,548	2,829	5,301	2,472	29,664
6	5 min	5,656	8,269	2,613	31,356	4,549	6,672	2,123	25,476	5,301	7,769	2,468	29,616

Tabela 23 - Medições na posição 90°, configuração C2 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,351	2,964	2,613	31,356	0,182	2,516	2,334	28,008	0,290	2,763	2,473	29,676
2	5 min	2,964	5,582	2,618	31,416	2,516	4,839	2,323	27,876	2,763	5,233	2,470	29,640
3	4 min	5,582	7,679	2,097	31,455	4,839	6,709	1,870	28,050	5,233	7,210	1,977	29,655
4	5 min	0,339	2,971	2,632	31,584	0,257	2,578	2,321	27,852	0,309	2,778	2,469	29,628
5	5 min	2,971	5,583	2,612	31,344	2,578	4,880	2,302	27,624	2,778	5,237	2,459	29,508
6	5 min	5,583	8,200	2,617	31,404	4,880	7,212	2,332	27,984	5,237	7,700	2,463	29,556

Tabela 24 - Medições na posição 270°, configuração C2 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,343	2,974	2,631	31,572	0,197	2,511	2,314	27,768	0,301	2,780	2,479	29,748
2	5 min	2,974	5,593	2,619	31,428	2,511	4,822	2,311	27,732	2,780	5,254	2,474	29,688
3	5 min	5,593	8,208	2,615	31,380	4,822	7,133	2,311	27,732	5,254	7,723	2,469	29,628
4	5 min	0,398	3,020	2,622	31,464	0,316	2,617	2,301	27,612	0,334	2,801	2,467	29,604
5	5 min	3,020	5,635	2,615	31,380	2,617	4,931	2,314	27,768	2,801	5,267	2,466	29,592
6	5 min	5,635	8,248	2,613	31,356	4,931	7,231	2,300	27,600	5,267	7,729	2,462	29,544

Tabela 25 - Medições na posição 135°, configuração C2 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,437	3,047	2,610	31,320	0,372	2,537	2,165	25,980	0,375	2,843	2,468	29,616
2	5 min	3,047	5,660	2,613	31,356	2,537	4,703	2,166	25,992	2,843	5,308	2,465	29,580
3	5 min	5,660	8,270	2,610	31,320	4,703	6,876	2,173	26,076	5,308	7,771	2,463	29,556
4	5 min	0,417	3,023	2,606	31,272	0,311	2,478	2,167	26,004	0,348	2,817	2,469	29,628
5	5 min	3,023	5,638	2,615	31,380	2,478	4,646	2,168	26,016	2,817	5,287	2,470	29,640
6	5 min	5,638	8,249	2,611	31,332	4,646	6,814	2,168	26,016	5,287	7,750	2,463	29,556

Tabela 26 - Medições na posição 315°, configuração C2 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,440	3,050	2,610	31,320	0,310	2,723	2,413	28,956	0,395	2,864	2,469	29,628
2	5 min	3,050	5,658	2,608	31,296	2,723	5,127	2,404	28,848	2,864	5,330	2,466	29,592
3	5 min	5,658	8,267	2,609	31,308	5,127	7,545	2,418	29,016	5,330	7,791	2,461	29,532
4	5 min	0,422	3,047	2,625	31,500	0,320	2,735	2,415	28,980	0,355	2,828	2,473	29,676
5	5 min	3,047	5,660	2,613	31,356	2,735	5,137	2,402	28,824	2,828	5,298	2,470	29,640
6	5 min	5,660	8,272	2,612	31,344	5,137	7,556	2,419	29,028	5,298	7,764	2,466	29,592

Anexo B: Resultados das medições: Configuração D1 (12D)

Tabela 27 - Medições na posição 0°, configuração D1 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,425	3,043	2,618	31,416	0,382	3,106	2,723	32,682	0,372	2,856	2,484	29,808
2	5 min	3,043	5,660	2,617	31,404	3,106	5,821	2,715	32,578	2,856	5,332	2,476	29,712
3	5 min	5,660	8,272	2,612	31,344	5,821	8,535	2,714	32,567	5,332	7,802	2,470	29,640
4	5 min	0,409	3,023	2,614	31,368	0,350	3,062	2,712	32,544	0,370	2,847	2,477	29,724
5	5 min	3,023	5,637	2,614	31,368	3,062	5,766	2,704	32,451	2,847	5,319	2,472	29,664
6	5 min	5,637	8,247	2,610	31,320	5,766	8,471	2,705	32,463	5,319	7,790	2,471	29,652

Tabela 28 - Medições na posição 180°, configuração D1 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,419	3,044	2,625	31,500	0,281	2,600	2,319	27,829	0,368	2,857	2,489	29,868
2	5 min	3,044	5,668	2,624	31,488	2,600	4,908	2,308	27,702	2,857	5,339	2,482	29,784
3	5 min	5,668	8,290	2,622	31,464	4,908	7,218	2,310	27,725	5,339	7,817	2,478	29,736
4	5 min	0,446	3,055	2,609	31,308	0,294	2,606	2,312	27,748	0,392	2,869	2,477	29,724
5	5 min	3,055	5,669	2,614	31,368	2,606	4,910	2,304	27,644	2,869	5,343	2,474	29,688
6	5 min	5,669	8,278	2,609	31,308	4,910	7,211	2,301	27,610	5,343	7,810	2,467	29,604

Tabela 29 - Medições na posição 45°, configuração D1 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,416	2,994	2,578	30,936	0,401	3,103	2,702	32,428	0,381	2,858	2,477	29,724
2	5 min	2,994	5,610	2,616	31,392	3,103	5,796	2,693	32,313	2,858	5,330	2,472	29,664
3	5 min	5,610	8,224	2,614	31,368	5,796	8,482	2,686	32,232	5,330	7,802	2,472	29,664
4	5 min	0,448	2,956	2,508	30,096	0,409	3,091	2,682	32,186	0,392	2,863	2,471	29,652
5	5 min	2,956	5,573	2,617	31,404	3,091	5,780	2,689	32,267	2,863	5,339	2,476	29,712
6	5 min	5,573	8,182	2,609	31,308	5,780	8,467	2,687	32,244	5,339	7,803	2,464	29,568

Tabela 30 - Medições na posição 225°, configuração D1 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,436	3,065	2,629	31,548	0,392	2,754	2,362	28,347	0,396	2,876	2,480	29,760
2	5 min	3,065	5,689	2,624	31,488	2,754	5,125	2,371	28,451	2,876	5,355	2,479	29,748
3	5 min	5,689	8,300	2,611	31,332	5,125	7,482	2,357	28,278	5,355	7,822	2,467	29,604
4	5 min	0,425	3,000	2,575	30,900	0,354	2,722	2,368	28,417	0,354	2,830	2,476	29,712
5	5 min	3,000	5,609	2,609	31,308	2,722	5,082	2,360	28,324	2,830	5,298	2,468	29,616
6	5 min	5,609	8,217	2,608	31,296	5,082	7,447	2,365	28,382	5,298	7,765	2,467	29,604

Tabela 31 - Medições na posição 90°, configuração D1 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,430	2,985	2,555	30,660	0,405	3,000	2,595	31,137	0,364	2,848	2,484	29,808
2	5 min	2,985	5,608	2,623	31,476	3,000	5,598	2,598	31,172	2,848	5,324	2,476	29,712
3	5 min	5,608	8,230	2,622	31,464	5,598	8,183	2,585	31,022	5,324	7,804	2,480	29,760
4	5 min	0,418	3,035	2,617	31,404	0,390	2,970	2,580	30,964	0,373	2,848	2,475	29,700
5	5 min	3,035	5,653	2,618	31,416	2,970	5,553	2,582	30,987	2,848	5,317	2,469	29,628
6	5 min	5,653	8,268	2,615	31,380	5,553	8,138	2,585	31,022	5,317	7,786	2,469	29,628

Tabela 32 - Medições na posição 270°, configuração D1 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,432	3,049	2,617	31,404	0,407	2,902	2,495	29,938	0,367	2,848	2,481	29,772
2	5 min	3,049	5,675	2,626	31,512	2,902	5,404	2,502	30,019	2,848	5,330	2,482	29,784
3	5 min	5,675	8,293	2,618	31,416	5,404	7,905	2,502	30,019	5,330	7,806	2,476	29,712
4	5 min	0,440	3,065	2,625	31,500	0,386	2,870	2,484	29,811	0,362	2,835	2,473	29,676
5	5 min	3,065	5,680	2,615	31,380	2,870	5,362	2,492	29,904	2,835	5,304	2,469	29,628
6	5 min	5,680	8,293	2,613	31,356	5,362	7,843	2,480	29,765	5,304	7,770	2,466	29,592

Tabela 33 - Medições na posição 135°, configuração D1 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,469	3,094	2,625	31,500	0,381	2,788	2,406	28,878	0,377	2,852	2,475	29,700
2	5 min	3,094	5,710	2,616	31,392	2,788	5,188	2,400	28,797	2,852	5,325	2,473	29,676
3	5 min	5,710	8,322	2,612	31,344	5,188	7,596	2,408	28,901	5,325	7,795	2,470	29,640
4	5 min	0,450	3,067	2,617	31,404	0,379	2,778	2,400	28,797	0,370	2,844	2,474	29,688
5	5 min	3,067	5,676	2,609	31,308	2,778	5,180	2,402	28,820	2,844	5,313	2,469	29,628
6	5 min	5,676	8,284	2,608	31,296	5,180	7,587	2,407	28,889	5,313	7,782	2,469	29,628

Tabela 34 - Medições na posição 315°, configuração D1 e distância 12D

Corrida	Tempo de totalização	Caldon				Clamp-on				Krohne			
		Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)	Volume (m³)			Vazão média (m³/h)
		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1	5 min	0,461	3,066	2,605	31,260	0,423	3,090	2,667	32,002	0,380	2,859	2,479	29,748
2	5 min	3,066	5,684	2,618	31,416	3,090	5,756	2,667	32,002	2,859	5,338	2,479	29,748
3	5 min	5,684	8,305	2,621	31,452	5,756	8,424	2,668	32,013	5,338	7,818	2,480	29,760
4	5 min	0,404	2,999	2,595	31,140	0,389	3,049	2,660	31,921	0,380	2,854	2,474	29,688
5	5 min	2,999	5,621	2,622	31,464	3,049	5,716	2,667	32,002	2,854	5,331	2,477	29,724
6	5 min	5,621	8,232	2,611	31,332	5,716	8,373	2,657	31,886	5,331	7,798	2,467	29,604

Anexo C: Resultados das medições: Configuração D1 (35D)

Tabela 35 - Medições na posição 0°, configuração D1 e distância 35D

Corrida	Caldon				Clamp-on			
	Volume (m³)			Vazão (m³/h)	Volume (m³)			Vazão (m³/h)
	Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1S	-	-	7,729	30,916	-	-	7,977	31,908
2S	-	-	7,757	31,028	-	-	8,013	32,052
3S	-	-	7,739	30,956	-	-	7,967	31,868
4S	-	-	7,727	30,908	-	-	7,924	31,696
5S	-	-	7,783	31,132	-	-	7,937	31,748
6S	-	-	7,774	31,096	-	-	7,978	31,912
7S	-	-	7,801	31,204	-	-	7,958	31,832
8S	-	-	7,740	30,960	-	-	8,007	32,028
9S	-	-	7,738	30,952	-	-	7,971	31,884

Tabela 36 - Medições na posição 180°, configuração D1 e distância 35D

Corrida	Caldon				Clamp-on			
	Volume (m³)			Vazão (m³/h)	Volume (m³)			Vazão (m³/h)
	Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1S	-	-	7,766	31,064	-	-	7,986	31,944
2S	-	-	7,737	30,948	-	-	7,965	31,860
3S	-	-	7,758	31,032	-	-	7,983	31,932
4S	-	-	7,774	31,096	-	-	7,961	31,844
5S	-	-	7,729	30,916	-	-	7,933	31,732
6S	-	-	7,770	31,080	-	-	7,951	31,804
7S	-	-	7,716	30,864	-	-	7,997	31,988
8S	-	-	7,769	31,076	-	-	7,985	31,940
9S	-	-	7,745	30,980	-	-	7,968	31,872

Tabela 37 - Medições na posição 45°, configuração D1 e distância 35D

Corrida	Caldon				Clamp-on			
	Volume (m³)			Vazão (m³/h)	Volume (m³)			Vazão (m³/h)
	Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1S	-	-	7,749	30,996	-	-	8,125	32,500
2S	-	-	7,754	31,016	-	-	8,045	32,180
3S	-	-	7,737	30,948	-	-	8,139	32,556
4S	-	-	7,748	30,992	-	-	8,131	32,524
5S	-	-	7,751	31,004	-	-	8,072	32,288
6S	-	-	7,727	30,908	-	-	8,092	32,368
7S	-	-	7,759	31,036	-	-	8,122	32,488
8S	-	-	7,783	31,132	-	-	8,054	32,216
9S	-	-	7,778	31,112	-	-	8,288	33,152

Tabela 38 - Medições na posição 225°, configuração D1 e distância 35D

Corrida	Caldon				Clamp-on			
	Volume (m³)			Vazão (m³/h)	Volume (m³)			Vazão (m³/h)
	Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1S	-	-	7,752	31,008	-	-	8,143	32,572
2S	-	-	7,750	31,000	-	-	8,155	32,620
3S	-	-	7,779	31,116	-	-	8,152	32,608
4S	-	-	7,766	31,064	-	-	8,129	32,516
5S	-	-	7,760	31,040	-	-	8,123	32,492
6S	-	-	7,740	30,960	-	-	8,102	32,408
7S	-	-	7,750	31,000	-	-	8,072	32,288
8S	-	-	7,677	30,708	-	-	8,071	32,284
9S	-	-	7,753	31,012	-	-	8,070	32,280

Tabela 39 - Medições na posição 90°, configuração D1 e distância 35D

Corrida	Caldon				Clamp-on			
	Volume (m³)			Vazão (m³/h)	Volume (m³)			Vazão (m³/h)
	Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1S	-	-	5,659	21,221	-	-	6,571	24,641
2S	-	-	6,618	26,472	-	-	7,013	28,052
3S	-	-	7,737	30,948	-	-	8,124	32,496
4S	-	-	7,741	30,964	-	-	8,100	32,400
5S	-	-	7,744	30,976	-	-	8,103	32,412
6S	-	-	7,742	30,968	-	-	8,084	32,336
7S	-	-	7,733	30,932	-	-	8,073	32,292
8S	-	-	7,752	31,008	-	-	8,098	32,392
9S	-	-	7,746	30,984	-	-	8,098	32,392
10D	-	-	7,742	30,968	-	-	8,099	32,396
11S	-	-	7,734	30,936	-	-	8,102	32,408
12S	-	-	2,470	29,640	-	-	2,640	31,680
13S	-	-	2,542	30,504	-	-	2,635	31,620
14D	-	-	2,530	30,360	-	-	2,640	31,680
15S	-	-	2,514	30,168	-	-	2,646	31,752
16S	-	-	2,511	30,132	-	-	2,631	31,572
17S	-	-	2,540	30,480	-	-	2,631	31,572
18S	-	-	2,494	29,928	-	-	2,647	31,764
19S	-	-	2,531	30,372	-	-	2,634	31,608
20S	-	-	2,521	30,252	-	-	2,653	31,836

Tabela 40 - Medições na posição 270°, configuração D1 e distância 35D

Corrida	Caldon				Clamp-on			
	Volume (m³)			Vazão (m³/h)	Volume (m³)			Vazão (m³/h)
	Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1S	-	-	7,718	30,872	-	-	8,081	32,324
2S	-	-	7,734	30,936	-	-	8,092	32,368
3S	-	-	7,763	31,052	-	-	8,091	32,364
4S	-	-	7,786	31,144	-	-	8,066	32,264
5S	-	-	7,752	31,008	-	-	8,073	32,292
6S	-	-	7,768	31,072	-	-	8,082	32,328
7S	-	-	7,755	31,020	-	-	8,073	32,292
8S	-	-	7,783	31,132	-	-	8,087	32,348

9S	-	-	7,763	31,052	-	-	8,080	32,320
----	---	---	-------	--------	---	---	-------	--------

Tabela 41 - Medições na posição 135°, configuração D1 e distância 35D

Corrida	Caldon				Clamp-on			
	Volume (m³)			Vazão (m³/h)	Volume (m³)			Vazão (m³/h)
	Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1S	-	-	7,737	30,948	-	-	8,083	32,332
2S	-	-	7,752	31,008	-	-	8,060	32,240
3S	-	-	7,777	31,108	-	-	8,045	32,180
4S	-	-	7,740	30,960	-	-	8,029	32,116
5S	-	-	7,773	31,092	-	-	8,099	32,396
6S	-	-	7,741	30,964	-	-	8,023	32,092
7S	-	-	7,671	30,684	-	-	8,096	32,384
8S	-	-	7,742	30,968	-	-	8,111	32,444
9S	-	-	7,763	31,052	-	-	8,044	32,176

Tabela 42 - Medições na posição 315°, configuração D1 e distância 35D

Corrida	Caldon				Clamp-on			
	Volume (m³)			Vazão (m³/h)	Volume (m³)			Vazão (m³/h)
	Inicial	Final	Totalizado		Inicial	Final	Totalizado	
1S	-	-	7,730	30,920	-	-	8,068	32,272
2S	-	-	7,754	31,016	-	-	7,988	31,952
3S	-	-	7,759	31,036	-	-	7,977	31,908
4S	-	-	7,774	31,096	-	-	8,038	32,152
5S	-	-	7,758	31,032	-	-	8,035	32,140
6S	-	-	7,768	31,072	-	-	8,043	32,172
7S	-	-	7,753	31,012	-	-	7,958	31,832
8S	-	-	7,746	30,984	-	-	7,998	31,992
9S	-	-	7,768	31,072	-	-	7,958	31,832

Anexo D: Certificado de calibração do Caldon 280Ci



CALDON ULTRASONICS TECHNOLOGY CENTER FLOW CALIBRATION FACILITY



CALIBRATION REPORT

Report No: CR-339

Revision: 01

Name	Title	Signature
------	-------	-----------

Calibrated By:	S. Heirs	Laboratory Operator
-----------------------	----------	---------------------

Prepared By:	S. Heirs	Laboratory Operator
---------------------	----------	---------------------

Approved By:	Bobbie Griffith	Laboratory Operations Manager
---------------------	-----------------	----------------------------------

Customer:	Faculdades Catolicas
------------------	----------------------

Job No:	1692664
----------------	---------

Model No:	LEFM 280Ci
------------------	------------

Serial No:	100714001
-------------------	-----------

Tag No:	
----------------	--

Test Date(s):	08/09/10 - 08/11/10
----------------------	---------------------

Report Date:	8/12/2010
---------------------	-----------

Cameron
Measurement Systems
1030 McClaren Woods Drive
Coraopolis, PA 15108
Tel: 724-273-8300
Fax: 724-273-8301



NVLAP LAB CODE 200813-C

Calibration Summary

Meter Information

Model:	LEFM 280Ci
Manufacturer:	Cameron
Serial No:	100714001
Size	4 inch
Flange Class	150#
I.D.	4.026 inches

Calibration Methods

These results were obtained using proving method CLP 2.0 and CLP 5.0. The flow meter calibration facility has been Accredited to ISO/IEC 17025:2005 (NVLAP Lab Code 200813-0) and CMC Certified by NMI VSL (certificate number 39330924).

The above meter was calibrated at the Cameron Calibration facility using Exxsol D80, Drakeol 5 which for these tests had a nominal density of 0.802 and 0.837 g/cc at 15.6°C. Test temperatures ranged from 20.0 to 20.1°C. Meter pressure ranged from 1.85 to 2.40 bar. The flow rate ranged from 32 to 282 m³/hr.

The average meter factor was 1.0000, with a linearity of $\pm 0.05\%$. The average repeatability spread in MF at the same condition was 0.05%.

The results shown relate only to the item calibrated and installed in the configuration shown.

For flow rates in mode M23 & M34 the expanded laboratory uncertainty of meter factor, MF, is $\pm 0.07\%$. The expanded uncertainty, $U = kuc$, is determined from a combined standard uncertainty (i.e., estimated standard deviation) $uc = 0.034\%$ and a coverage factor $k = 2$. For flow rates in mode TMM the expanded laboratory uncertainty of meter factor, MF, is $\pm 0.04\%$. The expanded uncertainty, $U = kuc$, is determined from a combined standard uncertainty (i.e., estimated standard deviation) $uc = 0.019\%$ and a coverage factor $k = 2$. Since it can be assumed that the possible estimated values of the standard are approximately normally distributed with approximate standard deviation uc , the unknown value of the standard is believed to lie in the interval defined by U with a level of confidence of approximately 95%.

1.0 Facility Description

During calibration the system is loaded with one of three calibration fluids (Mineral Oils) and air is removed from the system. This process will be repeated for each fluid to be used after the calibrations on a fluid are completed.

Flow is controlled by two variable speed pumps. Flow the lowest flow rates a pump bypass can be used to achieve the lowest rates. Temperature is controlled during the calibration using heat exchanger that is cooled using a glycol water mixture that is circulated through an external chiller.

The meter under test is placed in one of three test lines. Test line one is for 8 inch and smaller meters and must be used when the small volume prover is utilized. Test line two is for 8 to 16 inch meters. Test line three is for 10 to 24 inch meters.

Ball Prover

The ball prover is a 20-inch nominal bore, 10 cubic meter Ball Prover with a flow rate capacity of 60 to 2200 m³/hr. The ball prover has 4 detectors, 3.3 cubic meters between any two consecutive detectors and can be used to fully calibrate all meters between 4 inch and 10 inch in size. A calibration run is initiated when the prover ball is launched by the operator. The ball drops down and is carried by the flow into the piping. The position of the ball is monitored by a series of four detectors. A precise volume of 3.3 cubic meters corresponds to the movement of the ball between any two consecutive detectors or for larger meters the full 10 cubic meters is used.

Ultrasonic Master Meters

Master meter proving uses the two 10-inch LEFM 280C meters. They are used to calibrate 10-inch and larger meters particularly at flows greater than 2000 m³/hr. Flow can pass through one or both master meter lines and then into any of the three calibration lines. The master meters are calibrated by the prover. This calibration is then used for the calibration of the meter under test.

Small Volume Prover

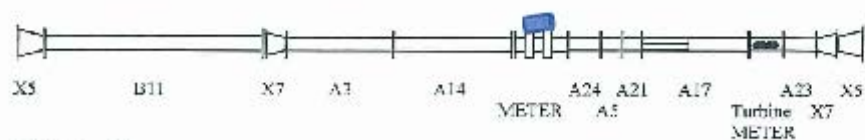
The small volume prover is used to calibrate from 10 to 750 m³/hr. The small volume prover has a nominal volume of 0.12 cubic meters.

Turbine Master Meter

A turbine master meter can be used in conjunction with either prover. When used with the small volume prover the flow rate can range from 10 to 750 m³/hr. When used with the ball prover the flow rate can range from 60 to 2200 m³/hr.

2.0 Installation

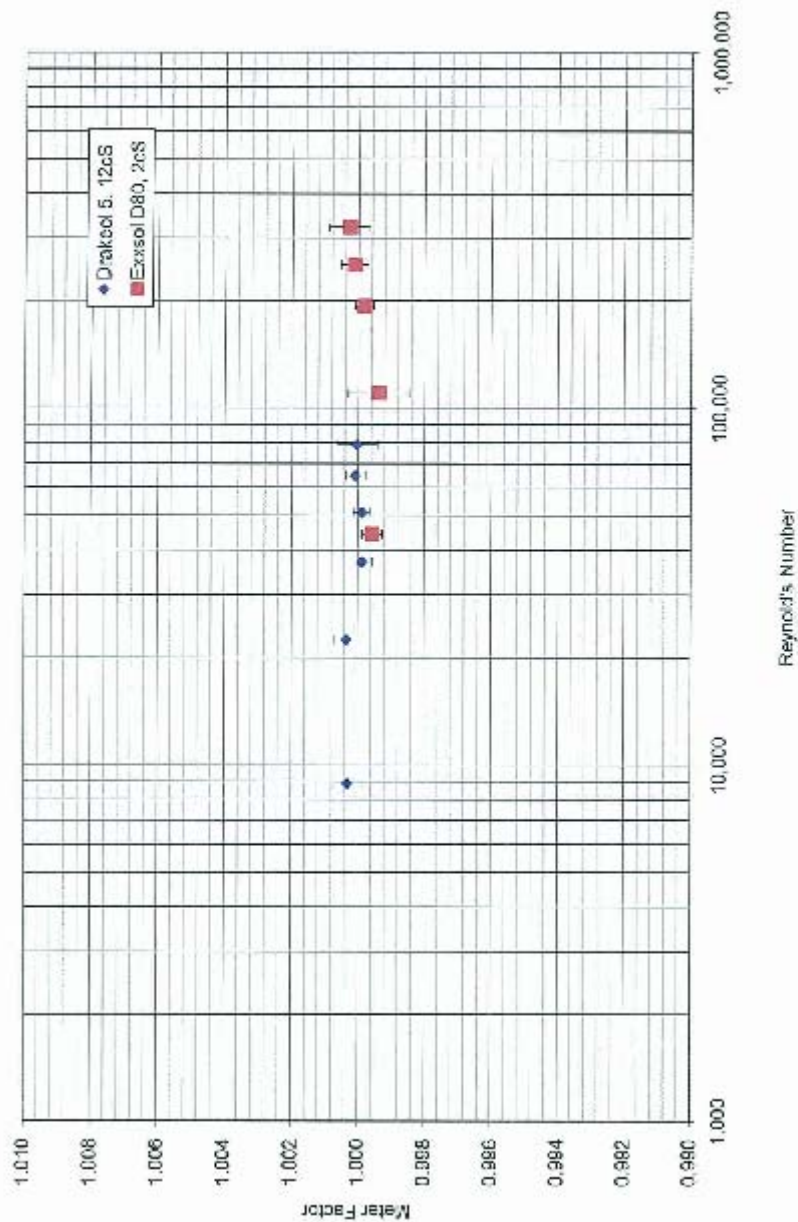
The 4 inch meter will be installed in line 1.



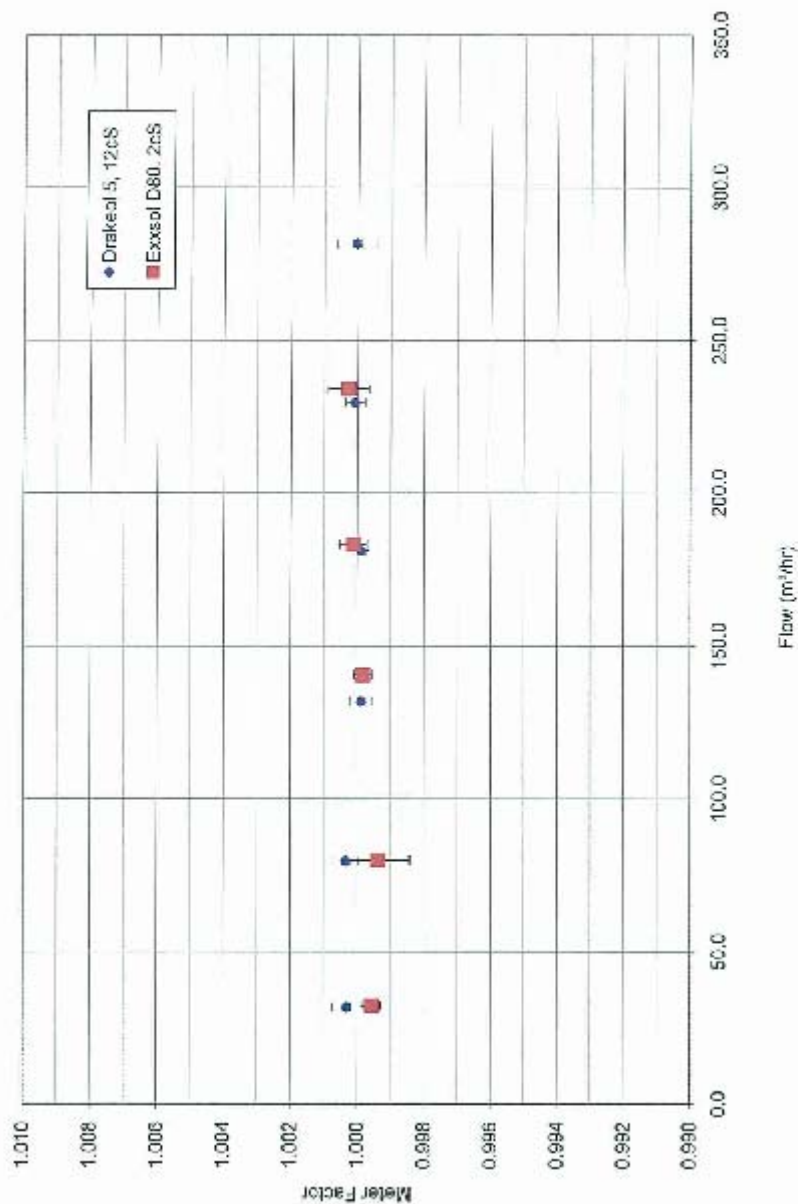
Piping Descriptions

ID Number	Size	Length	Schedule	TD	Inlet	Outlet
X5	8 x 6	11 1/4				
B11	8"	120	40	6.065	150	160
X7	8 x 4	9 1/4			150	150
A3	4"	40	40	4.028	150	150
A14	4"	42 1/2	40	4.028	150	150
Meter	4"	18	40	4.028	150	150
A24	4"	18	40	4.028	150	150
A5	4"	12	40	4.028	150	150
A21	4"	8	40	4.028	150	150
Tube Bundle	4"	1/4	40	4.028	150	150
A17	4"	40	40	4.028	150	150
Turbine	4"	12	40	4.028	150	150
A23	4"	24	40	4.028	150	150
X7	8 x 4	9 1/4			150	150
X5	8 x 8	11 1/4			150	150

10.07.14.001



100714001



4.0 Comments

The meter linearity is $\pm 0.05\%$. The average meter factor for the meter is 1.0000.

5.0 Calibration Procedure

This calibration was carried out per CTP-0157.

6.0 Traceability

During all steps in the traceability chain temperature and pressures are measured. All these instruments are traceable to a National Metrology Institute or an ISO/IEC 17025 accredited company. For a full description of the traceability chain see Cameron quality manual document CLM 5.6 "Measurement Traceability", revision 4, document CLP 6 "Uncertainty and traceability - flow loop calibration", revision 4 and CLP 6.1 "UNCERTAINTY AND TRACEABILITY - SMALL VOLUME PROVER FLOW LOOP", revision 1.

 **CAMERON** Meter Diagnostic Summary

Serial # 100714001
 TAG #
 Model LEFM 280Ci
 Size 4 inch
 Flange 150#
 I.D. 4.026 inch

	Min	Max	
Flow	32	282	m ³ /h
Reynolds Number	8,875	322,582	
Viscosity	2.48	12.23	cS

	Min Gain	Avg Gain	Max Gain	Min SNR	Avg SNR	Max SNR
Path 1	35.9	36.0	36.3	99.0	99.0	99.0
Path 2	36.9	37.0	37.2	99.0	99.0	99.0
Path 3	36.7	36.9	37.0	99.0	99.0	99.0
Path 4	36.1	36.3	36.6	99.0	99.0	99.0
Path 5	35.7	35.8	36.1	99.0	99.0	99.0
Path 6	37.6	37.7	37.8	99.0	99.0	99.0
Path 7	37.6	37.7	37.9	99.0	99.0	99.0
Path 8	37.0	37.2	37.5	99.0	99.0	99.0

	Min StDev	Avg StDev	Max StdDev	Min VN	Avg VN	Max VN
Path 1	4.9%	5.7%	6.6%	0.8447	0.8648	0.8778
Path 2	3.0%	3.3%	3.9%	1.0482	1.0541	1.0608
Path 3	3.0%	3.4%	4.0%	1.0528	1.0582	1.0624
Path 4	5.2%	5.6%	7.0%	0.8307	0.8419	0.8500
Path 5	4.6%	5.5%	6.2%	0.8555	0.8682	0.8785
Path 6	3.0%	3.3%	3.9%	1.0478	1.0550	1.0668
Path 7	3.0%	3.3%	4.0%	1.0494	1.0545	1.0617
Path 8	4.9%	5.7%	6.5%	0.8241	0.8443	0.8521

