

**Helmitom Aparecido da Silva**

**Análise metrológica do desempenho de medidores ultra-sônicos de vazão de líquidos como diagnóstico de calibração, instalação e operação.**

**Dissertação de Mestrado**

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

Professor Orientador:

Alcir de Faro Orlando, Ph.D.  
Departamento da Engenharia Mecânica e  
Programa de Pós-Graduação em Metrologia/PUC-Rio

Rio de Janeiro

Abril de 2008



**Helmitom Aparecido da Silva**

**Análise metrológica do desempenho de medidores ultra-sônicos de vazão de líquidos como diagnóstico de calibração, instalação e operação.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação (PósMQI) do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Dr. Alcir de Faro Orlando**

Orientador

Departamento da Engenharia Mecânica e  
Programa de Pós-Graduação em Metrologia  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/PUC-Rio

**Prof. Dr. Mauro Speranza Neto**

Departamento da Engenharia Mecânica  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/PUC-Rio

**Prof. Dr. Eloi Fernandez Y Fernandez**

Departamento da Engenharia Mecânica  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico- PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de Abril de 2008

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

### **Helmitom Aparecido da Silva**

Graduado em Engenharia Mecânica pela EFEI –Escola Federal de Engenharia de Itajubá – hoje UNIFEI – Universidade Federal de Engenharia de Itajubá MG, em 1999. Monitor de Química Tecnológica na UNIFEI de 1997 a 1999. Engenheiro da Qualidade da Mangels Indústria e Comércio Ltda de 1999 a 2001. Especialização em Engenharia de Equipamentos, Terminais e Dutos pela Universidade Petrobras do Rio de Janeiro em 2001. Engenheiro de Medição de Petróleo e Gás Natural do Ativo Sul da Unidade de Negócios da Bacia de Campos da Petrobras de 2002 até os dias atuais.

#### Ficha Catalográfica

Silva, Helmitom Aparecido da Silva

Análise metrológica do desempenho de medidores ultra-sônicos de vazão de líquidos como diagnóstico de calibração, instalação e operação / Helmitom Aparecido da Silva ; orientador: Alcir de Faro Orlando. – 2008.

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

Dissertação (Mestrado em Metrologia)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Medição de vazão de petróleo. 3. Medição ultrasônica. 4. Calibração e diagnóstico de medidor. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD:389.1

Dedico este trabalho, com muito amor, à minha mãe Maria Helena pelo constante apoio na trilha do estudo, à minha esposa Ana Paula e ao meu filho João Davi, fontes de inspiração na minha perseverança em alcançar meus objetivos.

## Agradecimentos

Á Deus que sempre está comigo levantando-me nos momentos em que o fardo parece maior que as forças.

Ao Professor Alcir Faro pela orientação e dedicação que contribuíram não só para o desenvolvimento deste trabalho, como também para meu aperfeiçoamento profissional.

Aos laboratórios envolvidos nesse estudo pelo apoio em viabilizar a realização deste trabalho cedendo as facilidades das suas instalações para calibração do medidor em estudo.

À unidade de exploração da produção, plataforma de Enchova (PCE-1), que disponibilizou o medidor para realização dos estudos.

Aos colegas de profissão Ricardo Pessanha e Wallace Arantes, ambos da Petrobras, que foram valorosos na troca de experiência e discussões técnicas. Ao colega de automação Miguel Ulbrich Filho, que foi parte essencial para coleta dos dados através dos softwares de automação.

À Petrobras, principalmente o Ativo Sul da Bacia de Campos, por financiar e colaborar para o desenvolvimento desta pesquisa de mestrado, que contribuiu para aprimoramento do Sistema de Medição de Vazão de Óleo, liberando-me em regime de tempo parcial.

Á minha família por todo incentivo e apoio para a realização do Mestrado no Pós-MQI.

Aos amigos e professores e coordenação do Pós-MQI pela amizade e parceria durante o curso.

## Resumo

Silva, Helmitom Aparecido; Orlando, Alcir de Faro. **Análise metrológica do desempenho de medidores ultra-sônicos de vazão de líquidos como diagnóstico de calibração, instalação e operação.** Rio de Janeiro, 2008. 100 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação (PósMQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Medidores ultra-sônicos de vazão de líquidos têm sido utilizados cada vez mais em medições fiscais devido à sua baixa incerteza de medição. Esse medidor utiliza a metodologia do tempo de trânsito, o relacionamento entre a velocidade medida e a vazão do escoamento se dá através da garantia de um perfil conhecido de escoamento, normalmente o perfil denominado de completamente desenvolvido. Como na prática existem distorções deste perfil, o uso de vários feixes acústicos pode compensar as discrepâncias, fazendo com que a medição de vazão tenha uma incerteza mais baixa. O Regulamento Nacional, apresentado pela ANP junto com o INMETRO, estipula que os medidores fiscais de vazão de líquidos devem ser calibrados pelo menos a cada 60 dias, a menos que o histórico de medição com os mesmos demonstre que outro intervalo entre calibrações é factível. Recentemente, foi proposto para o medidor ultra-sônico de 5 canais, um intervalo maior (4 anos), associado à garantia de desempenho do medidor e da manutenção do perfil do escoamento entre calibrações. Desse modo, o objetivo desse trabalho é a comprovação experimental de que o diagnóstico de medição e de manutenção do perfil de escoamento é uma ferramenta importante para a garantia de que a vazão de líquido está sendo medida corretamente e dentro dos critérios de medição fiscal estipulados pela legislação em vigor. Para tal, um sistema de aquisição de dados foi acoplado ao medidor ultrasônico de 05 canais, sendo então o medidor calibrado em dois laboratórios acreditados pelo INMETRO e pertencentes à Rede Brasileira de Calibração, respectivamente com água e óleo mineral registrando estes valores de referência, utilizados também para uma comparação entre as características metrológicas dos dois laboratórios. A seguir, o medidor foi instalado numa plataforma, demonstrando que as características metrológicas eram preservadas após sua instalação. Finalmente, um dia de

produção da plataforma de origem do medidor foi monitorado, obtendo-se informações sobre a confiabilidade das medições e de sua incerteza.

## **Palavras-chave**

Metrologia; medição de vazão de petróleo; medição ultrasônica; calibração e diagnóstico de medidor.

## Abstract

Silva, Helmitom Aparecido; Orlando, Alcir de Faro. **Metrological analysis of the performance of liquid flowrate ultra-sonic meters as a diagnostic for calibration, installation and operation.** Rio de Janeiro, 2008. 100p. MSc. Dissertation - Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Concentration area: Metrology for quality and innovation (PósMQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ultrasonic flowmeters of liquids have been used each more time in fiscal measurements due to its low uncertainty of measure. That meter uses the methodology of transit time, the relationship between the measured speed and the flow was made through the warranty of flow profile, usually denominated profile of completely developed. As in practice distortions of this profile exist, the use of several acoustic bunches can compensate the discrepancies, doing with that the flow measurement has a lower uncertainty. The Official Document of ANP/INMETRO determined that the fiscal flowmeters of liquids should be calibrated at least every 60 days, unless the measurement report demonstrate that other interval among calibrations is feasible. Recently, a larger interval was proposed for the ultrasonic flowmeter of 5 channels (4 years), associate to the warranty of acting of the meter and of the maintenance of the flow profile among calibrations. The aim of this work is the proof experimental that the measurement diagnosis and maintenance of flow profile is an important tool for the warranty that the liquid flow is being measured correctly and inside of the requirements of fiscal measurement determined by the actual legislation. This way, a system of acquisition of data was coupled to the ultrasonic flowmeter of 5 channels, then the meter calibrated in two laboratories certified by INMETRO and belong Brazilian Calibration Network, respectively with water and mineral oil registering these reference values, also used for a comparison among the metrological characteristics of the two laboratories. After, the meter was install in a platform, demonstrating that the metrological characteristics was maintains after its installation.



Finally, a day of production of the platform was monitored, being obtained information about the reliability of the measurements and of its uncertainty.

## **Keywords**

Metrology; measurement petroleum flowrate; ultrasonic flowmeters; meter calibration and diagnostics.

## Sumário

Capítulo 1 Introdução	16
Capítulo 2 Fundamentação Teórica	18
2.1 Leis Empregadas na Medição de Petróleo: Um novo cenário	18
2.2 A Ciência de Escoamento de Fluidos: tópicos	21
2.3 Regime de Escoamento: Número de Reynolds	23
2.4 O Estado da Arte da Medição de Vazão de Fluidos	27
2.5 Medição de Petróleo Usando Ultra-Som	30
2.6 Diagnóstico do Medidor Ultra-Som	31
Capítulo 3 Conhecendo o Medidor Ultra-Sônico 05 Canais para medição de Petróleo	36
3.1 Sobre o Medidor	36
3.2 Aplicação do Medidor	38
3.3 Manutenção do Medidor	39
Capítulo 4 Calibração Onshore do Medidor Ultra-Sônico em Laboratório	40
4.1 Parâmetros Coletados - Método de Aquisição de Dados	40
4.2 Teste em Loop usando Fluido Água: metodologia	42
4.3 Resultados da Calibração usando Circuito Água	44
4.4 Diagnóstico do Medidor para o Circuito Água	45
4.5 Teste em Loop usando Fluido Óleo Mineral: metodologia	50
4.6 Resultados da Calibração usando Circuito Óleo Mineral	52
4.7 Diagnóstico do Medidor para o Circuito Óleo	54
Capítulo 5 Diagnóstico de Campo do Medidor Ultra-Sônico	59
5.1 Descrição do Sistema da Instalação	59
5.2 Diagnóstico do Medidor para as Condições Reais de Processo	61
Capítulo 6 Resultados Encontrados	65
6.1 Comportamento da Vazão e Perfil de Velocidades	65
6.2 Desvios e Repetitividade durante as Calibrações	68
6.3 Comparação dos Parâmetros de Diagnóstico: Simetria, Escoamento Cruzado e Turbilhonamento	69
6.4 Comparação dos Parâmetros de Diagnóstico: Swirl	72
6.5 Comparação dos Parâmetros de Diagnóstico: Diferença $V_{som}$	73
6.6 Confiabilidade Metrológica das Medições e Incerteza Calculada	75
Capítulo 7 Conclusões	78
Referências Bibliográficas	80

APÊNDICE 82

APÊNDICE A - Estrutura Típica de um Sistema de Medição de Petróleo

APÊNDICE B - Definição dos Termos Fundamentais de Metrologia

APÊNDICE C - Arquitetura dos Parâmetros Coletados e Glossário Técnico de Automação

ANEXOS 88

ANEXO A - Dados Coletados - Circuito Água

ANEXO B - Gráficos Diagnósticos - Circuito Água

ANEXO C - Dados Coletados - Circuito Óleo

ANEXO D - Gráficos Diagnósticos - Circuito Óleo

ANEXO E - Dados Coletados - Plataforma

ANEXO F - Gráficos Diagnósticos - Plataforma

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> - Custo anual de Calibrações em Medidor US na Bacia de Campos	20
<b>Figura 2</b> – Deslocamento de uma placa sobre um fluido	22
<b>Figura 3</b> – Exemplo de Perfil de Velocidade	24
<b>Figura 4</b> – Exemplos de Perfis de Velocidade: (A) Laminar; (B) Turbulento	25
<b>Figura 5</b> – Exemplos de Perfis de Velocidade Assimétricos a 5 D e a 20 D à jusante de uma mesma curva em tubo de 3”	25
<b>Figura 6</b> – Movimentos de rotação criados após curvas de tubulação (Swirl)	26
<b>Figura 7</b> – Medidor de Engrenagens Ovais	28
<b>Figura 8</b> – Exemplo de Medidor Turbina	29
<b>Figura 9</b> - Exemplo de Medidor Mássico	29
<b>Figura 10</b> - Configuração básica do Medidor US de Tempo de Trânsito	30
<b>Figura 11</b> – Posição dos Feixes Acústicos	32
<b>Figura 12a</b> – Medidor Ultrasônico Altosonic V UFS 500	36
<b>Figura 12b</b> – Unidade Conversora e de Processamento do medidor ASV	37
<b>Figura 13</b> – Sistema de Escoamento - Instalação do Medidor	38
<b>Figura 14</b> – Danos nos conectores e sensores no medidor	39
<b>Figura 15</b> – Esquemático da Ligação de Automação para aquisição dados	41
<b>Figura 16</b> – Medidor ASV inserido no circuito de calibração água	42
<b>Figura 17</b> – Arranjo de automação para aquisição de dados	42
<b>Figura 18</b> – Esquemático do sistema de calibração – laboratório fluido água	43
<b>Figura 19</b> – Desvios encontrados na calibração do ASV – lab. fluido água	45
<b>Figura 20</b> – Repetitividade encontrada calibração do ASV – lab. fluido água	45
<b>Figura 21</b> – Diagnóstico ASV – 550 m <sup>3</sup> /h - fluido água	47
<b>Figura 22</b> – Diagnóstico ASV – 150 m <sup>3</sup> /h - fluido água	48
<b>Figura 23</b> – Diagnóstico Efeito Swirl - fluido água	49
<b>Figura 24</b> – Diagnóstico Velocidade do Som- fluido água	49
<b>Figura 25</b> – Esquemático do sistema de calibração - lab. fluido óleo mineral	50
<b>Figura 26</b> – a) Medidor ASV inserido no circuito de calibração óleo mineral	51
<b>Figura 26</b> – b) Esquemático de automação para aquisição de dados	51
<b>Figura 26</b> - c) Medidor ASV, deslocamento positivo e tanque provador	51
<b>Figura 27</b> – Desvios encontrados na calibração do ASV - lab. fluido óleo	53
<b>Figura 28</b> – Repetitividade encontrada calibração do ASV - lab. fluido óleo	53
<b>Figura 29</b> – Diagnóstico ASV 550 m <sup>3</sup> /h - fluido óleo mineral	55
<b>Figura 30</b> – Diagnóstico ASV 150 m <sup>3</sup> /d - fluido óleo mineral	56

<b>Figura 31</b> – Diagnóstico Efeito Swirl - fluido óleo	57
<b>Figura 32</b> – Diagnóstico V <sub>som</sub> - fluido óleo	57
<b>Figura 33</b> – Sistema fiscal de óleo da Plataforma Central de Enchova	60
<b>Figura 34</b> – Instalação do ASV na Plataforma de PCE-1	60
<b>Figura 35</b> – Diagnóstico ASV (450-550) m <sup>3</sup> /h - fluido óleo real	62
<b>Figura 36</b> – Diagnóstico ASV (100-300) m <sup>3</sup> /h - fluido óleo real	63
<b>Figura 37</b> – Diagnóstico Efeito Swirl - fluido óleo rea	64
<b>Figura 38</b> – Diagnóstico Velocidade do Som- fluido óleo rea	64
<b>Figura 39</b> – Comportamento das Vazões para Água, Óleo Mineral e Campo	66
<b>Figura 40</b> – Traçado na UFP do Perfil de Velocidades: Água e Campo	67
<b>Figura 41</b> – Comparação nos desvios e repetitividade encontrado durante Calibração	68
<b>Figura 42</b> – Comparação dos Parâmetros do Diagnóstico: Simetria, Escoamento Cruzado e Turbilhonamento	70
<b>Figura 43</b> – Comparação do Parâmetro do Diagnóstico: Efeito Swirl	72
<b>Figura 44</b> – Comparação do Parâmetro do Diagnóstico: V <sub>Som</sub>	73
<b>Figura 45</b> – Sistema de Medição de Óleo	83
<b>Figura 46</b> – Tela de Configuração dos Parâmetros da Gateway	87

## **Lista de tabelas**

<b>Tabela 1:</b> Redução de custos devido a melhoria da medição	20
<b>Tabela 2:</b> Critérios de Classe de Exatidão da OIML R117	27
<b>Tabela 3:</b> Resultados da Calibração do Medidor Altosonic V – Circuito Água	43
<b>Tabela 4:</b> Resultados do Diagnóstico ASV - Circuito Água	47
<b>Tabela 5:</b> Resultados da Calibração do Medidor Altosonic V – Circuito Óleo	51
<b>Tabela 6:</b> Resultados do Diagnóstico ASV - Circuito Óleo Mineral	57
<b>Tabela 7:</b> Resultados do Diagnóstico ASV - Campo	63
<b>Tabela 8:</b> Resumo dos Parâmetros de Diagnóstico do ASV	74
<b>Tabela 9</b> – Apresentação da Incerteza Processo Água	77
<b>Tabela 10</b> – Apresentação da Incerteza Processo Óleo Mineral	77
<b>Tabela 11</b> – Apresentação da Incerteza Processo Campo	77

## **Lista de Quadros**

Quadro 1: Características metrológicas de medidores multifeixes	36
Quadro 2: Variáveis coletadas do Medidor Altosonic V	38

## **Lista de Abreviaturas**

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

ASV – Medidor Ultra-Sônico Altosonic V (05 canais).

BSW – Base Sediments and Water.

E.M.A – Erro Máximo Admissível.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.

NEL – National Engineering Laboratory.

NMI – Netherland Measurement Institute.

NRe – Número de Reynolds.

OIML – Organização Internacional de Metrologia Legal.

PCE-1 – Plataforma Central de Enchova.

PósMQI – Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação.

PTB - Petrobras- Petróleo Brasileiro S.A.

PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

RBC – Rede Brasileira de Calibração.

RTM– Regulamento Técnico de Medição.

SI – Sistema Internacional de Unidades.

TRAPIL – Transporting Pipelines Company (França).

UN-BC – Unidade de Negócios da Bacia de Campos.

UFC – Unidade Conversora de fluxo do medidor ultra-sônico.

UFP- Unidade Processadora de fluxo do medidor ultra-sônico.

UFS – Unidade Sensora de fluxo do medidor ultra-sônico.

US – Medidores Ultra-sônicos.

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia.

## Lista de Símbolos

$\rho$  - massa específica.

$\mu$  - viscosidade.

$R_E$  - Número de Reynolds.

$\bar{v}$ ,  $v_m$  - Velocidade média.

$Q_V$  - Vazão Volumétrica     $Q_i$  – Vazão instantânea

$\sigma$ ,  $s$  - desvio padrão.

$\bar{u}$  - Velocidade média em cada canal.

$\bar{u}_m$  - Velocidade média indicada pelo medidor.

X1 – Simetria.

X2 – Escoamento Cruzado.

X3 – Turbilhonamento.

$U$  – Incerteza Expandida     $u$  – Incerteza padrão.

$n$  – n-ésimo termo da amostra.

$k$  – fator de abrangência.

$V_{eff}$  – graus de liberdade.

## Lista de fórmulas

- (1) Densidade, massa específica
- (2) Viscosidade
- (3) Número de Reynolds
- (4) Número de Reynolds em função da Vazão e diâmetro
- (5) Velocidade média em função da área da secção
- (6) Tempo de trânsito a favor do fluxo
- (7) Tempo de trânsito contrário ao fluxo
- (8) Velocidade média em função dos tempos de trânsito
- (9) Diagnóstico parâmetro Simetria
- (10) Diagnóstico parâmetro Escoamento Cruzado
- (11) Diagnóstico parâmetro Turbilhonamento
- (12) Velocidade média em função das velocidades axiais dos canais do ASV.
- (13) Cálculo do Volume em função do volume e tempo.
- (14) Cálculo da Incerteza do Volume em função das incert. de processo e tempo.
- (15) Equação do Cálculo da Incerteza do Volume adaptável para o estudo de caso.