



**Felipe Borges Coelho**

**Influência do desenvolvimento do perfil de velocidade na  
medição de vazão pelo medidor ultrassônico do tipo  
Clamp-On com dois canais**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Alcir de Faro Orlando

Rio de Janeiro  
Setembro de 2017



**Felipe Borges Coelho**

**Influência do desenvolvimento do perfil de velocidade na  
medição de vazão pelo medidor ultrassônico do tipo  
Clamp-On com dois canais**

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

**Prof. Alcir de Faro Orlando**

Orientador  
Programa de Pós-graduação em Metrologia - PUC-Rio

**Prof. Elcio Cruz de Oliveira**

Programa de Pós-graduação em Metrologia - PUC-Rio

**Maria Helena Farias**

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

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

Rio de Janeiro, 22 de setembro de 2017

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

### **Felipe Borges Coelho**

Formado em Engenharia de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil em 2015.

#### Ficha Catalográfica

Coelho, Felipe Borges

Influência do desenvolvimento do perfil de velocidade na medição de vazão pelo medidor ultrassônico do tipo *Clamp-On* com dois canais / Felipe Borges Coelho; orientador: Alcir de Faro Orlando. – 2017.

124 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2017.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia. 3. Incerteza de medição. 4. Medição de escoamento em desenvolvimento. 5. Medidor de vazão clamp-on. 6. Calibração in-situ. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD: 389.1

## Agradecimentos

Primeiramente, à Deus, por tudo que sou e tenho, e que sem ele nada disso seria possível.

A todos de minha família. Em especial à minha mãe e irmã pelo alicerce familiar e por toda educação e ensinamentos que a vida exige.

À Francielle Carvalho, que me incentivou e auxiliou em diversos momentos durante a execução do trabalho, especialmente pelo amor.

Ao meu pai (*in memoriam*), que apesar do pouco contato que tive sei que está sempre olhando por mim.

Ao professor Dr. Alcir de Faro Orlando, meu orientador, por toda paciência, confiança e sobretudo sua transmissão de sabedoria não somente a respeito do tema do trabalho, mas sobre os mais variados assuntos. Me sinto honrado de ter sido seu aluno.

Ao Evemero Callegario, por todo suporte técnico e discussões técnicas sobre os experimentos. E ao Marcelo pela organização do espaço e assistência.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro, e incentivo à pesquisa no Brasil.

À Petrobras pela infraestrutura do laboratório utilizado para os testes.

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

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e em minha formação.

## Resumo

Coelho, Felipe Borges; Orlando, Alcir de Faro. **Influência do desenvolvimento do perfil de velocidade na medição de vazão pelo medidor ultrassônico do tipo Clamp-On com dois canais.** Rio de Janeiro, 2017. 124p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Plantas industriais necessitam de algum tipo de medição, em especial a indústria química e de óleo e gás, que empregam em maior quantidade medidores de vazão, sobretudo os de princípio ultrassônico por sua maior confiabilidade. O desempenho metrológico desse tipo de medidor é sensível a imperfeições no perfil de escoamento, e por isso é recomendado que atendam aos requisitos de instalação quanto à distância de trechos retos especificados pela norma. No entanto, em alguns casos tais recomendações não conseguem ser atendidas devido ao espaço físico compacto, mas mesmo assim é mantida a instalação de tais instrumentos em locais inadequados. Por este motivo, a avaliação dos impactos provocados pelas incertezas de medição ocasionadas por irregularidades no perfil de escoamento torna-se relevante. O presente trabalho mostrou que após vários testes com o medidor de vazão do tipo *clamp-on* de dois canais, instalado em variadas posições longitudinais após seguidos trechos de curva na tubulação, é possível a partir de trechos retos equivalentes a 20 diâmetros utilizar o medidor como um medidor padrão itinerante para calibração de outros medidores de vazão dispostos em linha localizados adequadamente no campo, denominado calibração "*in-situ*". Os resultados dos testes atingiram níveis de incerteza de vazão inferiores a 1 %, especificada para calibração de medidores operacionais. O trabalho também mostrou que o uso do fator do medidor numa calibração pode minimizar a influência da flutuação do escoamento sobre a incerteza de medição do medidor, estimando mais realisticamente sua incerteza na ausência de flutuações.

## Palavras-chave

Metrologia; Incerteza de medição; Medição de escoamento em desenvolvimento; Medidor de vazão clamp-on; Vazão; Calibração in-situ

## Abstract

Coelho, Felipe Borges; Orlando, Alcir de Faro (Advisor) **Influence of the developing velocity profile on flow measurement using a two channel Clamp-On type ultrasonic flow meter.** Rio de Janeiro, 2017. 124p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Industrial plants need some kind of measurement, especially chemical and oil and gas industries, which uses a large amount of flow meters, mainly those that uses ultrasonic principle due to their greater reliability. The metrological performance of this type of meter is sensitive to imperfections present in the flow profile, and therefore must comply the installation requirements relative to the distance of straight sections without objects that cause any kind of disruption in the flow. However, in some cases such recommendations are not met due to the compact physical space, which does not preclude the installation of such instruments. For this reason, the evaluation of impacts on the uncertainties of measurement caused by irregularities in the flow becomes relevant. This work shows that using a two channels clamp-on flow meter, installed in various longitudinal positions after consecutive bend sections in the pipe, it is possible to, distance starting from 20 diameters, use the meter as the standard traveling meter for calibration of others flow meters arranged in-line, properly located in the field, process called “*in-situ*” calibration. The test results provided an uncertainty less than 1 %, which is usually specified for operational meters. This work also shows that the meter factor can be used to minimize the influence of the flow rate fluctuation on the uncertainty of measurement, and thus to estimate more realistically its value when there is no fluctuation.

## Keywords

Metrology; Uncertainty measurement; Developing flow measurement; Clamp-On flow meter; Flow; In-situ calibration

# Sumário

1	Introdução	19
1.1.	Definição do problema da pesquisa	20
1.2.	Objetivos: geral e específicos	21
1.3.	Estrutura da dissertação	21
2	Fundamentos teóricos da medição de vazão por princípio ultrassônico	23
2.1.	Princípio de operação	24
2.2.	Determinação da velocidade por tempo de trânsito	26
2.3.	Definição da vazão	27
2.4.	Classificação de medidores	28
2.5.	Medidor de vazão ultrassônico do tipo <i>clamp-on</i>	29
2.6.	Orientação dos transdutores	30
2.7.	Fórmula da vazão do medidor ultrassônico do tipo <i>clamp-on</i>	32
2.8.	Estudo desenvolvido pelo fabricante	32
3	Metodologia de avaliação	35
3.1.	Erro de medição	35
3.2.	Fator do medidor (MF)	35
3.3.	Repetibilidade	36
3.4.	Incerteza de medição	39
4	Procedimento experimental	42
4.1.	Bancada de testes – Concepção	42
4.2.	Bancada de testes – Estrutura completa	44
4.3.	Circuito hidráulico	46
4.4.	Medidores utilizados	47
4.5.	Procedimento dos testes	49
5	Resultados	53

5.1. Repetibilidade	53
5.1.1. Medidor com 1 diâmetro nominal de trecho reto à montante	55
5.1.2. Medidor com 5 diâmetros nominais de trechos retos à montante	56
5.1.3. Medidor com 10 diâmetros nominais de trechos retos à montante	57
5.1.4. Medidor com 16,5 diâmetros nominais de trechos retos à montante	58
5.1.5. Medidor com 20 diâmetros nominais de trechos retos à montante	59
5.1.6. Medidor com 29 diâmetros nominais de trechos retos à montante	60
5.1.7. Medidor com 41 diâmetros nominais de trechos retos à montante	61
5.1.8. Medidor com 50 diâmetros nominais de trechos retos à montante	62
5.2. Análise experimental	63
5.3. Fator do medidor em função da distância de instalação	64
5.4. Incertezas	65
5.4.1. Vazão de 40 m <sup>3</sup> /h	67
5.4.2. Vazão de 37,5 m <sup>3</sup> /h	67
5.4.3. Vazão de 35 m <sup>3</sup> /h	68
5.4.4. Vazão de 32,5 m <sup>3</sup> /h	68
5.4.5. Vazão de 30 m <sup>3</sup> /h	69
5.4.6. Vazão de 25 m <sup>3</sup> /h	69
5.4.7. Vazão de 20 m <sup>3</sup> /h	70
5.5. Comparação com o estudo do fabricante	70
6 Conclusões e orientações futuras	71
6.1. Conclusões	71
6.2. Recomendações para trabalhos futuros	72
Referências bibliográficas	73

Anexo A: Certificado medidor <i>clamp-on</i> Flexim	77
Anexo B: Manual bomba NETZSCH modelo NM063BY01L07V	80
Anexo C: Certificado medidor <i>Caldon</i> modelo 280C	81
Anexo D: Certificado do multímetro HP 34970A	90
Anexo E: Gráficos de evolução da incerteza de vazão ao longo do número de trechos retos	97

## Lista de figuras

Figura 1 - Técnicas ultrassônicas empregadas na medição de vazão. Fonte: (NBR 16198, 2013)	24
Figura 2: Esquema do processo de medição de vazão com medidor ultrassônico por tempo de trânsito. Fonte: Adaptado de (Weber, 2003)	26
Figura 3: Forma de onda na medição por princípio de tempo de trânsito. Fonte: Adaptado de (National Measurement System, 2017)	27
Figura 4: Layout dos feixes ultrassônicos de um medidor com múltiplos canais. Fonte: Adaptado de (Weber, 2003)	28
Figura 5: Classificação de instrumentos. Fonte: Adaptado de (National Measurement System, 2017)	29
Figura 6: Representação do contato entre transdutor e fluido. Fonte: (NBR 16198, 2013)	29
Figura 7: Refração do feixe ultrassônico nos diferentes meios. Fonte: Adaptado de (National Measurement System, 2017)	30
Figura 8: Instalação dos transdutores em volta da tubulação com configuração (a) reflexiva em dois planos e (b) direta em apenas um plano. Fonte: (Funck e Baldwin, 2012)	31
Figura 9: Resultado da simulação no CFD divulgado pela Flexim. Fonte: Adaptado de (Funck e Liptrot, 2014).	33
Figura 10: Resultado dos testes executados pelo fabricante Flexim. Fonte: Adaptado de (Funck e Liptrot, 2014).	34
Figura 11: Demonstrativo de cálculo e as variáveis envolvidas.	37
Figura 12: Esquema do conceito da bancada de testes, vista lateral.	43
Figura 13: Esquema do conceito da bancada de testes, vista isométrica.	43
Figura 14: Variação do local de instalação do medidor tipo clamp-on.	44
Figura 15: Vista aérea da casa de máquinas.	45

Figura 16: Vista do loop de teste na área interna do laboratório. Parte 1.	45
Figura 17: Vista do loop de teste na área interna do laboratório. Parte 2.	46
Figura 18: Medidor ultrassônico de vazão. Fonte: Flexim	47
Figura 19: Medidor de vazão ultrassônico com 8 canais, <i>Caldon</i> 280C. Fonte: Cameron	48
Figura 20: Multímetro HP modelo 34970A de 6,5 dígitos. Fonte: Hewlett Packard	49
Figura 21: Posicionamento dos transdutores em cada um dos testes localizados 27 DN à montante do medidor de referência.	51
Figura 22: Fluxograma de correção do valor de leitura do <i>clamp-on</i> .	52
Figura 23: Curva de repetibilidade do fator do medidor (MF) de acordo com o tempo de integração.	54
Figura 24: Testes com medidor instalado com 1 DN de trecho reto.	55
Figura 25: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 1 DN de trecho reto.	56
Figura 26: Testes com medidor instalado à montante com 5 DN de trechos retos.	56
Figura 27: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 5 DN.	57
Figura 28: Testes com medidor instalado à montante com 10 DN de trechos retos.	57
Figura 29: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 10 DN.	58
Figura 30: Testes com medidor instalado à montante com 16,5 DN de trechos retos.	58
Figura 31: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 16,5 DN.	59
Figura 32: Testes com medidor instalado à montante com 20 DN de trechos retos.	59
Figura 33: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 20 DN.	60
Figura 34: Testes com medidor instalado à montante com 29 DN de trechos retos.	60
Figura 35: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 29 DN.	61

Figura 36: Testes com medidor instalado à montante com 41 DN de trechos retos.	61
Figura 37: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 41 DN.	62
Figura 38: Testes com medidor instalado à montante com 50 DN de trechos retos.	62
Figura 39: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 50 DN.	63
Figura 40: Valor de fator do medidor ao longo do número de trechos retos em relação as curvas.	64
Figura 41: Curva de incerteza combinada ao longo do tempo de integração.	66
Figura 42: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 40 m <sup>3</sup> /h.	67
Figura 43: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 37,5 m <sup>3</sup> /h.	67
Figura 44: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 35 m <sup>3</sup> /h.	68
Figura 45: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 32,5 m <sup>3</sup> /h.	68
Figura 46: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 30 m <sup>3</sup> /h.	69
Figura 47: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 25 m <sup>3</sup> /h.	69
Figura 48: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 20 m <sup>3</sup> /h.	70

## Lista de tabelas

Tabela 1: Erros em corrente elétrica do teste preliminar do medidor <i>clamp-on</i> no multímetro HP.	50
Tabela 2: Erros em m <sup>3</sup> /h do teste preliminar.	50

## Lista de símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
$L$	Distância entre os transdutores	$m$
$D$	Diâmetro interno da tubulação	$m$
$t_{XY}$	Tempo de trajeto do feixe ultrassônico do transdutor X ao Y	$s$
$c_{\alpha}$	Velocidade do som no meio $\alpha$	$m/s$
$k_h$	Fator de correção entre a velocidade média do escoamento e a velocidade média do feixe ultrassônico	
$V_{Objeto}$	Vazão do medidor objeto	$m^3/h$
$V_{Padrão}$	Vazão do medidor de referência (padrão)	$m^3/h$
$\bar{X}$	Média das medições	$m^3/h$
$MF$	Fator do medidor	
$n$	Número total de corridas	
$X_i$	Média das medições referente ao número total de corridas	$m^3/h$
$t_i$	Tempo de integração do teste	$s$
$x_j$	Média das medições referente ao tempo de integração	$m^3/h$
$s$	Desvio padrão	$m^3/h$
$R$	Valor de repetibilidade	$m^3/h$
$t$	Valor $t$ -Student	
$u$	Incerteza padrão combinada	$m^3/h$
$k$	Fator de abrangência	

$U$	Incerteza expandida	$m^3/h$
$\bar{v}$	Velocidade média axial	$m/s$

## Lista de siglas

<b>Sigla</b>	<b>Descrição</b>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API MPMS	Instituto Americano de Petróleo (American Petroleum Institute)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	Organização Internacional para Padronização (International Organization for Standardization)
MPMS	Manual de Normas de Medição de Petróleo (Manual of Petroleum Measurement Standards)
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
GUM	Guia para expressão de incerteza de medição
DN	Diâmetro nominal
NBR	Norma Brasileira
RTM	Regulamento Técnico de Medição

Nenhum trabalho de qualidade pode ser feito sem concentração,  
auto sacrifício, esforço e dúvida.  
*Max Beerbohm*

# 1 Introdução

A exploração e a produção de petróleo e gás natural são atualmente umas das principais atividades econômicas no Brasil, mesmo com a queda brusca do preço do óleo ocorrida em 2014. E a cada ano é necessário aumentar a oferta para suprir a demanda crescente. Com o intuito de alcançar esse objetivo e aliado aos desafios, se faz necessário expandir a quantidade de plataformas exploradoras, já que a maior parte das reservas de petróleo brasileiro está localizada em campos marítimos.

Devido a este fato, algumas complicações técnicas surgem e é fundamental que sejam encontradas soluções. É notável que o espaço físico nas plataformas de petróleo é extremamente compacto e foi projetado e construído para comportar todo mecanismo de extração, tratamento e estocagem do óleo. No entanto, nem sempre é possível reproduzir integralmente o que fora projetado, o que pode gerar algum tipo de impacto nas medições.

Há necessidade periódica de se calibrar os instrumentos de medição, como é o caso do medidor de vazão. Para evitar a interrupção de operação da planta e, além disso, poupar gastos envolvidos na retirada e logística do instrumento da linha, busca-se possibilitar, especificamente, no caso da medição de vazão, a utilização de um medidor padrão itinerante para realizar calibrações “*in-situ*”. Porém, há que se assegurar o adequado desempenho do medidor padrão. Assim, esta pesquisa de mestrado tem como finalidade estudar a influência do perfil de velocidade do escoamento utilizando um instrumento ultrassônico de vazão do tipo *clamp-on* de dois canais, para que no futuro esse medidor possa ser empregado como um medidor de referência para a calibração “*in-situ*” de outros medidores de vazão.

O estudo baseou-se na comparação entre o medidor *clamp-on* de dois canais com um padrão que também opera por princípio ultrassônico e é de hierarquia metrológica superior. Os testes consistem em reproduzir situações de instalação inadequada para um medidor de vazão, situado próximo a curvas na tubulação que causem distorção no perfil de escoamento, e que conseqüentemente interferem na medição.

## 1.1. Definição do problema da pesquisa

De acordo com normas e regulamentos vigentes, os instrumentos devem ser utilizados nas mesmas condições em que foram calibrados, para que durante sua operação não ocorra influência de fatores externos que comprometam os resultados. Usualmente, a calibração ocorre em condições onde o escoamento está completamente desenvolvido, em atendimento às normas. Entretanto, é frequente a violação destas condições, tanto devido à limitação do espaço físico quanto devido à tentativa de conciliar o acesso da equipe técnica ao instrumento, em função da necessidade periódica de se calibrar estes instrumentos, como determinado pelo Regulamento Técnico de Medição (RTM).

Diante desta situação, é esperado que os resultados das medições realizadas por tais instrumentos exibam flutuações maiores e, no caso específico deste trabalho, que aborda a medição de vazão, isso ocorre, pois, o perfil de escoamento ainda se encontra em desenvolvimento no local de medição. O comportamento do escoamento na tubulação influencia qualquer tipo de medição que se deseja realizar. Neste trabalho, a escolha pelo medidor de vazão ultrassônico do tipo *clamp-on* justifica-se pela vantagem de ser um medidor não intrusivo e não invasivo e, desta forma, o escoamento não sofre distúrbios causados pelo mesmo. Ademais, é um instrumento que permanece acoplado externamente à tubulação sendo de fácil transporte.

Um desafio similar a este foi descrito na dissertação de (Ferreira, 2015), no qual foram testadas diversas posições longitudinais e angulares ao longo da tubulação utilizando um medidor ultrassônico também do tipo *clamp-on*, porém de apenas um canal. E deu origem a esse trabalho que se baseia em um experimento similar, onde o medidor ultrassônico do tipo *clamp-on* de outro fabricante é utilizado em diversas posições longitudinais ao longo da tubulação, mas com posição angular (orientação) fixa em todos os testes, tal orientação recomendada pelo fabricante do medidor. Nesse trabalho o objetivo é mensurar a magnitude da incerteza de medição causado pelo escoamento ainda em desenvolvimento utilizando um medidor com dois canais, característica alegada que quando empregada permite melhorar a incerteza das medições.

## 1.2. Objetivos: geral e específicos

O principal objetivo desta dissertação é estudar o desempenho de um medidor de vazão do tipo *clamp-on* com dois canais quando o perfil de velocidade do escoamento está em desenvolvimento. Os objetivos específicos envolvidos no trabalho para atingir o objetivo geral incluem:

- Identificar os processos de testes já executados e seus resultados;
- Demonstrar o desempenho do medidor de vazão *clamp-on* utilizando como padrão outro medidor ultrassônico;
- Determinar a confiabilidade metrológica do medidor ultrassônico em função de sua localização em relação ao início do trecho reto da tubulação.

Identificando o desempenho do medidor *clamp-on* para diversos cenários de instalação, será possível avaliar a confiabilidade no emprego deste medidor como um padrão para calibrar outros instrumentos que estejam instalados de forma análoga ao mesmo.

## 1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação é desenvolvida em um total de seis capítulos, sendo o primeiro capítulo a introdução, a definição do problema que envolve a motivação e metodologia da pesquisa, e os objetivos geral e específicos do trabalho.

O capítulo 2 descreve os fundamentos técnicos e teóricos envolvidos na medição ultrassônica de vazão por ultrassom, e aborda os medidores de vazão ultrassônicos que são utilizados no trabalho.

No capítulo 3 é demonstrada a metodologia de avaliação, apontando os parâmetros para a caracterização metrológica dos instrumentos de medição.

No capítulo 4 é apresentado o método experimental aplicado, a concepção da bancada de testes, os procedimentos de testes envolvidos junto com a definição dos locais críticos para a instalação do medidor *clamp-on*, onde o escoamento se encontra perturbado, e as orientações de instalação dos transdutores.

O capítulo 5 aborda os dados coletados, os resultados finais dos testes, e a magnitude do impacto gerado na medição de acordo com a posição longitudinal em que o medidor *clamp-on* se encontra.

O último capítulo discute os resultados encontrados e propõe diretrizes para trabalhos futuros.

## 2

### Fundamentos teóricos da medição de vazão por princípio ultrassônico

O som é um fenômeno acústico que pode ser utilizado como uma ferramenta em sistemas de medição. Desde a origem do ser humano o som era utilizado como meio de conhecimento da distância até um certo objeto, mesmo com resultados imprecisos. É através do som que os animais se comunicam e certas espécies o utilizam para localização. Por meio do avanço tecnológico e de pesquisas, essa ferramenta evoluiu sendo atualmente utilizada no âmbito médico e no contexto industrial. No meio industrial, a funcionalidade do som possibilitou a medição de vazão e ao longo dos mais de 50 anos de desenvolvimento seu desempenho aumentou consideravelmente. De maneira geral, as aplicações do som como ferramenta se mostram eficazes e seguem em constante evolução.

O emprego de medidores de vazão que utilizam a tecnologia ultrassônica cresce rapidamente, representando uma expectativa de crescimento do mercado de instrumentos de vazão de cerca de 8,29%, alcançando 5,1 bilhões de dólares no ano de 2017 (Flow Control Magazine, 2017). Tal destaque também é refletido na quantidade de estudos realizados recentemente sobre tecnologias de medição ultrassônica. Atualmente, o tema mais abordado é a medição de vazão em regimes em transição, onde o perfil do escoamento é assimétrico, sendo um dos fatores que contribuem para o erro de medição.

A modernização dos equipamentos trouxe benefícios em termos de regulamentação, pela confiabilidade e exatidão associadas aos instrumentos ultrassônicos. No âmbito nacional, a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) é o órgão regulador das atividades que integram as indústrias do setor de óleo e gás, e o Inmetro estabelece a regulamentação dos instrumentos utilizados na medição de petróleo e gás natural e executa o controle legal dos sistemas de medição. Em conjunto, a ANP e o Inmetro, permitem a utilização da tecnologia ultrassônica na medição fiscal e em transferência de

custódia desde que sejam atendidos os requisitos especificados (Portaria Conjunta ANP/Inmetro, 2013).

## 2.1. Princípio de operação

Os medidores de vazão que utilizam o princípio de ultrassom têm como finalidade principal determinar a velocidade do fluido que percorre a tubulação. Para a definição da velocidade alguns fatores são determinísticos, tais como a técnica empregada, as condições externas, o tipo e as características do fluido de trabalho. As diferentes técnicas empregadas para o cálculo da velocidade do escoamento estão presentes na figura 1 são:

- Tempo de trânsito
- Efeito Doppler
- Correlação cruzada
- Acústica passiva
- Deflexão do feixe

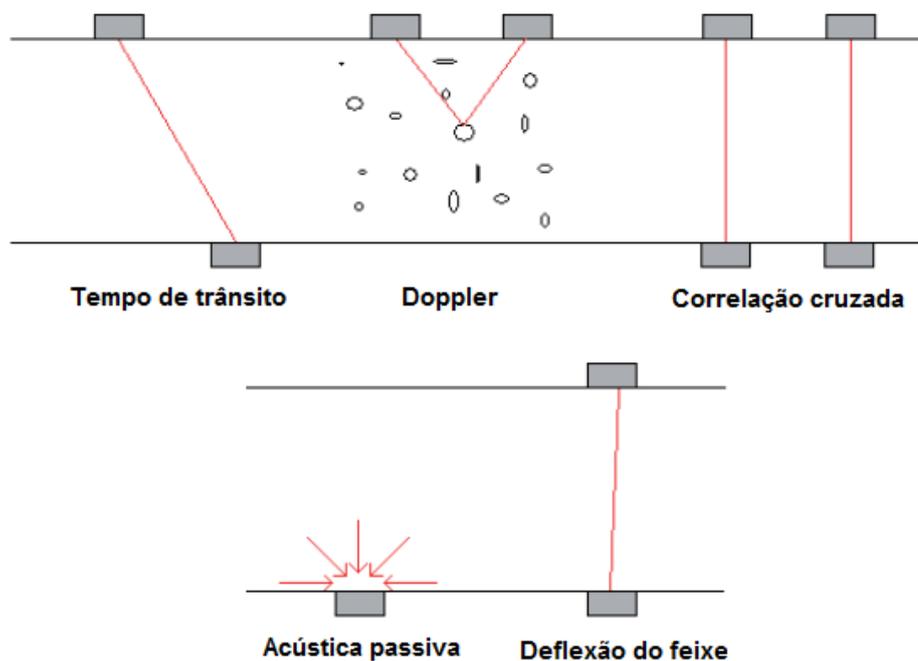


Figura 1 - Técnicas ultrassônicas empregadas na medição de vazão.

Fonte: (NBR 16198, 2013)

As 3 primeiras técnicas citadas são as mais utilizadas nos instrumentos industriais. Acústica passiva é o método em que o transdutor apenas capta o som gerado pelos vórtices, de modo que quanto maior for a frequência dos vórtices

captados maior é velocidade do fluido. O método de deflexão do feixe funciona a partir da transmissão contínua do sinal de ultrassom através da tubulação e do fluido até o transdutor receptor na outra extremidade da tubulação. O transdutor receptor monitora o ângulo de deflexão do feixe que está relacionado à velocidade média do fluido.

A técnica por tempo de trânsito é a mais comum utilizada nos medidores de tecnologia *clamp-on*. É a técnica empregada nos instrumentos desse trabalho. Seu funcionamento é baseado na diferença entre o tempo decorrido nos trajetos do feixe ultrassônico entre os transdutores, sendo o primeiro trajeto em sentido a favor do escoamento, e o segundo no sentido contrário. Essa diferença de tempo pode ser associada à velocidade do fluido.

O método efeito Doppler é baseado na reflexão do som pelas partículas presentes no fluido. Ondas de som emitidos pelo transdutor são refletidos pelas pequenas borbulhas ou sólidos, e então captadas pelo receptor. A velocidade do escoamento é determinada de acordo com a variação entre a frequência captada e a frequência emitida. Esse método é extremamente dependente das propriedades físicas do fluido, tais como a propagação do som, massa específica, perfil de escoamento, e uniformidade de distribuição das partículas suspensas e, atender ao requisito mínimo e máximo de partículas presente no escoamento.

Na correlação cruzada são utilizados dois pares de transdutores, posicionados um à montante do outro, estando os transdutores emissores alinhados lado a lado. Os transdutores funcionam continuamente e, quando há a passagem de um vórtice (partícula ou bolha) no primeiro par de transdutores, inicia-se a contagem de tempo até que este mesmo vórtice (mesma partícula ou mesma bolha) seja captado pelo segundo par de transdutores. A partir do tempo decorrido e, conhecendo-se a distância entre os pares de transdutores, a velocidade média do escoamento é estimada. O reconhecimento da mesma partícula, borbulha ou vórtice, que atravessou ambos os pares de transdutores é feito pela relação similar dos picos registrados.

Cada uma das técnicas apresentadas possui particularidades quanto aos requisitos de utilização, limitações, vantagens e desvantagens. O Guia (National Measurement System, 2017) explica detalhadamente cada uma dessas técnicas e fornece instruções para a instalação dos instrumentos. O trabalho de (Sanderson, Yeung, 2002) fornece a comparação com os outros princípios de medição. [4]

## 2.2.

### Determinação da velocidade por tempo de trânsito

Como mencionado anteriormente, a técnica de tempo de trânsito é a mais empregada nos instrumentos ultrassônicos, pelo melhor desempenho em comparação com as demais. O seu princípio de funcionamento é baseado na diferença de tempos de trajeto, exibido pela figura 2, e o seu cálculo é descrito na norma API MPMS 5.8 (exclusiva para medidores ultrassônicos).

$$\bar{v} = \frac{L^2}{2D} \cdot \frac{(t_{12} - t_{21})}{t_{12} \cdot t_{21}} \quad (1)$$

No qual:

- i.  $\bar{v}$  corresponde à velocidade média axial;
- ii.  $L$  é a distância entre os transdutores;
- iii.  $D$  é o diâmetro interno da tubulação;
- iv.  $t_{12}$  refere-se ao tempo de trajeto do feixe ultrassônico do transdutor 1 ao transdutor 2;
- v.  $t_{21}$  é o tempo de trajeto do feixe ultrassônico do transdutor 2 ao transdutor 1

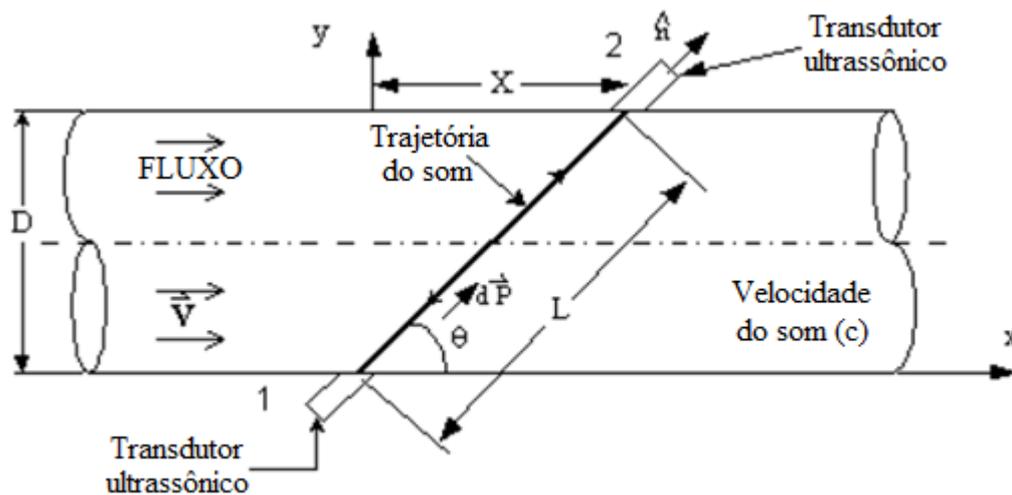


Figura 2: Esquema do processo de medição de vazão com medidor ultrassônico por tempo de trânsito.

Fonte: Adaptado de (Weber, 2003)

Para melhor entendimento da figura 2 sobre o tempo em que o feixe demora para ir do transdutor 1 ao 2 e vice-versa, pode ser feita a analogia da travessia de um barco entre as margens de um rio. Nessa situação, o barco levará menos tempo

para atravessar as margens quando estiver no mesmo sentido da corrente de água, e demorará mais tempo quando estiver contra a corrente. Assim, a diferença entre os tempos de travessia é proporcional à velocidade de escoamento do rio, o que também ocorre no cálculo da vazão quando se utiliza transdutores ultrassônicos. A figura 3 exemplifica a diferença nos tempos decorridos com as formas de onda captadas pelos transdutores.

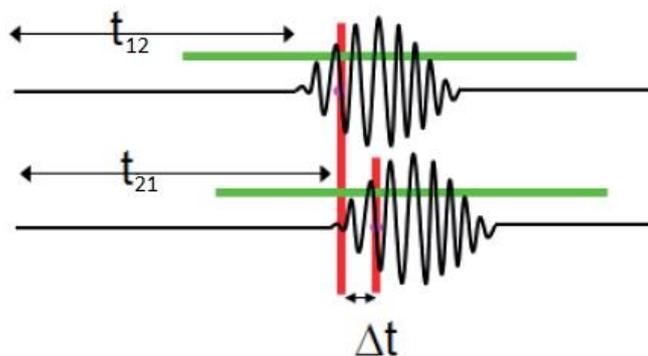


Figura 3: Forma de onda na medição por princípio de tempo de trânsito.

Fonte: Adaptado de (National Measurement System, 2017)

### 2.3. Definição da vazão

Para obter o valor da vazão deve-se integrar a velocidade axial do escoamento em torno da área transversal da tubulação.

$$Q = \int \bar{v} \cdot dA \quad (2)$$

Com o intuito de simplificar a análise, é suposto que a velocidade axial do fluido em toda a área do escoamento é constante, resultando em uma integral dada pela simples multiplicação da velocidade pela área interna da tubulação. Contudo, tal simplificação não representa a realidade, pois o perfil de escoamento não é uniforme ao longo da tubulação. De forma a contornar tal situação, os fabricantes utilizam fatores de correção para compensar os desvios presentes no perfil de escoamento do fluido.

De acordo com estudos divulgados, quanto maior o número de trajetórias em funcionamento no medidor ultrassônico, maior é a varredura no perfil de velocidade do escoamento e mais próximo será o valor medido do valor real. De acordo com Nikuradse e Reichardt, citados por (Weber, 2003), se o local planejado para a instalação do medidor atender às especificações das normas e apresentar um

escoamento desenvolvido, apenas uma trajetória é suficiente para a obtenção de uma medição razoável. A figura 4 demonstra como as trajetórias do feixe ultrassônico se propagam internamente e como ocorre a detecção do perfil de velocidade do fluido, uma vez que cada feixe faz a medição de velocidade naquela determinada camada do escoamento em que cruza.

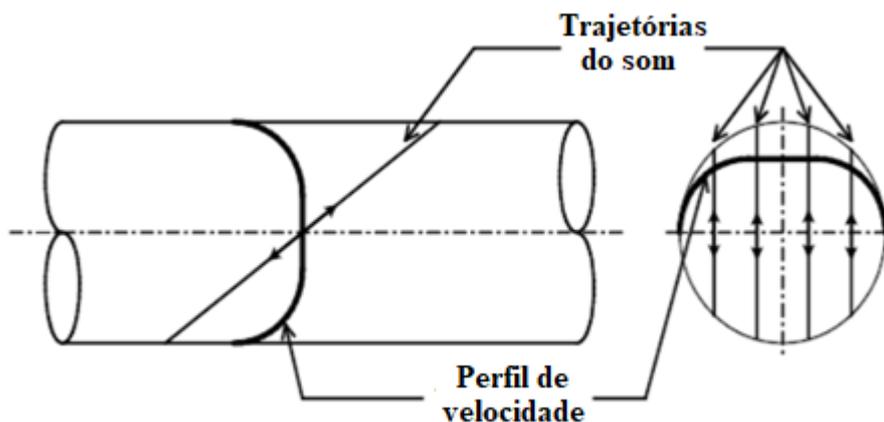


Figura 4: Layout dos feixes ultrassônicos de um medidor com múltiplos canais.

Fonte: Adaptado de (Weber, 2003)

No caso de um escoamento desenvolvido a utilização de um medidor com trajetória única é classificada como razoável. Já para o escoamento em desenvolvimento é aconselhável a utilização de um medidor com múltiplos feixes ultrassônicos. Evidentemente, quanto maior for o número de canais, maior o valor do medidor no mercado, pois o número de canais também está associado ao número de transdutores do instrumento.

#### **2.4. Classificação de medidores**

Existem diferentes disposições para montagem de medidores em tubulações, sendo para cada instrumento atribuída uma classificação. Quando o sensor está inserido no meio, ocorrendo contato direto, este é classificado como invasivo. E, se a disposição do sensor impacta a medição de alguma forma, este é classificado como intrusivo. Analogamente, os contrários são classificados como não-intrusivo e não-invasivo, totalizando 4 possibilidades de classificação. A figura 5 descreve os tipos possíveis de classificação dos medidores.

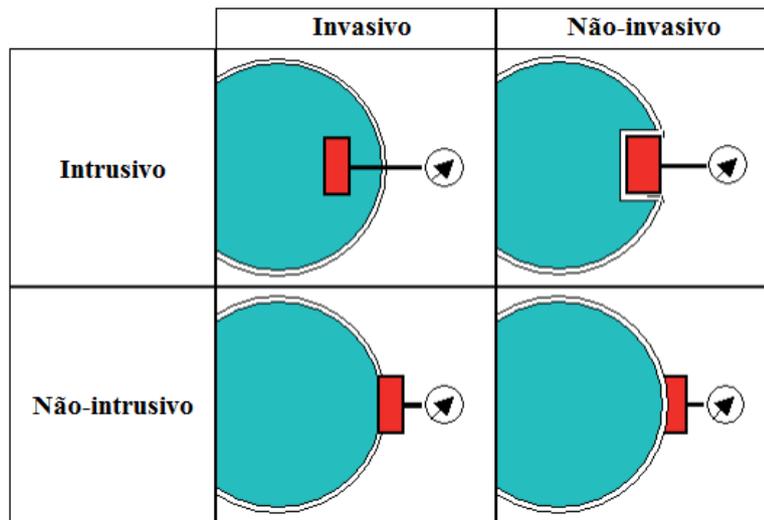


Figura 5: Classificação de instrumentos.

Fonte: Adaptado de (National Measurement System, 2017)

O medidor ultrassônico de vazão *clamp-on* é classificado como não-invasivo e não-intrusivo, justamente por seu acoplamento ocorrer do lado externo da tubulação. Já os medidores ultrassônicos convencionais são considerados invasivos e não intrusivos, o mesmo tipo utilizado neste trabalho como o medidor de referência. Ademais, os medidores invasivos podem ser apontados como retraídos, faceados e intrusivos, representados pela figura 6.

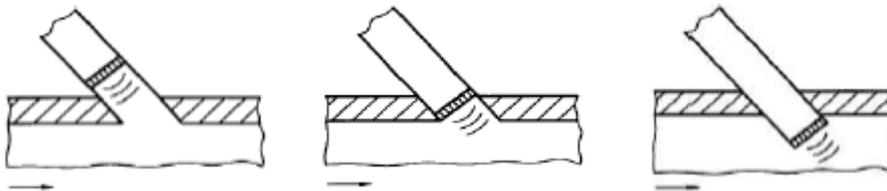


Figura 6: Representação do contato entre transdutor e fluido.

Fonte: (NBR 16198, 2013)

## 2.5.

### Medidor de vazão ultrassônico do tipo *clamp-on*

Por se tratar de um medidor acoplado externamente à tubulação, este tipo de medidor é mais suscetível a flutuações no valor efetivo de medição. Um dos causadores desta instabilidade é o meio em que o feixe ultrassônico se propaga, e para corrigir este tipo de perturbação a Lei de Snell é aplicada.

Por definição, todo tipo de onda sofre um desvio angular ao passar de um meio a outro com diferentes índices de refração. Como apresentado na figura 7, o

feixe de ultrassom atravessa três diferentes meios que possuem índices de refração distintos ( $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\theta$ ).

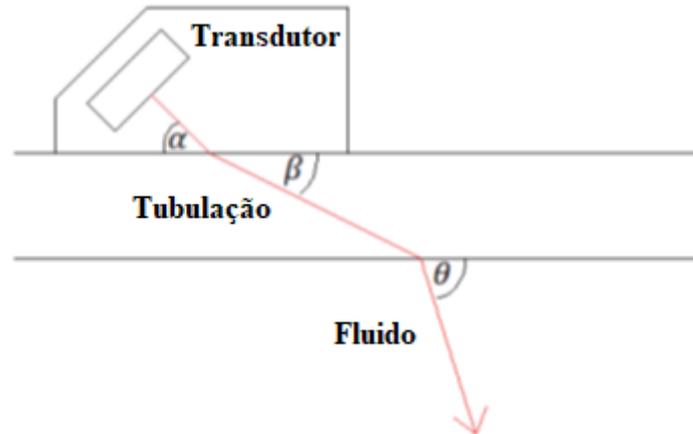


Figura 7: Refração do feixe ultrassônico nos diferentes meios.

Fonte: Adaptado de (National Measurement System, 2017)

A equação resultante da aplicação da Lei de Snell para o instrumento medir vazão pelo princípio ultrassônico, do tipo *clamp-on*, é:

$$\frac{\sin \alpha}{c_{\alpha}} = \frac{\sin \beta}{c_{\beta}} = \frac{\sin \theta}{c_{\theta}} \quad (3)$$

Sendo que:

- i.  $c_{\alpha}$  é a velocidade do feixe de som dentro do invólucro do transdutor, fornecida pelo fabricante;
- ii.  $c_{\beta}$  é a velocidade do feixe de som no material da tubulação (no presente trabalho é aço inox);
- iii.  $c_{\theta}$  é a velocidade do feixe de som no fluido.

## 2.6. Orientação dos transdutores

Como se trata de um medidor móvel, sem instalação fixa dos transdutores, há diversas orientações possíveis para o acoplamento dos transdutores em torno da tubulação. No entanto, o fabricante de cada instrumento sugere as orientações que devem ser utilizadas. Outro ponto importante deste tipo de medidor é que podem ocorrer variações quanto ao modo de propagação dos feixes de ultrassom, podendo ser de modo direto ou modo reflexivo. Segundo (Funck e Baldwin, 2012), a utilização de trajetórias em diferentes planos reduz o impacto de assimetria no perfil

do escoamento causados pelos distúrbios na tubulação. A figura 8 exemplifica dois tipos de orientações mais comuns na utilização do *clamp-on* com 2 pares de transdutores.

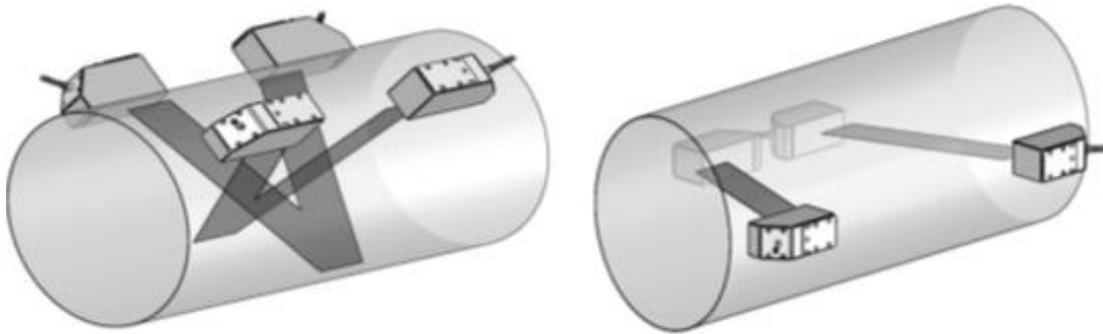


Figura 8: Instalação dos transdutores em volta da tubulação com configuração (a) reflexiva em dois planos e (b) direta em apenas um plano.

Fonte: (Funck e Baldwin, 2012)

Assim como é mencionado por (Funck e Baldwin, 2012), a vantagem da utilização dos transdutores em configuração de trajetórias reflexivas é que as componentes não axiais da velocidade do escoamento são compensadas. Isso ocorre por causa do efeito não axial do escoamento nos dois trajetos do feixe, o primeiro trajeto sendo do emissor até a superfície do outro lado da tubulação e o outro trajeto da reflexão na tubulação até o transdutor receptor, ambos trajetos captam essa componente axial de velocidade inclusive com a mesma intensidade, mas com sinais opostos e, por isso são compensadas automaticamente.

Além disso, foi demonstrado no trabalho de (Ferreira, 2015) que para se obter níveis de incerteza melhores é necessário o uso da média das medições de vazão feito com no mínimo dois pares de transdutores, de maneira que as trajetórias dos feixes ultrassônicos sejam perpendiculares, o que reduz a influência dos componentes não axiais, assim como foi mencionado anteriormente.

Levando em conta as análises mencionadas acima, a orientação dos transdutores escolhida para os testes no trabalho foi com os pares dispostos a  $45^\circ$  e  $315^\circ$  em relação ao topo da tubulação, com trajetórias reflexivas dos feixes ultrassônicos.

## 2.7.

### Fórmula da vazão do medidor ultrassônico do tipo *clamp-on*

Por fim, a equação 4 é desenvolvida para utilização dos transdutores em modo reflexivo (NBR 16198, 2013), ou seja, a análise matemática anterior é complementada, compensando-se algumas simplificações feitas para aproximar o valor da vazão medida do valor da vazão real.

$$Q_v = \frac{k_h \cdot \pi \cdot c_\alpha \cdot D \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{c_\theta \cdot \sin \alpha}{c_\alpha} \right)^2} (t_{1 \rightarrow 2} - t_{2 \rightarrow 1})}{16 \cdot \sin \alpha} \quad (4)$$

De forma que:

- i.  $Q_v$  indica o valor da vazão;
- ii.  $D$  diâmetro interno da tubulação;
- iii.  $k_h$  fator de correção que relaciona a velocidade média do escoamento e a velocidade média do feixe ultrassônico;
- iv.  $t_{1 \rightarrow 2}$  tempo de trânsito do feixe de som do transdutor 1 ao transdutor 2;
- v.  $t_{2 \rightarrow 1}$  tempo de trânsito do feixe de som do transdutor 2 ao transdutor 1;

Muitos fabricantes desse tipo de instrumento não divulgam a exata equação empregada no cálculo, que pode sofrer pequenas variações. Essas modificações são geralmente aplicadas como fatores de correção.

## 2.8.

### Estudo desenvolvido pelo fabricante

O teste desenvolvido neste trabalho é similar ao que foi realizado pelo próprio fabricante do medidor ultrassônico do tipo *clamp-on* utilizado. A apresentação divulgada pela Flexim, em (Funk e Liptrot, 2014), mostra o desempenho do medidor para diferentes situações de instalação do medidor de vazão do tipo *clamp-on*. A figura 9 ilustra o comportamento previsto do erro de medição para a situação de duas curvas na tubulação, como trata-se de uma simulação em um software, representa o desempenho esperado do medidor em uma situação real. A simulação utiliza como parâmetros: número de Reynolds fixo igual a 450 k; rugosidade  $10^{-4}$  m; e o medidor ultrassônico com 4 trajetórias, equivalente a dois canais.

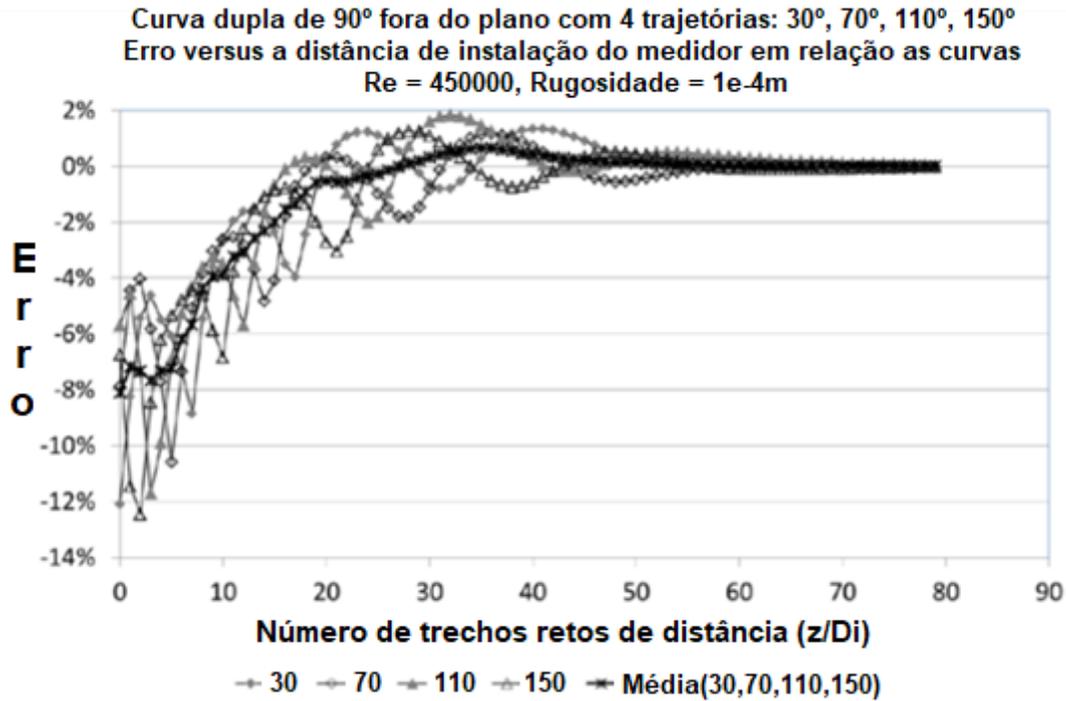


Figura 9: Resultado da simulação no CFD divulgado pela Flexim.

Fonte: Adaptado de (Funck e Liptrot, 2014).

No teste de laboratório conduzido pela Flexim, instalando o medidor após duas curvas na tubulação fora do plano, o resultado apresenta uma pequena oscilação do erro para curtas distâncias de trecho reto. Para maiores distâncias de trecho reto o erro é reduzido, mas ainda assim permanece perto de  $\pm 1\%$ . Além disso, a figura 10 mostra o resultado dos testes, nos quais também se variou o número de Reynolds. Os resultados simulados e físicos não têm comportamentos semelhantes, mas ambos tendem a erros menores à medida que a distância de trechos retos aumenta.

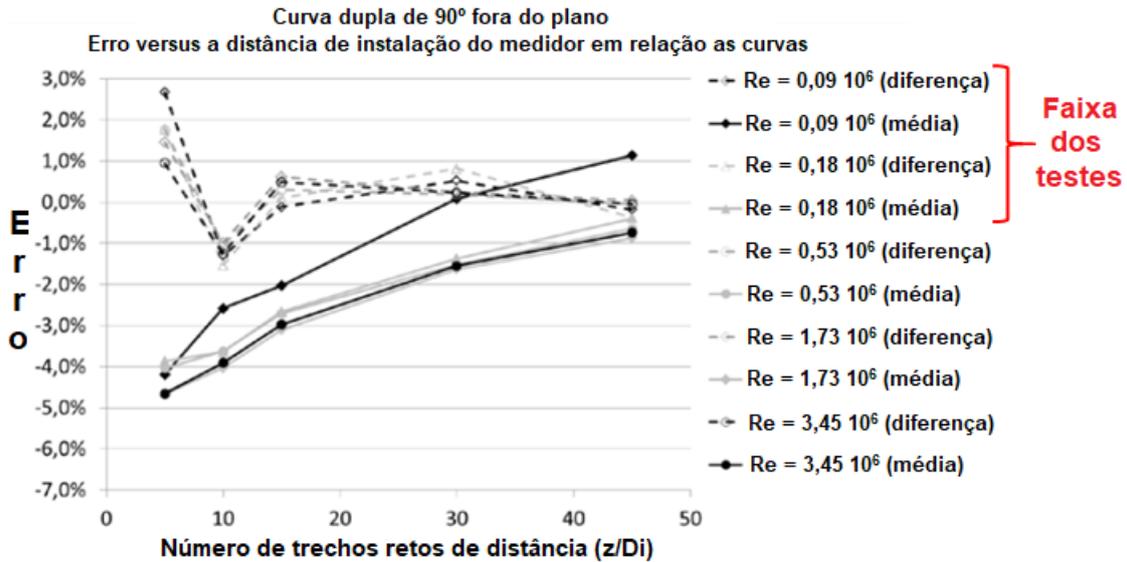


Figura 10: Resultado dos testes executados pelo fabricante Flexim.

Fonte: Adaptado de (Funck e Liptrot, 2014).

O número de Reynolds depende da velocidade média do escoamento, do diâmetro da tubulação e da viscosidade cinemática do fluido. Para efeitos de comparação, o número de Reynolds dos testes executados neste trabalho de dissertação variaram de  $0,085 \cdot 10^6$  até  $0,17 \cdot 10^6$ , aproximadamente. Com tubulação medindo cerca de 4 polegadas (aproximadamente igual a 101 mm), e a vazão variando de  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  até  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ , que significa velocidade média do escoamento de  $0,707 \text{ m/s}$  até  $1,415 \text{ m/s}$ .

### 3 Metodologia de avaliação

Para a avaliação metrológica do instrumento é necessário utilizar os parâmetros dispostos no VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia, 2012) e no GUM (Guia para a expressão de incerteza de medição, 2008) para caracterizar o desempenho do medidor em teste. Ao longo deste capítulo são apresentadas tanto as definições dos parâmetros utilizados, como as equações envolvidas nos cálculos.

#### 3.1. Erro de medição

Assim como consta no VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia, 2012), sendo evidente pelo nome, o erro refere-se diretamente à subtração entre o valor medido pelo instrumento em teste e o valor adquirido pelo medidor de referência. Por definição, o VIM esclarece que:

*Diferença entre o valor medido duma grandeza e um valor de referência.*

$$Erro = V_{Objeto} - V_{Padrão} \quad (5)$$

A unidade de resposta será a mesma porém, para termos de comparação, é interessante realizar posteriormente a divisão deste erro pelo valor do padrão. O valor em percentual indica a dimensão do erro sobre o seu valor absoluto, ou seja, é um método de comparação entre valores de ordem diferente.

#### 3.2. Fator do medidor (MF)

O fator do medidor é a relação entre as medições do medidor de referência e o medidor em calibração. Esse termo expõe a dimensão do erro entre os medidores. Matematicamente essa relação é a razão dos valores do medidor padrão e do medidor em calibração, assim como é exibido na equação 6.

$$MF = \frac{V_{Padrão}}{V_{Objeto}} \quad (6)$$

### 3.3. Repetibilidade

A repetibilidade indica um valor com base em medições repetidas, no qual se segue o mesmo procedimento de medição. De acordo com o VIM:

*Condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo.*

*NOTA 1 Uma condição de medição é uma condição de repetibilidade apenas com respeito a um conjunto especificado de condições de repetibilidade.*

*NOTA 2 Em química, o termo “condição de precisão intrassérie” é algumas vezes utilizado para designar este conceito.*

Para estimar mais realisticamente a repetibilidade a partir de uma amostra finita, o nível de repetibilidade nos testes depende do tempo de integração das amostras para o cálculo da vazão média durante o intervalo de tempo especificado e do número de corridas realizadas durante o teste, muito embora a distribuição *t-Student* tenha sido utilizada. Desta forma, pode-se calcular a média de todas as corridas, supostamente considerada como o valor verdadeiro, e o desvio padrão delas, que multiplicado pelo valor *t-Student*, referente ao número total de corridas menos um, e nível de confiança de 95,45 %, resulta no valor de incerteza do medidor.

A figura 11 é exibida para elucidar tais parâmetros com as devidas explicações em seguida. Durante uma calibração feita por um laboratório, o tempo de integração é especificado para cada corrida. No presente trabalho, foi simulada a influência do tempo de integração ( $t$ ) e do número de corridas ( $n$ ) sobre a repetibilidade das medições, usando para isto um conjunto de dados de vazão tomados a cada segundo ( $t = 1$ ) pelo medidor em calibração e o medidor de referência, resultando em um conjunto de  $N$  valores médios de cada uma das vazões a cada segundo. A seguir, um tempo de integração ( $t$ ) é escolhido, de modo que um outro conjunto é formado com os dados iniciais, consistindo de  $(N/t)$  elementos para cada vazão. O primeiro destes elementos é calculado como a média aritmética dos ( $t$ ) primeiros valores de vazão do conjunto inicial, simulando uma corrida onde uma

vazão média durante um intervalo de tempo ( $t$ ) é medida. Os outros elementos deste novo conjunto são sucessivamente calculados com os ( $t$ ) elementos iniciais seguintes. A seguir, a média aritmética, o desvio padrão e a repetibilidade são calculados variando-se o número de elementos deste novo conjunto de  $n = 3$  até  $n = N/t$ , simulando o número de corridas que seriam feitas com o mesmo tempo de integração ( $t$ ) até um número total possível com estes dados de ( $N/t$ ).

Tempo (s)	Tempo de Integração (s)			
	1	3	6	9
1	1,1360			
2	1,1720	1,1420		
3	1,1180			
4	1,0400		1,1107	
5	1,0210	1,0793		1,1109
6	1,1770			
7	1,1520			
8	1,0870	1,1113		
9	1,0950			
10	1,1010		1,0910	
11	1,0670	1,0707		
12	1,0440			
13	1,0590			
14	1,0650	1,0590		1,0668
15	1,0530			
16	1,0800		1,0648	
17	1,0820	1,0707		
18	1,0500			
19	1,0520			
20	1,0780	1,0743		
21	1,0930			
22	1,0570		1,0468	
23	1,0410	1,0193		1,0267
24	0,9600			
25	1,0050			
26	0,9850	0,9863		
27	0,9690			
28	1,0310		1,0290	
29	1,0220	1,0717		-
30	1,1620			

Figura 11: Demonstrativo de cálculo e as variáveis envolvidas.

Assim como é exibido na figura 11, o tempo de aquisição de cada medição é em torno de 1 segundo, resultando em um total de 30 medições. Com isso, o número total de corridas é igual ao número total de medições realizadas durante o teste, ou seja,  $n = 30$ . No caso do tempo de integração ser igual a  $t = 3$  s, o valor do número total de corridas seria igual a  $n = 10$ , ou seja, estes dois parâmetros estão ligados ao número de medições do experimento. Nada impede que o usuário escolha um valor inferior para o número total de corridas, uma vez que isso resultaria em menos medições necessárias. A figura 11 aponta justamente essa situação, no qual para um tempo de integração igual a  $t = 3$  s, o número total de corridas é igual a 10

( $\bar{Q}_i = 1,0685 \text{ m}^3/\text{h}$ ), mas que foi escolhido  $n = 7$ , resultando em um valor de  $\bar{Q}_i$  diferente ( $\bar{Q}_i = 1,0867 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

Na figura 11 também está ilustrado alguns dos parâmetros envolvidos nas equações seguintes como a equação 7, que mostra detalhadamente o cálculo.

$$\bar{Q}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \therefore Q_i = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t q_j \quad (7)$$

Onde:

- $\bar{Q}_i$  é a média do total de corridas (média dos valores de  $Q_i$ );
- $n$  corresponde ao número total de corridas;
- $Q_i$  é a média das medições referente ao tempo de integração;
- $t$  refere-se ao tempo de integração, sendo igual ao número de medições;
- $q_j$  corresponde ao valor de apenas uma medição;

O cálculo do desvio padrão é feito a partir do somatório da diferença entre a média do total de corridas e a média de cada integração de amostras. A equação 8 exemplifica cada variável envolvida no cálculo.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2}{n-1}} \quad (8)$$

O valor de *t-Student* é referente à distribuição estatística, no qual o valor do total de graus de liberdade é igual ao número total de corridas durante o teste subtraído de 1. Baseado no GUM (Guia para a expressão de incerteza de medição, 2008), o presente trabalho utilizou a equação 9 para o cálculo do valor da repetibilidade ( $R$ ). Assim como está apresentado pela equação, o seu valor é expresso em porcentagem e representa a multiplicação entre o desvio padrão e o valor de *t-Student* e, em seguida dividido pela média do total de corridas encontrada no teste.

$$R = \frac{t \cdot s}{\bar{Q}_i} \cdot 100\% \quad (9)$$

### 3.4. Incerteza de medição

O termo de incerteza de medição tem como definição:

*Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.*

*Nota 1 A incerteza de medição inclui componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como componentes associadas a correções e a valores atribuídos a padrões, assim como a incerteza definicional.*

*Nota 2 O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio-padrão denominado incerteza-padrão (ou um de seus múltiplos) ou a metade da amplitude dum intervalo tendo uma probabilidade de abrangência determinada.*

*Nota 3 A incerteza de medição geralmente engloba muitas componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. As outras componentes, as quais podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo B da incerteza de medição, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações.*

*Nota 4 Geralmente para um dado conjunto de informações, subentende-se que a incerteza de medição está associada a um determinado valor atribuído ao mensurando. Uma modificação deste valor resulta numa modificação da incerteza associada.*

Ou seja, a incerteza de medição de um instrumento possui diversas componentes relativas tanto a avaliações de erro do Tipo A como do Tipo B. No caso deste trabalho, primeiramente é feito a compensação do erro sistemático, e em seguida o cálculo do valor da incerteza. A equação 10 descreve a relação de igualdade entre a incerteza combinada e o desvio padrão de determinado medidor. Assim como a igualdade entre o *t-Student* e o fator de abrangência *k*, que resulta em uma outra forma de representação da repetibilidade, mas que são iguais. Vale ressaltar que o resultado da repetibilidade como mostrado é dado em valores percentuais.

$$u_i = s_i \therefore U = k \cdot u \therefore R = \frac{k \cdot u}{Q_i} = \frac{U}{Q_i} \quad (10)$$

Onde:

- $s_i$  é o desvio padrão de um medidor;
- $u$  refere-se a incerteza padrão combinada;
- $U$  referente a incerteza expandida relativa;

O valor verdadeiro de uma grandeza é normalmente desconhecido. Entretanto, pelo menos teoricamente, ele é uma função desconhecida dos valores medidos pelo padrão e pelo objeto ( $Q = f(Q_M, Q_T)$ ). A estimativa da sua incerteza de medição pode ser obtida propagando-se as incertezas tanto do medidor de referência como do medidor em teste, o *Caldon* e o *clamp-on* respectivamente.

$$u^2 = \left( \frac{\partial Q}{\partial Q_M} \cdot u_M \right)^2 + \left( \frac{\partial Q}{\partial Q_T} \cdot u_T \right)^2 \quad (11)$$

Como o valor médio do medidor de referência deve se aproximar do valor verdadeiro, pois o mesmo fora calibrado contra padrões hierarquicamente superiores, minimizando o erro sistemático, o coeficiente ( $\partial Q / \partial Q_M$ ) é em média aproximadamente igual a 1, pois  $Q \approx \bar{Q}_M$ . Já o outro coeficiente ( $\partial Q / \partial Q_T$ ) é em média aproximadamente igual ao fator do medidor médio ( $\bar{Q}_{MF} \approx \bar{Q}_M / \bar{Q}_T$ ). Pois  $Q \approx \bar{Q}_{MF} \cdot \bar{Q}_T$ . Assim:

$$u^2 = \sqrt{(u_M)^2 + \left( \frac{\bar{Q}_M}{\bar{Q}_T} \cdot u_T \right)^2} \quad (12)$$

Dividindo ambos os lados pelo valor verdadeiro, que é igual ao valor do padrão ( $Q = \bar{Q}_M$ ) e, também multiplicando os dois lados pelo valor de *t-Student*, é alcançada a forma de equação mais usual, a equação 13. O valor de *t-Student* é obtido através da distribuição estatística, no qual o valor do total de graus de liberdade é igual ao número total de corridas durante o teste subtraído de 1.

$$\frac{U}{Q} = \sqrt{\left( \frac{t \cdot u_M}{\bar{Q}_M} \right)^2 + \left( \frac{t \cdot u_T}{\bar{Q}_T} \right)^2} \quad (13)$$

Utilizar o valor de incerteza de medição do medidor de referência, valor fixo entregue no certificado de calibração, aparentemente seria o mais indicado para o termo de repetibilidade do padrão ( $t \cdot u_M / \bar{Q}_M$ ). A princípio, este valor divulgado

pelo fabricante certamente foi obtido através de testes controlados no qual se manteve constante a grandeza em medição. No entanto, de acordo com os testes executados nesta dissertação, foi constatado que a vazão do escoamento não permaneceu constante, tendo flutuações de vazão, tanto do medidor de referência como do em teste, que tendem a aumentar o desvio médio quadrático das flutuações. A estimativa da repetibilidade do valor do medidor em calibração, se o escoamento não tivesse flutuações, conforme condições de calibração do medidor de referência, pode ser feita usando a equação de definição do fator do medidor ( $Q_{MF} \approx Q/Q_T$ ). Para um valor verdadeiro ( $Q$ ) constante, e propagando-se a incerteza de medição, a repetibilidade do fator do medidor ( $t \cdot u_{MF} / \bar{Q}_{MF}$ ) é igual à repetibilidade do medidor em calibração ( $t \cdot u_T / \bar{Q}_T$ ).

Considerando que a relação entre o valor verdadeiro de vazão ( $Q$ ) e o valor indicado pelo objeto ( $Q_T$ ) não seja afetada por pequenas flutuações do escoamento, a repetibilidade do fator do medidor ( $t \cdot u_{MF} / \bar{Q}_{MF}$ ) permanece constante. Durante uma calibração, com pequenas flutuações do escoamento, calcula-se a repetibilidade do fator do medidor e supõe-se que ela permaneça a mesma quando na ausência de instabilidades no escoamento. Este valor é igual à repetibilidade do objeto, que quando substituído na equação 13, e usando o valor de certificado da incerteza de medição com o medidor de referência ( $U_M$ ), obtém-se uma estimativa da incerteza de medição de vazão com o objeto se o escoamento não tivesse flutuações.

$$\frac{U}{Q} = \sqrt{\left(\frac{U_M}{Q_M}\right)^2 + \left(\frac{t \cdot u_{MF}}{Q_{MF}}\right)^2} \quad (14)$$

## 4 Procedimento experimental

Neste capítulo é apresentada a estrutura utilizada assim como o procedimento dos testes realizados no trabalho. O laboratório está localizado na PUC-Rio e é utilizado para avaliação de desempenho funcional e metrológico de instrumentos de medição. E segundo consta no Regulamento Técnico Metrológico (Portaria Conjunta ANP/Inmetro, 2013), a calibração de um medidor de vazão deve ser realizada em um laboratório acreditado ou na própria instalação utilizando um padrão definido pela ANP, seja um tanque, um provador por deslocamento ou um medidor padrão.

Para as calibrações realizadas em campo, o RTM determina que as normas técnicas, API (*American Petroleum Institute*) capítulo 4 e as da série ISO 7278, sejam obedecidas. Determina-se também que as condições de calibração sejam similares às aquelas de operação (faixa de vazão, pressão, temperatura, densidade e viscosidade).

Por esse motivo, o objetivo do teste é reproduzir a situação em que o medidor de campo esteja instalado em local inapropriado para a realização das medições segundo a norma. Para utilizar o medidor *clamp-on* como padrão itinerante, é necessário primeiramente calibrá-lo em um local similar ao que funcionará. Os testes buscam identificar a magnitude do impacto gerada nas medições diante da localização do medidor *clamp-on*. Os resultados adquiridos são baseados na comparação dos valores medidos pelo medidor de referência e o medidor em teste.

### 4.1. Bancada de testes – Concepção

A bancada de testes se baseou no mesmo arranjo que havia no Laboratório de Avaliação Metrológica e Energética (LAME) no antigo local na PUC-Rio, assim como está descrito no trabalho de (Ferreira, 2015). Como foram feitas algumas modificações em relação à estrutura inicial, foi elaborado um desenho esquemático em 3D do projeto final da bancada de testes, exemplificado pelas figuras 12 e 13.

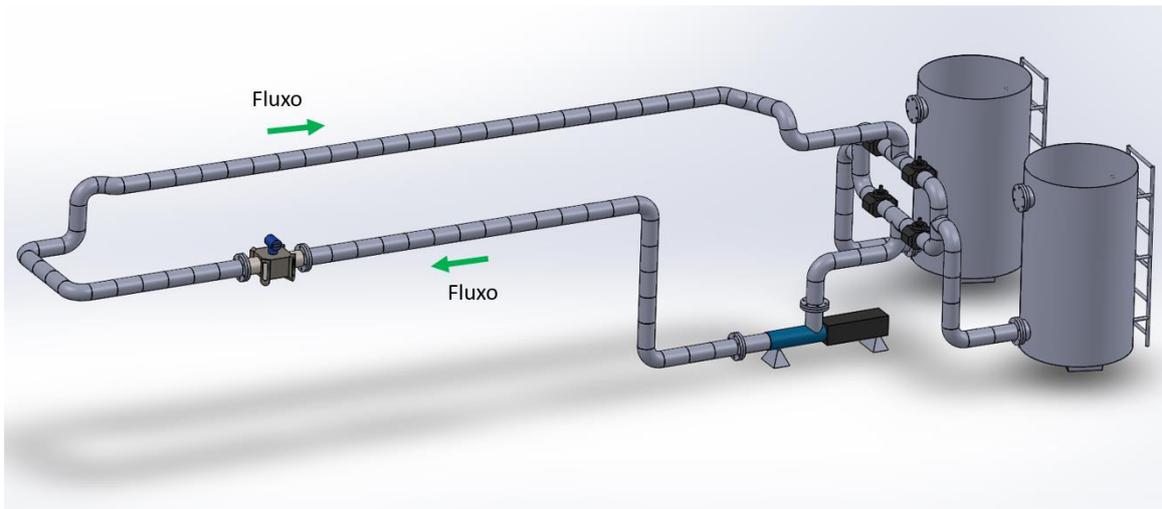


Figura 12: Esquema do conceito da bancada de testes, vista lateral.

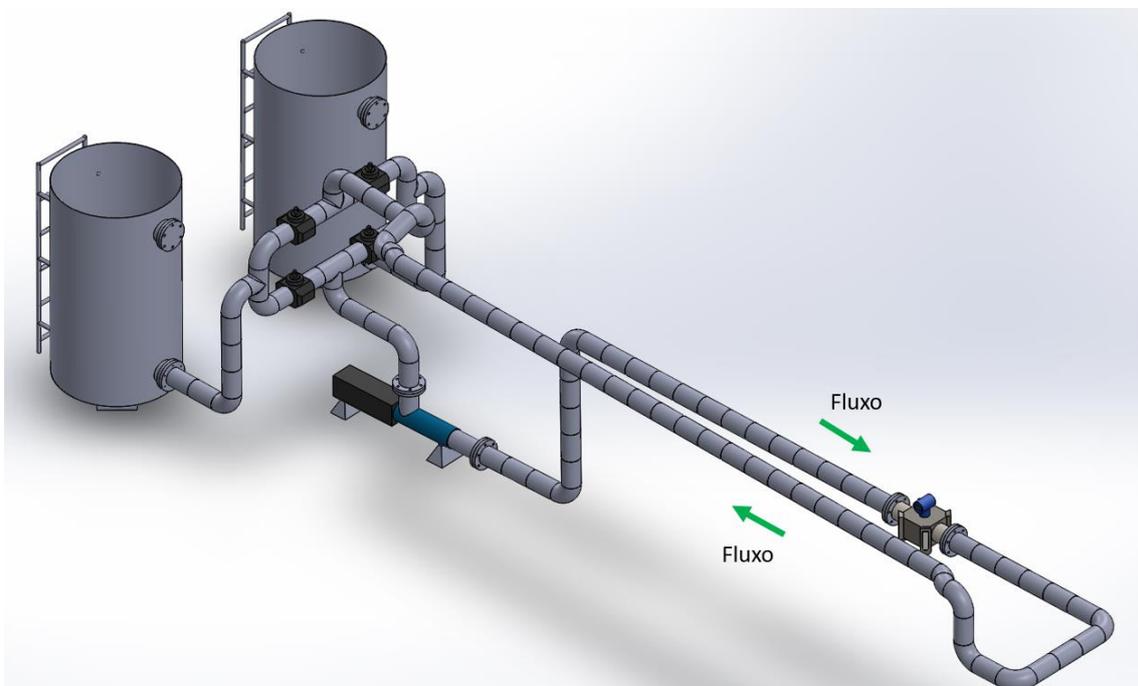


Figura 13: Esquema do conceito da bancada de testes, vista isométrica.

Grande parte da linha foi projetada para ser suspensa para o aproveitamento do espaço físico do laboratório. Os equipamentos essenciais para os testes estão representados, sendo eles: a bomba, os tanques, as válvulas e o medidor padrão. O local de instalação do medidor *clamp-on* varia ao longo deste trecho de linha, logo após as curvas na tubulação que causam a mudança de direção do escoamento, assim como está exemplificado na figura 14.

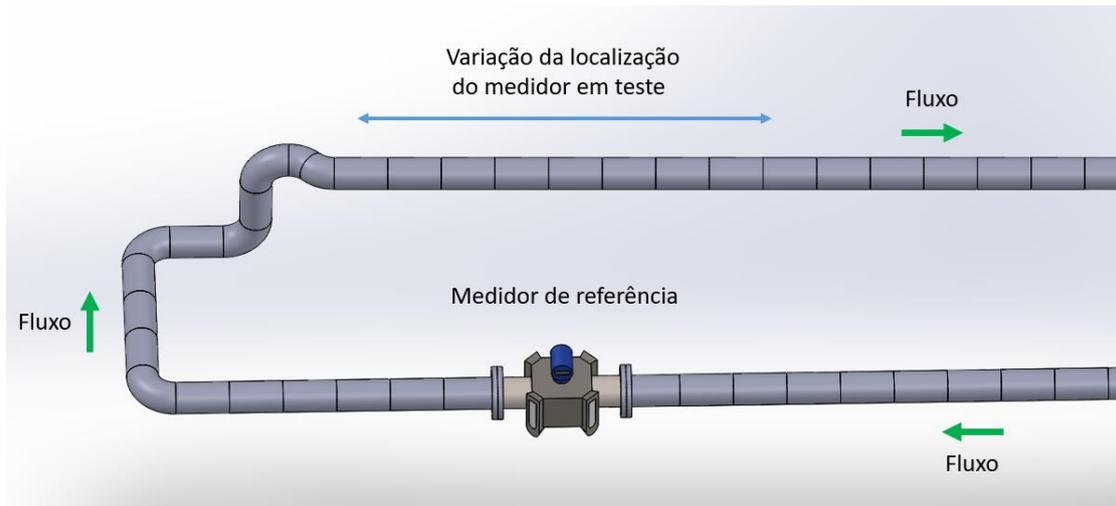


Figura 14: Variação do local de instalação do medidor tipo clamp-on.

Como pode ser visto, o escoamento sofre no total 6 tipos de mudança de direção, sendo as duas primeiras no mesmo plano com joelhos de  $90^\circ$ , seguidas de mais duas curvaturas de  $90^\circ$  e, por fim, duas curvas próximas de  $45^\circ$ , cada uma em direções opostas. Como o escoamento é perturbado, o perfil do escoamento se torna irregular, não sendo aconselhável a instalação de nenhum instrumento de medição à jusante deste conjunto de desvios na tubulação.

#### 4.2. Bancada de testes – Estrutura completa

Devido ao amplo espaço necessário para a instalação do *loop* de teste, o laboratório ficou dividido em duas salas. Em uma delas está a casa de máquinas onde todo maquinário pesado e com alta poluição sonora está localizado, como a bomba, os tanques, os compressores de ar e as válvulas. Apesar desta sala ser mais compacta, todos os equipamentos foram devidamente instalados conforme projetado, figura 15.



Figura 15: Vista aérea da casa de máquinas.

Na outra sala estão localizados os medidores e boa parte da tubulação com trechos retos, assim como mostram as figuras 16 e 17. Este ambiente é mais amplo e silencioso e foi utilizado para a execução dos testes, captação dos dados, análise crítica e conclusão de relatórios.



Figura 16: Vista do loop de teste na área interna do laboratório. Parte 1.



Figura 17: Vista do loop de teste na área interna do laboratório. Parte 2.

### 4.3. Circuito hidráulico

O processo tem início em um dos tanques, no qual o fluido contido é admitido pela bomba e segue ao longo da tubulação. Após certa distância percorrida é feita a medição da vazão pelo *Caldon* e pelo *clamp-on* e, a partir disso, o fluido segue para o outro tanque. À medida que o sistema opera, um tanque esvazia e o outro enche e, para evitar esvaziamento completo ou transbordamento, há um circuito eletrônico com sensores de nível que aciona as válvulas de modo que se alterne o fluxo de um tanque para o outro. Resumidamente, o experimento transfere o fluido de um tanque para o outro, semelhante ao realizado no trabalho de (Ferreira, 2015). O fluido utilizado ao longo dos testes foi a água e toda tubulação do sistema é de aço inox.

Normalmente, o experimento seguiria o procedimento descrito, mas através dos testes preliminares descobriu-se que a bomba utilizada não alcançava vazão superior a 32 m<sup>3</sup>/h, devido ao diferencial de pressão à montante e à jusante da bomba. À medida que um dos tanques esvazia, o outro enche, aumentando-se o diferencial de pressão entre eles. Contudo por limitação a bomba opera somente até um  $\Delta P$  igual à 6 bar, como consta no manual anexo B. Visando operar com vazões até 40 m<sup>3</sup>/h foi realizada uma pequena alteração no circuito hidráulico. Todas as válvulas foram mantidas abertas de modo que todo o circuito operasse em ciclo

fechado. Desta maneira, a água sai de ambos os tanques e continua percorrendo o circuito, não mais de um tanque para o outro. Assim, o nível de ambos os tanques se mantém o mesmo. Os componentes essenciais para medição envolvidos no trabalho são:

- Medidor ultrassônico *Caldon 280Ci* Cameron, com 8 trajetórias acústicas, de hierarquia metrológica superior ao *clamp-on*, possuindo incerteza inferior a 0,2%, valor extraído de acordo com o gráfico do certificado em anexo. O *Caldon* possui portaria de aprovação de modelo emitida pelo Inmetro, em que autoriza a operação do medidor entre 5,9 m<sup>3</sup>/h e 330 m<sup>3</sup>/h para diâmetro nominal de 100 mm.
- Multímetro HP, modelo 34970A possuindo 22 canais expansíveis com leitura de até 6,5 dígitos. Com certificado de calibração 153943-101 na data 22/09/2016, presente no anexo D.
- Medidor ultrassônico Flexim tipo *clamp-on* modelo F608 Double Energy, com exatidão de até 0,5% e repetibilidade igual a 0,15%, como informa o fabricante. Opera com até 3 trajetórias por par de transdutor utilizando-o em modo reflexivo.

#### 4.4. Medidores utilizados

O medidor *clamp-on* empregado no trabalho é do fabricante Flexim, modelo FLUXUS 608, e pode ser visualizado na figura 18.



Figura 18: Medidor ultrassônico de vazão.

Fonte: Flexim

Assim como é apresentado na equação 4 de vazão do medidor *clamp-on*, diversos parâmetros devem ser configurados no aparelho transmissor para iniciar o processo de medição. Abaixo são listados alguns parâmetros solicitados pelo equipamento:

- a. Diâmetro da tubulação
- b. Tipo de material da tubulação
- c. Tipo de fluido de trabalho
- d. Tipo de funcionamento dos feixes
- e. Número de trajetórias utilizadas
- f. Distância entre os transdutores

Este modelo dispõe de 2 canais de medição, A e B, e no medidor é possível configurar de maneira a obter o valor da média ou da subtração entre os dois canais. Assim como é recomendado pela norma BS 8452, e foi comprovado pelo estudo de (Ferreira, 2015), a média dos canais com montagem perpendiculares podem melhorar os níveis de exatidão das medições, e por isso a escolha de utilizar a média entre as medições.

Na figura 19 é apresentado o medidor de vazão *Caldon 280Ci*, sendo este o medidor de referência utilizado no trabalho.



Figura 19: Medidor de vazão ultrassônico com 8 canais, *Caldun 280C*.

Fonte: Cameron

O medidor da figura 19, este é um medidor do tipo *spool*, trecho de tubulação solidário ao instrumento, e que possui esse nome pois remete à aparência de um carretel. Como este instrumento é desenvolvido sob encomenda, o mesmo tem o diâmetro interno da tubulação previamente estabelecido, assim como o tipo de material empregado. Além disso, este medidor opera com 8 canais que totalizam 8

trajetórias de feixes ultrassônicos, conferindo ainda mais confiança nos resultados de medição.

Ambos os medidores, *clamp-on* e *Caldon*, permitem o acompanhamento das medições através de uma conexão com o computador. No presente trabalho, além da comunicação com o computador, utilizou-se também o multímetro HP para a aquisição de sinais em tempo real de ambos os medidores, já que cada um deles gera diferentes tipos de sinais de saída. O medidor *clamp-on* do fabricante Flexim utiliza sinal de saída em corrente elétrica (4 mA a 20 mA), enquanto o medidor de referência *Caldon* tem como saída um sinal em frequência (Hz). A finalidade do multímetro HP é manter um denominador comum de registro de dados dos dois medidores, realizando as leituras de cada um em instantes de tempo muito próximos e com erros de aquisição similares. A figura 20 mostra um exemplar do mesmo modelo ao que foi empregado.



Figura 20: Multímetro HP modelo 34970A de 6,5 dígitos.

Fonte: Hewlett Packard

#### 4.5. Procedimento dos testes

Primeiramente, foi realizado um teste com o multímetro HP para verificar se os valores de leitura estavam próximos aos valores injetados (simulados) pelo medidor *clamp-on*. O medidor *clamp-on* da Flexim tem uma função disponível em que é possível simular um sinal de saída dado um valor de entrada em  $\text{m}^3/\text{h}$ . Para isso devem ser introduzidos os pontos equivalente a  $0 \text{ m}^3/\text{h}$  e ao máximo  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , correspondentes à saída em corrente elétrica de 4 mA e 20 mA. Para qualquer valor intermediário é realizada uma interpolação.

Escolhidos os pontos de referência do teste em unidade de vazão ( $\text{m}^3/\text{h}$ ), o transmissor deve enviar o sinal de saída proporcional, e os valores medidos pelo

multímetro HP devem se aproximar dos valores teóricos esperados. O multímetro permaneceu monitorando dois canais referentes ao medidor Flexim durante 5 minutos, gerando um pouco mais de 250 medições dos dois canais de corrente elétrica do multímetro. A Tabela 1 exemplifica os valores escolhidos, os valores teóricos esperados, e os erros obtidos para cada um dos dois canais.

Tabela 1: Erros em corrente elétrica do teste preliminar do medidor *clamp-on* no multímetro HP.

Vazão de Referência (m <sup>3</sup> /h)	Referência corrente elétrica (mA)	Canal A		Canal B	
		Média (mA)	Erro (mA)	Média (mA)	Erro (mA)
0	4	4,00010	0,00010	4,00167	0,00167
10	7,2	7,20106	0,00106	7,20024	0,00024
20	10,4	10,40042	0,00042	10,39770	-0,00230
30	13,6	13,60088	0,00088	13,59618	-0,00382
35	15,2	15,20091	0,00091	15,20047	0,00047
40	16,8	16,80179	0,00179	16,80018	0,00018
50	20	20,00125	0,00125	19,99777	-0,00223

Os valores de média de corrente elétrica e vazão de referência servem de correlação entre o valor da corrente elétrica captada pelo multímetro e o valor efetivo da vazão, já com as devidas correções. Para obter o valor de erro em m<sup>3</sup>/h é aplicado a conversão, onde 0 m<sup>3</sup>/h equivale a 4 mA e, 50 m<sup>3</sup>/h corresponde a 20 mA. E assim como é apresentado na Tabela 2, mesmo com os valores de erro em corrente elétrica serem próximos de zero, o impacto no valor de vazão é considerável em determinadas faixas, fazendo-se necessário aplicar essa correção.

Tabela 2: Erros em m<sup>3</sup>/h do teste preliminar.

Vazão de referência (m <sup>3</sup> /h)	Canal A Erro (m <sup>3</sup> /h)	Canal B Erro (m <sup>3</sup> /h)
0	3,50792E-07	-3,25937E-06
10	-1,18119E-05	7,01208E-05
20	-0,00657814	-1,21092E-05
30	-1,6523E-05	-0,251388353
35	2,38652E-05	-0,251387611
40	-3,42528E-06	-0,265674964
50	-0,00067994	-0,000633782

Em seguida foi realizada a calibração do medidor *clamp-on* para confirmar se os valores medidos estão de acordo com os valores do medidor de referência. Nesse teste o *clamp-on* foi instalado com 27 DN (diâmetros nominais) de trecho reto à montante e 14 DN de trecho reto à jusante das curvas. A princípio estas distâncias pareciam seguras quanto à uma possível presença de irregularidade no perfil do escoamento, mas foram detectadas certas divergências nas leituras dos dois canais do medidor Flexim. Com isso foi realizada uma nova bateria de testes para confirmar se o escoamento realmente ainda se encontrava em desenvolvimento. Assim sendo, o novo teste ocorreu com a localização dos canais invertidas, ou seja, onde estava localizado o canal A passou a ser o canal B e vice-versa. A figura 21 demonstra como ficou a disposição dos transdutores em cada uma das situações, assim como o sentido do escoamento para elucidar a vista do desenho.

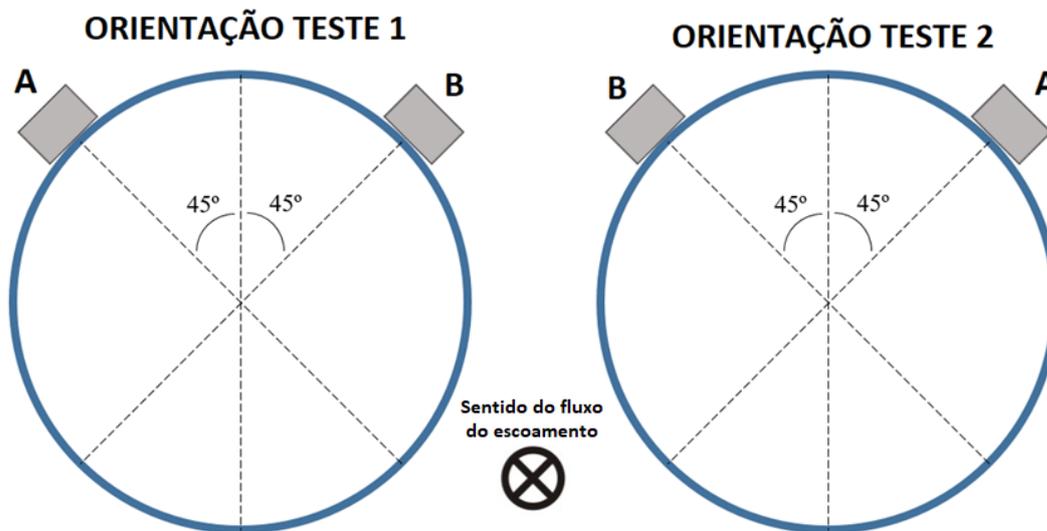


Figura 21: Posicionamento dos transdutores em cada um dos testes localizados 27 DN à montante do medidor de referência.

O resultado obtido nesse teste preliminar de calibração confirmou que há irregularidades no perfil do escoamento neste local onde os transdutores estão instalados, com desvio padrão em média igual a  $0,45 \text{ m}^3/\text{h}$ . Em virtude disso, foi realizado outro teste onde o medidor *clamp-on* ficou instalado com cerca de 50 DN de trechos retos à montante e 20 DN à jusante das curvas, sem que houvesse nenhum tipo de influência externa, localização ideal para operação assim como recomenda o fabricante.

Nesse último teste de calibração os valores de vazão indicados pelos canais A e B do medidor *clamp-on* se aproximaram, conseqüentemente reduziu-se o desvio padrão das medições (média de 0,06 m<sup>3</sup>/h). Sustentando a ideia de que neste local onde o medidor está instalado o fluxo apresenta perfil de escoamento completamente desenvolvido.

Para processamento dos dados obtidos foi desenvolvido um trecho de código em *Visual Basic* que realiza essas correções e também a conversão de corrente elétrica para metros cúbicos por hora. O diagrama da figura 22 demonstra o funcionamento do código. Dada a entrada, a leitura do sinal de corrente elétrica do medidor, o sistema gera como saída o valor em metros cúbicos por hora já com as devidas correções.

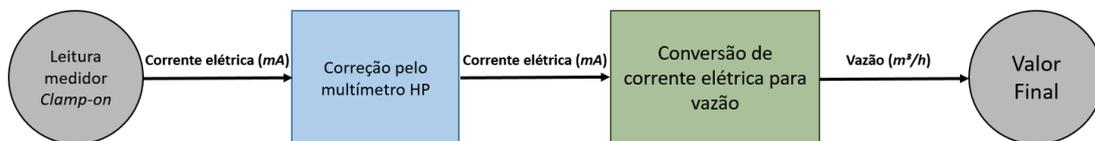


Figura 22: Fluxograma de correção do valor de leitura do *clamp-on*.

Após definida a posição de orientação dos canais do medidor *clamp-on* em volta da tubulação, e já com todo o sistema de correção de medições integrado, é prosseguiu-se para a etapa de testes, onde foi variada a posição axial de instalação do medidor *clamp-on* ao longo da tubulação após seguidos trechos de curvas na tubulação. O segundo teste foi realizado com trecho reto de 1 DN, e os seguintes com 5 DN, 10 DN, 15 DN, 20 DN, 30 DN e 40 DN em relação ao final das curvas na tubulação. Para cada localização foram realizadas 7 corridas de medição para os valores de vazão determinados e com intervalo de tempo fixado em 2 horas cada. Ou seja, para cada posicionamento do medidor foram realizados no mínimo 14 horas de medição, totalizando ao final 112 horas de testes.

## 5 Resultados

### 5.1. Repetibilidade

A execução de testes teve início com a instalação do medidor *clamp-on* à jusante dos trechos de curva e emendas de solda na tubulação, ou seja, disposto após determinada distância de trechos retos sem elementos causadores de distúrbio no escoamento. A figura 23 apresenta os valores de repetibilidade do fator do medidor (MF) como função do tempo de integração para diversos números de corridas. Pode-se observar que a repetibilidade tende assintoticamente para um valor aproximadamente constante. Para fins de comparação, as variáveis envolvidas, repetibilidade e incerteza, utilizam como base tempo de integração igual a 180 segundos. Para este tempo os testes resultaram em no mínimo 15 corridas, o que significa que cada teste teve pelo menos 2700 leituras. Esses valores foram definidos com base no resultado de diversos testes. Para exemplificar o comportamento da curva de repetibilidade da vazão e permitir a escolha dos melhores valores dos parâmetros, é exibido o resultado de um teste onde o medidor *clamp-on* foi instalado a 41 DN de trecho reto à montante das curvas na tubulação e mais de 10 DN de trecho reto à jusante.

A figura 23 foi construída a partir das leituras do teste com vazão nominal igual a 35 m<sup>3</sup>/h e a aplicação da equação 9, cálculo da repetibilidade. Pode ser observado que à medida que o tempo de integração aumenta o valor da repetibilidade melhora, indicando que um tempo de integração mais elevado seria mais adequado para comparações. É possível observar também que todos os pontos sofrem oscilações, sendo que determinadas corridas apresentam maiores oscilações e outras menores. Nota-se também que existe certa convergência dos pontos para um valor, e quando o tempo tende ao infinito a curva converge para um valor limite denominado assíntota. Isso quer dizer que mesmo executando um teste durante um período muito longo o resultado da precisão intermediária tenderia a assíntota. Pode-se observar também que pelo menos 10 corridas são necessárias para que os

valores do fator do medidor (MF) converjam para aproximadamente os mesmos valores.

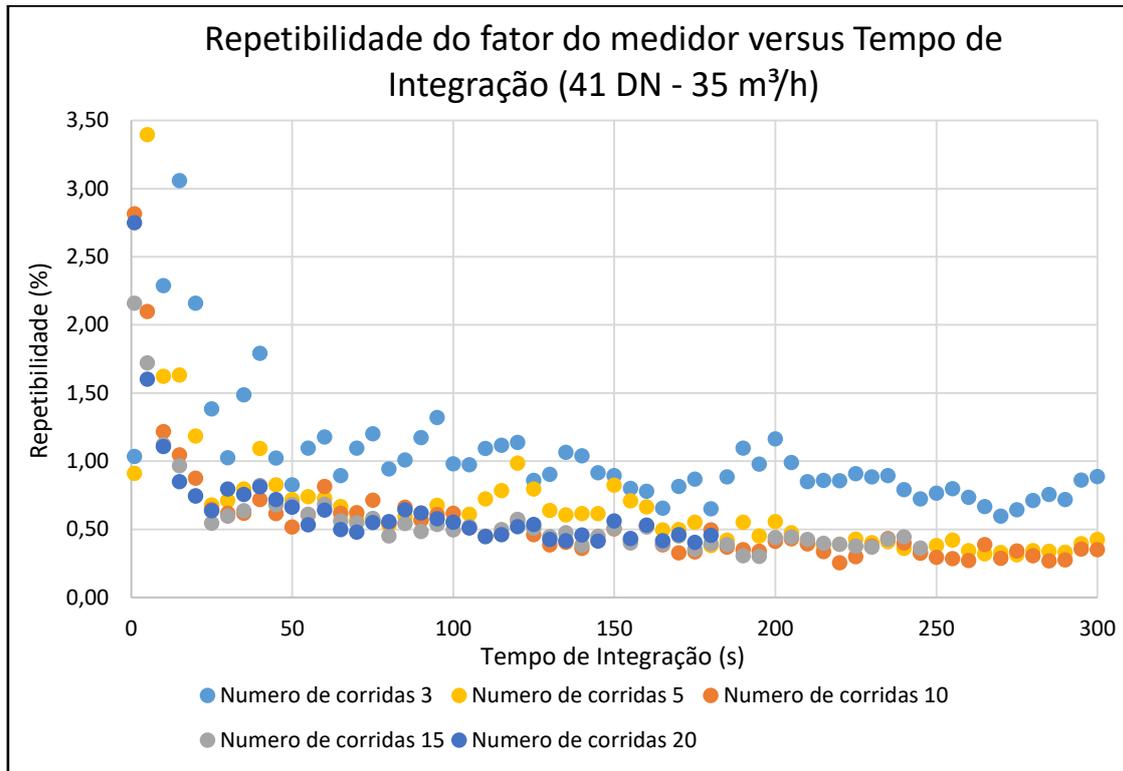


Figura 23: Curva de repetibilidade do fator do medidor (MF) de acordo com o tempo de integração.

Para determinação dos valores ótimos dessas variáveis como: tempo de integração, o número de corridas e o valor de repetibilidade, é necessário que haja certo equilíbrio entre eles. Escolher somente de acordo com elevados tempos de integração não é ideal pois, apesar do valor de repetibilidade estar convergindo para o valor da assíntota, o número de corridas pode ser insuficiente ao ponto de que ainda esteja sofrendo oscilações. O mesmo pode ser dito para um número de corridas elevado que apresenta tempo de integração baixo e resulte em valores altos de repetibilidade. Em virtude disso, o tempo de integração de 180 segundos em conjunto com número de corridas entre 15 e 10 foi considerado razoável pelo que foi constatado nos testes. O mesmo procedimento foi constatado no comportamento da incerteza.

As figuras 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36 e 38 apresentam o local físico de instalação do medidor *clamp-on* na tubulação em que cada um dos testes. Já as figuras 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37 e 39 mostram os gráficos de repetibilidade da vazão para o medidor *Caldon*, o medidor *clamp-on* e o fator do medidor. O objetivo

de mostrar a repetibilidade do fator do medidor (MF) é identificar variações nas medições que tenham sido causadas por efeitos externos, que ao mesmo tempo geram flutuações nas medições tanto no *Caldon* como no *clamp-on*. Se não houvesse essas variações, o valor da repetibilidade do fator do medidor seria igual ao do *clamp-on*.

### 5.1.1. Medidor com 1 diâmetro nominal de trecho reto à montante

A figura 24 evidencia que, no local onde o instrumento está instalado, as medições sofrem impacto direto provocado pelas curvas adjacentes. Assim como também se espera que, à medida que o medidor *clamp-on* se distancie dos acidentes na tubulação, as medições tendam ao valor do medidor de referência e a variação entre as medições reduzam.



Figura 24: Testes com medidor instalado com 1 DN de trecho reto.

O resultado do cálculo de repetibilidade para cada componente separadamente pode ser observado na figura 25. Note que para determinadas vazões o valor de repetibilidade do medidor de referência (*Caldon*) é bem mais alto do que o indicado pelo fabricante que é de 0,2 % para a faixa em operação. Pode-se observar também que a repetibilidade do fator do medidor (MF) está na maioria das vezes entre o do medidor objeto e o do medidor de referência e, outra constatação é de que a do medidor de referência é sempre maior ou bem próximo de 0,2 %.

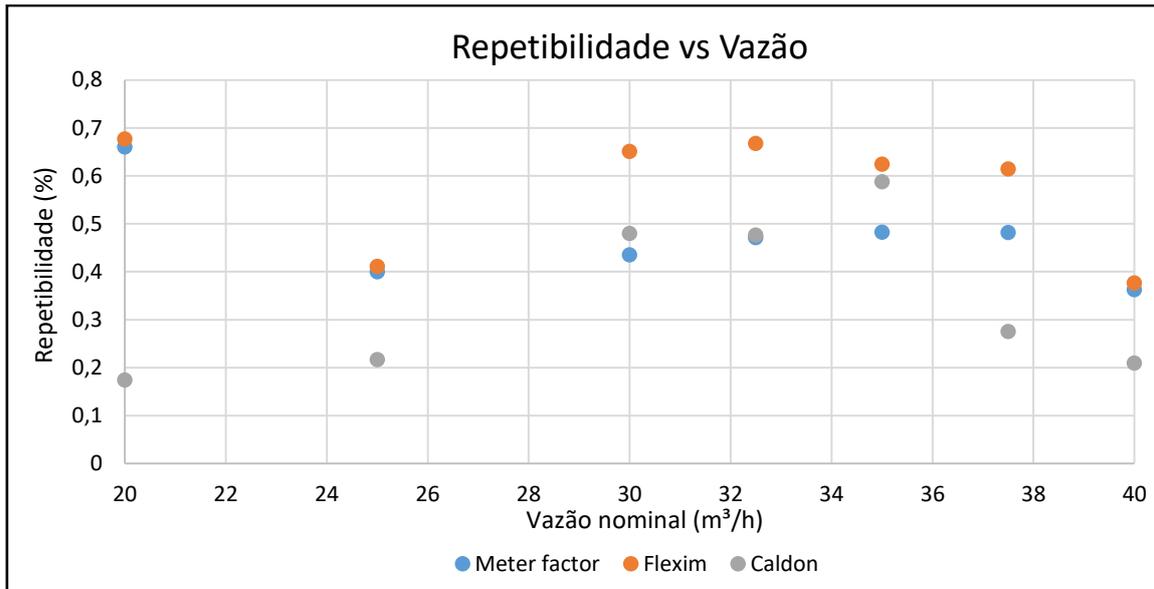


Figura 25: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 1 DN de trecho reto.

### 5.1.2.

#### Medidor com 5 diâmetros nominais de trechos retos à montante



Figura 26: Testes com medidor instalado à montante com 5 DN de trechos retos.

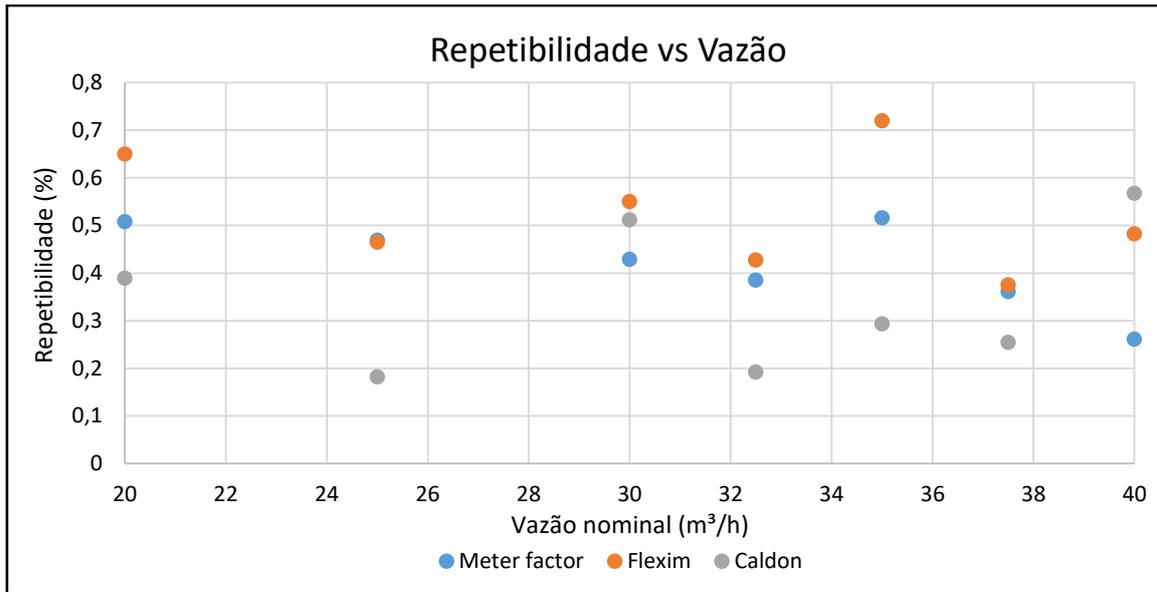


Figura 27: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 5 DN.

### 5.1.3. Medidor com 10 diâmetros nominais de trechos retos à montante



Figura 28: Testes com medidor instalado à montante com 10 DN de trechos retos.

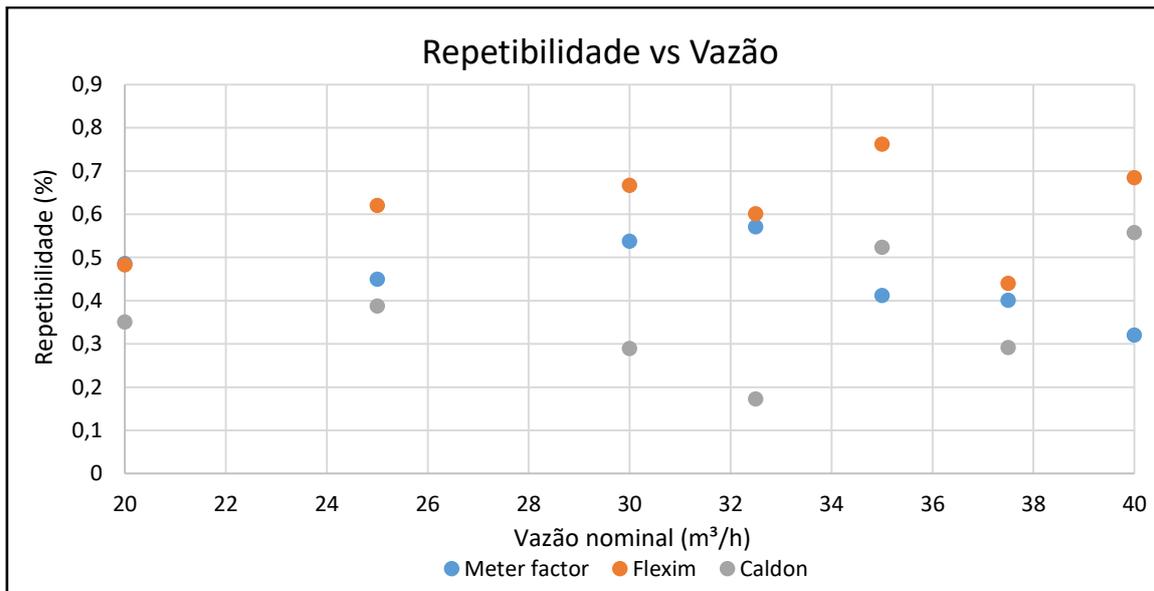


Figura 29: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 10 DN.

#### 5.1.4. Medidor com 16,5 diâmetros nominais de trechos retos à montante

Por limitação física não foi possível instalar o medidor a distância de 15 DN de trecho reto, pois o suporte de suspensão da tubulação ficou próximo impossibilitando a instalação do trilho do medidor *clamp-on*. Sendo assim, a instalação foi feita com 16,5 DN de trecho reto.



Figura 30: Testes com medidor instalado à montante com 16,5 DN de trechos retos.

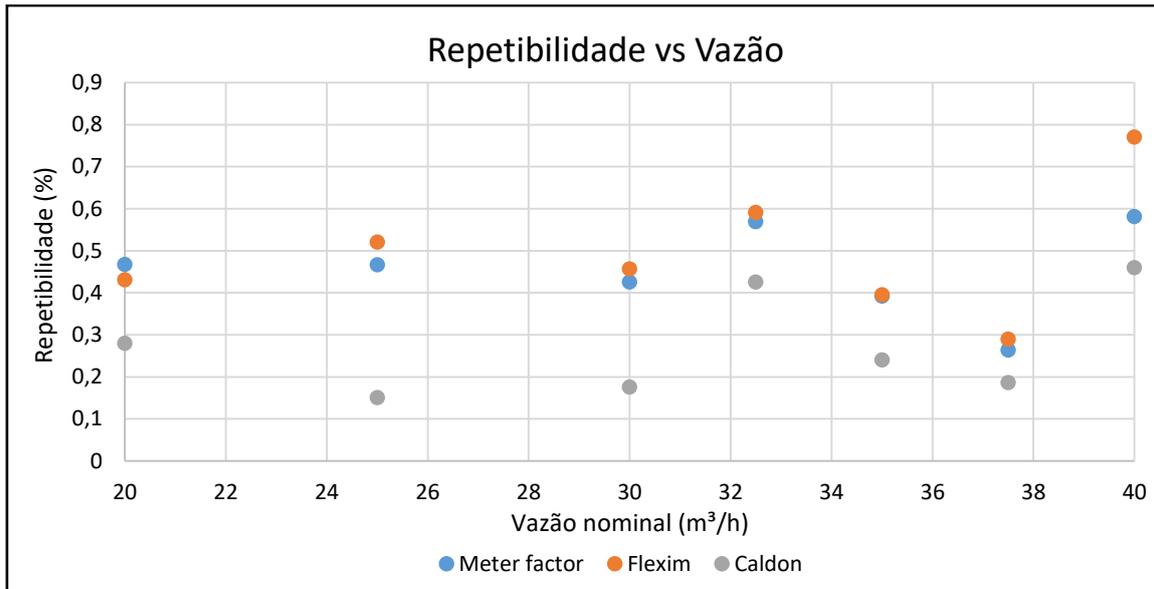


Figura 31: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 16,5 DN.

### 5.1.5.

#### Medidor com 20 diâmetros nominais de trechos retos à montante



Figura 32: Testes com medidor instalado à montante com 20 DN de trechos retos.

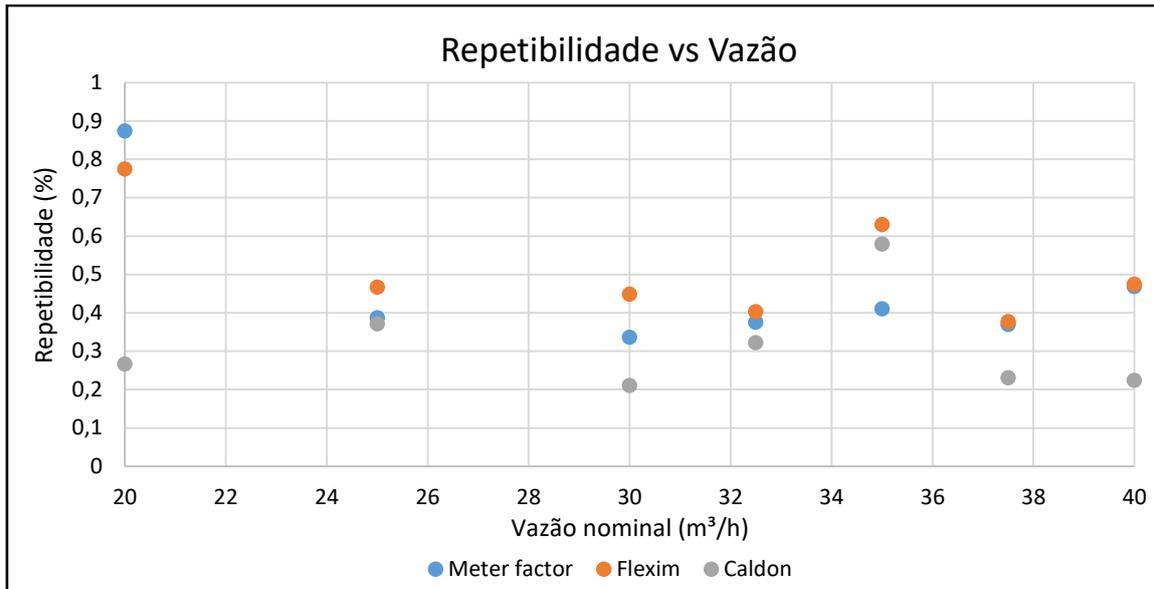


Figura 33: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 20 DN.

#### 5.1.6. Medidor com 29 diâmetros nominais de trechos retos à montante

A localização seguinte deveria ser de 30 DN de trecho reto e em seguida 40 DN, mas nessas distâncias há suportes de sustentação da linha e por isso a localização mais próxima para a instalação foi de 29 DN e 41 DN de trecho reto, respectivamente.



Figura 34: Testes com medidor instalado à montante com 29 DN de trechos retos.

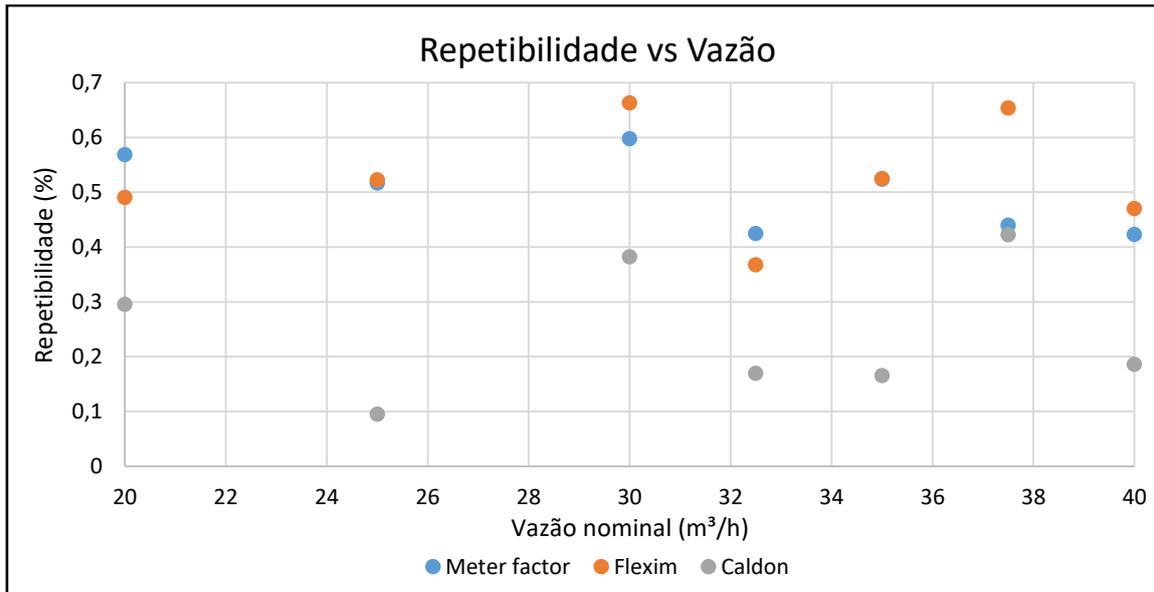


Figura 35: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 29 DN.

### 5.1.7.

#### Medidor com 41 diâmetros nominais de trechos retos à montante



Figura 36: Testes com medidor instalado à montante com 41 DN de trechos retos.

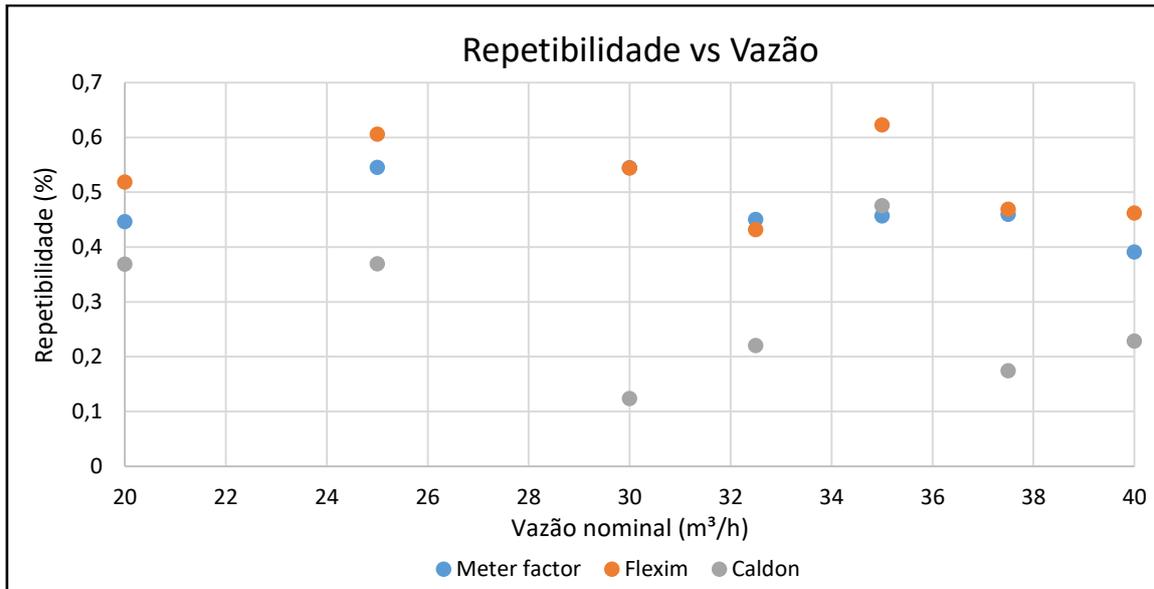


Figura 37: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 41 DN.

### 5.1.8. Medidor com 50 diâmetros nominais de trechos retos à montante

E por último, o teste com o medidor instalado com 50 DN de trecho reto.



Figura 38: Testes com medidor instalado à montante com 50 DN de trechos retos.

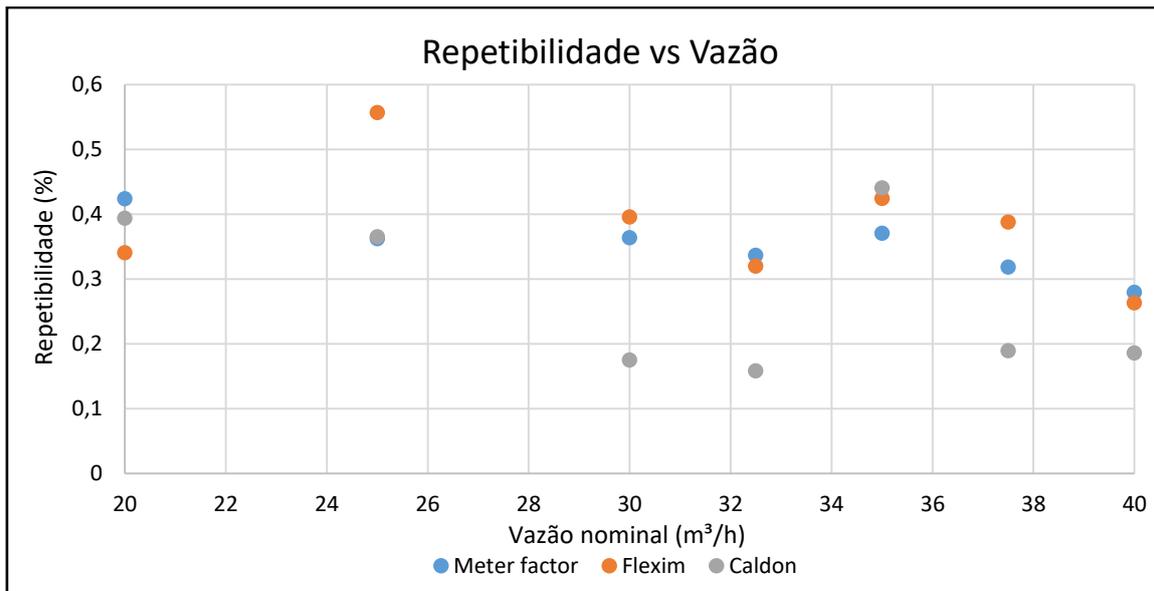


Figura 39: Repetibilidade para cada vazão nominal de teste a 50 DN.

## 5.2. Análise experimental

Observando os gráficos anteriores, das figuras 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37 e 39, constata-se que, de fato, na maioria dos testes o medidor *Caldon* possui alta estabilidade nas medições, próximo ao valor de 0,2 %. Nos casos em que a repetibilidade foi superior a este valor, a suspeita é de que a causa seja por conta da variabilidade da vazão do escoamento. Apesar de o medidor *clamp-on*, em todos os casos, apresentar valor de incerteza superior ao *Caldon*, seu desempenho ainda assim é satisfatório dependendo da aplicação para o qual é destinado. Em todos os casos o valor de repetibilidade se manteve abaixo de 1 %.

A hipótese é de que para os casos em que a repetibilidade do *Caldon* é superior a 0,2 %, a vazão no *loop* não esteja constante, causado por algum tipo de instabilidade. Com isso, as duas formas de cálculo da incerteza demonstram a diferença entre uma análise mais conservadora no qual utiliza-se dados reais de repetibilidade dos testes reproduzidos, e a outra que se trata de uma expectativa, no qual utiliza para o cálculo o valor fixo do certificado do *Caldon* (0,2 %), o que de certa forma é um subdimensionamento do valor de incerteza final. A suspeita é que a ocorrência dessa instabilidade no escoamento seja por conta da bomba. Para comprovação desta hipótese é necessário refazer alguns testes verificando a frequência do eixo da bomba.

### 5.3. Fator do medidor em função da distância de instalação

A figura 40 mostra a evolução do fator do medidor (MF) ao longo das distâncias de localização do medidor. Como esse fator representa a razão entre a vazão do medidor de referência e do *clamp-on*, ele mostra basicamente o erro sistemático entre eles. Pela figura observa-se certa oscilação para curtas distâncias, e para distâncias acima de 20 DN de trecho reto o valor do fator se mantém entre 5 % e 6 %. Esses valores são relativamente altos, mas como trata-se de um erro sistemático, após a calibração esse tipo de erro é eliminado. Além disso, o certificado de calibração entregue pelo fabricante junto ao medidor não inclui as faixas de vazão testadas. O menor valor de vazão presente no certificado foi de 100 m<sup>3</sup>/h utilizando tubulação com cerca de 8 polegadas, assim como está descrito no anexo A. Entretanto, no trabalho presente o maior valor de vazão foi de 40 m<sup>3</sup>/h nominal, menos da metade do que o divulgado pelo fabricante no certificado.

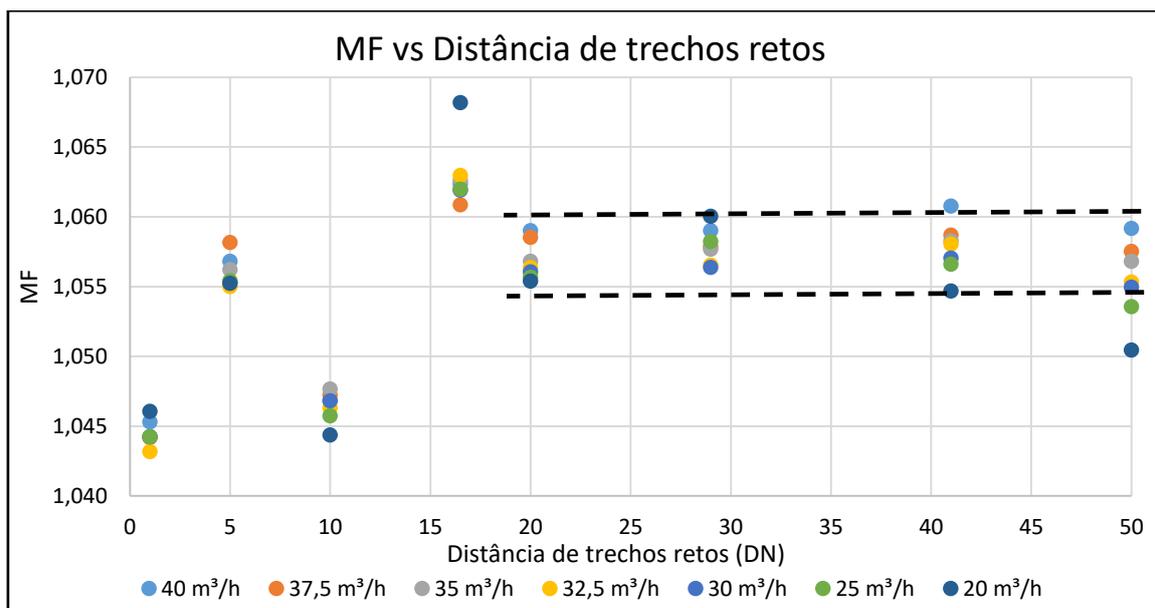


Figura 40: Valor de fator do medidor ao longo do número de trechos retos em relação as curvas.

Baseado nos testes executados em conjunto com os resultados obtidos, instalar o medidor a partir de 20 DN de trecho reto, a curva gera erros de medição com certa estabilidade, embora a magnitude do erro apresentado estar elevada. Tal fato pode estar ligado ao tipo de orientação dos transdutores empregada nos testes. Apesar de ter sido utilizada a orientação recomendada pelo fabricante, o trabalho de (Ferreira, 2015) verificou que a orientação dos transdutores em 45°-315° não é a

melhor opção de configuração dos transdutores para utilização desse tipo de medidor.

#### **5.4. Incertezas**

Para cada teste também foi realizado o cálculo da incerteza de medição e, assim como abordado no capítulo anterior, existem duas componentes que integram a equação. A incerteza foi calculada de duas formas: uma utilizando o valor da incerteza do medidor padrão fornecido pelo fabricante (valor fixo de 0,2 %), e o valor da repetibilidade do fator do medidor (MF) resultante do teste (estimativa da incerteza com escoamento sem flutuação); e a outra utilizando os valores de repetibilidade obtidos nos testes tanto do medidor *clamp-on* como do medidor *Caldon* (estimativa da incerteza com flutuações no escoamento). O objetivo de calcular dessas duas formas é demonstrar influências externas que estejam afetando a medição, e que dependendo da escolha da equação utilizada os valores de incerteza podem estar sendo subdimensionados.

A figura 41 exemplifica o comportamento das curvas para cada uma das formas calculadas, sendo a curva denominada como FATOR (equação 14) referente ao cálculo que utilizou os valores de repetibilidade fixo para o *Caldon* (0,2 %) e o calculado para o fator do medidor (estimativa da incerteza com escoamento sem flutuação). E a curva MEDIDOR (equação 13) refere-se ao resultado da incerteza calculado para cada componente, do *Caldon* e do *clamp-on* (estimativa da incerteza com flutuações no escoamento).

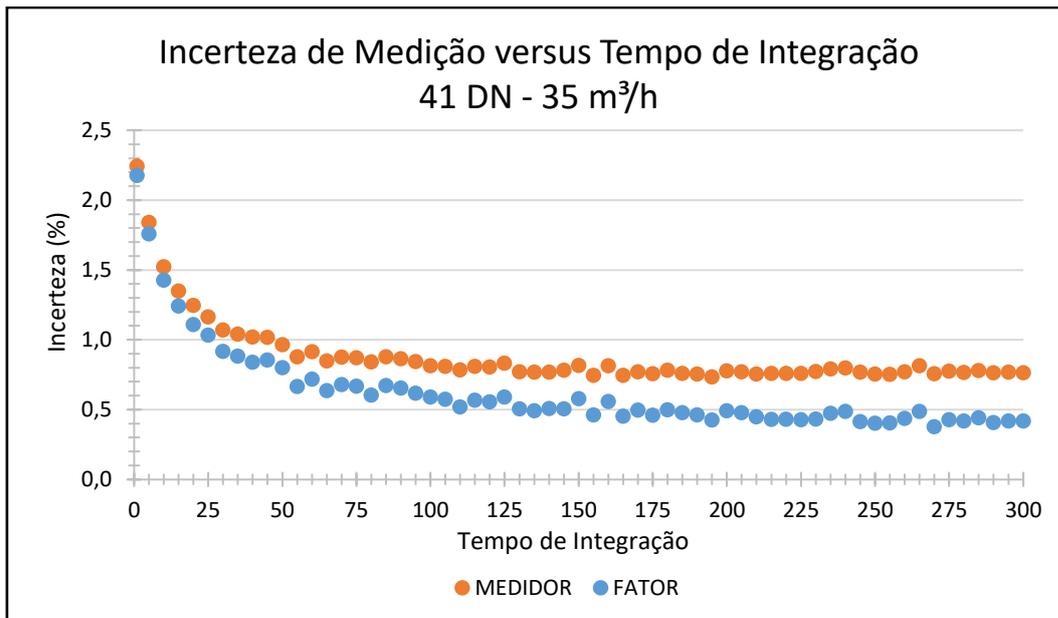


Figura 41: Curva de incerteza combinada ao longo do tempo de integração.

Vale ressaltar que se não houvesse flutuação do escoamento, os valores de incerteza tanto da curva MEDIDOR (equação 13) como da curva FATOR (equação 14) seriam iguais. Ao final da dissertação, no anexo E, estão disponíveis o mesmo tipo de gráfico para cada um dos testes realizados, sendo possível visualizar o impacto na incerteza dos testes que sofreram influência do escoamento.

Além disso, pelas figuras 41 e as que estão no anexo E, que representam o valor de incerteza em função do tempo de integração, é constatado que utilizando um tempo de integração igual ou maior que 100 segundos já é possível, seguramente, obter valores de incerteza abaixo de 1 %, o que é adequado para a calibração de medidores operacionais.

Em seguida, as figuras 42, 43, 44, 45, 46, 47 e 48 ilustram os resultados de incerteza do medidor *clamp-on* de acordo com a variação axial do medidor em teste. Para cada vazão nominal é designado o gráfico de incerteza que mostra o resultado do cálculo da incerteza utilizando as duas fórmulas de cálculo da incerteza citadas anteriormente, equações 13 e 14. A primeira utilizando os termos do medidor de referência e o medidor em teste com os valores obtidos no próprio experimento (estimativa da incerteza com flutuações no escoamento), e a outra forma usando o valor do fator do medidor junto com o valor fixo do medidor padrão de 0,2% (estimativa da incerteza com escoamento sem flutuação). No mesmo gráfico é

exibido também o valor de repetibilidade do medidor de referência, *Caldon*. Isso permite visualizar os testes que sofreram com a instabilidade do escoamento.

#### 5.4.1.

##### Vazão de 40 m<sup>3</sup>/h

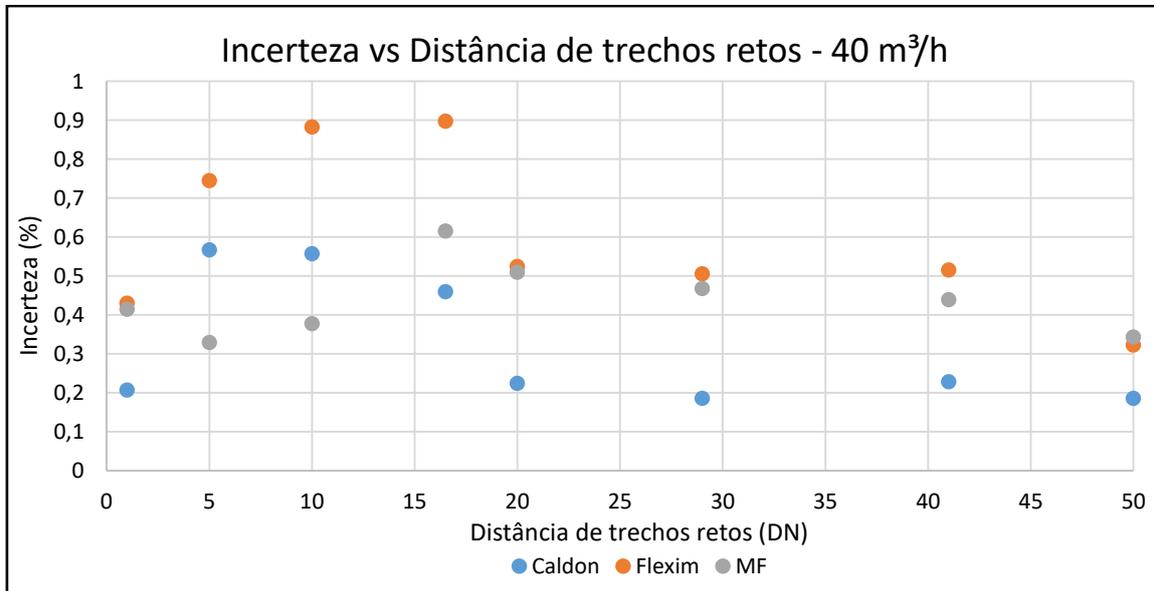


Figura 42: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 40 m<sup>3</sup>/h.

#### 5.4.2.

##### Vazão de 37,5 m<sup>3</sup>/h

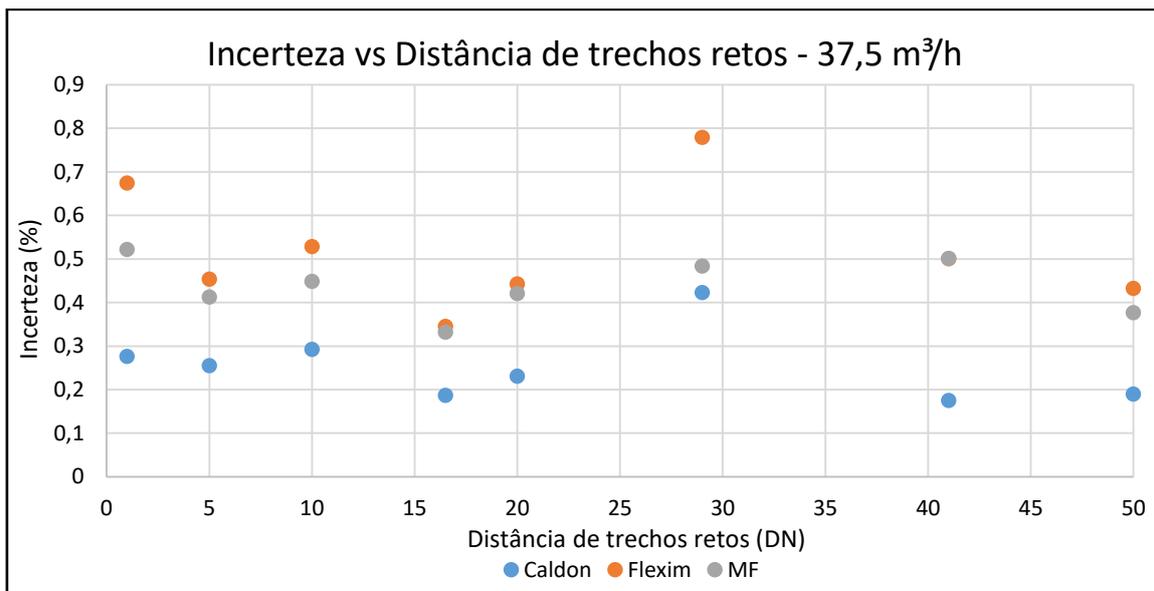


Figura 43: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 37,5 m<sup>3</sup>/h.

### 5.4.3. Vazão de 35 m<sup>3</sup>/h

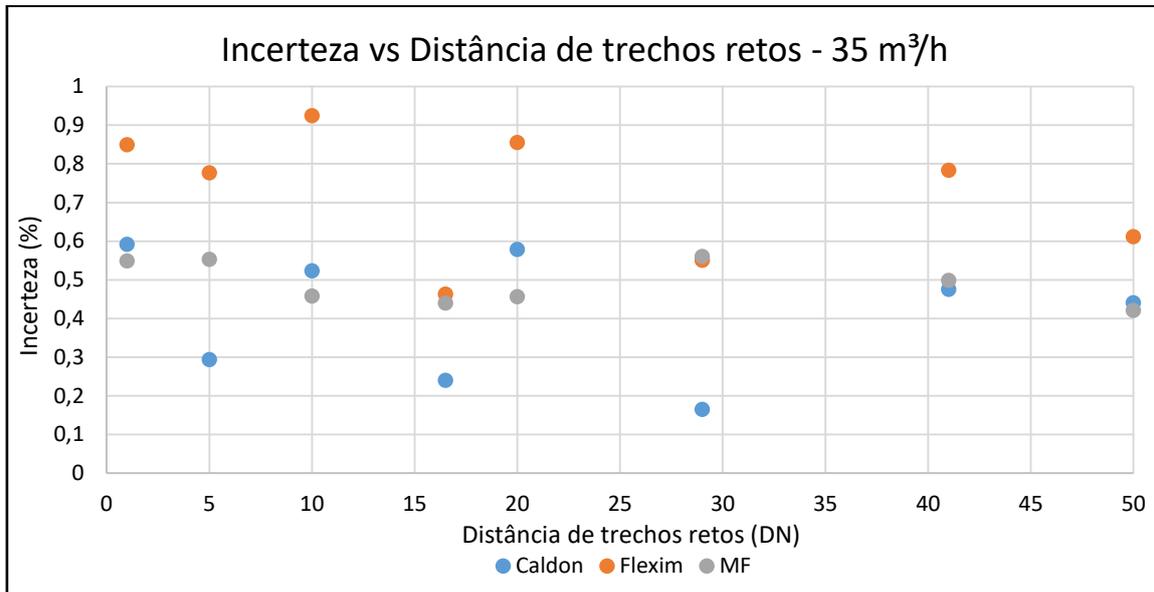


Figura 44: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 35 m<sup>3</sup>/h.

### 5.4.4. Vazão de 32,5 m<sup>3</sup>/h

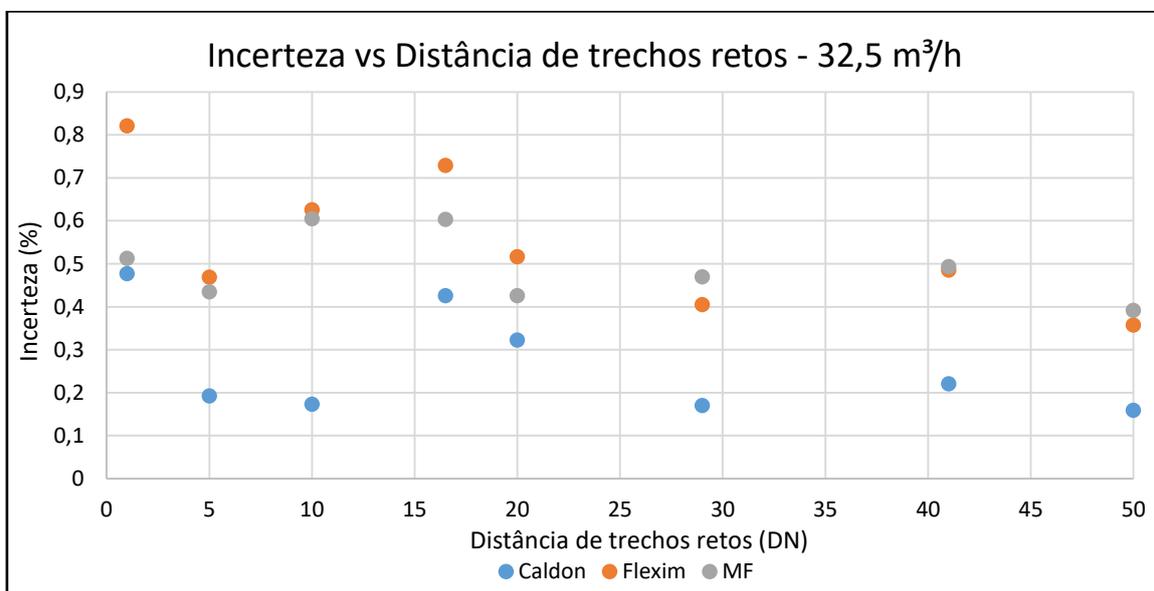


Figura 45: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 32,5 m<sup>3</sup>/h.

#### 5.4.5. Vazão de 30 m<sup>3</sup>/h

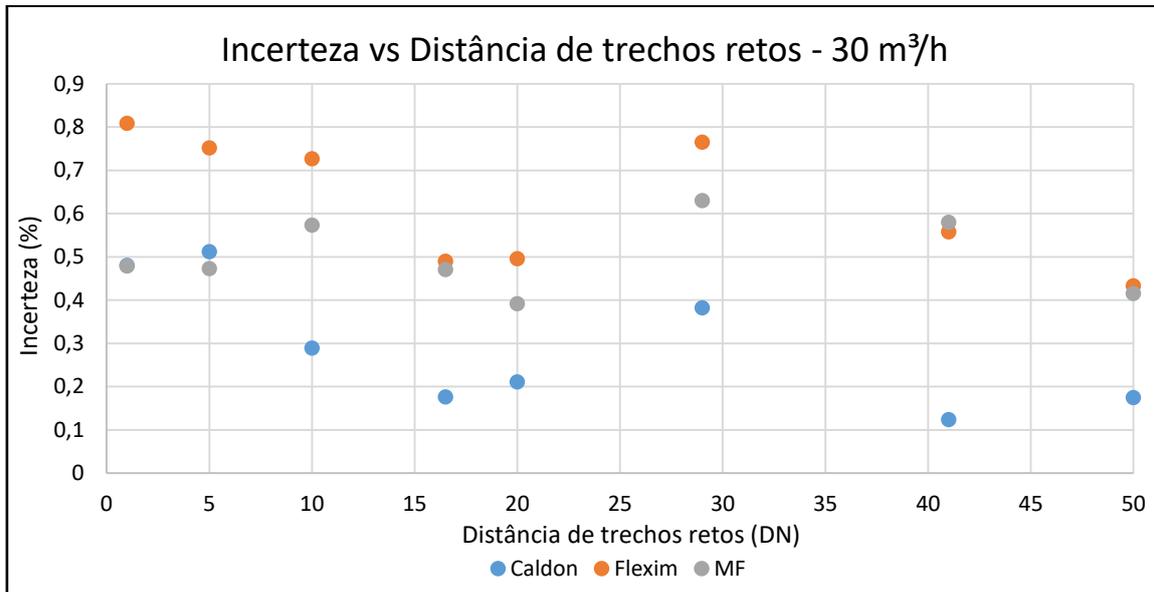


Figura 46: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 30 m<sup>3</sup>/h.

#### 5.4.6. Vazão de 25 m<sup>3</sup>/h

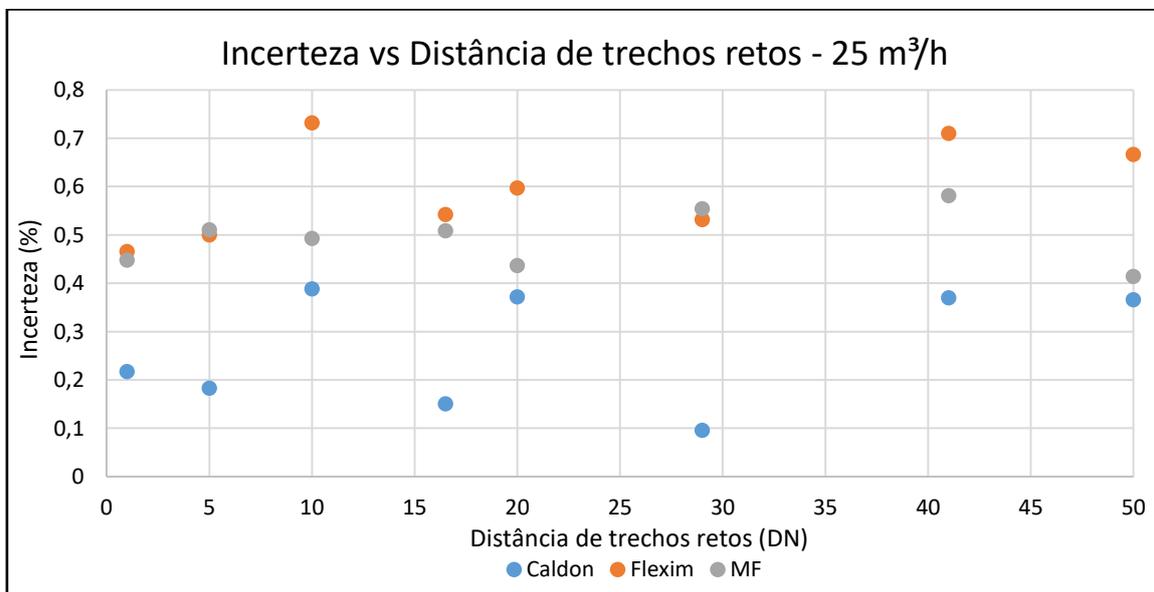


Figura 47: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 25 m<sup>3</sup>/h.

### 5.4.7. Vazão de 20 m<sup>3</sup>/h

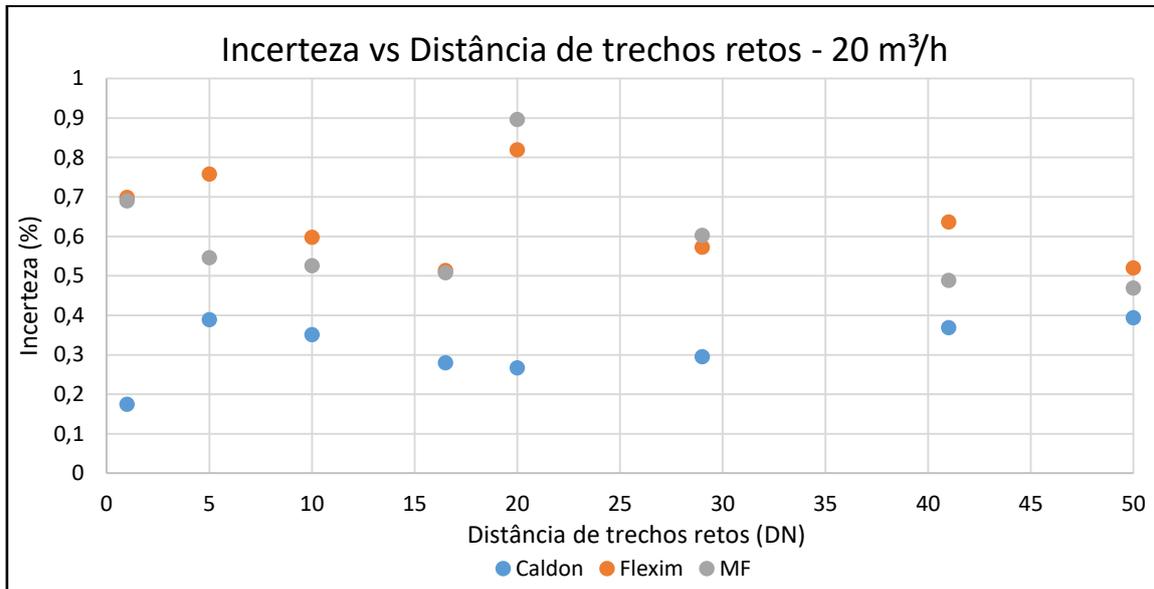


Figura 48: Valor de incerteza em função da posição do medidor ao longo da tubulação para vazão nominal de 20 m<sup>3</sup>/h.

### 5.5. Comparação com o estudo do fabricante

Assim como foi mencionado anteriormente, os testes realizados neste trabalho e os testes executados pela Flexim foram similares, mas não foram idênticos. E, assim como foi divulgado pela Flexim, o resultado obtido neste trabalho também confirma que o comportamento do erro é elevado para curtas distâncias de localização do medidor, apesar da magnitude deste erro ser um pouco maior do que do fabricante. Essa diferença de amplitude do erro pode ter sido causada pelo maior número de curvas na tubulação do circuito de testes desta dissertação, afinal como são testes fisicamente diferentes os resultados têm algumas distinções. Além disso, para a faixa de velocidade testada nesta dissertação, o certificado do fabricante indica um valor de incerteza elevada, de forma que, para atingir o menor valor de incerteza do medidor, equivalente a pouco menos de 1,5 %, como mostra o anexo A, a velocidade do escoamento deveria estar acima de 5 m/s.

## 6 Conclusões e orientações futuras

Em suma, o objetivo desta dissertação de mestrado foi estudar os impactos na medição de vazão utilizando um medidor do tipo *clamp-on* com dois canais em local inapropriado, e com base nesses valores analisar possível empregabilidade do mesmo como um padrão itinerante para calibração de outros medidores que se encontrem nessas mesmas condições.

### 6.1. Conclusões

A revisão bibliográfica proporcionou a comparação entre os testes executados neste trabalho com os resultados divulgados pelo fabricante. Muito embora os testes abordados nos dois trabalhos sejam ligeiramente diferentes, foi possível verificar o funcionamento e desempenho do medidor para situações similares.

Considerando os resultados dos testes é razoável afirmar que, para instalações do medidor *clamp-on* acima de 20 DN de trecho reto o desempenho metrológico do medidor é mantido e pode ser empregado para determinados fins, como a calibração de medidores operacionais.

O resultado obtido quanto ao erro sistemático nos testes teve um resultado fora do esperado em termos de magnitude, entretanto, além do certificado do fabricante não abordar a faixa de vazão utilizada no teste, a orientação dos transdutores empregada e recomendada pelo fabricante pode não ser a melhor. Esses fatores podem ser determinísticos para os valores de erro obtidos nos testes, mas que de qualquer forma após a devida calibração do medidor este tipo de erro deve ser minimizado.

No caso da incerteza de medição, considerada a instabilidade das medições, os valores se mostraram abaixo de 0,9 % para os piores casos. Isto se verificou mesmo para valores de velocidade abaixo de 1,5 m/s, o que de acordo com o certificado de calibração fornecido pela Flexim resultaria em incerteza superior à 2 %. Dessa maneira, dependendo da aplicação, o medidor pode ser considerado uma

alternativa para calibração de outros medidores já dispostos em linha. Embora as incertezas de medição encontradas apresentem valores superiores ao limite permitido pelo Regulamento Técnico de Medição (0,3 %) para transferência de custódia e medições fiscais, o medidor *clamp-on* pode ser considerado como uma alternativa para medições operacionais.

No presente trabalho também foi investigada a influência da flutuação do escoamento sobre a incerteza de medição. Foi concluído que o uso do fator do medidor (MF) pode minimizar estes efeitos, estimando mais realisticamente a incerteza de medição como se a vazão do escoamento não apresentasse oscilações, o que normalmente ocorre na calibração do medidor de referência.

## **6.2. Recomendações para trabalhos futuros**

É indicado que para qualquer novo teste executado ocorra a verificação da frequência da bomba para o controle da estabilidade do escoamento, de modo a validar o teste quanto à sua repetibilidade.

Uma das sugestões de trabalho para comparar com os resultados obtidos seria utilizar a orientação dos transdutores em 45° e 135°, que segundo o estudo de (Ferreira, 2015) foi a melhor orientação obtida.

Estudar também o aumento do desempenho metrológico dos medidores ultrassônicos de acordo com o número de canais, como forma de comprovar que um medidor com 8 canais é metrologicamente superior a um medidor com apenas 1 canal.

Outro ponto que seria interessante testar é a utilização de um tanque de calibração para comparação do volume de líquido por teste gravimétrico. Além disso, é sugerido que se empregue outro tipo de fluido nos testes.

Além dessas orientações, outra sugestão seria testar com vazões mais altas com o objetivo de o escoamento atingir maiores velocidades, acima de 5 m/s para validar os valores de incerteza fornecido no certificado do fabricante do medidor *clamp-on*.

## Referências bibliográficas

1. FERREIRA, G. A. A. **Caracterização metrológica de um medidor clamp-on para calibração “in situ” de medidor de vazão em escoamento em desenvolvimento**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.
2. FLOW CONTROL. **Flow Control magazine**. Disponível em: <<http://www.flowcontrolnetwork.com/global-flowmeter-market-to-reach-5-1-bil-by-2017/>>. Acesso em: 05 maio 2017.
3. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria Conjunta ANP/Inmetro N° 001, de 10 de junho de 2013**.
4. NATIONAL MEASUREMENT SYSTEM. **Good practice guide - an introduction to non-invasive ultrasonic flow metering**. Disponível em: <[http://www.tuvnel.com/\\_x90lbn/An\\_Introduction\\_to\\_Non-Invasive\\_Ultrasonic\\_Flow\\_Metering.pdf](http://www.tuvnel.com/_x90lbn/An_Introduction_to_Non-Invasive_Ultrasonic_Flow_Metering.pdf)>. Acesso em: 14 maio 2017.
5. WEBER JR., F. J. **Ultrasonic beam propagation in turbulent flow**. Dissertation Worcester Polytechnic Institute. Worcester, p. 180. 2003.
6. TÉCNICAS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **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.
7. FUNCK, B.; LIPTROT, P. **A Review of a Four-Channel Clamp-On Ultrasonic Flowmeter**. CEESI Workshop. Lisboa: 2014. p. 15.
8. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia**. 2012. ed. Duque de Caxias, RJ: 2012.

9. ISO GUM. **Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição.** INMETRO/CICMA/SEPIN. 2008.
10. AMERICAN GAS ASSOCIATION. **AGA Report. 9: Measurement of.** 2007.
11. INSTITUTE, AMERICAN PETROLEUM. **API MPMS 5.8: Measurement of Liquid Hydrocarbons by Ultrasonic Flow Meters.** 2014.
12. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5168: Measurement of fluid flow -- Procedures for the evaluation of uncertainties.** 2005.
13. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TR 12765: Measurement of fluid flow in closed conduits – Methods using transit-time ultrasonic flowmeters.** 1998.
14. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12242: Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic transit-time meters for liquid.** 2012.
15. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas - Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement.** 2010.
16. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17089-2: Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas - Part 2: Meters for industrial applications.** 2012.
17. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Use of clamp-on (externally mounted) ultrasonic flow-metering techniques for fluid applications. Guide.** 2010.
18. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portal ANP.** Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/>>. Acesso em: 03 maio 2017.
19. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API MPMS 4.2: Displacement Provers.** 2011.

20. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API MPMS 4.5: Master-Meter Provers**. 2011.
21. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria Inmetro/Dimel nº 0049**. 01 de fevereiro de 2011.
22. 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.
23. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API MPMS 20.1: Allocation Measurement**. 2011.
24. WEST, C.; COUNCIL, C. Committee report: transit-time ultrasonic flowmeters. **Journal AWWA**, Denver, v. 89, n. 7, p. 104-110, 2012.
25. FUNCK, B.; BALDWIN, P. **Challenges for ultrasonic flow meters in wet gas applications**. FLEXIM. Berlim, p. 21. 2012.
26. PANICKE, M. **Diagnosis and evaluation of ultrasonic clamp-on measurements**. FLEXIM. Berlim, p. 16. 2009.
27. MARTINS, R. S.; RAMOS, R. **Numerical evaluation of upstream bend installation effects on fully developed flow profiles aiming ultrasonic flow metering**. 21st International Congress of Mechanical Engineering. Natal: 2011. p. 9.
28. PETRUT, T. et al. **Flow rate computation of highly turbulent pipe flows using wide-band signals and matched filter-based approach in ultrasonic multi-element configuration**. Grenoble Institute of Technology. Saint Martin d'Hères, p. 12. n.a.
29. RUPPEL, C.; PETERS, F. Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter. **Flow Measurement and Instrumentation**, Essen, v. 15, p. 167-177, 2004.
30. SANDERSON, M. L.; YEUNG, H. Guidelines for the use of ultrasonic non-invasive metering techniques. **Flow Measurement and Instrumentation**, Cranfield, v. 13, p. 125-142, July 2002.
31. STRUNZ, T. et al. Influence of turbulence on ultrasonic flow measurements. **VDI Berichte**, Reinach, p. 6, 2003.

32. HOFMANN, F. **Fundamentals of Ultrasonic-flow measurement for industrial applications**. 7.02371.21.00. ed. Duisburg: v. 04, 2001.
33. MATTINGLY JR., G.; YEH, T. T. **NIST's ultrasonic technology assessment program to improve flow measurement**. National Institute of Standards and Technology. Palo Alto, p. 56. 2008.
34. NIKURADSE, J. **Laws of turbulent flow in smooth pipes**. National Aeronautics and Space. Washington. 1966.
35. BRITISH STANDARDS INSTITUTION BS 8452. **Use of clamp-on (externally mounted) ultrasonic flow-metering techniques for fluid applications**. 2010.

# Anexo A: Certificado medidor *clamp-on* Flexim



## Kalibrierschein Calibration Certificate

Testgerät / Device under test (DUT)

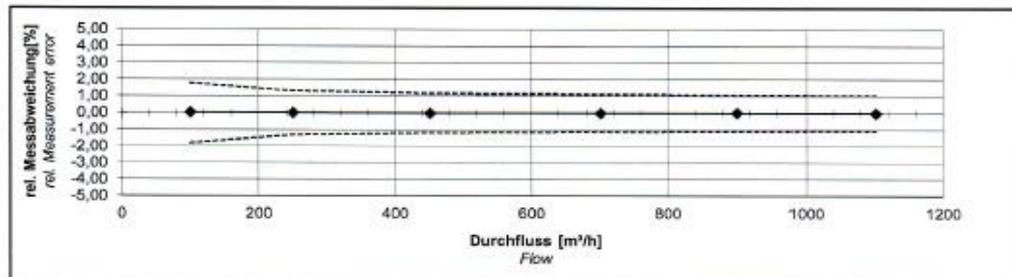
Kalibrierschein Nr.: 20160801-060  
Certificate No.

Schallwandler: CDM2NW1 Ser. Nr.: 68652  
Transducer Ser. No.

Messumformer: Flexim G721 Ser. Nr.: Master23  
Transmitter Ser. No.  
Rohr Di [mm]: 200,96 Flüssigkeit: Wasser Temperatur: 25,0 °C  
Pipe [inch]: 7,91 Fluid Water Temperature 77,0 °F  
Bereich [m³/h]: 1100 Fehlergrenze: 1,0 % ± 0,7 cm/s  
Range Error limit

### Messergebnisse / Test results

Messpunkt Meas. Point	Messzeit Meas. time	Normal	Prüfung	Messwertabweichung		Grenze	Normal	ok
		Standard	DUT	measurement error		Limit	Standard	
		Durchfluss Flowrate Qn m³/h	Durchfluss Flowrate Qp m³/h	Durchfluss Flowrate (Qp-Qn) m³/h	Durchfluss Flowrate (Qp-Qn) / Qn %	Durchfluss Flowrate Q m³/h	Strömung Velocity v m/s	ok
1	13	0,00	0,15	0,15	-	0,80	0,00	p
2	13	100,12	100,15	0,03	0,03	1,80	0,88	p
3	13	250,35	250,39	0,04	0,02	3,30	2,19	p
4	13	450,55	450,53	-0,03	-0,01	5,30	3,95	p
5	13	700,78	700,70	-0,07	-0,01	7,81	6,14	p
6	13	901,10	901,13	0,02	0,00	8,61	7,89	p
7	13	1101,45	1101,42	-0,04	0,00	11,81	9,65	p



Das angegebene Messgerät erfüllt die in unserer Spezifikation angegebenen Genauigkeitsdaten (passed / failed). p

The indicated instrument meets the accuracy data published in the specification (passed / failed).

Die Kalibrierung des oben angegebenen Messgerätes wurde gegen Normale ausgeführt, die sich auf nationale Normale rückführen lassen. Die Kalibrierung erfolgte nach Vorgaben, die im Rahmen unseres zertifizierten QM-Systems nach DIN EN ISO 9001 überwacht werden.

The instrument specified above was calibrated against measurement standards which are traceable to national measurement standards. The calibration was carried out according to the guidelines monitored by our certified QM system in compliance with DIN EN ISO 9001.

Normal Flexim Ser. Nr. 10343  
Standard VXX1NHO Ser. No.  
Kalibriert bis: 31.08.2016 Zertifikat Nr. VXX1NHO10343\_20160209  
Calibration due Certificate No.

Datum: 01.08.2016 Prüfer: Langue  
Date Test eng.

Unterschrift:  
Signature

Dieses Protokoll enthält 1 Seite und darf nur vollständig vervielfältigt werden. This certificate contains 1 page and should be copied only in its entirety.

FLEXIM GmbH Wolfener Str. 36 D-12681 Berlin



## Kalibrierschein Calibration Certificate

### Testgerät / Device under test (DUT)

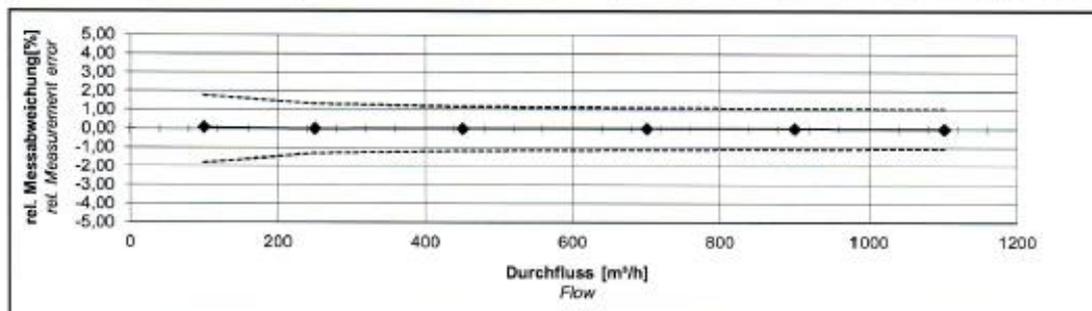
Kalibrierschein Nr.: 20160801-061  
Certificate No.

Schallwandler: CDM2NW1 Ser. Nr.: 68653  
Transducer Ser. No.

Messumformer: Flexim G721 Ser. Nr.: Master23  
Transmitter Ser. No.  
Rohr Di [mm]: 200,96 Flüssigkeit: Wasser Temperatur: 25,0 °C  
Pipe [inch]: 7,91 Fluid Water Temperature: 77,0 °F  
Bereich [m³/h]: 1100 Fehlergrenze: 1,0 % ± 0,7 cm/s  
Range Error limit

### Messergebnisse / Test results

Messpunkt Meas. Point	Messzeit Meas. time s	Normal	Prüfung	Messwertabweichung		Grenze	Normal	ok
		Standard	DUT	measurement error		Limit	Standard	
		Durchfluss Flowrate Qn m³/h	Durchfluss Flowrate Qp m³/h	Durchfluss Flowrate (Qp-Qn) m³/h	Durchfluss Flowrate (Qp-Qn) / Qn %	Durchfluss Flowrate Q m³/h	Strömung Velocity v m/s	
1	13	0,00	0,08	0,08	-	0,80	0,00	p
2	13	100,14	100,23	0,08	0,08	1,80	0,88	p
3	13	250,41	250,44	0,03	0,01	3,30	2,19	p
4	13	450,59	450,70	0,11	0,02	5,31	3,95	p
5	13	701,09	701,26	0,16	0,02	7,81	6,14	p
6	13	901,44	901,58	0,14	0,02	9,81	7,90	p
7	13	1101,53	1101,51	-0,02	0,00	11,81	9,65	p



Das angegebene Messgerät erfüllt die in unserer Spezifikation angegebenen Genauigkeitsdaten (passed / failed).

p

The indicated instrument meets the accuracy data published in the specification (passed / failed).

Die Kalibrierung des oben angegebenen Messgerätes wurde gegen Normale ausgeführt, die sich auf nationale Normale rückführen lassen. Die Kalibrierung erfolgte nach Vorgaben, die im Rahmen unseres zertifizierten QM-Systems nach DIN EN ISO 9001 überwacht werden.

The instrument specified above was calibrated against measurement standards which are traceable to national measurement standards. The calibration was carried out according to the guidelines monitored by our certified QM system in compliance with DIN EN ISO 9001.

Normal	Flexim	Ser. Nr.	10343
Standard	VXX1NHO	Ser. No.	
Kalibriert bis:	31.08.2016	Zertifikat Nr.	VXX1NHO10343_20160209
Calibration due		Certificate No.	

Datum: 01.08.2016  
Date

Prüfer: Langue  
Test eng.

Unterschrift:  
Signature

*Langue*

Dieses Protokoll enthält 1 Seite und darf nur vollständig vervielfältigt werden. This certificate contains 1 page and should be copied only in its entirety.

FLEXIM GmbH Wolfener Str. 36 D-12681 Berlin

## Annex / Anhang

### Total Measurement Uncertainty of the Transmitter and the Transducers

Due to the separate calibration of the transmitter and the transducers, they can be used and, if necessary, replaced in any combination. The total measurement uncertainty  $U$  is determined from the uncertainties  $U_t$  of the transmitter and  $U_A$  of the transducers as follows:

$$U = \sqrt{U_t^2 + U_A^2} \quad (1)$$

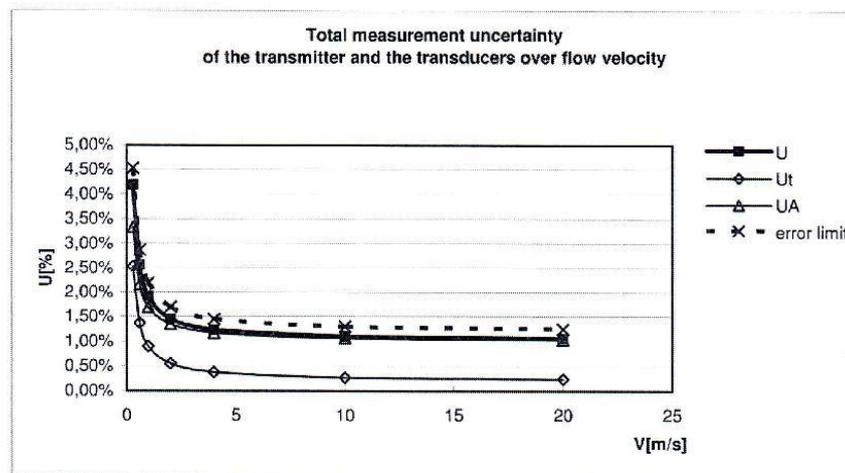
The measurement uncertainties  $U_t$  of the transmitter and  $U_A$  of the transducers are smaller than the error limits documented in the individual calibration protocols of the transmitter and the transducers, respectively. The total measurement uncertainty that results from (1) is shown below in graphic form

### Gesamt-Messunsicherheit des Messumformers und der Sensoren

Durch die getrennte Kalibrierung von Messumformer und Sensoren sind diese beliebig miteinander kombinierbar und bei Bedarf austauschbar. Die Gesamt-Messunsicherheit  $U$  wird folgendermaßen aus den Unsicherheiten  $U_t$  des Messumformers und  $U_A$  der Sensoren ermittelt:

Die Messunsicherheiten  $U_t$  des Messumformers und  $U_A$  der Sensoren sind kleiner als die Grenzen der Messunsicherheiten, die in den jeweiligen Kalibrierprotokollen des Messumformers bzw. der Sensoren dokumentiert sind. Die Gesamt-Messunsicherheit, die sich aus der Gleichung (1) ergibt, ist in der nachfolgenden Abbildung grafisch dargestellt.

Error limit: 1,2% ± 1 cm/s



The measurement system consisting of transducers and transmitter fulfils the specified measurement uncertainty.

Das aus den Sensoren und dem Messumformer bestehende Messsystem erfüllt die spezifierte Messunsicherheit.

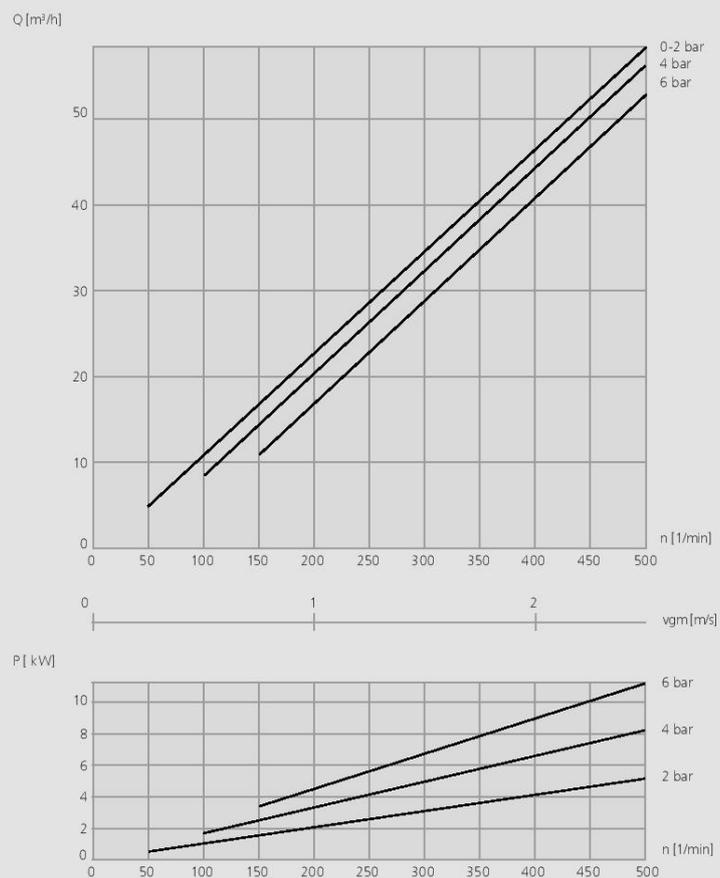
## Anexo B: Manual bomba NETZSCH modelo NM063BY01L07V

# NETZSCH

### NM063--01L

Curva Característica / Performance Curve

Material do Estator / elastomer quality: standard



Torque de Partida / starting torque  
 $T(L) = 155 \text{ Nm}$

Pressão/pressure	T
2 bar	98 Nm
4 bar	155 Nm
6 bar	216 Nm

## Anexo C: Certificado medidor *Caldon* modelo 280C



CALDON ULTRASONICS TECHNOLOGY CENTER  
FLOW CALIBRATION FACILITY



### CALIBRATION REPORT

**Report No:** CR-339

**Revision:** 01

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

<b>Calibrated By:</b>	S. Heirs	Laboratory Operator	
-----------------------	----------	---------------------	--

<b>Prepared By:</b>	S. Heirs	Laboratory Operator	
---------------------	----------	---------------------	--

<b>Approved By:</b>	Bobbie Griffith	Laboratory Operator's Manager	
---------------------	-----------------	-------------------------------	---

<b>Customer:</b>	Faculdades Catolicas		
------------------	----------------------	--	--

**Job No:** 1692664

**Model No:** LEFM 280C1

**Serial No:** 100714001

**Tag No:**

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

**Report Date:** 8/12/2010

Cameron  
Measurement Systems  
1000 McClaren Woods Drive  
Coraopolis, PA 15108  
Tel: 724-273-8300  
Fax: 724-273-8301



NVLAP LAB CODE 200813-0

### 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 D60, 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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

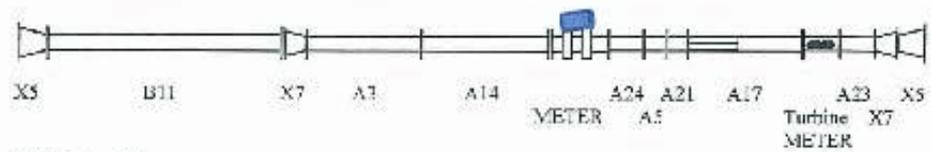
The small volume prover is used to calibrate from 10 to 750 m<sup>3</sup>/hr. The small volume prover has a nominal volume of 0.12 cubic meters.

### 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 m<sup>3</sup>/hr. When used with the ball prover the flow rate can range from 60 to 2200 m<sup>3</sup>/hr.

## 2.0 Installation

The 4 inch meter will be installed in line 1.



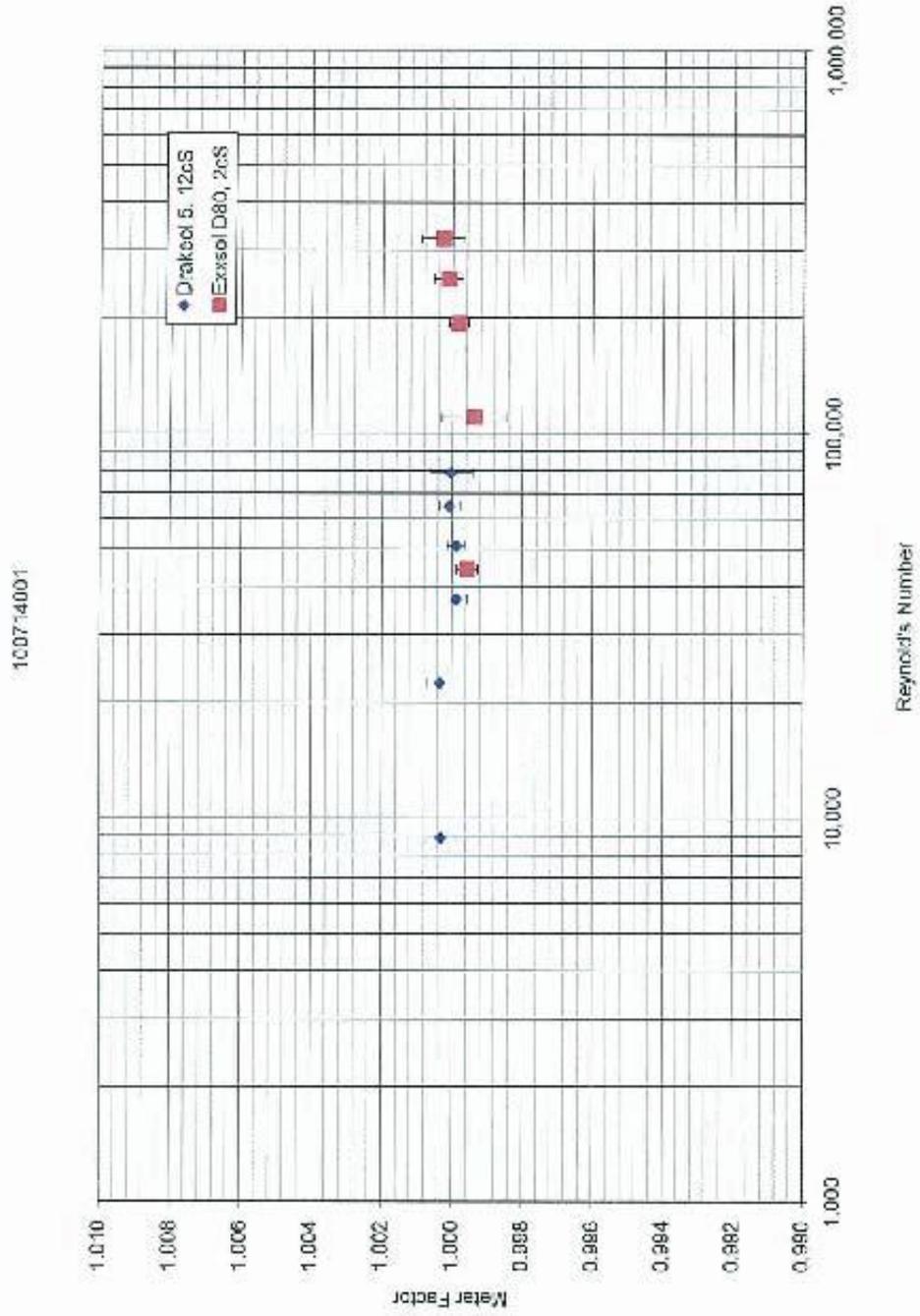
Piping Descriptors

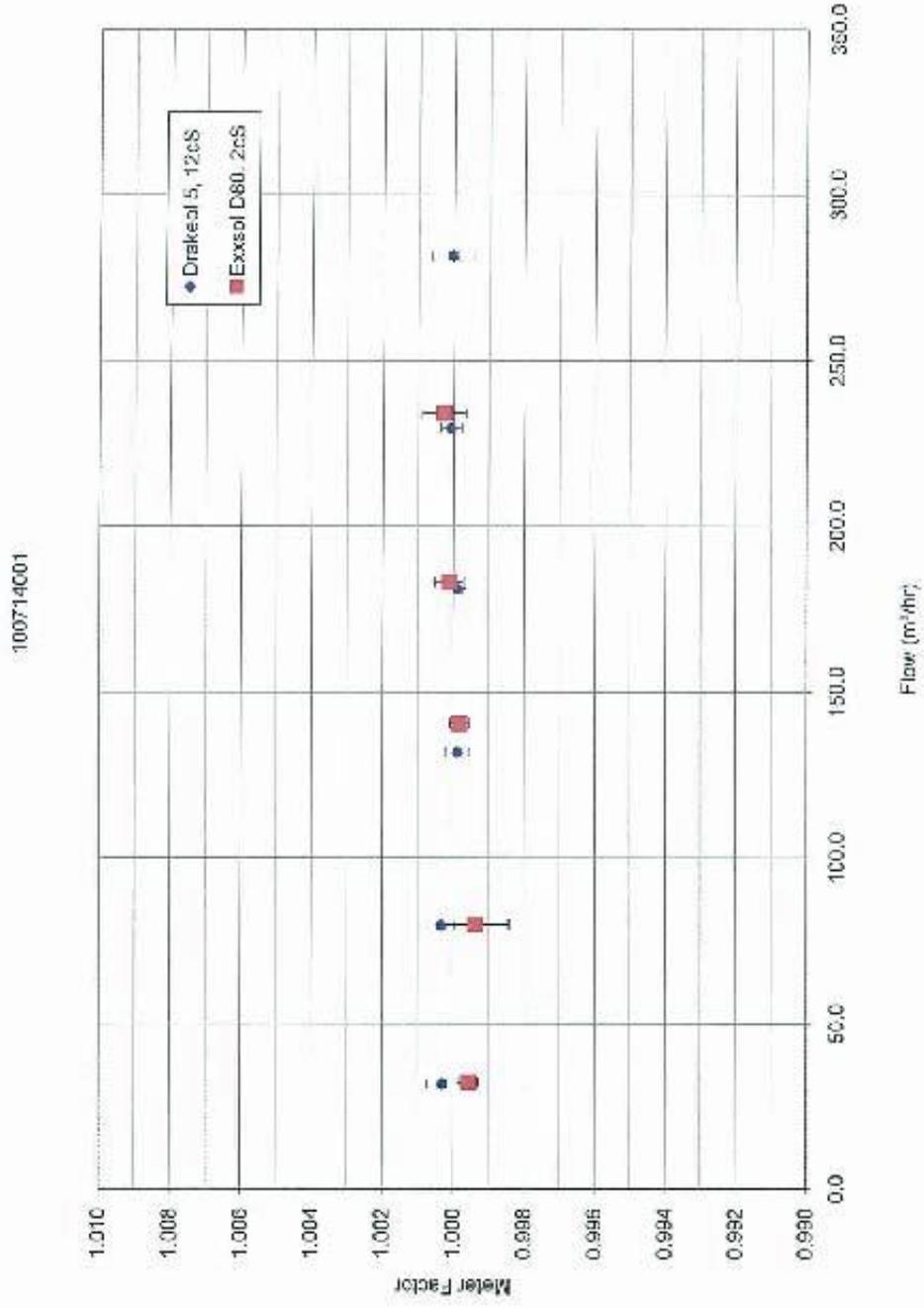
ID Number	Size	Length	Schedule	TD	Inlet	Outlet
X5	8 x 6	11 1/4				
B11	8"	120	40	6.065	150	160
X7	6 x 4	9 1/4			150	150
A3	4"	40	40	4.026	150	150
A14	4"	42 1/2	40	4.026	150	150
Motor	4"	18	40	4.028	150	150
A24	4"	18	40	4.028	150	150
A5	4"	12	40	4.028	150	150
A21	4"	8	40	4.028	150	150
Tube Bundle	4"	1/4	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	6 x 4	9 1/4			150	150
X5	8 x 6	11 1/4			150	160



Social Number: 100714001 (LEF0230C) ID: 41225 \* (12DD) p.066m01 Test Fluid: Exxon (Cat. Inhered B) Average MF: 1.0000 1.0000 MF Spread: 0.0000 0.0000 Uncertainty Band: 0.0000 0.0000

Date	Time	Mode	Site	Temperature (°C)		Pressure (bar)		Flow Volume		Indicated Volume		MF	Average MF	MF Spread	Uncertainty Band
				MUT	Prover / MAT	MUT	Prover / MAT	m³	Viso (ccB)	m³	m³				
81022310	5:16:40	TMV	38715	20.02	2.40	12.9	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:16:41	TMV	38716	19.95	2.40	12.95	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:20:40	TMV	38717	20.05	2.30	12.70	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:44:40	TMV	38728	20.05	2.30	12.70	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:47:40	TMV	38729	20.09	2.39	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:49:40	TMV	38730	20.05	2.39	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:04:40	M23	38751	20.08	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:05:40	M24	38752	20.04	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:12:40	M23	38753	20.05	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:14:40	M24	38754	20.05	2.42	12.9	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:21:40	M23	38755	20.11	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:25:40	M24	38756	20.08	2.41	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:26:40	M23	38757	20.07	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:29:40	M23	38758	20.06	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:33:40	M23	38759	20.2	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:34:40	M24	38760	20.5	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:39:40	M23	38761	20.05	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:42:40	M24	38762	20.00	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:52:40	M23	38763	20.01	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:53:40	M24	38764	20.04	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:55:40	M23	38765	19.97	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	5:56:40	M24	38766	19.99	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:00:40	M23	38801	20.04	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:02:40	M24	38802	20.04	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:12:40	M23	38803	20.02	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:13:40	M24	38804	19.90	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:18:40	M23	38805	19.99	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:19:40	M24	38806	20.01	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:25:40	M23	38807	19.97	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:26:40	M24	38808	19.99	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:32:40	M23	38809	20.04	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:33:40	M24	38810	20.04	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:41:40	M23	38811	20.01	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:42:40	M24	38812	20.01	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:52:40	M23	38813	20.04	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	6:53:40	M24	38814	20.05	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	7:00:40	M23	38815	20.05	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	7:01:40	M24	38816	20.05	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	7:23:40	M23	38817	20.05	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	7:24:40	M24	38818	20.05	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			
81022310	7:31:40	M23	38819	19.99	2.40	12.8	2.5253	3.1647	2.5253	3.1647	3.1647	1.0000			





#### 4.0 Comments

The meter linearity is +/- 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.

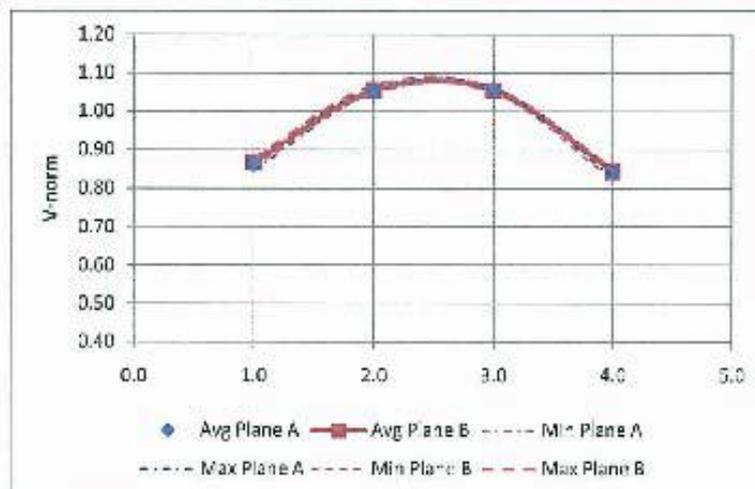

**CAMERON** Meter Diagnostic Summary

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

	Min	Max	
Flow	32	282	m <sup>3</sup> /h
Reynolds Number	6,675	322,562	
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 StDev	Min VN	Avg VN	Max VN
Path 1	4.9%	5.7%	6.6%	0.8447	0.8648	0.8776
Path 2	3.0%	3.3%	3.8%	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



## Anexo D: Certificado do multímetro HP 34970A

1/7



**ipt**  
INSTITUTO DE  
PESQUISAS  
TECNOLÓGICAS

Laboratório de Metrologia Elétrica / CTMetro



Calibração  
NBR ISO/IEC  
17025  
CAL 0047

### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° 153943-101

**Cliente:** Faculdades Católicas  
Rua Marquês de São Vicente, 225  
22451-900 – Gávea – Rio de Janeiro – RJ

**Item:** Sistema de aquisição de dados

**Referência:** Aprovação por e-mail de 31.08.2016

**DESCRIÇÃO DO ITEM**

Sistema de aquisição de dados, marca Agilent, modelo 34970A, série n° US37033133 e patrimônio n° 055303.

Obs.: Registrado no LME sob n°(s) 0971/16.

**INFORMAÇÕES PERTINENTES À CALIBRAÇÃO**

**1. Procedimento da calibração**

Foram calibradas as faixas e os pontos solicitados pelo cliente.

A execução da calibração foi baseada no(s) procedimento(s) interno(s) CTMetro-LME-G17 (Versão 12) e CTMetro-LME-G25 (Versão 11).

A calibração foi realizada pelo método de comparação com o(s) padrão(ões) utilizado(s).

A faixa AC foi calibrada com frequência de 60 Hz e forma de onda senoidal.

A faixa de frequência foi calibrada com amplitude eficaz de 1 V e forma de onda senoidal.

O Sistema de aquisição de dados foi calibrado com as configurações abaixo:

- "NPLC" 200 para tensão, corrente e resistência;
- Autozero "ON" para tensão e resistência e
- "LF 3 Hz: SLOW" para tensão AC e frequência.

**2. Incerteza**

A incerteza expandida de medição relatada no item RESULTADOS é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com  $v_{eff}$  graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95 %. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

JR

**Laboratório de Metrologia Elétrica / CTMetro**

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0047

Certificado de Calibração N° 153943-101

**3. Padrão(ões) utilizado(s)**

Descrição	Modelo	Série N°	Certificado N°	Origem	Validade
Calibrador 7 ½ dígitos	5720A - série II	6900201	150688-101	IPT-LME	mar./2017
Calibrador multifunção	5520A	1173004	150833-101 e 150834-101	IPT-LME	mar./2017
Gerador de forma de onda	33522B	MY52801756	153238-101 e 153239-101	IPT-LME	ago./2017

**4. Rastreabilidade**

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI).

**5. Condições durante a calibração**

As medições foram realizadas na temperatura ambiente de  $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $(60 \pm 20)\%$ .

**6. Legenda para as abreviações usadas na apresentação dos resultados**

VI = Valor Indicado (indicação obtida no item sob calibração)

VR = Valor de Referência (indicação obtida no padrão)

Erro = VI - VR (erro de indicação do item sob calibração)

EMA = Erro Máximo Admissível (limites de erros especificados pelo fabricante do item sob calibração)

U = Incerteza Expandida de Medição

k = Fator de Abrangência (fator multiplicativo adimensional)

$\nu_{\text{eff}}$  = Graus de liberdade efetivos

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

**Laboratório de Metrologia Elétrica / CTMetro**

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0047

Certificado de Calibração N° 153943-101

7. Data da execução da calibração: 22.09.2016.

Calibração executada por: Tecg° Felipe Santiago Apolinário 

São Paulo, 22 de setembro de 2016.

CENTRO DE METROLOGIA MECÂNICA, ELÉTRICA E  
 DE FLUIDOS  
 Laboratório de Metrologia Elétrica

  
 Físico Régis Renato Dias  
 Supervisor(a) da Calibração  
 RE n° 8825

CENTRO DE METROLOGIA MECÂNICA, ELÉTRICA E  
 DE FLUIDOS  
 Laboratório de Metrologia Elétrica

  
 Eng.ª Eletricista Tomie Yokoji  
 Supervisor(a) da Calibração  
 RE n° 8176.0

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
 Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

**Laboratório de Metrologia Elétrica / CTMetro**

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0047

Certificado de Calibração N° 153943-101

**RESULTADOS**

Faixa de 100 mV DC - Canal 101

Erro Máximo Admissível (EMA):  $\pm$  (0,005 % do valor indicado + 0,004 % da faixa)

Unidade	VI	VR	Erro	EMA	U	k	V <sub>eff</sub>
mV	0,0987	0,09962	-0,00092	0,0040	0,00074	2,00	$\infty$
mV	0,9986	0,99962	-0,00102	0,0040	0,00075	2,00	$\infty$
mV	1,9986	1,99962	-0,00102	0,0041	0,00076	2,00	$\infty$
mV	2,9986	2,99961	-0,00101	0,0041	0,00077	2,00	$\infty$
mV	3,9986	3,99961	-0,00101	0,0042	0,00078	2,00	$\infty$
mV	4,9985	4,99961	-0,00111	0,0042	0,00079	2,00	$\infty$
mV	5,9986	5,99961	-0,00101	0,0043	0,00080	2,00	$\infty$
mV	6,9986	6,99961	-0,00101	0,0043	0,00081	2,00	4696
mV	7,9985	7,99960	-0,00110	0,0044	0,00081	2,00	$\infty$
mV	8,9986	8,99960	-0,00100	0,0044	0,00082	2,00	$\infty$
mV	9,9984	9,99960	-0,00120	0,0045	0,00083	2,00	$\infty$
mV	14,9985	14,99959	-0,00109	0,0047	0,00087	2,00	$\infty$
mV	19,9983	19,99958	-0,00128	0,0050	0,00092	2,00	$\infty$
mV	24,9983	24,99957	-0,00127	0,0052	0,00096	2,00	$\infty$
mV	29,9982	29,9996	-0,0014	0,0055	0,0010	2,00	$\infty$
mV	49,9979	49,9995	-0,0016	0,0065	0,0012	2,00	$\infty$
mV	74,9974	74,9995	-0,0021	0,0077	0,0014	2,00	$\infty$
mV	99,9969	99,9994	-0,0025	0,0090	0,0016	2,00	$\infty$

Faixa de 10 V DC - Canal 101

Erro Máximo Admissível (EMA):  $\pm$  (0,0035 % do valor indicado + 0,0005 % da faixa)

Unidade	VI	VR	Erro	EMA	U	k	V <sub>eff</sub>
V	1,00002	1,000000	0,0000200	0,000085	0,0000082	2,00	$\infty$
V	3,00007	3,000000	0,000070	0,00016	0,000016	2,00	$\infty$
V	5,00011	5,000000	0,000110	0,00023	0,000024	2,00	$\infty$
V	7,00015	7,000000	0,000150	0,00030	0,000033	2,00	$\infty$
V	9,00020	9,000000	0,000200	0,00037	0,000041	2,00	$\infty$
V	10,00022	10,000000	0,000220	0,00040	0,000045	2,00	$\infty$

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
 Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

**Laboratório de Metrologia Elétrica / CTMetro**

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0047

Certificado de Calibração N° 153943-101

**Faixa de 10 mA DC - Canal 121**Erro Máximo Admissível (EMA):  $\pm$  (0,05 % do valor indicado + 0,02 % da faixa)

Unidade	VI	VR	Erro	EMA	U	k	V <sub>eff</sub>
mA	0,99992	1,000000	-0,000080	0,0025	0,000044	2,00	1164
mA	1,99990	2,000000	-0,000100	0,0030	0,000080	2,00	4387
mA	2,99987	3,000000	-0,00013	0,0035	0,00015	2,00	$\infty$
mA	3,99985	4,000000	-0,00015	0,0040	0,00018	2,00	$\infty$
mA	4,99984	5,000000	-0,00016	0,0045	0,00022	2,00	$\infty$
mA	5,99980	6,000000	-0,00020	0,0050	0,00026	2,00	$\infty$
mA	6,99978	7,000000	-0,00022	0,0055	0,00029	2,00	$\infty$
mA	7,99976	8,000000	-0,00024	0,0060	0,00033	2,00	$\infty$
mA	8,99974	9,000000	-0,00026	0,0065	0,00036	2,00	$\infty$
mA	9,99971	10,000000	-0,00029	0,0070	0,00040	2,00	$\infty$

**Faixa de 100 mA DC - Canal 121**Erro Máximo Admissível (EMA):  $\pm$  (0,05 % do valor indicado + 0,005 % da faixa)

Unidade	VI	VR	Erro	EMA	U	k	V <sub>eff</sub>
mA	9,9999	10,00000	-0,00010	0,010	0,00040	2,00	$\infty$
mA	11,9998	12,00000	-0,00020	0,011	0,00048	2,00	$\infty$
mA	13,9998	14,00000	-0,00020	0,012	0,00055	2,00	$\infty$
mA	15,9998	16,00000	-0,00020	0,013	0,00062	2,00	$\infty$
mA	17,9998	18,00000	-0,00020	0,014	0,00069	2,00	$\infty$
mA	19,9998	20,00000	-0,00020	0,015	0,00076	2,00	$\infty$
mA	25,0000	25,00000	0,0000	0,018	0,0022	2,00	$\infty$
mA	30,0000	30,00000	0,0000	0,020	0,0026	2,00	$\infty$

**Faixa de 300 V AC (10 Hz a 20 kHz) - Canal 101**Erro Máximo Admissível (EMA):  $\pm$  (0,06 % do valor indicado + 0,08 % da faixa)

Unidade	VI	VR	Erro	EMA	U	k	V <sub>eff</sub>
V	99,6499	100,0000	-0,3501	0,30	0,0076	2,00	5400
V	199,2806	200,0000	-0,7194	0,36	0,015	2,00	$\infty$
V	298,9264	300,0000	-1,0736	0,42	0,030	2,00	$\infty$

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
 Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

**Laboratório de Metrologia Elétrica / CTMetro**

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0047

Certificado de Calibração N° 153943-101

Faixa de 100  $\Omega$  (4 fios) - Canal 101 e 111

Erro Máximo Admissível (EMA):  $\pm$  (0,01 % do valor indicado + 0,004 % da faixa)

Unidade	VI	VR	Erro	EMA	U	k	V <sub>eff</sub>
$\Omega$	14,99997	15,0000	-0,00003	0,0055	0,0023	2,00	$\infty$
$\Omega$	19,99991	20,0000	-0,00009	0,0060	0,0024	2,00	9601
$\Omega$	24,99993	25,0000	-0,00007	0,0065	0,0026	2,00	$\infty$
$\Omega$	29,99976	30,0000	-0,00024	0,0070	0,0028	2,00	6380
$\Omega$	34,99974	35,0000	-0,00026	0,0075	0,0028	2,00	$\infty$
$\Omega$	39,99946	40,0000	-0,00054	0,0080	0,0029	2,00	$\infty$
$\Omega$	44,99932	45,0000	-0,00068	0,0085	0,0031	2,00	$\infty$
$\Omega$	49,99876	50,0000	-0,00124	0,0090	0,0033	2,00	$\infty$
$\Omega$	54,99897	55,0000	-0,00103	0,0095	0,0034	2,00	$\infty$
$\Omega$	59,99900	60,0000	-0,00100	0,010	0,0036	2,00	$\infty$
$\Omega$	64,99850	65,0000	-0,00150	0,010	0,0037	2,00	$\infty$
$\Omega$	69,99866	70,0000	-0,00134	0,011	0,0039	2,00	$\infty$
$\Omega$	79,99826	80,0000	-0,00174	0,012	0,0042	2,00	$\infty$
$\Omega$	89,99769	90,0000	-0,00231	0,013	0,0045	2,00	$\infty$
$\Omega$	99,99748	100,0000	-0,00252	0,014	0,0049	2,00	$\infty$

Faixa de 1 k $\Omega$  (4 fios) - Canal 101 e 111

Erro Máximo Admissível (EMA):  $\pm$  (0,01 % do valor indicado + 0,001 % da faixa)

Unidade	VI	VR	Erro	EMA	U	k	V <sub>eff</sub>
k $\Omega$	0,100000	0,1000000	0,0000000	0,000020	0,0000049	2,00	$\infty$
k $\Omega$	0,110001	0,1100000	0,0000010	0,000021	0,0000059	2,00	$\infty$
k $\Omega$	0,130001	0,1300000	0,0000010	0,000023	0,0000065	2,00	$\infty$
k $\Omega$	0,150000	0,1500000	0,0000000	0,000025	0,0000072	2,00	$\infty$
k $\Omega$	0,160001	0,1600000	0,0000010	0,000026	0,0000075	2,00	$\infty$
k $\Omega$	0,180001	0,1800000	0,0000010	0,000028	0,0000081	2,00	$\infty$
k $\Omega$	0,200001	0,2000000	0,0000010	0,000030	0,0000088	2,00	$\infty$
k $\Omega$	0,220001	0,2200000	0,0000010	0,000032	0,0000095	2,00	$\infty$
k $\Omega$	0,240000	0,2400000	0,0000000	0,000034	0,000010	2,00	$\infty$
k $\Omega$	0,260000	0,2600000	0,0000000	0,000036	0,000011	2,00	$\infty$
k $\Omega$	0,280000	0,2800000	0,0000000	0,000038	0,000011	2,00	$\infty$
k $\Omega$	0,300000	0,3000000	0,0000000	0,000040	0,000012	2,00	$\infty$

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

**Laboratório de Metrologia Elétrica / CTMetro**

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0047

Certificado de Calibração N° 153943-101

Faixa de 40 Hz a 300 kHz - Canal 101

Erro Máximo Admissível (EMA):  $\pm$  (0,01 % do valor indicado)

Unidade	VI	VR	Erro	EMA	U	k	v <sub>eff</sub>
Hz	100,0007	100,00000	0,00070	0,010	0,00014	2,01	176
Hz	200,0012	200,00000	0,00120	0,020	0,00028	2,04	58
Hz	300,0021	300,00000	0,00210	0,030	0,00037	2,01	315
Hz	400,0026	400,00000	0,00260	0,040	0,00047	2,00	$\infty$
Hz	500,0031	500,00000	0,00310	0,050	0,00060	2,00	556
kHz	1,000006	1,0000000	0,0000060	0,00010	0,0000013	2,00	$\infty$
kHz	2,000012	2,0000000	0,0000120	0,00020	0,0000025	2,00	972
kHz	4,000025	4,0000000	0,0000250	0,00040	0,0000047	2,00	$\infty$
kHz	6,000037	6,0000000	0,0000370	0,00060	0,0000070	2,00	$\infty$
kHz	8,000050	8,0000000	0,0000500	0,00080	0,0000093	2,00	$\infty$
kHz	10,00006	10,0000000	0,000060	0,0010	0,000013	2,00	$\infty$
kHz	15,00009	15,0000000	0,000090	0,0015	0,000018	2,00	$\infty$
kHz	20,00012	20,0000000	0,000120	0,0020	0,000024	2,00	$\infty$
kHz	50,00031	50,0000000	0,000310	0,0050	0,000058	2,00	$\infty$
kHz	100,0006	100,00000	0,00060	0,010	0,00013	2,00	$\infty$

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

## Anexo E: Gráficos de evolução da incerteza de vazão ao longo do número de trechos retos

