



Carlos Augusto Santos Anjos

**Avaliação da incerteza de medição do
volume de queima de gás natural**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa
Co-orientador: Prof. Alcir de Faro Orlando

Rio de Janeiro
Abril de 2014



Carlos Augusto Santos Anjos

**Avaliação da incerteza de medição do
volume de queima de gás natural**

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

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Orientador/Presidente

Programa de Pós-Graduação em Metrologia - PUC-Rio

Prof. Alcir de Faro Orlando

Co-orientador

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO)
e Academia Nacional de Engenharia

Profa. Elisabeth Costa Monteiro

Programa de Pós-Graduação em Metrologia - PUC-Rio

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Jose Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de abril de 2014

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

Carlos Augusto Santos Anjos

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 2003. Concluiu a pós-graduação em Automação Industrial pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 2007. Engenheiro de Equipamentos voltado à Automação Industrial e Instrumentação da PETROBRAS desde 2006, atua na área de Medição de Fluidos da Unidade de Operações do Rio de Janeiro.

Ficha Catalográfica

Anjos, Carlos Augusto Santos

Avaliação da incerteza de medição do volume de queima de gás natural / Carlos Augusto Santos Anjos; orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa; co-orientador: Alcir de Faro Orlando. - 2014.

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

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2014.

Inclui bibliografia.

1. Metrologia – Teses. 2. Medição de vazão de gás de queima. 3. Medição de vazão de gás natural. 4. Volumes queimados de gás natural. 5. Incerteza de medição. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Orlando, Alcir de Faro. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD: 389.1

Dedico este trabalho aos meus filhos, Camilla e Bernardo. Que lhes sirva de
incentivo e inspiração.

Agradecimentos

À minha mulher, Patrícia, pelo incentivo, apoio, carinho, cuidado, paciência, dedicação e amor. Agradeço-a por não me deixar desistir antes de começar.

Aos orientadores. Prof. Hall por encampar o projeto, e Prof. Alcir pelo direcionamento e correções de rumo. Considero-me privilegiado por ter sido aluno de ambos.

Aos colegas Sergio Pires de Carvalho e José Alberto Pinheiro da Silva Filho, pela insistência na candidatura ao mestrado junto às instâncias decisórias da PETROBRAS.

Aos mestres Paulo Sergio Alonso, Jorge Luis Amaral e Franco Machado Amaral, meus professores na UERJ, que honraram-me com suas recomendações à PUC-Rio.

Ao Prof. Rogério Ramos (UFES) e ao Engenheiro Leonardo Bastos, pelo envio de informações técnicas de grande valia para a realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho, que me ajudaram por todos os meios que tinham ao alcance. Tenho uma dívida de gratidão com diversos deles. Não os nomeio por temer incorrer em injustiça ao deixar de citar nominalmente alguém.

A todos aqueles que, de um modo ou de outro, em algum momento, ajudaram-me com seu incentivo e apoio para a conclusão deste trabalho.

Resumo

Anjos, Carlos Augusto Santos; Barbosa, Carlos Roberto Hall; Orlando, Alcir de Faro. **Avaliação da Incerteza de Medição do Volume de Queima de Gás Natural**. Rio de Janeiro, 2014. 103p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A fim de garantir a segurança das instalações marítimas de produção de óleo e gás natural, parte do gás produzido é continuamente queimada, em função de condições específicas. Tais condições incluem paradas de emergência ou o alívio de inventário de gás devido a flutuações operacionais. A queima nestes ambientes acontece a uma grande faixa de vazões de gás, o que resulta em reduzido número de alternativas tecnológicas para sua medição. A medição de vazão a partir da tecnologia ultrasônica por tempo de trânsito vem sendo largamente utilizada, porém com incertezas relativamente elevadas, dadas as limitações da solução tecnológica. Devido a tais limitações, diversos órgãos reguladores da área de óleo e gás ao redor do mundo admitem diferentes percentuais para estimativa de incerteza da queima. No Brasil, a regulamentação estabelece um percentual máximo de 5% para a queima de gás, não sendo porém específica quanto a que grandeza refere-se (vazão volumétrica ou volume). Esta dissertação traz um estudo sobre a incerteza de volumes horários, diários e mensais de gás produzidos por uma unidade de produção marítima por dezesseis meses, avaliando o impacto da incerteza na medição de vazão de queima sobre a incerteza dos volumes apurados. Foi avaliado o impacto de aspectos da medição ultrasônica de vazão de gás e da computação de volumes de produção a partir desta nos volumes apurados. Conclui-se que a medição de vazão e sua respectiva incerteza afetam de modo pouco significativo a incerteza dos volumes computados de queima.

Palavras-chave

Metrologia; medição de vazão de gás de queima; medição de vazão de gás natural; volumes queimados de gás natural; incerteza de medição.

Abstract

Anjos, Carlos Augusto Santos; Barbosa, Carlos Roberto Hall (Advisor); Orlando, Alcir de Faro (Co-Advisor). **Uncertainty Evaluation On Flare Gas Volume Measurement**. Rio de Janeiro, 2014. 103p. MSc. Dissertation - Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In order to assure safety at maritime oil & gas production facilities, part of the produced gas is continually burned (flared), depending upon specific operating conditions. These conditions include emergency shutdown and gas inventory relief due to process fluctuations. In such environments, gas flaring occurs at very large flow rate range, reducing the number of available technological choices for flow rate measurement. Transit-time ultrasonic flow measurement has been commonly used for this task, although with relatively high uncertainties due to technology limitations. Because of that, various oil & gas regulator authorities around the world impose different rules for flare measurement uncertainty. In Brazil, the regulation establishes a maximum percentage of 5% for flare measurement uncertainty, but it is not specific about the target (flow rate or volume). This dissertation presents a study on the effects of flow rate uncertainty on hourly, daily and monthly produced volume uncertainty in the maritime environment for a 16-month period, evaluating the impact of flare flow rate measurement on volume uncertainty. Aspects of gas transit-time ultrasonic flow rate measurement and volume computation over resulting volumes are evaluated. The conclusion is that flow rate measurement and its associated uncertainty have little effect on computed volume uncertainties.

Keywords

Metrology; flare gas flow rate measurement; natural gas flow rate measurement; natural gas flared volumes; measurement uncertainty.

Sumário

1 Introdução	13
1.1 Produção Marítima de Óleo e Gás – Esquema Típico	14
1.2 Características da Queima de Gás Natural	16
1.3 Regulamentação Sobre Medição de Queima de Gás Natural	19
1.4 Objetivo e Organização	21
2 Medição de Vazão na Produção de Gás Natural	23
2.1 Tecnologias de Medição de Vazão Utilizadas Para Gás Natural	23
2.2 Medição de Vazão por Placa de Orifício	24
2.2.1 Normas Associadas à Medição de Vazão por Placa de Orifício	26
2.3 Medição de Vazão por Ultrassom por Tempo de Trânsito	27
2.3.1 Compensação pelo Fator k	31
2.3.2 Propagação do Pulso Ultrassônico e Interferências	36
2.3.3 Composição do Gás Natural e Influência de Fluxo Bifásico	38
2.3.4 Normas Associadas à Medição de Vazão por Tempo de Trânsito	40
3 Computação de Volumes de Gás Natural	41
3.1 Condições Para a Computação de Volumes de Gás Natural	41
3.1.1 Fator de Compressibilidade	41
3.2 Computação de Volume: Medição de Vazão por Pressão Diferencial	42
3.3 Computação de Volume: Medição de Vazão por Medição Linear	45
4 Incerteza Sobre Vazão e Volume	48
4.1 Incerteza de Medição	48
4.1.1 ISO-GUM e ISO-5168	49
4.2 Incerteza da Medição de Vazão de Gás por Placa de Orifício	52
4.3 Incerteza Sobre o Volume: Medição de Vazão por Placa de Orifício	53
4.4 Incerteza da Medição de Vazão de Gás por Tempo de Trânsito	55
4.4.1 Incerteza Sobre a Velocidade do Escoamento	56
4.4.2 Incerteza Sobre a Velocidade ao Longo do Caminho Acústico	56
4.4.3 Incerteza Sobre o Fator k	57

4.5 Incerteza Sobre o Volume: Medição de Vazão por Tempo de Trânsito	58
4.5.1 Incerteza Sobre o Volume Não-Corrigido	59
4.5.2 Incerteza Sobre o Fator de Compressibilidade	60
4.5.3 Incerteza Associada à Medição de Pressão	62
4.5.4 Incerteza Associada à Medição de Temperatura	62
5 Resultados	64
5.1 Cenário	64
5.2 Dados Obtidos da Plataforma “A”	66
5.3 Dados Obtidos de Outras Plataformas	69
5.4 Comportamento dos Medidores de Queima de Gás da Plataforma “A”	73
5.4.1 Inferência de Propriedades do Gás	73
5.4.1.1 Efeitos do Número de Reynolds	74
5.4.1.2 Inferência da Velocidade do Som	76
5.5 Incertezas dos Volumes de Queima de Gás a Partir das Inferências	76
5.6 Comparação de Resultados	80
5.7 Balanço de Massa	84
5.8 Volumes Produzidos, Consumidos e Queimados	88
6 Conclusão	90
Referências Bibliográficas	93
Apêndice A - Incertezas expandidas (I.C. $\approx 95\%$) para as vazões volumétricas corrigidas (base horária) e respectivos períodos de vigência	97
Apêndice B - Incertezas sobre os volumes mensais dos pontos de produção a partir das incertezas das respectivas vazões horárias corrigidas	98
Apêndice C - Extrato de <i>log</i> do medidor de queima de alta pressão de 24” da Plataforma “B”, incorporando variáveis inferidas	99
Apêndice D - Extrato de <i>log</i> do medidor de queima de baixa pressão de 12” da Plataforma “C”, incorporando variáveis inferidas	100
Apêndice E - Incertezas sobre os volumes mensais dos pontos de produção a partir de inferência do comportamento dos medidores de queima	101
Apêndice F - Dados do balanço de massa	102

Lista de figuras

Figura 1 - Produção mundial de gás natural, 1973-2011 (AIE, 2012)	13
Figura 2 - Produção nacional de gás natural, 2002-2011 (ANP, 2012)	14
Figura 3 - Esquema típico de produção marítima de óleo e gás (Pinheiro et al, 2010)	15
Figura 4 - Arranjo típico de medição de vazão por placa de orifício (Ribeiro, 2010)	25
Figura 5 - Vista em corte: trajetórias dos pulsos ultrasônicos (Orlando & Val, 2006)	28
Figura 6 - Medidor típico, transdutores em plano longitudinal diametral (NPP, 2007)	29
Figura 7 - Arranjo de medidor ultrasônico e computador de vazão	31
Figura 8 - Perfil de Hinze para diversos Re : 10^3 a 10^8 (Ramos et al, 2013)	33
Figura 9 - “Irradiação” de transdutor de medidor ultrasônico de vazão (Ramos et al, 2013)	36
Figura 10 - Vista em corte de transdutor piezoelétrico (Ferreira, 2010)	37
Figura 11 - Transdutores postos a ângulos diferentes de 45° (Mylvaganam, 1989)	38
Figura 12 - Exemplo de acúmulo de condensado na região inferior do medidor (FLUENTA, 2010)	39
Figura 13 - Envelope pressão-temperatura e faixas de incerteza de Z (AGA, 1992)	61
Figura 14 - Incerteza expandida da velocidade do escoamento para 5 s (I.C. $\approx 95\%$): medidores de 12” e 24”	72
Figura 15 - Incerteza da vazão volumétrica não-corrigida para 1 h - medidores de 12”, 18”, 24” e 30”	80

Figura 16 - Incerteza da velocidade do escoamento para 5 s, medidores de 12", 18", 24" e 30"	81
Figura 17 - Comparação entre as incertezas dos volumes queimados de alta pressão	83
Figura 18 - Comparação entre as incertezas dos volumes queimados de baixa pressão	84
Figura 19 - Comparação entre volumes queimados e consumidos em 16 meses – Plataforma "A"	88
Figura 20 - Contribuição diária das correntes de produção em 16 meses – Plataforma "A"	89

Lista de tabelas

Tabela 1 - Exemplo de composição de gases utilizada pela norma AGA8	42
Tabela 2 - Distribuição t de Student	51
Tabela 3 - Extrato de dados de produção horária: queima de alta pressão, Plataforma “A”	66
Tabela 4 - Incertezas dos volumes produzidos de set/2012 a dez/2013, Plataforma “A”	68
Tabela 5 - Extrato de arquivo de <i>log</i> de equipamento da Plataforma “B”	69
Tabela 6 - Propriedades obtidas a partir de análises laboratoriais de amostras de gás	73
Tabela 7 - Variáveis inferidas a partir de dados de relatórios e de propriedades do gás	74
Tabela 8 - Regimes de escoamento e volumes apurados	74
Tabela 9 - Velocidade do som e outras variáveis inferidas	76
Tabela 10 - Incertezas para a produção mensal de set/2012 a dez/2013, Plataforma “A”	79
Tabela 11 - Incertezas sobre volumes produzidos: diferentes tratamentos para a queima	81
Tabela 12 - Diferentes tratamentos para a incerteza: volumes queimados, alta pressão	82
Tabela 13 - Diferentes tratamentos para a incerteza: volumes queimados, baixa pressão	83
Tabela 14 - Diferentes composições dos gases de alguns poços (% de fração em mol)	86
Tabela 15 - Resultado do balanço de massa para a Plataforma “A” (dez/2013)	87