

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

FADY ABOUJAOUDE

**METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE
PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE VAZÃO PARA ÓLEOS PESADOS POR
TECNOLOGIA ULTRASSÔNICA POR TEMPO DE TRÂNSITO**

**Vitória
2017**

FADY ABOUJAOUDE

**METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE
PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE VAZÃO PARA ÓLEOS PESADOS POR
TECNOLOGIA ULTRASSÔNICA POR TEMPO DE TRÂNSITO**

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

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Coelho de Mattos

**Vitória
2017**

FADY ABOUJAOUDE

**METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO DE PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE VAZÃO PARA
ÓLEOS PESADOS POR TECNOLOGIA ULTRASSÔNICA POR
TEMPO DE TRÂNSITO**

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

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Rogério Ramos – Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Márcio Coelho de Mattos – Coorientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira
Instituto Federal do Espírito Santo

Resumo

A medição ultrassônica por tempo de trânsito vem sendo utilizada cada vez mais, aumentando, sem dúvida, a necessidade urgente de desenvolvimento de tecnologia brasileira neste campo da instrumentação. Este trabalho se dedica ao desenvolvimento de uma metodologia experimental de avaliação do desempenho de um protótipo de medidor de vazão de óleo pesado por tecnologia ultrassônica desenvolvido em território nacional. Os processos estatísticos utilizados visam estabelecer o uma metodologia de tratamento das leituras executadas pelo aparelho, considerando a redução das incertezas nas leituras. Para isso, o trabalho avalia experimentalmente o comportamento do medidor por tempo de trânsito, validando-o em relação a um medidor de vazão de referência. A calibração realizada por uma regressão linear obteve erros constantes ($0.5-0.9\text{m}^3/\text{h}$) entre faixas de funcionamento ($5-25\text{m}^3/\text{h}$) obtendo-se assim erros de 15% para piores casos (vazões menores) e 3.3% para os melhores casos. Para tentar amenizar os efeitos do processo no cálculo final das incertezas foi proposto um método de linearização, assim como aumentar a frequência de aquisição dos dados coletados pelo MOPUS. Com isso, obteve se incertezas de na ordem de 1-4%. Durante as análises, foi observada também a dependência desse medidor em relação a variáveis processuais. Concluiu-se que o protótipo desenvolvido tem condições de ser comercializado de forma a suprir as necessidades da inexistência desta tecnologia nacional no mercado.

Palavras chave: Medidor Ultrassônico, tempo de trânsito, óleo pesado, medição de vazão

Abstract

The use of transit time ultrasonic flow meters has been increasing in recent years, and undoubtedly there is a need for the development of Brazilian technology in this field of instrumentation. This work is dedicated to the study of flow measurement in heavy oils by ultrasound with the intention of calibrating the prototype and verifying the validity of the statistical procedures used in order to reduce the uncertainties in the readings. To accomplish this, effects of possible errors of the transit-time flow meter are analyzed experimentally and validated in relation to a reference flow meter. The calibration performed by linear regression showed constant errors (0.5-0.9m³/h) between operating ranges (5-25m³/h), thus obtaining errors of 15% for worst cases (lower flows) and 3.3% for better cases. A linearization method was proposed to minimize the effects of the measuring process in the final uncertainty calculation. Increasing the frequency of data acquisition was also proposed with the same intention. This led to uncertainties of 1-4%. The dependence of this meter was also observed in relation to process variables during the analysis. This work concludes that the prototype developed can be commercialized in order to meet the needs of the lack of this national technology in the market.

Key words: Ultrasonic flowmeter, transit time, heavy oil, flow measurement

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS.....	3
2	REVISÃO TEÓRICA.....	4
2.1	MEDIDORES ULTRASSÔNICOS.....	4
2.2	CALIBRAÇÃO.....	13
2.3	REPETITIVIDADE.....	15
2.4	LINEARIZAÇÃO.....	15
2.5	PECULIARIDADES NA MEDIÇÃO ULTRASSÔNICA EM ÓLEOS.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1	HISTÓRICO DOS MEDIDORES ULTRASSÔNICOS.....	23
3.2	TEMPO DE TRÂNSITO E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DOS FLUIDOS.....	25
3.3	CAMINHO ACÚSTICO E PERFIL DE VELOCIDADE.....	27
3.4	MEDIDORES ULTRASSÔNICOS PARA ÓLEOS PESADOS.....	30
4	CALIBRAÇÃO E INCERTEZAS NO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO...32	
4.1	CALIBRAÇÃO.....	32
4.2	INCERTEZA.....	32
4.3	REPETIVIDADE.....	42
5	PLANTA EXPERIMENTAL.....	45
5.1	CIRCUITO DE TESTES.....	47
5.2	CONTROLE DA PLANTA.....	50
5.3	ÓLEO.....	55
5.4	MOPUS.....	56
6	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.....	61
6.1	LIMITES DA PLANTA.....	61
6.2	CALIBRAÇÃO.....	63
6.3	VALIDAÇÃO.....	64
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
7.1	PRIMEIRO TESTE DO MOPUS PARA O TRECHO 1.....	65
7.2	PRIMEIRO TESTE DO MOPUS PARA O TRECHO 2.....	73

7.3	CALIBRAÇÃO INICIAL DO MOPUS	74
7.4	ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA PLANTA	84
7.5	ANÁLISE INICIAL DA INCERTEZA DO MOPUS	86
7.6	LINEARIZAÇÃO DO MOPUS	91
7.7	REPETITIVIDADE DO MOPUS	93
7.8	ANÁLISE DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS EM RELAÇÃO AO COMPORTAMENTO DO MOPUS.....	97
7.9	ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MOPUS EM RELAÇÃO AS VARIÁVEIS DO PROCESSO	105
8	CONCLUSÃO	109
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
	ANEXO A	116
	ANEXO B	117
	ANEXO C	120
	ANEXO D	121
	ANEXO E	123
	ANEXO F.....	125
	ANEXO G	134
	ANEXO H	137
	ANEXO I.....	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema representativo do acoplamento de componentes de um medidor ultrassônico.	4
Figura 2: Exemplo do caminho percorrido pelos pulso ultrassônicos.....	5
Figura 3: Possível desvio da trajetória do pulso ultrassônico em relação a um caminho reto causado pelo escoamento.	8
Figura 4: Exemplos de perfis de escoamento para regimes diferentes.....	10
Figura 5: Distorção do perfil causada por um acidente de linha em 5D e 20D.....	11
Figura 6: Seção transversal de um tubo.....	12
Figura 7: Linearização de um medidor tipo Turbina (COUSINS, 2014).....	16
Figura 8: Esquema de Exemplo de Incerteza.....	33
Figura 9: Curva de probabilidade de uma medição estar dentro de faixas.	37
Figura 10: Planta Experimental com os instrumentos de medição e controle.	46
Figura 11: Pagina Inicial do Supervisório.	51
Figura 12: Aba de Painel de Operação.	52
Figura 13: Painel de controle de Vazão	53
Figura 14: Gráfico da vazão do MOPUS e o valor esperado.....	54
Figura 15: Curva de viscosidade do óleo usado.....	56
Figura 16: Medidor ultrassônico MOPUS.	57
Figura 17: Desenho no AutoCAD das dimensões do MOPUS.	58
Figura 18: Exemplo de mudança de fase das ondas sinusoidais.....	59
Figura 19: Sinal emitido e recebido (esquerda) e esboço de um filtro FFT	59
Figura 20: O óleo escoa pelo trecho 1 quando a válvula 1 está aberta e a válvula 2 está fechada	61
Figura 21: Vazão medido pelos medidores	66
Figura 22: Medição Do MOPUS Em Vazão Nula	66
Figura 23: Tempos de trânsito do MOPUS em vazão nula.	68
Figura 24: Médias das vazões dos instrumentos	70
Figura 25: Média dos tempos de trânsito para cada vazão.....	71
Figura 26: Média dos tempos de trânsito corrigidos para cada vazão.	72
Figura 27: Progressão dos Tempos de Trânsito	73

Figura 28: Aumento da temperatura do óleo em função da dissipação viscosa.....	74
Figura 29: Acima: Variação da Vazão durante a matriz os Testes. Abaixo: Variação da temperatura e pressão durante a matriz de testes	76
Figura 30: Vazões Do MOPUS Sem E Com A Calibração.....	80
Figura 31: Calibração Da Matriz Completa E Erros Relativos	81
Figura 32: Validação Feita Com A Calibração Realizada Em Uma Matriz	82
Figura 33: Validação Feita Com A Calibração Realizada Em Uma Matriz	83
Figura 34: Variância Do MOPUS E Circuito De Testes Para Uma Vazão De 5m ³ /h85	
Figura 35: Incertezas Combinadas da primeira matriz de Teste (k=2).....	90
Figura 36: Linearização Com Média Móvel De 1 Segundo	91
Figura 37: Linearização Com Média Móvel De 1 Segundos Para Uma Frequência De Aquisição De 7Hz.....	93
Figura 38: Linearização Com Média Móvel De 1 Segundos Para Uma Frequência De Aquisição De 10Hz.....	93
Figura 39: Repetitividade Do MOPUS após a Linearização (API 12.2.3 e 13.1).....	95
Figura 40: Repetitividade Do MOPUS após a Linearização NIST.....	97
Figura 41: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero	98
Figura 42: Mopus vs. Referência após correções (10 medições consecutivas).....	99
Figura 43: Mopus vs. Referência após correções (20 medições consecutivas).....	99
Figura 44: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Todas as pressões e temperaturas. Resolução temporal padrão: 100 ms.	100
Figura 45: Mopus vs. Referência após correções (10 medições consecutivas)....	100
Figura 46: Mopus vs. Referência após correções (20 medições consecutivas)....	100
Figura 47: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 30°C.	102
Figura 48: Históricos de medição a 5m ³ /h e a 10 m ³ /h.....	103
Figura 49: Desvio padrão relativo do MOPUS versus Temperatura.....	104
Figura 50: Desvio padrão relativo do MOPUS versus Pressão	104
Figura 51: Correlação entre as variâncias das variáveis do processo e o MOPUS	106
Figura 52: Correlação Entre As Variâncias Dos Tempos De Trânsito.....	107
Figura 53: Correlação entre as variâncias das variáveis do processo e MOPUS ..	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Recomendações de instalação das norma API 5.8 (2006) para sistemas de medição com medidores ultrassônicos.....	14
Tabela 2 - Exemplo de Efeitos Aleatórios e Sistemáticos	35
Tabela 3 - Especificações do circuito de testes.....	47
Tabela 4 - Especificações dos medidores de referência	49
Tabela 5 - Especificações do Óleo.....	56
Tabela 6 - Reynolds vs Limites da Planta para o primeiro Trecho	62
Tabela 7 - Reynolds vs. Limites da Planta para o segundo trecho.....	63
Tabela 8 - Matriz de Testes do MOPUS com seus respectivos códigos de testes....	64
Tabela 9 - Primeiro Teste do MOPUS.....	70
Tabela 10 - Correção do tempo de trânsito pela velocidade do som	72
Tabela 11 - Corrida de Calibração	77
Tabela 12 - Variâncias da Corrida de Calibração.....	78
Tabela 13 - Erros da Corrida de Calibração.....	78
Tabela 14 - Corrida de Verificação da Calibração.....	78
Tabela 15 - Variâncias da Corrida de Validação	79
Tabela 16 - Erros da Corrida de Calibração.....	79
Tabela 17 - Zeros e Ganhos Matriz de Calibração.....	83
Tabela 18 - Matriz de Incertezas Padrão	87
Tabela 19 - Incerteza Combinada E Componentes.....	89
Tabela 20 – Comparação dos dados originais com os dados linearizados	92
Tabela 21 - Comparação entre dados linearizados com frequências diferentes	92
Tabela 22 - Repetitividade Dados linearizados em 100ms	95
Tabela 23 - Correções de ganhos e de zeros e da incerteza que do MOPUS (Sem média móvel)	101

LISTA DE SÍMBOLOS

α – Fator De Atenuação Ultrassônica

ω – Frequência Da Onda Ultrassônica

η_{dyn} – Viscosidade Dinâmica

η_{bulk} – Viscosidade *Bulk*

ρ – Massa Específica

c, c_0 – Velocidade Do Som No Fluido

L – Distância Entre Os Transdutores

θ – Ângulo De Inclinação Entre Vazão Axial E Transdutor

c_{AB} – Velocidade De Propagação Do Pulso Ultrassônico A Jusante

c_{BA} – Velocidade De Propagação Do Pulso Ultrassônico A Montante

t_{AB} – Tempo De Propagação Do Pulso Na Direção Do Escoamento

t_{BA} – Tempo De Propagação Do Pulso Contrário Ao Escoamento

U_{rel} – Incerteza Relativa

U_{abs} – Incerteza Absoluta

q – Mensurado

$s^2(q), \sigma^2$ – Variância

σ – Desvio Padrão

U_{rel} – Incerteza Relativa

U_{abs} – Incerteza Absoluta

Re – Numero de Reynolds

D – Diâmetro do Tubo

β_1 – Correção de Ganho

β_0 – Correção de Zero

$\bar{Q}_{MOPUS_{calib}}$ – Vazão Calibrado Calculado pelo Protótipo

\bar{Q}_{MOPUS} – Vazão Calculado pelo Protótipo

$\overline{Erro_{relativo}}$ – Erro Relativo do Protótipo

\overline{Erro} – Erro do Protótipo

1 INTRODUÇÃO

A medição da vazão de um fluido com baixa incerteza é essencial para a transferência de custódia de produtos petrolíferos, como óleos brutos e refinados. Incertezas elevadas podem levar a prejuízos financeiros em uma produção de elevada importância estratégica, além de não permitir ações precisas de controle de plantas de produção. Incertezas de até mesmo de 0,1% podem resultar em perdas significativas em relação a extração anual do produto. Tais exigências originam aos rigorosos padrões de precisão e rastreabilidade que são tipicamente aplicados às transferências de custódia de petróleo tais como a Resolução Conjunta N° 1 (ANP/INMETRO, 2013), o “*Manual of Petroleum Measurement Standards*” capítulo 18.2 (API MPMS, 2016), entre outros.

Por muito tempo, a transferência de custódia foi gerenciada por técnicas de medições de nível de tanques. Mas com os níveis atuais de produção tal procedimento se torna inviável. Para isso, os sistemas de medição dinâmicos se tornaram indispensáveis. Além do interesse direto das empresas de petróleo na utilização e melhoria contínua dos sistemas de medição de vazão, a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro) estão mais rigorosos nas regulamentações aplicáveis às medições de vazão. Hoje, sistemas de medição para transferência de custódia de petróleo (com viscosidade dinâmica até 1000 mPa.s) devem ser projetados, instalados e calibrados para operar dentro da classe de exatidão 0.3% (OIML, 2009). Para petróleo com viscosidade dinâmica acima de 1000 mPa.s a classe de exatidão passa a ser de 0.5.

Nas últimas décadas, medidores de vazão ultrassônicos vem sendo utilizados cada vez mais por conta das suas características favoráveis a essa indústria. São robustos, conseguem atender a classe de exatidão requerida, são capazes de medir grandes vazões, sua instalação na linha é relativamente fácil e apresentam grande flexibilidade quanto ao produto a ser medido. Entretanto, esses instrumentos de medição são de alto custo, pois são de fabricação estrangeira. Isso contribui ainda mais com o alto custo de reposição de peças e calibrações.

O limiar de incerteza definido pelos órgãos que regulamentam a transferência de custódia não é atingido sem um controle rígido do processo. Então um estudo das incertezas de medição deve ser aprofundado de modo a atingir esta meta. Uma das principais questões sobre medição de óleo pesado por tecnologia ultrassônica refere-se ao efeito de baixos números de Reynolds (CORDOVA; FURUICHI; LEDERER, 2015) que podem oscilar devido a variações de viscosidade e temperatura. Hogendoorn *et al.* (2009) também cita tais variações como principal desafio na medição de óleos pesados. Com o intuito de desenvolver soluções para tais questões, em 2010 o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) através da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, realizou uma chamada pública para selecionar propostas para apoio financeiro a projetos cooperativos entre Instituição de Pesquisa Científica e Tecnológica (ICTs) e Empresas para desenvolvimentos tecnológicos de interesse das empresas brasileiras, visando o fornecimento de bens e serviços para o setor de Petróleo e Gás Natural.

Assim, este trabalho está inserido no escopo do projeto MOPUS (Medidor de Vazão de Óleos Pesados por Ultrassom), financiado pela Finep para desenvolvimento de tecnologias para exploração de Petróleo no “Pré-Sal”, Chamada Pública MCT/FINEP/AT COOPERAÇÃO ICTs-EMPRESAS PRÉ-SAL 03. O projeto tem como objetivo o desenvolvimento de tecnologia nacional para um protótipo de um medidor de vazão para escoamentos de óleos pesados baseado na tecnologia ultrassônica. A etapa em que esse trabalho participa é a validação e definição da incerteza do produto de modo a melhorar o produto final.

Para a realização desse trabalho será utilizado um circuito de escoamento de óleo pesado instalado no Laboratório de Máquinas de Fluxo da Universidade Federal do Espírito Santo. Para a realização desse trabalho será utilizado um circuito de óleo pesado já existente localizado no Laboratório de Máquinas de Fluxo da Universidade Federal do Espírito Santo.

1.1 OBJETIVOS

Ampliar a aplicabilidade e confiabilidade operacional da tecnologia para medição de escoamentos de óleo pesado

Desta forma, este trabalho visa:

- Analisar o comportamento do protótipo a fim de garantir um funcionamento satisfatório e controlado;
- Validar o medidor protótipo com medidores de referência;
- Avaliar a incerteza global da medição em situações adversas de medição;
- Propor melhorias para redução da incerteza de medição.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 MEDIDORES ULTRASSÔNICOS

Atualmente, existem no mercado diversas tecnologias relativas a medidores ultrassônicos para escoamentos de líquidos. No presente trabalho foi avaliada a tecnologia de medidor por Tempo de Trânsito desenvolvida por ocasião da Chamada Pública MCT/FINEP – Pré-Sal Cooperativos ICT-Empresas 03/2010, denominado MOPUS (Medidor de Óleo Pesado por Ultrassom) Φ 4pol. classe de pressão 150 psi. O projeto foi concebido com a finalidade de desenvolver tecnologia nacional para medição ultrassônica de óleos pesados, conforme especificado no projeto.

2.1.1 Configuração básica de um Medidor Ultrassônicos

Um medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito e um canal acústico é constituído de basicamente três componentes: (i) um par de transdutores ultrassônicos, (ii) um trecho reto de medição, e (iii) uma unidade de processamento. A Figura 1 exemplifica como esses componentes podem ser acoplados.

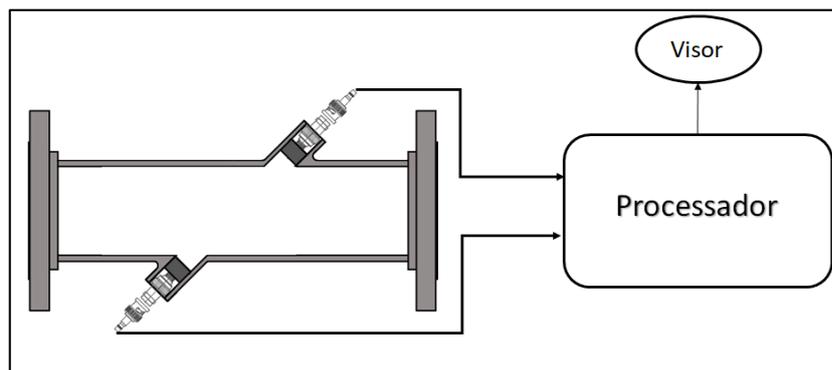


Figura 1: Esquema representativo do acoplamento de componentes de um medidor ultrassônico.

Os transdutores são constituídos de cristais piezelétricos encapsulados, capazes de emitir pulsos ultrassônicos, fixados no duto de forma que o pulso ultrassônico trafegue com uma inclinação que permita a medição da diferença de tempo de trânsito à montante e a jusante do escoamento. A fixação dos transdutores é feita através de conexões roscadas, devidamente alinhadas ao trecho de medição.

2.1.2 Princípio de Medição

Os medidores por tempo de trânsito contam com, no mínimo, um par de transdutores, que são cristais piezelétricos, capazes de emitir pulsos ultrassônicos. Estes transdutores operam de forma intercalada, ora como transmissores, ora como receptores, e emitem os pulsos em duas direções: para a jusante do escoamento do fluido e para a direção de montante. O pulso que segue para a jusante do escoamento (Figura 2, de A para B) percorre a distância entre os transdutores em um intervalo de tempo menor do que o pulso que segue na direção oposta (Figura 2, de B para A). A diferença entre os tempos de trânsito é proporcional à velocidade média do escoamento.

A vazão do fluido que escoar em um tubo fechado completamente preenchido é calculada como a velocidade média do líquido ao longo de um corte transversal multiplicada pela área da seção transversal desse tubo. Assim, medindo a velocidade média do escoamento ao longo de um ou mais caminhos acústicos e combinando as medições com conhecimento da área da seção transversal e do perfil de velocidade sobre a seção transversal, é possível inferir a vazão volumétrica do fluido escoando.

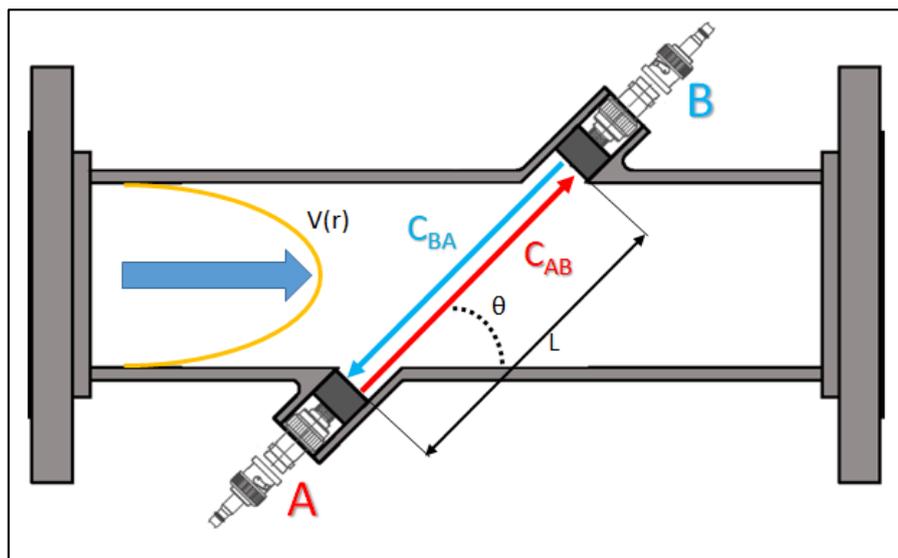


Figura 2: Exemplo do caminho percorrido pelos pulso ultrassônicos em relação a vazão do fluido.

Onde:

- Distância entre os transdutores: L ;
- Ângulo de inclinação: θ ;
- Velocidade do som no fluido: c_0 ;
- Velocidade de propagação do pulso ultrassônico a jusante: c_{AB} ;
- Velocidade de propagação do pulso ultrassônico a montante: c_{BA} ;
- Tempo de propagação do pulso na direção do escoamento: t_{AB} ;
- Tempo de propagação do pulso contrário ao escoamento: t_{BA} .

Para um perfil de velocidades simétrico, em escoamento completamente desenvolvido, o cálculo da velocidade média do fluido na trajetória ($\overline{u_m}$) considera apenas a componente axial de velocidade:

$$c_{AB} = \frac{L}{t_{AB}} = c_0 + \overline{u_m} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$c_{BA} = \frac{L}{t_{BA}} = c_0 - \overline{u_m} \cdot \cos \theta \quad (2)$$

$$t_{AB} = \frac{L}{c_0 + \overline{u_m} \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

$$t_{BA} = \frac{L}{c_0 - \overline{u_m} \cdot \cos \theta} \quad (4)$$

Resolvendo o sistema algébrico definido pelas eqs. (3) e (4) para $\overline{u_m}$ a velocidade do som cancela e obtém-se equação (5).

$$\overline{u_m} = \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \quad (5)$$

Mas $\overline{u_m}$ não é necessariamente igual à velocidade média na seção transversal ($\overline{u_a}$). Para chegar à $\overline{u_a}$, são utilizados fatores de correção do perfil de velocidades. Alguns medidores conseguem avaliar, a partir de $\overline{u_m}$ e de propriedades do fluido, se o escoamento é laminar, turbulento ou de transição e, com base em processamentos específicos de cada fabricante, calcula-se u_a . A fim de obter maior exatidão, é recomendável que o medidor seja calibrado nas condições de operação.

Uma vez que a velocidade média do fluxo axial ao longo de um caminho acústico foi encontrada, a vazão volumétrica pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$Q = A \cdot \bar{V}_{axial} \quad (6)$$

Onde:

- Vazão volumétrica na seção: Q ;
- Área transversal média da seção de medição: A ;
- A velocidade média axial ao longo do caminho acústico: \bar{V}_{axial} .

A velocidade do som (c_0) pode ser determinada a partir do mesmo sistema algébrico em função de t_{AB} e t_{BA} e independe de \vec{u}_m :

$$c_0 = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_{BA} + t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \quad (7)$$

2.1.3 Desvio do Pulso Ultrassônico: O caminho acústico

A trajetória do pulso ultrassônico como uma visada direta entre as faces dos transdutores ultrassônicos, tal como visto na Figura 2, representa uma forma simplificada do caminho acústico representados por estes pulsos. Essa simplificação se baseia na diferença entre a velocidade média do escoamento, no caso desse trabalho entre 0,5 a 10 m/s, e a velocidade do som, que pode variar de 400 a 1500 m/s para hidrocarbonetos.

Em uma análise mais completa (LYNNWORTH, 1979), a velocidade de propagação do pulso no fluido em movimento (\vec{c}) é descrita como a soma vetorial da velocidade de propagação do som (\vec{c}_0) e a velocidade do escoamento (\vec{u}), Eq. (8).

$$\vec{c} = \vec{c}_0 + \vec{u} \quad (8)$$

A direção do pulso também varia em função de \vec{u} e \vec{c}_0 . Se a velocidade do escoamento não puder ser desprezada e a posição dos transdutores não for

corrigida, a trajetória será desviada. O desvio do pulso ultrassônico é influenciado pela direção e a velocidade do escoamento. A trajetória do pulso é conhecida por “caminho acústico” (LYNNWORTH, 1979).

Em casos extremos, o pulso não atinge o outro transdutor, como indicado na figura 3. Porém, essa situação só é prevista para acontecer em escoamento de gases em alta velocidade.

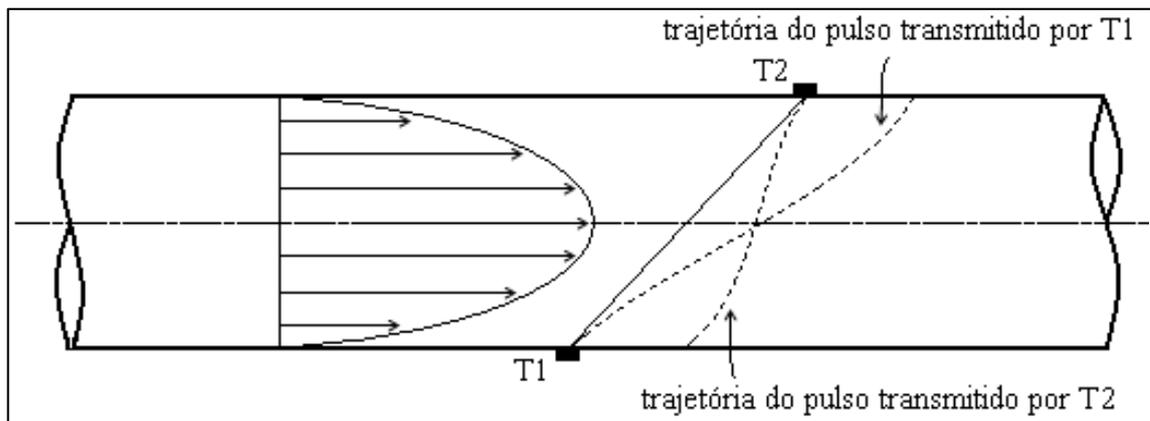


Figura 3: Possível desvio da trajetória do pulso ultrassônico em relação a um caminho reto causado pelo escoamento.

2.1.4 Medição de Tempo de Trânsito e Vazão Volumétrica

Segundo a norma ANSI/ASME MFC/5M (2001), a medição de tempo de trânsito pode ser realizada de três formas: (i) medição direta de tempo, (ii) medição de frequência e (iii) medição de diferença de fase. A medição direta de tempo é o método mais utilizado pelos medidores ultrassônicos, pois apresenta melhor exatidão, com menor tempo de resposta e maior confiabilidade.

Pela medição direta, o pulso ultrassônico é transmitido do transdutor A para B e vice-versa, quando são realizadas as medições de tempo de propagação e é então, calculada a velocidade média na trajetória \vec{u}_m (ANSI/ASME, 2001) através da eq. (5). Além de considerar os atrasos devido ao processo de detecção da onda ultrassônica, essa equação também considera os atrasos dos circuitos eletrônicos.

A diferença entre os intervalos de tempo de propagação é pequena (da ordem de nanosegundos, podendo atingir picosegundos, em diâmetros menores), e diminui ainda mais para meios onde a velocidade do som é elevada (como no caso de escoamento de líquidos). Tanto que, somente na década de 60, com a evolução da eletrônica, a tecnologia de medição ultrassônica por tempo de trânsito atingiu incerteza aceitável na indústria (LYNNWORTH, 1989). Para fins de entendimento, isso pode ser observado através da diferença de tempo de trânsito (Δt) (ISO 12765,1998) conforme consta nas equações (9) e (10), derivadas da equação (6):

$$\Delta t = \frac{2 \cdot L \cdot \overline{u_m} \cdot \cos \theta}{c_0^2 - \overline{u_m}^2 \cos^2 \theta} \quad (9)$$

Quando $\overline{u_m}$ é $\ll c_0$:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot L \cdot \overline{u_m} \cdot \cos \theta}{c_0^2} \quad (10)$$

A equação mostra que os intervalos de tempo serão menores quando a velocidade do som é elevada. Para líquidos, os tempos de trânsito serão menores do que na medição de vazão de gases. Por esta razão os medidores de gás vem alcançando incertezas relativas cada vez menores em relação a medidores de líquidos.

2.1.5 Perfil de Velocidade

A velocidade do escoamento varia na seção transversal de um tubo em função do perfil de velocidades determinado pelas características do escoamento. No fluxo em regime laminar, o perfil de velocidades completamente desenvolvido evolui em forma de parábola onde a velocidade no centro do tubo é o dobro da velocidade média. No escoamento em regime turbulento, o perfil completamente desenvolvido é mais achatado e a velocidade no centro do tubo é cerca de 1,2 vezes a velocidade média (Figura 4).

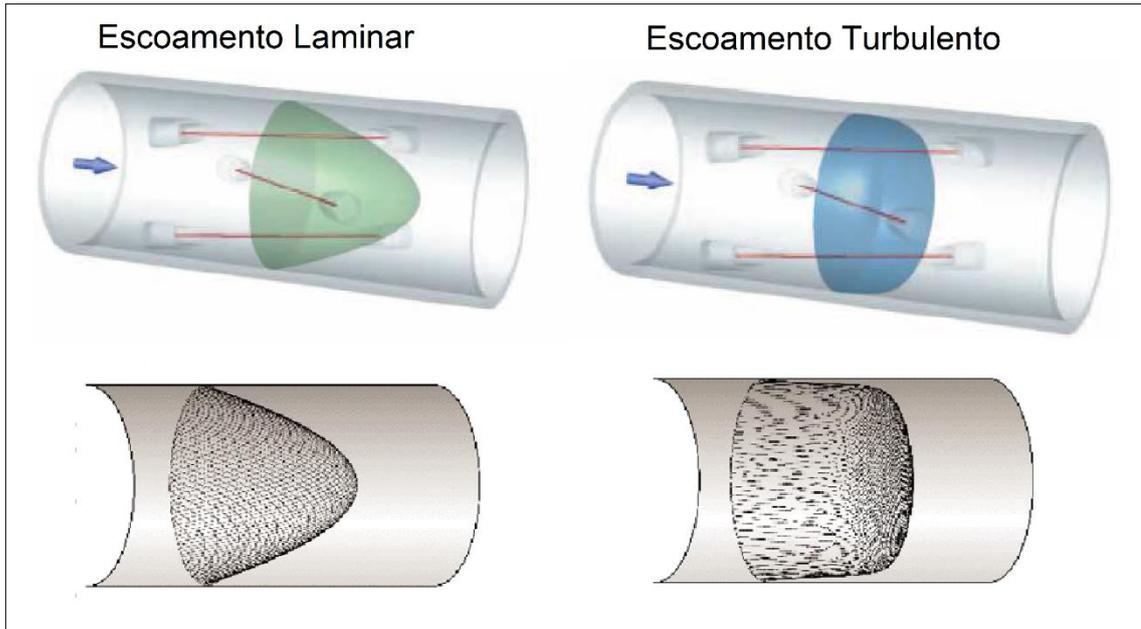


Figura 4: Exemplos de perfis de escoamento para regimes diferentes de vazão. (KHRONE, 2015)

O perfil de velocidade pode ser distorcido devido à presença de curvas ou acidentes de linha na tubulação (válvulas, restrições, medidores, etc.) e, neste caso, o perfil resultante é conhecido como perfil assimétrico ou perturbado. Em instalações industriais, os arranjos podem apresentar mudanças de planos e direção do escoamento que distorcem o perfil. Esse efeito é exemplificado na Figura 5. Deve-se observar que o medidor mede a velocidade média do perfil para inferir a vazão. Em casos de perfis assimétricos, procedimentos matemáticos devem ser implementados a fim de considerar os efeitos da assimetria na relação entre a vazão e a velocidade média.

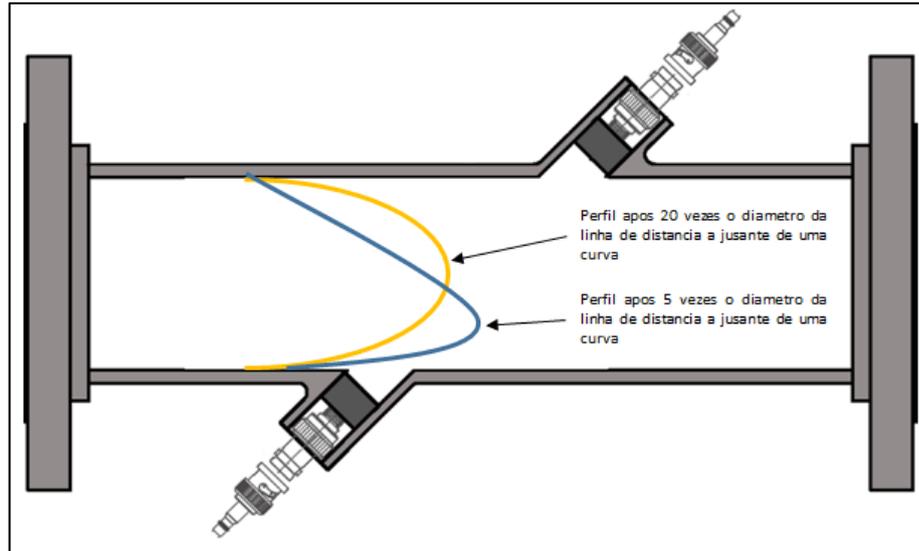


Figura 5: Distorção do perfil causada por um acidente de linha em 5D e 20D.

2.1.6 O Fator de Perfil do Medidor

O medidor ultrassônico de tempo de trânsito mede a velocidade média do pulso ultrassônico ($\overline{u_m}$) ao longo da trajetória para, então, calcular a velocidade média do escoamento na seção transversal ($\overline{u_a}$). Assim, determina-se a equação que correlaciona estas velocidades médias (ISO 12765, 1998).

Segundo a norma ISO 12765 (1998) as equações das velocidades Médias $\overline{u_m}$ e $\overline{u_a}$ são dadas pelas equações (11) e (12):

$$\overline{u_m} = \frac{1}{L} \int_0^L u(l) dl = \frac{1}{\sqrt{1-a^2}} \int_0^{\sqrt{1-a^2}} u(l') dl' \quad (11)$$

$$\overline{u_a} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r u(r) dr = 2 \int_0^1 \frac{r}{R} u\left(\frac{r}{R}\right) d\frac{r}{R} \quad (12)$$

Onde

- R é o raio da seção transversal do tubo;
- L é o comprimento da trajetória do caminho acústico;
- r_0 é a distância do trajetória até a linha de centro do tubo;
- a é a razão $\frac{r_0}{R}$.

As dimensões estão representadas na Figura 6:

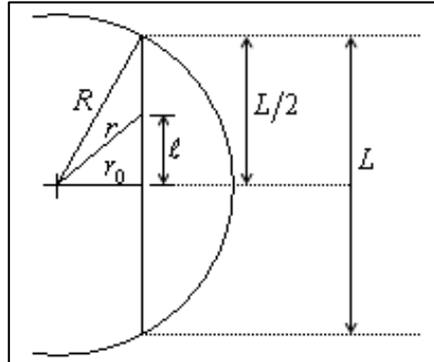


Figura 6: Seção transversal de um tubo

O perfil de velocidade de um escoamento completamente desenvolvido laminar em um duto circular pode ser expresso em função da distância r do ponto em referência ao eixo do tubo, conforme equação (13).

$$u = u_{max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] = 2\bar{u}_a \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (13)$$

A partir das equações de \bar{u}_a (Eq. (12) e u (Eq. (13)) a velocidade média pode ser deduzida, de acordo com a Eq. (14).

$$\bar{u}_m = \frac{1}{\sqrt{1-a^2}} \int_0^{\sqrt{1-a^2}} 2\bar{u}_a \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) dl' = \frac{4}{3} \bar{u}_a (1 - a^2) \quad (14)$$

Como pode ser visto existe uma proporção entre as duas velocidades. Essa proporção é denominado fator de perfil k . Esse fator k pode ser obtido de acordo com a Eq. (15).

$$k = \frac{\bar{u}_a}{\bar{u}_m} = \frac{3}{4(1-a^2)} \quad (15)$$

O medidor objeto do presente estudo opera em regime laminar de escoamento, tem o seu caminho acústico passando pela linha de centro do tubo. A Eq. (15) conduz a um valor constante, conforme Eq. (16).

$$k = \frac{\overline{u_a}}{\overline{u_m}} = \frac{3}{4} \quad (16)$$

2.2 CALIBRAÇÃO

Um processo de calibração pode ser caracterizado pelo conjunto de operações que se estabelecem, sob condições especificadas na avaliação de um instrumento de medição, com referência de outro instrumento de medição da mesma variável de processo e que leituras rastreáveis. Pode-se afirmar que, ao longo do tempo, os medidores de vazão perderão suas características de medição mencionadas no catálogo de referência/manual do fabricante, em função de desgaste das partes, estresse, deformação por esforços estruturais, corrosão, variação das propriedades dos materiais que compõe o processo de medição. Desta forma estes equipamentos devem necessariamente ser calibrados periodicamente para não comprometer a qualidade do processo industrial ao qual estão instalados e também atender aos requisitos da metrologia legal e regulatória (Portaria ANP/Inmetro no.01, 2013).

2.2.1 Calibração de um Medidor Ultrassônico

Segundo a norma API 5.8 (2006), sistemas de medição compostos por medidores ultrassônicos de hidrocarbonetos líquidos necessitam de trechos retos adequados, à montante e à jusante do medidor devido à sensibilidade da tecnologia aos perfis de escoamento.

O valor recomendado para trechos retos a montante do medidor é de comprimento igual ou maior que 20D (diâmetros nominais). Para instalações com um condicionador de fluxo, o trecho reto a montante do medidor deve ser igual ou maior que 10D. O trecho a jusante do medidor deve ter comprimento de 5D e a tomada de pressão e o poço de temperatura devem ficar imediatamente após o trecho a jusante, como indicado na tabela 1.

Tabela 1 - Recomendações de instalação das norma API 5.8 (2006) para sistemas de medição com medidores ultrassônicos.

Item de Instalação	Com Condicionador de Escoamento	Sem Condicionador de Escoamento
Trecho Reto a Montante	10 Diâmetros Nominais	20 Diâmetros Nominais
Trecho Reto a Jusante	5 Diâmetros Nominais	5 Diâmetros Nominais
Tomada de Pressão	Imediatamente após o trecho reto a jusante	
Poço de Temperatura		

Fonte: API 5.8 (API, 2006)

A utilização de trechos retos e condicionadores de escoamento tem por objetivo garantir a formação de perfil de velocidade simétrico e completamente desenvolvido no trecho de medição nas instalações operacionais e nos laboratórios de calibração. Assim, a incerteza de medição devido a diferenças entre a instalação de calibração e operação é minimizada (API, 2006).

As menores incertezas são obtidas utilizando um provador primário como padrão. O volume do provador é determinado em função da resolução do medidor que, para medidores tipo turbina ou deslocamento positivo, está relacionado basicamente com o número de pulsos por unidade de volume, que é função do volume correspondente a uma rotação do rotor (API, 2006).

Os medidores ultrassônicos não têm partes móveis e sua resolução envolve a resolução na medição dos tempos de trânsito, outras características específicas como processamento de sinais e relação sinal-ruído, e até mesmo a configuração do fabricante e do usuário. Por não ter partes móveis, o medidor ultrassônico proporciona um intervalo entre calibrações maior do que medidores tipo turbina ou deslocamento positivo. Entretanto, para ser calibrado, o medidor ultrassônico exige um volume de fluido significativamente maior do que os medidores de outras tecnologias. Para não haver necessidade de aumentar excessivamente o volume do provador para calibração do medidor ultrassônico, pode ser utilizado um método com provador e medidor mestre de transferência, ou utilizar apenas um medidor mestre (API, 2006).

Os medidores ultrassônicos inferem a vazão a partir da velocidade média do perfil. Assim, o fator- k não é um parâmetro intrínseco aos medidores ultrassônicos, ao

contrário, o medidor é configurado para emitir um pulso quando acumula um dado volume e essa configuração pode ser alterada pelo usuário. O medidor ultrassônico é configurado pelos fabricantes com fatores para correção de distorções, devido, por exemplo, ao número de Reynolds (Re) ou rugosidade e, nas calibrações iniciais, esses fatores são ajustados para melhorar a exatidão.

2.3 REPETITIVIDADE

A fim de obter confiança em uma medida, espera-se que a medição possa ser repetida para um mesmo mensurando e apresentar o mesmo resultado. Na prática, as medições apenas se repetem, dentro de uma pequena faixa durante um curto período de tempo e uma faixa maior durante um longo período de tempo ou em circunstâncias diferentes. Espera-se que uma calibração apresente alguma indicação da repetitividade de um instrumento. No entanto, não é provável que uma calibração mostre a reprodutibilidade. A calibração repetida pode, naturalmente, ser realizada talvez ao longo de um período de tempo para mostrar esse parâmetro.

Medidores ultrassônicos são notórios por terem uma repetitividade inferior a outras tecnologias, como os de turbina e placa de orifício. Segundo Zanker (2003) isso se deve a sensibilidade desse medidor em relação a turbulência no escoamento. Por muito tempo a repetitividade e a amostragem foram consideradas uma desvantagem do medidor ultrassônico. No entanto, Zanker mostrou a tecnologia ultrassônica apresenta a capacidade de medir a turbulência e usá-la como parâmetro de diagnóstico da operação do aparelho.

2.4 LINEARIZAÇÃO

A linearização é um termo usado para descrever o processo de reduzir a variação na curva de calibração para um intervalo de vazão, sendo algumas vezes referida como “caracterização”. A linearização no geral é realizada para melhorar a incerteza global do medidor (COUSINS, 2014). Um exemplo típico é tomar a curva de calibração

para um medidor de turbina, mostrado na figura 7, e linearizá-lo para "melhorar" o desempenho do medidor. A curva é mostrada como uma função do fator k . Nesse caso, o fator k é a razão da leitura do medidor para a leitura de calibração (COUSINS, 2014).

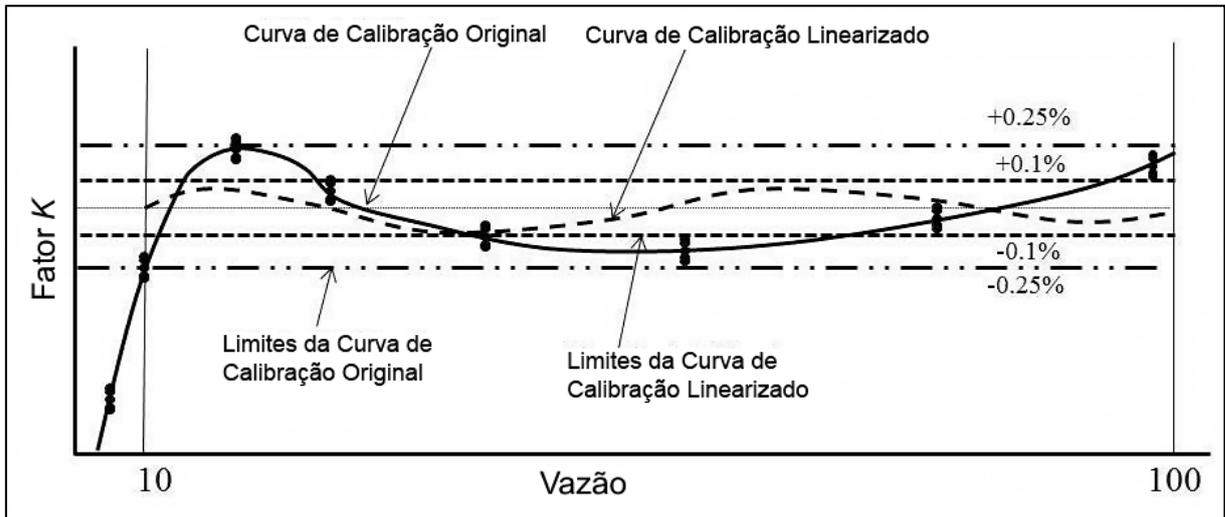


Figura 7: Linearização de um medidor tipo Turbina (COUSINS, 2014)

A curva é obtida calibrando o medidor em diferentes níveis de vazão em toda a sua faixa de medição admissível. Para obter a linearidade, um intervalo deve ser associado à curva. Na curva hipotética da Figura 7, foi escolhido um intervalo onde a variação alcançada é $\pm 0,25\%$. É prática comum linearizar o medidor no local da sua operação usando um computador de vazão e um ajuste de curva para adequar os dados mais próximos de uma linha reta. Na prática, como indicado, não se obtém uma linha perfeitamente reta mas uma aproximação. O ajuste dessa curva é mostrada como a representação mais próxima de uma reta, com linearidade de $\pm 0,1\%$ (COUSINS, 2014).

2.4.1 Linearização de Medidores Ultrassônicos

De acordo com Cousins (2014), são consideradas três áreas distintas, em função do número de Reynolds e da natureza do fluido, a fim de estabelecer a linearização de medidores ultrassônicos por tempo de trânsito usados para transferência de custódia.

As três áreas onde a linearização é usada com diferentes efeitos são:

- Número de Reynolds elevado, acima de 10^6 : normalmente essa condição inclui Gases, GNL, etc.;
- Número de Reynolds médio, entre 10^4 e 10^6 : condição do escoamento para a maioria dos hidrocarbonetos líquidos;
- Número de Reynolds baixo, abaixo de 10^4 : incluindo os óleos pesados, cuja produção tem aumentado significativamente nos tempos atuais.

No caso de número de Reynolds elevado, os medidores de gás operam em números de Reynolds mais altos, até 10^7 e geralmente são lineares dentro da especificação aceitável para medidores de gás na aplicação de transferência de custódia, $\pm 0,3\%$ (ANP/INMETRO, 2013). Embora operam muitas vezes dentro das especificações, eles são quase inevitavelmente linearizados para melhorar o desempenho.

A maioria dos medidores atuais se enquadram na condição do número de Reynolds médio, e é geralmente onde os hidrocarbonetos encontraram seu maior valor comercial. O desempenho dos medidores depende do projeto, do número de caminhos acústicos, da configuração do caminho e, possivelmente, da instalação do transdutor. É considerado que o problema principal com todos esses fatores é que a não-linearidade induzida por eles depende do número de Reynolds. O desafio é então determinar como corrigir esse fenômeno.

Os escoamentos laminares e de transição se enquadram no caso de baixo número de Reynolds. Na faixa de transição, uma importante questão é a não-linearidade, combinada com a dificuldade de repetitividade. A falta de repetitividade é devido à grande variação na turbulência e às mudanças de perfil nessa faixa de Reynolds. A fim de melhorar a linearização, normalmente são usados condicionadores de fluxo. No entanto, a linearização nessa faixa de Reynolds apresenta elevada incerteza.

Enquanto o escoamento é laminar, o perfil está sujeito a variações com o aumento do número de Reynolds assim como problemas práticos como gradientes de temperatura. Para medidores ultrassônicos de um único caminho acústico, a

linearidade varia significativamente durante as variações no perfil. Assim as correções numéricas usando o número de Reynolds tornam-se mais críticas nesta faixa.

2.4.2 Métodos de Linearização de Medidores Ultrassônicos

Existem vários métodos para determinar o número de Reynolds do medidor em condições de fluxo, tais como:

- Ajustar novamente fatores de ponderação dos caminhos acústicos;
- Razão de “achatamento” do perfil de velocidade de escoamento;
- Correção direta do número de Reynolds;

Os dois primeiros métodos necessitam de mais de um caminho acústico para realizar a sua linearização, já o terceiro pode ser aplicado a medidores com um caminho acústico. A correção direta do número de Reynolds depende basicamente dos fatores usados no cálculo desse adimensional.

2.5 PECULIARIDADES NA MEDIÇÃO ULTRASSÔNICA EM ÓLEOS PESADOS

Para os medidores mecânicos convencionais, a medição de vazão de elevada viscosidade é limitada por esforços sobre mancais, nas partes móveis e intrusivas. Assim, a tecnologia ultrassônica para medição de vazão de um óleo pesado apresenta características atrativas para a aplicação. Entretanto, a tecnologia também apresenta fatores limitantes para a sua aplicação. Um desses é a incerteza relativamente elevada em relação a outras tecnologias. Segundo Hogendoorn et al. (2009) as principais questões que elevam a incerteza em processos de medição por ultrassom são:

- Forte atenuação do sinal acústico;
- Perfil velocidade instável na região de transição laminar-turbulenta;

- Forte dependência da viscosidade com a temperatura;
- Forte influência da dissipação viscosa para a variação da temperatura;
- Necessidade de elevada precisão do tempo de trânsito.

2.5.1 Atenuação Do Sinal Acústico

A atenuação do sinal será afetado por dois fatores:

- Atenuação acústica
- Lei do inverso do quadrado

As ondas acústicas originadas pelos pulsos ultrassônicos geram movimentos de pequena amplitude no fluido. Estes “micro movimentos” são atenuados pelo atrito molecular que está diretamente relacionado à viscosidade. Devido à atenuação no meio, a amplitude da pressão acústica (P) diminui exponencialmente com a distância (L), segundo a Lei de Lambert-Beer (Eq. 17)

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha \cdot L} \quad (17)$$

Onde α é a coeficiente de atenuação calculado através da formula (STOKES, 1845):

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2 \cdot \rho \cdot c^3} \cdot \left[\frac{4}{3} \cdot \eta_{dyn} + \eta_{bulk} \right] \quad (18)$$

e ω é a frequência (Hz) ρ é a massa específica (kg/m), η_{dyn} é viscosidade dinâmica (g/(m·s)), η_{bulk} é a viscosidade *bulk* (g/(m·s)).

A viscosidade *bulk* (também denominada segundo coeficiente de viscosidade ou viscosidade dilatacional ou viscosidade de volume) torna-se importante apenas para efeitos tais onde a compressibilidade do fluido é essencial (CRAMER, 2012). A viscosidade do volume está principalmente relacionada à energia vibracional das moléculas. É zero para gases monatômicos com baixa densidade, mas pode ser grande para fluidos com moléculas maiores. A viscosidade *bulk* é importante para

descrever a atenuação do som em gases moleculares, e a absorção de energia sonora no fluido depende da frequência do som, isto é, a taxa de compressão e expansão do fluido. A viscosidade bulk também é importante para descrever a dinâmica dos fluidos contendo bolhas de gás.

No caso de óleos pesados, a atenuação do sinal acústico recebido resultará em uma razão reduzida entre os sinais emitidos e recebidos e pode até acarretar na perda completa de sinal. Por observação da Equação 17, conclui-se que a atenuação do sinal acústico está diretamente relacionada ao diâmetro do medidor de fluxo e aumentará para grandes diâmetros.

2.5.2 Perfil Velocidade Instável Na Região De Transição Laminar-Turbulenta

A tecnologia ultrassônica por tempo de trânsito com vários canais acústicos baseia-se na medição da velocidade do líquido em diferentes posições do perfil de velocidades do escoamento. A formação de diferentes perfis de velocidade podem influenciar a incerteza dos medidores ultrassônicos. Como citado anteriormente, a identificação de perfis de velocidade é função do número de Reynolds e existem fatores para correção da velocidade medida. No caso de escoamentos laminares, a velocidade máxima é duas vezes a velocidade média do perfil. Em escoamentos turbulentos, esse fator varia com a velocidade. Para a fase de transição esse fator não pode ser estimado em função apenas do número de Reynolds.

A fase laminar-turbulenta ocorre em Reynolds acima de 10^3 , onde o fluxo laminar se torna instável e turbilhonamentos começam a surgir. Esses turbilhonamentos são transportados junto com o fluxo e podem crescer em tamanho, provocando um fluxo intermitente instável chamado de área de transição. O comportamento e frequência destes turbilhonamentos são estocásticos. Dependem de fatores externos, como bordas afiadas locais, diferenças locais de temperatura, vibrações induzidas na tubulação, etc. No intervalo de transição, a forma do perfil de fluxo é imprevisível, resultando em elevada incerteza na medição.

2.5.3 Dependência Da Viscosidade com a Temperatura

Uma vez que os óleos altamente viscosos são transferidos em temperaturas elevadas, as flutuações de temperatura tem que ser consideradas como um parâmetro operacional importante e muito influente na medição de vazão. Uma consequência direta da variação de temperatura é a mudança de viscosidade, especificamente para óleos brutos altamente viscosos e, como resultado, o número de Reynolds e, por consequência, o perfil de velocidade será alterado juntamente com a temperatura.

Outro efeito frequente é a estratificação do perfil de temperatura sobre a seção transversal do tubo, provocando um gradiente de viscosidade gradualmente variável (estratificada) com o raio do tubo e que leva a um perfil de velocidade indefinido.

Ademais, outro desafio é a calibração usando produtos altamente viscosos. Atualmente não existem instalações de laboratório onde os medidores de fluxo de grande porte podem ser testados ou calibrados com produtos altamente viscosos com uma referência confiável. Isso exigiu o desenvolvimento de um método de calibração alternativo. Uma solução para isso foi proposta na calibração de medidores de vazão ultrassônicos usando um método denominado calibração de Reynolds (HOGENDOORN, 2007).

2.5.4 Alta Precisão Do Tempo De Trânsito

Como mencionado nas seções anteriores, produtos petroquímicos líquidos tem velocidades do som elevadas em relação a velocidades de escoamento industriais. Isso significa que os tempos de trânsito entre os transdutores serão significativamente menores e, então, a diferença entre esses tempos é bastante reduzida. Usando a Equação 19 pode-se estimar a precisão da medição do tempo de trânsito para atingir incertezas de 1%.

$$\Delta t = \frac{2L\vec{u}_m \cos \theta}{c_0^2} \quad (19)$$

Considerando a Eq. 19 na medição de vazão de um óleo ($c_0 \cong 1400$ m/s) em um tubo ($L = 0,15$ m; e $\theta=45^\circ$) com velocidades relativamente baixas de 1m/s, o tempo de trânsito pode atingir a ordem de 100 μ s, e a diferença de tempo de trânsito (Δt) é da ordem de 100 ns. Uma resolução de 0,1% em Δt indica uma operação na faixa de 100 ps.

Para alcançar uma maior precisão com essas grandezas, faz-se necessário o uso de tecnologias de geração e detecção de sinais mais avançadas. Um método que pode ser utilizado para obter medições com a mesma qualidade sem a demanda de tais recursos tecnológicos, é o aumento do caminho acústico percorrido. No entanto, este recurso pode ser inviável em determinadas situações, pois aumenta a atenuação acústica, conforme Equação 17, sendo necessário aumentar, então, a potência do transdutor.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como citado no capítulo anterior, alguns dos desafios dos medidores ultrassônicos que influenciam nas incertezas deste medidor são:

- A precisão dos instrumentos que medem o tempo de trânsito, especialmente em líquidos;
- As propriedades termodinâmicas dos fluidos (atenuação do sinal ultrassônico, por exemplo);
- O perfil de velocidades do escoamento;
- A deformação da onda ultrassônica causada pela influência do escoamento sobre o caminho acústico.

3.1 HISTÓRICO DOS MEDIDORES ULTRASSÔNICOS

Há vários relatos citando a primeira patente em relação a tecnologia dos medidores de vazão por princípio ultrassônico por tempo de trânsito. Segundo Lawrence (1989) o mais antigo foi registrado por Rutten (Alemanha) em 1931. No entanto, mesmo com o conhecimento teórico, a tecnologia que a tornaria viável para medição comercial só se efetivou na década de 1960 com o surgimento dos circuitos integrados.

Uma das primeiras empresas a fornecer comercialmente esse tipo de medidor foi a Tokimec em 1963 (YODER, 2009). Embora uma tecnologia inovadora para a época, os medidores ultrassônicos apresentavam vários problemas a serem resolvidos até serem aceitos no mercado, devido principalmente a escassez nos estudos dessa tecnologia aplicada.

Inicialmente, a tecnologia ultrassônica foi aplicada para medição de água, mas nos anos 80 os medidores ultrassônicos migraram para a indústria do petróleo, para a medição de vazão de óleo e gás. Na década de 90 seu desempenho melhorou o suficiente para ser comercializado em larga escala. Segundo o Yoder (2009), em

2008, 60% dos medidores ultrassônicos vendidos eram para medição de gás, e 40%, de líquidos.

Yamamoto (1972) e Anderson (1976) foram os primeiros a realizar estudos experimentais de medidores ultrassônicos em dutos fechados para escala industrial (medição de escoamento de água de esgoto). Anderson relatou que “obteve precisões de medição de 2 a 5% em condições de variação rápida de níveis de vazão, sobretaxas e condições de *back-up*”. Foi observado também a superioridade deste medidor em relação a outros pela ausência de falhas no processo durante 18 meses do projeto, e a necessidade de menos manutenção. Esse estudo demonstra a qualidade e precisão dos medidores ultrassônicos desta época quando aplicados aos processos industriais e, também, demonstra aspectos importantes da tecnologia que começaram a tornar o medidor mais confiável em relação a outras tecnologias.

Um estudo similar a aquele realizado por Anderson (1976) foi feito por Sakariassen *et al.* (2000), quando descrevem um teste de longa duração em um circuito de gás natural visando conhecer as possibilidades e limitações dos medidores ultrassônicos. No final desse teste, as diferenças entre os valores indicados pelos medidores ultrassônicos e os valores indicados por medidores tipo turbina ficaram na faixa de $\pm 0,25\%$. O medidor ultrassônico se mostrou mais robusto que a turbina, pois apresentou operação mais constante, exigindo menos manutenção.

Em 1998, a *American Gas Association* publicou o relatório AGA-9 (1998). Esse relatório definiu uma série de parâmetros mínimos e práticas recomendáveis para o cenário dos medidores por ultrassom para gás natural. Neste relatório recomenda-se o uso da tecnologia para transferência de custódia de gás natural. Foi esse texto também que estabeleceu as especificações dos limites de tolerância de 1%, no máximo, para medidores pequenos e 0,7 %, para medidores maiores. O relatório mostra quanto a confiabilidade do medidor aumentou desde a sua concepção, sendo usado para medir *commodities* de alto valor agregado, onde o erro porcentual poderia significar elevado prejuízo financeiro.

3.2 TEMPO DE TRÂNSITO E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DOS FLUIDOS

A precisão no cálculo de tempo de trânsito é fundamental para a qualidade da medição por tecnologia ultrassônica, principalmente na medição de fluidos líquidos, considerando que a diferença no tempo de trânsito em líquidos é muito menor devido à elevada velocidade do som nesse meio. Delsing (1992) avaliou, com êxito, uma técnica eletrônica chamada de *sing-around* para redução da incerteza de medição de vazão em baixas velocidades atingindo incertezas menores que 1%.

Folkestad & Mylvaganam (1993) trabalharam na redução de erro associado ao cálculo do tempo de trânsito com a introdução do método *Chirp Excitation* em conjunto com o método de *Continuous Wave* onde obtiveram incertezas de 3%, porém para uma faixa de medição maior extremamente elevada, típica de escoamento de gás de tocha.

Vaterlaus (1995) descreveu um método simples para calcular o tempo de trânsito para minimizar a resolução dos resultados. Para isso ele calculou uma média dos tempos de trânsito de uma sequência de pulsos ultrassônicos. Assim, a resolução necessária e o número de pulsos utilizados no cálculo da média determinam a velocidade mínima da faixa de trabalho do medidor. Aziz (1996) também propôs um algoritmo simples baseado na diferença acumulada dos tempos de trânsito na tentativa de reduzir o erro dessa medição. Essa metodologia é muito aplicada na instrumentação, conhecida popularmente como média móvel.

Nemade (1998) utilizou um método menos convencional na tentativa de melhorar precisão dos medidores ultrassônicos. A sua equipe utilizou uma montagem geométrica perpendicular a vazão do fluido e a correlação cruzada dos sinais de dois sensores.

Nygaard *et al.* (2000) notaram uma relação entre a resistência de um transmissor e a frequência emitida. Para compreender esse fenômeno, os pesquisadores estudaram o processo de emissão da onda ultrassônica levando em consideração a impedância

do cristal piezelétrico e a frequência de ressonância. No trabalho foi concluído que diferentes faixas de frequências ofereciam menores resistências de pico. No entanto estes resultados sofriam variação em relação a densidade do fluido sendo necessários mais estudos para confirmar o fenômeno.

Dell'Isola *et al.* (1997) estudaram efeitos de calibração e instalação na incerteza dos medidores ultrassônicos de gás úmido. Neste estudo, foram relatados efeitos de histerese consistentes em quedas bruscas de pressão mas, de um modo geral, estas propriedades não afetaram significativamente a incerteza do instrumento. Observaram uma diferença média de 1% entre um medidor ultrassônico por tempo de trânsito e o medidor de placa de orifício.

Eren (1998) discutiu os parâmetros de medidores ultrassônicos que afetavam a exatidão do medidor. Mais especificamente, a atenuação do sinal ultrassônico ocorre devido a sólidos e bolhas suspensas no fluido. Assim, propôs a utilização de medidores de múltiplos caminhos acústicos para eliminar esse erro. Eren (2002) não estava satisfeito com a conclusão e então estudou a atenuação das ondas ultrassônicas pela presença de bolhas de ar. A sua equipe realizou uma análise mais aprofundada dos sinais, usando a técnica de transformada *wavelet*, e chegou a um algoritmo capaz de diminuir o erro na medição do tempo de trânsito, assim como prever a densidade e tamanho das bolhas que causam a distorção.

Com o avanço da potência de cálculo dos computadores, Ma *et al.* (2012) estudaram a aplicação de um algoritmo mais complexo baseado no método *Spline* de interpolação para melhorar a precisão no cálculo do tempo de trânsito. Segundo os autores, o algoritmo desenvolvido melhora a precisão em até uma ordem de grandeza, mas fica mais suscetível a erros de posicionamento dos transdutores.

Tawackolian *et al.* (2013) estudaram os efeitos sistemáticos no erro de um medidor ultrassônico em relação ao aumento de temperatura. A sua equipe demonstrou que um modelo linear para compensação do erro causado pelo aumento de temperatura foi suficiente para mantê-lo dentro das especificações de calibração.

3.3 CAMINHO ACÚSTICO E PERFIL DE VELOCIDADE

Hemp (1982) foi um dos primeiros a estudar com mais profundidade o teorema de medidores ultrassônicos por tempo de trânsito, onde aplicou a técnica de operação recíproca, que usa a reciprocidade eletroacústica para se obter uma relação entre as tensões e as correntes nos terminais do transdutor e a velocidade do fluido. Segundo o Hemp, essa técnica poderia ser aplicada a medidores onde o comprimento de onda e a largura de feixe (que normalmente criam erros desprezíveis) são suficientemente elevados para influenciar na medida final. Com a técnica é possível usar feixes de som mais largos em medidores, pois proporcionam médias melhores de perfis de velocidade. Esse estudo foi importante, pois trata um problema fundamental do medidor ultrassônico, que utiliza a média simples do perfil de velocidade para calcular a vazão.

O trabalho realizado por Mylvaganam (1989), não só melhorou a precisão no cálculo do tempo de trânsito mas também avaliou a faixa de funcionamento do medidor ultrassônico utilizando a técnica híbrida de calcular o tempo de trânsito que utilizava o já conhecido *continuous wave* e a mais nova técnica de *Chirp*. Com esse método inovador, foi possível obter incertezas aceitáveis em escoamentos de alta velocidade assim como manter a exatidão em baixas velocidades aumentando a faixa de medição dos medidores ultrassônicos. A fim de compensar a deformação do caminho acústico e reduzir o erro do medidor, Mylvaganam (1989) também investigou a implementação de uma técnica denominada *ray rescue angle for the orientation*.

Holden e Peters (1991) foram um dos primeiros a realizar estudos experimentais que avaliaram a incerteza de medidores ultrassônicos de gás em dutos pressurizados em relação ao perfil de velocidade (mais especificamente o efeito *swirl*). Para isso investigaram diferentes acidentes de linha a montante do ponto de medição comparando a acurácia da medição final com as normas do indústria. Relataram que medidores de 4 caminhos acústicos foram capazes de realizar medidas com uma acurácia aceitável com acidentes de linha com até 10 diâmetros de distância do

ponto de medição. Com esse estudo o mercado obteve um ponto de referência para a instalação dos seus medidores visando a economia de espaço.

Vulovic *et al.* (1995) também avaliou a utilização de múltiplos caminhos acústicos em medidores ultrassônicos como forma de melhorar seu desempenho, pois essa técnica compensava os distúrbios de acidentes de linha no perfil de velocidade. Muitos outros pesquisadores como Grimely (1996; 1998), Dell'Isola (1997), e Sakariassen (1997) também apostaram na utilização de múltiplos caminhos acústicos e obtiveram resultados promissores. Com esses resultados essa técnica ficou conhecida como padrão para correção de erros causados por acidentes de linha, tanto que a AGA (1998) recomendou o uso desses medidores para transferência de custódia de gás natural.

Brown (1996, 1997) juntamente com o National Engineering Laboratory – NEL, instituição de referência de vazão no Reino Unido, iniciaram um projeto investigativo visando caracterizar o desempenho de medidores ultrassônicos em uma gama de condições operacionais. Nos experimentos de 1996, foram constatados que os medidores que empregam apenas um caminho acústico eram mais sensíveis a alterações de perfil causadas pelas mudanças de viscosidade. Concluiu também que a imprecisão da compensação do perfil na transição do escoamento turbulento para o escoamento laminar pode resultar em incertezas de até $\pm 20\%$. Na publicação de 1997 foi investigado o efeito de várias fases no escoamento, assim como diferentes fluidos, e foi observado que efeito da dispersão e atenuação é significativamente maior nos escoamentos de óleo/gás quando comparados com óleo/água.

Willatzen (2003; 2008) também descreve os erros de medidores ultrassônicos causados pela simplificação da sua equação de medição de velocidade. Ele discute no seu primeiro artigo que a equação não considera a não linearidade da propagação do som em gases. O segundo artigo levanta uma outra equação simples e, através da calibração, consegue eliminar esse erro. Cordova (2015) também desenvolveu estudo relacionado a escoamentos de gases com Reynolds de até 4×10^6 , onde o erro do caminho acústico é significativo. Para mitigar esse erro ele propõe uma equação com soma ponderada de vários caminhos acústicos.

Houve outras tentativas de correção similares, como o estudo de Ruppel e Peters (2004) que tentou equacionar o efeito de acidentes de linha a montante dos medidores por ultrassom de gás natural. O intuito desse estudo foi criar medidores “inteligentes” com correção automática destes erros, diminuindo a seção reta de tubos necessários a serem instalados antes do estabelecimento de um escoamento completamente desenvolvido.

Butkus *et al.* (2004) aproveitaram a técnica criada por Mylvaganam (1989) e apresentaram um estudo sobre a utilização de transdutores eletroacústicos com padrão de diretividade controlável em medidores ultrassônicos de tempo de trânsito para gás, visando melhorar a exatidão e aumentar a faixa desses medidores. Existe um comprometimento entre potência do sinal, largura do feixe ultrassônico e exatidão do medidor. Para melhorar a exatidão é necessário aumentar a potência transmitida e diminuir a largura do feixe; entretanto, para aumentar a faixa do medidor, é necessário aumentar a largura do feixe, o que leva a diminuir a potência transmitida. Em um medidor operando em diâmetro de 16 polegadas (0,4 m) em escoamento turbulento de ar e velocidade média de 60m/s, o ângulo de compensação de desvio (φ) chega a $9,13^\circ$ e $7,50^\circ$, para θ igual a, respectivamente, 60° e 45° . Como a largura do feixe ultrassônico é de apenas $\pm 1,87^\circ$, concluíram que, para operar com faixa ampla (de 0,05 a 60 m/s), é necessário utilizar o transdutor com padrão de diretividade controlável.

Jung & Seong (2005) desenvolveram um método novo de estimar o fator de correção de perfil de velocidade. No estudo desenvolvido os autores alegaram atingir uma incerteza de 0,33%, metade da incerteza original do medidor ultrassônico. O método desenvolvido utiliza uma função logarítmica de ajuste de curva entre os valores medidos do medidor ultrassônico e de referência (tubo de Venturi).

Wang *et al.* (2012) avaliaram experimentalmente a quantidade de caminhos acústicos em relação a exatidão de um medidor ultrassônico instalado na Barragem das Três Gargantas (maior hidrelétrica do mundo no período de publicação). Foi observado que há uma melhora na incerteza com o aumento de caminhos acústicos,

mas este comportamento estagnou a partir de 7 caminhos. O medidor foi capaz de fornecer medições com menos de 1% de incerteza.

Weissenbrunner (2016) avaliou a influência das condições a montante dos medidores ultrassônicos no erro das medições. Observou erros de mais de 3% para acidentes do tipo *double elbow* a 20 diâmetros de distância do ponto de medição e defende o uso de condicionadores de fluxo. Esse resultado se diferencia muito dos resultados prévios de Holden e Peters (1991), pois Weissenbrunner utilizava medidores ultrassônicos de um único caminho acústico. Com isso, pode ser observado a importância do perfil de velocidade na influência da incerteza final do instrumento.

3.4 MEDIDORES ULTRASSÔNICOS PARA ÓLEOS PESADOS

Os medidores ultrassônicos para líquidos estão ganhando popularidade para a medição precisa de produtos petrolíferos. Na América do Norte, o primeiro “standard” elaborada pela API (American Petroleum Institute) foi emitida em fevereiro de 2005 chamada "Medição de hidrocarbonetos líquidos por medidores de vazão ultrassônicos usando tecnologia de tempo de trânsito". Esse padrão de medição aborda tanto produtos refinados de petróleo quanto aplicações de petróleo bruto. Foi elaborada principalmente para tratar questões de transferência de custódia, mas nos dá recomendações para a instalação e operação em outras aplicações.

Mesmo depois dessa publicação, Kalivoda *et al.* (2005) afirmaram que esses medidores necessitavam de mais conhecimento quantitativa antes da sua aceitação no mercado, especialmente em relação aos hidrocarbonetos líquidos. Para isso, a sua equipe investigou alguns fatores que influenciam a medição precisa do petróleo usando medidores ultrassônicos como a atenuação de sinal. Concluíram que a atenuação ultrassônica não é linear em relação a viscosidade dinâmica, mas há uma tendência de aumentar com o aumento desta propriedade. Isso implica que para óleos mais pesados será necessário uma potência inicial maior no sinal ultrassônico

para alcançar níveis de SNR (*Signal to Noise Ratio*) suficientes para atingir níveis de precisão aceitáveis.

Brown *et al.* (2006) investigaram a resposta do medidor a variações significativas no perfil de velocidade. Com o uso de um medidor de 8 caminhos acústicos atrelado a um algoritmo de correção de perfil de velocidade dinâmico mostraram que é possível obter incertezas de menos de 0,3% mesmo com efeitos de acidentes de linha. Vale ressaltar que os testes foram feitos com vazões de 70l/s-420l/s com Reynolds acima de 10^5 .

Hogendoorn *et al.* (2007) estudaram um método novo de calibração de medidores ultrassônicos para líquidos criogênicos denominado calibração de Reynolds que foi reconhecido pelo NMI (Instituto de Medição dos Países-Baixos). A sua equipe citou o potencial de usar esse mesmo método para calibrar medidores de óleos pesados.

Hogendoorn *et al.* (2009) destacam a atenuação acústica do sinal ultrassônico pelo fluido, o efeito do baixo número de Reynolds (no perfil laminar) e os desvios da temperatura no líquido viscoso. Indicam que é importante, para medidores ultrassônicos operando com produtos viscosos, a influência das instalações e as possibilidades de calibração e verificação.

Cousins (2014) faz uma análise aprofundada sobre a influência da linearização, que ocorre durante a calibração, na incerteza de medidores em geral. Para medidores ultrassônicos, ele discute a relação dessa linearização com diferentes números de Reynolds, ainda para líquidos, pois normalmente se encontram em fases de transição de um escoamento laminar para turbulento. Essa fase de transição prejudica a repetitividade do instrumento e com isso a calibração

4 CALIBRAÇÃO E INCERTEZAS NO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

4.1 CALIBRAÇÃO

A calibração de medidores de vazão consiste em submeter o medidor em teste e outro medidor de referência, instalados em série na tubulação, a um determinado escoamento, e comparar os valores indicados pelo medidor com os valores da referência. Para a calibração do medidor MOPUS foram seguidas as orientações da norma API MPMS 5.8 (2005), que descreve a medição de hidrocarbonetos líquidos por tecnologia ultrassônica. Segundo o texto, é necessário estabelecer a leitura de zero e ganho do medidor comparado a um medidor de referência. O medidor de referência utilizado na planta laboratorial é um medidor do tipo deslocamento positivo por engrenagens ovais. Esse método está descrito na norma API MPMS 4.5 (2010) em conjunto com a norma API MPMS 20.1 (1993). O cálculo dos zeros e ganhos é executado através de um processo de regressão linear.

4.2 INCERTEZA

A medição é um processo de obtenção experimental do valor de uma quantidade. A quantidade que pretendemos medir é chamada de mensurando. Em princípio, o objetivo de uma medida é obter o valor verdadeiro do mensurando. Todos os esforços são feitos para otimizar o procedimento de medição de tal forma que o valor medido seja o mais próximo possível do valor verdadeiro. No entanto, o resultado de medição será apenas uma estimativa do valor real e o valor verdadeiro real sempre permanecerá desconhecido. Portanto, não é possível saber exatamente o quão perto do valor medido está do valor verdadeiro - uma estimativa sempre tem alguma incerteza associada a ele.

A diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro é denominada erro. O erro pode ter sinal positivo ou negativo. O erro pode ser considerado como sendo

composto de duas partes - erro aleatório e erro sistemático. Como o valor verdadeiro, o erro exato não é conhecido. Portanto, não pode ser usado na prática para caracterizar a qualidade do nosso resultado de medição.

A qualidade do resultado da medição, sua precisão, é caracterizada por incerteza de medição (ou simplesmente incerteza), que define um intervalo em torno do valor medido C_{Medido} , onde o valor verdadeiro $C_{Verdadeiro}$ se encontra com uma probabilidade estimada. A incerteza de medida U em si é a metade da largura desse intervalo e é sempre não-negativa. A Figura a seguir ilustra isso:

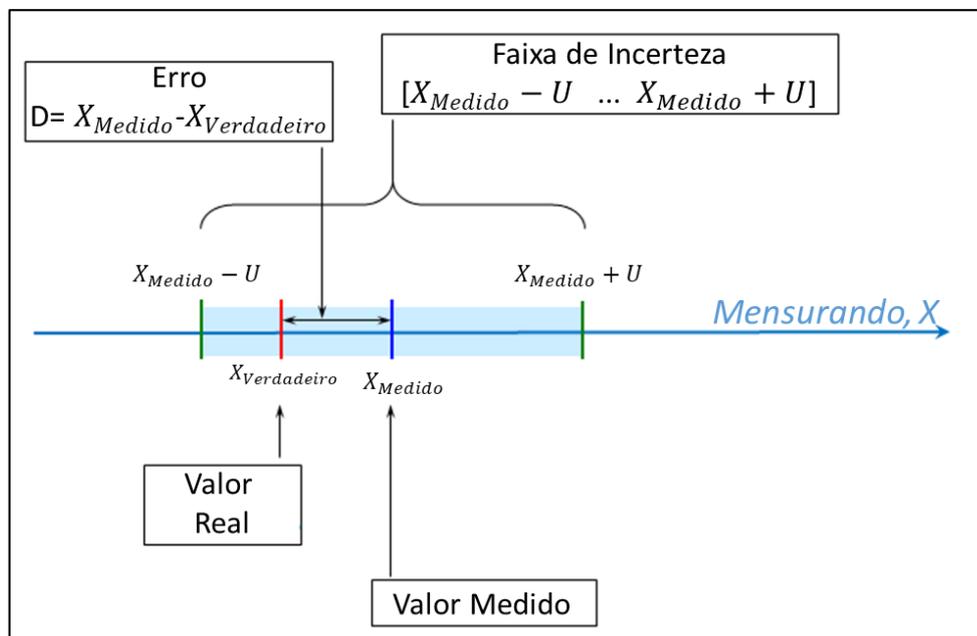


Figura 8: Esquema de Exemplo de Incerteza

A incerteza de medição está sempre associada a alguma probabilidade, geralmente não é possível definir o intervalo de incerteza de tal maneira que o valor verdadeiro esteja dentro dele com 100% de probabilidade.

A incerteza de medição descrita acima é também chamado de incerteza de medição absoluta. Isso significa que a incerteza de medição é expressa nas mesmas unidades que o mensurando. Em alguns casos é mais útil expressar a incerteza de medição como incerteza de medição relativa, que é a razão entre os U_{abs} de incerteza absoluta e o valor medido y :

$$U_{rel} = \frac{U_{abs}}{y} \quad (19)$$

A incerteza relativa é uma quantidade adimensional, que às vezes também é expressa em porcentagem.

A incerteza de medição é diferente do erro, pois não expressa uma diferença entre dois valores e não possui um sinal. Portanto, não pode ser usado para corrigir o resultado da medição e não pode ser considerado como uma estimativa do erro. Em vez disso, a incerteza de medição pode ser considerada como uma estimativa, por exemplo, a maior diferença absoluta provável entre o valor medido e o valor verdadeiro. Com alta probabilidade, a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro é, de fato, menor que a incerteza da medição. No entanto, existe uma baixa probabilidade de que essa diferença possa ser maior que a incerteza da medição.

4.2.1 Fontes de Incerteza

Resultados de medição têm incerteza, pois existem fontes de incerteza. Estes são efeitos que causam desvios do valor medido do valor verdadeiro. Se o procedimento de medição usado é bem conhecido, as fontes de incerteza mais importantes geralmente são também conhecidas. Devem ser envidados esforços para minimizar e, se possível, eliminar fontes de incerteza ao otimizar o procedimento de medição (procedimento de análise). As fontes de incerteza que não podem ser eliminadas (e nunca é possível eliminar todas as fontes de incertezas) devem ser levadas em consideração na estimativa de incerteza.

De forma um tanto simplificada, as fontes de incerteza podem ser divididas em efeitos aleatórios e efeitos sistemáticos. O esquema a seguir ilustra isso (círculos azuis indicam valores verdadeiros, círculos amarelos indicam valores medidos):

Tabela 2 - Exemplo de Efeitos Aleatórios e Sistemáticos

Distribuição Da Medição	Efeitos Aleatórios	Efeitos Sistemáticos	Incerteza
1) 	Forte	Forte	Alta
2) 	Forte	Fraco	Média
3) 	Fraco	Forte	Média
4) 	Fraco	Fraco	Baixa

Os efeitos aleatórios causam a diferença entre os resultados de medição repetidos (e, portanto, também do valor verdadeiro). No entanto, se um grande número de medidas repetidas forem feitas, o valor médio terá pouca influência dos efeitos aleatórios (distribuição 2 na tabela). Assim, a influência de efeitos aleatórios pode diminuir ao aumentar o número de repetições. Os efeitos sistemáticos causam desvio de todas as medidas na série na mesma direção pela mesma magnitude. Aumentar o número de repetições não permite diminuir a sua influência (distribuição 3 na tabela).

Em princípio, é desejável determinar a magnitude e a direção dos efeitos sistemáticos e corrigir os resultados das medições para os efeitos sistemáticos. No entanto, muitas vezes pode ser tão difícil e intensivo em trabalho, que torna-se impraticável. Portanto, em muitos casos, em vez de determinar com precisão os efeitos sistemáticos e corrigi-los, suas magnitudes possíveis são estimadas e são consideradas como fontes de incerteza.

4.2.2 Distribuição Normal e Incerteza

Todas medições são, do ponto de vista das estatísticas matemáticas, quantidades aleatórias. Quantidades aleatórias podem ter valores diferentes, por exemplo quando se mede um volume nominal de 10 litros várias vezes, todos os volumes medidos são ligeiramente diferentes. Se um número suficientemente grande de medidas repetidas forem realizadas e se os volumes forem plotados de acordo com

a frequência com que se encontram, torna-se evidente que, embora aleatório, os valores seguem uma distribuição.

Existem numerosas funções de distribuição e muitas delas são encontradas na natureza, ou seja, descrevem certos processos naturais. Na ciência da medição, a função de distribuição mais importante é a distribuição. Sua importância decorre do chamado teorema do limite central. De forma simplificada, pode ser redigido da seguinte forma: se um resultado de medição for simultaneamente influenciado por muitas fontes de incerteza, então, se o número de fontes de incerteza se aproximar do infinito, a função de distribuição do resultado da medição aproxima-se da distribuição normal, independentemente do que são as funções de distribuição dos fatores / parâmetros que descrevem as fontes de incerteza.

A curva de distribuição normal tem a aparência em forma de sino e é expressa pela equação:

$$f(y) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-y_m)^2}{2s^2}} \quad (20)$$

Nesta equação $f(y)$ é a probabilidade de que o mensurando Y tenha valor y . y_m é o valor médio da população e s é o desvio padrão da população. y_m caracteriza a posição da distribuição normal no eixo Y , s caracteriza a largura (extensão) da função de distribuição, que é determinada pela dispersão dos pontos de dados. A média e o desvio padrão são os dois parâmetros que determinam completamente a forma da curva de distribuição normal de uma quantidade aleatória particular.

Neste caso, população significa que é necessário um número infinito de medidas para obter os verdadeiros valores de y_m e s . Na prática, opera-se com um número limitado de medidas, de modo que o valor médio e o desvio padrão a partir das leituras dos experimentos são, de fato, estimativas da média real e do desvio padrão verdadeiro. Quanto maior o número de medidas repetidas, mais confiáveis são as estimativas.

A distribuição normal e o desvio padrão são a base para a definição de incerteza padrão. A incerteza padrão, denotada por u , é a incerteza expressa no nível de desvio padrão, isto é, a incerteza com aproximadamente uma probabilidade de cobertura de 68,3% (ou seja, a probabilidade de o valor verdadeiro cair no intervalo de incerteza é de aproximadamente 68,3%). A probabilidade de 68,3% é por vezes muito baixa para aplicações práticas. Portanto, a incerteza dos resultados da medição é, na maioria dos casos, não relatada como incerteza padrão, mas como incerteza expandida. A incerteza expandida, denotada por U , é obtida multiplicando a incerteza padrão por um fator de cobertura, denotado por k , que é um número positivo maior do que 1. Se o fator de cobertura for, por exemplo, 2 (que é o valor mais utilizado para o fator de cobertura), então, no caso de resultado de medição normalmente distribuído, a probabilidade de cobertura é de aproximadamente 95,5%. Essas probabilidades podem ser consideradas como frações de áreas dos respectivos segmentos a partir da área total sob a curva conforme ilustrado pela figura a seguir:

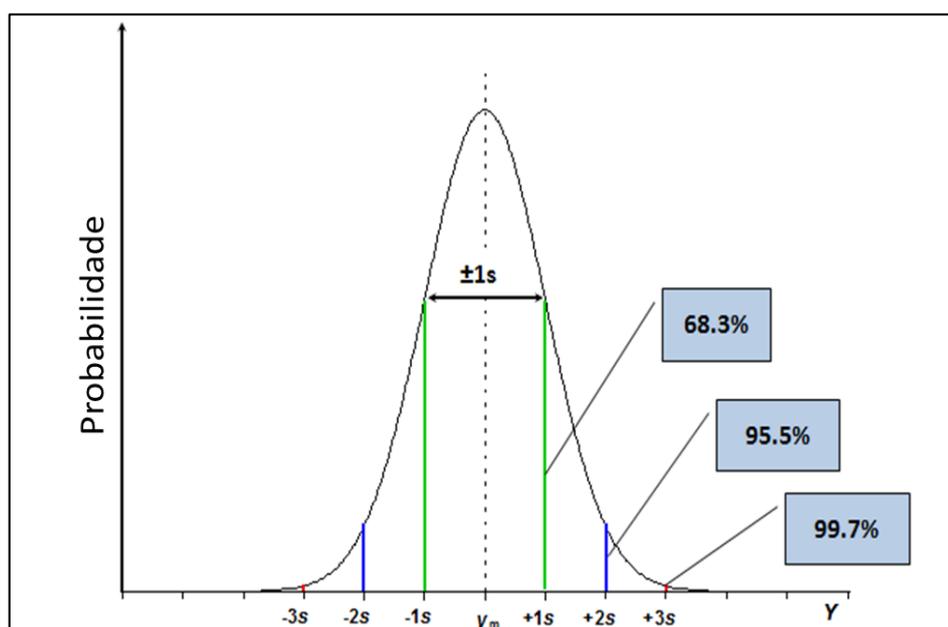


Figura 9: Curva de probabilidade de uma medição estar dentro de faixas de desvios padrão.

4.2.3 Cálculo da Incerteza

O cálculo da incerteza segue a norma N° NIT-DICLA-021 (INMETRO 2012), que estabelece requisitos para expressão da incerteza de medição e da capacidade de medição e calibração por laboratórios de calibração.

Conforme descrito na Guia para Expressão da Incerteza de Medição (JCGM, 2008), a incerteza de uma medição é uma avaliação numérica do resultado de uma medição. Esta avaliação caracteriza a dispersão dos valores que podem ser atribuídos as grandezas submetidas a medição. Em calibrações, um mensurando ou grandeza de saída Y depende de uma série de grandezas de entrada X_i ($i = 1, 2, \dots, N$). A função em que essas grandezas de entrada afetam a saída depende do procedimento de medição e o método de avaliação.

4.2.4 Incerteza Padrão

A incerteza padrão de medição pode ser avaliada de acordo com um dos dois métodos de avaliação: Tipo A ou Tipo B. A avaliação Tipo A é o método de avaliação da incerteza pela análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a incerteza padrão é o desvio padrão experimental da média que se obtêm de um procedimento de cálculo da média aritmética ou de uma análise de regressão adequada. A avaliação do Tipo B da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza por outros meios sem ser uma análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a avaliação da incerteza padrão é baseada em algum outro conhecimento científico.

Neste estudo será usado o método de avaliação do Tipo A, pois é possível realizar várias observações independentes para uma das grandezas de entrada sob as mesmas condições de medição. No caso desse estudo, a grandeza medida é a vazão (Q). Com n observações estatisticamente independentes ($n > 1$), a estimativa da grandeza Q é \bar{q} , uma média aritmética, conforme Eq. (21):

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (21)$$

A incerteza associada à estimativa \bar{q} é avaliada de acordo com um dos métodos descritos a seguir.

4.1.1.1 Incerteza Padrão Tipo A

Incerteza Tipo A utiliza a média aritmética das observações e então calcula uma estimativa da variância da distribuição de probabilidade ou seja a variância experimental $s^2(q)$ dos valores de q_j . Essa variância experimental é dada pela Eq. (22).

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (22)$$

O valor (positivo) da raiz quadrada de $s^2(q)$ é chamado desvio padrão experimental. A melhor estimativa da variância da média aritmética é a variância experimental da média conforme Eq. (23)

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (23)$$

A incerteza padrão $u(\bar{q})$ associada à estimativa de entrada \bar{q} é o desvio padrão experimental da média conforme Eq. (24)

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (24)$$

4.1.1.2 Incerteza Padrão Tipo B

Para uma estimativa x_i de uma grandeza de entrada X_i que não tenha sido obtida através de observações repetidas, a variância estimada associada $u^2(x_i)$ ou a incerteza-padrão $u(x_i)$ é avaliada por julgamento científico baseando em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de X_i . O conjunto de informações pode incluir:

- Dados de medições prévias;
- Experiência com ou conhecimento geral do comportamento e das propriedades de materiais e instrumentos relevantes;
- Especificações do fabricante;
- Dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados;
- Incertezas atribuídas a dados de referência extraídos de manuais.

No caso desse trabalho a incerteza tipo B não foi utilizado.

4.2.5 Incerteza Padrão Combinada

Quando a incerteza padrão do resultado de uma medição é obtida por meio dos valores de várias outras grandezas, este resultado é denominado incerteza padrão combinada e representada por u_c , sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, sendo estes as variâncias e covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com o quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas. Ou seja, a incerteza padrão do mensurado de saída é a estimativa do resultado da medição, e este é obtida pela combinação apropriada de incertezas padrão das estimativas de entrada. A incerteza padrão combinada $u_c(y)$ é a raiz quadrada positiva da variância combinada $u_c^2(y)$ (JCGM, 2008), que é dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (25)$$

Ou seja, se a quantidade de saída (Y) for encontrada a partir das quantidades de entrada (X_1, X_2, \dots, X_n) de acordo com alguma função F como segue:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (26)$$

Para esse caso a incerteza padrão combinada da quantidade de saída $u_c(y)$ pode ser expressa através das incertezas padrão das quantidades de entrada $u(x_i)$ da seguinte maneira:

$$u_c(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial x_1} u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_2} u(x_2)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_n} u(x_n)\right)^2} \quad (27)$$

Os termos $\left[\frac{\partial Y}{\partial x_1} u(x_1)\right]$ são os componentes da incerteza. Os termos $\frac{\partial Y}{\partial x_1}$ são derivadas parciais. À primeira vista, a equação pode parecer muito complexa, mas os componentes da incerteza podem ser calculados numericamente usando o método de Kragten.

4.1.1.3 Método de Kragten

O método Kragten pode ser usado para simplificar os cálculos de derivadas parciais. O procedimento usa um método numérico para resolver as derivadas e requer apenas o conhecimento do cálculo utilizado para achar o resultado final (incluindo fatores de correção necessários) e dos valores numéricos dos parâmetros e suas incertezas.

O método analisa cada componente da incerteza individualmente ou seja:

$$u(y, x_1) = \frac{\partial y}{\partial x} u(x_1) \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_1} u(x_1) \quad (28)$$

Δy pode ser escrito da seguinte forma:

$$\Delta y = F(x_1 + \Delta x_1, x_2, \dots, x_n) - F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (29)$$

Então a equação fica:

$$u(y, x_1) = \frac{F(x_1 + \Delta x_1, x_2, \dots, x_n) - F(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\Delta x_1} u(x_1) \quad (30)$$

O método finalmente propõe uma simplificação igualando a incerteza padrão com o diferencial parcial do componente:

$$u(y, x_1) = \frac{F(x_1 + u(x_1), x_2, \dots, x_n) - F(x_1, x_2, \dots, x_n)}{u(x_1)} u(x_1) \quad (31)$$

Ou seja:

$$u(y, x_1) = F(x_1 + u(x_1), x_2, \dots, x_n) - F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (32)$$

Com essa simplificação pode se calcular a incerteza padrão combinada com pouco esforço.

Para facilitar esse processo, a norma ISO 5168 (2005) fornece um passo-a-passo de como realizar esse cálculo, listado a seguir:

1. Identificar o mensurando Y e as fontes de incerteza X_i e expressar em termos matemáticos a dependência de Y com as grandezas X_i
2. Determinar a relação matemática entre as quantidades de entrada (X_i) e a quantidade de saída (Y)
3. Identificar as fontes de incerteza, $u(x_i)$. Para grandezas medidas repetidamente, calcular a incerteza padrão $u(x_i)$
4. Calcular $u_i(y)$, ou seja, a contribuição para a incerteza da saída devido à incerteza da grandeza de entrada X_i . Para isso deve ser determinada a incerteza padrão combinada.
5. Calcular a incerteza expandida U por meio da multiplicação da incerteza padrão $u(y)$ por um fator de abrangência k .
6. Relatar o resultado da medição incluindo a estimativa y do mensurando e a incerteza associada U e o fator de abrangência k .

4.3 REPETIVIDADE

A GUM (2008) define repetitividade como “o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando, efetuadas sob as mesmas condições de medição.” A API 13.1 (2006) define repetitividade como a faixa de incerteza devido a erros randômicos para a diferença entre duas medições,

e associa a repetitividade ao desvio padrão $s(y)$ da diferença absoluta entre duas medições repetidas com distribuição normal dada pela equação seguinte:

$$Rep_{\%} = t_{95,n-1} \sqrt{2} s(y) \quad (33)$$

Onde $t_{95,n-1}$ é o coeficiente t de Student para probabilidade de 95% para uma amostra de tamanho n. A API 12.2.3 (2002) indica que a repetitividade é determinada pela diferença entre valores mínimos e máximos durante os testes de medidores de vazão, conforme a equação:

$$Rep_{\%} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{min}} \cdot 100 \quad (34)$$

Onde:

- V_{max} : é o volume máximo de uma série de volumes medidos, calibrados utilizando-se um padrão de volume fixo.

A repetitividade de um método de medição é uma medida quantitativa do erro aleatório associado a um único operador em um determinado local, obtendo medidas sucessivas no mesmo corpo de material em um curto intervalo de tempo, com os mesmos dispositivos de medição e sob constante condições de funcionamento. A repetitividade é definida como a diferença entre duas dessas medições que seriam excedidas a longo prazo em 1 caso em 20 na operação normal e correta do método de medição. A repetitividade é o intervalo de incerteza (nível de confiança de 95%) para a diferença entre duas medidas obtidas nas mesmas condições. O curto intervalo de tempo entre medições é essencial para garantir que as condições externas sejam mantidas tão constantes quanto possível. O intervalo de tempo deve ser da mesma ordem de grandeza que a duração de uma única medida. Por exemplo, se uma medida leva 5 minutos para realizar, o intervalo antes de uma segunda medição não deve exceder 10 minutos (API, 1991).

A reprodutibilidade de um método de medição em massa é uma expressão quantitativa do erro aleatório associado a diferentes operadores que trabalham em diferentes locais com diferentes instrumentos, com cada operador obtendo medições únicas no mesmo corpo de material usando o mesmo método e os mesmos

dispositivos de medição. É definida como a diferença entre duas dessas medições individuais e independentes que seriam excedidas no longo prazo em apenas 1 caso em 20 na operação normal e correta do método de medição.

Segundo o NIST (2012), a análise da repetitividade apresentada anteriormente, se refere a um desvio padrão de repetitividade de nível 1 que é calculado para um grupo de repetições feitas de forma sequencial e com curtos intervalos de tempo entre cada repetição. O problema desse tipo de análise é que muitas vezes as medições não podem ser feitas de forma sequencial e são feitas em horas e até dias diferentes. Isso torna o método mais suscetível a variações sistemáticas. Para esses casos o NIST recomenda um desvio padrão de repetitividade de nível 2 que não é nada mais que uma repetitividade ponderada calculada através de agrupamentos de desvios padrão de medições (*Pooled Standard Deviation* em inglês). Para isso é usada a fórmula:

$$s_{pooled} = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2 + \dots + (n_k-1)s_k^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_k - k}} \quad (35)$$

Onde:

- K é o número de grupos de repetições;
- s_1, s_2 etc. são desvios padrão de cada grupo;
- n_1, n_2 etc. são o número de medições em cada grupo.

5 PLANTA EXPERIMENTAL

Uma das etapas prévias do projeto MOPUS, no qual este trabalho está englobado, foi a construção de um circuito de escoamento (*loop*) de testes no Laboratório de máquinas de fluxo localizado na Universidade Federal do Espírito Santo, campus Goiabeiras. Neste *loop* foram realizados todos os testes descritos nesse trabalho. O medidor ultrassônico propriamente dito foi desenvolvido em parceria com a empresa 2Solve, participante do projeto MOPUS, conforme previsto nos termos do edital.

Neste capítulo descreve a planta experimental e os instrumentos utilizados no trabalho. Descreve também o medidor protótipo com as suas respectivas tecnologias e processo de medição. A Figura 10 mostra a planta experimental e equipamentos, que são descritos a seguir.

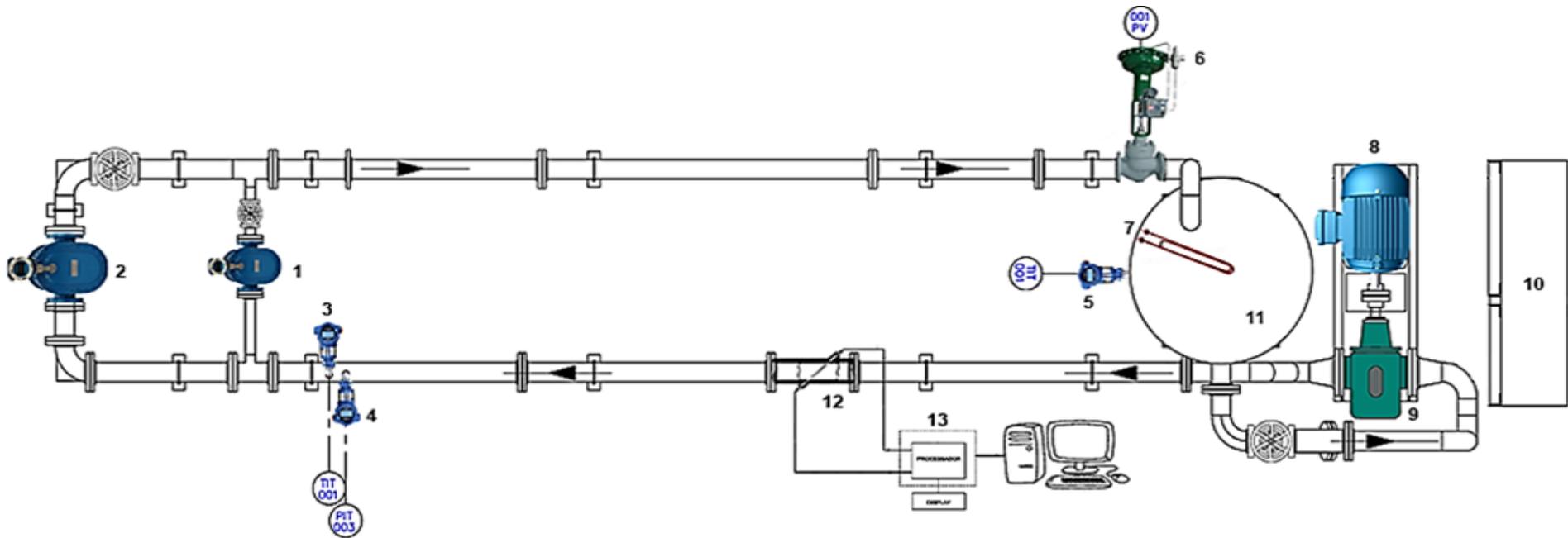


Figura 10: Planta Experimental com os instrumentos de medição e controle.

Legenda:

- | | | |
|------------------------------------|--|---------------------------------------|
| 1 Medidor de Referência (OI-200) | 6 Válvula de Pressão (PV-001) | 11 Tanque de armazenamento de óleo |
| 2 Medidor de Referência (OI-600) | 7 Resistência para Aquecimento (R-001) | 12 MOPUS (Transdutores Ultrassônicos) |
| 3 Medidor de Temperatura (TIT-001) | 8 Motor trifásico (3kW) | 13 MOPUS (Controle Eletrônico) |
| 4 Medidor de Pressão (PIT-001) | 9 Bomba de Fuso | |
| 5 Medidor de Temperatura (TIT-002) | 10 Painel Elétrico de automação e potência | |

5.1 CIRCUITO DE TESTES

O circuito de escoamento de óleo foi construído para realizar os testes experimentais do MOPUS. Para realizar esses testes foi necessário simular situações de escoamento que o protótipo, MOPUS, poderia encontrar na indústria, como variação de pressão, temperatura e diversas vazões de trabalho.

Para isso o circuito é equipado com dois medidores de vazão de deslocamento positivo de referência com diferentes faixas de operação, válvulas de controle de pressão, e resistores elétricas para aquecer o fluido.

Nessa seção será descrita a estrutura física do circuito de testes assim como os instrumentos instalados.

5.1.1 Estrutura Física

O circuito de óleo que se encontra no laboratório, está situado sob uma plataforma móvel, para facilitar sua locomoção. Esta plataforma tem 9m de comprimento e 1,35m de largura. O circuito é constituído por tubos de aço, onde a maior parte tem um diâmetro interno de 4 polegadas (101,6mm) e são feitos de aço A53/NBR 5590. Este material foi escolhido, pois destina-se a aplicações mecânicas e de pressão e é aceitável para usos comuns em linhas de vapor, água, gás e ar, sendo também adequado para soldagem. As dimensões dos tubos e conexões usados são resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificações do circuito de testes

Item de Instalação	Qnt.	Comprimento total (m)	Diâmetro Interno (pol)
Trecho Reto Aço ASTM A-53	16	17,5m \pm 0.005m	4"
Trecho Joelho 90° ASTM A-234	8	1.92m \pm 0.005m	4"
Trecho Joelho 45° ASTM A-234	2	0.24m \pm 0.005m	4"
Flange Plano ASTM A-36	34	0.76m \pm 0.005m	4"
Flange Plano ASTM A-36	2	0.10m \pm 0.005m	6"
Flange Plano ASTM A-36	4	0.15m \pm 0.005m	2"
Redução concêntrica ASTM A-234	2	0.62m \pm 0.005m	6"x4"

Té de Redução ASTM A-234	2	0.42m ±0.005m	4"x2"
--------------------------	---	---------------	-------

Na Figura 10 podem ser observados dois caminhos onde o fluido pode escoar. Nesses caminhos encontram-se os medidores de referência de faixas distintas (*split range*). Cada caminho pode ser aberto ou fechado, guiando o fluido para um medidor de referência específico. Assim, o medidor ultrassônico pode ser testado em uma ampla faixa de operação.

O escoamento interno do óleo é promovido por uma bomba de fuso. Essa bomba de deslocamento positivo é utilizada na indústria de petróleo e gás para o tratamento de petróleo bruto, emulsões, fluidos com alto conteúdo de gás, bem como produtos líquidos intermediários e finais. Essas bombas caracterizam-se por trabalhar com baixas vazões e altas pressões e podem ser utilizadas com fluidos de maior viscosidade. Esse tipo de bomba foi escolhido pois não admite recirculação interna, e possui baixa pulsação. Isso é importante pois essas pulsações podem influenciar na medição das incertezas do medidor ultrassônico. A bomba escolhida foi da marca NETZSCH (modelo LN-106) e tem os seguintes limites de operação:

- Vazão: 89,5 m³/h
- Pressão máxima de operação: 12 bar
- Temperatura máxima de operação: 300° C
- Viscosidade cinemática máxima de operação: 10.000 cSt

O motor atrelado a bomba (Figura 3) é da marca WEG. É um motor assíncrono trifásico (modelo W22Plus) de 3kW (75cv) com rotação nominal de 1775rpm. O circuito conta também com uma válvula de diafragma pneumática (Fischer) usada para pressurizar a linha em até 15 bar. A válvula de pressão foi posicionada também de acordo com a Norma API 5.8 (2005) ou seja após os medidores de referência e protótipo.

5.1.2 Instrumentação

Como um dos objetivos desse trabalho é a comparação do medidor protótipo com medidores de referência, no circuito encontram-se dois medidores de deslocamento positivo por engrenagens ovais. Estes medidores foram escolhidos por serem referência no mercado onde o fluido a ser medido possui uma alta viscosidade, além de possuir uma incerteza relativamente baixa.

“Uma das características deste medidor é medir líquidos de altíssima viscosidade, até 100.000 cP. Tendo em vista a sua alta exatidão de medição os medidores volumétricos de engrenagens ovais, garantem ao produto final a máxima qualidade possível num processo industrial. São os mais exatos e confiáveis concebidos até o momento, visto que eles efetuam a medição de volume de uma forma direta, ou em outras palavras não efetuam a medição volumétrica em função de nenhuma outra variável dos mesmos, tal como: velocidade, condutividade, turbulência, etc” (METROVAL 2015)

Os dois medidores de referência usadas nesse trabalho são da marca Metroval e tem as seguintes características:

Tabela 4 - Especificações dos medidores de referência

	Modelo	
	OI-200	OI-600
Diâmetro Nominal	200mm	100mm
Vazão máxima (até 1000mPs·s)	30m ³ /h	150m ³ /h
Vazão mínima (até 1000mPs·s)	3m ³ /h	12m ³ /h
Perda de Carga máxima (vazão max. em 1000mPa·s)	1,4bar	0,8bar
Perda de Carga mínima (vazão min. em 1000mPa·s)	0,3bar	0,08bar
Temperatura Máxima de Operação	70°C	70°C
Pressão Máxima de Operação	18,7bar	18,7bar
Incerteza Máxima	±0,2%	±0,2%

Fonte: (METROVAL 2015)

Além dos medidores de referência também foram instalados dois sensores de temperatura do tipo Termorresistência (ou PT-100) da marca Rosemount. O PT-100 ou RTD, são sensores de alta precisão e excelente repetitividade de leitura. O seu funcionamento se baseia no princípio de variação da resistência ôhmica em função da temperatura, e seu elemento sensor consiste de uma resistência em forma de fio de platina de alta pureza, níquel ou de cobre, encapsulados num bulbo de cerâmica

ou vidro. Estes foram calibrados para temperaturas de 0°C a 100°C. Nessa faixa de operação possuem uma incerteza de $\pm 0,02\%$ da faixa. Foi instalado também um transmissor de pressão, 2051T, também da marca Rosemount, calibrado para a faixa de 0 a 20kgf/cm². A sua incerteza é de 0,0075% da sua faixa de medição.

Situado na plataforma se encontra um painel elétrico onde foram instalados todos os componentes eletrônicos e elétricos empregados no controle do processo de vazão, assim como a comunicação com o supervisor.

5.2 CONTROLE DA PLANTA

Como o objetivo desse trabalho foi validar o comportamento do medidor ultrassônico em diversas faixas temperatura, pressão e velocidade, foi necessário criar um programa que controlasse esses três fatores. Para isso, a empresa 2Solve (parceira do projeto MOPUS), auxiliou na criação de um supervisor em LabView. Este *software* disponibiliza as ferramentas necessárias para criar e implementar sistemas de medição e controle por meio de uma integração de hardware e *software*.

5.2.1 Supervisor da Planta

Ao abrir o arquivo executável, o usuário se depara com o painel de operação (Figura 11), que é dividido em 6 abas: Inicialização, Painel de Operação, Controle Manual, Medidor de Teste, Supervisor e Controladores. Todas as abas tem uma certa importância no funcionamento da planta. Aqui serão explicados somente as duas abas necessárias para realizar um experimento.

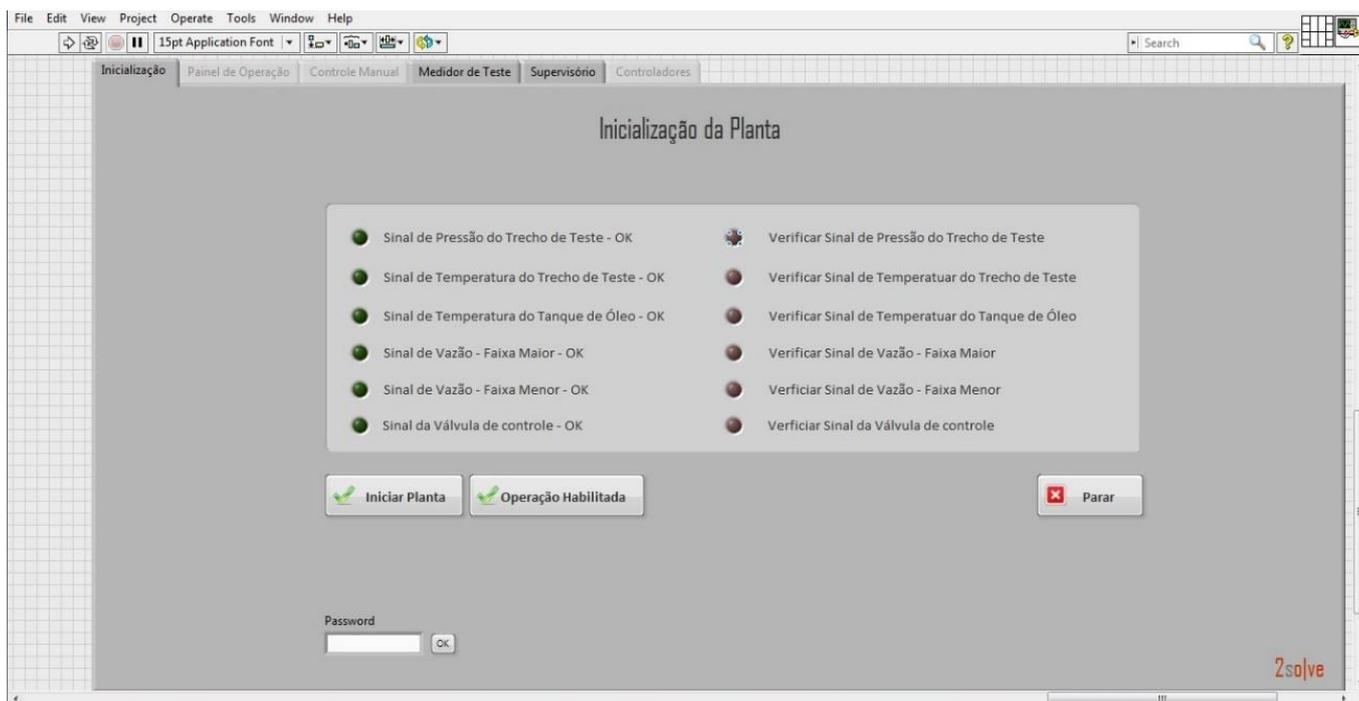


Figura 11: Pagina Inicial do Supervisório.

Antes de iniciar a planta é realizado um processo de verificação, clicando “Iniciar Planta”. Este botão verifica se os sinais essenciais para o funcionamento do circuito estão corretos, como os sinais de pressão, da válvula de controle, ou um dos medidores. Caso algum desses sinais não esteja de acordo com o seu padrão de funcionamento, a planta é incapaz de inicializar. Indicadores verdes irão acender para sinais verificados com valores corretos e indicadores vermelhos nos sinais que não estiverem de acordo. Sinais, como os do sensor de temperatura, não são essenciais para o funcionamento da planta, então o usuário pode iniciar a planta, mesmo com esses parâmetros não estando de acordo com o seu funcionamento padrão.

Após inicializar a planta, o usuário é direcionado para a aba “painel de operação” (Figura 12). Nesta aba é possível: comandar diversos dispositivos, como o inversor de frequência, o acionamento do motor, resistências e a energização do medidor MOPUS; obter os dados de diversos medidores/sensores e salvar os esses dados.

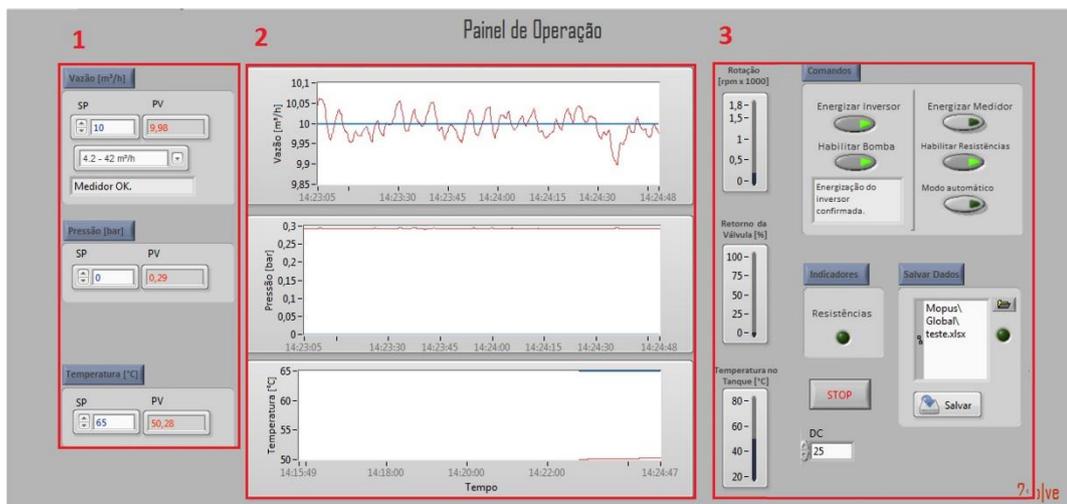


Figura 12: Aba de Painel de Operação.

A esquerda da aba “painel de operação” (destacado em vermelho - 1), existem três tabelas principais, um para cada variável controlada: vazão, pressão e temperatura. Nestes quadrados são definidos os valores de “set point” de operação de cada uma das variáveis. Os valores de “set point” são os valores que o usuário deseja que a variável esteja. Um controlador PID irá ajustar a atuadores na planta de forma a deixar o valor da variável o mais próximo do seu *set point*. Existem 3 controladores, um para cada variável.

A velocidade do escoamento é controlada variando a rotação do motor que está atrelado a bomba de fuso. O controle da rotação do motor é feita pelo inversor de frequência através da variação da frequência que alimenta o motor. O inversor de frequência é então controlado pelo programa desenvolvido no LabView. O escoamento no circuito de óleo é verificado usando um dos medidores de referência. Esse dado realimenta uma malha de controle que emite comandos para o inversor de frequência de aumentar ou reduzir a velocidade de rotação do motor.

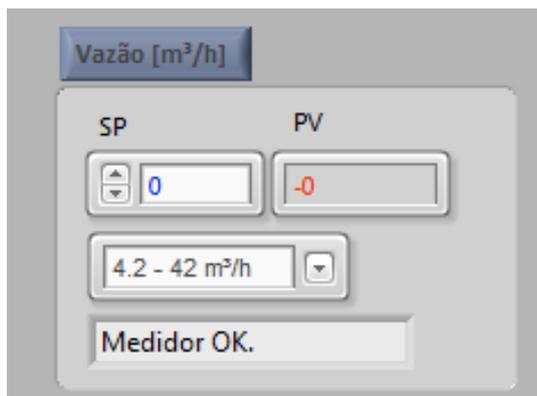


Figura 13: Painel de controle de Vazão

A imagem acima mostra a possibilidade de escolher o *set point* (SP) e o medidor a ser usado. O valor do medidor de referência é mostrado como PV (variável de processo). Essa metodologia de controle é repetida para as variáveis de pressão e temperatura.

A variação de pressão no circuito de óleo é feita variando a posição da válvula pneumática. A verificação da pressão é feita através do sinal recebido do medidor de pressão. Esse medidor possui uma saída de corrente na faixa de 4-20mA. O programa usa os dados desse sensor de pressão para aferir a pressão na linha e realimentar uma malha de controle que manda os comandos para a válvula abrir ou fechar (reduzindo ou aumentando a pressão).

O aumento da temperatura do óleo no circuito é feita através de uma resistência de potência localizada no tanque de armazenamento de óleo. O controle é feito usando o sensor/transmissor de temperatura Pt100_385_3-WIRE, como referência para realimentar a malha de controle. Uma dificuldade encontrada com esse tipo de aquecimento foi que a propagação da temperatura no óleo levava muito tempo e com isso a homogeneização da temperatura no líquido também demorava. Para ajudar na homogeneização do óleo um misturador simples constituído por um motor monofásico e misturador foi adicionado dentro do tanque de armazenamento. Esse misturador é ligado a um *timer* e é acionado a cada minuto por dois minutos.

Os sinais PV e SP de cada variável são plotados ao lado dos indicadores, na região (2) da Figura 12. A imagem abaixo mostra os valores do PV (em vermelho) e do SP (em azul) da vazão:

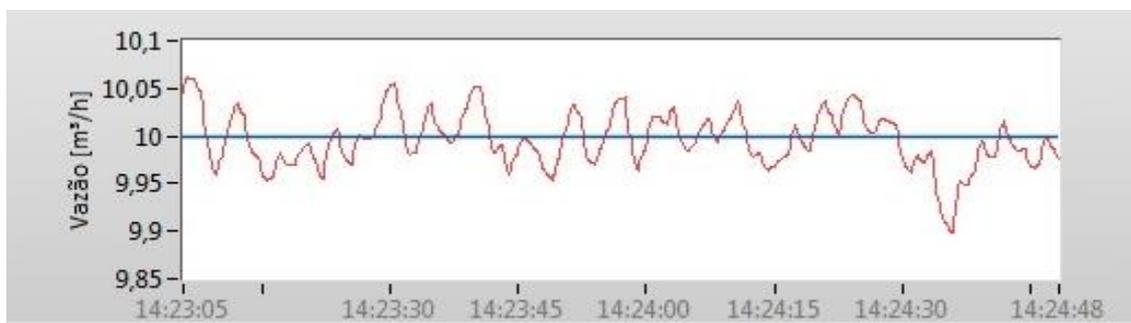


Figura 14: Gráfico da vazão do MOPUS e o valor esperado.

Note que a escala do gráfico é atualizada automaticamente para ficar entre os valores de máximo e mínimo da função durante um período de tempo. Na figura acima, por exemplo, a escala da vazão varia entre 9,85 e 10,1.

Vale ressaltar que todas as variáveis descritas acima podem ser controlados manualmente usando a função “Manual” do supervisório. Essa função deixa o usuário escolher a porcentagem de acionamento de cada atuador.

A direita da figura 12 (destacado como 3), tem um tabela denominada “Comandos” nela encontram-se cinco botões: “Energizar Inversor”, “Habilitar Bomba”, “Energizar Medidor”, “Habilitar Resistências” e “Modo Automático”. O botão “Energizar Medidor” aciona o relé do inversor de frequência, energizando o mesmo. A confirmação da energização é mostrada no caixa de texto abaixo dos botões. Nesta mesma área destacada também se encontram o *status* das resistências de aquecimento do tanque de óleo, um tabela denominado “Salvar Dados, e 3 indicadores: Rotação do motor (escala de 0 a 1800 RPM), posição da válvula (escala de 0 a 100%) e temperatura do tanque de óleo (escala de 15 a 100 °C).”

Depois de realizar os testes, o programa no LabView organiza os dados gerados e cria uma tabela em Excel para realizar as análises posteriores. Os dados que se encontram na tabela são:

- Tempo de aquisição das variáveis;
- *Set-Point* das variáveis controladas: vazão, pressão, e temperatura;
- Valores medidos das variáveis controladas: vazão, pressão, e temperatura;
- Tempo de trânsito do medidor protótipo (jusante e montante) usando dois métodos distintos;
- Potência de sinal do medidor protótipo;
- Potência do Ruído medido pelos transdutores.

5.3 ÓLEO

Para melhor aproximar o experimento a uma situação real, o óleo escolhido para realizar os testes foi um óleo com grau API médio, próximo ao óleo do pré-sal. Para isso, foi usado o HBP-460 (API 25.72º) fornecido pela empresa Kelpen Oil.

As propriedades do fluido são muito importantes, pois afetam integralmente a medição realizada pelo instrumento. Como discutido no Capítulo 2, uma das propriedades mais importantes é a viscosidade, pois afeta dois fatores importantes na medição ultrassônica: perfil de escoamento e atenuação do sinal ultrassônico. Para analisar o efeito dessa propriedade no fluido foi necessário conhecê-la em todas as situações de medição, ou seja, precisaria de uma curva de viscosidade. A viscosidade de um fluido incompressível como o óleo muda insignificativamente com o aumento da pressão (CAUDWELL *et al.*, 2009), mas a temperatura é um fator fundamental para essa propriedade. Foi então traçado uma curva de viscosidade em relação a temperatura para o óleo utilizado. Para poder traçar a curva de viscosidade foram usados dados de testes conhecidos de um óleo semelhante e com isso foi obtido uma equação de curva de viscosidade (Figura 15).

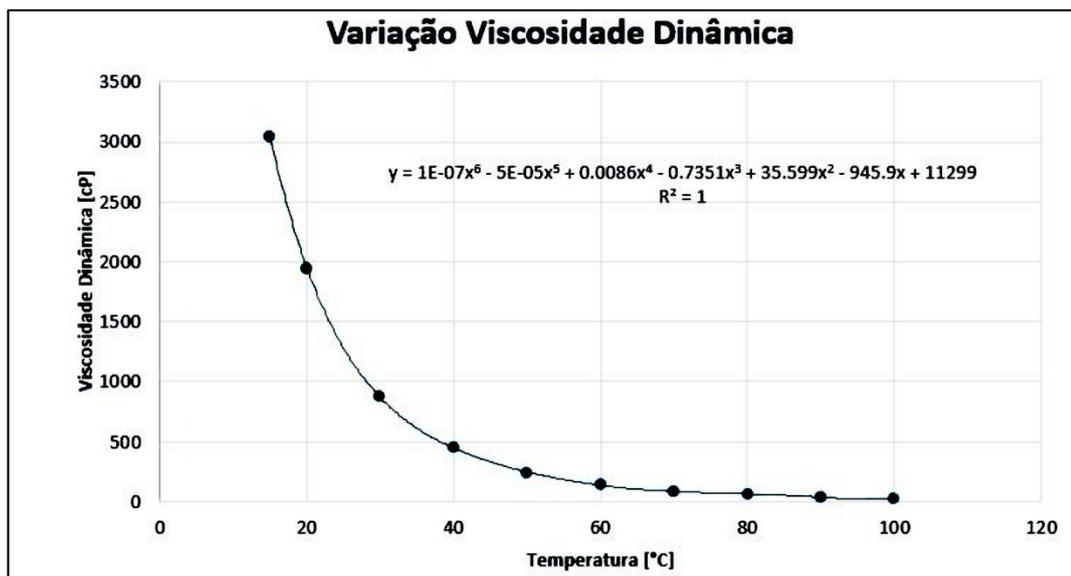


Figura 15: Curva de viscosidade do óleo usado

Essa curva foi usada como uma forma de estimar a viscosidade do óleo HBP-460 nas temperaturas de operação. As características do HBP-460 fornecidos pela Kelpen Oil são descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Especificações do Óleo

	HBP-460
Densidade Relativa (15°C)	899.00 kg/m ³
Viscosidade Cinemática a 40°C	487.9 cSt
Viscosidade Cinemática a 100°C	32.00 cSt

Fonte: (KELPEN OIL 2015)

5.4 MOPUS

O desempenho do protótipo em desenvolvimento denominado MOPUS é o foco deste trabalho. Este medidor ultrassônico por tempo de trânsito foi desenvolvido pela empresa 2Solve Eng., como signatária do convênio UFES-FINEP-empresa, com o intuito de desenvolver um medidor de óleos pesados nacional. A estrutura do MOPUS é típico de medidores ultrassônicos onde os transdutores são instalados do tipo carretel (Figura 16). Os transdutores são fixados a um tubo de diâmetro nominal de 114mm e essa seção de tubo é fixada em série aos tubos onde o fluido escoava via

flanges. Os conectores destes transdutores ficam expostos como mostra a Figura 17, onde são conectados, via cabo coaxial até a placa eletrônica principal. A placa eletrônica tem a tarefa de gerar os sinais elétricos que alimentem os transdutores, assim como reconhecer quando um dos transdutores recebe o sinal do outro, ou seja, é empregado para gerar e calcular o tempo de trânsito.



Figura 16: Medidor ultrassônico MOPUS \varnothing 4" #150, instalado no circuito de testes.

O programa gravado no microprocessador da placa utiliza dois métodos para medir o tempo de trânsito: *Continuous Wave* e *Chirp*. Esses métodos são conhecidos na indústria de medidores ultrassônicos por serem capazes de obter faixas de medição maiores quando usados em conjunto (MYLVAGANAM, 1989).

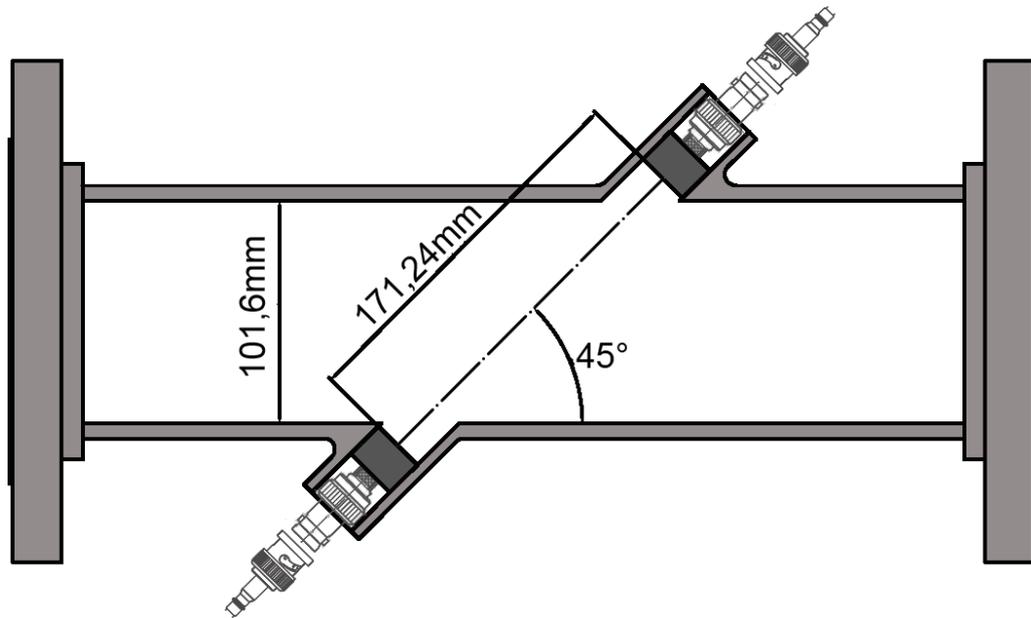


Figura 17: Desenho no AutoCAD das dimensões do MOPUS.

5.4.1 Continuous Wave

A onda tipo *continuous wave* já era um método empregado em radares antes de ser adaptado para o campo de medição de vazão. O conceito de medir o tempo usando essa técnica é baseado em uma relação das diferenças de fases de uma onda que um transdutor emite em relação ao que chega ao transdutor receptor. Isso é feito porque o sistema opera a velocidades extremamente altas, e não seria prático ter um relógio eletrônico para iniciar e parar o tempo para medir o tempo de trânsito entre os sensores. Em vez disso, esses dois sinais de alta frequência são plotados um contra o outro e o ângulo de fase da onda senoidal é medido (Figura 18). Essa mudança de fase de onda senoidal é a base para a medição.

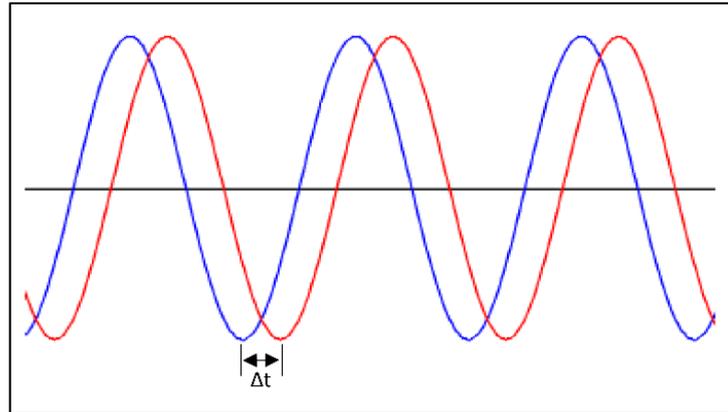


Figura 18: Exemplo de mudança de fase das ondas sinusoidais causada pela velocidade do meio

5.4.2 Chirp

Um *chirp* é um sinal (acústico ou elétrico) onde a frequência aumenta (*up-chirp*) ou diminui (*down-chirp*) com o tempo. Em um *chirp* linear, a frequência instantânea emitida pelo transdutor varia linearmente com o tempo. Fazendo uma varredura da frequência que chega a um transdutor e aplicando uma correlação cruzada, podemos identificar com alta precisão as diferenças de tempo entre os *chirps*. A Figura 19 mostra dois sinais emitidos e recebidos por transdutores e também mostra como uma correlação cruzada pode ser aplicada aos sinais. Esse conceito pode ser usado para calcular o tempo de trânsito de um medidor.

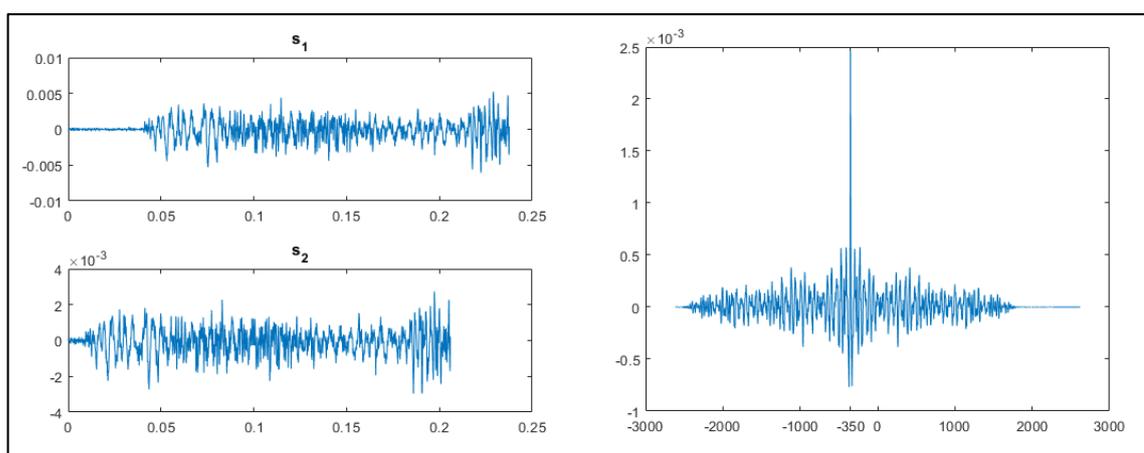


Figura 19: Sinal emitido e recebido (esquerda) e esboço de um filtro FFT aplicado a um dos sinais *chirp* (direita)

5.4.3 Local de Medição

Para garantir um escoamento totalmente desenvolvido, foram considerados trechos retos mínimos do último acidente de linha (curva, válvula, redução, etc) igual 20 D (D = diâmetro da tubulação) à montante e 10 D à jusante. Estabelecer uma distância mínima dos acidentes de linha é importante para o desempenho do medidor e é uma informação encontrada em qualquer manual, norma ou recomendação sobre o assunto. A posição dos medidores de pressão e temperatura também são importantes e seguiram a norma API 5.8 (2005), ou seja, ambos forma instalados imediatamente após o trecho reto a jusante” do MOPUS.

5.4.4 Aquisição de Dados do Medidor

Um conjunto de dados são gerados pela placa eletrônica do medidor ultrassônico e são enviados para o programa no LabView. Esses dados são:

- Tempo de Trânsito por *Continuous Wave* (jusante e montante) medidos em μs com uma precisão de até 6 casas decimais;
- Tempo de Trânsito por *Chirp* (jusante e montante) medidos em μs com uma precisão de até 6 casas decimais;
- Potência de Sinal (jusante e montante) medidos em unidades relativas;
- Potência de Ruído (jusante e montante) medidos em unidades relativas.

O medidor também faz um cálculo bruto da vazão com valores do diâmetro de tubo e ângulo dos medidores já pré-programados. O tempo de aquisição desses dados pode ser variado no experimento, mas o limite de tempo mínimo para aquisição desses dados é de 70ms.

6 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

6.1 LIMITES DA PLANTA

Antes de realizar os experimentos foi necessário conhecer os limites da planta experimental. Para tanto, foi feita uma análise dos componentes da planta para conhecer os limites individuais de cada instrumento de medição:

- Medição de vazão: Executado por medidores de vazão de deslocamento positivo de engrenagens ovais, operando em duas faixas de medição distintas:
 - 5 à 30 m³/h (trecho 1 na Figura 20)
 - 25 à 150 m³/h (trecho 2 na Figura 20);
- Medição da temperatura do escoamento: Estabelecida entre 30 - 50°C, para que a incerteza dos medidores não fossem comprometidas.
- Medição da pressão do escoamento: foi fixado entre 2,5 - 10bar por ser próximo ao limite máximo da bomba de fuso (12bar).

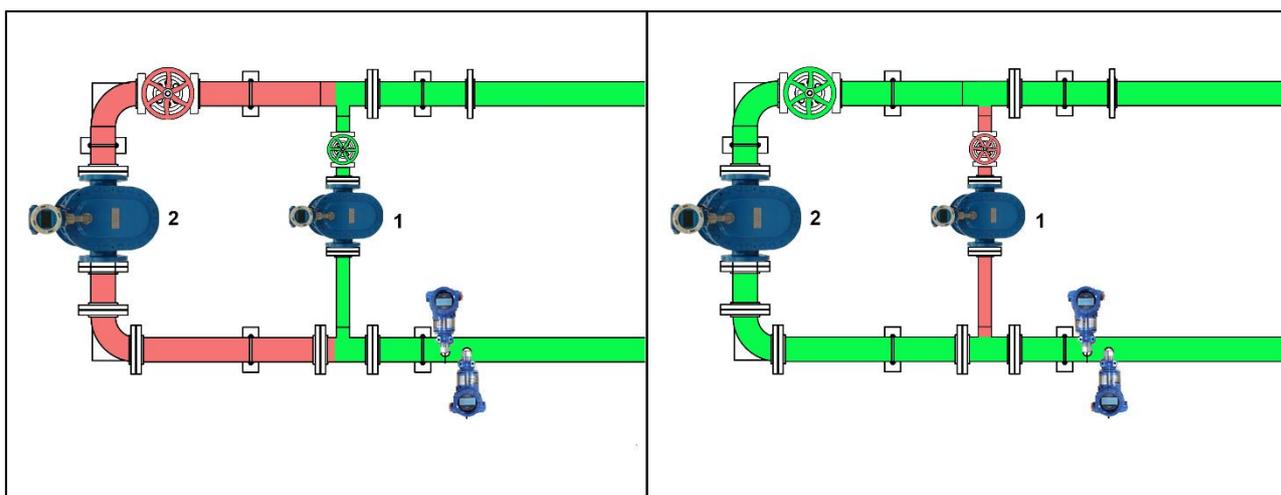


Figura 20: O óleo escoa pelo trecho 1 quando a válvula 1 está aberta e a válvula 2 está fechada (Esquerda). O óleo escoa pelo trecho 2 quando contrário (Direita)

6.1.1 Número de Reynolds da Planta

Antes de realizar os experimentos iniciais foram calculados os números de Reynolds máximo e mínimo, relativos aos limites da planta para referência. O número de Reynolds é o parâmetro adimensional que descreve a proporção de forças inerciais e forças viscosas no escoamento de um fluido. É usado em muitas correlações de escoamento e é usado para descrever os limites dos regimes de fluxo de um fluido (laminar, transição e turbulento). As tabelas 6 e 7 mostram os limites de operação da planta com os respectivos números de Reynolds calculados pela equação seguinte:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Onde:

- ρ é a massa específica do fluido (kg/m³)
- μ é a viscosidade (Pa·s)
- V é a velocidade média do escoamento (m/s)
- D é o diâmetro do tubo (m)

As propriedades do fluido (viscosidade e massa específica) foram informadas pela análise que acompanha a remessa do óleo.

Tabela 6 - Reynolds vs Limites da Planta para o primeiro Trecho

Vazão (m ³ /h)	Pressão (bar)	Temp. (°C)	ρ (kg/m ³)	μ (Pa·s)	Reynolds MOPUS	Reynolds Medidor de Referencia 1
5	2.5	30	895,3	0,872	17.98	71.06
30	2.5	30	895,3	0,872	107.86	426.36
5	10	30	895,3	0,872	17.98	71.06
30	10	30	895,3	0,872	107.86	426.36
5	2.5	50	883,1	0,240	64.43	254.67
30	2.5	50	883,1	0,240	386.55	1527.99
5	10	50	883,1	0,240	64.43	254.67
30	10	50	883,1	0,240	386.55	1527.99

O trecho 1 e o tubo onde o MOPUS foi instalado possuem diâmetros internos diferentes (50,5mm e 101mm respectivamente) e, em consequência, diferentes

números de Reynolds. Dessa forma, o adimensional foi calculado para cada ponto. Essa situação não se repete para o trecho 2 (resumida na Tabela 7).

Tabela 7 - Reynolds vs. Limites da Planta para o segundo trecho

Vazão (m ³ /h)	Pressão (bar)	Temp. (°C)	ρ (kg/m ³)	μ (Pa·s)	Reynolds
25	2.5	30	895,3	0,872	89.88
125	2.5	30	895,3	0,872	449.42
25	10	30	895,3	0,872	89.88
125	10	30	895,3	0,872	449.42
25	2.5	50	883,1	0,240	322.13
125	2.5	50	883,1	0,240	1610.63
25	10	50	883,1	0,240	322.13
125	10	50	883,1	0,240	1610.63

Assim, concluiu-se que o regime de escoamento é laminar para toda faixa de operação. Essa conclusão impacta o cálculo do fator de perfil k do medidor ultrassônico, pois como descrito no capítulo 2 esse valor será constante e igual a 0,75 no caso de perfil de velocidade de um escoamento é completamente desenvolvido e laminar.

6.2 CALIBRAÇÃO

Antes de começar a validação do MOPUS foi necessário calibrá-la por si tratar de um protótipo recém concebido e construído. A calibração de qualquer medidor de vazão consiste em passar uma vazão média pelo medidor sendo calibrado e também por um padrão e comparar os valores indicados pelos dois medidores (TUVNEL, 2015). No caso, a calibração foi feita usando um medidor de referência de deslocamento positivo do tipo engrenagens ovais.

O método de calibração é feito realizando “patamares ou corridas de vazão” onde a vazão no circuito é mantida constante, mas em diferentes níveis. Após estas corridas, o volume agregado do medidor de referência é comparado ao volume registrado pelo medidor protótipo e é inferida uma equação de calibração, podendo esta ser uma regressão linear, polinomial ou até logarítmica.

6.3 VALIDAÇÃO

Após a calibração foi feito um levantamento das especificações do MOPUS para obter as suas incertezas finais assim como o seu comportamento em relação a histerese e repetitividade. Isso foi através de uma matriz de validação.

6.3.1 Matriz de Validação

Para submeter o medidor protótipo a diferentes situações de operação do circuito foi elaborada uma matriz de validação que define o *outline* dos testes a serem realizados. No início desse capítulo foram descritas os limites de funcionamento do circuito, esses limites se tornaram então os limites da matriz de validação. Foram então realizadas 5 patamares ou corridas para vazões variando entre 5 e 25 m³/h com incrementos de 5m³/h. A pressão foi variada em 2,5, 5, e 7,5bar e a temperatura foi variada em 30, 40, e 50°C. A Tabela 8 mostra a variação dos parâmetros do escoamento para cumprir com a matriz proposta.

Tabela 8 - Matriz de Testes do MOPUS com seus respectivos códigos de testes

Condições de processo		Corrida								
Temp (°C)	Pressão (Bar)	Q0 = 5m ³ /h	Q1 = 10m ³ /h	Q2 = 15m ³ /h	Q3 = 20m ³ /h	Q4 = 25m ³ /h	Q5 = 20m ³ /h	Q6 = 15m ³ /h	Q7 = 10m ³ /h	Q8 = 5m ³ /h
T0=30	P0=2,5	T0_P0_Q0	T0_P0_Q1	T0_P0_Q2	T0_P0_Q3	T0_P0_Q4	T0_P0_Q5	T0_P0_Q6	T0_P0_Q7	T0_P0_Q8
T0=30	P1=5	T0_P1_Q0	T0_P1_Q1	T0_P1_Q2	T0_P1_Q3	T0_P1_Q4	T0_P1_Q5	T0_P1_Q6	T0_P1_Q7	T0_P1_Q8
T0=30	P2=7,5	T0_P2_Q0	T0_P2_Q1	T0_P2_Q2	T0_P2_Q3	T0_P2_Q4	T0_P2_Q5	T0_P2_Q6	T0_P2_Q7	T0_P2_Q8
T1=40	P0=2,5	T1_P0_Q0	T1_P0_Q1	T1_P0_Q2	T1_P0_Q3	T1_P0_Q4	T1_P0_Q5	T1_P0_Q6	T1_P0_Q7	T1_P0_Q8
T1=40	P1=5	T1_P1_Q0	T1_P1_Q1	T1_P1_Q2	T1_P1_Q3	T1_P1_Q4	T1_P1_Q5	T1_P1_Q6	T1_P1_Q7	T1_P1_Q8
T1=40	P2=7,5	T1_P2_Q0	T1_P2_Q1	T1_P2_Q2	T1_P2_Q3	T1_P2_Q4	T1_P2_Q5	T1_P2_Q6	T1_P2_Q7	T1_P2_Q8
T2=50	P0=2,5	T2_P0_Q0	T2_P0_Q1	T2_P0_Q2	T2_P0_Q3	T2_P0_Q4	T2_P0_Q5	T2_P0_Q6	T2_P0_Q7	T2_P0_Q8
T2=50	P1=5	T2_P1_Q0	T2_P1_Q1	T2_P1_Q2	T2_P1_Q3	T2_P1_Q4	T2_P1_Q5	T2_P1_Q6	T2_P1_Q7	T2_P1_Q8
T2=50	P2=7,5	T2_P2_Q0	T2_P2_Q1	T2_P2_Q2	T2_P2_Q3	T2_P2_Q4	T2_P2_Q5	T2_P2_Q6	T2_P2_Q7	T2_P2_Q8

Onde X representa uma etapa de teste a uma vazão, temperatura e pressão específica. Q0, Q1... e Q8 representam as vazões de 5, 10, 15, 20, 25, 20, 15, 10 e 5m³/h, respectivamente. Estas variações de vazão crescente e decrescente foram necessárias para avaliar a histerese do MOPUS. Para poder avaliar a repetitividade foi necessário então repetir cada teste da matriz por três vezes.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo anterior foi apresentada a matriz de condições utilizada para realizar os testes no circuito de óleo. Neste capítulo serão apresentados e discutidos a calibração inicial, assim como os resultados e novos testes elaborados a partir destes resultados.

7.1 PRIMEIRO TESTE DO MOPUS PARA O TRECHO 1

Antes de calibrar o medidor foi realizada uma corrida usando o trecho 1 (de menor vazão), onde a pressão e a temperatura foram mantidas constantes e nos valores mínimos dos limites de operação (30°C e 2,5bar), com o objetivo de melhor observar o efeito do aumento destas variáveis na medição final da vazão. As vazões foram escolhidas de forma a proporcionar no mínimo 5 patamares de vazão regularmente espaçados na faixa de operação do primeiro medidor de referência. A vazão do medidor ultrassônico foi calculada através das equações descritas no capítulo 2, associadas aos dados construtivos do protótipo, conforme descritos no capítulo 5 e os dados operacionais recebidos do medidor ultrassônico. A Figura 21 mostra o resultado deste teste inicial.

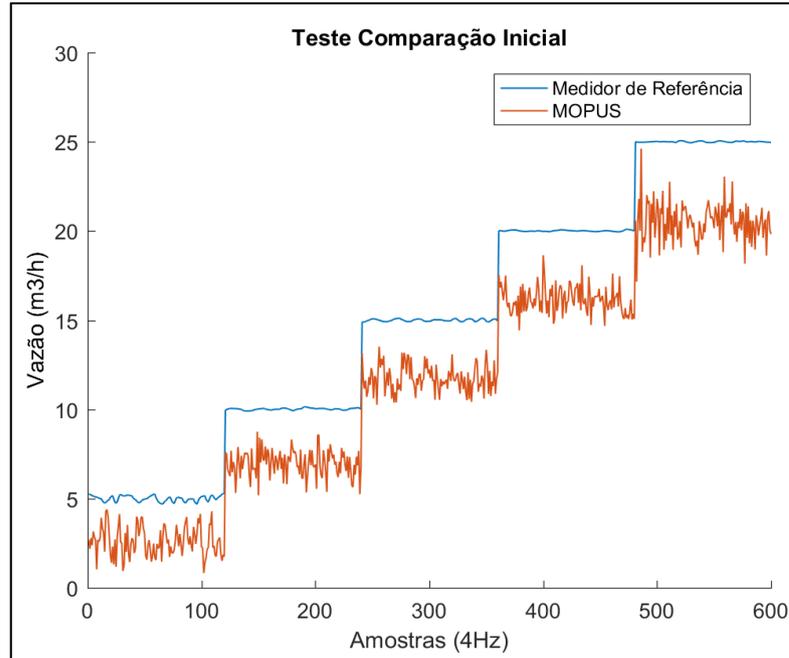


Figura 21: Vazão medido pelos medidores (protótipo em vermelho e referência em azul)

Na Figura 21, estão apresentados: a vazão sem correções medida pelo MOPUS e também a vazão da medida pelo medidor de referência ao mesmo tempo. Nota-se que a vazão do MOPUS está sempre menor que a vazão indicada pelo medidor de referência. Isso indica um erro sistemático.

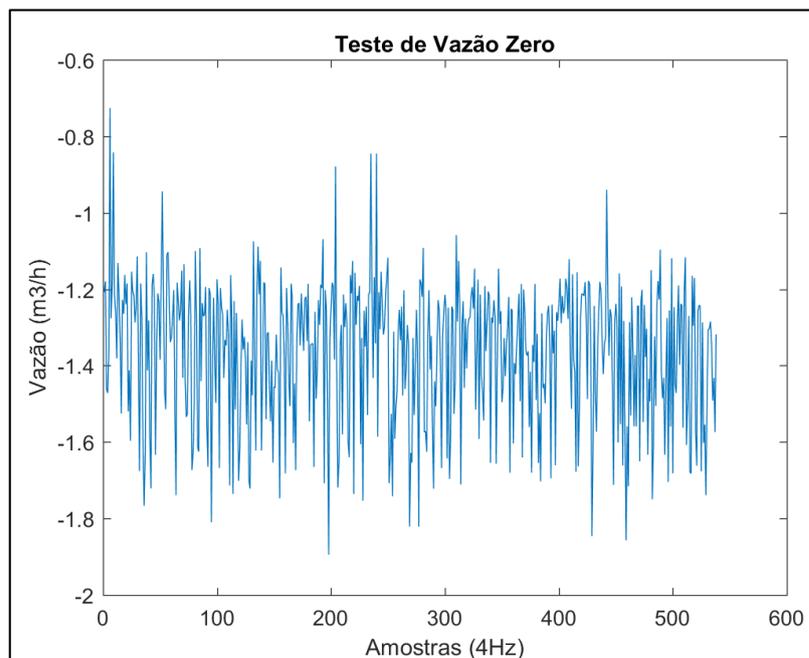


Figura 22: Medição Do MOPUS Em Vazão Nula

É possível inferir que há um erro nos valores usados no cálculo da vazão. Isso se torna mais evidente quando o MOPUS foi usado para medir a vazão nula de um óleo. A seguinte figura (22) mostra o resultado de medição efetuada da mesma forma em um óleo em repouso com a uma temperatura de 50°C e sem acionamento da válvula de pressão. É observado que, mesmo sem um escoamento, o medidor apresenta um erro sistemático com média de $-1.33\text{m}^3/\text{h}$ e aleatório de $\pm 0.363\text{m}^3/\text{h}$ (95% de confiança). Como os dados referentes a geometria mantiveram-se constantes, a única causa desse erro seria no cálculo de tempo de trânsito. Segundo o NIST (2001), assim como o Folkestad e Mylvaganam (1993), os tempos de trânsito medidos são influenciados pelo seguintes fontes de erros sistemáticos:

- Efeitos na detecção/processamento de sinal (por exemplo, identificação do período errôneo do sinal);
- Possíveis depósitos na face do transdutor (óleo lubrificante, líquido, cera, graxa, etc.);
- Refração do som (efeitos de perfil de fluxo nos tempos de trânsito);
- Reflexão do feixe na parede do corpo do medidor.

Como o circuito foi de pouco uso, foi descartado as influências de depósitos na face do transdutor. Entretanto, as outras fontes de erro poderiam estar afetando o medidor. Para melhor entender esse fenômeno foram plotados os tempos de trânsito (a jusante e a montante) para esse caso (Figura 23).

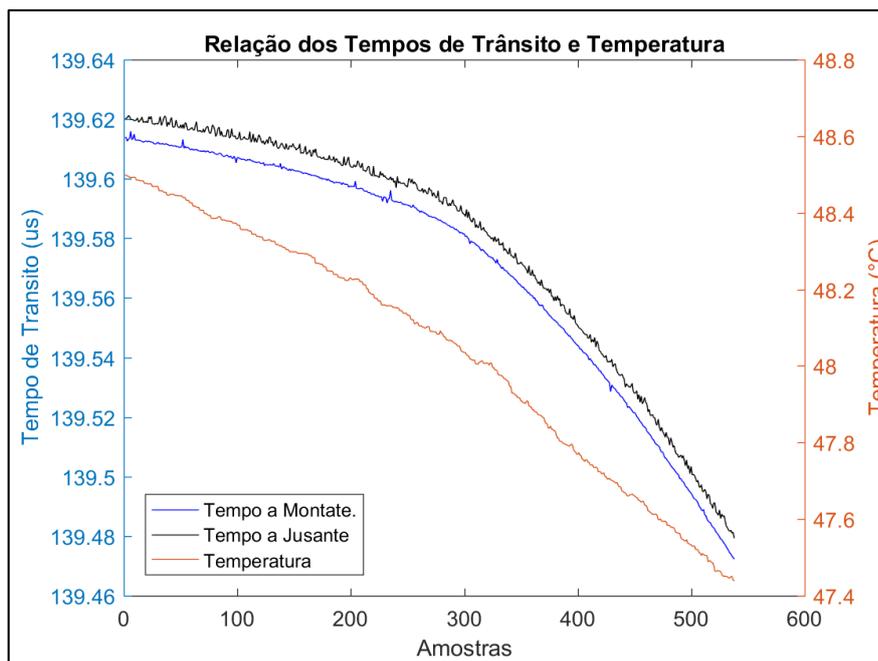


Figura 23: Tempos de trânsito do MOPUS em vazão nula.

O primeiro erro observado nesse gráfico é a discrepância entre os tempos de trânsito para uma velocidade nula, uma vez que os mesmos deveriam ser iguais nessa condição. Outra observação feita é a variabilidade do tempo de trânsito a jusante quando comparado ao tempo a montante. A temperatura foi plotada para mostrar a progressão negativa do tempo de trânsito com a temperatura. O fenômeno da variância também foi observado na Figura 21, onde o medidor ultrassônico demonstra uma variância elevada (muito além daquela apresentada para vazão nula), mesmo para uma vazão relativamente estável, conforme atesta o registro do medidor de referência. Essa característica é típica da tecnologia de medidores de vazão por ultrassom, pois medem a velocidade instantânea. Entretanto, como a vazão era nula para a Figura 23, a única explicação é a existência de aleatórios no cálculo dos tempos de trânsito. O NIST (2001) cita que as causas desses erros aleatórios são:

- Turbulência (flutuações do tempo de trânsito devido à velocidade aleatória);
- Ruídos incoerentes (válvulas de controle de pressão, vibrações de tubos, etc.);
- Ruídos coerentes (conversação acústica através do corpo do medidor, conversão eletromagnética, reverberação acústica em gás, etc.);

- Estabilidade eletrônica (possíveis efeitos aleatórios);
- Possíveis efeitos aleatórios na detecção/processamento de sinal (por exemplo, identificação do período de sinal errado);
- Variações do fornecimento de energia.

No caso de vazão nula, estas oscilações só poderiam ter sido provocadas por possíveis efeitos aleatórios na detecção/processamento de sinal, considerando que não há influência de estratificação de temperatura no óleo parado. As oscilações encontradas na figura 21 podem ser causadas por outros motivos no circuito de óleo como por exemplo turbulência ou uma oscilação na válvula de pressão. Este comportamento será novamente discutido na seção 7.4.

Os medidores permaneceram nessas faixas de vazão por dois minutos onde os dados foram coletados e armazenados. Nesse período, foi selecionada uma faixa de dados de 30 segundos com 120 leituras de referência (uma taxa de aquisição de 250ms) onde a variância do processo foi mínima. Isso foi feito a fim de garantir que a variância do processo teria uma influência mínima sobre a variância apresentada no MOPUS.

Essa seleção foi efetuada calculando a variância de pressão, temperatura e vazão de referência das 120 primeiras amostras sequenciais de uma corrida usando a equação 36. Essas três variâncias então foram somadas e o resultado anotado e tabelado. Esse processo foi repetido de modo a calcular a “variância combinada” para todas as possibilidades de combinações sequenciais da corrida para encontrar uma faixa onde essa variável fosse mínima.

$$s^2 = \sum \frac{(x-\bar{x})^2}{n-1} \quad (36)$$

Foram encontradas 5 faixas de variância, uma para cada patamar de vazão. A Tabela 9 mostra um resumo das faixas encontradas nos primeiros testes do experimento com as médias das vazões em cada patamar de vazão, assim como dados referentes a faixa de operação.

Tabela 9 - Primeiro Teste do MOPUS

\bar{Q}_{ref1} (m ³ /h)	\bar{Q}_{MOPUS} (m ³ /h)	\bar{P} (bar)	\bar{T} (°C)	\bar{Re}_{MOPUS}	$S^2(\bar{Q}_{MOPUS})$ ($\frac{m^3}{h}$) ²	$S^2(\bar{Q}_{ref1})$ ($\frac{m^3}{h}$) ²	$S^2(\bar{P})$ (bar) ²	$S^2(\bar{T})$ (°C) ²
5.00	2.76	2.56	29.23	9.94	0.50	0.122	0.131	0.007
10.02	6.95	2.49	29.28	24.98	0.29	0.040	0.025	0.009
14.99	11.79	2.51	29.48	42.37	0.31	0.045	0.030	0.005
20.00	16.25	2.50	29.92	58.44	0.35	0.018	0.011	0.003
25.00	20.57	2.50	30.50	73.94	0.38	0.018	0.008	0.009

A tabela indica uma leve correlação entre as variâncias de pressão e temperatura com a vazão de referência. Este tópico será melhor explorado na seção 7.4.

Para avaliar se as medições de vazão obtidas pelo MOPUS apresentam uma relação linear com as medições feitas pelo medidor de referência, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 24 que indica este comportamento entre os instrumentos.

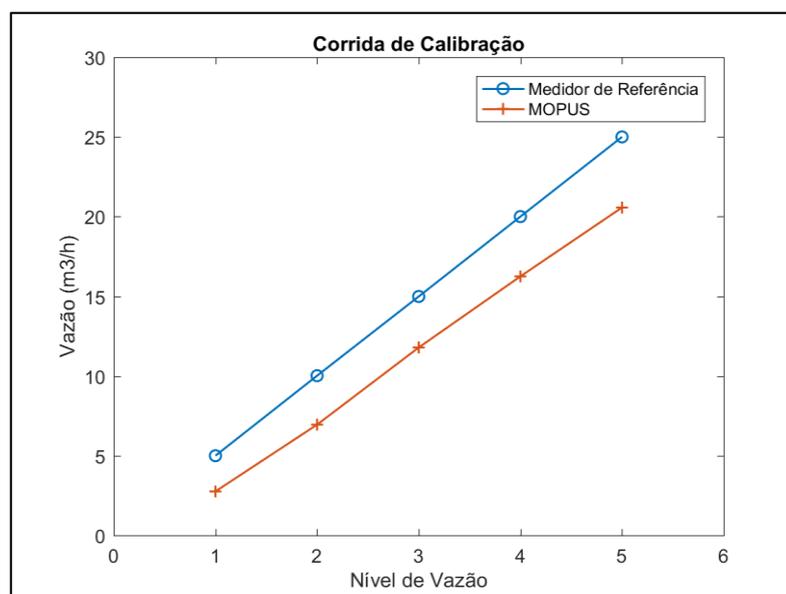


Figura 24: Médias das vazões dos instrumentos em uma faixa de mínima variância do processo

Como mencionado anteriormente, a Figura 24 indica, graficamente, uma forte correlação entre os dois medidores. Além disso, para garantir que o medidor ultrassônico estava tendo um comportamento estável em relação aos tempos de trânsito, elaborou-se o gráfico dos tempos de transitos apresentado na Figura 25.

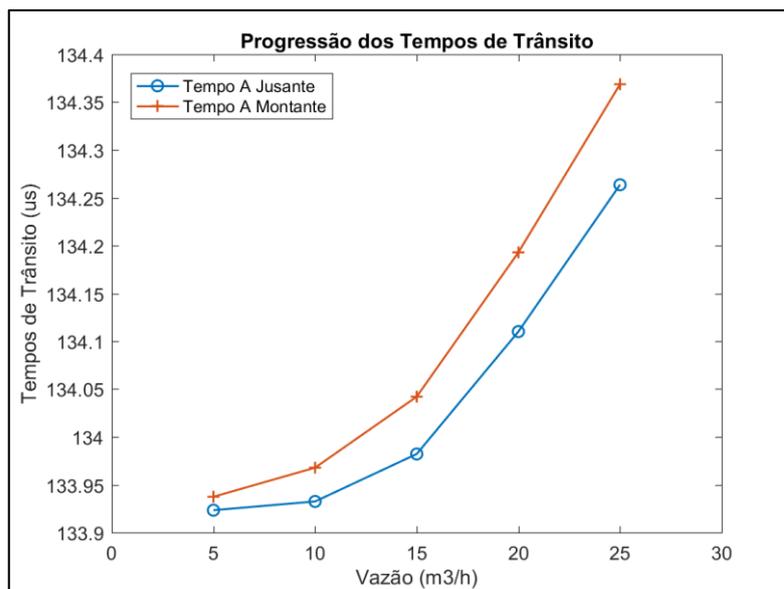


Figura 25: Média dos tempos de trânsito para cada vazão

Inicialmente, o gráfico mostrado na Figura 25 indica uma falsa noção de que o protótipo MOPUS está apresentando um comportamento errôneo, pois os dois tempos de trânsito estão aumentando com o aumento da vazão. O esperado é que um tempo aumente e o outro diminua, pois o aumento da velocidade axial da vazão atrasa o pulso ultrassônico à montante e adianta o pulso à jusante. Porém, como mostra a Tabela 9, a temperatura também aumentou nesse período. O aumento de temperatura ocorre devido à alta dissipação viscosa gerada pelo fluido na bomba de fusão. Este fenômeno é conhecido, tendo em vista a viscosidade relativamente alta que prejudica a estabilidade da temperatura, como será visto nas próximas seções.

O aumento da temperatura em óleos pesados acarreta uma redução da velocidade do som nesse meio (DASHTI; RIAZI, 2014) e com isso, o tempo de trânsito do pulso ultrassônico aumenta. A fim de corrigir esse fenômeno, foi elaborada uma correção destes tempos para que esse atraso causado pela redução da velocidade fosse anulado. Para isso foi utilizado o cálculo da velocidade do som calculado pelos próprios tempos de trânsito (Eq. 37), como apresentado na tabela 10. A partir desse cálculo, obteve-se a diferença de tempo de trânsito do pulso ultrassônico, causada pela redução da velocidade do som em cada patamar de velocidade. Esse valor então foi incorporado aos tempos de trânsitos medidos, obtendo-se um tempo de trânsito corrigido.

$$c_0 = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_{BA} + t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \quad (37)$$

Tabela 10 - Correção do tempo de trânsito pela velocidade do som

\bar{Q}_{MOPUS} (m ³ /h)	\bar{T} (°C)	\bar{t}_{ab} (ms)	\bar{t}_{ba} (ms)	\bar{c}_0 (ms)	$t = \frac{L}{\bar{c}_0}$ (ms)	Δt_0 (ms)	\bar{t}_{abcorr} (ms)	\bar{t}_{bacorr} (ms)
2.76	29.23	133.923	133.937	1278.574	133.930	0.000	133.937	133.923
6.95	29.28	133.933	133.968	1278.385	133.950	0.020	133.948	133.913
11.79	29.48	133.982	134.042	1277.795	134.012	0.082	133.960	133.900
16.25	29.92	134.110	134.193	1276.467	134.152	0.221	133.972	133.889
20.57	30.50	134.264	134.369	1274.902	134.316	0.386	133.983	133.878

A Figura 26 mostra os tempos de trânsito com a correção da velocidade do som baseada na temperatura.

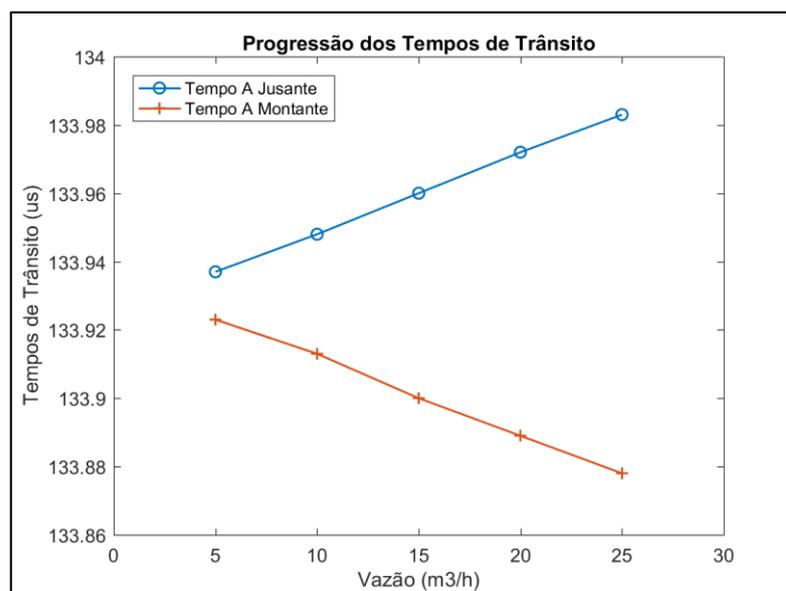


Figura 26: Média dos tempos de trânsito corrigidos para cada vazão.

O comportamento esperado para o aumento da velocidade é ilustrado na Figura 26. Isso reforça a independência deste medidor em relação a velocidade do som do fluido. As diferenças dos tempos de trânsito médios em cada patamar de vazão também foram plotadas (Figura 27) para melhor visualização do comportamento destes em relação ao aumento de velocidade de escoamento. Esta figura apresenta um comportamento esperado, pois com o aumento linear da velocidade, a diferença entre os tempos de trânsito devem aumentar de forma proporcional. Essa afirmação só se faz verdadeira pelo regime de manter laminar, assim como não atingir valores

suficientes para distorcer o caminho acústico causando erros no cálculo do tempo de trânsito.

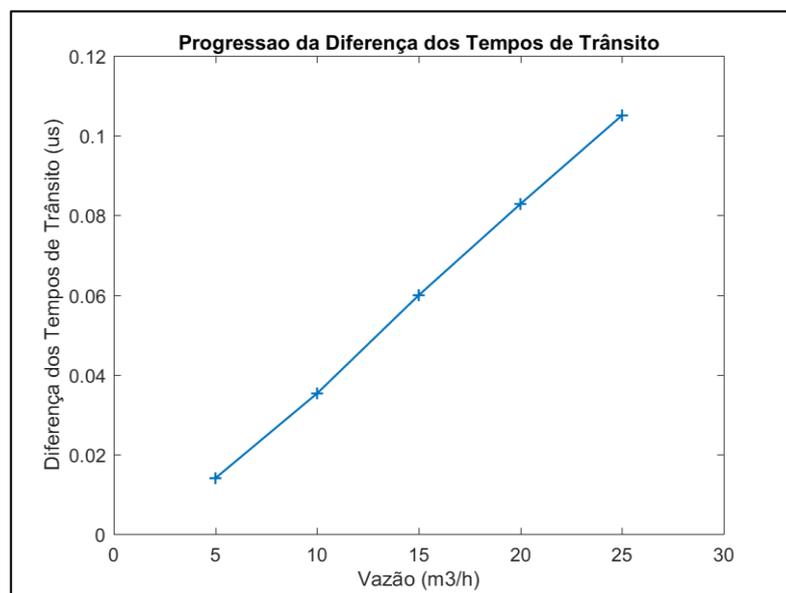


Figura 27: Progressão dos Tempos de Trânsito

7.2 PRIMEIRO TESTE DO MOPUS PARA O TRECHO 2

Antes de realizar qualquer calibração do medidor foi efetuado um teste usando o segundo trecho do circuito onde o medidor de referência de maior vazão estava instalado. Notou-se que a dissipação viscosa, já citada na seção anterior, apresentou uma influência ainda maior nos novos patamares programados de vazão. Em função desse fenômeno, buscou-se um patamar onde a dissipação viscosa fosse equilibrada com a troca de calor com o ambiente, de modo a estabilizar a temperatura e realizar testes sem a influência da variância induzida pela dissipação. Foi observado que a temperatura aumentou sem indícios de estabilização, mesmo com mais de 4 horas de testes. O histórico de elevação da temperatura pode ser visualizado na Figura 28.

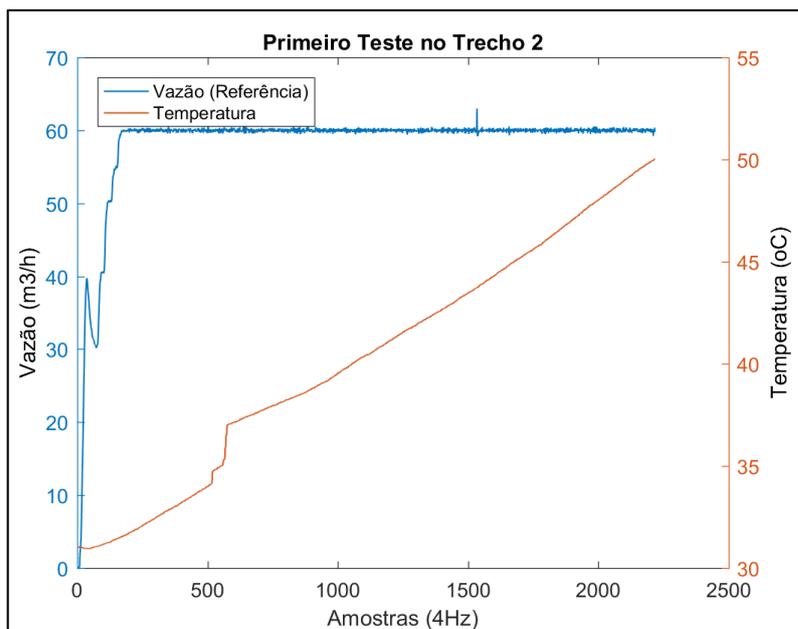


Figura 28: Aumento da temperatura do óleo em função da dissipação viscosa

Os testes foram interrompidos quando a temperatura atingiu 50°C para não causar danos aos instrumentos e também para não alterar as propriedades do fluido de forma irreversível. Durante a medição, ruídos que poderiam danificar o processo foram gerados no acoplamento entre o motor e a bomba. Deste modo, com a instabilidade da temperatura e os ruídos, testes neste trecho não foram mais realizados.

7.3 CALIBRAÇÃO INICIAL DO MOPUS

A calibração inicial do MOPUS foi realizada seguindo a Norma API MPMS 5.8 (2005). Segundo a norma, a calibração é procedida realizando corridas onde as leituras do medidor de referência são comparadas ao medidor protótipo e, sendo então desenvolvida uma equação de calibração.

Para verificar quanto a variância dos parâmetros de operação afeta o erro absoluto e relativo final, uma matriz de testes (citado no capítulo anterior) foi feita. Para futuras análises de repetitividade, esse matriz foi realizada em triplicata. A pressão e a temperatura foram variadas junto com as vazões. A fim de avaliar efeitos de

histerese, posteriormente as vazões foram variadas de forma crescente e depois decrescente.

A Figura 29 (parte de cima) mostra como as vazões foram variadas durante a matriz. Já a Figura 29 (parte de baixo) mostra um exemplo de como os parâmetros de operações foram variados durante a matriz.

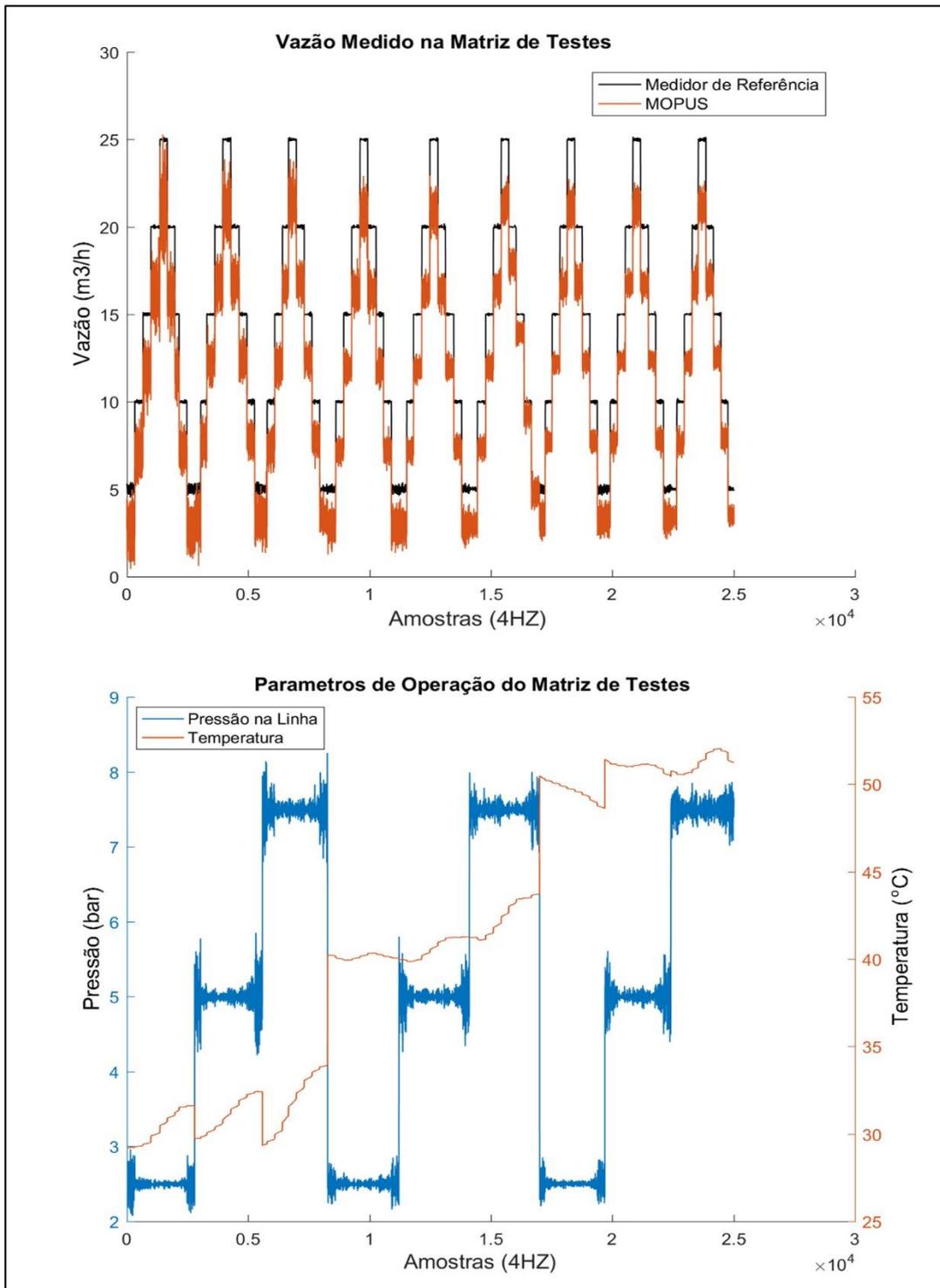


Figura 29: Acima: Variação da Vazão durante a matriz os Testes. Abaixo: Variação da temperatura e pressão durante a matriz de testes

Segundo a norma ASME PTC 19.5 (2004), corridas de calibração devem durar no mínimo 30 segundos. Com isso, realizou-se uma bateria de testes com duração de 2 minutos em cada patamar de vazão. Das leituras foram selecionadas novamente

faixas onde a variância do processo foi mínima, desta vez de 30 segundos. Nessas leituras foi aplicada uma regressão linear a partir das equações 38 e 39 em uma rotina escrita em MatLab, obtendo-se os valores de ganhos (β_1) e zeros (β_0) para calibrar o protótipo.

$$\beta_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n \bar{Q}_{MOPUS_i} \bar{Q}_{Ref_i} - \sum_{i=1}^n \bar{Q}_{MOPUS_i} \sum_{i=1}^n \bar{Q}_{Ref_i}}{n \sum_{i=1}^n \bar{Q}_{MOPUS_i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n \bar{Q}_{MOPUS_i} \right)^2} \quad (38)$$

$$\beta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{Q}_{Ref_i} - \beta_1 \sum_{i=1}^n \bar{Q}_{MOPUS_i}}{n} \quad (39)$$

$$\bar{Q}_{MOPUS_{calib}} = \beta_1 \cdot \bar{Q}_{MOPUS} + \beta_0 \quad (40)$$

Uma vez que a matriz de teste era muito extensa, elaborou-se a Tabela 11 com os resultados dos valores mínimos dos limites de operação (30°C e 2,5bar) dessa calibração inicial. Por uma questão de síntese, os demais patamares encontram-se no anexo A.

Tabela 11 - Corrida de Calibração

\bar{Q}_{ref1} (m ³ /h)	\bar{Q}_{MOPUS} (m ³ /h)	$\sigma^2(Q_{ref1})$	$\sigma^2(Q_{MOPUS})$	Ganho	Zero	$\bar{Q}_{MOPUS_{calib}}$ (m ³ /h)
4.999	2.596	0.158	0.818	1.1124	2.116	5.003
10.017	6.980	0.052	0.751			9.878
14.998	11.731	0.060	0.745			15.161
20.008	16.133	0.032	0.774			20.056
25.002	20.492	0.028	1.078			24.903

Foram calculados também a variância, o desvio padrão, e as médias dos erros relativos e absolutos para as medições do MOPUS antes e depois da calibração (Tabela 12 e 13). As equações usadas para esses cálculos foram:

$$\overline{Erro_{relativo}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{(\bar{Q}_{Ref_i} - \bar{Q}_{MOPUS_i})}{\bar{Q}_{Ref_i}} \right)^2}}{n} \quad (41)$$

$$\overline{Erro} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(\bar{Q}_{Ref_i} - \bar{Q}_{MOPUS_i})^2}}{n} \quad (42)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |Q_{MOPUS_i} - \bar{Q}_{MOPUS}|^2}{n-1}} \quad (43)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{MOPUS_i} - \bar{Q}_{MOPUS}|^2}{n-1} \quad (44)$$

Tabela 12 - Variâncias da Corrida de Calibração

\bar{Q}_{MOPUS} (m ³ /h)	$\bar{Q}_{MOPUS_{calib}}$ (m ³ /h)	$\sigma^2(Q_{MOPUS})$	$\sigma^2(Q_{MOPUS_{calib}})$	$\sigma(Q_{MOPUS})$	$\sigma(Q_{MOPUS_{calib}})$
2.596	5.003	0.818	0.828	0.904	0.910
6.980	9.878	0.751	0.698	0.867	0.835
11.731	15.161	0.745	0.686	0.863	0.828
16.133	20.056	0.774	0.741	0.880	0.861
20.492	24.903	1.078	1.438	1.038	1.199

Tabela 13 - Erros da Corrida de Calibração

\bar{Q}_{MOPUS} (m ³ /h)	$\bar{Q}_{MOPUS_{calib}}$ (m ³ /h)	Erro Inicial (m ³ /h)	Erro Pós-Calib (m ³ /h)	Erro Relativo Inicial (%)	Erro Relativo Pós-Calib (%)
2.596	5.003	2.402	0.779	48.07%	15.6%
6.980	9.878	3.037	0.680	30.32%	6.8%
11.731	15.161	3.267	0.672	21.79%	4.5%
16.133	20.056	3.875	0.693	19.37%	3.5%
20.492	24.903	4.510	0.916	18.04%	3.7%

Para validar a calibração realizou-se outra corrida onde os valores de calibração foram aplicados, a título de verificação da calibração. O mesmo procedimento de escolha de faixa de dados foi realizado e os resultados da calibração estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Corrida de Verificação da Calibração

\bar{Q}_{ref1} (m ³ /h)	\bar{Q}_{MOPUS} (m ³ /h)	$\sigma^2(Q_{ref1})$	$\sigma^2(Q_{MOPUS})$	Ganho	Zero	$\bar{Q}_{MOPUS_{corr}}$ (m ³ /h)
5.020	3.083	0.158	0.818	1.1124	2.116	5.544
10.006	7.500	0.052	0.751			10.456
14.996	12.241	0.060	0.745			15.728
19.988	16.598	0.032	0.774			20.573
25.003	21.142	0.028	1.078			25.626

Os valores da variância e as médias dos erros relativos e absolutos também foram calculados em relação a vazão de referência e se encontram nas tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Variâncias da Corrida de Validação

\bar{Q}_{MOPUS} (m ³ /h)	$\bar{Q}_{MOPUS_{calib}}$ (m ³ /h)	$\sigma^2(Q_{MOPUS})$	$\sigma^2(Q_{MOPUS_{calib}})$	$\sigma(Q_{MOPUS})$	$\sigma(Q_{MOPUS_{calib}})$
3.083	5.544	0.730	0.659	0.854	0.812
7.500	10.456	0.497	0.305	0.705	0.552
12.241	15.728	0.567	0.397	0.753	0.630
16.598	20.573	0.713	0.629	0.844	0.793
21.142	25.626	0.990	1.211	0.995	1.100

Tabela 16 - Erros da Corrida de Calibração

\bar{Q}_{MOPUS} (m ³ /h)	$\bar{Q}_{MOPUS_{calib}}$ (m ³ /h)	Erro Inicial (m ³ /h)	Erro Pós-Calib (m ³ /h)	Erro Relativo Inicial (%)	Erro Relativo Pós- Calib (%)
3.083	5.544	1.940	0.829	38.58%	16.74%
7.500	10.456	2.506	0.593	25.05%	5.94%
12.241	15.728	2.756	0.795	18.37%	5.30%
16.598	20.573	3.391	0.789	16.96%	3.95%
21.142	25.626	3.861	0.978	15.44%	3.92%

Os dados usados para obter as tabelas 15 e 16 foram plotadas (Figura 30) para melhor observar o comportamento do MOPUS em relação ao medidor de referência.

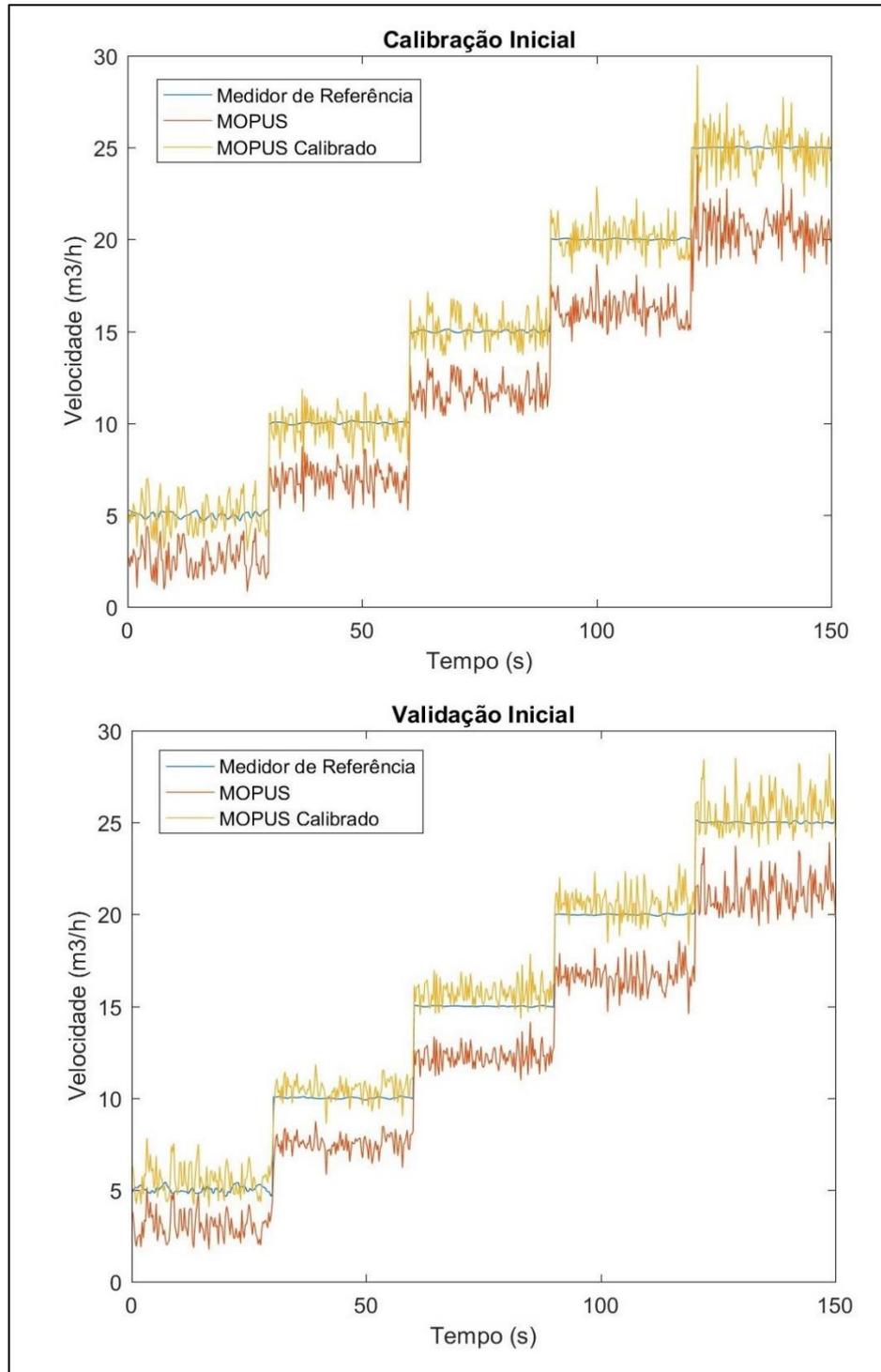


Figura 30: Vazões Do MOPUS Sem E Com A Calibração

Esse mesmo procedimento foi realizado para a matriz inteira e o erro relativo da matriz de calibração e validação, pode ser observado nas figuras 31, 32 e 33. É importante ressaltar que uma calibração foi efetuada para cada combinação de operação usando os dados de uma matriz conforme a Tabela 17. Uma vez calculada a calibração, aplicou-se a mesma aos dados de duas outras matrizes.

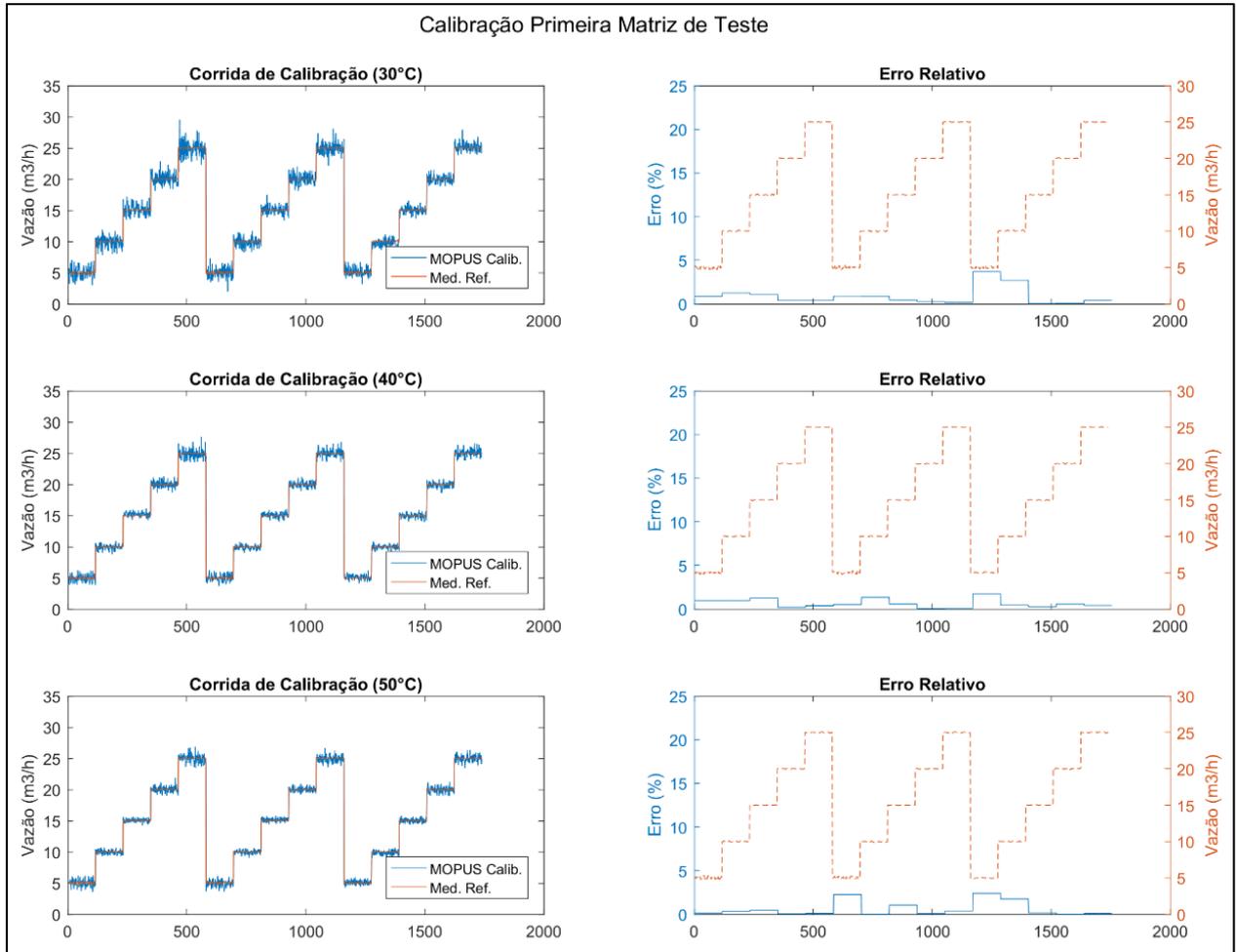


Figura 31: Calibração Da Matriz Completa E Erros Relativos Em Relação Ao Medidor De Referência

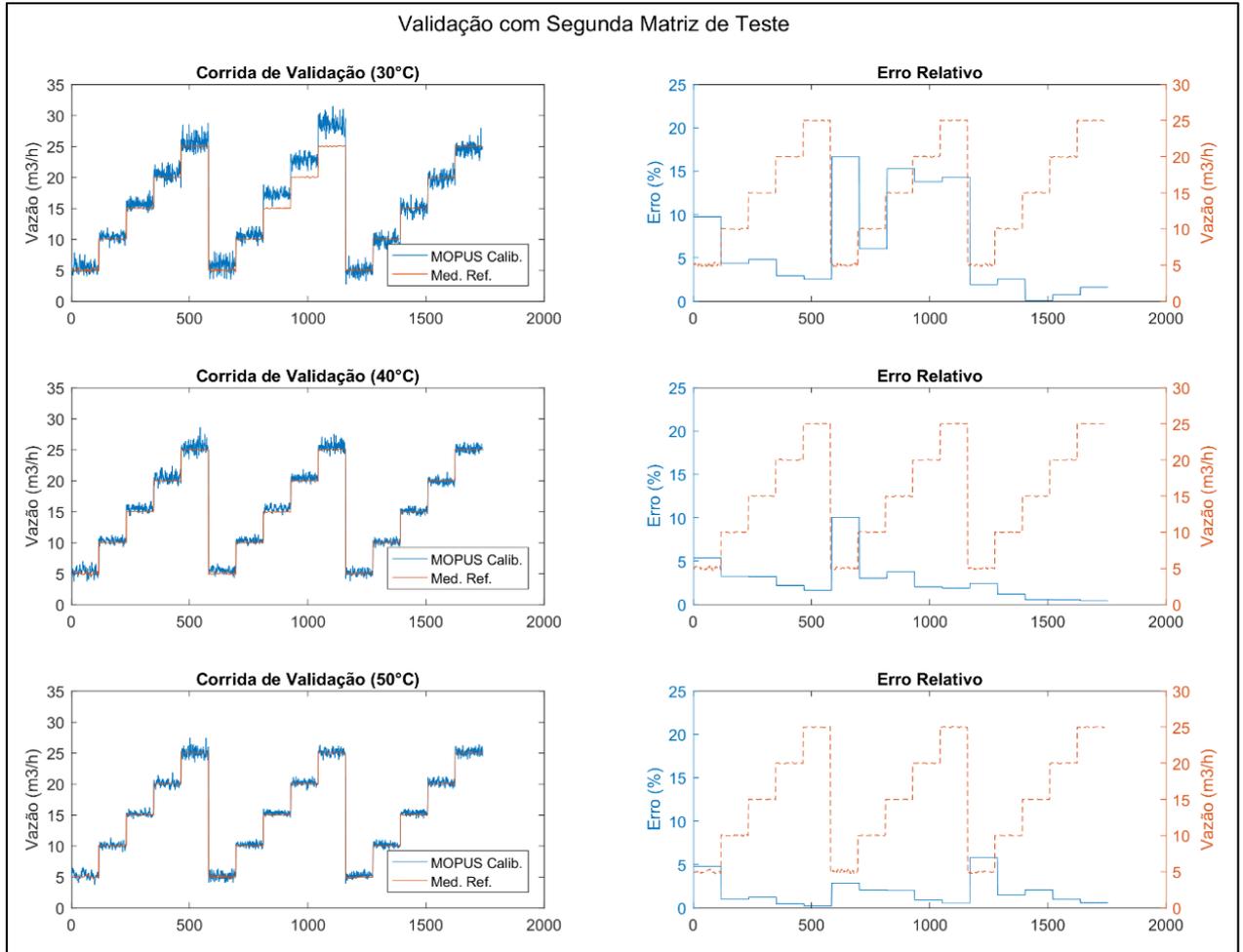


Figura 32: Validação Feita Com A Calibração Realizada Em Uma Matriz E Aplicada A Outra E Os Erros Relativos Em Relação Ao Medidor De Referência

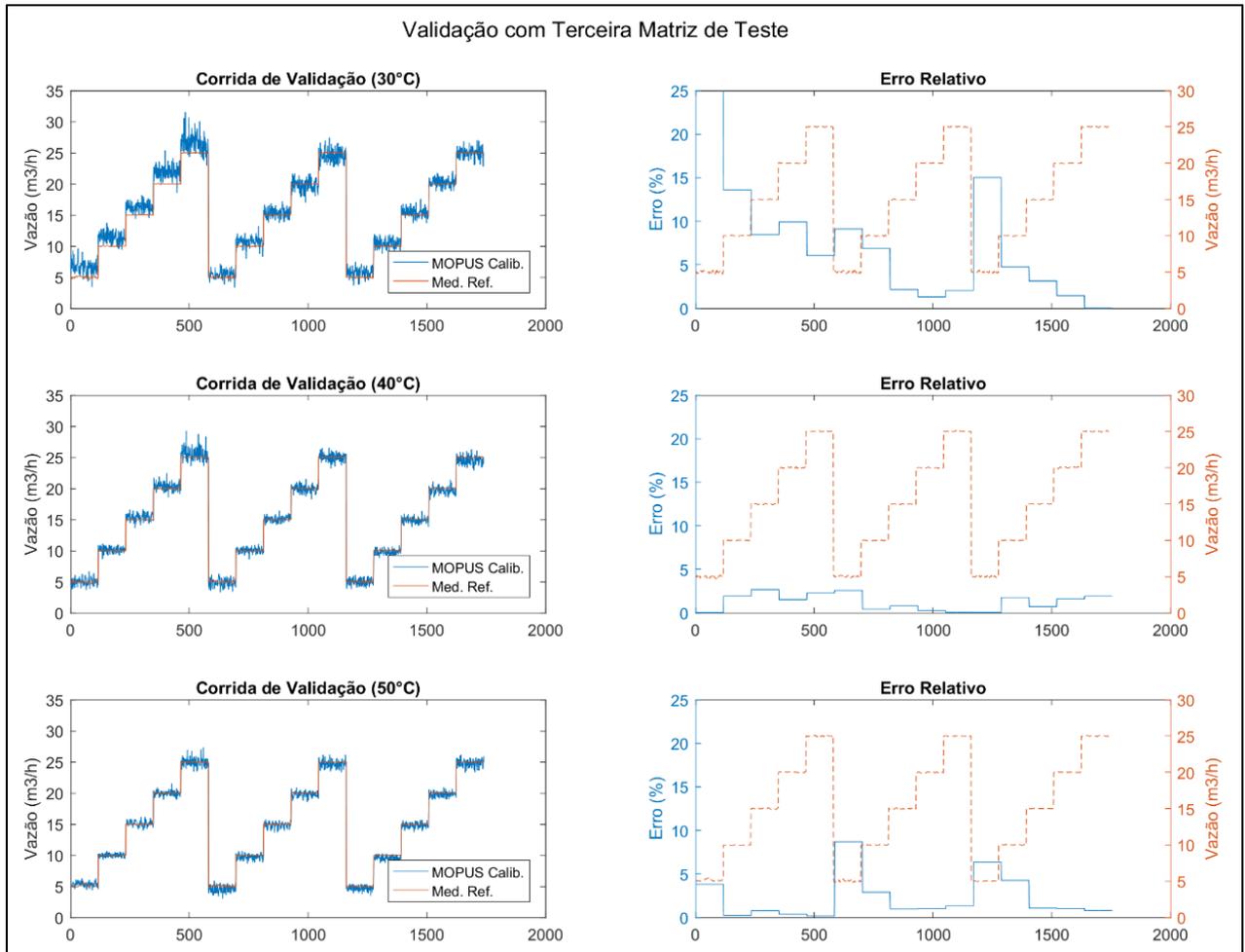


Figura 33: Validação Feita Com A Calibração Realizada Em Uma Matriz E Aplicada A Uma Terceira Matriz E Os Erros Relativos Em Relação Ao Medidor De Referência

Tabela 17 - Zeros e Ganhos Matriz de Calibração

Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Vazão (m³/h)	Ganho (β_1)	Zero (β_0)
30	2.5	5-25	1.112	2.114
30	5	5-25	1.120	1.320
30	7.5	5-25	1.101	1.720
40	2.5	5-25	1.127	1.741
40	5	5-25	1.116	1.800
40	7.5	5-25	1.092	1.865
50	2.5	5-25	1.118	1.395
50	5	5-25	1.124	1.231
50	7.5	5-25	1.119	1.328

Conforme observado nas Figuras, novamente há uma variância elevada, mesmo para uma vazão relativamente estável. A razão dessa instabilidade pode ser causada por vários fatores. Uma deles é a sensibilidade desse medidor em relação a turbulência no escoamento, e outra a instabilidade dos controladores da planta de

óleo. A primeira vista o segundo fator (instabilidade da planta) não parece ser a causa deste problema, pois as leituras do medidor de referência também seriam afetadas. Entretanto, durante os experimentos, notou-se um tempo de resposta maior que esperado desse medidor referência. Isso indica que um filtro de linearização pode estar corrigindo essa variância do sistema. Para melhor entender a causa dessa variabilidade, fez-se uma análise da variância do MOPUS em relação as variâncias das variáveis controladas da planta, conforme será apresentado na seção 7.4.

7.4 ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA PLANTA

A análise de variância da planta foi realizada usando o mesmo conceito da soma quadrática da variâncias das variáveis controladas. Essa análise foi efetuada para toda matriz do experimento. A partir desses valores foi elaborado um gráfico de superfície para cada velocidade de operação em relação as variâncias do processo de forma a melhor visualizar a relação entre as variâncias do processo e a variância do MOPUS. Por uma questão de síntese, todos os gráficos podem ser encontrados no Anexo B. A Figura 34 mostra uma superfície onde o eixo vertical representa a variância a uma vazão fixa (nesse caso $5\text{m}^3/\text{h}$) e os eixos horizontais representam as condições de temperatura e pressão da planta. Essa configuração foi gerada para cada patamar de velocidade testada na matriz.

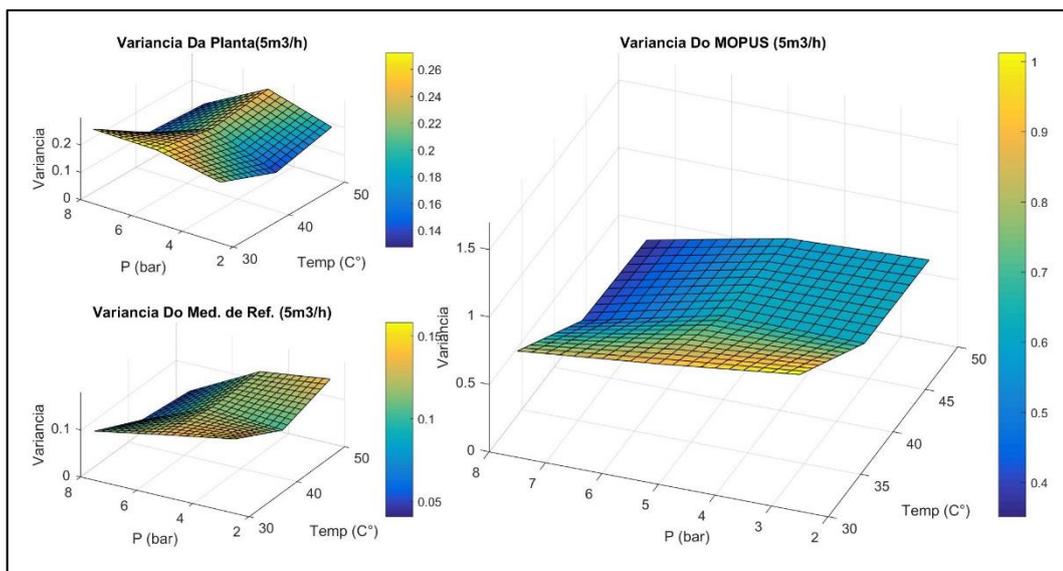


Figura 34: Variância Do MOPUS E Circuito De Testes Para Uma Vazão De 5m³/h

As figuras trazem uma noção do comportamento da variância do medidor em diversas circunstâncias de operação, assim como o comportamento da variância em relação a variância do sistema como um todo, onde observa-se uma tendência de aumentar a variância do MOPUS com o aumento da variância do sistema. Entretanto, essa tendência se limita as vazões mais baixas, uma vez que as vazões passam de 10m³/h a relação entre aumento das variâncias do processo com o protótipo não são mais evidentes.

A melhor condição de operação onde todas as variâncias são mínimas, é quando a temperatura está em 50°C e a pressão a 5bar. Uma razão dessa redução se deve a redução drástica da viscosidade do óleo que torna o controle mais simples para os controladores. Essa redução da viscosidade também reduz a velocidade do som e a atenuação ultrassônica. A redução da atenuação ultrassônica causa o sinal recebido pelo transdutor ser mais potente em relação a ruídos e assim torna-se mais evidente o início e final do tempo de trânsito. Essa situação de redução da variabilidade se repete para todas as outras faixas de vazão, o que pode ser explicado pela facilidade de controle de bombeamento do fluido com a redução da sua viscosidade. Para reduzir a variância do sistema seria necessário otimizar os controladores do sistema supervisorio da planta. Não foi possível realizar essa otimização a tempo, pois se trata de um sistema complexo com várias entradas e saída. Desta forma, o

único método plausível no momento foi a aplicação de uma linearização para reduzir as variâncias do medidor para chegar próximo ao medidor de referência.

7.5 ANÁLISE INICIAL DA INCERTEZA DO MOPUS

Para a análise inicial da incerteza do MOPUS foi seguido um passo-a-passo da norma ISO 5168 (2005).

7.5.1 Passo 1: Identificar o Mensurando

Para o primeiro passo é necessário identificar qual a quantidade medida e quais são os fatores que a afetam. O mensurando no caso do MOPUS é a vazão volumétrica (Q_v) que passa pelo circuito de óleo em cada patamar de velocidade. Os fatores que influenciam as medições feitas pelo instrumento são:

- L : a distância entre os transdutores;
- θ : o ângulo dos transdutores em relação ao tubo;
- t_{BA}, t_{AB} : o tempo de trânsito a montante e a jusante;
- πr^2 : a área transversal do tubo;
- β_1, β_0 : o ganho e zero da calibração

7.5.2 Passo 2: Equação do Modelo

O segundo passo consiste em achar o modelo que rege a medição. Nesse caso a equação 45 é usada para achar o Q_v :

$$Q_v = \left[\pi r^2 \cdot \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right] * 3600 * \beta_1 + \beta_0 \quad (45)$$

7.5.3 Passo 3: Determinar a Incerteza Padrão dos Fatores

Antes de achar a incerteza combinada do MOPUS foi necessário calcular a incerteza padrão $u(q)$ dos componentes usando os dados medidos, estimados e obtidos durante as corridas de testes. Para os valores mensuráveis como r , t_{BA} e t_{AB} a equação 46 foi usada:

$$u(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (46)$$

Para determinar a incerteza do raio (r) foram feitas medições diretamente no MOPUS usando um relógio comparador de inserção. Os dados obtidos estão resumidos no Anexo C.

Como a medida de distância da visada direta (distância entre as faces dos transdutores - L) e ângulo (θ) formado pelo transdutor com a direção do escoamento foram dados pelo fabricante e não mensurados durante o trabalho, estimou-se uma incerteza máxima de $u(L) = 0.5\text{mm}$ e $u(\theta) = 1.5^\circ$. As incertezas de t_{BA} e t_{AB} foram calculadas através dos dados obtidos durante as corridas de teste usando o método “*polyarci*” na biblioteca do *MatLab*.

Para os valores de β_1 e β_0 foi utilizado o desvio padrão calculado junto com a regressão linear usada para esses valores (intervalo de confiança 95%). A Tabela 18 resume esses cálculos para uma corrida da primeira matriz de testes onde a temperatura foi 30°C , a pressão 2.5bar e vazão $25\text{m}^3/\text{h}$. Os demais resultados estão sumarizados no Anexo D.

Tabela 18 - Matriz de Incertezas Padrão

Componentes	Valor	$u(x_i)$	$u_{relativo}(x_i)$
r	0.05144m	0.00005m	0.10%
L	0.1712m	0.0005m	0.29%
θ	45.0°	1.5°	3.33%
t_{BA}	1.341E-04s	8.675E-09s	0.00647%
t_{AB}	1.342E-04s	8.853E-09s	0.00660%
β_1	1.112	0.02186	1.97%
β_0	2.116	0.28340	13.39%

7.5.4 Passo 4: Calcular a Incerteza Combinada

De acordo com a ISO 5168 (2005), uma medida indireta é aquela em que a quantidade de saída (resultado) é encontrada por um cálculo (usando uma equação modelo) de várias quantidades de entrada. Cada fator usado no cálculo contribui para a incerteza final do medidor. Ou seja, a quantidade de saída (Y) é encontrada a partir das quantidades de entrada (X_1, X_2, \dots, X_n) de acordo com alguma função F na eq. 47:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (47)$$

Para esse caso a incerteza padrão combinada da quantidade de saída $u_c(y)$ pode ser expressa através das incertezas padrão das quantidades de entrada $u(x_i)$ na forma da eq. 48:

$$u_c(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} u(x_2)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_n} u(x_n)\right)^2} \quad (48)$$

Nesta equação, os termos $\left[\frac{\partial Y}{\partial X_1} u(x_1)\right]$ são os componentes da incerteza, onde os termos $\frac{\partial Y}{\partial X_1}$ são derivadas parciais da quantidade de saída (Y) em relação a quantidade de entrada (X_1). Para obter a incerteza padrão combinada é necessário desenvolver a equação 48 usando a regra de propagação de incertezas. Memória de cálculo necessário desenvolver a equação pode ser encontrado no Anexo I.

Com a equação desenvolvida e os valores das incertezas padrão encontrados no passo 3, pôde-se calcular a incerteza combinada. A tabela 19 mostra os valores obtidos.

Tabela 19 - Incerteza Combinada E Componentes

Componentes	Valor	$u(x_i)$	Índices de Incerteza $\frac{u(x_i)}{u(Q_v)^2}$
r	0.05144m	0.00005m	0.03%
L	0.1712m	0.0005m	0.06%
θ	45.0°	1.5°	5.10%
t_{BA}	1.341E-04s	8.675E-09s	44.71%
t_{AB}	1.342E-04s	8.853E-09s	46.41%
β_1	1.112	0.02186	2.66%
β_0	2.116	0.28340	1.03%
$\overline{Q_v}$	25.27 m³/h	± 4.79 m³/h	(k=2 ; 95% conf.)

Encontram-se na tabela também os pesos de cada componente no cálculo final da incerteza combinada, ou seja, o grau em que o componente afeta a incerteza combinada final. Encontrou-se uma incerteza combinada referente a cada patamar de vazão conforme mostrado na Figura 35. Nota-se que a maior parte da incerteza vem dos tempos de trânsito. É provável que essa incerteza vem do comportamento típico do medidor ultrassônico onde existe uma alta sensibilidade desse medidor em relação a turbulência no escoamento ou até de uma variância de vazão apresentada pela planta.

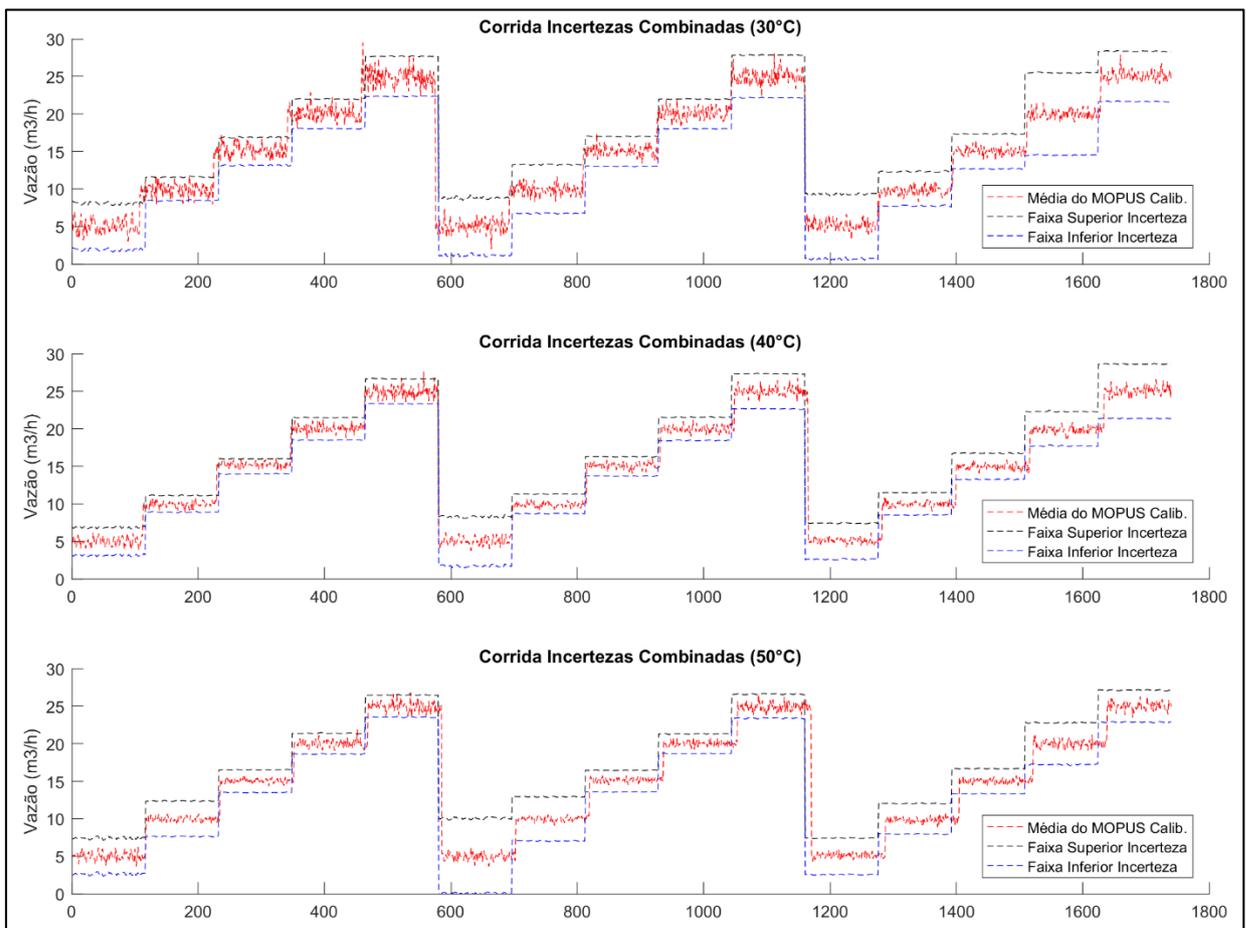


Figura 35: Incertezas Combinadas da primeira matriz de Teste ($k=2$)

A incerteza combinada da medição, apresentada na Figura 35, leva em consideração todos os fatores que influenciariam a incerteza da medição no circuito, tanto que 99,9% dos dados da medição se encontram dentro da faixa de incerteza. As variâncias do processo estão associados aos tempos de trânsito, que justifica o peso desses componentes na incerteza final.

A fim de melhorar a incerteza de medição do MOPUS para a planta, é necessário que seja feita uma correção dessa variância. A próxima seção trata essa variância de forma estatística.

7.6 LINEARIZAÇÃO DO MOPUS

O método de linearização mais utilizado para processadores de sinais digitais é a média móvel (SMITH, 2008). O método foi aplicado às leituras do MOPUS com o intuito de reduzir a variação. Esse método utiliza uma sucessão de médias derivadas de uma sequência de vazões sucessivas de tamanho constantes. Isso é feito usando a equação 50:

$$\bar{Q}_{movel} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n Q_{n-i} \quad (50)$$

Foi necessário também definir o número de amostras prévias usadas no cálculo (n). A escolha desse parâmetro foi de 2 segundos baseado no tempo de resposta de medidores ultrassônicos comerciais (IFM, 2016; SMARTMEASUREMENT, 2016). Nesse caso, isso significa uma média móvel das 8 leituras anteriores, por ter uma frequência de amostragem de 250ms. Esse cálculo foi feito para toda matriz de operação, observando-se uma redução na variância de forma geral. A Figura 36 mostra a comparação entre as medições feitas com e sem média móvel a uma temperatura de 30°C e pressão de 2,5bar.

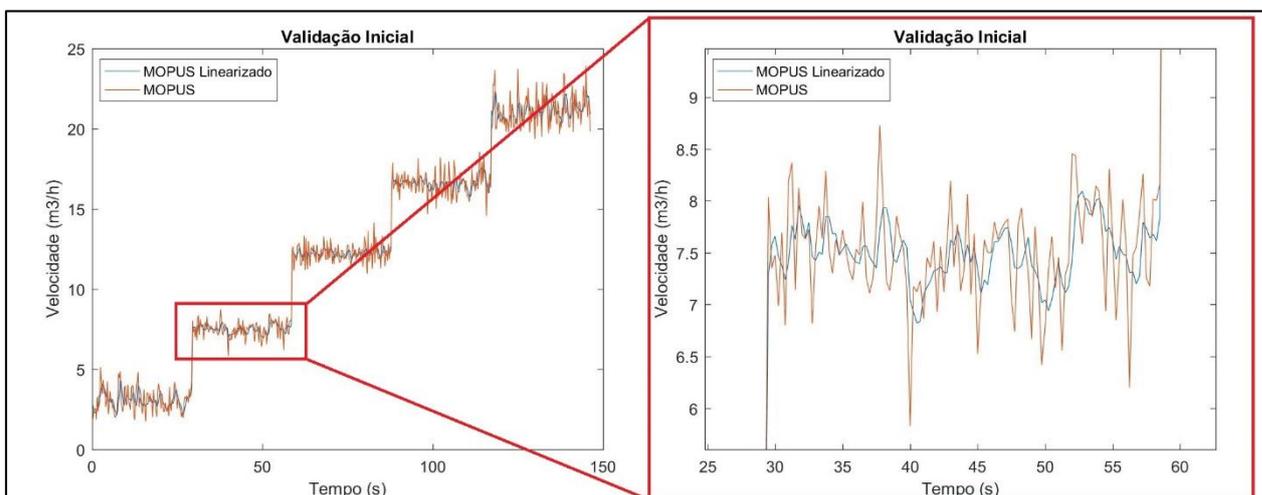


Figura 36: Linearização Com Média Móvel De 1 Segundo Para Uma Frequência De Aquisição De 4Hz

Nota-se que a linha que representa o medidor linearizado (em azul) tem uma variação menor que do que o medidor sem correções (em vermelho). Para quantificar a redução, calculou-se as variâncias de cada patamar de velocidade (Tabela 20), confirmando que a variação do medidor foi atenuada. Entretanto,

quando comparado com um medidor de referência, a variação ainda se mostra maior.

Tabela 20 – Comparação dos dados originais com os dados linearizados

\bar{Q}_{Ref} (m ³ /h)	\bar{Q}_{MOPUS} (m ³ /h)	$\bar{Q}_{MOPUS_{Linear}}$ (m ³ /h)	$S^2(Q_{Ref})$	$S^2(Q_{MOPUS})$	$S^2(Q_{MOPUS_{Linear}})$
4.999	2.596	2.608	0.158	0.818	0.548
10.017	6.980	6.982	0.052	0.751	0.352
14.998	11.731	11.723	0.060	0.745	0.462
20.008	16.133	16.131	0.032	0.774	0.411
25.002	20.492	20.510	0.028	1.078	0.482

Um método para reduzir essa variação é aumentando o número de leituras prévias usadas no cálculo da média móvel. Para não prejudicar o tempo de resposta do instrumento, aumentou-se sua frequência de aquisição, obtendo-se assim mais leituras para realizar a média dentro do mesmo tempo de resposta. O tempo mínimo de aquisição possível devido a limitações da eletrônica do MOPUS e comunicação com o programa do LabView foi de 100ms. Fez-se então uma corrida usando o tempo de aquisição, assim como o tempo intermediário de 145ms, para observar a progressão da redução da variância. A matriz de teste foi realizada mais duas vezes usando essas novas frequências de aquisição, para então calcular as suas variâncias. A Tabela 21 mostra uma situação que se repetiu durante toda a tabela de análise de variâncias, onde a variância reduziu com o aumento da frequência. Deste modo, definiu-se 10Hz como a frequência de aquisição desse medidor.

Tabela 21 - Comparação entre dados linearizados com frequências diferentes

\bar{Q}_{Ref} (m ³ /h)	$S^2(Q_{MOPUS_{Linear}})$ (P= 2,5bar ; T=30°C) (Média Móvel de 2segundos)		
	Freq. = 4Hz	Freq. = 7Hz	Freq. = 10Hz
5	0.317	0.296	0.288
10	0.292	0.243	0.209
15	0.197	0.235	0.178
20	0.259	0.188	0.221
25	0.363	0.344	0.197

Os resultados obtidos estão representados nas figuras 37 e 38.

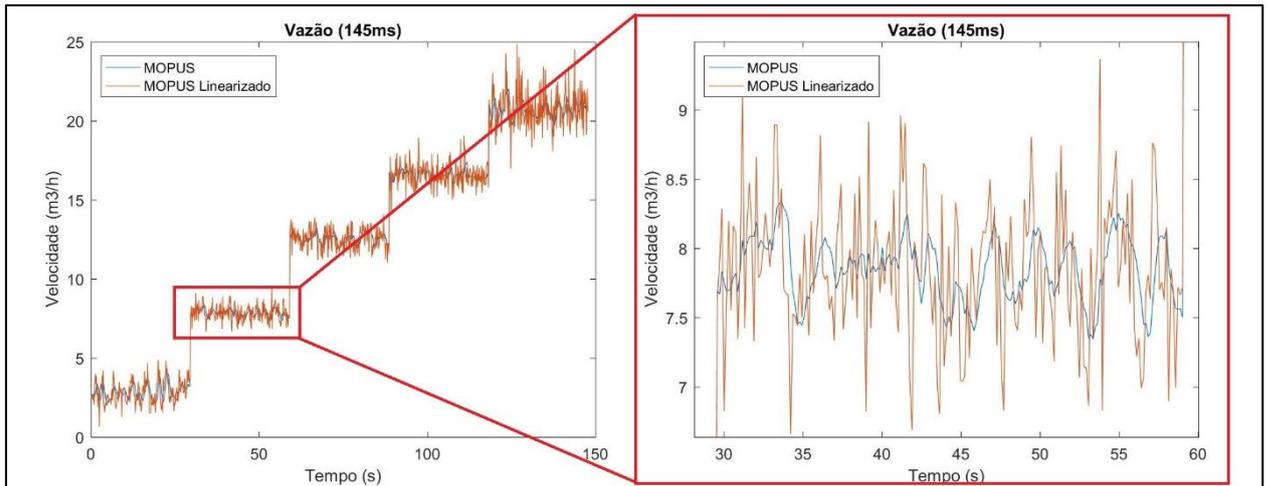


Figura 37: Linearização Com Média Móvel De 1 Segundo Para Uma Frequência De Aquisição De 7Hz

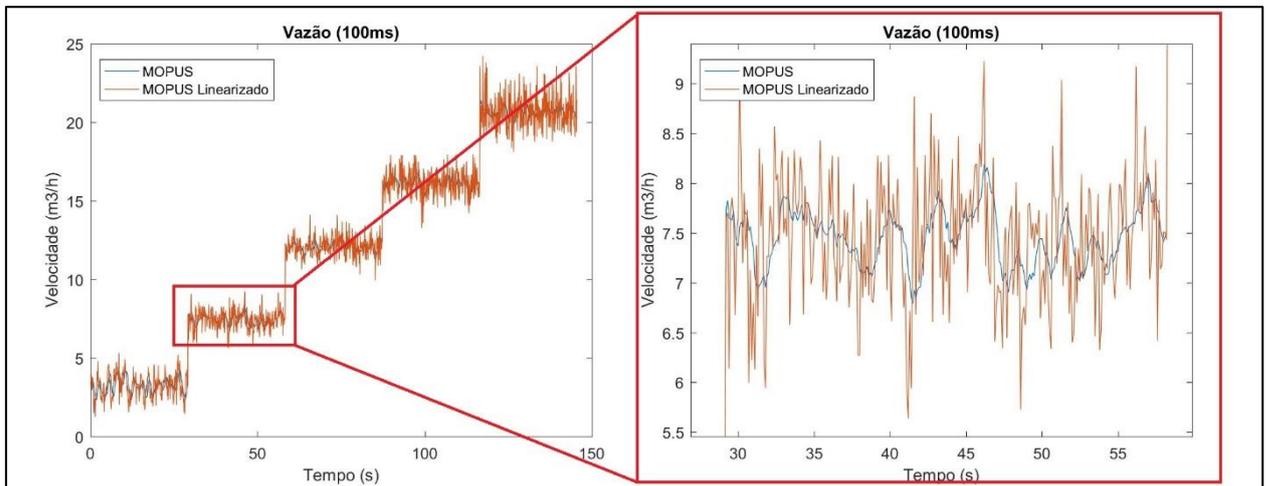


Figura 38: Linearização Com Média Móvel De 1 Segundo Para Uma Frequência De Aquisição De 10Hz

Com a linearização, foi avaliada a repetitividade e a influência dos parâmetros de operação no comportamento do MOPUS para caracterizar o esse instrumento de medição.

7.7 REPETITIVIDADE DO MOPUS

Após a linearização, foi analisado a repetitividade do MOPUS com uma taxa de aquisição de 100ms. Para isso foram seguidas as normas API 12.2.3 (2002) e 13.1 (2006) descritas no capítulo 4 e o cálculo foi realizado conforme as equações:

$$Rep_{\%} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{min}} \cdot 100 \quad (51)$$

$$Rep = t_{95,n-1} \sqrt{2} s(y) \quad (52)$$

Segundo essa mesma norma a repetitividade não deve exceder a 0,05% quando se usa um medidor mestre de prova. Um mínimo de duas corridas de prova são necessárias para usar a fórmula acima e determinar se o critério de repetitividade foi satisfeito (API, 2002).

O medidor de referência deve ser conectado em série e próximo do medidor a ser provado, e deve-se ter cuidado para evitar qualquer interação entre os dois instrumentos (ISO 7278-1, 1987).

Com o método *start-and-stop*, a vazão deve ser interrompida e ambas as leituras do medidor devem ser gravadas. Para iniciar a prova, a vazão deve ser iniciada através dos dois instrumentos simultaneamente. Pressões e temperaturas devem ser observadas e registradas durante a prova. Quando tiver decorrido um tempo suficiente para fornecer uma prova de medida satisfatória, a vazão deve ser interrompida e as leituras do medidor gravadas (ISO 7278-1, 1987).

Esse procedimento foi realizado cinco vezes para todas as corridas de uma matriz de teste, onde o medidor de referência e o MOPUS foram submetidos a uma vazão por um tempo determinado. Decorrido o tempo, o volume acumulado foi calculado e tabelado. Depois das cinco provas a repetitividade foi calculada usando os dois métodos descritos acima. A Tabela 22 mostra um exemplo de como os cálculos de repetitividade foram feitos para uma faixa de vazões de 5 a 25m³/h a uma temperatura de 30°C e uma pressão de 2,5bar. Os demais resultados são apresentados no anexo E.

Tabela 22 - Repetitividade Dados linearizados em 100ms

Vazão (m ³ /h)	M1 (litros)	M2 (litros)	M3 (litros)	M4 (litros)	M5 (litros)	Média (litros)	Controle (litros)	Rep (API 12.2.3)	Rep (API 13.1)
5	13.10	13.57	13.40	13.35	14.14	13.51	13.75	8.00%	2.87%
10	27.62	27.21	27.18	27.15	27.67	27.37	27.50	1.69%	1.42%
15	41.63	42.18	41.70	42.58	42.11	42.04	41.25	1.32%	0.92%
20	54.66	54.03	54.65	54.15	54.37	54.37	55.00	1.17%	0.71%
25	68.64	69.04	69.32	68.84	68.62	68.89	68.75	0.62%	0.56%

Essa análise foi realizada para toda matriz e pode ser observada na figura 39.

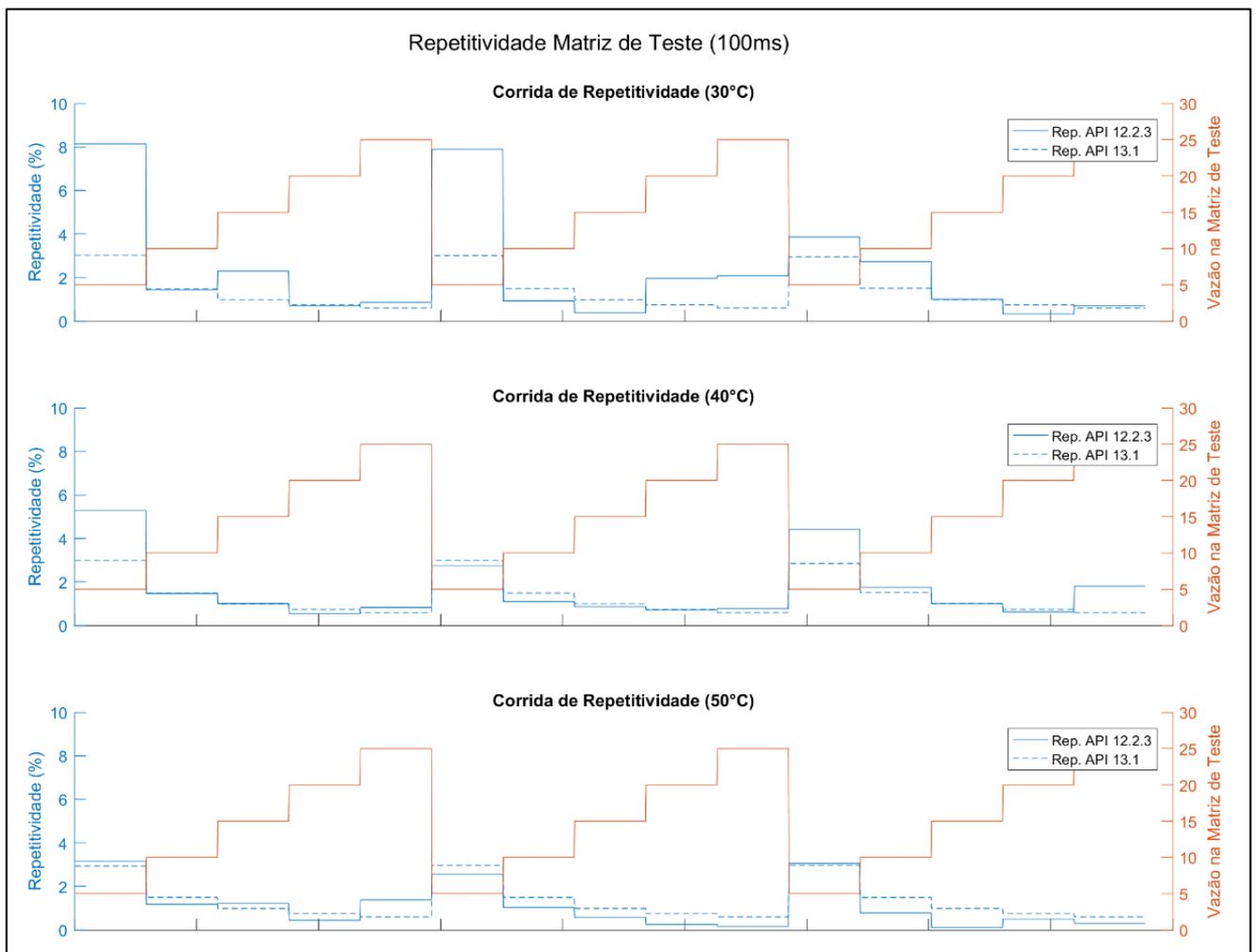


Figura 39: Repetitividade Do MOPUS após a Linearização calculada através de dois métodos (API 12.2.3 e 13.1)

Nota-se que os dois métodos apresentam repetitividades similares, isso reforça ainda mais a confiabilidade dessa medição de repetitividade.

Segundo o NIST (2012), a análise acima se refere a um desvio padrão de repetitividade de nível 1 que é calculado para um grupo de repetições feitas de forma sequencial e com curtos intervalos de tempo entre cada repetição. O problema desse tipo de análise é que muitas vezes as medições não podem ser feitas de forma sequencial, sendo efetuadas em horas ou até mesmo dias diferentes. Nos dados utilizados para o cálculo acima, somente uma matriz foi executada para avaliar a repetitividade. O uso desse número limitado de dados torna o método mais suscetível a variações sistemáticas.

Para esses casos, o NIST recomenda um desvio padrão de repetitividade de nível 2, que se refere a uma repetitividade ponderada calculada através de agrupamentos de desvios padrão de medições (*Pooled Standard Deviation* em inglês). Neste caso usa-se a fórmula (53) descrita no capítulo 4. Para tanto, fez-se o cálculo usando os dados das três matrizes onde a taxa de aquisição foi de 250ms, pois mais dados estavam disponíveis. O desvio padrão individual de cada amostra pode ser observado na Figura 40.

$$s_{pooled} = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2 + \dots + (n_k-1)s_k^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_k - k}} \quad (53)$$

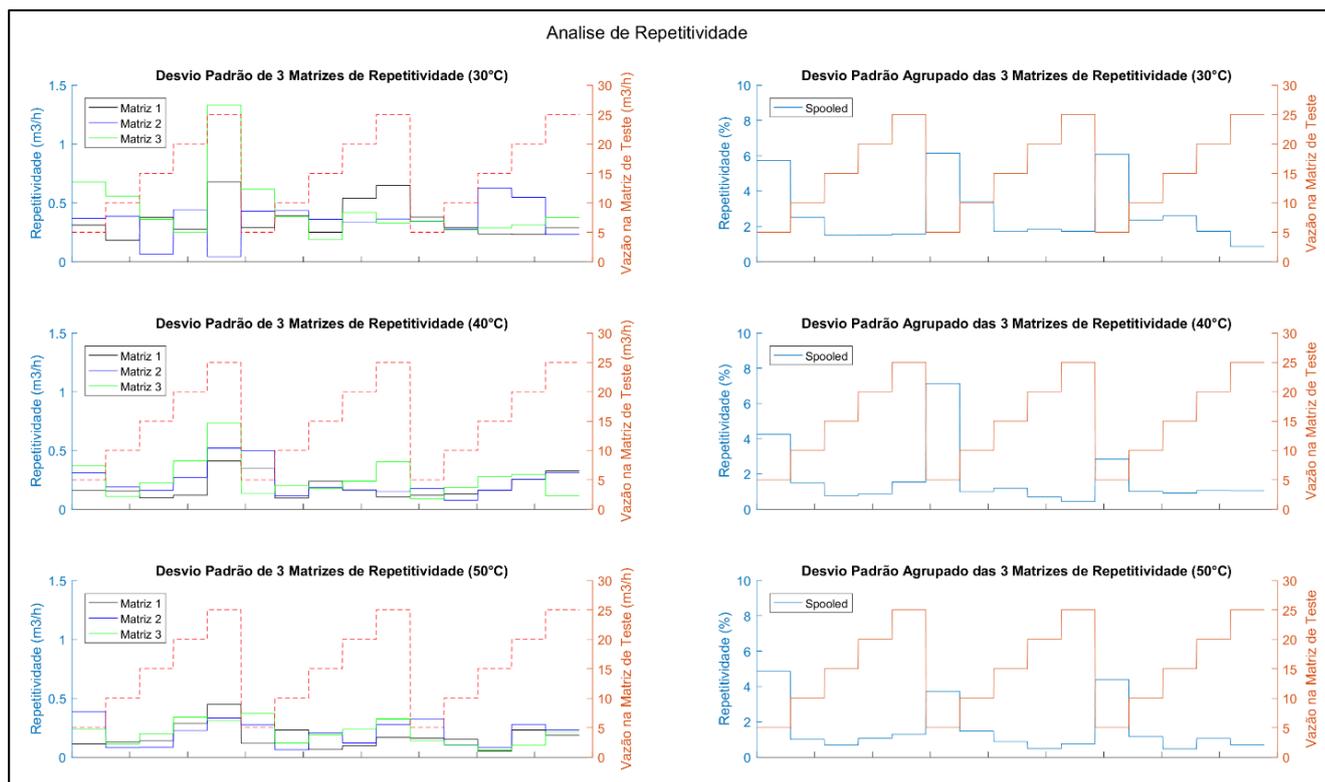


Figura 40: Repetitividade Do MOPUS após a Linearização calculada através do método recomendado pelo NIST

A repetitividade apresentada por este método, embora um pouco mais elevada do que o outro, apresenta um resultado mais confiável por usar mais casos. O aumento ou redução da taxa de frequência de aquisição, não deve afetar a repetitividade de forma significativa pois essa variável está relacionada aos erros aleatórios que podem estar interferindo no processo de medição.

7.8 ANÁLISE DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS EM RELAÇÃO AO COMPORTAMENTO DO MOPUS

Para analisar o comportamento do MOPUS em relação aos parâmetros operacionais foram usadas três variáveis: correção de ganho, correção de zero e a incerteza padrão do medidor. A correção do ganho foi escolhida, pois é diretamente afetada por mudanças de linearidade do medidor. A correção do zero foi utilizada por ser afetada pela mudança de erros sistemáticos que podem surgir com a alteração das variáveis operacionais. Já a incerteza padrão do medidor dá uma forma de avaliar a

progressão dos erros aleatórios do medidor, uma vez que esses parâmetros são diretamente proporcionais.

Para realizar essa análise, foram plotadas figuras das vazões do MOPUS e do medidor de referência, e também foram tabeladas as correções e incertezas para cada patamar medido. Os valores de correções de ganho e zero, e incerteza padrão foram calculados seguindo o roteiro abaixo:

1. Variando a pressão e temperatura individualmente com diferentes taxas de linearização;
2. Variando somente a temperatura com todos os dados de pressão com diferentes taxas de linearização;
3. Variando unicamente a pressão com todos os dados de temperatura com diferentes taxas de linearização;

As figuras 41, 42 e 43 mostram um exemplo dos cálculos realizados. Por uma questão de síntese, o restante dos gráficos dos itens 1, 2, e 3 do roteiro estão localizados nos anexos F, G, e H. A Tabela 24 resume os dados das figuras para melhor visualização.

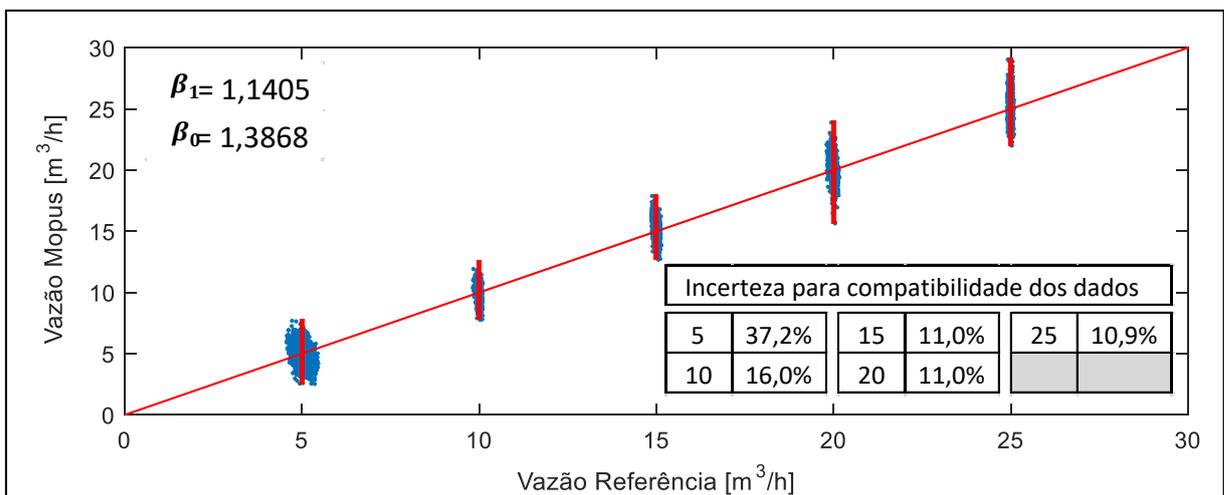


Figura 41: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 30°C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms

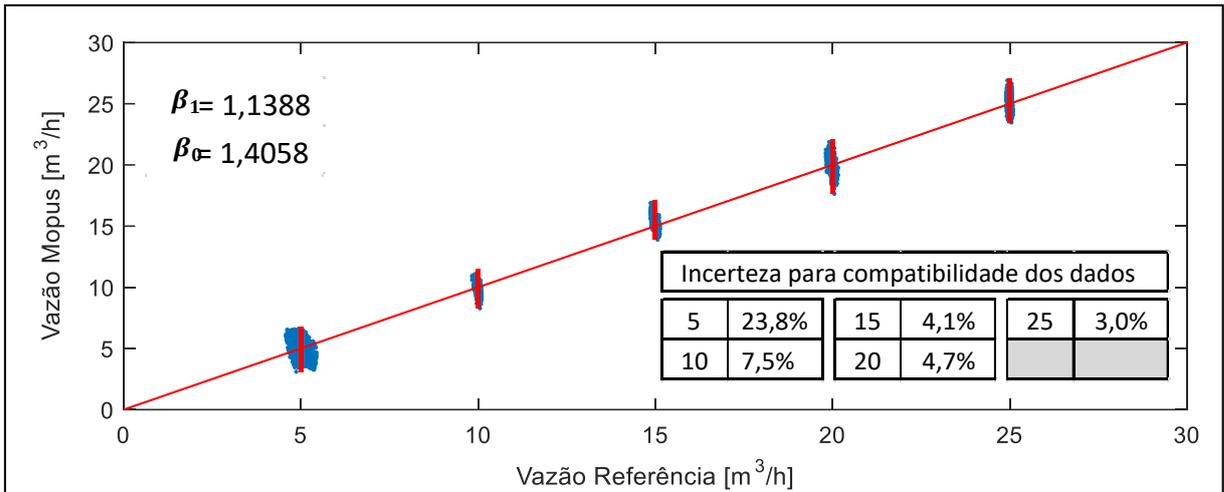


Figura 42: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 30°C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

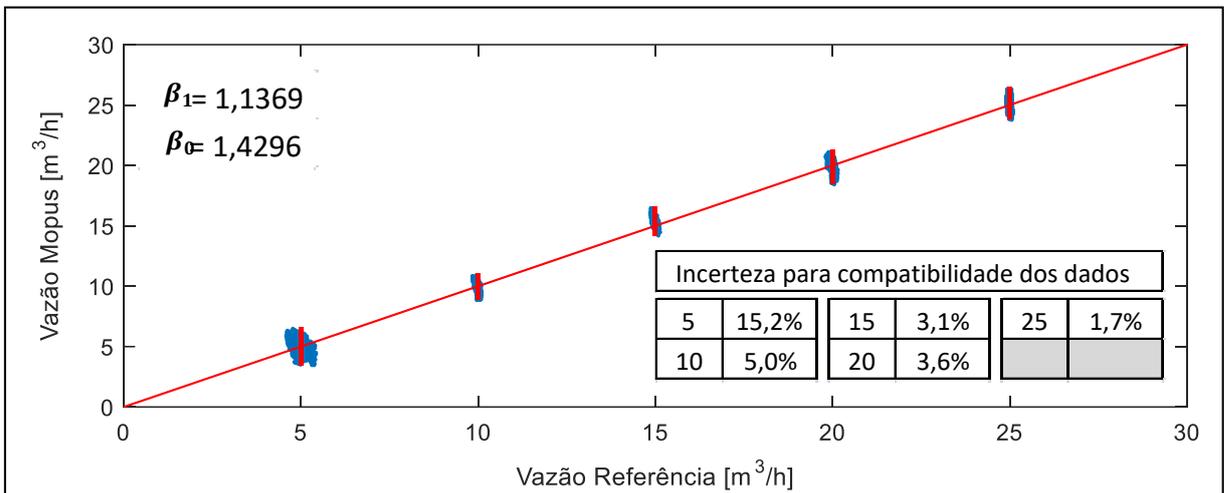


Figura 43: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 30°C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

Analisando os gráficos plotados (Anexos F, G e H) depara-se com alguns fenômenos como aqueles destacados no quadro vermelho nas figuras 44, 45, e 46. Esses fenômenos não são representativos de um processo estável e por esta razão, todos esses dados foram descartados para realizar as análises.

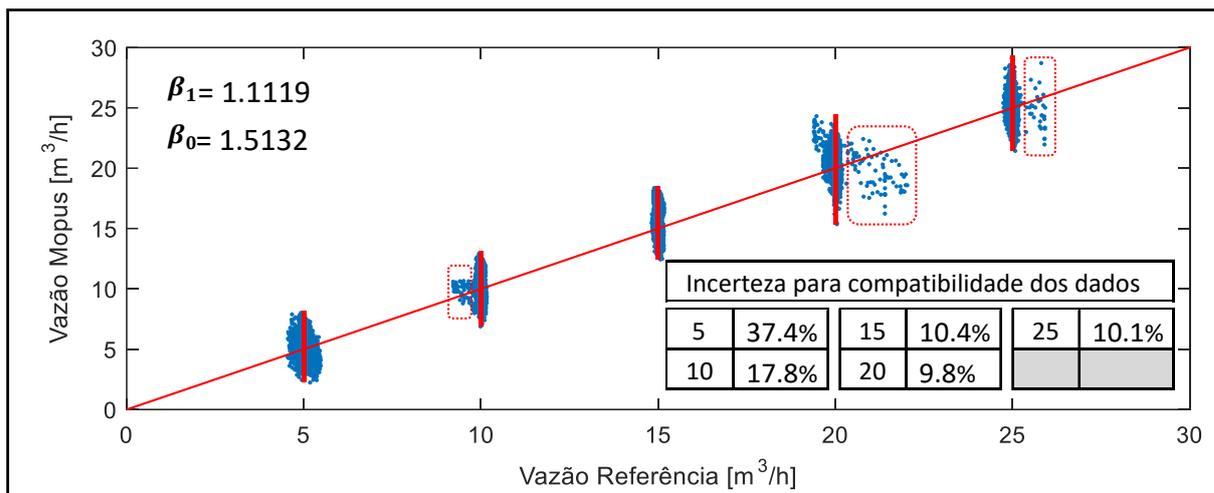


Figura 44: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Todas as pressões e temperaturas. Resolução temporal padrão: 100 ms.

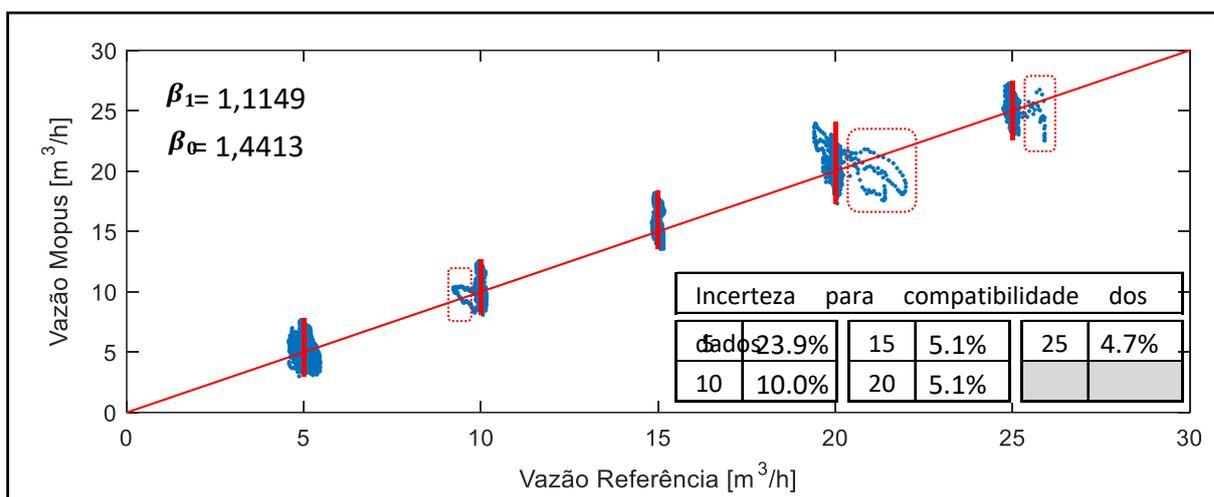


Figura 45: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Todas as pressões e temperaturas. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

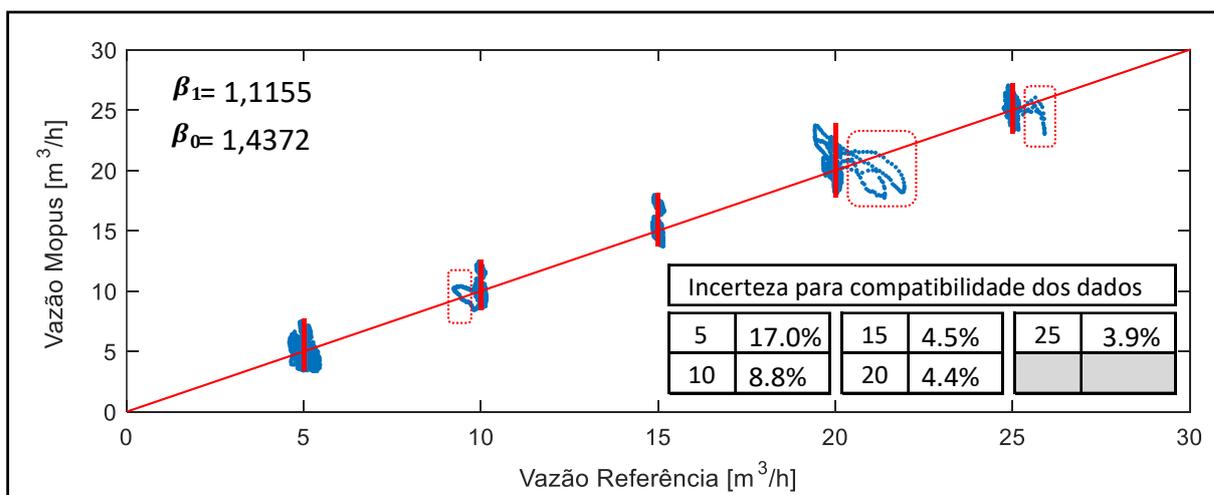


Figura 46: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Todas as pressões e temperaturas. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

Tabela 23 - Correções de ganhos e de zeros e da incerteza que do MOPUS (Sem média móvel)

	P2.5-T30	P2.5-T40	P2.5-T50	P2.5-T	P5.0-T30	P5.0-T40	P5.0-T50	P5.0-T	P7.5-T30	P7.5-T40	P7.5-T50	P7.5-T	P-T
β_1	1.1406	1.1258	1.1275	1.1208	1.1263	1.1182	1.1240	1.1153	1.1218	1.0537	1.1291	1.0928	1.1119
β_0	1.3869	1.6631	1.3127	1.5795	0.9647	1.3719	1.3113	1.3084	1.5223	1.8288	1.2281	1.6264	1.5132
5	37.2%	29.9%	11.0%	31.3%	38.7%	26.6%	18.9%	32.5%	28.0%	18.7%	14.0%	22.7%	37.4%
10	16.0%	8.6%	5.2%	12.5%	12.7%	7.3%	6.6%	11.1%	17.3%	6.7%	7.1%	12.5%	17.8%
15	11.0%	7.8%	3.9%	9.1%	8.2%	5.2%	3.6%	7.0%	7.9%	5.2%	4.7%	6.6%	10.4%
20	11.0%	6.4%	5.0%	9.0%	7.8%	4.3%	3.6%	6.1%	6.4%	3.8%	4.1%	6.5%	9.8%
25	10.9%	5.7%	5.8%	8.7%	8.9%	4.9%	4.1%	7.2%	6.5%	4.5%	4.5%	8.1%	10.1%

	P2.5-T30	P5.0-T30	P7.5-T30	P-T30	P2.5-T40	P5.0-T40	P7.5-T40	P-T40	P2.5-T50	P5.0-T50	P7.5-T50	P-T50	P-T
β_1	1.1406	1.1258	1.1275	1.1141	1.1263	1.1182	1.1240	1.0901	1.1218	1.0537	1.1291	1.1235	1.1119
β_0	1.3869	1.6631	1.3127	1.4773	0.9647	1.3719	1.3113	1.7245	1.5223	1.8288	1.2281	1.3250	1.5132
5	37.2%	29.9%	11.0%	38.1%	38.7%	26.6%	18.9%	27.3%	28.0%	18.7%	14.0%	16.7%	37.4%
10	16.0%	8.6%	5.2%	18.1%	12.7%	7.3%	6.6%	9.1%	17.3%	6.7%	7.1%	7.2%	17.8%
15	11.0%	7.8%	3.9%	10.6%	8.2%	5.2%	3.6%	6.9%	7.9%	5.2%	4.7%	4.6%	10.4%
20	11.0%	6.4%	5.0%	10.0%	7.8%	4.3%	3.6%	7.2%	6.4%	3.8%	4.1%	4.8%	9.8%
25	10.9%	5.7%	5.8%	10.2%	8.9%	4.9%	4.1%	8.4%	6.5%	4.5%	4.5%	5.5%	10.1%

A Tabela 23 indica que no processo de medição de vazão, a pressão e temperatura afetam significativamente a dinâmica do MOPUS. Na Figura 47, é ilustrado o efeito da pressão e temperatura no MOPUS, apresentando a correlação entre as correções e as variáveis do processo. Este fato é possível somente com a suposição de que o medidor referência não altera significativamente sua própria dinâmica quando a temperatura e pressão variam. O medidor de referência é um medidor de deslocamento positivo, e por esta razão é razoável que esta suposição seja correta, uma vez que a “fuga” de fluido no medidor é muito baixa.

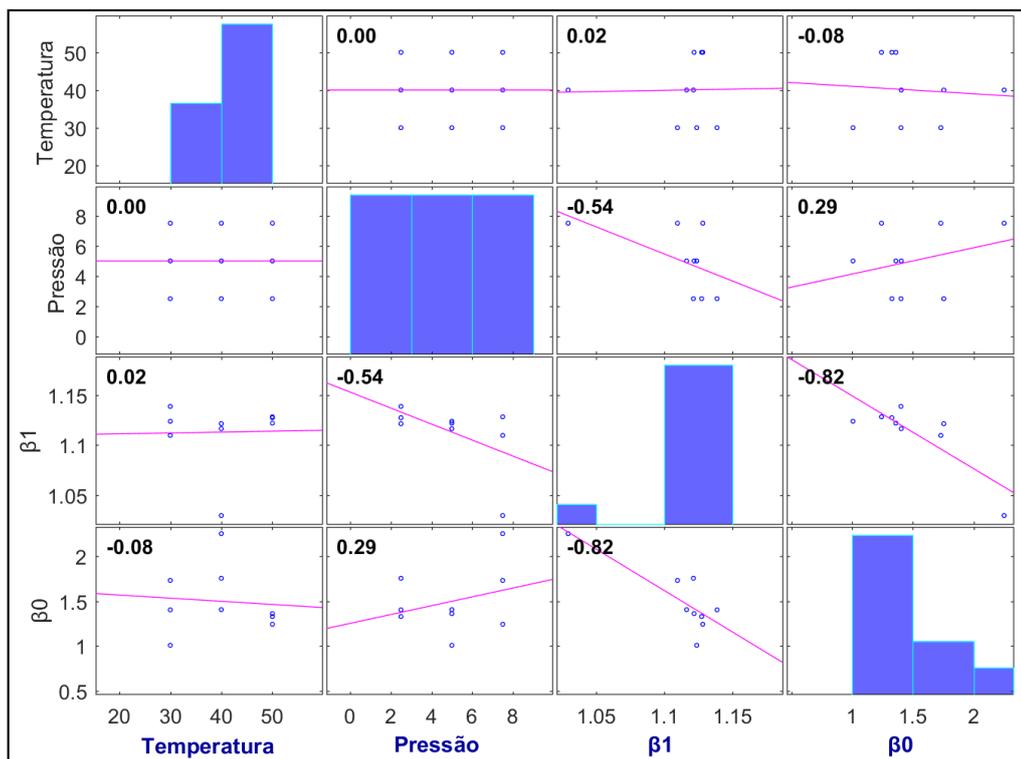


Figura 47: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 30°C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

Para as nove combinações possíveis do par de variáveis de pressão e temperatura, a correção de ganho médio é de $\overline{\beta_1} = 1,1185 \pm 0,050$, com uma incerteza relativa expandida de 0,90%. Por este valor de incerteza ter sido consideravelmente alto, o mesmo não pode ser descartado, impedindo o uso dessa média de correção de ganho. Mais relevante ainda é a variação da correção de zero. As mesmas nove combinações possíveis de pressão e temperatura apontam que a correção de zero média é $\overline{\beta_0} = 1,3989 \pm 0,502$, com uma incerteza relativa expandida de 5%.

Os dados da tabela 23 apontam ainda que há um efeito que ocorre na vazão mais baixa, nitidamente mitigado (ou ausente) nas demais vazões. É evidente que, em todos os casos, este parâmetro sofre uma queda abrupta entre as vazões de 5m³/h e 10m³/h, quando, a partir deste ponto, as variações são bem menores. Uma comparação entre dados coletados do medidor de referência a 5m³/h e 10m³/h, é apresentada na Figura 48. Essa figura permite a visualização desse aumento de variação no processo sendo medido. Na figura estão indicados os limites dentro dos quais estão 90% do histórico.

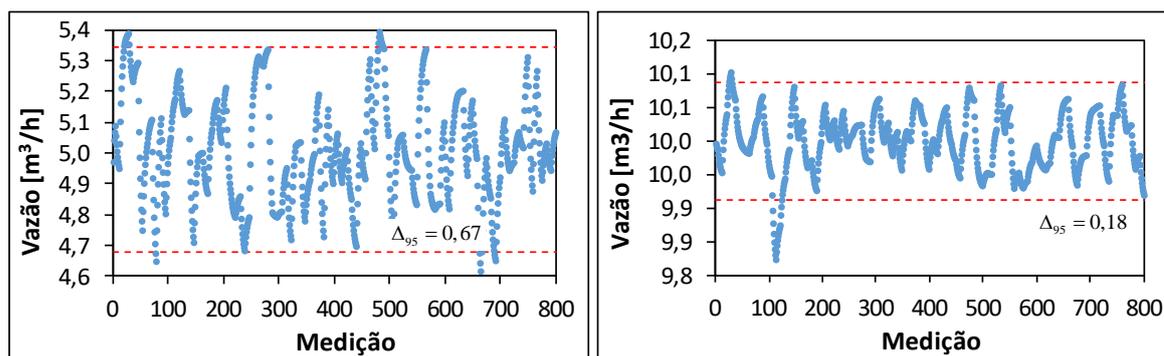


Figura 48: Históricos de medição a 5m³/h e a 10 m³/h

Nota-se pelos limites apresentados (0.67 e 0.18) que a variabilidade das medições na vazão de 5m³/h é sete vezes maior que a variabilidade na vazão de 10m³/h. Com o intuito de mitigar esse erro de processo, uma nova análise foi feita excluindo o ponto de vazão de 5m³/h. Eliminando os registros da medições com maior incerteza, ou seja, os de 5m³/h para comparação a tabela fica da seguinte forma:

Tabela 24 - Correções de ganhos e de zeros e da incerteza que do MOPUS

	P2.5-T30	P2.5-T40	P2.5-T50	P2.5-T	P5.0-T30	P5.0-T40	P5.0-T50	P5.0-T	P7.5-T30	P7.5-T40	P7.5-T50	P7.5-T	P-T
β_1	1.1390	1.1228	1.1257	1.1122	1.1225	1.1165	1.1215	1.1095	1.1097	1.0278	1.1278	1.0740	1.0971
β_0	1.4132	1.7109	1.3420	1.7285	1.0290	1.4011	1.3526	1.4151	1.7208	2.2778	1.2483	1.9495	1.7181
10	15.89	8.57	5.19	12.1%	12.59	7.25	6.59	10.8%	16.73	6.21	7.08	11.7%	17.1%
15	11.01	7.79	3.88	8.8%	8.17	5.17	3.62	6.8%	7.67	4.87	4.66	6.3%	10.1%
20	10.97	6.35	4.97	8.7%	7.72	4.29	3.60	6.0%	6.24	3.65	4.06	6.2%	9.5%
25	10.84	5.72	5.80	8.5%	8.88	4.93	4.12	7.1%	6.38	4.32	4.54	7.7%	9.8%

	P2.5-T30	P5.0-T30	P7.5-T30	P-T30	P2.5-T40	P5.0-T40	P7.5-T40	P-T40	P2.5-T50	P5.0-T50	P7.5-T50	P-T50	P-T
β_1	1.1390	1.1225	1.1097	1.0994	1.1228	1.1165	1.0278	1.0743	1.1257	1.1215	1.1278	1.1194	1.0971
β_0	1.4132	1.0290	1.7208	1.7362	1.7109	1.4011	2.2778	1.9970	1.3420	1.3526	1.2483	1.3946	1.7181
10	15.89	12.59	16.73	17.1%	8.57	7.25	6.21	8.5%	5.19	6.59	7.08	7.1%	17.1%
15	11.01	8.17	7.67	10.1%	7.79	5.17	4.87	6.5%	3.88	3.62	4.66	4.5%	10.1%
20	10.97	7.72	6.24	9.6%	6.35	4.29	3.65	6.9%	4.97	3.60	4.06	4.7%	9.5%
25	10.84	8.88	6.38	9.8%	5.72	4.93	4.32	8.1%	5.80	4.12	4.54	5.4%	9.8%

A Tabela 24 apresenta a mesma comparação da Tabela 23, excluindo-se, como justificado no item anterior, a vazão de 5m³/h. Nota-se que as incertezas não são significativamente alteradas, onde apenas as correções de ganho e de zero são afetadas. Isto não significa que este subconjunto de dados não apresente uma

dinâmica particular, mostrando apenas que esta dinâmica afeta a variabilidade das medições, embora, para uma vazão alvo controlada, não afete a tendência à aquela vazão. A vazão de $5\text{m}^3/\text{h}$ não afeta a tendência nos cálculos da calibração, mas os resultados da variabilidade das medições afetam de forma significativa a incerteza do MOPUS nesta vazão.

Na faixa de pressões e temperaturas do experimento, a variabilidade das medições do MOPUS apresenta tendência de queda quando a pressão aumenta, o mesmo acontece com relação à temperatura. Esta é uma tendência geral em todos os níveis de vazão. Pode-se notar, nas figuras 49 e 50 a curva de tendência linear. Os pontos verdes destacados em vermelho nas figuras 49 e 50 foram desprezados usando o critério de Chauvenet por serem *outliers* (não representativos do experimento).

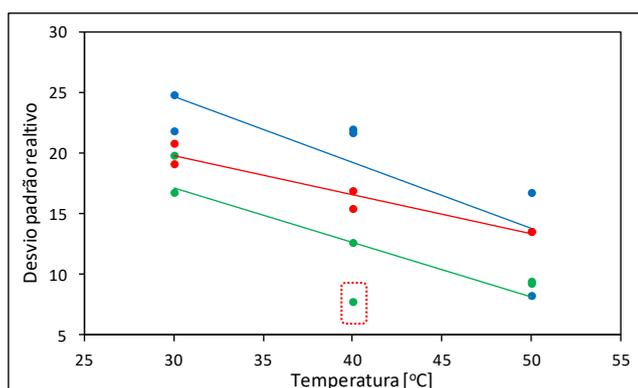


Figura 49: Desvio padrão relativo do MOPUS versus Temperatura (Azul: 2.5 bar. Vermelho: 5.0 bar. Verde: 7.5 bar)

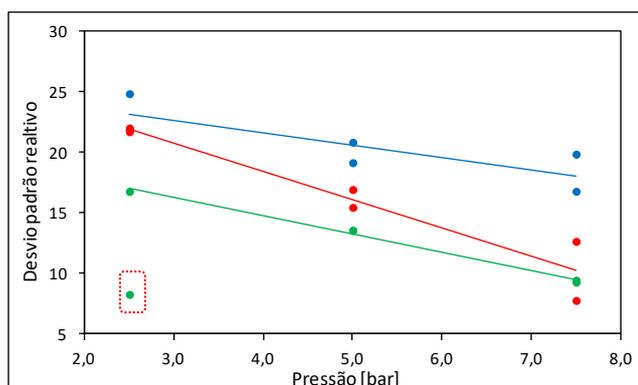


Figura 50: Desvio padrão relativo do MOPUS versus Pressão (Azul: 30 °C. Vermelho: 40 °C. Verde: 50 °C).

A aplicação da média móvel é fundamental para a redução da variabilidade das medições do MOPUS. Isto fica evidente na Tabela 25, que traz as incertezas para compatibilidade entre MOPUS e Referência.

Tabela 25 - Incertezas para compatibilidade da dispersão na comparação MOPUS versus Referência, para o registro sem média móvel, com média móvel sobre 10 medições instantâneas e média móvel sobre 20 medições instantâneas

	P2.5-T30			P2.5-T40			P2.5-T50		
	$\Delta = 0$	$\Delta = 10$	$\Delta = 20$	$\Delta = 0$	$\Delta = 10$	$\Delta = 20$	$\Delta = 0$	$\Delta = 10$	$\Delta = 20$
β_1	1.1390	1.1380	1.1386	1.1225	1.1221	1.1238	1.1097	1.1098	1.1096
β_0	1.4132	1.4198	1.4026	1.0290	1.0298	1.0080	1.7208	1.7233	1.7303
10	15.9%	7.5%	5.0%	8.6%	5.0%	3.6%	5.2%	1.6%	1.3%
15	11.0%	4.1%	3.1%	7.8%	5.1%	4.1%	3.9%	2.1%	1.7%
20	11.0%	4.7%	3.6%	6.3%	2.2%	1.6%	5.0%	1.7%	1.2%
25	10.8%	3.0%	1.7%	5.7%	2.3%	1.5%	5.8%	2.7%	1.9%

	P5.0-T30			P5.0-T40			P5.0-T50		
	$\Delta = 0$	$\Delta = 10$	$\Delta = 20$	$\Delta = 0$	$\Delta = 10$	$\Delta = 20$	$\Delta = 0$	$\Delta = 10$	$\Delta = 20$
β_1	1.1228	1.1234	1.1213	1.1165	1.1159	1.1163	1.0278	1.0291	1.0296
β_0	1.7109	1.7111	1.7548	1.4011	1.4133	1.4049	2.2778	2.2590	2.2511
10	12.6%	4.2%	2.4%	7.2%	3.4%	1.9%	6.6%	3.2%	2.1%
15	8.2%	3.0%	2.0%	5.2%	2.4%	1.6%	3.6%	1.4%	0.9%
20	7.7%	2.7%	1.5%	4.3%	1.5%	1.0%	3.6%	1.7%	1.3%
25	8.9%	3.4%	2.5%	4.9%	2.0%	1.5%	4.1%	1.6%	1.0%

	P7.5-T30			P7.5-T40			P7.5-T50		
	$\Delta = 0$	$\Delta = 10$	$\Delta = 20$	$\Delta = 0$	$\Delta = 10$	$\Delta = 20$	$\Delta = 0$	$\Delta = 10$	$\Delta = 20$
β_1	1.1257	1.1261	1.1273	1.1215	1.1221	1.1218	1.1278	1.1281	1.1282
β_0	1.3420	1.3430	1.3282	1.3526	1.3514	1.3608	1.2483	1.2432	1.2424
10	16.7%	6.5%	4.9%	6.2%	3.4%	2.9%	7.1%	2.5%	1.9%
15	7.7%	2.1%	1.3%	4.9%	3.0%	2.3%	4.7%	1.1%	0.5%
20	6.2%	2.0%	1.5%	3.7%	1.6%	1.0%	4.1%	1.4%	1.0%
25	6.4%	2.6%	1.8%	4.3%	1.8%	1.5%	4.5%	2.0%	1.3%

7.9 ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MOPUS EM RELAÇÃO AS VARIÁVEIS DO PROCESSO

Para elucidação dos efeitos do circuito de testes na medição do MOPUS, realizou-se uma análise da correlação entre a variabilidade do MOPUS em relação as faixas de operação do circuito. Foi realizado também a mesma análise entre a variabilidade do MOPUS e a variabilidade das variáveis.

A primeira análise foi feita correlacionando os valores de cada patamar de pressão, temperatura, e vazão com a variância do MOPUS. Isso pode ser observado na Figura 51.

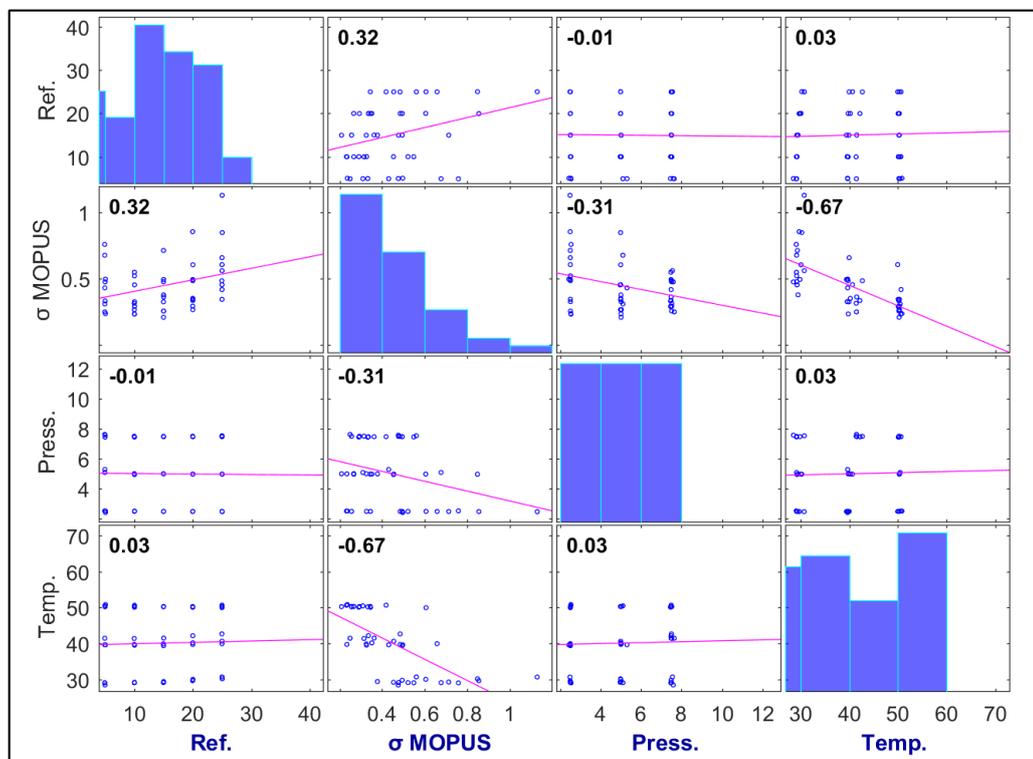


Figura 51: Correlação entre as variâncias das variáveis do processo e o MOPUS

Observa-se que há uma correlação negativa ($R=-0.67$ e $R=-0.31$) entre a variância do MOPUS e o aumento da temperatura e pressão. Esse fato foi visto também na seção anterior, analisando as correções de ganho e zero, o que fortalece ainda mais essa afirmação. Ou seja, quanto maior a temperatura ou pressão, a variância do MOPUS tende a diminuir. Isso pode ser em razão da redução da atenuação ultrassônica que causa o sinal recebido pelo transdutor a ser mais potente em relação a ruídos e assim torna-se mais evidente o início e final do tempo de trânsito. Para conferir essa análise foi realizado uma correlação entre a variância dos tempos de trânsito em relação ao aumento de temperatura, mostrado na figura 52. Isso foi realizado pois se a análise, anterior fosse verdadeira existiria também uma redução da variância nos tempos de trânsito com o aumento da temperatura, pois essa é a única variável afetada no cálculo da velocidade média de escoamento.

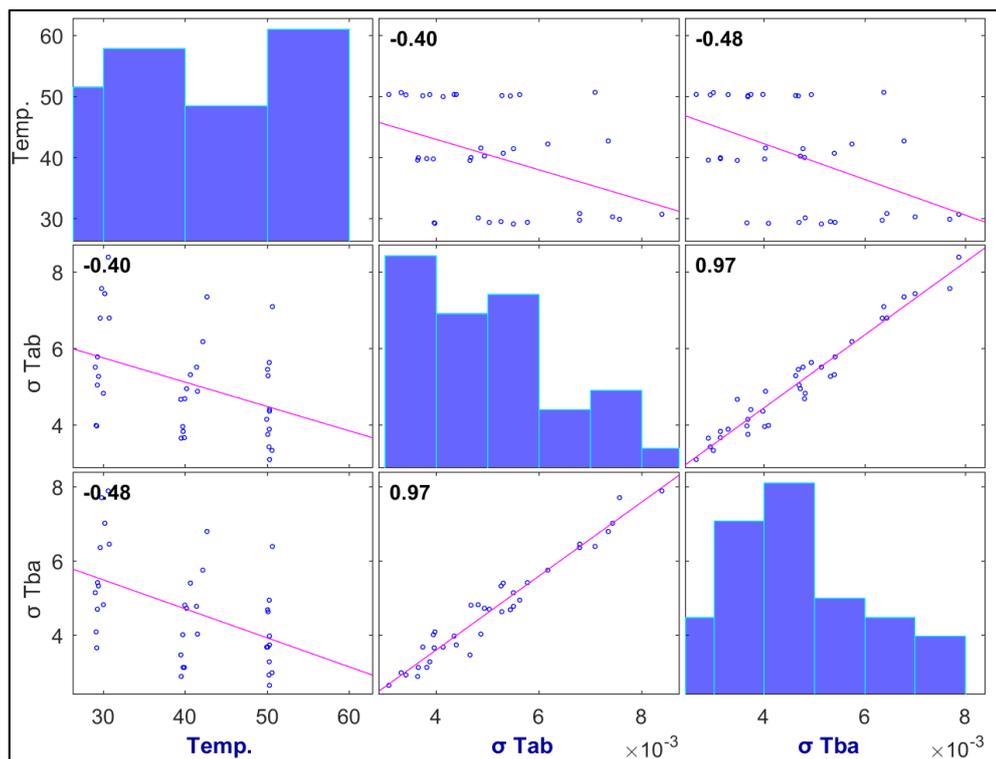


Figura 52: Correlação Entre As Variâncias Dos Tempos De Trânsito E A Temperatura

A Figura 52 mostra que existe uma correlação entre a incerteza dos tempos de trânsito e o aumento de temperatura. Com essa afirmação e com as relações apresentadas na Figura 53 podemos afirmar que a temperatura e a pressão afetaram o desempenho do MOPUS, isto é, ele apresentou variação relevante no processo (emissão da onda sonora e detecção da onda sonora) na faixa de pressões e temperaturas do teste. Assim, pode-se concluir que a variância do MOPUS é dominada pela variância do próprio processo e pela variância dos tempos de trânsito. Isso se torna mais evidente na figura seguinte que analisa a correlação entre as variâncias das variáveis do processo e a variância do MOPUS.

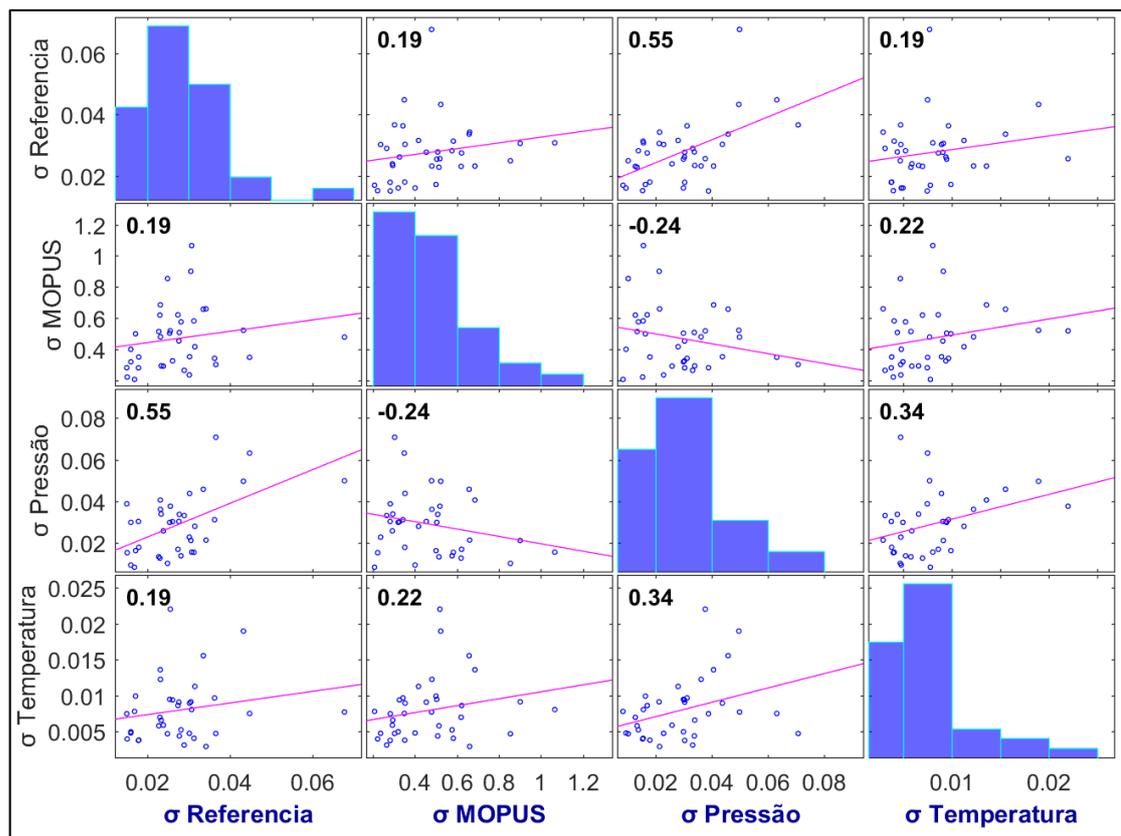


Figura 53: Correlação entre as variâncias das variáveis do processo e o MOPUS

Nota-se que nenhuma variância teve concordância com a variância do MOPUS. Entretanto, a variância do medidor de referência apresentou uma forte correlação com a variância da pressão. Isso foi visto também na seção 7.4 e fortalece a hipótese de que há uma relação entre a variância aumentada do MOPUS em baixas vazões e as instabilidades do processo.

8 CONCLUSÃO

O protótipo mostrou um comportamento esperado para um medidor por tecnologia ultrassônica por tempo de trânsito. O MOPUS apresenta um aumento linear dos tempos de trânsito com o aumento linear da vazão do escoamento. Essa relação se mostrou constante mesmo com o aumento da temperatura acarretando na redução da velocidade do som, o que indica a independência desse medidor em relação a esse parâmetro.

Embora o protótipo tenha apresentado inicialmente uma medição diferente daquela apresentada pelo medidor de referência, foi notado que existia também uma forte correlação linear entre os dois dispositivos. Por esta razão uma calibração com apenas correções de ganhos e correções de zeros foi suficiente para aproximar as medições do MOPUS às medições feitas pela referência.

A seção 7.3 mostra que a calibração obteve erros constantes ($0.5-0.9\text{m}^3/\text{h}$) entre faixas de funcionamento ($5-25\text{m}^3/\text{h}$) obtendo-se assim erros de 15% para piores casos (vazões menores) e 3.3% para os melhores casos. Mesmo com uma correlação forte entre os dois medidores, o MOPUS apresentou uma variabilidade de medição alta e por esta razão foi feita uma análise de variabilidade do processo. Observou-se que a variabilidade do protótipo mostrou uma relação a variabilidade das variáveis do processo em vazões abaixo de $10\text{m}^3/\text{h}$.

Foi concluído que essa relação foi devido à alta viscosidade do óleo, assim como a ineficiência dos controladores de pressão e vazão da planta, a se estabilizar em um ponto operacional. A partir de $10\text{m}^3/\text{h}$ o MOPUS se mostrou menos suscetível a variabilidade do processo. Essa afirmação é reforçada na seção 7.9 onde nenhuma correlação foi observada entre as variâncias do processo e do protótipo, mas sim entre a variância da pressão e vazão de referência.

A incerteza do MOPUS foi calculada usando vários métodos, onde foram obtidas diferentes incertezas. Vale ressaltar que cada método leva em consideração fatores específicos que levam a essa discrepância entre incertezas.

Na seção 7.5 foi calculado a incerteza combinada da medição que leva em consideração os fatores do processo e não somente do medidor. Ainda mais que a incerteza da correção de ganho também foi incluída na análise de toda a faixa de vazão. Foram constatadas incertezas nas ordens de 5% até 80%. Como o processo apresentou uma variabilidade, essa incerteza combinada tende a ser maior que a incerteza apresentada somente pelo MOPUS. Para tentar amenizar os efeitos do processo no cálculo final da incertezas foi proposto um método de linearização que é uma pratica comum quando o processo apresenta variações cíclicas conhecidas.

Durante a linearização foi definida uma taxa de aquisição de dados do medidor de 100ms. Para melhor observar a incerteza apresentada pelo MOPUS e não do processo em si, foi realizado um cálculo usando a metodologia indicada pelo NIST, especificamente desenvolvida para medidores ultrassônicos. Esse método mostrou incertezas de 1-4%. Na seção 7.9 constatou-se que a variância de cada variável de processo individualmente não influencia a variância do MOPUS.

Foi visto também que os fatores de operação tais como pressão e temperatura afetaram de forma correlacionável a incerteza do MOPUS. Assim, pode-se concluir que a variância do MOPUS é dominada pela variância do próprio processo e pela variância dos tempos de trânsito.

Com a dependência do MOPUS a essas variáveis, não foi possível realizar um o cálculo de uma calibração geral do protótipo pois isso afetaria a incerteza do medidor. Assim, é necessário realizar ajustes com base em pressão e temperatura, o que complica o processo de tratamento das informações primárias coletadas pelo MOPUS. Dado o grau de dispersão dos valores dos ajustes de ganho e zeros para cada pressão e temperatura, o ajuste baseado nas faixas de pressão e temperatura resultam em uma incerteza menor para a medição final do protótipo.

Finalmente, o MOPUS não apresentou sinais de degradação de desempenho durante o teste. Apenas se pode notar que, como normalmente acontece com os medidores ultrassônicos, eles não acompanham transientes que não sejam suficientemente lentos. Em suma, com os dados obtidos nesse trabalho, conclui-se

que o MOPUS se apresenta como um potencial medidor concorrente aos encontrados comercialmente, embora uma calibração que leva em conta as variáveis do processo será necessária para uma abrangência de operação maior.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGA (AMERICAN GAS ASSOCIATION). Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters Transmission Measurement Committee Report No. 9. Arlington, Virginia: [s.n.].

ANDERSON, R. J.; BELL, S. S. WASTEWATER FLOW MEASUREMENT IN SEWERS. CINCINNATI, OHIO: [s.n.].

ANP/INMETRO. RESOLUÇÃO CONJUNTA ANP/INMETRO Nº 1. Diário Oficial da União, p. 1–34, 2013.

ANSI/ASME. Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits Using Transit-Time Ultrasonic Flowmeters. [s.l: s.n.].

API. Statistical Aspects of Measuring and Sampling. In: Manual of Petroleum Measurement Standards. Washington, D.C: American Petroleum Institute, 1991.

API. Calculation of Petroleum Quantities. In: Manual of Petroleum Measurement Standards. [s.l.] American Petroleum Institute, 2002. p. 67.

API. Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 5 — Metering Section 2 — Measurement of Liquid Hydrocarbons by Displacement Meters. [s.l: s.n.].

AZIZ, E. et al. An ultrasonic flowmeter designed according to smart sensors concept. Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference on Industrial Applications in Power Systems Computer Science and Telecommunications MELECON 96, v. 3, p. 1371–1374, 1996.

BROWN, G. J. OIL FLOW PERFORMANCE OF ULTRASONIC METERS. North Sea Flow Measurement Workshop. Anais...1996

BROWN, G. J. FACTORS AFFECTING THE PERFORMANCE OF ULTRASONIC FLOWMETERS. International North Sea Flow Measurement Workshop. Anais...1997

BROWN, G. J.; AUGENSTEIN, D. R.; COUSINS, T. an 8-Path Ultrasonic Master Meter for Oil Custody Transfers. p. 17–22, 2006.

CAUDWELL, D. R. et al. Viscosity and Density of Five Hydrocarbon Liquids at Pressures up to 200 MPa and Temperatures up to 473 K Viscosity and Density of Five Hydrocarbon Liquids at Pressures up to 200 MPa and Temperatures up to 473 K †. Journal of Chemical & Engineering Data, v. 54, p. 359–366, 2009.

CORDOVA, L.; FURUICHI, N.; LEDERER, T. Qualification of an ultrasonic flow meter as a transfer standard for measurements at Reynolds numbers up to $4 \cdot 10^6$ between NMIJ and PTB. Flow Measurement and Instrumentation, v. 45, p. 28–42, 2015.

COUSINS, T. IS LINEARISATION SAFE FOR CUSTODY TRANSFER METERS? 32nd International North Sea Flow Measurement Workshop. Anais...2014

DASHTI, H. H.; RIAZI, M. R. Acoustic velocities in petroleum fluids: Measurement and prediction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 124, p. 94–104, 2014.

DELL'ISOLA, M.; CANNIZZO, M.; DIRITTI, M. Measurement of high-pressure natural gas flow using ultrasonic flowmeters. *Measurement*, v. 20, n. 2, p. 75–89, 1997.

DELSING, J. The zero-flow performance of a sing-around ultrasonic flowmeter. v. 2, n. October 1991, p. 205–208, 1992.

EREN, H. Accuracy in real time ultrasonic applications and transit-time flow meters. IMTC/98 Conference Proceedings. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Where Instrumentation is Going (Cat. No.98CH36222), v. 1, p. 568–572, 1998.

EREN, H. et al. Processing Ultrasonic Signals to Identify Fluid Contents in Transit-Time. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Anais...2002

FOLKESTAD, T.; MYLVAGANAM, K. S. Chirp Excitation of Ultrasonic Probes and Algorithm for Filtering Transit Times in High-Rangeability Gas Flow Metering. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 40, n. 3, p. 193–215, 1993.

GRIMLEY, T. A. Multipath Ultrasonic Flowmeter Performance. The North Sea Flow Measurement Workshop. Anais...Peebles, Scotland: 1996

GRIMLEY, T. A.; VIRGINIA, W. ULTRASONIC METER TESTING FOR STORAGE ULTRASONIC METER TESTING FOR STORAGE. n. December, 1998.

HEMP, J. Theory of transit time ultrasonic flowmeters. *Journal of Sound and Vibration*, v. 84, n. 1, p. 133–147, 1982.

HOGENDOORN, J. An Ultrasonic Flowmeter for Custody Transfer Measurement of LNG: A challenge for Design and Calibration. 25th International North Sea Flow Measurement Workshop. Anais...2007

HOGENDOORN, J. et al. High viscosity hydrocarbon flow measurement, a challenge for ultrasonic flow meters? *Nsfmw*, v. Paper 19, p. 20, 2009.

HOLDEN, J.; PETERS, R. Practical Experiences Using Ultrasonic Flowmeters on High Pressure Gas. *Flow Measurement Instruments*, v. 2, n. 1, p. 69–73, 1991.

IFM. Manual: Efetor300Malvern, PA, 2016. Disponível em: <<http://www.ifm.com/products/>>

ISO 7278-1. Liquid hydrocarbons - Dynamic_ measurement. [s.l: s.n.].

JCGM. JCGM 100:2008 - Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization Geneva ISBN, v. 50, n. September, p. 134, 2008.

JUNG, J. C.; SEONG, P. H. Estimation of the flow profile correction factor of a transit-

time ultrasonic flow meter for the feedwater flow measurement in a nuclear power plant. IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 52, n. 3 II, p. 714–718, 2005.

KALIVODA, R. J.; LUNDE, P. Liquid ultrasonic flow meters for crude oil measurement. Proceedings of the 23rd International North Sea Flow Measurement Workshop, n. October, p. 253–275, 2005.

KHRONE. UFM 3030, 2015. Disponível em: <http://cdn.krohne.com/dlc/CA_UFM3030_Highlight_en_091116.pdf>

LANSING, J. AGA-9 MEASUREMENT OF GAS BY MULTIPATH ULTRASONIC METERS. n. 9, 1998.

LYNNWORTH, L. C. Ultrasonic Flowmeters. In: Physical Acoustics. [s.l.] Academic Press, Inc, 1979. p. 425–566.

LYNNWORTH, L. C. Ultrasonic Measurements for Process Control: Theory, Techniques, Applications. Orlando, FL: Academic Press, Inc, 1989. v. I

MA, L.; LIU, J.; WANG, J. Study of the Accuracy of Ultrasonic Flowmeters for Liquid. AASRI Procedia, v. 3, p. 14–20, 2012.

MYLVAGANAM, K. S. High-Rangeability Ultrasonic Gas Flowmeter for Monitoring Flare Gas. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, v. 36, n. 2, p. 144–149, 1989.

NEMADE, H. B.; ANJANEYULU, T.; PANDEY, P. C. Sensing turbulence transit time by pulsed ultrasound for single-phase fluid flow measurement. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 47, n. 1, p. 265–269, 1998.

OIML. Recommendation OIML R117 Dynamic measuring systems for liquids other than water. v. 2009, p. 1–62, 2009.

RUPPEL, C.; PETERS, F. Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter. Flow Measurement and Instrumentation, v. 15, n. 3, p. 167–177, 2004.

SAKARIASSEN, R. On-line Quality Control of Ultrasonic Gas Flow Meters. North Sea Flow Measurement Workshop. Anais...1997

SAKARIASSEN, R. et al. LONG TERM COMPARISON OF AN ULTRASONIC METER AND A TURBINE METER WITH AN ORIFICE METER AT EMS TEST LOOP. THE NORTH SEA FLOW MEASUREMENT WORKSHOP. Anais...Glasgow, United Kingdom: 2000

SMARTMEASUREMENT. Ultrasonic Flowmeter Model ALSONIC-FX San Francisco, CA, 2016. Disponível em: <<http://www.smartmeasurement.com>>

SMITH, S. W. Moving Average Filters. In: The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. [s.l.] California Technical Pub., 2008. p. 277–284.

STOKES, G. G. On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion, and of the

Equilibrium and Motion of Elastic Solid. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, v. XII, p. 287–305, 1845.

TAWACKOLIAN, K. et al. Calibration of an ultrasonic flow meter for hot water. Flow Measurement and Instrumentation, v. 30, p. 166–173, 2013.

TUVNEL. GOOD PRACTICE GUIDE: THE CALIBRATION OF FLOW METERS. [s.l: s.n.].

VULOVIC, F. et al. INSTALLATION EFFECTS ON A MULTIPATH ULTRASONIC FLOW METER. North Sea Measurement Workshop, 1995.

WANG, C. et al. Accuracy of the ultrasonic flow meter used in the hydroturbine intake penstock of the Three Gorges Power Station. Flow Measurement and Instrumentation, v. 25, p. 32–39, 2012.

WEISSENBRUNNER, A. et al. Simulation-based determination of systematic errors of flow meters due to uncertain inflow conditions. Flow Measurement and Instrumentation, v. 52, p. 25–39, 2016.

WILLATZEN, M. Ultrasonic flowmeters: Temperature gradients and transducer geometry effects. Ultrasonics, v. 41, n. 2, p. 105–114, 2003.

WILLATZEN, M.; KAMATH, H. Nonlinearities in ultrasonic flow measurement. Flow Measurement and Instrumentation, v. 19, n. 2, p. 79–84, 2008.

YAMAMOTO, M. Ultrasonic Method of Flow Measurement in Large Conduits and Open Channels. In: PEREGRINUS (Ed.). Modern Developments in Flow Measurement. London: [s.n.]. p. 115–138.

YODER, J. Ultrasonic flow meters in the energy measurement spotlight.

ZANKER, K. J. The Transit Time Ultrasonic Multi-path Gas Meter A Reassessment. North Sea Flow Measurement Workshop. Anais...2003

ANEXO A

Tabela 26 - Valores de ganhos (β_1) e zeros (β_0) para calibrar o protótipo

Temp. (°C)	Pressão (bar)	Q_{ref1} (m³/h)	Q_{MOPUS} (m³/h)	$\sigma^2(Q_{ref1})$	$\sigma^2(Q_{MOPUS})$	Ganho	Zero	$\bar{Q}_{MOPUS_{calib}}$ (m³/h)
30	2.5	5.00	2.60	0.158	0.818	1.112	2.119	5.01
30	2.5	10.02	6.98	0.052	0.751			9.88
30	2.5	15.00	11.73	0.060	0.745			15.17
30	2.5	20.01	16.13	0.032	0.774			20.06
30	2.5	25.00	20.49	0.028	1.078			24.91
30	5	4.98	3.31	0.132	0.711	1.120	1.310	5.02
30	5	9.99	7.66	0.048	0.606			9.89
30	5	15.00	12.27	0.029	0.567			15.05
30	5	20.00	16.74	0.026	0.672			20.06
30	5	25.00	21.11	0.040	0.819			24.96
30	7.5	4.99	3.16	0.105	0.647	1.102	1.705	5.19
30	7.5	10.01	7.30	0.071	0.506			9.75
30	7.5	15.00	12.06	0.037	0.437			15.00
30	7.5	20.00	16.58	0.037	0.516			19.98
30	7.5	25.00	21.20	0.037	0.627			25.07
40	2.5	4.98	2.85	0.103	0.485	1.127	1.744	4.95
40	2.5	10.00	7.25	0.042	0.363			9.91
40	2.5	15.00	11.93	0.029	0.302			15.18
40	2.5	20.00	16.23	0.035	0.421			20.03
40	2.5	25.00	20.56	0.028	0.627			24.90
40	5	4.99	2.91	0.117	0.498	1.117	1.791	5.04
40	5	10.00	7.23	0.040	0.284			9.87
40	5	15.00	11.89	0.025	0.329			15.08
40	5	19.99	16.31	0.037	0.390			20.01
40	5	25.00	20.75	0.032	0.530			24.97
40	7.5	5.01	2.96	0.054	0.321	1.092	1.865	5.10
40	7.5	9.99	7.40	0.030	0.307			9.95
40	7.5	15.00	11.98	0.036	0.351			14.95
40	7.5	19.99	16.49	0.052	0.388			19.88
40	7.5	25.00	21.29	0.028	0.507			25.12
50	2.5	5.02	3.24	0.137	0.483	1.119	1.386	5.01
50	2.5	10.01	7.67	0.046	0.276			9.97
50	2.5	15.00	12.23	0.026	0.238			15.07
50	2.5	20.00	16.65	0.037	0.407			20.01
50	2.5	25.00	21.09	0.041	0.549			24.98
50	5	5.03	3.28	0.117	0.446	1.124	1.244	4.93
50	5	9.99	7.80	0.052	0.279			10.01
50	5	15.00	12.39	0.018	0.238			15.16
50	5	20.00	16.70	0.028	0.301			20.01
50	5	25.01	21.06	0.046	0.474			24.91
50	7.5	4.99	3.37	0.041	0.280	1.119	1.330	5.10
50	7.5	10.00	7.59	0.040	0.304			9.83
50	7.5	15.01	12.25	0.025	0.279			15.04
50	7.5	20.00	16.69	0.056	0.434			20.01
50	7.5	25.00	21.17	0.046	0.465			25.02

ANEXO B

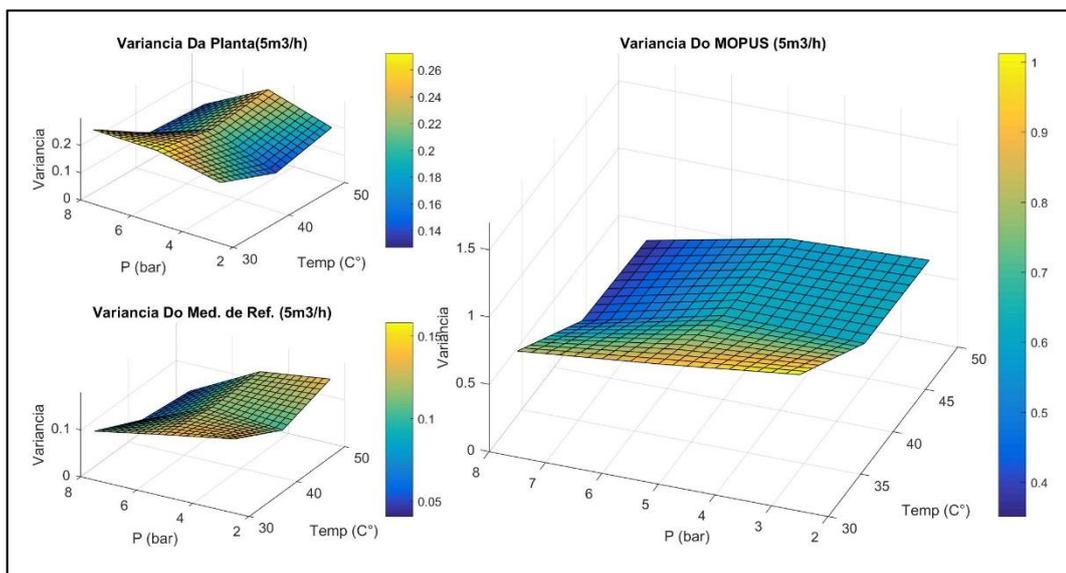


Figura 54: Variância Do MOPUS E Circuito De Testes Para Uma Vazão De 5m³/h

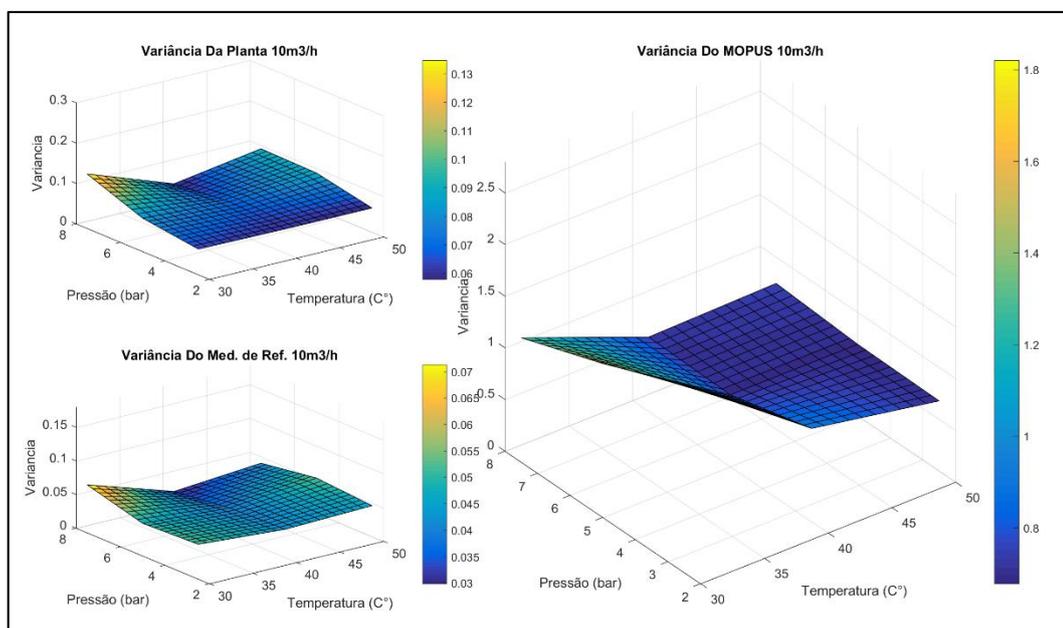


Figura 55: Variância Do MOPUS E Circuito De Testes Para Uma Vazão De 10m³/h

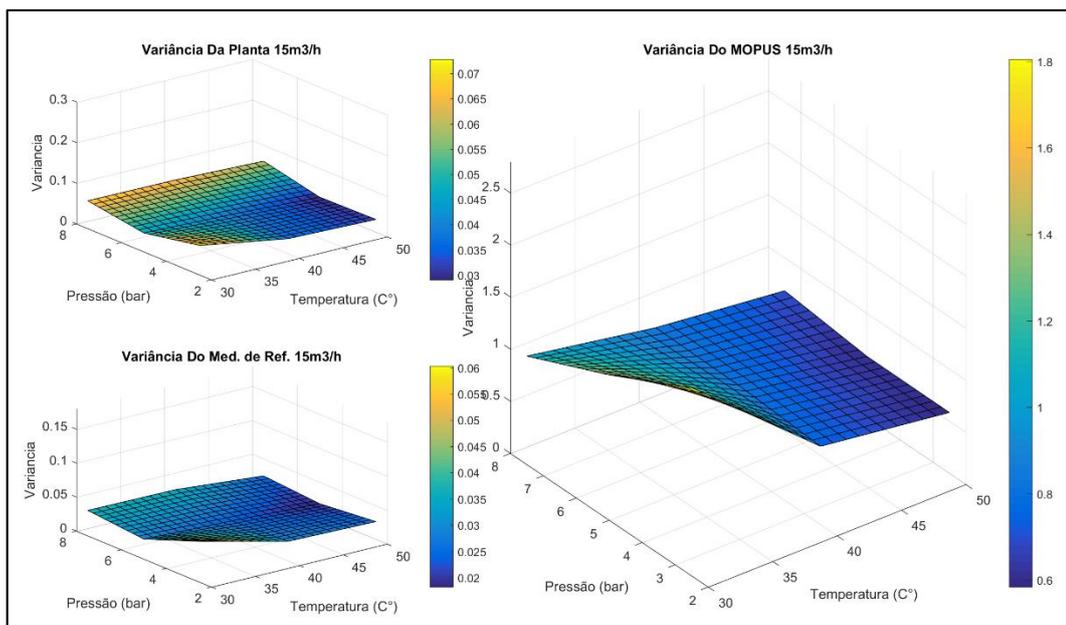


Figura 56: Variância Do MOPUS E Circuito De Testes Para Uma Vazão De 15m³/h

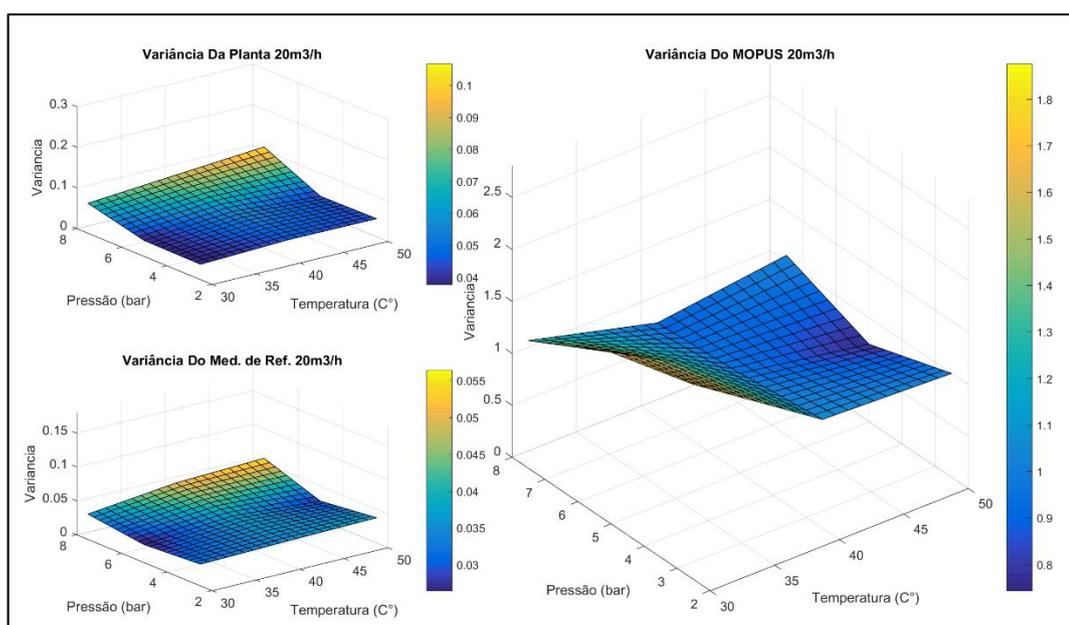


Figura 57: Variância Do MOPUS E Circuito De Testes Para Uma Vazão De 20m³/h

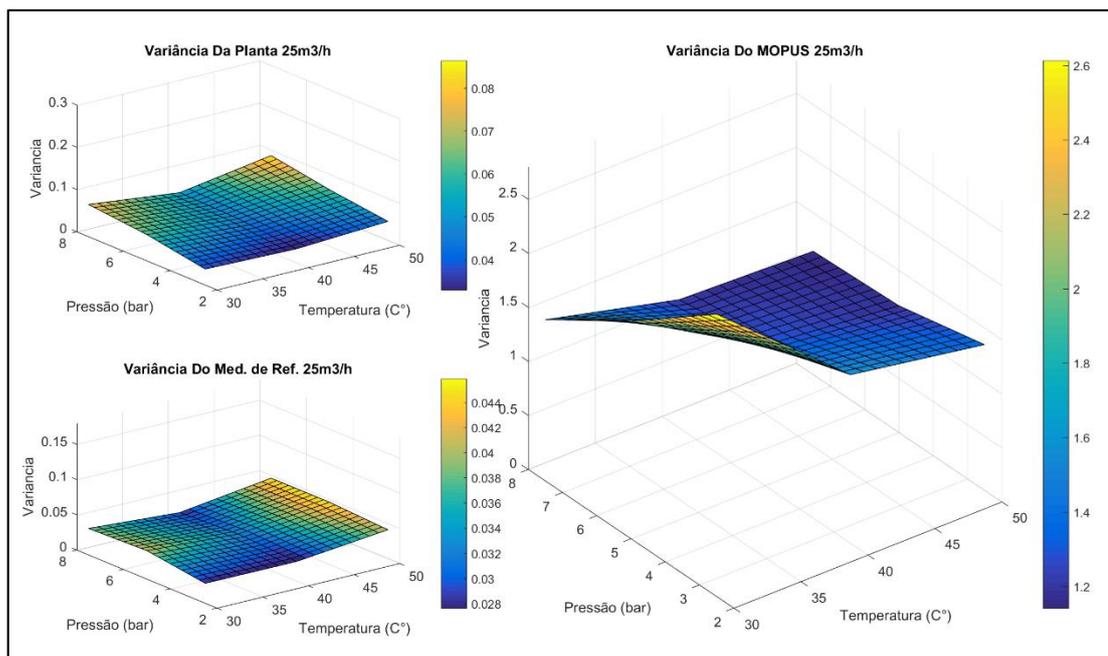


Figura 58: Variância Do MOPUS E Circuito De Testes Para Uma Vazão De 25m³/h

ANEXO C

Tabela 27 - Medidas do Raio do Tubo

Ângulo de Medição	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Média (mm)
0°	50.45	50.44	50.44	50.44
45°	50.51	50.53	50.52	50.52
90°	50.37	50.41	50.36	50.38
135°	50.36	50.41	50.37	50.38
180°	50.45	50.45	50.45	50.45
225°	50.50	50.51	50.52	50.51
270°	50.47	50.46	50.45	50.46
315°	50.37	50.42	50.41	50.40
Média Geral	50.440			
$u(r)$	0.054			

ANEXO D

Tabela 28 - Matriz de incertezas padrão para cada patamar de operação.

Temp. (°C)	Pressão (bar)	Vazão (m ³ /h)	T_{ba} (s)	T_{ab} (s)	β_1	β_0	uT_{ba}	uT_{ab}	$u\beta_1$	$u\beta_0$	u_{Comb} (m ³ /h)
30	2.5	5	1.339E-04	1.339E-04	1.112	2.119	1.11E-08	8.07E-09	0.023	0.304	3.091
30	2.5	10	1.339E-04	1.340E-04			5.24E-09	4.25E-09			1.569
30	2.5	15	1.340E-04	1.340E-04			6.08E-09	5.13E-09			1.868
30	2.5	20	1.341E-04	1.342E-04			6.32E-09	5.38E-09			1.986
30	2.5	25	1.343E-04	1.344E-04			8.18E-09	7.81E-09			2.668
30	5	5	1.340E-04	1.340E-04	1.12	1.31	1.28E-08	1.10E-08	0.014	0.191	3.824
30	5	10	1.340E-04	1.340E-04			1.03E-08	9.97E-09			3.257
30	5	15	1.341E-04	1.341E-04			6.17E-09	5.95E-09			1.988
30	5	20	1.342E-04	1.343E-04			6.12E-09	5.75E-09			1.988
30	5	25	1.343E-04	1.344E-04			8.51E-09	8.74E-09			2.842
30	7.5	5	1.338E-04	1.338E-04	1.102	1.705	1.46E-08	1.26E-08	0.032	0.438	4.327
30	7.5	10	1.339E-04	1.339E-04			7.51E-09	6.59E-09			2.293
30	7.5	15	1.340E-04	1.341E-04			7.21E-09	6.91E-09			2.327
30	7.5	20	1.342E-04	1.343E-04			1.73E-08	1.74E-08			5.496
30	7.5	25	1.345E-04	1.346E-04			1.06E-08	9.85E-09			3.356
40	2.5	5	1.369E-04	1.369E-04	1.127	1.744	6.85E-09	4.85E-09	0.023	0.301	1.855
40	2.5	10	1.369E-04	1.369E-04			3.81E-09	2.76E-09			1.105
40	2.5	15	1.369E-04	1.369E-04			2.91E-09	2.36E-09			0.989
40	2.5	20	1.369E-04	1.369E-04			4.41E-09	4.17E-09			1.498
40	2.5	25	1.369E-04	1.370E-04			4.68E-09	4.45E-09			1.650
40	5	5	1.368E-04	1.368E-04	1.117	1.791	1.17E-08	9.64E-09	0.016	0.213	3.290
40	5	10	1.368E-04	1.368E-04			4.50E-09	3.72E-09			1.306
40	5	15	1.368E-04	1.369E-04			4.13E-09	3.70E-09			1.288
40	5	20	1.369E-04	1.370E-04			4.85E-09	4.59E-09			1.567
40	5	25	1.369E-04	1.371E-04			7.43E-09	7.01E-09			2.332
40	7.5	5	1.370E-04	1.371E-04	1.092	1.865	8.57E-09	7.45E-09	0.019	0.257	2.409
40	7.5	10	1.370E-04	1.371E-04			5.17E-09	4.47E-09			1.487
40	7.5	15	1.371E-04	1.372E-04			6.05E-09	5.19E-09			1.751
40	7.5	20	1.372E-04	1.373E-04			7.63E-09	7.17E-09			2.294
40	7.5	25	1.374E-04	1.375E-04			1.17E-08	1.21E-08			3.619
50	2.5	5	1.398E-04	1.398E-04	1.119	1.386	8.85E-09	7.38E-09	0.008	0.110	2.393
50	2.5	10	1.397E-04	1.397E-04			8.06E-09	7.95E-09			2.367
50	2.5	15	1.396E-04	1.397E-04			4.97E-09	4.93E-09			1.513
50	2.5	20	1.395E-04	1.396E-04			4.79E-09	3.75E-09			1.380
50	2.5	25	1.395E-04	1.396E-04			4.34E-09	4.43E-09			1.467
50	5	5	1.400E-04	1.400E-04	1.124	1.244	1.76E-08	1.65E-08	0.021	0.288	5.015
50	5	10	1.398E-04	1.399E-04			1.02E-08	9.54E-09			2.931
50	5	15	1.398E-04	1.398E-04			4.76E-09	4.27E-09			1.443

ANEXO E

Tabela 29 - Repetitividade Dados linearizados para cada patamar de operação

Temp. (°C)	Pressão (bar)	Vazão (m ³ /h)	Repetitividade (API 12.2.3)	Repetitividade (API 13.1)
30	2.5	5	8.14%	6.05%
30	2.5	10	1.42%	2.98%
30	2.5	15	2.30%	1.94%
30	2.5	20	0.71%	1.50%
30	2.5	25	0.86%	1.19%
30	5	5	7.90%	6.02%
30	5	10	0.93%	3.00%
30	5	15	0.38%	1.96%
30	5	20	1.96%	1.49%
30	5	25	2.08%	1.19%
30	7.5	5	3.86%	5.89%
30	7.5	10	2.74%	3.02%
30	7.5	15	1.00%	1.96%
30	7.5	20	0.32%	1.48%
30	7.5	25	0.70%	1.19%
40	2.5	5	5.28%	5.98%
40	2.5	10	1.47%	2.98%
40	2.5	15	1.01%	1.96%
40	2.5	20	0.54%	1.48%
40	2.5	25	0.83%	1.19%
40	5	5	2.74%	5.99%
40	5	10	1.10%	2.98%
40	5	15	0.85%	1.97%
40	5	20	0.71%	1.48%
40	5	25	0.78%	1.19%
40	7.5	5	4.42%	5.69%
40	7.5	10	1.76%	3.03%
40	7.5	15	1.00%	2.00%
40	7.5	20	0.62%	1.49%
40	7.5	25	1.81%	1.19%
50	2.5	5	3.16%	5.88%
50	2.5	10	1.18%	3.00%
50	2.5	15	1.21%	1.97%
50	2.5	20	0.45%	1.48%
50	2.5	25	1.38%	1.19%
50	5	5	2.57%	5.95%
50	5	10	1.03%	2.99%
50	5	15	0.56%	1.97%

50	5	20	0.25%	1.48%
50	5	25	0.17%	1.19%
50	7.5	5	3.05%	5.93%
50	7.5	10	0.78%	2.98%
50	7.5	15	0.10%	1.97%
50	7.5	20	0.50%	1.48%
50	7.5	25	0.30%	1.19%

ANEXO F

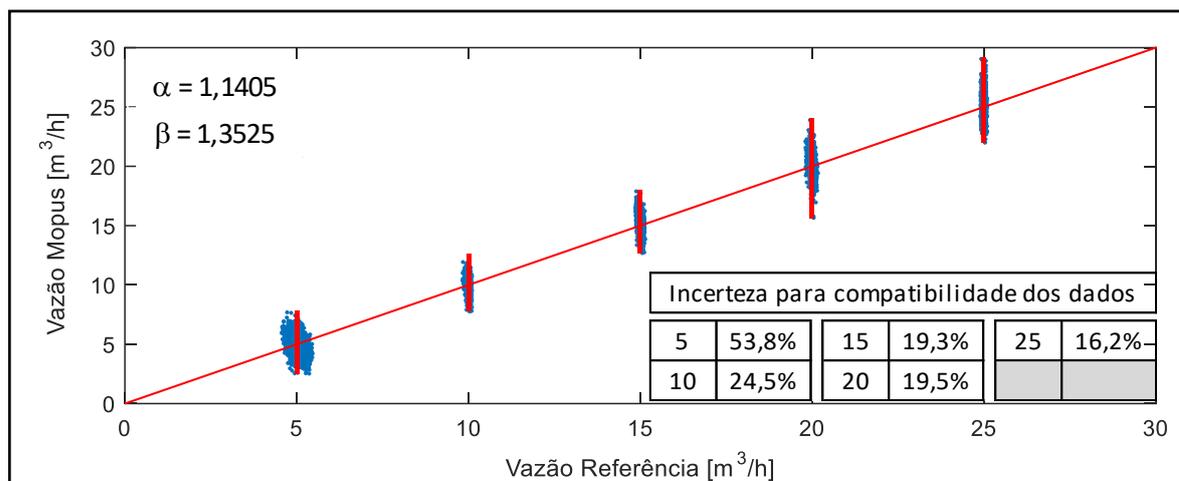


Figura 59: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 30 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms.

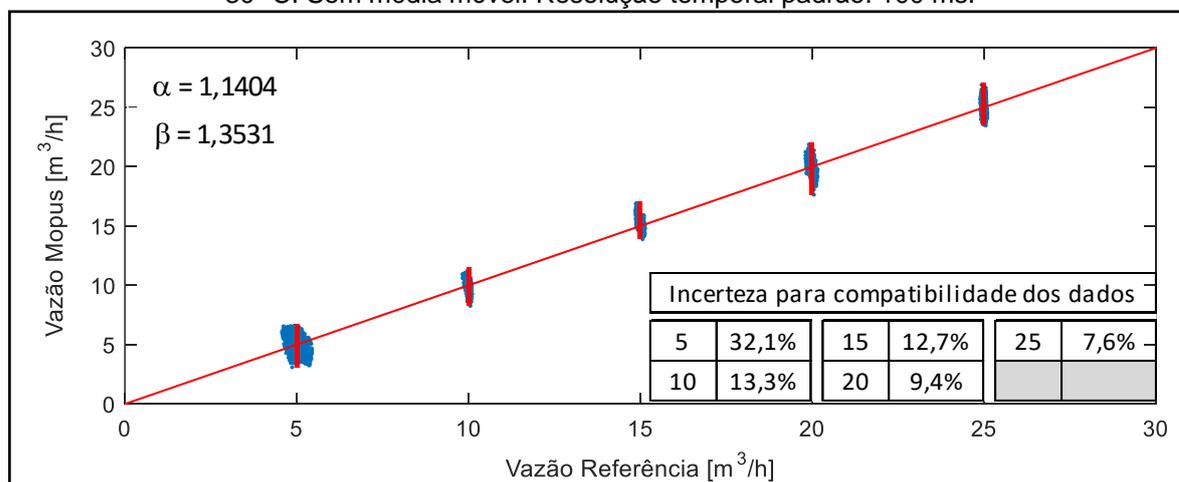


Figura 60: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 30 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas)

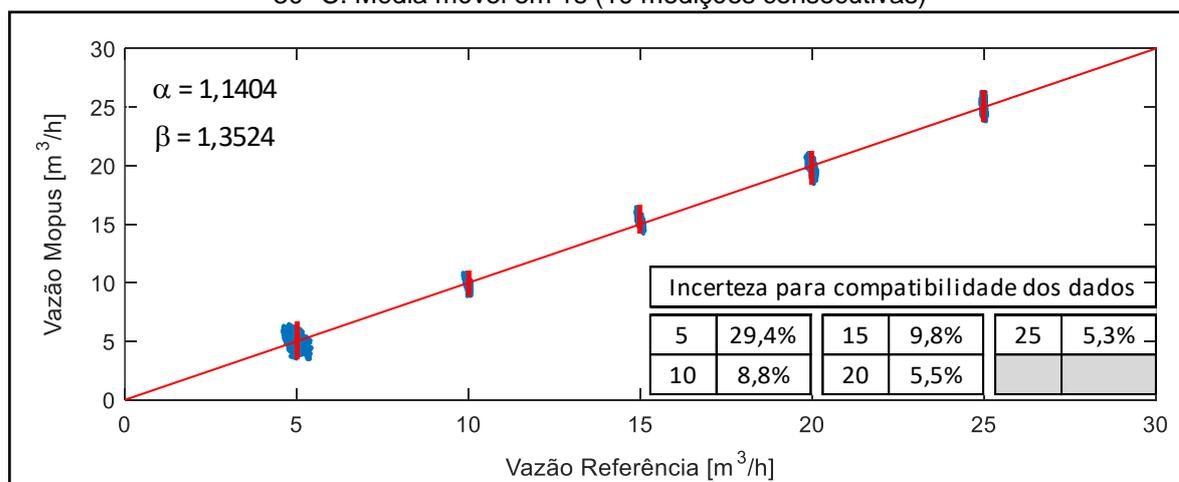


Figura 61: Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 30 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

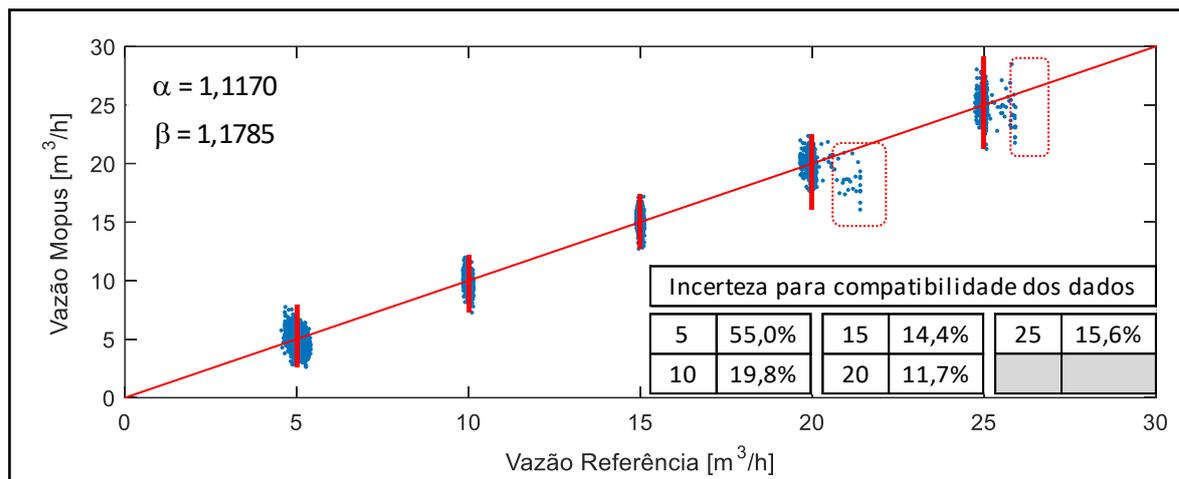


Figura 62 Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 5 bar. Temperatura: 30 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms.

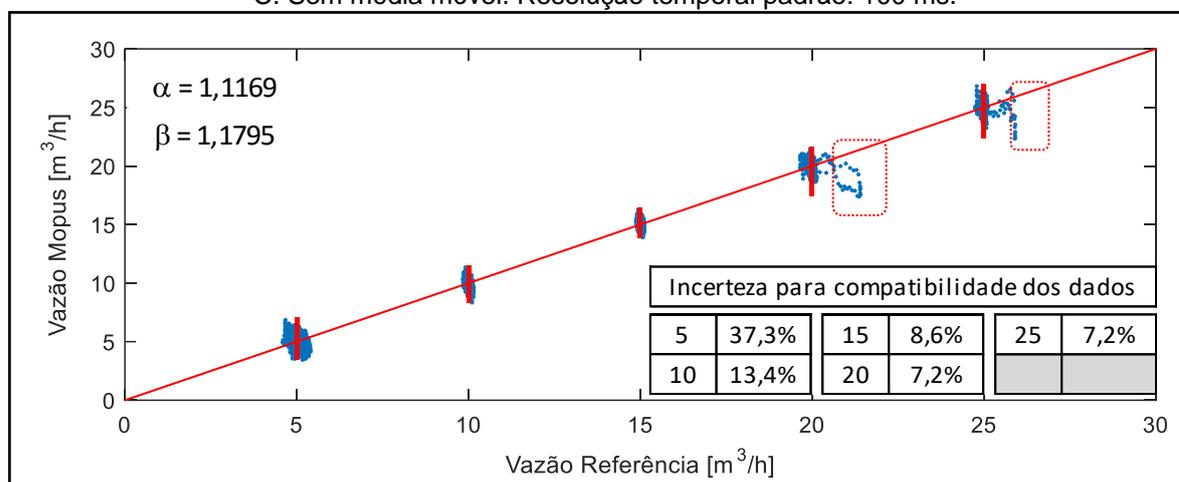


Figura 63 Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 5 bar. Temperatura: 30 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas)..

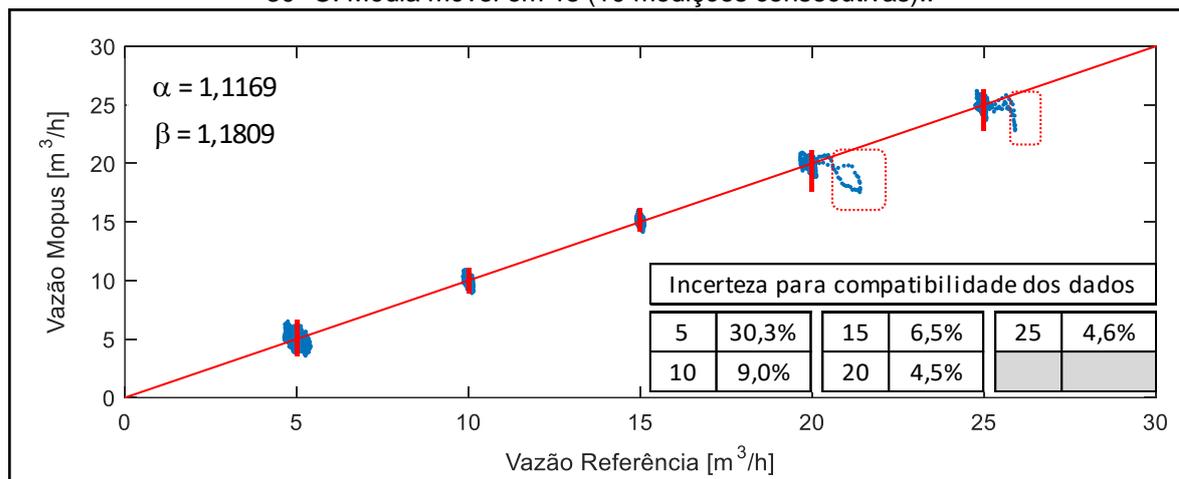


Figura 64 Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 5 bar. Temperatura: 30 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

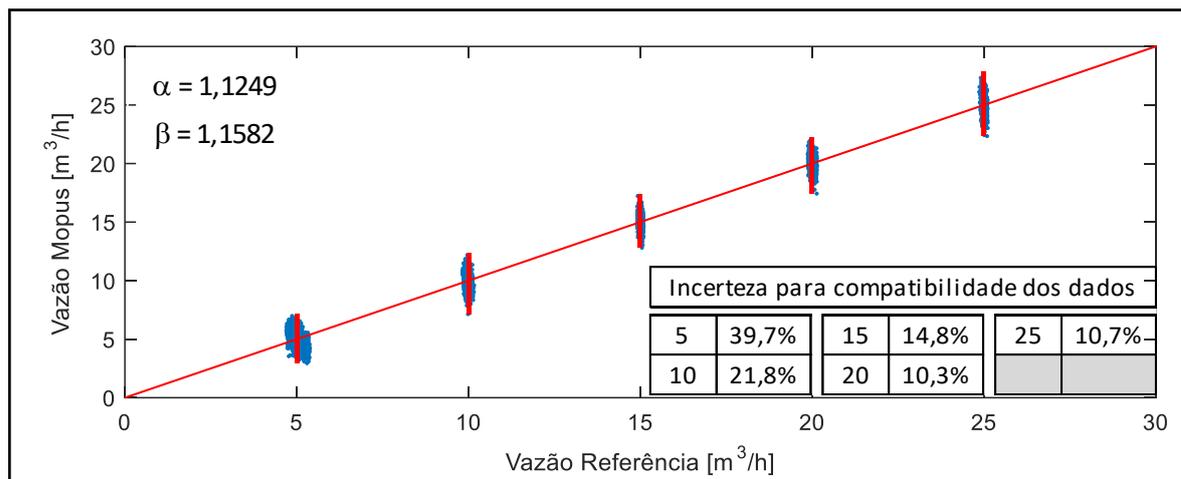


Figura 65 Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 7,5 bar. Temperatura: 30 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms

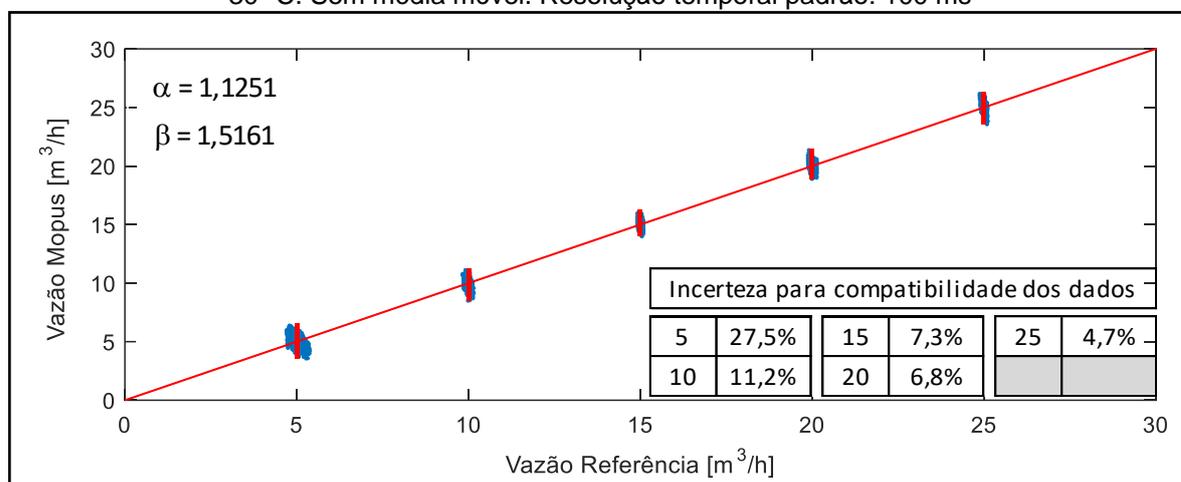


Figura 66 Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 7,5 bar. Temperatura: 30 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

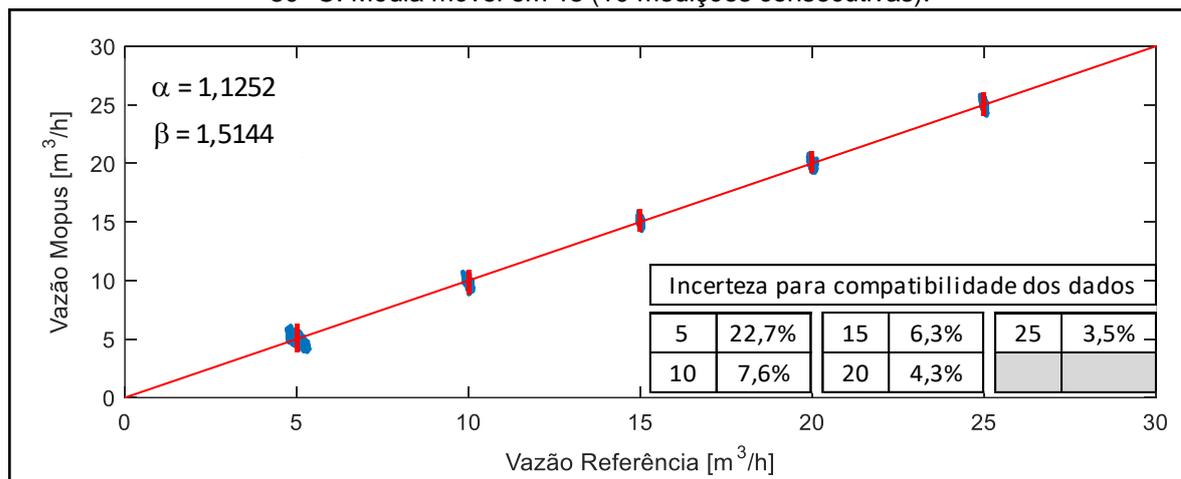


Figura 67 Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 7,5 bar. Temperatura: 30 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas)

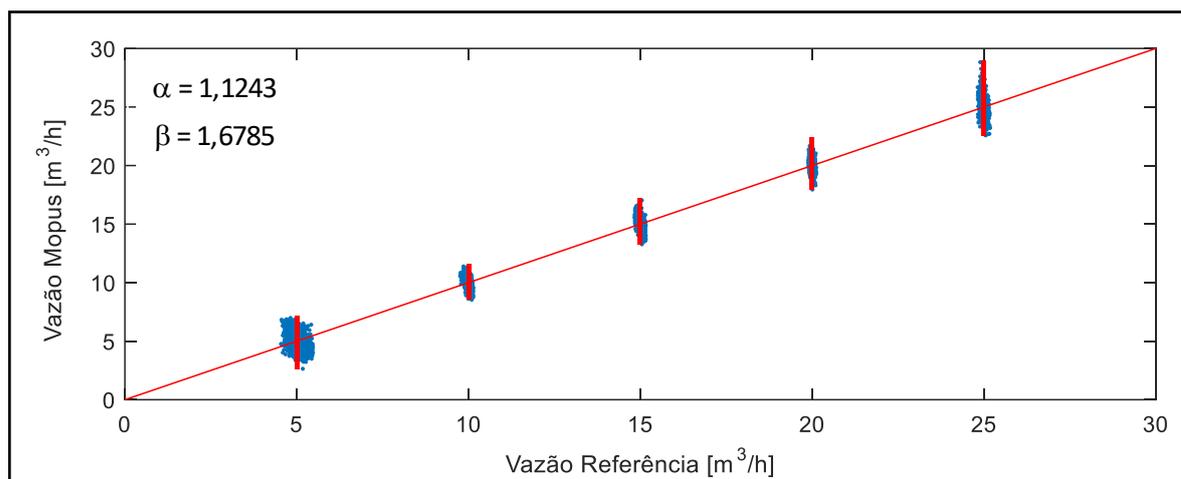


Figura 68 Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 40 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms

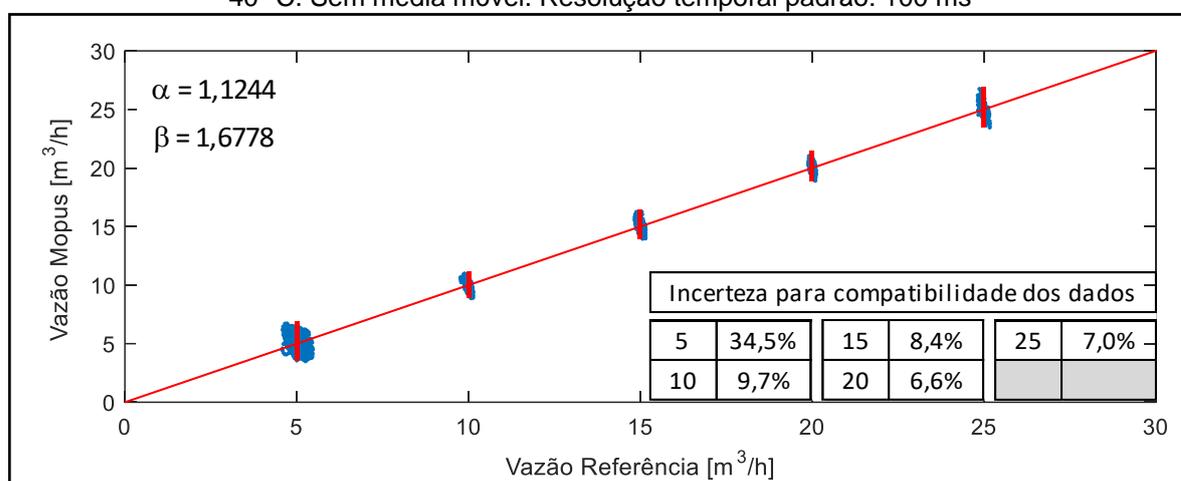


Figura 69 Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 40 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

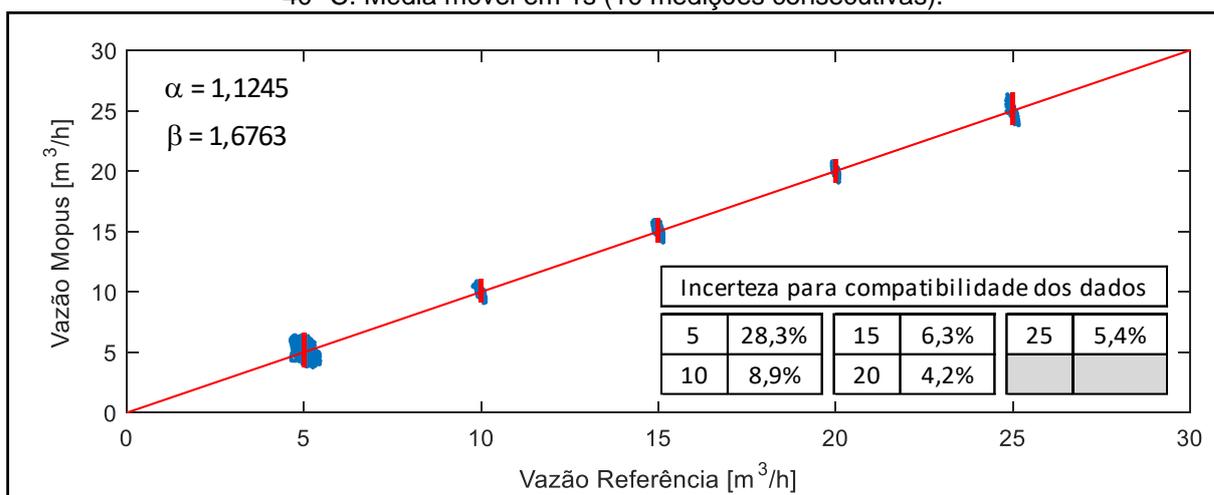


Figura 70 Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 40 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

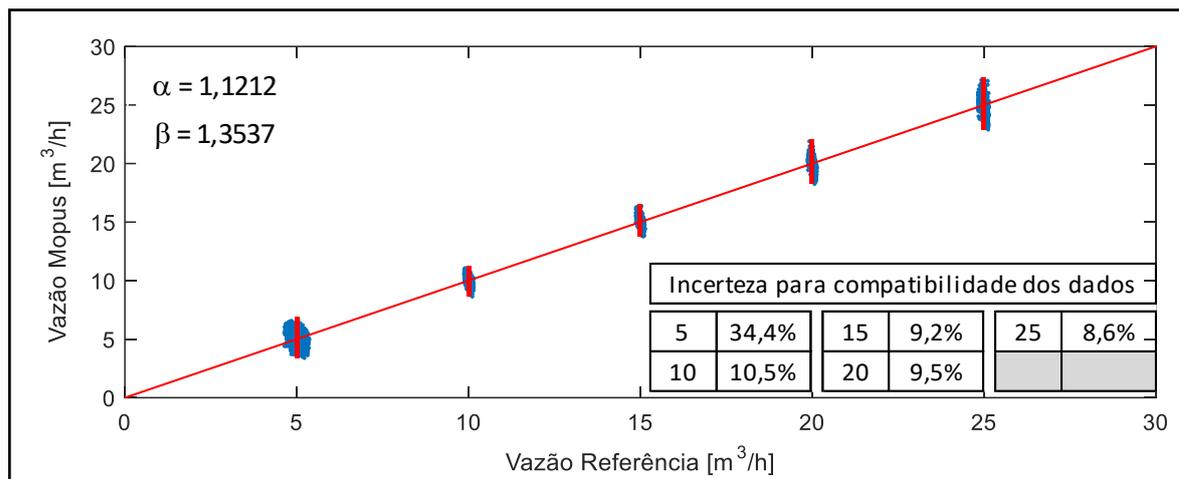


Figura 71 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 5 bar. Temperatura: 40 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms

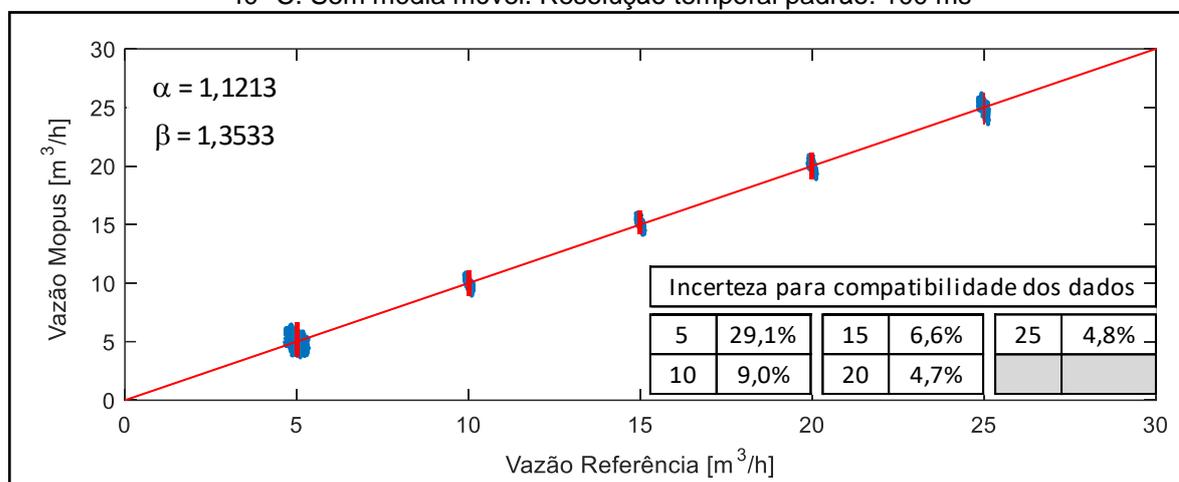


Figura 72 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 5 bar. Temperatura: 40 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

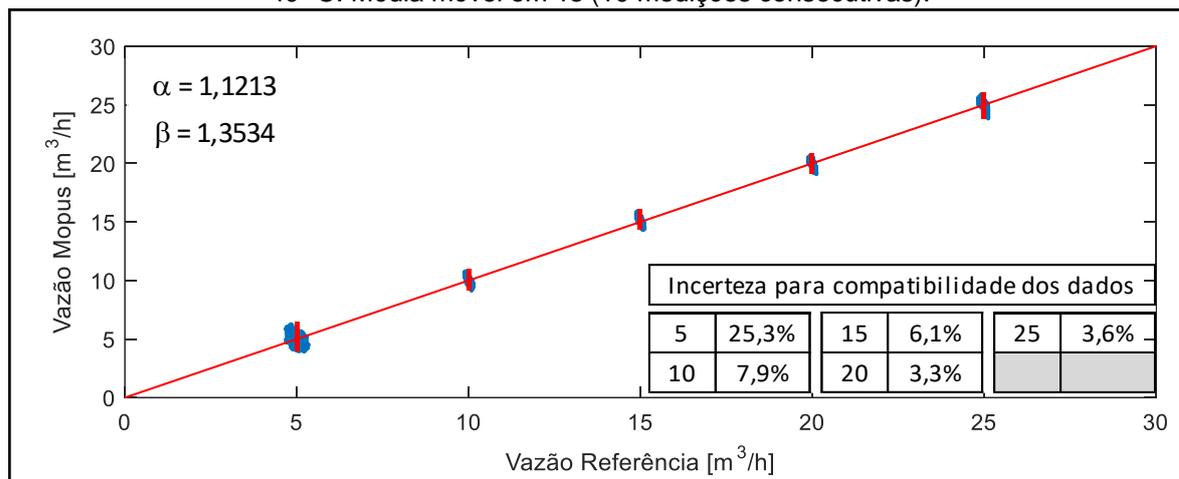


Figura 73 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 5 bar. Temperatura: 40 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

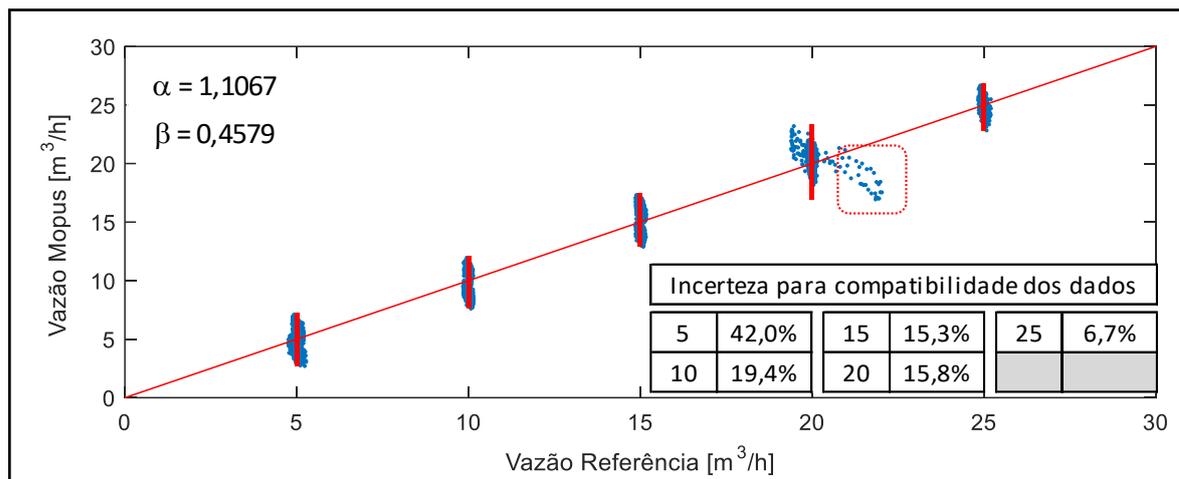


Figura 74 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 7,5 bar. Temperatura: 40 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms

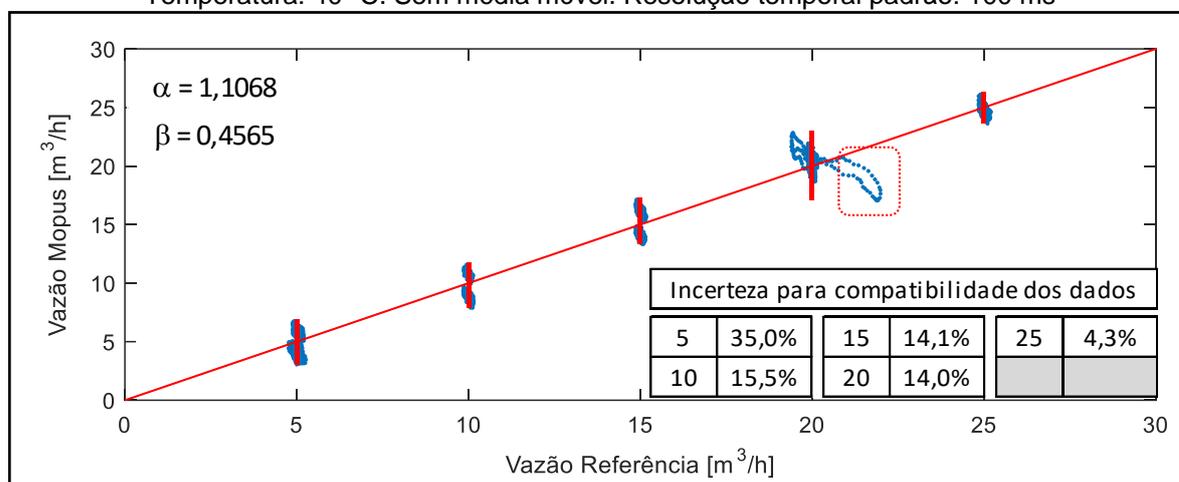


Figura 75 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 7,5 bar. Temperatura: 40 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

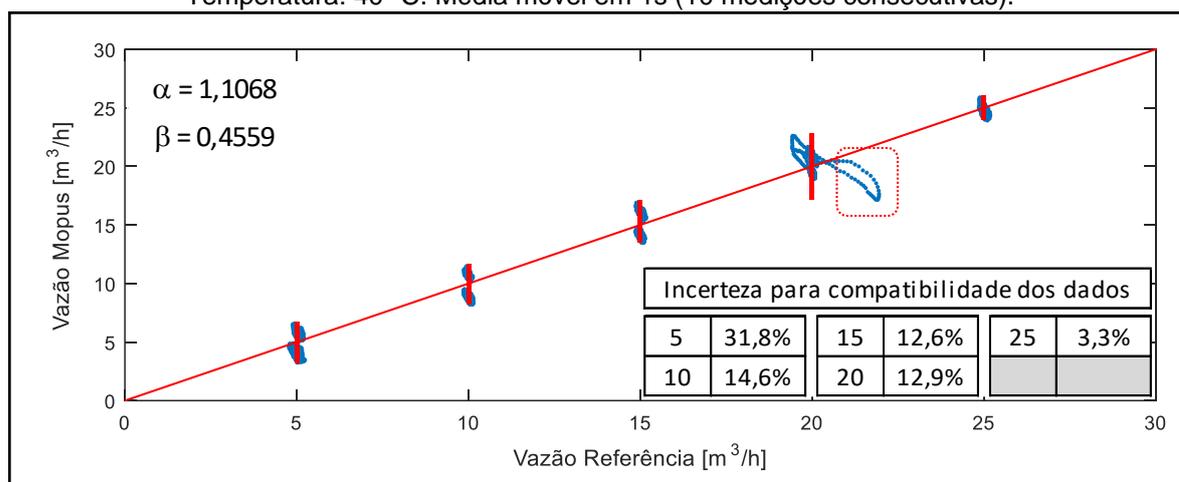


Figura 76 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 7,5 bar. Temperatura: 40 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

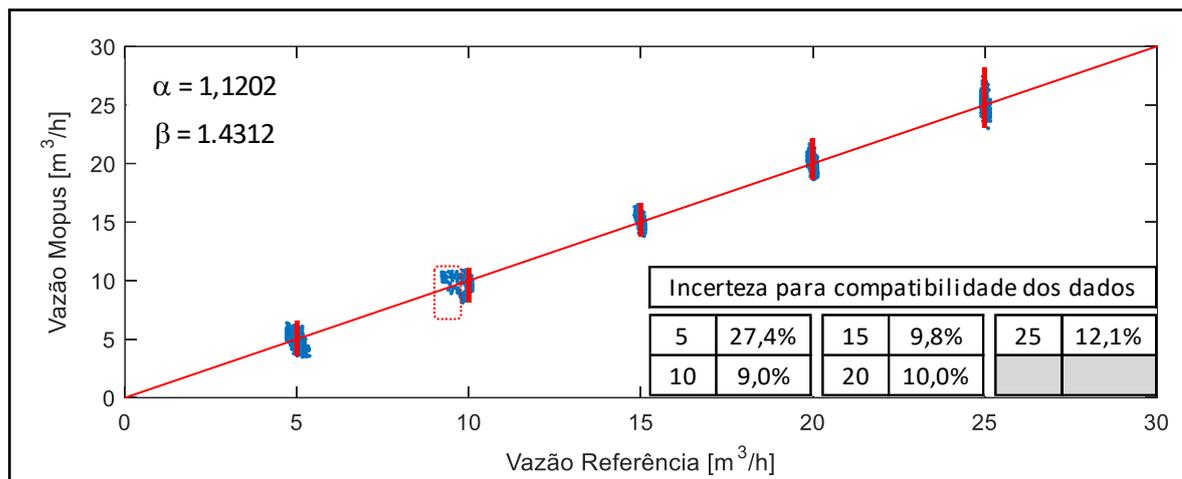


Figura 77 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 50 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms.

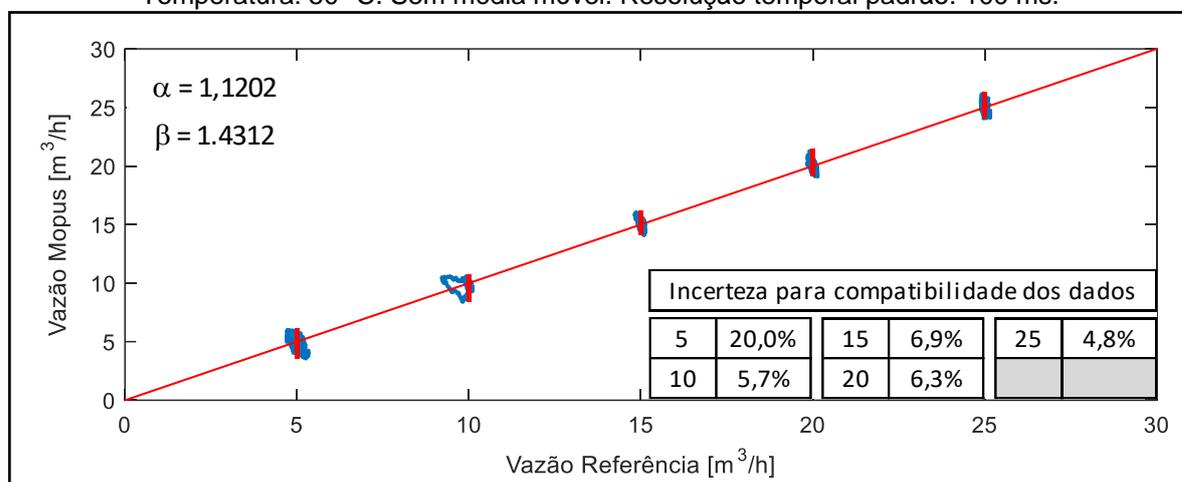


Figura 78 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 50 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

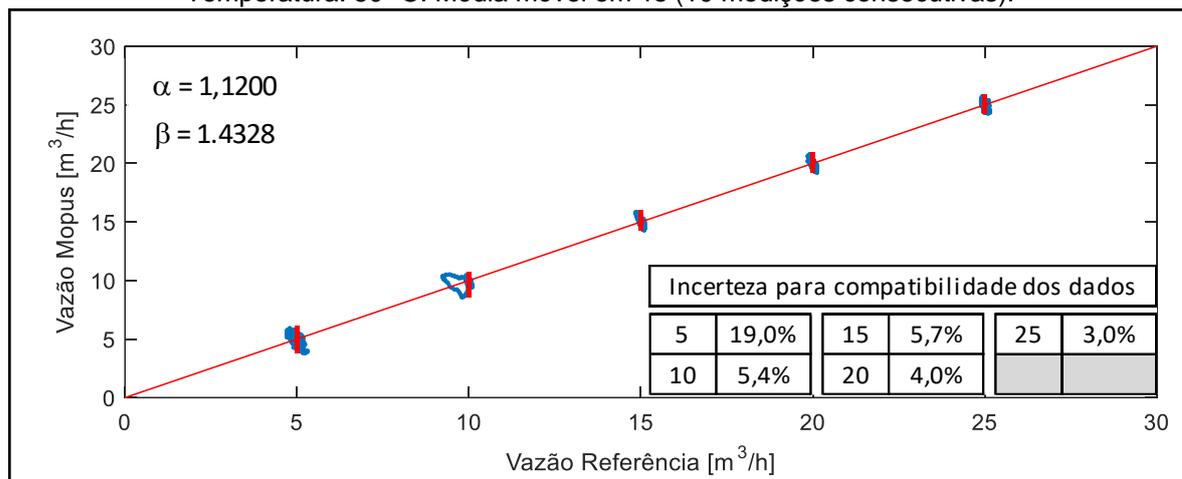


Figura 79 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 2,5 bar. Temperatura: 50 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

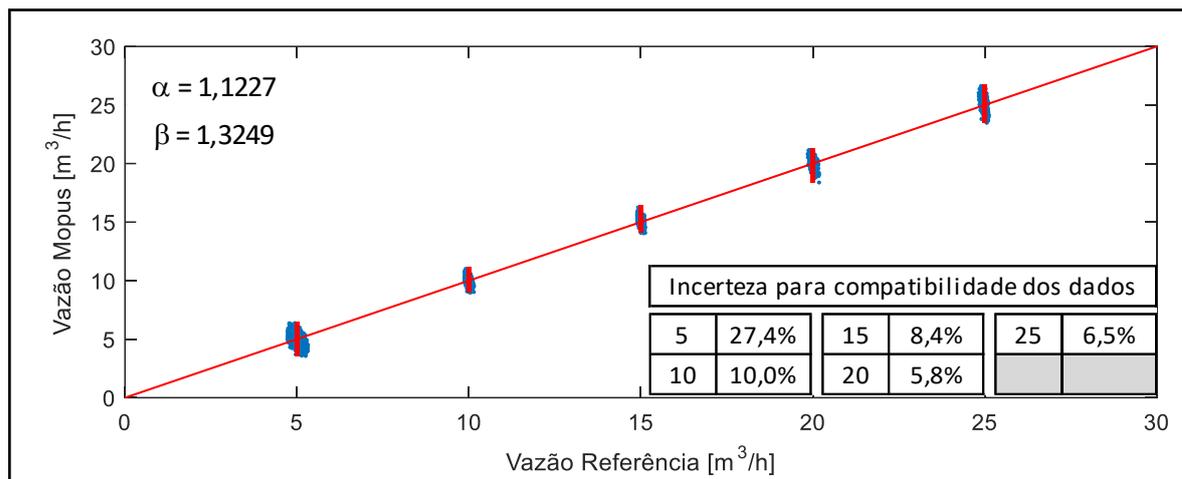


Figura 80 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 5 bar. Temperatura: 50 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms.

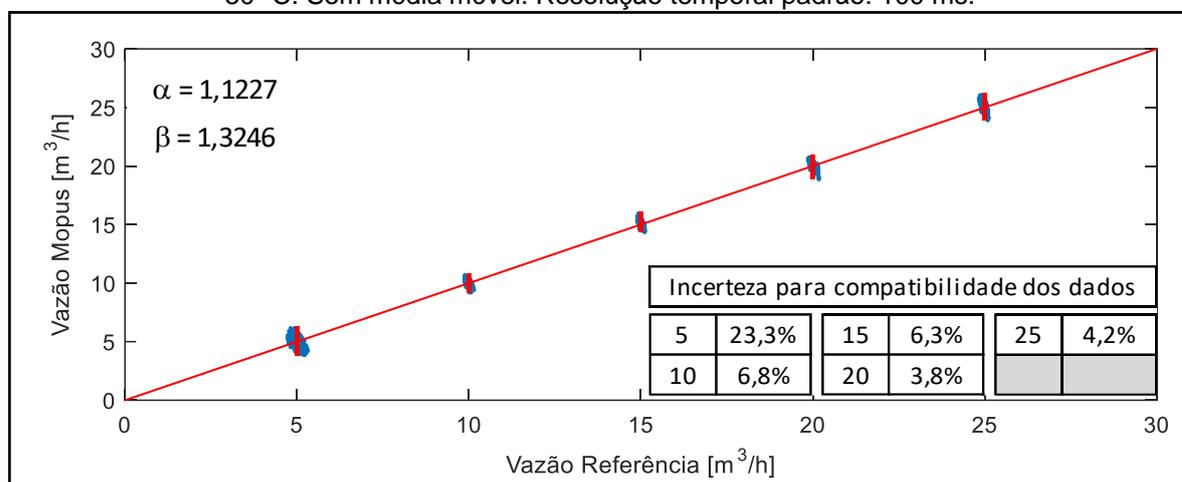


Figura 81 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 5 bar. Temperatura: 50 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

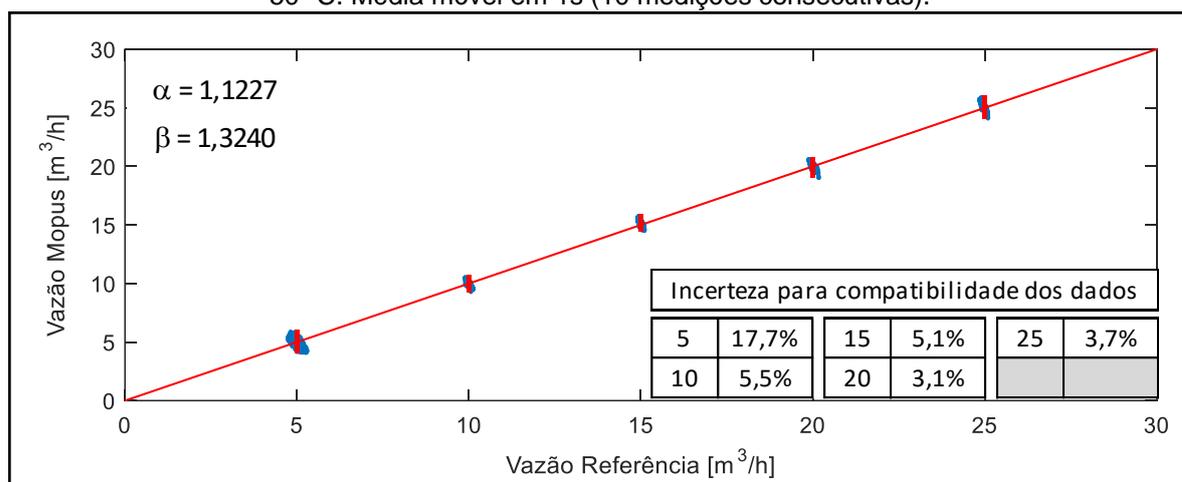


Figura 82 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 5 bar. Temperatura: 50 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

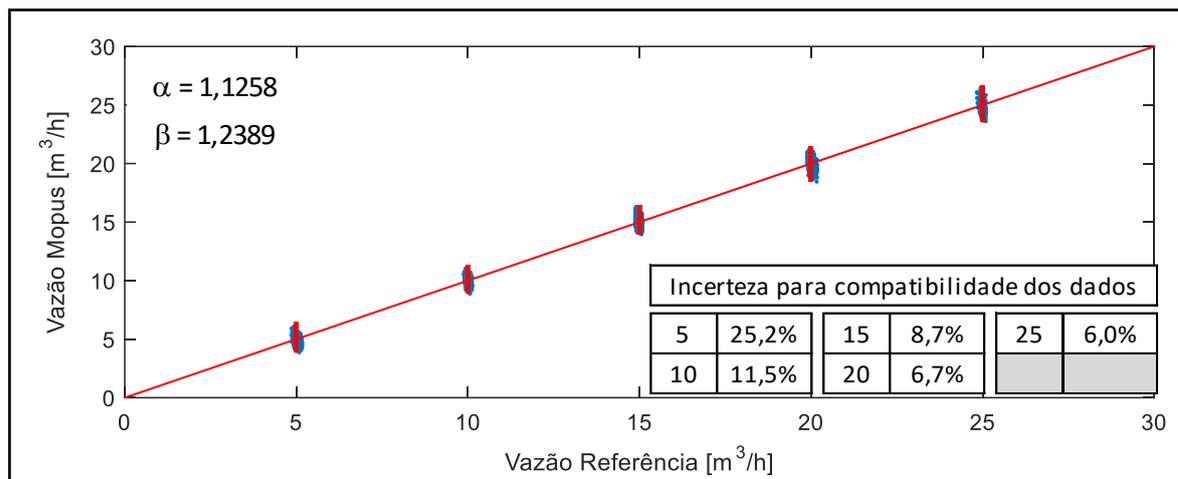


Figura 83 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 7,5 bar. Temperatura: 50 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms.

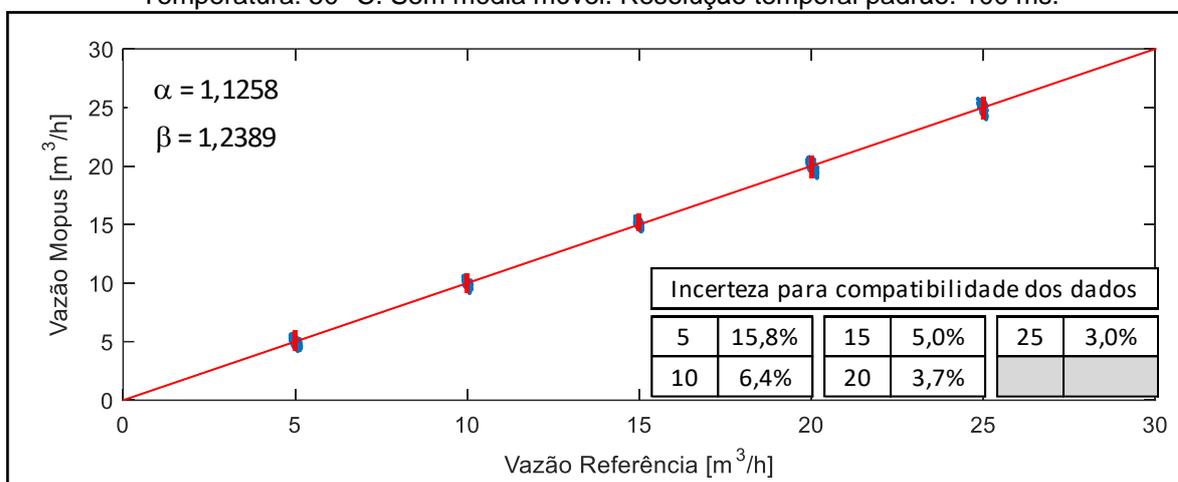


Figura 84 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 7,5 bar. Temperatura: 50 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

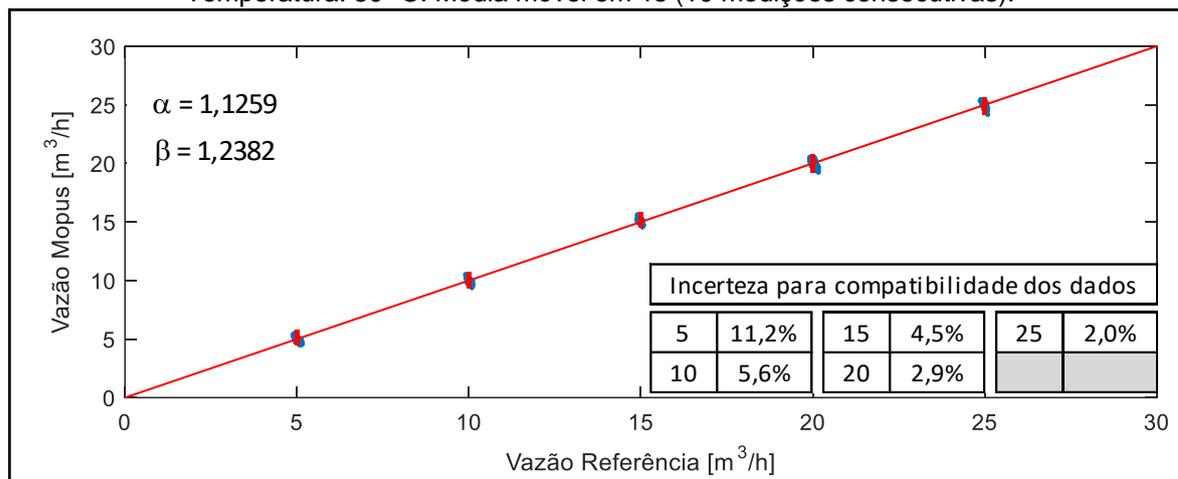


Figura 85 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 7,5 bar. Temperatura: 50 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

ANEXO G

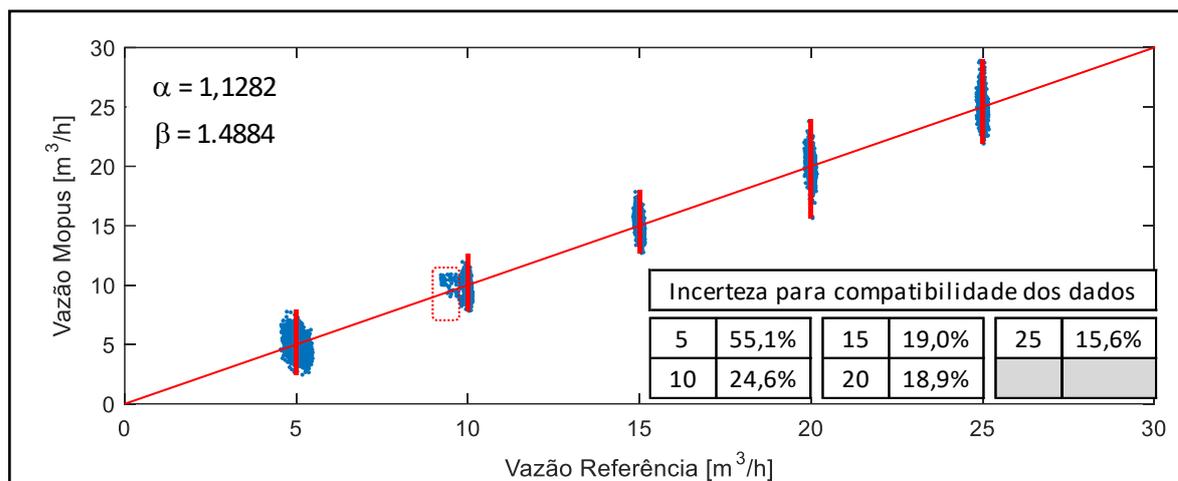


Figura 86 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 2.5 bar. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms.

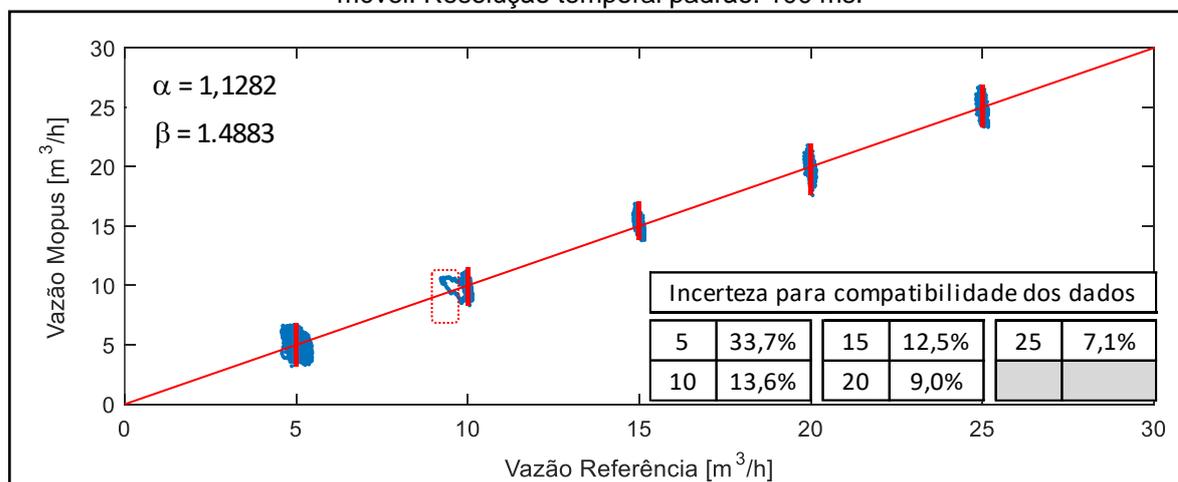


Figura 87 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 2.5 bar. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

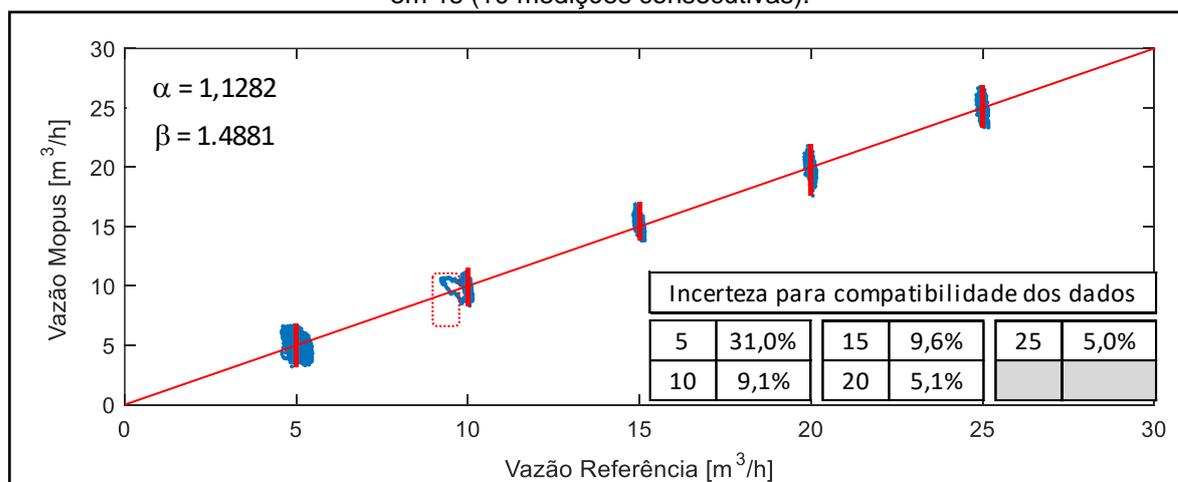


Figura 88 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 2.5 bar. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

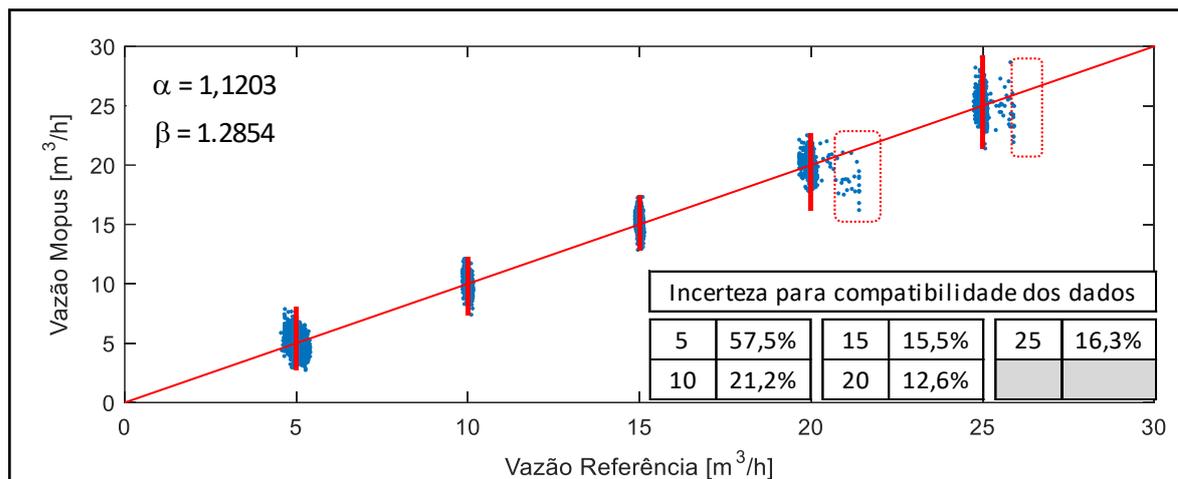


Figura 89 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 5 bar; Sem média móvel; Resolução temporal padrão: 100 ms.

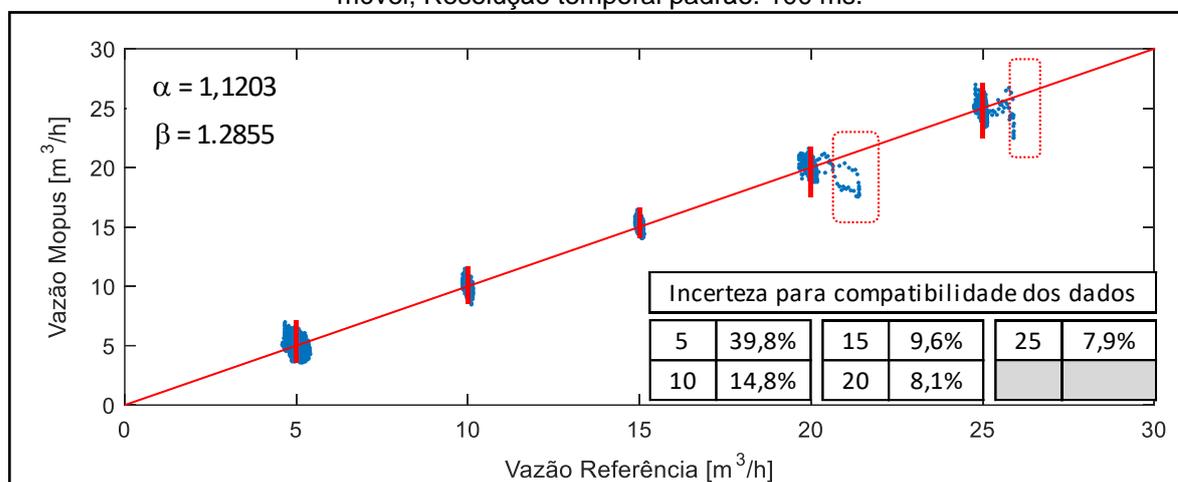


Figura 90 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 5 bar; Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

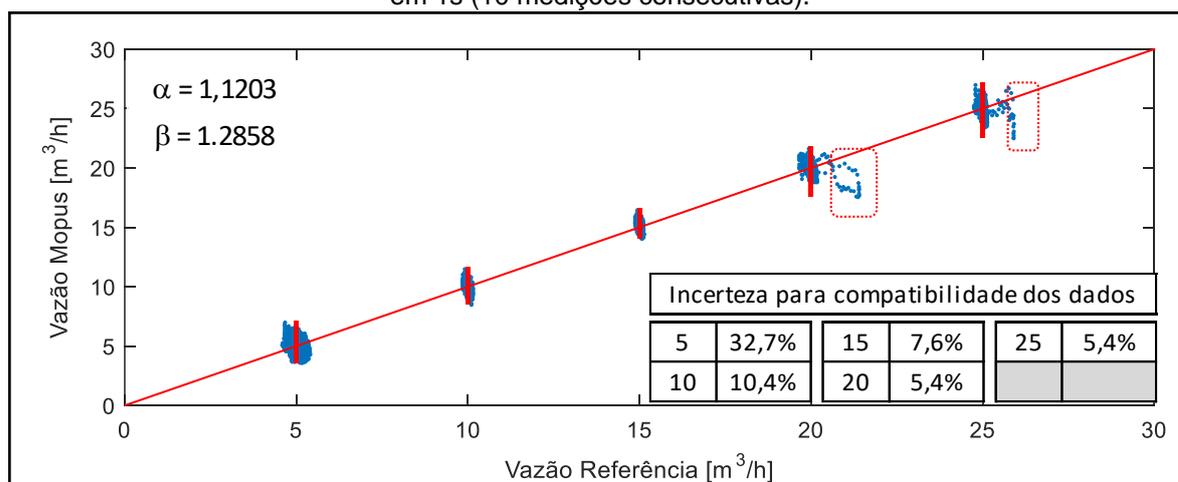


Figura 91 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 5 bar. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

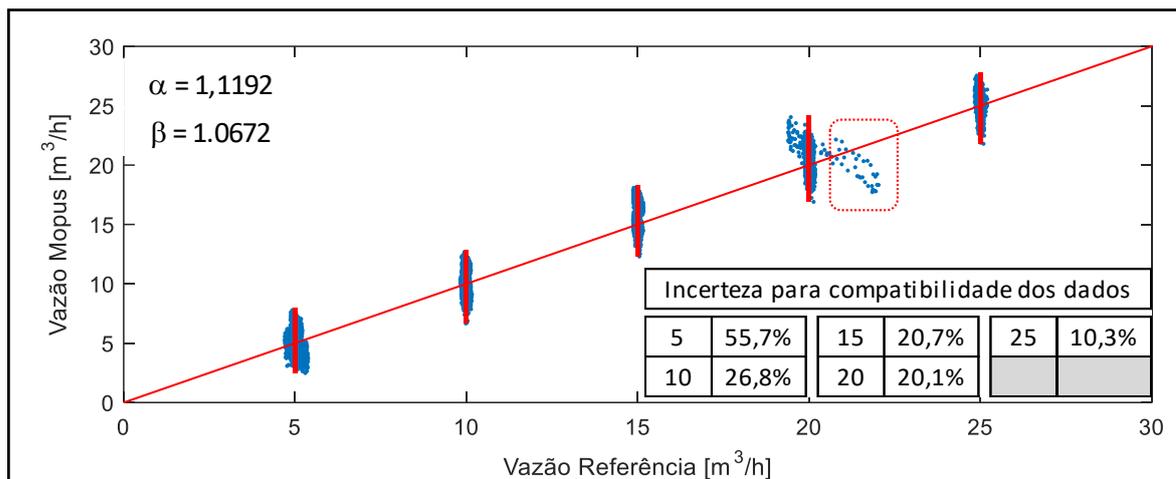


Figura 92 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 7,5 bar. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms.

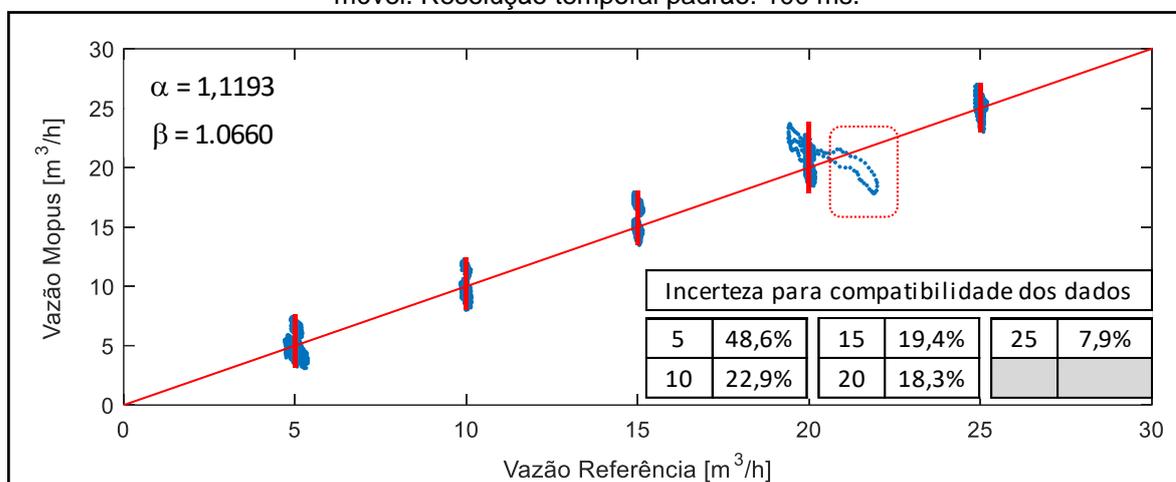


Figura 93 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Pressão: 7,5 bar. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

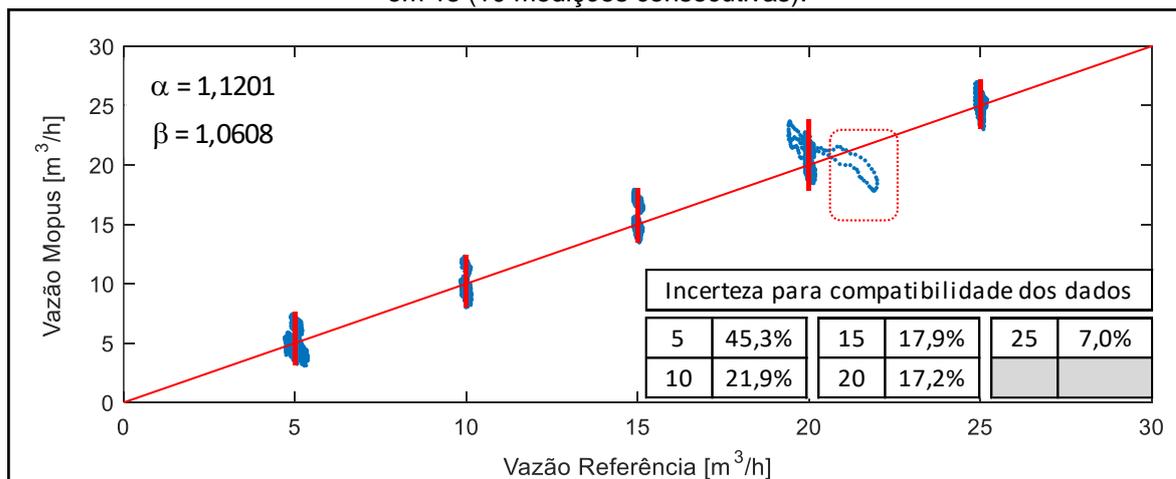


Figura 94 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Pressão: 7,5 bar. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

ANEXO H

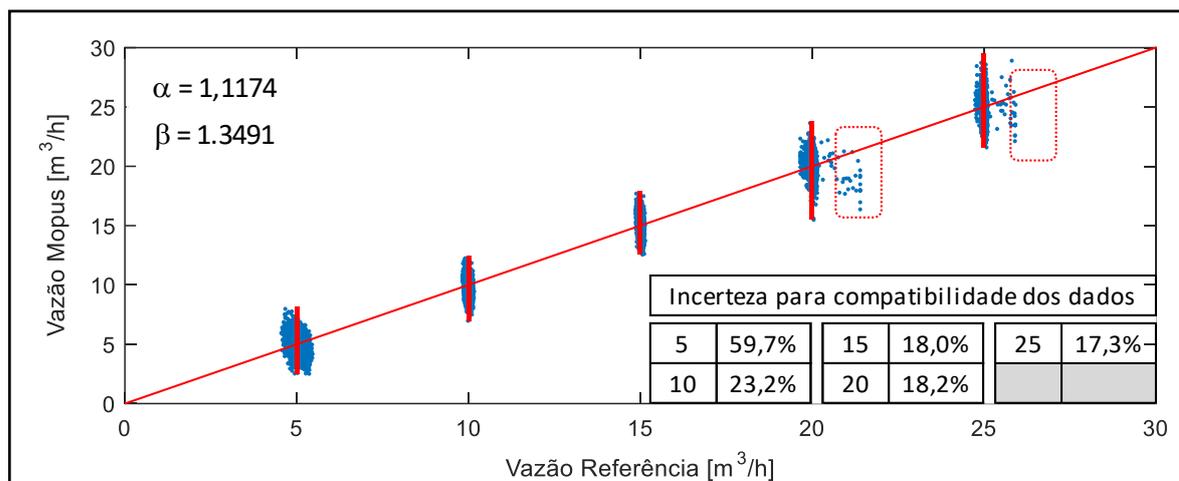


Figura 95 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Temperatura: 30 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms.

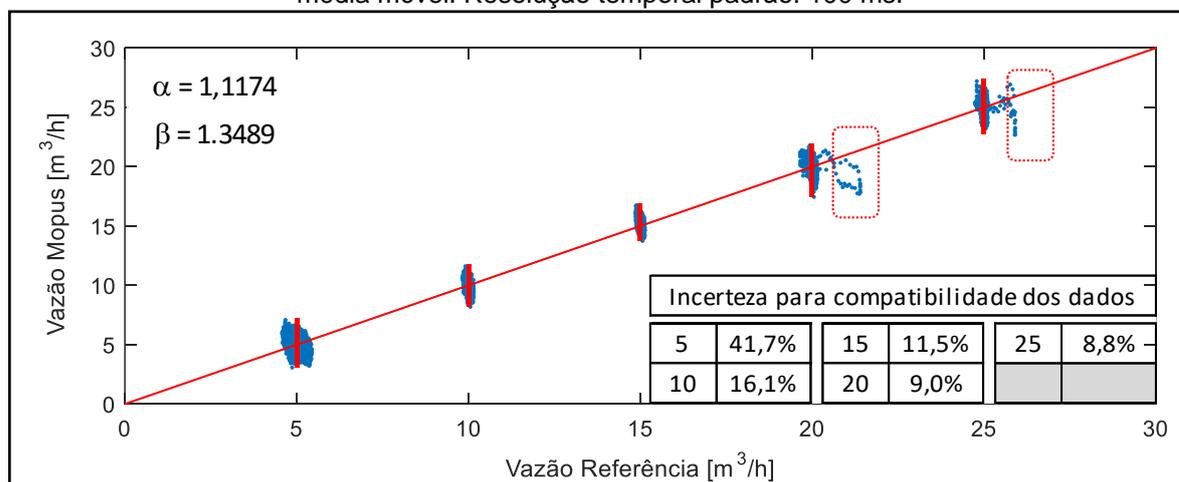


Figura 96 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Temperatura: 30 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

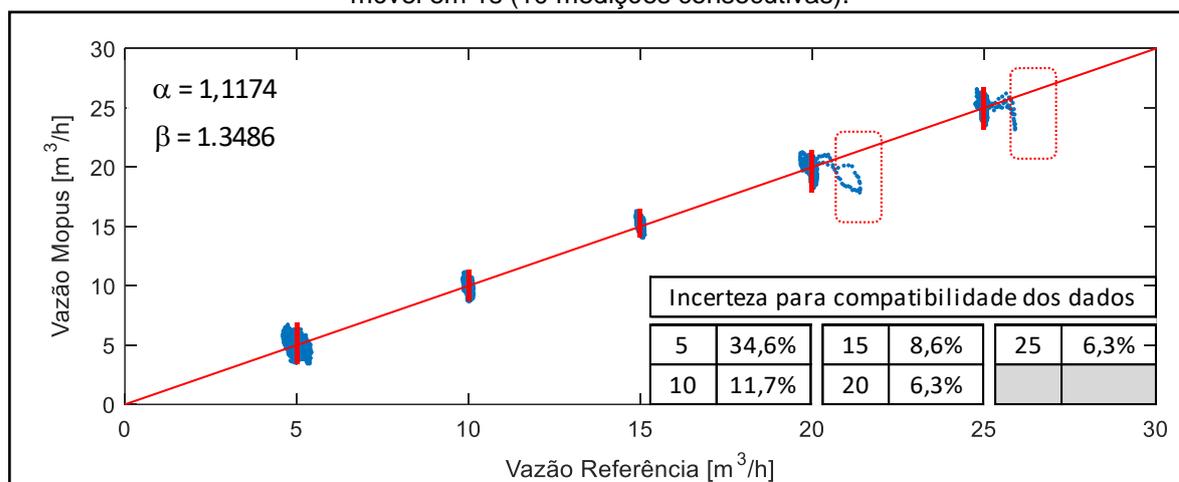


Figura 97 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Temperatura: 30 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

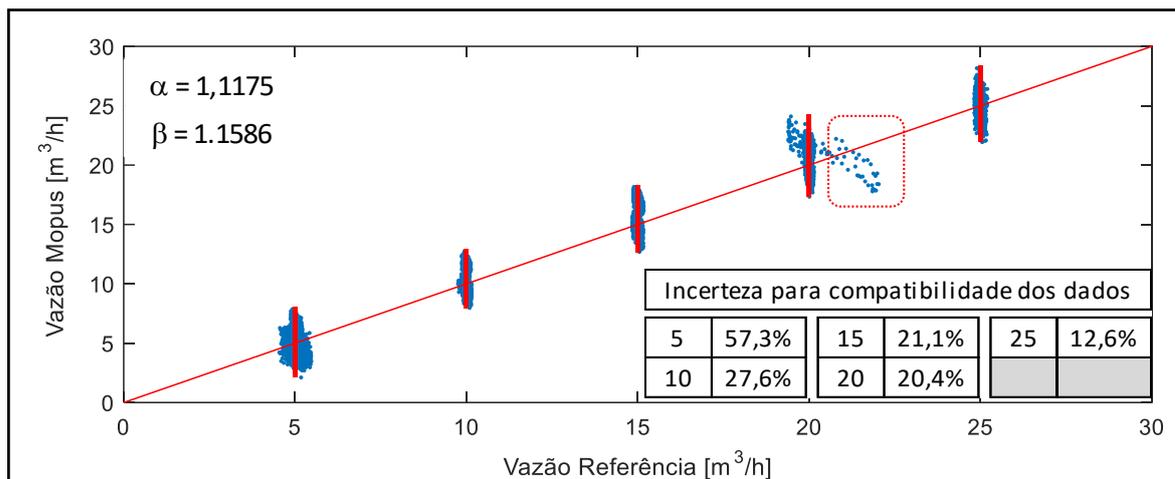


Figura 98 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Temperatura: 40 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms.

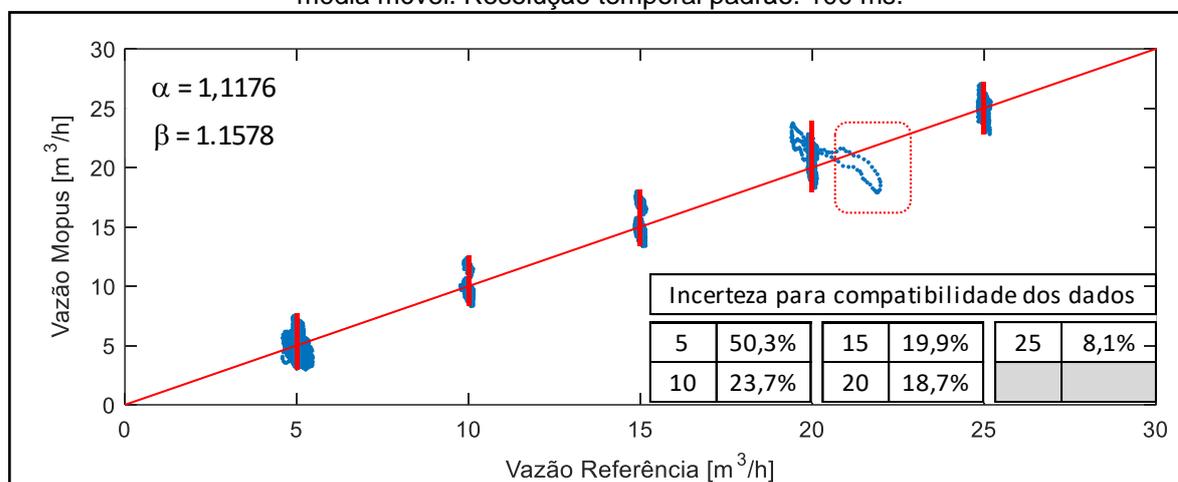


Figura 99 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Temperatura: 40 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

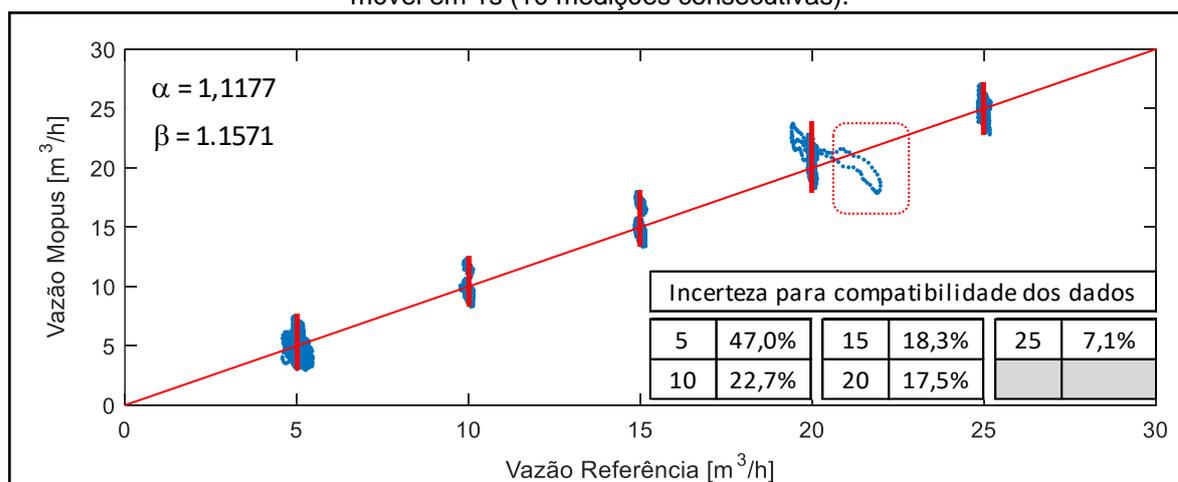


Figura 100 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Temperatura: 40 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

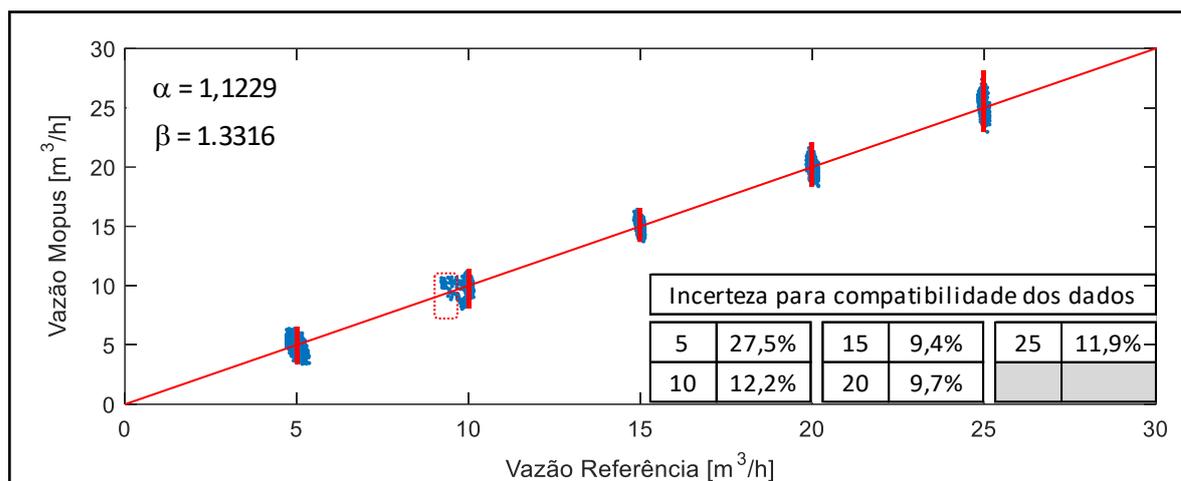


Figura 101 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Temperatura: 50 °C. Sem média móvel. Resolução temporal padrão: 100 ms.

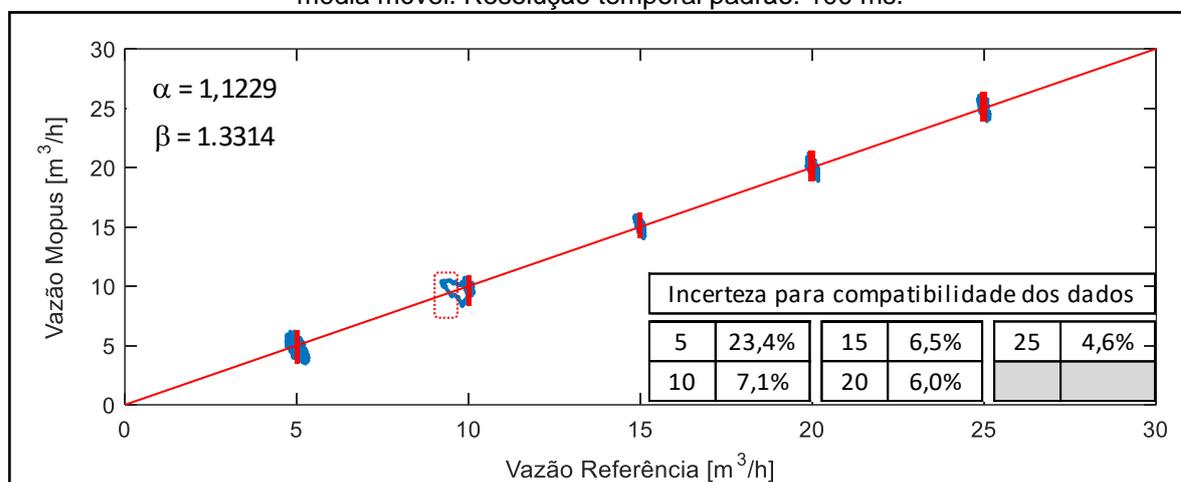


Figura 102 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero; Temperatura: 50 °C. Média móvel em 1s (10 medições consecutivas).

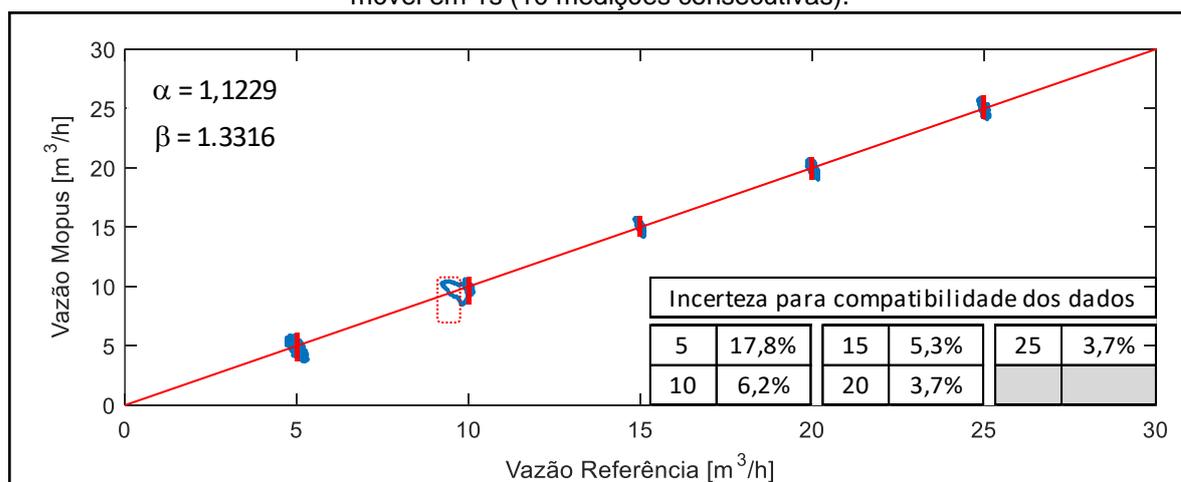


Figura 103 : Mopus vs. Referência após correções de ganho e de zero. Temperatura: 50 °C. Média móvel em 2s (20 medições consecutivas).

ANEXO I

Para obter a incerteza padrão combinada é necessário desenvolver a equação 48 usando a regra de propagação de incertezas. Desse modo deve-se analisar o modelo apresentado no passo 2 do capítulo 7, Equação 54:

$$Q_v = \left[\pi r^2 \cdot \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right] * 3600 * \beta_1 + \beta_0 \quad (54)$$

O resultado final, ou mensurando do MOPUS é a vazão volumétrica (Q_v) sendo calculado indiretamente através da equação 5. Aplicando-se a regra de propagação de incertezas entre as variáveis descritas acima tem-se obtém-se a Equação 55:

$$\Delta \overline{Q}_v = \sqrt{\left(\frac{\partial \overline{Q}_v}{\partial L} u(L) \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{Q}_v}{\partial (t_{AB})} u(t_{AB}) \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{Q}_v}{\partial (t_{BA})} u(t_{BA}) \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{Q}_v}{\partial \cos \theta} u(\cos \theta) \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{Q}_v}{\partial r^2} u(r^2) \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{Q}_v}{\partial \beta_1} u(\beta_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{Q}_v}{\partial \beta_0} u(\beta_0) \right)^2} \quad (55)$$

Seguindo o Método Kragten apresentado no capítulo 4, pode-se simplificar as derivadas parciais por deltas pequenos, tal como visto na Equação 56:

$$\Delta \overline{Q}_v = \sqrt{\left(\frac{\Delta \overline{Q}_v}{\Delta L} u(L) \right)^2 + \left(\frac{\Delta \overline{Q}_v}{\Delta (t_{AB})} u(t_{AB}) \right)^2 + \left(\frac{\Delta \overline{Q}_v}{\Delta (t_{BA})} u(t_{BA}) \right)^2 + \left(\frac{\Delta \overline{Q}_v}{\Delta \cos \theta} u(\cos \theta) \right)^2 + \left(\frac{\Delta \overline{Q}_v}{\Delta r^2} u(r^2) \right)^2 + \left(\frac{\Delta \overline{Q}_v}{\Delta \beta_1} u(\beta_1) \right)^2 + \left(\frac{\Delta \overline{Q}_v}{\Delta \beta_0} u(\beta_0) \right)^2} \quad (56)$$

Como $\Delta \overline{Q}_v = F(x_1 + \Delta x_1, x_2, \dots, x_n) - F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ tem-se:

$$\Delta \vec{Q}_v = \sqrt{\left(\frac{\left(\pi r^2 \frac{L + \Delta L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right) u(L)}{\Delta L} \right)^2 + \left(\frac{\left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \left(\frac{t_{BA} - (t_{AB} + \Delta t_{AB})}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) * 3600 * \beta_1 - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right) u(t_{AB})}{\Delta(t_{AB})} \right)^2 + \left(\frac{\left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \left(\frac{(t_{BA} + \Delta t_{BA}) - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) * 3600 * \beta_1 - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right) u(t_{BA})}{\Delta(t_{BA})} \right)^2 + \left(\frac{\left(\pi r^2 \frac{L}{2(\cos \theta + \Delta \cos \theta)} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right) u(\cos \theta)}{\Delta \cos \theta} \right)^2 + \left(\frac{\left(\pi (r^2 + \Delta r^2) \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right) u(r^2)}{\Delta r^2} \right)^2 + \left(\frac{\left(\pi (r^2) \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * (\beta_1 + \Delta \beta_1) - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right) u(\beta_1)}{\Delta \beta_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \beta_0}{\Delta \beta_0} u(\beta_0) \right)^2 \right) \quad (57)$$

O método Kragten também iguala a incerteza padrão ($u(x_1)$) dos componentes com o diferencial parcial dos componentes (Δx_1). Cancelando o delta de cada componente tem-se:

$$\Delta \vec{Q}_v = \sqrt{\left(\frac{\left(\pi r^2 \frac{L + u(L)}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right)^2}{\left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \left(\frac{t_{BA} - (t_{AB} + u(t_{AB}))}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) * 3600 * \beta_1 - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right)^2} + \left(\frac{\left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \left(\frac{(t_{BA} + u(t_{BA})) - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) * 3600 * \beta_1 - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right)^2}{\left(\pi r^2 \frac{L}{2(\cos(\theta + u(\theta)))} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right)^2} + \left(\frac{\left(\pi (r^2 + u(r^2)) \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right)^2}{\left(\pi (r^2) \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * (\beta_1 + u(\beta_1)) - \left(\pi r^2 \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} * 3600 * \beta_1 \right) \right)^2} + (u(\beta_0))^2 \right) \quad (58)$$