



Thiago Barra Vidal de Oliveira

**Avaliação metrológica do desempenho do medidor tipo
v-cone para medição de vazão de gás úmido**

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.

Orientador: Prof. Alcir de Faro Orlando

Rio de Janeiro
Setembro de 2010



Thiago Barra Vidal de Oliveira

**Avaliação metrológica do desempenho do medidor tipo
v-cone para medição de vazão de gás úmido**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora e homologada pela Coordenação Setorial de Pós-Graduação, formalizado pelas respectivas assinaturas.

Prof. Dr. Alcir de Faro Orlando

Orientador
Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)
Departamento de Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Prof. Dr. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Prof. Dr. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Dra. Maria Helena Farias

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial -
INMETRO

Prof. José Eugênio Leal

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

Rio de Janeiro, 17 de setembro de 2010

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

Thiago Barra Vidal de Oliveira

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG - em 2003. cursou Especialização em Engenharia de Petróleo pela Universidade Petrobras, com conclusão em 2005. Engenheiro de Automação da empresa ATAN Sistemas de Automação e Otimização de 2003 a 2004. Engenheiro de Petróleo da Petrobras desde 2004, atuando no segmento de medição de vazão de petróleo e gás natural nas Unidades de Exploração e Produção (E&P).

Ficha Catalográfica

Oliveira, Thiago Barra Vidal de

Avaliação metrológica do desempenho do medidor tipo v-cone para medição de vazão de gás úmido / Thiago Barra Vidal de Oliveira ; orientador: Prof. Dr. Alcir de Faro Orlando – 2010.

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

Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia.

1. Metrologia – Teses. 2. Medição de vazão. 3. Gás úmido. 4. Medidor tipo v-cone. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD: 389.1

Agradecimentos

A Deus, pela realização deste projeto.

Ao Professor Alcir, pela orientação prestada em cada etapa do trabalho.

À Petrobras, pelo incentivo ao desenvolvimento profissional.

Ao Grupo de Medição do E&P-ENGP e demais colegas da Petrobras, pelas contribuições realizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, pelo esforço dedicado para me proporcionar uma educação de qualidade.

À minha namorada, pela paciência e companheirismo.

Aos meus amigos e demais familiares, pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Aos professores, funcionários e colegas da PUC-Rio, que estiveram presentes ao longo desta caminhada.

Aos professores da banca examinadora, por dedicarem seu tempo à avaliação do trabalho, contribuindo para a sua melhoria.

Resumo

Barra Vidal de Oliveira, Thiago; Orlando, Alcir de Faro. **Avaliação metrológica do desempenho do medidor tipo v-cone para medição de vazão de gás úmido**. Rio de Janeiro, 2010. 166p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Departamento de Metrologia para Qualidade Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho metrológico e o potencial de aplicação do medidor tipo v-cone para medição de vazão de gás natural em condições de gás úmido. Observa-se que os medidores do tipo placa de orifício, geralmente utilizados na medição de vazão de gás no segmento de Exploração e Produção (E&P), podem não representar a tecnologia mais adequada. O medidor v-cone representa uma tecnologia relativamente recente, que vem demonstrando bom desempenho para a medição de vazão e vem ganhando aceitação de órgãos reguladores. O interesse e a motivação do pesquisador residem na busca de maior exatidão na medição de vazão em condições operacionais adversas (gás úmido não especificado), sem impacto significativo sobre o custo do sistema. O presente trabalho, por meio de uma pesquisa bibliográfica e documental, apresenta o estágio atual de desenvolvimento da tecnologia de medição por v-cone e detalha as características dos sistemas de medição de vazão de gás natural, além de abordar as normas e regulamentos relacionados ao tema em questão. A fase experimental busca avaliar o desempenho do medidor por meio de uma investigação empírica realizada em laboratório, simulando condições de gás úmido encontradas em campo. Essa análise envolve também a determinação de erros e incertezas de medição. A pesquisa realizada, em conjunto com a avaliação dos resultados dos testes e das correlações utilizadas, demonstra que o medidor v-cone apresenta boa confiabilidade na medição de vazão de gás natural em escoamento de gás úmido, podendo ser utilizado em aplicações encontradas no segmento de E&P.

Palavras-chave

Metrologia; medição de vazão; gás úmido; medidor tipo v-cone.

Abstract

Barra Vidal de Oliveira, Thiago; Orlando, Alcir de Faro. **Metrological evaluation of the v-cone type meter performance for wet gas flow rate measurement.** Rio de Janeiro, 2010. 166p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Departamento de Metrologia para Qualidade Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this study is to evaluate the metrological performance and potential of use of the v-cone type meter for measuring the natural gas flow rate under wet gas conditions. The orifice plate type meters, that are usually used to measure the gas flow rate in the Exploration and Production segment (E&P), may not represent the most appropriate technology. The v-cone meter represents a relatively recent technology, which has shown good performance for the flow rate measurement and is gaining acceptance from the regulators. The interest and motivation of the researcher are related to the quest for greater flow rate measurement accuracy in adverse operating conditions (unspecified wet gas), with no significant impact on the cost of the system. This work, through a literature and documentary search, presents the current stage of development of the v-cone flow rate measurement technology and details the characteristics of natural gas flow rate measurement systems, in addition to addressing the standards and regulations relating to the subject. The experimental phase aims to evaluate the meter performance through an empirical research conducted in laboratory, by simulating wet gas conditions found in the field. This analysis also involves the determination of measurement errors and uncertainties. The research and the evaluation of test results and correlations show that the v-cone meter has good reliability in natural gas flow rate measurement under wet gas conditions, allowing it to be used in applications found in E&P.

Keywords

Metrology; flow rate measurement; wet gas; v-cone type meter.

Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Definição do problema de pesquisa	19
1.2.	Objetivos geral e específicos	21
1.3.	Metodologia	22
1.4.	Motivação	23
1.5.	Estrutura da dissertação	23
2	Fundamentação teórica	25
2.1.	Descrição geral do processamento primário de gás natural	25
2.2.	Aproveitamento do gás natural	27
2.3.	Conceitos	28
2.3.1.	Número de Reynolds	29
2.3.2.	Calor específico	29
2.3.3.	Coeficiente isentrópico ou coeficiente adiabático	29
2.3.4.	Fator de compressibilidade	30
2.3.5.	Lei da Continuidade ou Lei da Conservação da Massa	31
2.3.6.	Lei da Conservação de Energia	31
2.3.7.	Condensado de gás natural	32
2.3.8.	Velocidade superficial	32
2.3.9.	Parâmetro de Lockhart-Martinelli	33
2.3.10.	Número de Froude	34
2.3.11.	Padrões de fluxo ou padrões de escoamento	34
2.4.	Medição convencional de vazão de gás natural	37
2.5.	Medição de vazão de gás natural em escoamento com presença de líquido	39
2.5.1.	Definição de gás úmido	40
2.6.	Medidor do tipo v-cone ou cone invertido	41
2.6.1.	Cálculo da vazão volumétrica de gás no medidor v-cone	48
2.6.1.1.	Cálculo da vazão volumétrica em condições de referência	51
3	Metodologia para medição de vazão de gás em escoamento de gás úmido	52

3.1. Correlações para correção da vazão de gás natural	54
3.1.1. Correlações desenvolvidas para placa de orifício	56
3.1.1.1. Correlação de Murdock	57
3.1.1.2. Correlação de Chisholm	58
3.1.2. Correlações desenvolvidas para medidor venturi	59
3.1.2.1. Correlação de Leeuw	60
3.1.2.2. Correlação de Steven	61
3.1.3. Correlação desenvolvida para v-cone	63
3.1.3.1. Nova correlação de Steven	63
3.2. Circuito de testes para avaliação do v-cone	65
3.3. Apresentação dos resultados dos testes	67
4 Resultados Experimentais	71
4.1. Resultados da medição de vazão de gás do v-cone	72
4.1.1. Correção da medição de vazão de gás	78
4.1.1.1. Aplicação das correlações de Murdock e Chisholm	78
4.1.1.2. Aplicação das correlações de Leeuw e Steven	82
4.1.1.3. Aplicação da nova correlação de Steven	85
4.1.1.4. Correlação para v-cone com beta igual a 0,6	88
4.2. Avaliação do desempenho do medidor v-cone	91
4.2.1. Avaliação das incertezas de medição (metodologia 1)	91
4.2.2. Avaliação das incertezas de medição (metodologia 2)	99
4.3. Avaliação do desempenho do medidor v-cone considerando altas frações de líquido	101
4.3.1. Avaliação das incertezas de medição considerando altas frações de líquido	104
4.4. Determinação da vazão de líquido em um escoamento de gás úmido	111
4.4.1. Vazões de gás e líquido em um medidor v-cone	112
5 Conclusões e Recomendações	115
5.1. Conclusões	115
5.2. Recomendações	118
6 Referências bibliográficas	120

ANEXO A – Portaria INMETRO/DIMEL nº 166: Aprovação de modelo do medidor de vazão do tipo v-cone

ANEXO B – Dados obtidos nos testes realizados no laboratório NEL

Lista de figuras

Figura 1 - Exemplos de pontos de medição fiscal compartilhada e medição de apropriação aplicados a três campos de produção	18
Figura 2 - Medidor de vazão de gás úmido (multifásico)	20
Figura 3 – Sistema típico de condicionamento de gás natural em uma Unidade de Produção	27
Figura 4 - Cadeia de movimentação do gás natural	28
Figura 5 - Exemplo de mapa de padrões de escoamento	36
Figura 6 – Medidor tipo v-cone	42
Figura 7 - Sistema de medição típico com medidor v-cone	44
Figura 8 - Sistema de medição de vazão por placa de orifício	56
Figura 9 – Medidor venturi	59
Figura 10 - Representação esquemática do circuito de testes do laboratório NEL	67
Figura 11 – Exemplo de gráfico apresentando os erros na medição de vazão de gás do v-cone	69
Figura 12 – Exemplo de gráfico apresentando o erro residual percentual na medição de vazão de gás do v-cone, após aplicação de determinada correlação	70
Figura 13 – Circuito de testes do laboratório NEL	72
Figura 14 – Dados obtidos de sobrestimação na medição de vazão de gás do v-cone	75
Figura 15 – Influência da pressão de operação na superestimação de vazão de gás	76
Figura 16 - Influência da velocidade do gás na sobrestimação da vazão obtida pelo v-cone	76
Figura 17 – Influência do número de Froude na medição de vazão de gás (P = 15 bar)	77
Figura 18 – Influência do número de Froude na medição de vazão de gás (P = 40 bar)	78
Figura 19 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Murdock	79
Figura 20 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da	

correlação de Murdock	80
Figura 21 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Chisholm	80
Figura 22 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da correlação de Chisholm	81
Figura 23 - Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Leeuw	82
Figura 24 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da correlação de Leeuw	83
Figura 25 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Steven desenvolvida para o venturi	83
Figura 26 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da correlação de Steven desenvolvida para o venturi	84
Figura 27 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Steven desenvolvida com v-cone de beta igual a 0,55	85
Figura 28 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da correlação de Steven desenvolvida com v-cone de beta igual a 0,55	86
Figura 29 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da correlação de Steven desenvolvida com v-cone de beta igual a 0,75	87
Figura 30 – Erro residual da vazão de gás após a aplicação da correlação de Steven desenvolvida com v-cone de beta igual a 0,75	87
Figura 31 – Sobrestimação da vazão de gás e aplicação do novo fator de correção (Eq. (50)) específico para v-cone de beta igual a 0,6	89
Figura 32 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação do novo fator de correção (Eq. (50)) específico para v-cone de beta igual a 0,6	90
Figura 33 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação da nova correlação x Vazão de gás de referência	92
Figura 34 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação da nova correlação x Parâmetro de Lockhart-Martinelli	95
Figura 35 - Vazão volumétrica de gás de referência x Vazão volumétrica de gás corrigida	99
Figura 36 - Sobrestimação da vazão de gás e aplicação da nova correlação específica para v-cone de beta igual a 0,6, com X variando entre 0 e 0,4	102
Figura 37 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação da nova correlação específica para v-cone de beta igual a 0,6,	

com X variando entre 0 e 0,4	103
Figura 38 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação da nova correlação x Vazão de gás de referência, considerando X até 0,4	105
Figura 39 - Erro residual da vazão de gás após a aplicação da nova correlação x Parâmetro de Lockhart-Martinelli (X), com X variando entre 0 e 0,4	108
Figura 40 – Flutuação de pressão no v-cone	113

Lista de tabelas

Tabela 1 - Laboratórios acreditados pela RBC para calibração volumétrica de medidores de vazão de gás natural	38
Tabela 2 - Análise comparativa das tecnologias de medição de vazão de gás natural	45
Tabela 3 – Coeficiente de Descarga (C_d) obtido em cada condição operacional nos testes com gás seco	74
Tabela 4 – Erro máximo encontrado na vazão de gás natural	91
Tabela 5 – Erros médios e incertezas associadas a cada valor de erro	92
Tabela 6 – Incerteza associada a cada valor de vazão de gás	94
Tabela 7 – Erros médios e incertezas associadas a cada valor de erro	95
Tabela 8 – Incerteza associada a cada valor de parâmetro de Lockhart-Martinelli	97
Tabela 9 – Incerteza associada a cada valor de vazão de gás obtida pela metodologia 2	101
Tabela 10 – Comparação das incertezas de medição obtidas pelas metodologias 1 e 2	101
Tabela 11 – Erro máximo encontrado na vazão de gás natural, com X variando entre 0 e 0,4	104
Tabela 12 – Erros médios e incertezas associadas a cada valor de erro	105
Tabela 13 – Incerteza associada a cada valor de vazão de gás	107
Tabela 14 – Erros médios e incertezas associadas a cada valor de erro	109
Tabela 15 – Incerteza associada a cada valor do parâmetro de Lockhart-Martinelli	111
Tabela 16 – Dados do sistema de medição de vazão de gás de referência – 15 bar	131
Tabela 17 – Dados do sistema de medição de vazão de líquido de referência – 15 bar	134
Tabela 18 – Dados do sistema de medição de vazão com medidor v-cone – 15 bar	137
Tabela 19 – Dados do sistema de medição de vazão de gás de referência – 20 bar	140
Tabela 20 – Dados do sistema de medição de vazão de líquido de	

referência – 20 bar	143
Tabela 21 – Dados do sistema de medição de vazão com medidor v-cone – 20 bar	146
Tabela 22 – Dados do sistema de medição de vazão de gás de referência – 30 bar	149
Tabela 23 – Dados do sistema de medição de vazão de líquido de referência – 30 bar	152
Tabela 24 – Dados do sistema de medição de vazão com medidor v-cone – 30 bar	155
Tabela 25 – Dados do sistema de medição de vazão de gás de referência – 40 bar	158
Tabela 26 – Dados do sistema de medição de vazão de líquido de referência – 40 bar	161
Tabela 27 – Dados do sistema de medição de vazão com medidor v-cone – 40 bar	164