

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Tabita Yaling Cheng Loureiro

Medição de Vazão de Gás em Sistemas de *Flare* (Tocha)

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Alcir de Faro Orlando

Rio de Janeiro
Abril de 2013



Tabita Yaling Cheng Loureiro

Medição de Vazão de Gás em Sistemas de *Flare* (Tocha)

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

Alcir de Faro Orlando

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Sidney Stuckenbruck

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Geraldo Afonso Spinelli Martins Ribeiro

Petrobras

Paulo Alexandre Souza da Silva

ANP

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico e Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de abril de 2013

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

Tabita Yaling Cheng Loureiro

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em 2007. Concluiu a pós-graduação em Engenharia de Petróleo pela Pontifícia Universidade Católica em 2009. Trabalha na Superintendência de Desenvolvimento e Produção da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Ficha Catalográfica

Loureiro, Tabita Yaling Cheng

Medição de vazão de gás em sistemas de flare (tocha) / Tabita Yaling Cheng Loureiro; orientador: Alcir de Faro Orlando. – 2013.

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

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Medição de vazão de gás. 3. Sistema de flare (tocha). 4. Queima e ventilação de gás natural. 5. Regulação. 6. Incerteza. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Dedico esse trabalho ao meu pai Samuel Loureiro por ser o melhor pai que alguém pode desejar. Seus conselhos têm sido diadema de graça para a minha cabeça e colares para o meu pescoço. Suas orações me sustentaram até aqui. Suas repreensões me fizeram crescer. Seu amor é o meu maior tesouro. Qualquer conquista na minha vida é apenas fruto de tudo isso. Muito obrigada pai!

Agradecimentos

À Trindade, Pai, Filho e Espírito Santo pelas grandes misericórdias na minha vida e pelo grande amor por mim, mesmo sem merecer. Senhor, muito obrigada!

Aos meus orientadores, Prof. Alcir e Pinheiro, pela paciência, compreensão e incentivo, quando forças não havia em mim para continuar. Sem dúvida foram vocês os principais responsáveis pela conclusão dessa dissertação. Palavras nenhuma expressariam a minha gratidão. Que Deus possa recompensá-los!

À minha família, base de tudo na minha vida. Papai, Mamãe, Talis e Sarinha, amo vocês!

Aos meus companheiros diários de labuta, em especial André, Bispo, Paulo Alexandre, Carlos, Gustavo, Alberto, Jorge, Leonardo e Karen. Obrigada pelas contribuições e pelas muitas palavras de encorajamento. Vocês representam muito para mim, fazem parte da minha história e são verdadeiros amigos.

Aos meus queridos amigos e intercessores, em especial Camila, Elen, Meire, Israel, Thais e Tia Cândida. Obrigada pelas orações, pelas broncas e por todo carinho e atenção dispensada. Cada um de vocês tem um lugar muito especial no meu coração.

Agradecimento Especial

Ao meu orientador José Alberto Pinheiro da Silva Filho por ter compartilhado sua reconhecida experiência em sistemas de medição de vazão de óleo e gás, proporcionando informações valiosas para a estruturação da minha dissertação de mestrado.

Como consultor sênior da Petrobras, conhecia os desafios da medição de gás de *flare* e deu todo o suporte no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Loureiro, Tabita Yaling Cheng; Orlando, Alcir de Faro. **Medição de Vazão de Gás em Sistemas de Flare (Tocha)**. Rio de Janeiro, 2013. 152p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Anualmente, mais de 100 bilhões de m³ de gás são queimados mundialmente em *flares* nas instalações de petróleo e gás natural. Esse número era ainda maior a alguns anos atrás. No passado, o holofote estava sobre o petróleo e o gás natural era visto como uma fonte de energia não rentável. A preocupação mundial com o aquecimento global impulsionou as ações para redução das emissões de gases causadores do efeito estufa. A crescente mobilização dos órgãos reguladores de diversos países para imposição de restrições de queima e ventilação do gás natural vem contribuindo para a melhoria dos índices de aproveitamento do gás associado. Muito embora já tenha havido um avanço relevante, o montante de gás desperdiçado ainda precisa ser reduzido. Neste contexto, a necessidade de se quantificar corretamente os volumes desperdiçados de gás fica evidente. As ações para redução da queima ou ventilação de gás natural se baseiam fortemente em medições precisas. O reflexo disto são as constantes publicações de diretrizes regulatórias voltadas para as medições de vazão de gás dos sistemas de alívio/tocha. Apesar da medição de gás de *flare* não ser uma técnica nova, ela ainda é considerada desafiadora e bem diferente das demais aplicações de medição de vazão. A natureza imprevisível da queima de gás natural, associada a instalações inadequadas, torna a medição extremamente difícil e complexa. O presente trabalho traz uma visão geral da queima de gás natural, da regulação do tema no Brasil e no mundo e das características e desafios da medição de gás de *flare*. Adicionalmente, foram feitos estudos de incerteza sobre os volumes diários medidos nos pontos fiscais de gás de uma instalação típica, de forma a analisar a influência da incerteza da medição do gás de tocha sobre a incerteza da produção mensal de gás natural, que é a base de cálculo para as devidas participações governamentais. Também foram calculadas as diferenças obtidas entre a medição indireta (balanço volumétrico de gás) e a medição direta (medição ultrassônica) da queima de gás natural e as incertezas relacionadas à medição indireta.

Palavras-chave

Medição de Vazão de Gás; Sistemas de *Flare* (Tocha); Queima e Ventilação de Gás Natural; Regulação; Incerteza.

Abstract

Loureiro, Tabita Yaling Cheng; Orlando, Alcir de Faro (Advisor). **Gas Flow Measurement in Flare Systems**. Rio de Janeiro, 2013. 152p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Annually, more than 100 billion cubic meters of gas are *flared* from upstream oil and gas facilities. This number was even higher a few years ago. In the past, the spotlight was on oil and natural gas was seen as a non-profitable source of energy. The worldwide concern over global warming spurred actions to reduce emissions of greenhouses effect gases, contributing to change the scenario above. The increased mobilization of regulators from many countries enforcing gas flaring and venting restrictions has contributed to the improvement of gas use. However, although some progress has been already achieved, the amount of wasted gas still needs to be reduced. In this context, the need to correctly quantify the volumes of gas *flared* is evident. Actions to reduce the flaring or venting of natural gas rely heavily on accurate measurements. This reflects on the rigorous *flare* measurement guidelines introduced by many countries to support flaring legislation. Although the *flare* gas measurement is not a new technique, it is still considered a challenging task and quite unique compared to other flow measurement applications. The unpredictable nature of the flaring, many times happening at inadequate facility, makes measuring it extremely difficult and complex. This work provides an overview of gas flaring, regulatory requirements in Brazil and worldwide and the characteristics and challenges of *flare* gas measurement. In addition, uncertainty studies were made over the daily volumes measured in the fiscal points of a typical installation, in order to analyze the influence of the uncertainty of *flared* gas measurement on the uncertainty of monthly gas production, which is the basis for calculating the government takes. The differences obtained between the gas flaring indirect measurement (“by-difference” method) and direct measurement (ultrasonic measurement) were also calculated, as well as the uncertainties related to the indirect measurement.

Keyword

Gas Measurement; *Flare* Systems; Gas Flaring and Venting; Regulation; Uncertainty.

Sumário

1	Introdução	19
1.1.	Objetivo	25
1.2.	Estrutura do Trabalho	26
2	Conceitos Básicos	27
2.1.	Gás Natural	27
2.2.	Queima e Ventilação de Gás Natural	29
2.3.	Sistema de <i>Flare</i> (Tocha)	30
2.4.	Sistema de Medição de Vazão	32
3	A Queima e Ventilação de Gás Natural	37
3.1.	Contextualização	37
3.2.	As estatísticas de queima de gás natural no mundo	41
3.3.	Motivações para a queima de gás natural	44
3.4.	A importância da regulação na redução da queima de gás natural	46
3.4.1.	O exemplo da Noruega	50
3.4.2.	Aspectos relevantes da regulação de outros países	52
3.5.	A queima de gás natural no Brasil	56
3.5.1.	Histórico	56
3.5.2.	A ANP e a regulação da queima de gás natural no Brasil	59
3.5.3.	Dados Estatísticos de Produção e Queima de Gás Natural	65
3.5.4.	Comparação entre a Regulação de Queima de Gás Natural do Brasil e da Noruega	70
4	A Medição de Gás de <i>Flare</i> (Tocha)	73
4.1.	Considerações Operacionais	73
4.1.1.	Sistemas de <i>Flare</i> (Tocha) de Alta e de Baixa Pressão	74
4.1.2.	Temperatura	75
4.1.3.	Composição do Gás	75

4.2. Quantificação dos volumes	76
4.2.1. Medição Indireta	76
4.2.1.1. A medição por diferença para determinação do gás queimado	77
4.2.1.2. Cálculo do Inventário	79
4.2.2. Medição Direta	80
4.2.3. Combinação de Medição Direta e Indireta	82
4.3. Tecnologias de Medição de Vazão de Gás de <i>Flare</i> (Tocha)	82
4.3.1. Tubo de Pitot de Média	85
4.3.2. Mássico tipo termal	86
4.3.3. Turbina tipo inserção	88
4.3.4. Vórtice do Tipo Inserção	90
4.3.5. Óptico	93
4.3.6. Ultrassônico do tipo tempo de trânsito	94
4.4. Considerações a respeito da Instalação de Medidores de Gás de <i>Flare</i> (Tocha)	102
4.4.1. Considerações gerais relacionadas à localização do sistema de medição e dos trechos retos requeridos	103
4.4.2. Efeitos da Instalação	106
4.4.2.1. Modelagem CFD	107
4.4.3. Efeitos do Número de Reynolds	110
4.4.4. Efeitos do Fluxo Laminar/Turbulento	110
4.4.5. Efeitos da Rugosidade	111
4.5. Fatores que influenciam a Incerteza de Medição	111
4.6. Calibração e verificação	116
5 Análise dos Dados	121
5.1. O Sistema de Medição da Instalação Típica	121
5.2. O Histórico da Queima e da Produção de Gás Natural	124
5.3. Análises de Incertezas obtidas	125
5.4. O cálculo da Incerteza de Medição da Queima e da Produção	128
5.5. Os resultados das Análises de Incerteza da Medição da Queima e da Produção	130
5.6. A influência da incerteza da medição de gás de <i>flare</i> (tocha) sobre	

a medição da produção	131
5.7. Incerteza de Medição: Vazão Horária versus Vazão Média Horária	133
5.8. Medição Direta versus Medição Indireta da Queima de Gás	134
6 Conclusão	138
7 Referências Bibliográficas	141
8 Referências Normativas	146
9 ANEXO I	148

Lista de figuras

Figura 1 – Queimadores – <i>flares</i> (FARINA, 2010)	20
Figura 2 – Medidor Ultrassônico de Gás de <i>Flare</i> (PINHEIRO, 2010)	24
Figura 3 – Origem e extração do gás natural (adaptado BAHIAGÁS, 2005)	28
Figura 4 – Fluxograma básico de um Sistema de <i>Flare</i> (KRCONTROL, 2012)	32
Figura 5 - Diagrama de funcionamento do computador de vazão (LAZARI <i>et al</i> , 2011)	34
Figura 6 – Sistema de medição com placa de orifício (PINHEIRO, 2010)	35
Figura 7 – Típico Sistema de Medição de gás de <i>flare</i> (FLUENTA, 2012)	36
Figura 8 – Efeito Estufa (SUZANO PAPEL E CELULOSE, 2012)	37
Figura 9 – Histórico de emissões de GEE antropogênicos (1970-2004) (IPCC, 2007)	38
Figura 10 – Estimativa de Queima de Gás em Tocha, incluindo os maiores queimadores (FARINA, 2010)	42
Figura 11 – Distribuição da Queima de Gás natural em 2010 – 10 Maiores Queimadores (elaboração própria com base nos dados da NOAA)	43
Figura 12 – Distribuição Geográfica da Queima de Gás Natural (FARINA, 2010)	43
Figura 13 – Queima de Gás na Noruega (GGFR, 2011)	50
Figura 14 – Queima de Gás em Tochas nas plataformas da Bacia de Campos – 1984 (REIS, 1984)	57
Figura 15 - Consumo de Gás Natural no Brasil (elaboração própria com base nos dados do MME/EPE/BEM, 2011)	57
Figura 16 - Produção de Gás Natural no Brasil (elaboração própria com base nos dados do MME/EPE/BEM, 2011)	58

Figura 17: Movimentação de Gás Natural no Brasil (elaboração própria com base nos dados da ANP, 2012)	59
Figura 18: Principais Instrumentos de Controle da Queima de Gás Natural	62
Figura 19: Produção e Queima de Gás Natural no Brasil – Resultados dos Termos de Compromisso assinado entre ANP e Petrobras (elaboração própria com base nos dados da ANP, 2013)	64
Figura 20: Sistema de Fiscalização da Produção (ANP, 2012)	65
Figura 21: Produção de Gás Natural no Brasil (ANP, 2012)	66
Figura 22: Maiores campos produtores de gás no Brasil (ANP, 2012)	67
Figura 23: Histórico dos índices de queima de gás natural no Brasil (elaboração própria com base nos dados da ANP, 2012)	68
Figura 24: Histórico da Queima de Gás Natural no Brasil nos últimos 12 meses (ANP, 2012)	68
Figura 25: Representação do Conceito de Queima Zero (adaptado de MILES, 2005)	72
Figura 26 – Verificação por diferença, onde o gás do <i>flare</i> é calculado como o gás que não foi utilizado na instalação (F: Fiscal; A: Apropriação; O: Operacional) (PINHEIRO, 2012)	77
Figura 27: Pontos de Medição da Cormorant Alpha envolvidos na Medição de gás de <i>flare</i> por Diferença (MARSHALL, 2005)	78
Figura 28: Estudo de Incerteza da Medição de gás de <i>flare</i> da Cormorant Alpha (MARSHALL, 2005)	79
Figura 29 – Tubo de Pitot (CHAVES, 2002)	86
Figura 30: Exemplo de Medidor do Tipo Termal (PINHEIRO, 2012)	87
Figura 31: Medidor de Vazão Tipo Turbina e Turbina de Inserção (INCONTROL, 2012)	90
Figura 32 – Vórtices em um tubo (SANTOS, 2011)	91
Figura 33 – Medidor Vórtice do Tipo Inserção (FIVE ATLAS, 2012)	92
Figura 34 - Princípio de operação do medidor L2F (MELNYK, 2005)	94
Figura 35 – Distribuição da medição de gás de <i>flare</i> por tecnologia de medição, Mar – ES, Campos e Santos (elaboração própria com base nos dados da ANP, 2012)	95

Figura 36 – Distribuição da medição de gás de <i>flare</i> por tecnologia de medição, Terra – ES, Bahia, Rio Grande do Norte, Sergipe, Alagoas (elaboração própria com base nos dados da ANP, 2012)	96
Figura 37 – Alinhamento do sensor e parâmetros importantes para o cálculo da vazão (FLUENTA, 2007)	97
Figura 38 – Relação entre velocidades, escoamento completamente desenvolvido em tubulações (ORLANDO, 2008)	99
Figura 39 – Transdutores em contato com o fluido (FERREIRA, 2010)	100
Figura 40 – Transdutor externo a tubulação (FERREIRA, 2010)	100
Figura 41 – Transmissão direta do sinal acústico (ARANTES, 2007)	101
Figura 42 – Transmissão indireta do sinal acústico (ARANTES, 2007)	101
Figura 43 – Arranjos de instalações recomendadas pela AGA-9 (AGA)	105
Figura 44 - Simulações em CFD de escoamentos de fluidos através de uma curva de 90° e de duas curvas sequenciais de 90° em uma configuração fora de plano (KAWAKITA, 2012)	107
Figura 45: Detalhes dos transdutores nas posições diametral e de meio raio (GIBSON, 2009)	108
Figura 46 – Exemplo de simulação via CFD de escoamento numa curva (TUV NEL, 2010)	109
Figura 47– Curva típica de erro em função da vazão num medidor USM (ISO 17089, 2010)	113
Figura 48: Incertezas da Medição de gás de <i>flare</i> por tipo de Medidor, apuradas em estudo com 49 sistemas de medição no Reino Unido (ROSS, 2005)	114
Figura 49 – <i>Dry Calibration – Zero Flow Box</i> (CAMARA <i>et al</i> , 2012)	117
Figura 50 - Calibração no próprio local de operação (PINHEIRO, 2012)	118
Figura 51 - Calibração com medidor de referência instalado numa linha auxiliar (PINHEIRO, 2012)	118
Figura 52 - Calibração com a inserção de medidores de diferentes faixas (PINHEIRO, 2012)	119
Figura 53– Esquema de medição de vazão por traçadores (RAMOS, 2013)	119

Figura 54 – Esquema Simplificado do Sistema de Medição de Gás da Instalação analisada	122
Figura 55 – Distribuição da medição de gás de <i>flare</i> por tipo de medição, Mar – ES, Campos e Santos (elaboração própria com base nos dados da ANP, 2012)	124
Figura 56 – Histórico da Queima e da Produção de Gás da Instalação Típica	124
Figura 57 – Incertezas relativas mensais dos volumes de consumo, queima e exportação e produção de gás da plataforma típica	130
Figura 58 – Totalização Mensal dos Volumes Queimados, Consumidos e Exportados	131
Figura 59 – Incerteza da vazão diária de gás de tocha, por balanço	135
Figura 60 – Queima Fiscal (Medição Direta) x Queima por balanço (Medição Indireta)	136
Figura 61 – Diferença Volumétrica entre a Queima Fiscal (Medição Direta) e a Queima por balanço (Medição Indireta)	136
Figura 62 - Diferença volumétrica entre a produção de gás calculada pelas entradas (Medição Operacional) e a produção de gás calculada pelas saídas (Medição Fiscal)	137

Lista de tabelas

Tabela 1 – Sistemas de Transporte de Gás Natural – Características (ZAMALLOA, 2004)	45
Tabela 2 - Queima de Gás Natural no Brasil por Bacia em dezembro de 2012 (ANP, 2012).....	69
Tabela 3: Tabela Comparativa entre a regulação da Noruega e a do Brasil (WORLD BANK adaptado)	70
Tabela 4 - Categorização de Eventos Típicos de Tocha (HM 58)	73
Tabela 5 - Sensibilidade em relação à entrada de líquido e entupimento (Norma API MPMS 14.10)	84
Tabela 6 - Localização dos Instrumentos de Pressão em relação ao medidor de vazão por Tecnologia de Medição (Norma API MPMS 14.10)	104
Tabela 7 – Incerteza de medição de vazão de gases (ISO 17089).....	112
Tabela 8 – Incertezas dos Pontos de Medição Fiscais por Placa de Orifício	127
Tabela 9 – Incertezas Mensais dos volumes queimados variando as incertezas dos pontos de medição de gás de <i>flare</i> (5%, 10%, 15%, 20% e 40%)	132
Tabela 10– Incertezas mensais dos volumes produzidos variando as incertezas dos pontos de medição de gás de <i>flare</i> (5%, 10%, 15%, 20% e 40%).....	132
Tabela 11 – Resultados das análises de incerteza mensais baseadas nos dados horários e nos dados diários, aplicando-se a média como melhor estimativa.....	134