

Wesley Joaquim Henrique Correia

**Avaliação Experimental de Correlações
Empíricas para Correção da Superestimação das
Leituras em Medidores Tipo Cone em
Escoamento Bifásico**

Vitória, ES

2016

Wesley Joaquim Henrique Correia

**Avaliação Experimental de Correlações Empíricas para
Correção da Superestimação das Leituras em Medidores
Tipo Cone em Escoamento Bifásico**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Centro Tecnológico

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos

Vitória, ES

2016

Wesley Joaquim Henrique Correia

Avaliação Experimental de Correlações Empíricas para Correção da Superestimação das Leituras em Medidores Tipo Cone em Escoamento Bifásico/ Wesley Joaquim Henrique Correia. – Vitória, ES, 2016-

83 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

1. Medição de Vazão. 2. Escoamento bifásico. 3. Medidor tipo Cone. I. Correia, Wesley Joaquim Henrique. II. Universidade Federal do Espírito Santo. IV. Avaliação Experimental de Correlações Empíricas para Correção da Superestimação das Leituras em Medidores Tipo Cone em Escoamento Bifásico

CDU 02:141:005.7

Wesley Joaquim Henrique Correia

Avaliação Experimental de Correlações Empíricas para Correção da Superestimação das Leituras em Medidores Tipo Cone em Escoamento Bifásico

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Trabalho aprovado. Vitória, ES, 27 de setembro de 2016:

Prof. Dr. Rogério Ramos
PPGEM/UFES
Orientador

Prof. Dr. Oscar Mauricio Hernandez Rodriguez
EESC/USP
Avaliador Externo

Prof. Dr. Marcio Ferreira Martins
PPGEM/UFES
Avaliador Interno

Vitória, ES
2016

Agradecimentos

Sou Grato a Deus, minha família, amigos e professores, e a todas as pessoas que e apoiaram e incentivaram a concluir o mestrado em engenharia mecanica. Especialmente a dedicação da minha querida mãe, que com sua solicitude e presteza foi fundamental durante o processo. Também sou grato ao apoio e encorajamento especial dos amigos, André Canal, Gabriel Fontoura, Matheus Pimenta e Ricardo Calheiros. Outros amigos como a Haru, o Hygor, Heber Buss, Gabriel Barrios, e o Gustavo Machado, que intercederam por mim em suas orações, torceram e me deram palavras de animo em momentos em que precisei de apoio para superar os desafios. Claro, também, o Professor Rogério Ramos, pelo seu vasto conhecimento, experiência e compreensão mostrados durante o período da pesquisa, pela indicação do tema e por ter aceitado gentilmente a tarefa de ser meu orientador; À 2solve, pelo apoio técnico eficiente que foi prestado.

*“Os mais poderosos intelectos da Terra não podem compreender a Deus. Os homens podem estar sempre a pesquisar, sempre a aprender, e ainda há, para além, o infinito.
(Ellen G. White)*

Resumo

O trabalho busca avaliar experimentalmente correlações empíricas para correção das leituras superestimadas de escoamentos de gás úmido em medidores tipo cone. Esse propósito reside no fato dos desafios tecnológicos de medição de vazão de gás natural em condição de gás úmido. Por uma pesquisa documental, foram apresentados o estado atual em que se encontra a tecnologia de medição de gás úmido, bem como o funcionamento de tal sistema de medição, sua vantagens e desvantagens, e uma discussão sobre as normas e regulamentos referentes ao assunto. Na fase experimental são apresentados os aspectos dos padrões de escoamento e sua influência sobre a superestimação de leitura, análises do comportamento do medidor tipo cone, avaliação dos parâmetros que influenciam a medição de gás úmido. Também é analisada a eficiência de correlações existentes aplicadas aos dados do presente trabalho. O medidor tipo cone se apresenta como um medidor importante diante do cenário apresentado. Conhecer seu comportamento diante das correlações existentes se mostra importante já que não existe uma correlação generalizada de correção.

Palavras-chaves: medição de vazão, gás úmido, medidor tipo cone, V-Cone.

Abstract

The work seeks to experimentally evaluate the empirical correlations for correction of the over-reading in measurements of wet gas-flow in cone devices. The purpose is based on the technological challenges of natural-gas flow measuring in wet-gas condition. By a literature search, the current state of the wet-gas flow measuring technology, how the system of measurement works, the pros and cons, and a discussion on the standardization and regulations related to the subject were presented. In the experimental part it was presented the aspects of the flow patterns and their influence on the over-reading, behavior analysis of the cone device, evaluation of the parameters that affects the wet-gas measuring. Also it is compared the efficiency of existent correlations applied to the data of the present work. The cone device is seen as an important measurement device before the present scenario. To know its behaviour when using the existent correlations is important, once there is no general correlation for correction.

Keywords: flow measuring, Wet gas, cone device, V-Cone

Lista de ilustrações

Figura 1 – Leituras de vazão de gás úmido com superestimação, tal como medidos por um medidor V-Cone e posteriormente tratados pela correlação da eq. 1.1 para obter a vazão de gás (STEVEN, 2009).	27
Figura 2 – Leitura de vazão de gás úmido para beta de 0,75 e diâmetros de 4 e 6 polegadas sem correção e com correção por meio da correlação eq. 1.5. Fonte: (STEVEN, 2009).	28
Figura 3 – Expoente de Chisholm x Fr_g . Fonte: (STEVEN, 2009)	28
Figura 4 – escoamento com variação de área	32
Figura 5 – Fotografia de um fluxo por uma placa de orifício mostrando o acúmulo de líquido à jusante da placa	35
Figura 6 – Perfil de velocidades simétrico, turbulento e completamente desenvolvido, mostrando a variação de velocidade típica desse escoamento com regiões de baixa velocidade próximas da parede contra velocidades altas nas regiões centrais do fluxo.	35
Figura 7 – Ilustração mostrando a modificação do perfil mediante a interação com o V-Cone. Fonte: McCrometer Inc.: http://www.mccrometer.com/	36
Figura 8 – Ilustração do comportamento do perfil de velocidade saindo de um acidente de linha e se encontrado com o V-Cone. (Fonte: McCrometer)	36
Figura 9 – Sistema de medição típico com V-Cone	37
Figura 10 – Razão beta de medidores cone e placas de orifícios	39
Figura 11 – Demonstração da linearidade entre erro porcentual e X_{LM} (Fonte:(BATINGA, 2005))	41
Figura 12 – Padrões de escoamento de gás úmido	42
Figura 13 – Esboço do V-cone (STEVEN, 2009)	44
Figura 14 – Mapa de Escoamento da Shell (STEVEN, 2009)	48
Figura 15 – Dados levantados em Laboratório e plotados no Mapa de Padrão de Escoamento Shell	49
Figura 16 – Imagens coletadas em laboratório que mostram que as condições de testes permaneceram sob o padrão estratificado	50
Figura 17 – Diagrama <i>P&I</i> do do circuito experimental de gás úmido	53
Figura 18 – Supervisório LabView	54
Figura 19 – Interface de controle do supervisório LabView	55
Figura 20 – Coeficiente de descarga C_d do medidor cone do trecho de teste em comparação com a referência, em escoamento monofásico de ar	56
Figura 21 – Influência de X_{LM} sobre K (a) $\beta = 0.65$ e (b) $\beta = 0.75$ (HE; BAI, 2014b)	61

Figura 22 – Influência do DR sobre K (a) $\beta = 0.65$, $Fr_g = 0.5$; (b) $\beta = 0.65$, $Fr_g = 1.2$; (c) $\beta = 0.75$, $Fr_g = 0.5$ e (d) $\beta = 0.75$, $Fr_g = 1.2$ (HE; BAI, 2014b)	62
Figura 23 – Influência do Fr_g sobre K (a) $\beta = 0.65$, $DR = 0.002445$; (b) $\beta = 0.65$, $DR = 0.006083$; (c) $\beta = 0.75$, $DR = 0.002445$ e (d) $\beta = 0.75$, $DR = 0.006083$ (HE; BAI, 2014b)	63
Figura 24 – Superestimação na medição de gás úmido a partir dos dados obtidos em laboratório.	65
Figura 25 – Influência do Fr_g sobre a superestimação da leitura de gás	66
Figura 26 – Influência do Fr_g sobre a superestimação da leitura de gás	67
Figura 27 – Influência do Fr_g sobre a superestimação da leitura de gás	68
Figura 28 – Uso das correlações de Steven 3.2 e de Leeuw modificada 3.7 no presente trabalho para efeito de comparação	69
Figura 29 – Uso das correlações de Steven 3.2 e de Leeuw modificada 3.7 no trabalho de He. Fonte: He et al. (HE; BAI, 2014b)	70
Figura 30 – Superestimação das medidas e suas correções pelo uso das correlações de Steven	71
Figura 31 – Superestimação das medidas e suas correções pelo uso da correlação de Leeuw Modificada 3.7	72
Figura 32 – Comparação dos valores de K experimentais com os valores estimados por He.	72
Figura 33 – Comparação dos valores de K experimentais com valores de K estimados, feita por He.	73
Figura 34 – Superestimação das medidas e suas correções pelo uso das correlações de He	73
Figura 35 – Superestimação das medidas do escoamento bifásico e suas correções pelo uso das correlações de He	74
Figura 36 – Influência do Fr_g no coeficiente angular k	75
Figura 37 – Comparação dos valores de K experimentais com os valores estimados de K^*	76
Figura 38 – Superestimação das medidas e suas correções pelo uso da correlação modificada de He	76
Figura 39 – Superestimação das medidas do escoamento bifásico e suas correções pelo uso da correlação modificada de He	77

Lista de tabelas

Tabela 1 – Análise comparativa das tecnologias de medição de vazão de gás úmido. Fonte: (ORLANDO, 2010)	37
Tabela 2 – Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido.	47
Tabela 3 – Matriz dos Testes	48
Tabela 4 – Dados Experimentais	55
Tabela 5 – Coeficiente de Descarga (Cd) obtido para cada condição de operação dos testes realizados para β de 0,75	57

Lista de abreviaturas e siglas

\dot{m}	Vazão mássica do fluido
Q	Vazão volumétrica do fluido
ρ	Massa específica do fluido
A	Área de seção transversal na tubulação
U	Velocidade superficial do fluido
g	Aceleração local da gravidade
β	Razão de diâmetros
C_d	Coefficiente de descarga
Re	Número de Reynolds
SE	Superestimação de Erro
ϵ	Fator de expansão
X_{LM}	Parâmetro de Lockhart Martinelli
Fr_g	Número de Froude do gás
ΔP	Diferencial de Pressão
D	Diâmetro da tubulação
DR	Razão de densidades
K	Coefficiente de fluxo bifásico
Y	Fator de expansão do gás

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Motivação	22
1.2	Metodologia	22
1.3	Revisão Bibliográfica	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1	Conceitos	31
2.1.1	Lei da Continuidade	32
2.1.2	Lei da Conservação de Energia	32
2.1.3	Velocidade Superficial da Fase	33
2.1.4	Medição de Vazão por Medidores Deprimogênios	33
2.1.4.1	Medição de Gás Úmido	34
2.1.4.2	O Medidor Tipo Cone	34
2.1.5	Definição de Gás Úmido	38
2.1.5.1	Cálculo da Vazão Volumétrica em V-Cone	38
2.1.6	Superestimação	39
2.1.7	Parâmetro de Lockhart-Martinelli	40
2.1.8	Número de Froude	41
2.1.9	Padrão de Escoamento	42
2.1.9.1	Fluxo Estratificado	42
2.1.9.2	Fluxo em golfadas	42
2.1.9.3	Fluxo anular ou névoa	43
2.2	Adimensionalização de Parâmetros	43
2.2.1	Análise Dimensional	43
2.2.2	Procedimento de Análise	44
2.2.3	Critério de Chauvenet	46
2.3	Mapa de Escoamento	47
3	DESCRIÇÃO DA PLANTA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA	51
3.1	O Circuito Experimental de Gás Úmido	51
3.2	Aquisição de Dados	52
3.3	Controle da Planta	52
3.4	Metodologia	52
3.4.1	Características do Experimento	52
3.4.2	Coeficiente de Descarga	55
3.4.3	Método para Avaliação de Performance do V-Cone	56

3.5	Correlações	57
3.5.1	Correlação de Steven	58
3.5.2	Correlação de De Leeuw Modificada	59
3.5.3	Coefficiente de Fluxo de Massa para Duas Fases	59
4	RESULTADOS E ANÁLISES	65
4.1	Validação de Correlações Anteriores	68
4.1.1	Performance da Correlação de Steven	70
4.1.2	Performance da Correlação de Leuw Modificada	71
4.1.3	Performance da Correlação de He	71
4.1.4	Coefficiente de He Modificado	74
5	CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS . .	79
	REFERÊNCIAS	81

1 Introdução

O desafio tecnológico representado pela medição da vazão de escoamentos multifásicos vai muito além do problema puramente físico, em reconhecer e medir corretamente as diferentes fases durante o processo, como também abrange exigências apresentadas pela metrologia legal. Tais questões se tornam mais urgentes ao se referir a escoamentos de fluidos estratégicos como petróleo e gás natural, quando a medição da vazão implica no recolhimento de impostos, repasse de *royalties* e na contabilização dos estoques energéticos nacionais.

Considerando esse aspecto e em virtude do aumento da demanda de consumo de óleo e gás, nos últimos anos as companhias do setor de petróleo têm dispensado um esforço crescente, visando à exploração de campos de gás com formação de fluidos condensados. Campos esses que não eram acessíveis em passado recente devido às limitadas técnicas de exploração e à inviabilidade econômica.

Concomitantemente à expansão da produção, as exigências fiscais, de logística, exatidão e confiabilidade, impostas pelos órgãos governamentais e pelo mercado quanto aos sistemas de medição de vazão dos processos (FERREIRA, 2010) também aumentaram. Em muitos casos, tais exigências já são desafiadoras para a medição da vazão quando o fluido apresenta uma única fase (escoamento monofásico). Contudo, o desafio tecnológico se agiganta quando se trata de aplicar a metrologia legal em processos de medição de vazão para escoamentos que apresentam duas fases ou mais (escoamentos multifásicos).

Por outro lado, as condições operacionais extremas encontradas na indústria do petróleo e gás, tais como pressões elevadas, fluido não-enquadrado para medição, escoamentos pulsantes, operação em área explosiva, presença de fluidos condensados, áreas de instalação *off-shore* de difícil acesso, custos elevados de manutenção e operação, indicam a opção por medidores sem partes móveis e que possam atender a tais premissas.

É nesse cenário que a tecnologia de medição deprimogênia de vazão de gás por cone invertido se torna atraente, tendo em vista sua robustez, princípio de medição conhecido e consolidada tolerância à presença de líquidos no escoamento. Porém, a presença de líquidos provoca o fenômeno conhecido como superestimação (*over-reading*) da vazão de gás, que superestima a vazão escoada e que precisa ser melhor compreendido e modelado de forma a corrigir a vazão e representa o tema do presente estudo.

1.1 Motivação

A motivação para o presente estudo reside em ampliar os conhecimentos dos efeitos de superestimação da medição da vazão de escoamentos de gás em medidores deprimogênicos tipo cone invertido e propor metodologias para a correção dos registros de vazão. Tal superestimação das leituras é originada pela presença de líquidos no escoamento de gás (escoamento caracterizado como bifásico), tal como encontrado frequentemente em escoamentos de gás natural, onde são registradas a presença de frações de líquidos provenientes de hidrocarbonetos condensados, e água.

Neste contexto, é registrada uma urgência em se entender e desenvolver tecnologias de medição de vazão para gás que contém líquido misturado em sua corrente (Jean-Paul Couput, 2006). Algumas características encontradas na medição de gás com presença de umidade por medidores deprimogênicos - DP são:

- O líquido altera a leitura de vazão de gás que o medidor registra;
- Essa alteração na leitura é dependente de diversos parâmetros, tais como: número de Froude –Fr, parâmetro de Lockhart-Martinelli, X_{LM} , razão das densidades (*Density Ratio* – DR), entre outros;
- Afim de prever e corrigir o erro, é necessário que se conheça a vazão de uma das fases previamente. Esses fatores fazem com que a adequação da medição aos requisitos da legislação seja um assunto de grande interesse tecnológico. Por outro lado, medidores tipo cone invertido apresentam características atraentes para a solução desses problemas, tais como:
- Repetibilidade aceitável das leituras quando associadas ao parâmetro de Lockhart-Martinelli
- O comportamento da alteração da leitura tem sempre a mesma tendência em medidores DP
- Dependência linear da sobre-leitura em relação a X_{LM}

1.2 Metodologia

Quanto aos fins, a pesquisa pode ser considerada aplicada, já que busca respostas para questionamentos levantados pela indústria, sendo a indústria do petróleo e gás uma demandante, por sua necessidade de alternativas quanto a medidores que possam eficientemente medir escoamento de gás úmido.

Quanto aos meios de investigação, a pesquisa teve uma parte estritamente documental e bibliográfica, sempre buscando fontes confiáveis e atuais para compreensão e

contextualização do assunto. E também uma parte estritamente experimental, com coletas de dados em laboratório, tratamentos estatísticos e por fim análises físicas, que buscam avaliar o desempenho do medidor operando em condição de escoamento de gás úmido. Esse estudo busca investigar e avaliar o desempenho de aplicação do medidor cone invertido para medições de vazão de gás úmido através de experimentos. No escopo do objetivo geral, foram definidas as metas:

- Mapear os padrões de escoamento disponíveis na planta experimental;
- Apresentar uma análise do medidor tipo cone invertido;
- Identificar as variáveis que influenciam a medição de vazão de gás úmido;
- Propor uma correlação de correção da predição do medidor com base nos dados registrados em laboratório;
- Comparar o comportamento observado em laboratório com aquele observado por outros pesquisadores;
- Contribuir para um melhor entendimento da medição de vazão em condições de escoamento de gás úmido.

1.3 Revisão Bibliográfica

O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) e a Agência Nacional do Petróleo (ANP) estão cada vez mais exigentes nas regulamentações aplicáveis às medições de vazão, em especial no caso de medição de transferência de custódia e fiscal. Hoje, é exigido que a medição de vazão de hidrocarbonetos líquidos apresente erro máximo de $\pm 0,3\%$ (INMETRO, 2003) e para gás natural, a incerteza de medição deve ser menor ou igual a 5% (ANP/INMETRO, 2000b).

Por ser um medidor de custo relativamente baixo, os medidores tipo cone estão virtualmente substituindo as tradicionais placas de orifício, principalmente ao se tratar de medição de gás úmido. As vantagens são atribuídas à geometria, pois permite leituras de vazão com trechos retos relativamente curtos e são pouco influenciados pela condição do escoamento à jusante e montante. Também não acumulam líquido na região de obstrução, pois a geometria propicia a característica de auto-limpeza (BATINGA, 2005). No Brasil, a Portaria Conjunta ANP/INMETRO No 1 de 2000 (ANP/INMETRO, 2000a), foi o primeiro documento desta categoria a ser publicado. Este documento regula as condições e procedimentos de sistemas de medição de vazão para hidrocarbonetos. Essa portaria foi recentemente atualizada para a resolução conjunta ANP/INMETRO no. 1/2013.

O escoamento de gás úmido é muito comum na indústria de petróleo, onde a

dependem das características dos reservatórios, o petróleo e o gás ocorrem quase sempre de forma associada. O escoamento de gás que contém uma pequena fração de líquido, tem sua dinâmica alterada. Esse comportamento começou a ser estudado nos anos 1940 e tem sido objeto de muitas pesquisas ao longo dos últimos 70 anos.

Em 1944 Martinelli fez o primeiro estudo a fim de correlacionar os dados empíricos que foram obtidos por Benjamin e Miller em 1941 quando estudavam escoamentos de gás e líquido em tubos e placa de orifício (LOCKHART; MARTINELLI, 1949).

Em 1949, Martinelli, agora juntamente com Lockhart, atualizaram o trabalho anterior, buscando então prever a queda de pressão por unidade de comprimento em função do atrito viscoso. Outros trabalhos importantes também se seguiram, como os de Chisholm (CHISHOLM, 1977), Murdock (MURDOCK, 1962), e outros.

Para escoamentos com uma alta fração de gás e baixa fração de líquido, denomina-se o escoamento por gás úmido, porém diferentes definições são adotadas nos diferentes trabalhos (STEVEN, 2009; ORLANDO, 2010; HE; BAI, 2014b; IFFT, 1995).

Em 2007, Steven (STEVEN, 2007) apresenta uma longa descrição de um projeto de pesquisa que começou com um medidor Venturi e se configurou na criação de um modelo simples de medidor deprimogênio de gás úmido, que utiliza o elemento cone para produzir o diferencial de pressão.

Existem definições que se baseiam na Fração Volumétrica do Gás (FVG), outras no número adimensional que é chamado Parâmetro de Lockhart-Martinelli (X_{LM}). Quanto a este último, observa-se uma que há uma preferência no seu uso, onde o valor máximo de 0,3 ($X_{LM} \leq 0,3$) é considerado limite para classificar um escoamento como gás úmido.

O API Multi-phase report no. 2566 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2005) define gás úmido com base no parâmetro de Lockhart-Martinelli. A ASME tende a concordar com o API, conforme o *Wet Gas Technical Report* (ASME, 2008).

A definição da ISO para gás úmido (ISO: DIS 14532 / ISO TC 193 GásNatural) (ISO, 2014b) é bem genérica, não limitando nenhum valor para a presença de líquido, sendo somente gás contendo água livre, vapor de água e/ou hidrocarbonetos líquidos.

Como tem sido a prática mais comum e aceita na comunidade científica (STEVEN, 2009), será adotado neste texto o parâmetro de Lockhart-Martinelli com um limite de 0,3 para definir gás úmido ($X_{LM} \leq 0,3$).

Por outro lado, pesquisas mostram que os medidores deprimogênios em geral apresentam as mesmas tendências em superestimar a leitura da pressão diferencial em escoamentos úmidos (STEVEN, 2009; LOCKHART; MARTINELLI, 1949; CHISHOLM, 1977; MURDOCK, 1962). Essa característica tem atraído a atenção dos pesquisadores para propor correlações para correção de leituras. Tal opção se apresenta como uma

solução mais econômica, em oposição à instalação de medidores multifásicos, oferecidos no mercado, mas que são mais dispendiosos e complexos, o que inviabiliza o uso de forma geral (ORLANDO, 2010).

Murdock em 1962 (MURDOCK, 1962) mostrou de forma efetiva que a superestimação de leitura em uma placa de orifício apresentava uma dependência quanto ao parâmetro de Lockhart-Martinelli. Por volta dos anos 70, Chisholm (CHISHOLM, 1977) observou que a placa de orifício, além de apresentar a superestimação em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli, também apresentava uma dependência das densidades das fases. Esses dois pesquisadores, Murdock e Chisholm, elaboraram um modelo de fluxo separado para o gás úmido.

Em 1997, Leuw (LEEUW, 1997) afirma que o medidor Venturi apresenta uma superestimação em função do Parâmetro de Lockhart-Martinelli- X_{LM} , da razão de densidades (*Density Ratio* - DR) e do número de Froude do gás - Fr_g . Também mostrou no mesmo trabalho que o padrão de escoamento bifásico afeta a maneira como a superestimação era percebida pelo medidor. Para números de Froude baixos, o fluxo era estratificado e a dependência da superestimação para esse parâmetro seria desprezível. Esse parâmetro tem sua influência destacada na superestimação quando o padrão de escoamento anular começa a aparecer, ou seja, quando o Froude do gás está elevado suficiente para que a inércia do gás seja superior às forças gravitacionais no líquido. Mais tarde, a influência do padrão de escoamento foi detalhada em 2006 por Steven (STEVEN, 2006).

Stewart et al. (STEVEN, 2002; STEWART, 2003) mostraram em 2002/03 que os medidores deprimogênios Venturi e cone invertido além de apresentarem uma dependência do parâmetro de Lockhart-Martinelli (X_{LM}), número de Froude do gás (Fr_g), razão de densidades (DR), também apresentam dependência com a razão de diâmetros beta (β).

Em 2006, Steven (STEVEN; KINNEY; BRITTON, 2006) demonstrou a partir de dados limitados que o diâmetro do medidor pode ter um efeito nas respostas dos medidores. Em 2006, Reader-Harris et al. (READER-HARRIS; HODGES; GIBSON, 2006) e Steven et al. (STEVEN, 2009; STEVEN; KINNEY; BRITTON, 2006) mostraram que a resposta do medidor DP no fluxo de gás úmido pode ser afetada por algumas das propriedades dos líquidos, dependendo de quais sejam as condições de fluxo.

As pesquisas sobre as respostas de medidores tipo cone invertido em escoamento de gás úmido começaram em 1997, por Ifft (IFFT, 1997) por meio de experimentos visualizados com ar/água escoando por placas de orifícios e cone invertido.

Pesquisas em altas pressões foram iniciadas por Stewart et al. (STEWART et al., 2002), onde foi demonstrado que os medidores tipo cone invertido apresentavam as mesmas tendências que os outros medidores DP quando submetidos ao escoamento de gás úmido. Isto quer dizer que o cone depende dos mesmos parâmetros anteriormente já

citados. (STEVEN; LAWRENCE, 2003; STEVEN; PETERS, 2004) confirmaram isso com mais dados. Em 2005 Steven et al. (STEVEN; KEGEL; BRITTON, 2005) produziram uma correlação ajustada (Eq. 1.1) para as respostas do V-Cone em escoamentos de gás com hidrocarbonetos leves nos diâmetros de 4 e 6 polegadas e razão beta de 0.75.

Na equação 1.1, m_g é a vazão de gás seco e $m_{g,aparente}$ é a vazão em sobreleitura, tal como indicada pelo medidor tipo cone.

$$\dot{m}_g = \frac{\dot{m}_{g,aparente}}{\left(\frac{1+AX_{LM}+BFr_g}{1+CX_{LM}+BFr_g}\right)} \quad (1.1)$$

Onde para razão de densidade, $\rho_g/\rho_l \geq 0,027$, os coeficientes da eq. 1.1 são dados por:

$$A = -0,0013 + \frac{0,3997}{\sqrt{\rho_g/\rho_l}} \quad (1.2)$$

$$B = 0,0420 - \frac{0,0317}{\sqrt{\rho_g/\rho_l}} \quad (1.3)$$

$$C = -0,7157 + \frac{0,2819}{\sqrt{\rho_g/\rho_l}} \quad (1.4)$$

e para $\rho_g/\rho_l < 0,027$,

$$A = 2,431, B = -0,151, C = 1.$$

Na figura 1 são mostrados os dados utilizados por Steven (STEVEN; KEGEL; BRITTON, 2005) em um gráfico de "Murdock" (i.e. Lockhart-Martinelli vs. Superestimação). Para os dados em questão, a predição do escoamento foi de 2% com 95% de confiança. Contudo, Evans (EVANS; IFFT, 2007) e Steven (STEVEN, 2007) mostraram em estudos independentes em 2007 que a correlação proposta por Steven et al. (STEVEN; KEGEL; BRITTON, 2005) não era adequada para extrapolações de números de Froude do gás elevados, conforme figura 2. Em seguida, em 2008, Steven et al. (STEVEN; TING; STOBIE, 2007) propôs uma nova correlação baseada no formato de equação de Chisholm/de Leew (CHISHOLM, 1967; CHISHOLM, 1977; LEEUW, 1997) e ajustou os dados disponíveis. A correlação de De Leeuw para o medidor Venturi de 4 polegadas, e razão beta de 0,4, foi baseado na correlação desenvolvida por Chilsom (CHISHOLM, 1977; LEEUW, 1997) com a inclusão do número densiométrico de Froude do gás (definido na eq. 2.9) na forma da

equação 1.5.

$$\dot{m}_g = \frac{\dot{m}_{m,aparente}}{\sqrt{1 + CX_{LM} + X_{LM}^2}} \quad (1.5)$$

onde

$$C = \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^n + \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^n \quad (1.6)$$

para $0,5 \leq Fr_g < 1,5$ $n = constante$

para $Fr_g > 1,5$ $n = f(Fr_g)$

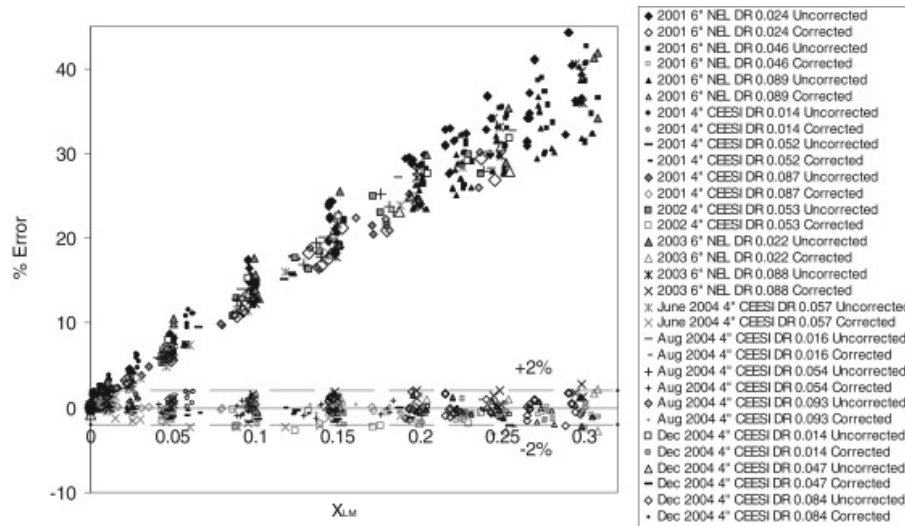


Figura 1 – Leituras de vazão de gás umido com superestimação, tal como medidos por um medidor V-Cone e posteriormente tratados pela correlação da eq. 1.1 para obter a vazão de gás (STEVEN, 2009).

Chisholm apresenta um valor para o expoente "n" como uma constante de valor igual a 0,25. De Leeuw encontrou, por análise gráfica, uma função $n = f(Fr_g)$ como é mostrado na figura 3. Ao desenvolver uma correlação para um medidor tipo cone, Steven et al. (STEVEN; HALL, 2009) adotou o mesmo procedimento. A figura 3 mostra leituras de um medidor tipo cone de diâmetro 6 polegadas, schedule 80, e razão beta de 0.75 em escoamento de gás com hidrocarboneto leve. Usando ajuste de dados, Steven et al. atualizaram as equações, obtendo um melhor resultado para a nova correlação, que se adequa de forma mais próxima às extrapolações do número densimétrico de Froude tal como definido nas eqs. 1.7 e 1.8.

para $Fr_g \leq 0,5$

$$n = 0,19 \quad (1.7)$$

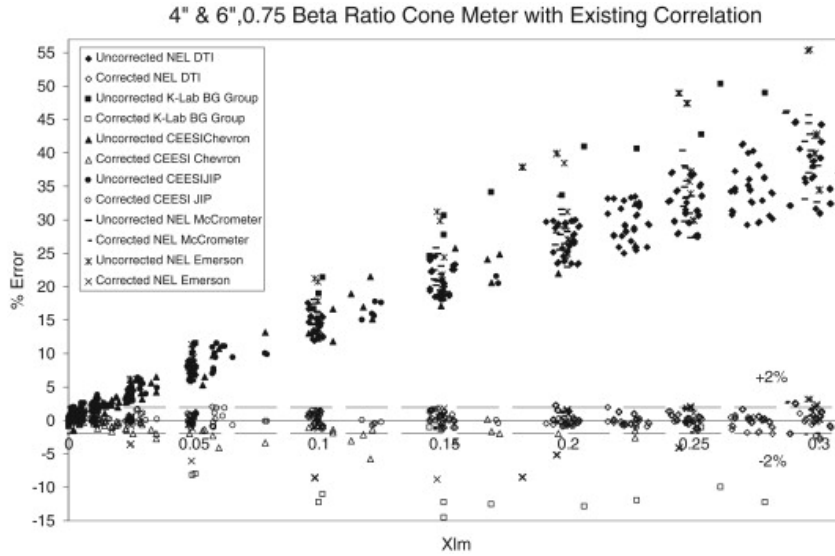


Figura 2 – Leitura de vazão de gás úmido para beta de 0,75 e diâmetros de 4 e 6 polegadas sem correção e com correção por meio da correlação eq. 1.5. Fonte: (STEVEN, 2009).

para $Fr_g > 0,5$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{0,83}{1,14 \cdot \exp(0,31 \cdot Fr_g)} \right) \right) \quad (1.8)$$

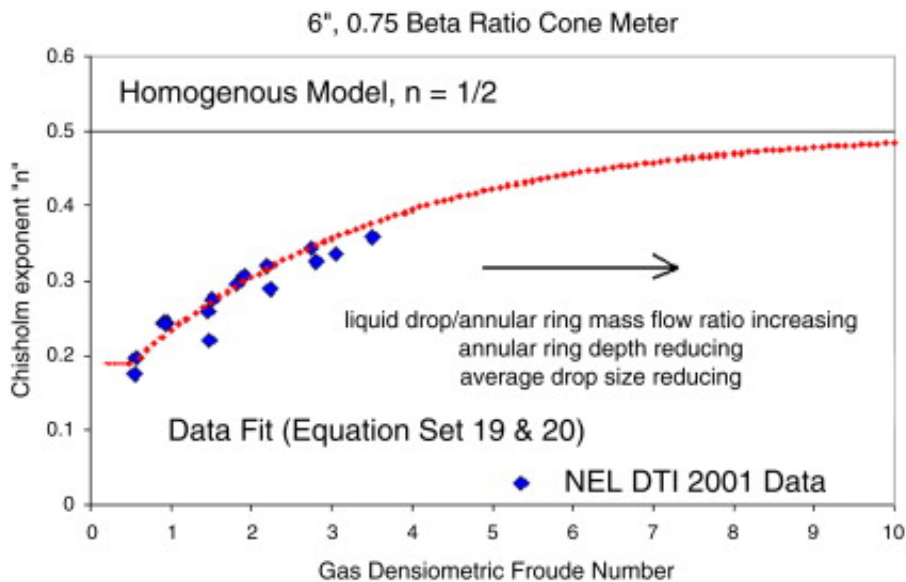


Figura 3 – Expoente de Chisholm x Fr_g . Fonte: (STEVEN, 2009)

Reader-Harris et al. (READER-HARRIS; HODGES; GIBSON, 2006) mostraram em 2005/06, em estudo com medidor Venturi, embora a composição do gás não influenciasse na resposta do medidor, que a composição do líquido imprimia um efeito considerável

na resposta do mesmo medidor, indicando que as propriedades do líquido influenciam no processo. Uma vez que o medidor tipo cone é da mesma família do Venturi, pois operam sob os mesmos princípios físicos, a conclusão pode ser extrapolada para o medidor tipo cone.

Em 2014, He et al. (HE; BAI, 2014b) propuseram uma nova forma de correlação que leva em conta a influência dos parâmetros X_{LM} , Fr_g , DR e β propondo um coeficiente de fluxo bifásico, K . Esse coeficiente será discutido em detalhes mais adiante no texto (seção 3.5.3).

2 Fundamentação Teórica

Nos campos de produção, o gás que é produzido geralmente apresenta frações de líquido, sendo compostas ou por petróleo ou por água produzida que inevitavelmente vai elevar a complexidade das tecnologias de medição requeridas no processo. Mesmo em campos que produzem unicamente gás a presença de fase líquida ainda acontece, quando no processo de elevação é imposta uma queda de pressão que faz com que os componentes mais pesados condensem formando uma mistura de fases.

Os medidores mais amplamente usados nesses processos são os medidores deprimogênicos (DP), que por uma obstrução no escoamento geram uma queda de pressão usada para inferir a vazão. Apesar de serem os medidores mais comuns para essas aplicações, eles foram projetados para operarem em gás seco e não em gás úmido. A presença de líquido nesses medidores provocam uma superestimação de leitura, que necessita ser devidamente tratada a fim de corrigir as medições de gás.

Ainda assim, a superestimação que é observada possui alta repetitividade, possibilitando que se estime o percentual de erro e se proponha correções. A maior parte das correlações para correção de erro foram investigadas para placa de orifício e venturi (LOCKHART; MARTINELLI, 1949; CHISHOLM, 1977; MURDOCK, 1962).

A tecnologia de medição por cone invertido é mais recente, desenvolvida pela McCrometer diante da necessidade de remover obstáculos que os outros medidores apresentam. Três diferenças que podem ser destacadas é que tais medidores são menos sensíveis ao padrão de escoamento, apresentam mais estabilidade no sinal de pressão, e dispensam longos trechos retos (STEVEN, 2009; TAN et al., 2009).

Esse é um medidor ainda muito pouco estudado, sendo que somente após o vencimento do direito de patente começou-se a dar passos no sentido de incluir normatizações nas medições do cone invertido, que podem ser vistas na ISO 5167 (parte 5) (ISO, 2014a).

2.1 Conceitos

Alguns dos conceitos importantes para o estudo de medição de vazão de gás úmido serão abordados nessa seção considerando o modelo matemático simplificado, tipicamente utilizado e que viabiliza a medição de vazão por elementos deprimogênicos.

2.1.1 Lei da Continuidade

A equação da continuidade afirma que, para um regime permanente, a taxa na qual a massa entra em um sistema é igual a taxa que ela deixa o sistema. Na figura 2.1 isso implicaria em dizer que num intervalo de tempo, a quantidade de massa que passa na seção A é a mesma que passa na seção B .

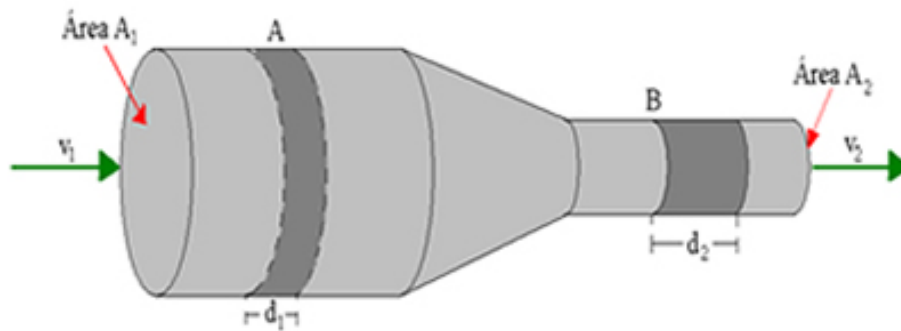


Figura 4 – Escoamento com variação de área

Portanto:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q = \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (2.1)$$

onde,

- \dot{m} Vazão mássica do fluido
- Q Vazão volumétrica
- ρ Massa específica do fluido
- A Área de seção transversal na tubulação
- v Velocidade média do fluido na respectiva seção de escoamento

2.1.2 Lei da Conservação de Energia

A conservação de energia de um escoamento através de um medidor deprimogênio é matematicamente modelada pela equação de Bernoulli aplicada em duas seções distintas do escoamento e considerando todas as suas hipóteses simplificadoras, tal como apresentado na equação 2.2. Essa modelagem é definida pela norma ISO 5167 e é aplicada a qualquer medidor deprimogênio, havendo adaptações a depender da geometria em questão.

$$P_1 + \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_1 = P_2 + \frac{\rho \cdot V_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_2 \quad (2.2)$$

onde,

P	Pressão média na seção transversal
V	Velocidade média na respectiva seção transversal
z	Cota da seção transversal
ρ	Massa específica na seção transversal
g	Aceleração local da gravidade

Conforme modelado, a equação de Bernoulli, equação 2.2, assume que não há perda por atrito, variação de energia interna do fluido, regime permanente, fluxo incompressível e se aplica ao longo de uma linha de corrente

2.1.3 Velocidade Superficial da Fase

A velocidade superficial do gás é aquela atingida caso o escoamento fosse monofásico, mas mantendo a mesma vazão e mesma seção. A velocidade superficial pode ser calculada pela equação 2.3.

$$U_{sg} = \frac{Q_g}{A} \quad (2.3)$$

onde,

U_{sg}	Velocidade superficial do gás
Q_g	Vazão do gás
A	Área da seção

A presença de líquido no escoamento de gás úmido faz com que a velocidade do gás seja maior que a velocidade superficial, dado que o líquido reduz a área da seção ocupada pelo gás.

2.1.4 Medição de Vazão por Medidores Deprimogênios

A ideia de um medidor deprimogênio consiste em produzir uma pressão diferencial por meio de um elemento primário que obstrui a passagem do fluido na tubulação, criando um diferencial de pressão entre a montante e a jusante por efeitos inerciais e viscosos. Uma vez medido este diferencial, é possível inferir a vazão por meio das equações de conservação de energia e massa (2.2 e 2.1).

Historicamente, a placa de orifício é o medidor mais usado para medir gás natural no mundo. O seu uso perdura por anos na indústria de medição de vazão e essa permanência se deve principalmente ao alto conhecimento tecnológico que se acumulou e documentou em pesquisas e normas desde então. Todo esse conhecimento é baseado em uma calibração

de gás seco. Assim, quando existe a introdução de líquido no escoamento, a medição não tem mais uma boa precisão.

2.1.4.1 Medição de Gás Úmido

Considerando o consumo de gás natural por vários setores econômicos e o concomitante amadurecimento de campos produtores, a medição de gás úmido tem se tornado mais relevante com o passar do tempo a fim de garantir o abastecimento. Vários laboratórios têm surgido com o objetivo de estudar o efeito que a presença de líquido na corrente de gás tem sobre os medidores de vazão. Desde a década de 40 um esforço crescente começou para se entender as respostas dos medidores frente a condição de gás úmido.

Existem duas abordagens predominantes para esse tipo de medição. A primeira é o uso de medidores originalmente projetados para medir diretamente as fases presentes no escoamento. A segunda é o uso de medidores de gás seco alinhados às correlações que corrigem os erros na vazão causados pela presença de líquido. Em 1962 J. W. Murdock observou que havia uma superestimação de leitura no medidor causada pela presença de líquido na corrente gasosa (LAWRENCE, 2009). Obviamente o primeiro método é preferível, não fosse pelo seu custo altamente elevado, o que o coloca em desvantagem em relação aos demais medidores de pressão diferencial, ou seja, deprimogênios (STEWART, 2003).

Nas placas de orifício, um efeito que é observado nos escoamentos de gás úmido é o acúmulo do líquido antes e depois da placa (figura 5), que coloca esse medidor em desvantagem em relação ao cone, que não acumula líquido, garantindo uma melhor estabilidade do sinal de pressão.

2.1.4.2 O Medidor Tipo Cone

O medidor de pressão diferencial V-Cone foi introduzido em 1986 como uma tecnologia de medição alternativa, com o objetivo de superar muitas das limitações das tecnologias então existentes. Pesquisas considerando as condições de instalações, distúrbios a montante e jusante, e outros fatores mostraram que o V-Cone é insensível a esses aspectos, que para os demais medidores são problemáticos (IFFT, 1997). Foi observado que o cone apresenta elevada tolerância à medição de gás úmido, devendo-se à sua geometria. A ideia reside na instalação de um cone centralizado na tubulação, que interaja com a porção do fluido de maior velocidade (ver fig. 6) obstruindo a passagem de fluido, forçando-o a escoar pelas bordas. Essa interação provoca uma mistura das porções de alta velocidade com as porções de baixa, o que tende a forçar a uniformização do perfil de velocidades (ver fig. 7). Isso possibilita a eliminação do uso de longos trechos retos.

A figura 8 demonstra de forma ilustrativa o que aconteceria com o perfil de velocidade ao passar por um acidente e se aproximar do V-Cone.

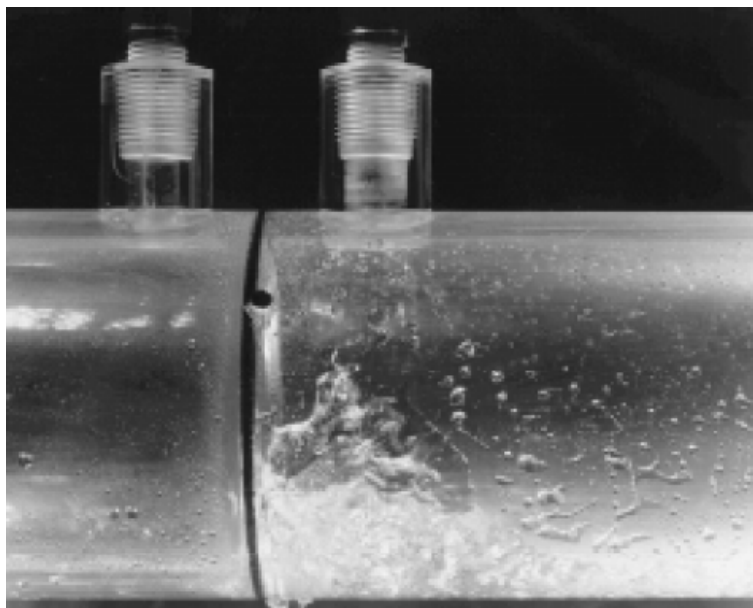


Figura 5 – Fotografia de um fluxo por uma placa de orifício mostrando o acúmulo de líquido à jusante da placa

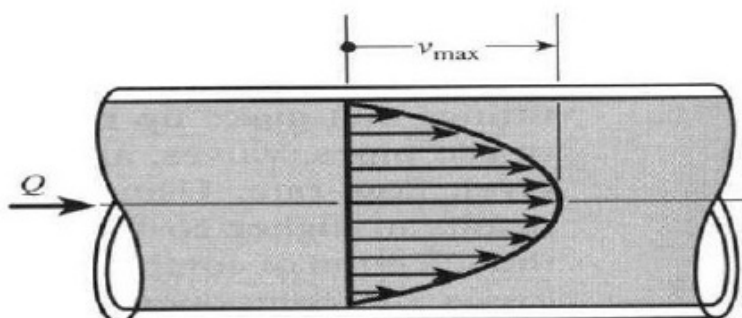


Figura 6 – Perfil de velocidades simétrico, turbulento e completamente desenvolvido, mostrando a variação de velocidade típica desse escoamento com regiões de baixa velocidade próximas da parede contra velocidades altas nas regiões centrais do fluxo.

Um segundo cone de dimensões menores instalado após o elemento primário, auxilia na recuperação da pressão do fluido, pois diminui a geração de vórtices, ruídos e estabiliza o sinal de pressão.

Testes demonstram que a haste de sustentação do cone apresenta uma influência desprezível no processo de medição (IFFT; MIKKELSEN, 1993).

Um sistema de medição típico com o medidor V-Cone é composto de elementos primários, secundários e terciário. Os elementos primários são o cone de obstrução, trechos retos e tomadas de pressão. Os elementos secundários são transmissores de pressão diferencial, estática e de temperatura. Já o elemento terciário é o computador de vazão que computa e os sinais de pressão e temperatura retornando os valores tratados de vazão.

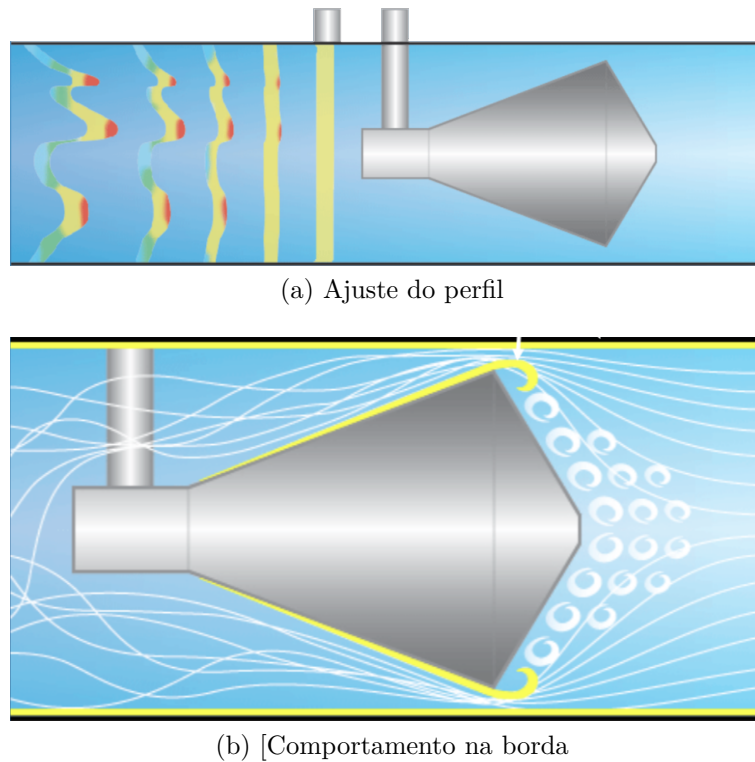


Figura 7 – Ilustração mostrando a modificação do perfil mediante a interação com o V-Cone. Fonte: McCrometer Inc.: <http://www.mccrometer.com/>

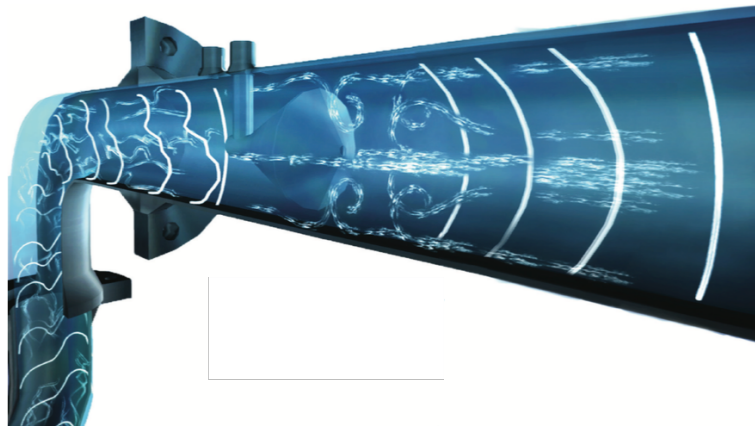


Figura 8 – Ilustração do comportamento do perfil de velocidade saindo de um acidente de linha e se encontrado com o V-Cone. (Fonte: McCrometer)

A figura 9 mostra como é um sistema do gênero.

Na tabela 1 são mostrados diferentes aspectos de medidores de vazão com o fim de compará-los. O V-Cone apresenta vantagens técnicas em relação aos demais que devem ser destacadas. A McCrometer (2005 apud (ORLANDO, 2010)) afirma que para esse medidor não há necessidade de trecho reto a montante e jusante. Também é observado que apresenta perda de carga média (devido ao impacto do contato do fluido com a superfície do cone não ser abrupta), baixo custo, não possui partes móveis, e tem faixa de medição mediana.

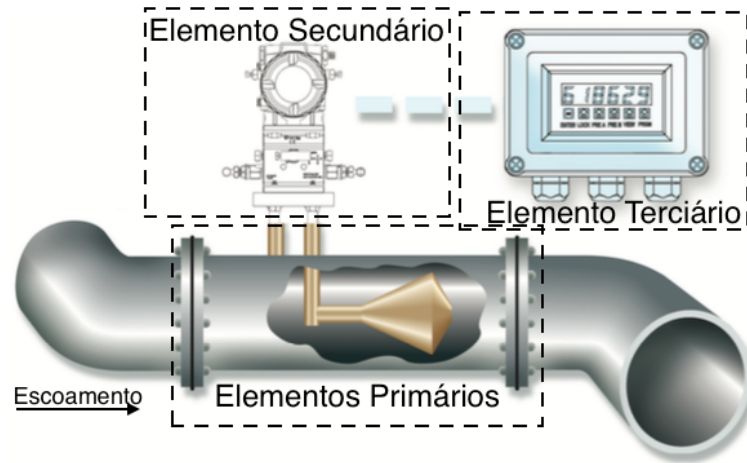


Figura 9 – Sistema de medição típico com V-Cone

Tabela 1 – Análise comparativa das tecnologias de medição de vazão de gás úmido. Fonte: (ORLANDO, 2010)

Tipo de Medidor	Trecho Reto Montante/ Jusante	Perda de Carga	Padronização	Faixa de Medição	Calibração	Custo	Partes Móveis
V-Cone	0D/0D	Média	Não	Média	*	Baixo	Não
Placa de Orifício	5D/4D	Alta	Sim	Baixa	Não	Baixo	Não
Venturi	2,5D/4D	Média	Sim	Baixa	Não	Baixo	Não
Ultrassônico	5D/3D	Desprezível	Sim	Alta	Sim	Alto	Não
Turbina	10D/5D	Alta	Sim	Média	Sim	Médio	Sim

Neste ponto serão discutidas as principais vantagens e desvantagens que o medidor V-Cone apresenta em relação à placa de orifício. Como vantagens destacam-se:

- **Não exige longos trechos retos** em sua instalação já que a geometria do cone interage com o escoamento de maneira a condicionar o perfil de escoamento. Os medidores convencionais, como é o caso da placa de orifício, requerem um perfil de escoamento completamente desenvolvido e livres de efeito *swirl*, isto é, movimentos rotacionais. Em casos extremos de perfis assimétricos um trecho reto de cinco vezes o diâmetro da tubulação é suficiente para contornar a situação (ORLANDO, 2010). Esta característica permite uma diminuição de espaço e custos. Em aplicações de plataformas de petróleo, uma diminuição de espaço é um aspecto extremamente importante.
- **Menor perda de carga**, que também se deve à sua geometria, que não impacta abruptamente o fluido escoando. Isso não acontece nas placas de orifício.
- **Menor custo de manutenção**, que pode ser atribuída ao fato de não haver impacto abrupto no elemento primário, que contribui para uma menor taxa de corrosão e erosão.

- **Geometria auto limpante**, não retendo líquidos ou sólidos, pois diferente da placa de orifício, não tem regiões de estagnação. Medidores que retêm estes elementos tem seu sinal comprometido, gerando instabilidade na medição.
- **Maior faixa de medição**, que chega a um *range* de até 10:1, contra o *range* típico de 3:1 das placas de orifício.

As principais desvantagens derivam em sua maior parte do fato de que esses medidores têm uma tecnologia muito recente, tendo sua patente expirada há pouco tempo.

Até então, apenas a empresa detentora da patente realizava estudos sobre a performance da tecnologia. O processo de pesquisa mais abrangente só foi iniciado após o vencimento legal da patente. Assim, as desvantagens são:

- **Carência de estudos** aprofundados por parte da comunidade tecnológica e científica envolvida em processos de medição de vazão
- **Coefficiente de descarga** não pode ser obtido por equação reconhecida e de consenso, sendo característica desenvolvida pelo fabricante para cada medidor.
- **Ausência de normas** bem estabelecidas e de consenso, semelhantes às da placa de orifício, que definem os aspectos geométricos ou que definem modelos de calibrações universais.

2.1.5 Definição de Gás Úmido

Não existe hoje, uma definição quantitativa de escoamento de gás úmido universalmente aceita. Alguns autores consideram que escoamentos com uma fração de até 5% de líquido em volume pode ser considerado gás úmido, outros consideram até 10% (Batinga, 2005). Todavia, o parâmetro mais comum para definir um escoamento de gás úmido é o parâmetro de Lockhart-Martinelli, que será discutido na seção 2.1.7. Alguns trabalhos e normas (ORLANDO, 2010; STEVEN, 2009) adotam um valor de $X_{LM} \leq 0,3$ para definir o escoamento de gás úmido. Neste trabalho foi adotada essa abordagem.

2.1.5.1 Cálculo da Vazão Volumétrica em V-Cone

A obstrução que é gerada pelo cone ocasiona o aparecimento de um diferencial de pressão ao longo do medidor que é medido pelas tomadas de alta pressão e de baixa pressão à montante e à jusante do elemento primário, respectivamente. A partir dessa medição e do conhecimento da geometria do medidor é possível calcular a vazão por meio da combinação da equação de Bernoulli e da equação de conservação da massa, princípio usado nos medidores de vazão por pressão diferencial, equação 2.4, que demonstra que

para uma vazão constante, a queda de pressão em um tubo é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade dentro do tubo.

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \frac{D^2 \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot C_d \cdot Y \quad (2.4)$$

Onde,

- Q vazão volumétrica
- D Diâmetro interno da seção do tubo
- ΔP Diferencial de pressão gerado no V-cone
- ρ massa específica do gás
- C_d coeficiente de descarga que representa a razão entre a vazão monofásica real e a vazão teórica
- Y Fator de expansão do gás (para fluidos incompressíveis $Y = 1$)
- β Razão que representa a relação entre o diâmetro equivalente do espaço anular e o diâmetro da linha

Quanto maior é a restrição de área, maior será o diferencial de pressão criado para uma mesma vazão e menor é a relação β . A figura abaixo mostra uma comparação da razão beta para placas de orifícios e V-cones.

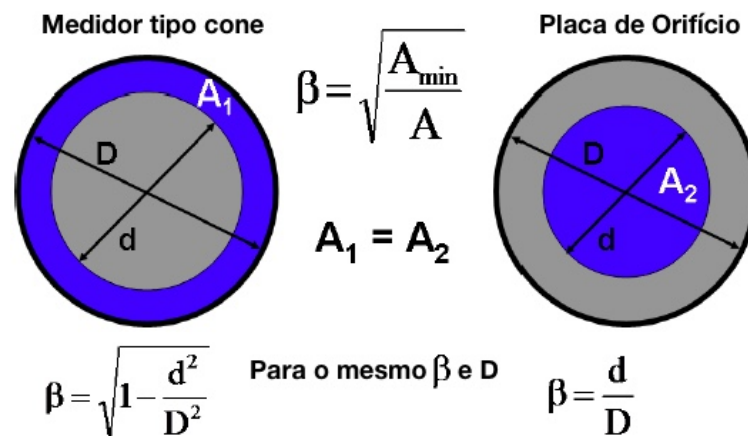


Figura 10 – Razão beta de medidores cone e placas de orifícios

2.1.6 Superestimação

Assim como os demais medidores deprimogênicos, em escoamento de gás úmido, o medidor tipo cone também produz um diferencial de pressão maior do que aquele que seria gerado caso no escoamento caso houvesse condição de gás seco. Ou seja, uma

superestimação (SE) é observada na leitura e a leitura do medidor não é a vazão real, mas uma vazão aparente. Essa leitura aparente está formulada na equação 2.5:

$$\dot{m}_{g,aparente} = \frac{A\beta^2 C d_g Y \sqrt{2\rho_g \Delta P_{bf}}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (2.5)$$

onde,

$\dot{m}_{g,aparente}$	Vazão mássica aparente em caso de escoamento de gás úmido
A	Área de seção transversal
β	Razão entre áreas
Cd	Coefficiente de descarga de gás seco
Y	fator de expansão
ΔP_{bf}	Diferencial de pressão de escoamento bifásico
ρ_g	Massa específica do gás seco

Um coeficiente de correção da superestimação, SE , é proposto para corrigir a vazão lida. SE é definido como a razão da vazão aparente pela vazão real do gás (2.6):

$$SE = \frac{\dot{m}_{g,aparente}}{\dot{m}_g} \quad (2.6)$$

2.1.7 Parâmetro de Lockhart-Martinelli

O parâmetro de Lockhart-Martinelli (X_{LM}) é um número adimensional que indica a relação entre a inércia superficial do líquido e a inércia superficial do gás em uma corrente cuja fase gasosa é contínua (STEVEN; KEGEL; BRITTON, 2005). Para o fim deste trabalho, o Lockhart-Martinelli é adotado para definir se o escoamento é ou não de gás úmido, sendo o critério para isso o valor máximo de X_{LM} de 0,3. O parâmetro é definido pela equação 2.7 onde é definido que o X_{LM} é a raiz quadrada da razão entre a inércia superficial do líquido e a inércia superficial do gás:

$$X_{LM} = \sqrt{\frac{\rho_l \cdot U_{sl}^2 \cdot D^2}{\rho_g \cdot U_{sg}^2 \cdot D^2}} = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} = \frac{Q_l}{Q_g} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (2.7)$$

onde,

D	Diâmetro interno da tubulação
U_{sg}	Velocidade superficial do gás
U_{sl}	Velocidade superficial do líquido
\dot{m}_l	Vazão mássica do líquido
\dot{m}_g	Vazão mássica do gás
Q_l	Vazão volumétrica do gás
Q_g	Vazão volumétrica do líquido
ρ_g	Massa específica do gás
ρ_l	Massa específica do líquido

Foi observado que (BATINGA, 2005) o parâmetro de Lockhart-Martinelli apresenta um comportamento linear com a superestimação (SE), como pode ser visto na figura 11. E por isso, seu uso passa a ser de notável importância para a correção da superestimação de leitura. O erro positivo (eq. 2.8) na figura indica a superestimação - SE.

$$Erro(\%) = \left(\frac{\dot{m}_{aparente}}{\dot{m}_g} - 1 \right) * 100\% \quad (2.8)$$

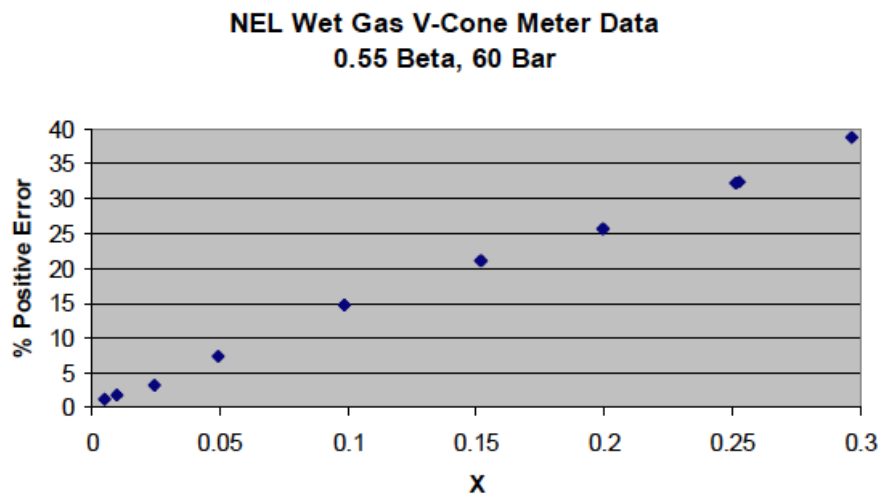


Figura 11 – Demonstração da linearidade entre erro porcentual e X_{LM} (Fonte:(BATINGA, 2005))

2.1.8 Número de Froude

O número de Froude é um número adimensional que descreve a relação entre as forças de inércia e as forças gravitacionais. Portanto, em um escoamento de gás e líquido, esse número pode ser escrito como a razão entre as forças de inércia do gás e as forças

gravitacionais do líquido, conforme a equação 2.9.

$$Fr_g = \frac{U_{sg}}{\sqrt{g \cdot D}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}} \quad (2.9)$$

2.1.9 Padrão de escoamento

O padrão de escoamento é uma descrição física e qualitativa da distribuição das fases presentes em um fluxo composto por duas fases. Para o escoamento horizontal de gás úmido, a definição de padrões mais aceita são: fluxo anular ou névoa, fluxo estratificado e estratificado ondulado, e o fluxo em golfadas e semi golfadas. O padrão de escoamento é dependente do diâmetro do tubo, das propriedades das fases (STEVEN, 2009) e é fortemente dependente da inclinação do tubo. A figura 12 demonstra esses padrões para escoamento horizontal.



Figura 12 – Padrões de escoamento de gás úmido

2.1.9.1 Fluxo Estratificado e Estratificado Ondulado

Esses padrões ocorrem em pressões relativamente baixas, baixas razões entre a densidade do gás e do líquido, e baixas velocidades do gás. O líquido tende a escoar na parte inferior do tubo devido à influência das forças gravitacionais e o gás que é menos denso ocupa a parte superior. O escorregamento das fases, ou seja, a diferença das velocidades das fases tende a ser alta, sendo a velocidade do gás superior à do líquido.

2.1.9.2 Fluxo em Golfadas ou Semi Golfadas

Ocorrem com o aumento da pressão e da velocidade do gás (aumento das forças dinâmicas do gás), e são caracterizados pelo aparecimento de ondas na interface entre o gás e o líquido. Não é tarefa simples localizar onde começa um e termina o outro.

2.1.9.3 Fluxo anular ou névoa

Este é um escoamento característico de baixas vazões de líquido e maior vazão de gás. A fase líquida escoar próxima às paredes do tubo e o gás na parte mais interna formando um anel de líquido no escoamento. No escoamento horizontal a gravidade tende a manter a parte inferior do anel com maior concentração de líquido do que a parte superior.

2.2 Adimensionalização de Parâmetros

O medidor tipo cone, assim como os demais medidores DP trabalham primariamente com a leitura de pressão diferencial. Embora essa classe de medidores tenha sido desenvolvida para trabalhar com escoamento de gás seco, foi constatado nos últimos anos, que eles são adequados para a medição de gás úmido, desde que se entendam os fenômenos originados pela presença da fase líquida. Dessa forma, entender a resposta das leituras primárias desse medidor à presença do gás úmido é de vital importância para se obter valores que possam ser manejados corretamente para que haja uma devida correção. Essa correção é proposta por uma correlação que usa o modelo do escoamento (i.e. influência dos parâmetros envolvidos) para prever a medição correta de gás dentro de limites conhecidos e aceitáveis.

O medidor tipo cone representa uma tecnologia recente na investigação de escoamento de gás úmido. Ao analisar as investigações ou pesquisas desenvolvidas nessa área, pode ser notado que muitos números adimensionais foram usados e escolhidos de forma independente pelos diversos pesquisadores. Nesse trabalho é proposto que seja feita uma análise adimensional completa do escoamento de gás úmido em aplicação de medidores tipo cone usando o teorema de Pi de Buckingham. Esse teorema lista todos os parâmetros que possivelmente possam ter efeito sobre a leitura do medidor, sem nenhuma garantia de que cada um de fato contribuirá de forma significativa sobre o medidor. Esse efeito pode ou não ser confirmado pelas análises experimentais.

Esse procedimento é importante para mostrar os grupos dimensionais que podem ter influência sobre o medidor V-Cone, bem como provar a validade do uso de parâmetros adimensionais que foram escolhidos ao longo dos anos nas pesquisas.

2.2.1 Análise Dimensional

A fim de obter a análise dimensional, primeiro listam-se todos os parâmetros que podem afetar as leituras no medidor (mesmo que na realidade eles possam não afetar) mostrando suas dimensões primárias (i.e. "M" para massa, "L" para comprimento e "T" para tempo).

Um esboço de cone genérico é mostrado na figura 13. A lista de variáveis e respec-

tivas dimensões para análise segue:

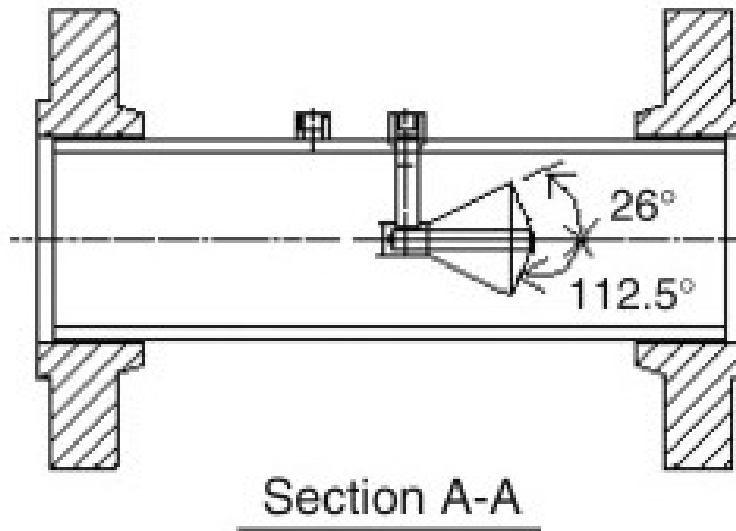


Figura 13 – Esboço do V-cone (STEVEN, 2009)

ΔP	Diferencial de pressão	$\frac{M}{LT^2}$
\dot{m}_g	Vazão mássica do gás	$\frac{M}{T}$
\dot{m}_l	Vazão mássica do líquido	$\frac{M}{T}$
ρ_g	Massa específica do gás	$\frac{M}{L^3}$
ρ_l	Massa específica do líquido	$\frac{M}{L^3}$
μ_g	Viscosidade do gás	$\frac{M}{LT}$
μ_l	Viscosidade do líquido	$\frac{M}{LT}$
d	Diâmetro do V-cone	L
D	Diâmetro da tubulação	L
g	Gravidade	$\frac{M}{LT^2}$
$\Delta\rho$	Diferença entre massas específicas	$\frac{M}{L^3}$

2.2.2 Procedimento de Análise

A partir dos 11 parâmetros listados, tem-se $m = 11$, dos quais três parâmetros são considerados primários, i.e. comprimento (L), massa (M) e tempo (T), o que resulta em $n = 3$. Assim, o número de grupos independentes é obtido como, $m - n = 11 - 3 = 8$. Ou seja, tem-se:

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8) = 0 \quad (2.10)$$

Onde f é uma função. Escrevendo de uma maneira diferente:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8) \quad (2.11)$$

Três parâmetros arbitrários são tomados dos onze em torno dos quais os outros oito grupos serão construídos:

$$\begin{aligned} \text{Grupo1} : \Pi_1 = & \left\{ (\rho_g)^a (\dot{m}_g)^b (D)^c \right\} (\Delta P) \\ & \left\{ \left(\frac{m}{l^3} \right)^a \left(\frac{m}{t} \right)^b (l)^c \right\} \left(\frac{m}{l^2} \right) = m^0 l^0 t^0 \end{aligned}$$

Equacionando os expoentes:

$$\text{M: } a + b + 1 = 0, \text{ L: } -3a + c - 1 = 0, \text{ T: } -b - 2 = 0$$

Resolvendo, $a = 1$, $b = -2$ e $c = 4$. Então:

$$\Pi_1 = \left\{ (\rho_g)^1 (\dot{m}_g)^{-2} (D)^4 \right\} (\Delta P) = \frac{\rho_g D^4 \Delta P}{(\dot{m}_g)^2}$$

Afim de se explicitar o diferencial de pressão, uma manipulação pode ser feita a partir da função acima. Da equação da continuidade:

$$\dot{m}_g = \rho_g A U_{sg} = \rho_g \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) U_{sg} \quad (2.12)$$

Onde A é a área da seção da entrada do cone e U_{sg} é a velocidade superficial do gás. Em análises dimensionais as constantes podem ser desconsideradas, de modo que pode-se substituir a equação 2.12 em Π_1 , que rearranjando tendo em vista que a pressão dinâmica de escoamento de gás monofásico é $\frac{1}{2} \rho_g U_{sg}^2$, obtém-se:

$$\Pi_1 = \frac{\rho_g D^4 \Delta P}{(\dot{m}_g)^2} = \frac{2 \Delta P}{\rho_g U_{sg}^2}$$

Usando os mesmos procedimentos, os grupos restantes são:

$$\begin{aligned}
\text{Grupo2} : \Pi_2 &= \{(\rho_g)^0 (\dot{m}_g)^{-1} (D)^0\} (\dot{m}_l) = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g} \\
\text{Grupo3} : \Pi_3 &= \{(\rho_g)^0 (\dot{m}_g)^{-1} (D)^1\} (\mu_g) = \frac{\mu_g D}{\dot{m}_g} = \frac{\mu_g}{\rho_g U_{sg} D} \\
\text{Grupo4} : \Pi_4 &= \{(\rho_g)^0 (\dot{m}_g)^{-1} (D)^1\} (\mu_l) = \frac{\mu_l D}{\dot{m}_g} = \frac{\mu_l}{\rho_g U_{sg} D} \\
\text{Grupo5} : \Pi_5 &= \{(\rho_g)^{-1} (\dot{m}_g)^0 (D)^0\} (\rho_l) = \frac{\rho_l}{\rho_g} \\
\text{Grupo6} : \Pi_6 &= \{(\rho_g)^0 (\dot{m}_g)^0 (D)^{-1}\} (d) = \frac{d}{D} \\
\text{Grupo7} : \Pi_7 &= \{(\rho_g)^2 (\dot{m}_g)^{-2} (D)^5\} (g) = \frac{\rho_g^2 D^5 g}{\dot{m}_g^2} = \frac{gD}{U_{sg}^2} \\
\text{Grupo8} : \Pi_8 &= \{(\rho_g)^{-1} (\dot{m}_g)^0 (D)^0\} (\Delta\rho) = \frac{\Delta\rho}{\rho_g}
\end{aligned}$$

Portanto, $\Pi_1 = f_1(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8)$ pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{2\Delta P}{\rho_g U_{sg}^2} = f_1 \left(\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g}, \frac{\mu_g}{\rho_g U_{sg} D}, \frac{\mu_l}{\rho_g U_{sg} D}, \frac{\rho_l}{\rho_g}, \frac{d}{D}, \frac{gD}{U_{sg}^2}, \frac{\Delta\rho}{\rho_g} \right) \quad (2.13a)$$

Explicitando o diferencial de pressão, que representa a leitura primária do medidor tem-se que:

$$\Delta P = \frac{\rho_g U_{sg}^2}{2} f_1 \left(\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g}, \frac{\mu_g}{\rho_g U_{sg} D}, \frac{\mu_l}{\rho_g U_{sg} D}, \frac{\rho_l}{\rho_g}, \frac{d}{D}, \frac{gD}{U_{sg}^2}, \frac{\Delta\rho}{\rho_g} \right) \quad (2.13b)$$

Assim, observa-se que a diferença de pressão lida pelo cone é o produto da pressão dinâmica do gás, se este estivesse escoando em uma fase apenas, pela função f_1 que contém um conjunto de grupos adimensionais. Como mencionado antes, a presença de cada um dos grupos adimensionais na função não revela se de fato esses parâmetros tem algum efeito sobre a leitura. Isso só pode ser afirmado depois de uma análise experimental. A conclusão desta análise, então, é mostrar de quais parâmetros pode-se esperar algum efeito e influência na leitura.

2.2.3 Critério de Chauvenet

Em trabalhos experimentais, um tratamento estatístico adequado é necessário, uma parcela dos valores medidos extrapolam a tendência geral das outras medições. Quando isso acontece, é necessária a definição de um critério para estabelecer um limite para rejeição ou não dos valores extrapolados. Uma parte dos desvios acontecem por falhas de medições e instrumentações, por exemplo. Todavia, outras vezes representam

algum fenômeno físico de interesse. A abordagem que será utilizada aqui para rejeição dos valores fora da tendência será o critério de Chauvenet, que permite determinar se um valor amostral (resultante de uma medida) é discrepante (ou, no termo em inglês, *outlier*) em relação aos demais valores restantes da amostra, supondo-se que esta amostra é retirada de uma distribuição normal.

O critério de Chauvenet assume que a rejeição de um valor medido acontece caso a probabilidade m de se obter um desvio em relação a média seja menor do que $1/2n$, onde n é o número de amostra. A tabela 2 lista valores da razão do desvio em relação ao desvio padrão para vários valores de n conforme este critério.

Número de leituras, n	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão, $\frac{d_{máx}}{\sigma}$
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

Tabela 2 – Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido.

Para a rejeição de pontos medidos duvidosos deve-se obter o desvio padrão e o desvio médio das leituras obtidas. O desvio de cada ponto deve ser comparado com o desvio padrão, pela relação mostrada na tabela 2, e então é possível aplicar o critério observando o número de amostras e os limites de rejeição. Quando o limite não é respeitado, os pontos devem ser descartados e a média e desvio padrão devem ser recalculadas. Esse procedimento não deve ser repetido uma segunda vez.

2.3 Mapa de Escoamento

A técnica para se estabelecer padrões de escoamento conhecidos envolve medidores de referência que medem os montantes de fluido monofásico antes que estes se misturem e formem o escoamento de gás úmido. Assim, a vazão de ar e de água devem ser medidas

separadamente em medidores de referência para que depois que a mistura acontecer possa-se produzir análises controladas e confiáveis. Isso é importante já que uma vez que a mistura é feita, o medidor do trecho de medição registra valores aparentes.

Conhecer o mapa de escoamento operacional da planta é essencial, pois padrão de escoamento tem influência na superestimação (LEEUW, 1997).

A definição dos padrões de escoamentos é baseada em um gráfico estabelecido pela Shell (STEVEN, 2009), mostrado na figura 14, verificando a validade dos dados adquiridos por meio de comparação com este mapa, e analisar como ocorre a distribuição do mapa em termos do parâmetro de Lockhart-Martinelli (X_{LM}).

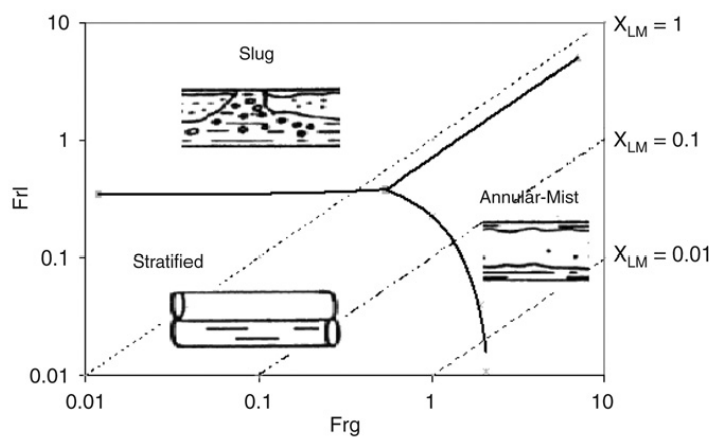


Figura 14 – Mapa de Escoamento da Shell (STEVEN, 2009)

O circuito experimental de escoamentos bi-fásicos utilizado opera em vazões mínimas e máximas de $45 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e $175 \text{ Nm}^3/\text{h}$ respectivamente. Com ajuda do painel de monitoramento e controle do laboratório um *setpoint* foi estabelecido para o Lockhart-Martinelli enquanto se varia valores determinados na vazão de ar. Assim, uma mudança na vazão de ar leva a uma mudança na vazão de água, de forma a manter o parâmetro X_{LM} invariável.

A matriz dos testes executada, dentro dos limites impostos pela instrumentação, está definida na tabela 3, em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli e diferentes vazões de ar (que define o valor do número de Froude do gás - Fr_g)

Tabela 3 – Matriz dos Testes

Lockhart-Martinelli (X_{LM})	Vazão de ar (Nm^3/h)						
0,08	45	76	104	125	149	168	
0,1	48	75	103	127	153	173	
0,15	51	73	100	128	150	170	
0,2	50	75	101	127	151	-	
0,25	50	78	99	128	148	169	
0,3	50	78	98	126	145	-	

Os dados experimentais, obtidos pela execução da matriz da tabela 3, são lançados sobre o gráfico de padrões de escoamento indicado na figura 14, obtendo-se a figura 15.

A figura 15 mostra que um comportamento similar ao do mapa da Shell. Observa-se que os testes realizados permanecem na região de escoamento estratificado, isso é devido as características construtivas da planta.

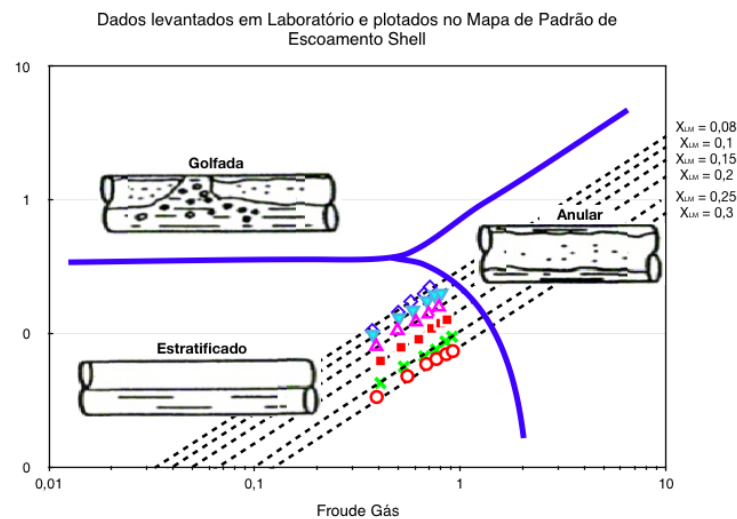
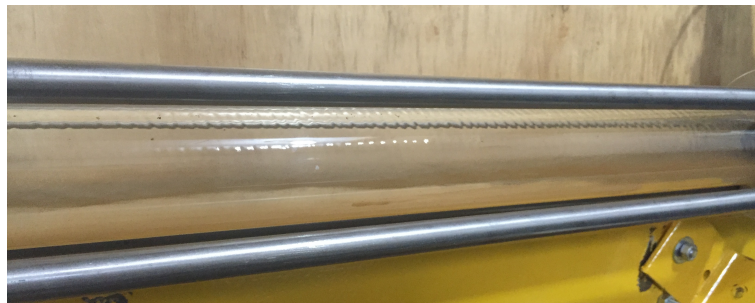


Figura 15 – Dados levantados em Laboratório e plotados no Mapa de Padrão de Escoamento Shell

Em nenhum momento durante os experimentos foram observadas condições diferentes da do padrão de escoamento estratificado. As figuras 16a e 16b mostram exemplos do que foi observado.



(a) Ajuste do perfil



(b) [Comportamento na borda

Figura 16 – Imagens coletadas em laboratório que mostram que as condições de testes permaneceram sob o padrão estratificado

3 Descrição da Planta Experimental e Metodologia

A seguir será caracterizado os componentes e funcionamento do laboratório e métodos.

3.1 O Circuito Experimental de Gás Úmido

O circuito experimental de gás úmido foi construído para atender pesquisas e testes de medidores de vazão sob condições de gás úmido. O circuito conta com um *loop* de circulação dos fluidos que opera num ciclo para criar uma mistura bifásica (ar e água) e retornar essa mistura a um tanque para separação gravitacional. O diâmetro nominal da seção de testes do *loop* é de $1^{1/2}$ polegadas, tendo como fluidos de testes ar e água.

O ar é liberado para o ambiente e captado por um compressor parafuso com potência de 30 HP, sendo estocado num cilindro de pressão, passando por um secador e levado à linha de teste ao passo que a água, que permanece no primeiro estágio de separação bifásica, é bombeada para os seguintes reservatórios, de onde é feita a sucção por meio de uma bomba centrífuga de 2cv e injetada ao trecho de medição, ou trecho de teste, por meio de um misturador. A capacidade máxima do compressor é de $250 \text{ Nm}^3/\text{H}$ e a da bomba centrífuga de $5 \text{ m}^3/\text{H}$. Depois de passar pelo trecho de medição, a mistura retorna ao separador e completa o *loop*. Válvulas de controles, são responsáveis por ajustar as vazões tanto do ar quanto da água, que entrarão no trecho de medição.

Antes que o ar e a água sejam misturados e injetados no trecho de medição suas vazões são registradas em escoamentos monofásicos. Essas vazões são chamadas de 'vazões de referência' e são a partir delas que se verifica o comportamento do medidor tipo cone sob condição de gás úmido. A vazão de referência do ar é medida por um medidor V-Cone, do fabricante McCrometer, de $3/4''$ com beta igual a 0,75 e C_d igual a 0,8. A vazão de referência da água é medida por meio de duas turbinas, do fabricante Tecnofluid, arrajadas em *split range* (isto é, para que se alcance limites de medição que de outra maneira não seria possível). Na faixa inferior de medição encontra-se uma turbina que mede entre 0,0 e $0,3 \text{ m}^3/\text{H}$, com incerteza de 0,12%. Na faixa superior encontra-se uma turbina que mede entre 0,0 e $3,18 \text{ m}^3/\text{H}$, com incerteza de 0,12%.

Válvulas de controle são responsáveis por controlar tanto a vazão do ar quanto a vazão da água, bem como a pressão no trecho de medição. O que se tem é uma válvula de controle disposta na linha de referência do ar, uma na linha de referência da água que

controlam as vazões de referência e uma válvula de controle no fim do trecho de medição que controla a pressão.

As medições de temperaturas e pressões, associadas a cada linha de medição, são realizadas por instrumentos calibrados. Esses medidores tem um papel importante na determinação da massa específica do ar e das vazões em condições padrões de escoamento (20 °C e 101,325 kPa abs)

A figura 17 apresenta um diagrama *P&I* do circuito de gás experimental, indicando os principais elementos de acordo com a norma ISA 5.1-2009.

3.2 Aquisição de Dados

A planta é supervisionada com um sistema automático de aquisição de dados, gerado no ambiente *LabVIEW*, que serve como um supervisor de tudo que acontece no processo. O LabView adquire os dados lidos pelo instrumento e gera arquivos tanto com os dados lidos como com dados calculados a partir dos dados brutos. A figura 18 mostra o supervisor LabView.

3.3 Controle da Planta

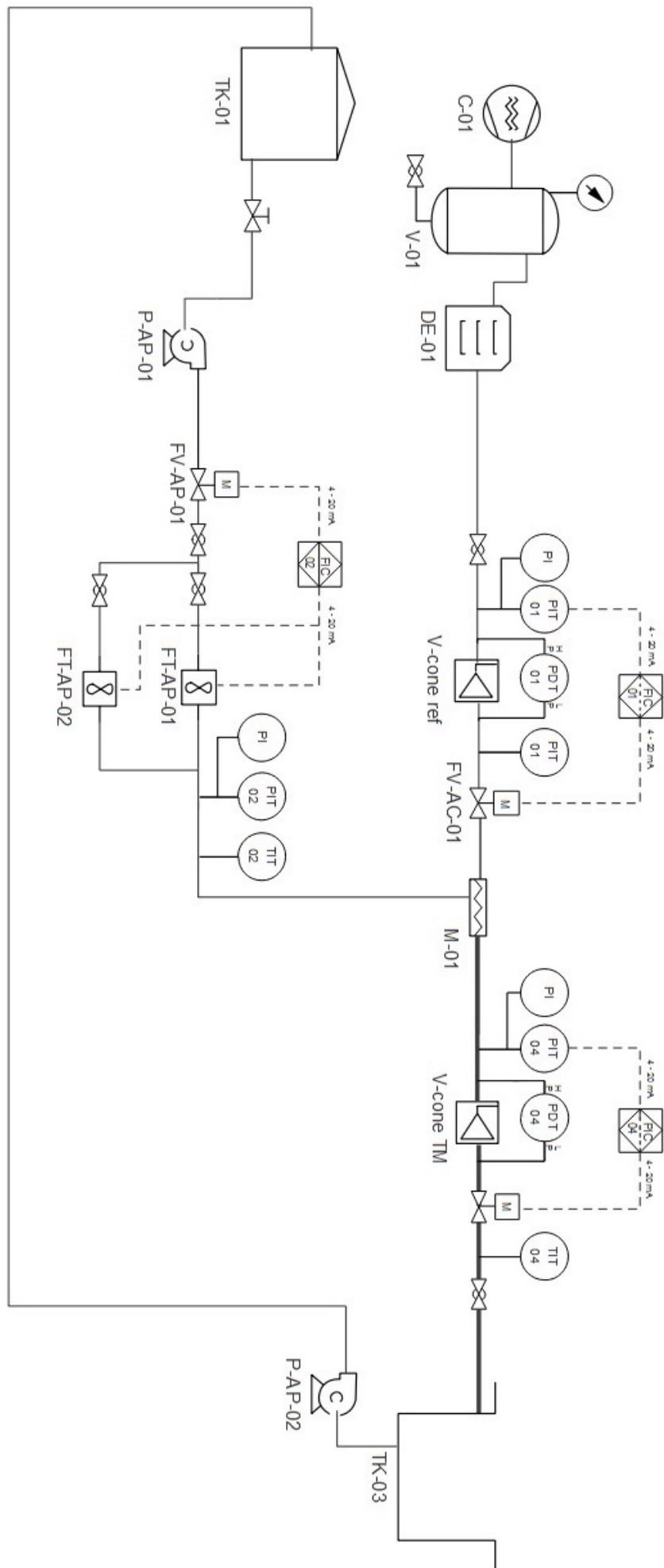
A fim de controlar as variáveis principais, tais como número de Froude do gás (Fr_g), parâmetro de Lockhart-Martinelli (X_{LM}) e da pressão, no trecho de medição que permitem caracterizar o escoamento, um conjunto de algoritmos de PID foi implementado para garantir esse controle. A figura 19 mostra a interface de controle do supervisor.

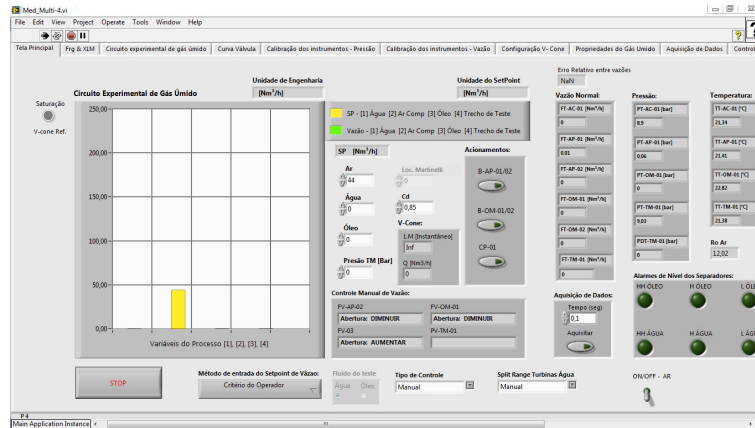
3.4 Metodologia

Tão importante quanto a boa estrutura de um laboratório (aparato, instrumentação, aquisição, etc.) são os procedimentos e ações adotados para a obtenção de resultados confiáveis que permitam uma visualização do problema e análises simplificadas.

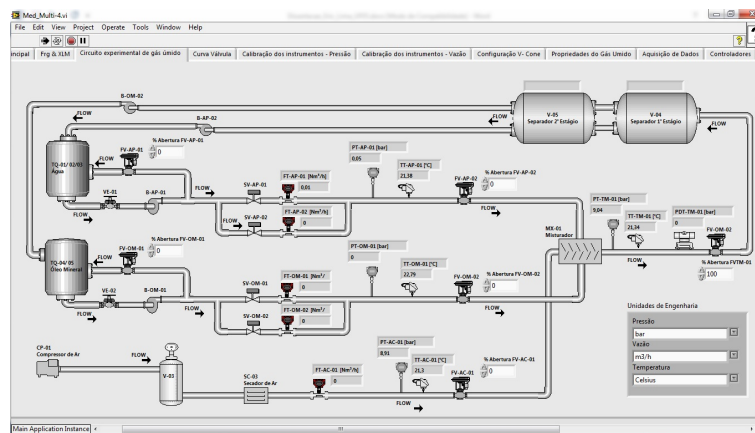
3.4.1 Características do Experimento

Os testes realizados no circuito experimental de medição de gás úmido foram realizados para dois medidores tipo cone, cada um com $1^{1/2}$ ", mas com valores de beta (β) iguais a 0,5 e 0,75. O coeficiente de descarga usado foi obtido no próprio laboratório e é um ponto importante que será discutido em detalhes adiante. Como o objetivo é identificar os parâmetros de influência da performance do medidor mediante escoamento de gás úmido, certas condições são estabelecidas para realização de ensaios. O parâmetro de Lockhart-Martinelli, que define a quantidade de líquido no escoamento, foi variado de 0





(a) Interface de visualização dos dados no supervisor LabView



(b) [Supervisor do Circuito no LabView

Figura 18 – Supervisor LabView

a 0, 3. O outro parâmetro adotado para simplificar a análise foi o número de Froude do gás, que foi variado em 0, 45, 0, 53 e 0, 66. A razão da seleção destes parâmetros reside nas limitações operacionais da planta.

As pressões nas quais os testes foram feitos são 5, 6 e 7 bar. Depois que os parâmetros para cada experimento eram ajustados e se atingia um regime permanente, com temperaturas, pressões e vazões estabilizadas, uma aquisição era iniciada e mantida por um período médio de 30 segundos, garantido que se houvesse alguma irregularidade pontual no experimento, tal poderia ser eliminada. Todos os dados e propriedades foram adquiridos para análises posteriores.

Diante das limitações operacionais da planta, as condições testadas foram o padrão estratificado. O padrão foi constatado por observações experimentais (figuras 16a e 16b).

A tabela 4 sintetiza as informações sobre as condições experimentais:

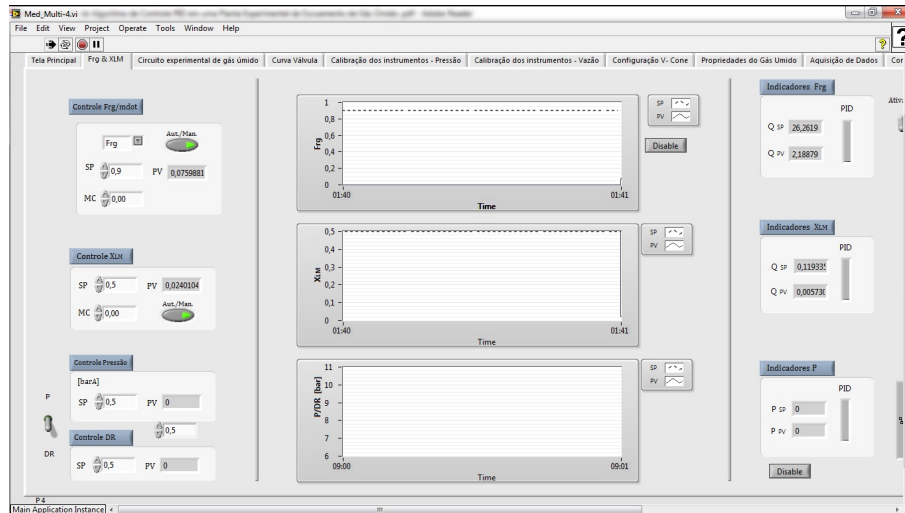


Figura 19 – Interface de controle do supervisor LabView

Tabela 4 – Dados Experimentais

D (mm)	β	Pressão (Bar)	DR	Fr_g	X_{LM}
41,758	0,5 e 0,75	5	0,005	0,3 – 0,66	0 – 0,3
		6	0,007	0,3 – 0,66	0 – 0,3
		7	0,008	0,3 – 0,66	0 – 0,3

3.4.2 Coeficiente de Descarga

Um dos desafios iniciais foi definir qual metodologia deveria ser adotada para certificar que a medição do ar lida na referência, isto é, no escoamento de ar monofásico, seria equivalente no trecho de medição, depois que este estivesse submetido a condição de ar úmido. A dificuldade se deve ao fato de que diferentes medidores quando submetidos a diferentes condições apresentam tendências diversas, sendo assim, a pergunta feita seria: qual é a vazão real no medidor cone de teste se não houvesse líquido? A resposta seria simples caso o medidor de teste e o medidor de referência mostrassem sempre a mesma leitura em condição de ar seco, o que raramente acontece. Então o que se faz é determinar coeficientes de descargas pontuais, ou seja, para cada condição operacional deve-se saber qual é o coeficiente.

O cálculo para os coeficientes de descarga são obtidos a partir da vazão do ar lida pelo medidor de referência e da vazão medida pelo medidor cone no trecho de teste. A equação 3.1 descreve isso:

$$C_d = \frac{Q_{ref}}{\frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \frac{D^2 \beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot Y} \quad (3.1)$$

onde:

- Q_{ref} - Vazão de ar no medidor de referência;
 ρ - massa específica do ar no trecho de medição;
 D - diâmetro interno do v-cone;
 β - razão de diâmetros do v-cone;
 ΔP - diferencial de pressão no v-cone;
 Y - fator de expansão do ar no v-cone.

Pela aplicação desse procedimento na condição de gás seco, foram obtidos os C_d 's para serem aplicados às diversas vazões de operação do trecho monofásico de referência. Conforme pode ser visto na figura 20, o coeficiente de descarga pode ser tomado como independente do número de Reynolds, apresentando um valor médio de 0,764 e um desvio médio de $\pm 1,08\%$.

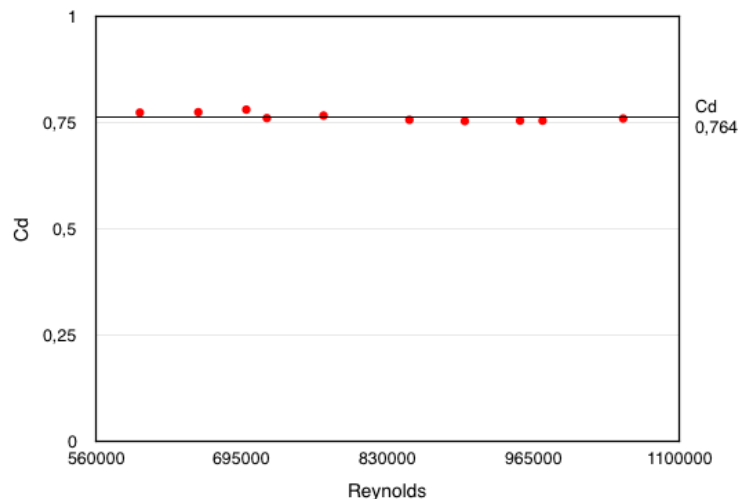


Figura 20 – Coeficiente de descarga Cd do medidor cone do trecho de teste em comparação com a referência, em escoamento monofásico de ar

Na tabela 5 podem ser vistas os C_d 's para condições fixadas (temperatura, pressão, velocidade, vazão massica, etc):

3.4.3 Método para Avaliação de Performance do V-Cone

Afim de avaliar o desempenho do medidor V-Cone da McCrometer sob determinadas condições de escoamento de gás úmido, os seguintes passos foram seguidos:

- Execução de testes para aquisição dos valores de vazões de referência, vazões de testes, pressões, temperaturas, massa específica, e outros valores calculados no software de aquisição *LabView*.
- Tratamento estatístico dos dados coletados pelo critério de Chauvenet. Afim de eliminar valores anômalos, o critério foi aplicado (ver seção 2).

Tabela 5 – Coeficiente de Descarga (Cd) obtido para cada condição de operação dos testes realizados para β de 0,75

Pressão de Teste [bara]	Froude do gás	Reynolds no Trecho de Medição	Coeficiente de Descarga Calculado
5	0,45	600654	0.774
5	0,53	718239	0.761
5	0,66	901480	0.754
5	0,66	952617	0.755
6	0,45	654760	0.775
6	0,53	770729	0.767
6	0,66	973469	0.755
7	0,45	699205	0.781
7	0,53	850189	0.757
7	0,66	1048037	0.760

- Analisar como os parâmetros de Lockhart-Martinelli, número densiométrico de Froude do gás, pressão e beta, influenciam na leitura superestimada do medidor V-Cone em escoamento de gás úmido.
- Avaliação das correlações de Steven e de Leeuw modificada para correção de medição de vazão de V-Cone, como foram descritas na seção 3.5.
- Propor uma nova correlação baseada nos dados levantados no MEDMULTI a partir dos parâmetros apresentados.

Comentar de forma descritiva o método

3.5 Correlações

Quando um medidor deprimogênio é usado para escoamento de gás úmido, o diferencial de pressão produzido é maior do que se o escoamento fosse de gás seco apenas, efeito conhecido como superestimação da vazão (*over reading*). O que acontece é que no gás úmido existe uma fase incompressível (líquido) e uma fase compressível (gás) que provocam um fenômeno de superestimação (*SE*) na leitura, devido ao fato de que quando as duas fases passam juntas pelo elemento estrangulador do medidor, o líquido permanece ocupando o mesmo espaço que ocupava, ou seja, não se comprime, ao passo que o gás necessariamente encontrará maior restrição de passagem e se expandirá ainda mais para passar pela obstrução, que agora não é mais unicamente o elemento deprimogênio, mas também a parcela do líquido ocupando um determinado volume na passagem. Uma vez que a velocidade do gás aumenta, explica-se o motivo de se produzir um diferencial de pressão maior do que aquele que ocorreria caso só houvesse gás. Conforme foi discutido na seção 2.1.6, essa leitura incorreta que o medidor consegue medir é chamada de vazão

"aparente" de massa (equação 2.5), comumente corrigida por uma correlação empírica de correção, SE , que é a razão da leitura aparente pela vazão real de gás no escoamento (equação 2.6).

As correlações mais conhecidas para correção de leitura em medidores V-Cone foram propostas por Steven (STEVEN; KEGEL; BRITTON, 2005; STEVEN, 2009).

3.5.1 Correlação de Steven

A correlação de Steven (STEVEN; KEGEL; BRITTON, 2005), conforme mostrada nas equações que se seguem, foi desenvolvida para escoamento de gás e hidrocarbonetos líquidos leves, por meio de ajustes de dados experimentais feitos em um V-cone de 6 polegadas (6"), com razão de diâmetros beta(β) de 0,55 e 0,75.

$$SE = \frac{1 + AX_{LM} + BFr_g}{1 + CX_{LM} + BFr_g} \quad (3.2)$$

onde,

X_{LM}	Parâmetro de Lockhart-Martinelli
Fr_g	Número de Froude do Gás
A, B e C	Coefficientes determinados a partir do β

Da equação 2.6, obtém-se que a vazão mássica corrigida é dada por:

$$\dot{m}_g = \frac{\dot{m}_{g,aparente}}{\left(\frac{1+AX_{LM}+BFr_g}{1+CX_{LM}+BFr_g}\right)} \quad (3.3)$$

Onde para a razão beta de 0,75 e razão de densidade (DR), $\rho_g/\rho_l \geq 0,027$,

$$A = -0,0013 + \frac{0,3997}{\sqrt{\rho_g/\rho_l}} \quad (3.4)$$

$$B = -0,0420 - \frac{0,0317}{\sqrt{\rho_g/\rho_l}} \quad (3.5)$$

$$C = -0,7157 + \frac{0,2819}{\sqrt{\rho_g/\rho_l}} \quad (3.6)$$

e para $\rho_g/\rho_l < 0,027$, $A = 2,431$, $B = -0,151$, $C = 1$.

3.5.2 Correlação de De Leeuw Modificada

A correlação de De Leeuw modificada é conseguida pela alteração do expoente "n" na correlação de Leeuw (LEEUEW, 1997). Os dados usados para a obtenção dessa correlação foram conseguidos de um V-cone com razão beta (β) de 0,75.

$$SE = -\sqrt{1 + CX_{LM} + X_{LM}^2} \quad (3.7)$$

onde

$$C = \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^n + \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^n \quad (3.8)$$

para $Fr_g \leq 0,5$, $n = 0,143$. para $Fr_g >$, $n = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{0,83}{\exp(0,3Fr_g)}\right)\right)$

3.5.3 Coeficiente de Fluxo de Massa para Duas Fases

Uma abordagem diferente foi feita por He et. al. (HE; BAI, 2014b) em 2014. Contra as propostas feitas até então, que relacionam a superestimação (SE) com o parâmetro de Lockhart-Martinelli (X_{LM}), He et. al. sugeriu que um coeficiente de fluxo de massa para duas fases (K) se relaciona com X_{LM} .

Uma das diferenças do trabalho de He et al., que lida com um coeficiente K , e os trabalhos que lidam com a Superestimação - SE , consiste no fato de que He et al. decide desconsiderar o coeficiente de fluxo de gás - C_d , por uma simples lógica de que esse coeficiente só faz sentido quando se trata de escoamento monofásico de gás. Quando He et al. introduz o coeficiente K , a proposta é de realmente avaliar um escoamento bifásico, retirando parâmetros que são provenientes de medições monofásicas. Esse tipo de abordagem é muito recente e não foi discutida até então, merecendo mais atenção para

futuros trabalhos. A definição do coeficiente K é conforme a equação 3.9:

$$K = \frac{\dot{m}_{bf}}{\dot{m}_{bf,teórica}} \quad (3.9)$$

Na equação 3.9, o termo m_{bf} é a vazão mássica real do gás úmido, que contabiliza tanto a contribuição do gás quanto a do líquido:

$$\dot{m}_{bf} = \dot{m}_g + \dot{m}_l \quad (3.10)$$

A vazão mássica teórica ($m_{bf,teórica}$) do escoamento parte da suposição de que o gás úmido se comporta similarmente ao escoamento de uma fase única. Portanto, de acordo com as equações de continuidade e de Bernoulli, a equação teórica para o escoamento de duas fases é escrita como se segue:

$$\dot{m}_{bf,teórica} = \frac{A\beta^2\sqrt{2\rho_{bf}\Delta P_{bf}}}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (3.11)$$

Os fatores que influenciam na medição de gás úmido são muito mais complexos do que para o escoamento de gás seco. Um dos fatores mais importantes e talvez o mais complexo é a massa específica que deve ser adotada para as duas fases em escoamento (ρ_{bf}), pois é influenciada pelo padrão de escoamento, as frações de vazios e outros fenômenos, sendo extremamente difícil de ser determinada. Dessa forma, a massa específica do gás úmido (ρ_{bf}) é geralmente assumida como sendo de gás seco (ρ_g). Essa simplificação é uma fonte de erro de medição significativa, todavia necessária, já que se conhece tão pouco dos fenômenos envolvidos. Desse modo, tem-se:

$$\dot{m}_{bf,teórica} = \frac{A\beta^2\sqrt{2\rho_g\Delta P_{bf}}}{1-\beta^4} \quad (3.12)$$

He et. al. (HE; BAI, 2014b) observou por meio de dados experimentais que o coeficiente K é afetado principalmente pelo parâmetro de Lockhart-Martinelli (X_{LM}), a razão de densidades (DR), o número densiométrico de Froude do gás (Fr_g), e a razão de diâmetros para uma dada geometria e material do medidor tipo cone. Na figura 21, é mostrado a influência de X_{LM} sobre K , que exibe uma relação relativamente linear e pode ser expressa na seguinte forma:

$$K = kX_{LM} + b \quad (3.13)$$

Onde k é coeficiente angular da expressão e b o coeficiente linear. Quando não há líquido no escoamento, de acordo com as equações 3.9, 3.10 e 3.11, b é obtido por se

igualar ao coeficiente de fluxo de gás seco:

$$b = C_{dg}\epsilon \quad (3.14)$$

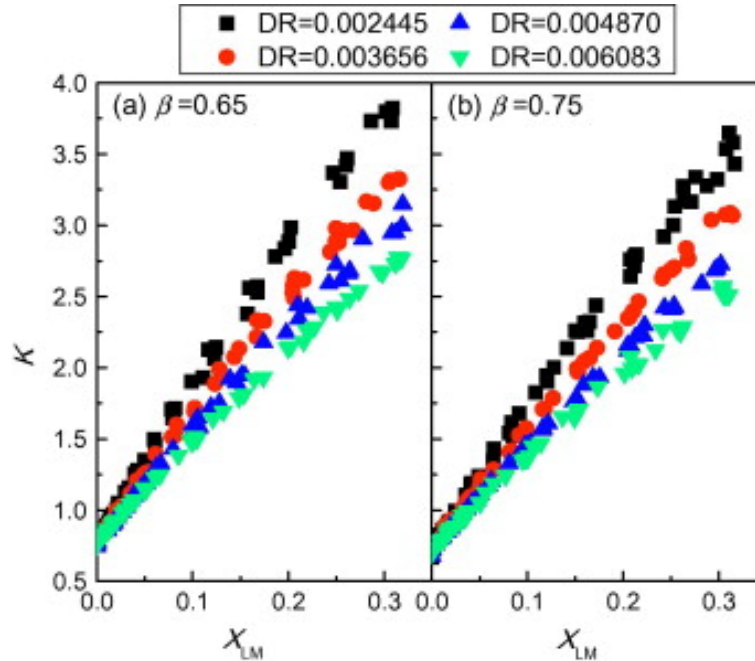


Figura 21 – Influência de X_{LM} sobre K (a) $\beta = 0.65$ e (b) $\beta = 0.75$ (HE; BAI, 2014b)

He et. al. também demonstrou que o coeficiente de inclinação da expressão 3.13, k , é dependente da razão de densidades (DR) e do número densiométrico de Froude do gás (Fr_g) que podem ser vistos nas figuras 22 e 23. Para todos os parâmetros mantidos constantes, foi visto que K aumenta com uma diminuição do DR e assim, a inclinação, k , diminui com o aumento de DR . A influência do número densiométrico de Froude não foi tão óbvia. Mas foi observado que ao aumentar Fr_g , K tende a diminuir com os outros parâmetros mantidos constantes.

Com base nessas observações, He et. al. concluiu que o coeficiente angular (k) do gráfico " $K \times X_{LM}$ " diminui tanto com o aumento de DR como com o de Fr_g . Assim, o modelo proposto é mostrado na equação 3.15:

$$k = a_0 + \frac{a_1}{DR} - a_2 Fr_g \quad (3.15)$$

Uma vez que essa correlação não leva em consideração o parâmetro β , cada um dos coeficientes devem ser determinados para um V-Cone com seu próprio β . No trabalho de He et. al. foi proposto uma solução para os β 's de 0,65 e 0,75. Para o V-Cone com β igual a 0,65 o coeficiente de fluxo de massa para duas fases foi $K_{0,65}$:

$$K_{0,65} = \left(4,1031 + \frac{0,01568}{DR} - 0,1891 Fr_g \right) X_{LM} + 0,8214 \quad (3.16)$$

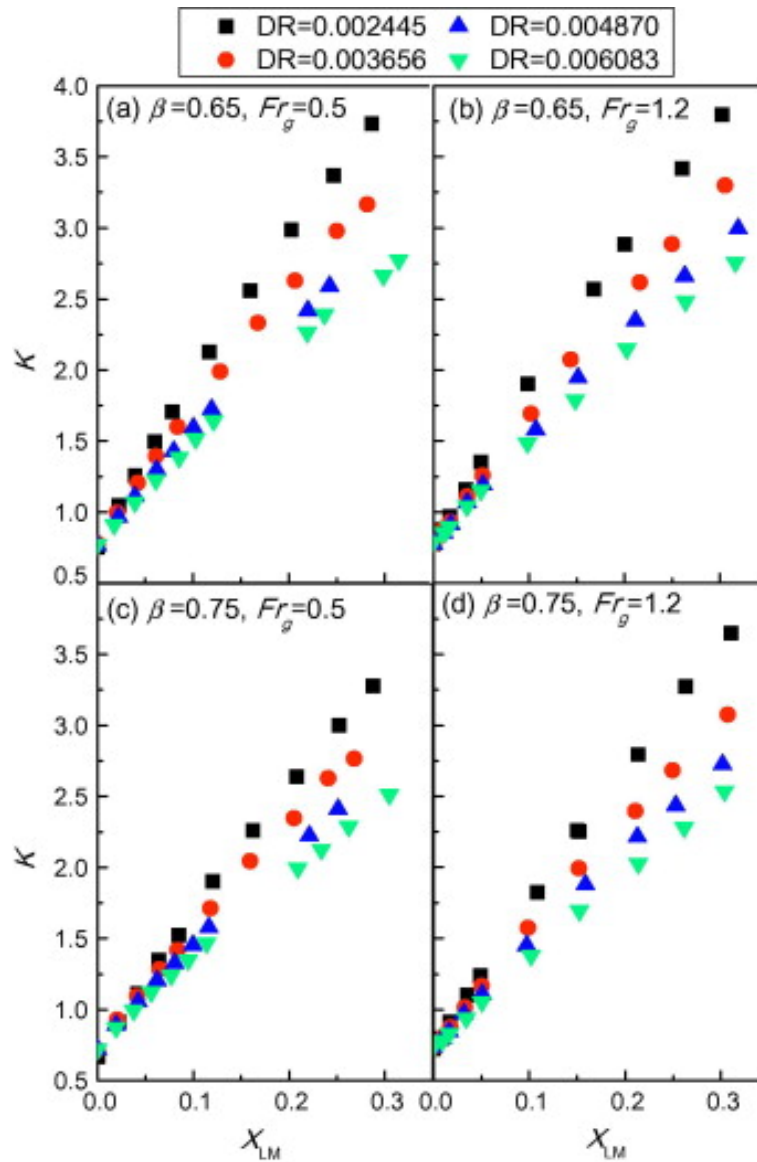


Figura 22 – Influência do DR sobre K (a) $\beta = 0.65, Fr_g = 0.5$; (b) $\beta = 0.65, Fr_g = 1.2$; (c) $\beta = 0.75, Fr_g = 0.5$ e (d) $\beta = 0.75, Fr_g = 1.2$ (HE; BAI, 2014b)

Para o V-Cone com β igual a 0,75 o coeficiente de fluxo de massa para duas fases foi $K_{0,75}$:

$$K_{0,75} = \left(3,9104 + \frac{0,01339}{DR} - 0,05151Fr_g \right) X_{LM} + 0,7642 \quad (3.17)$$

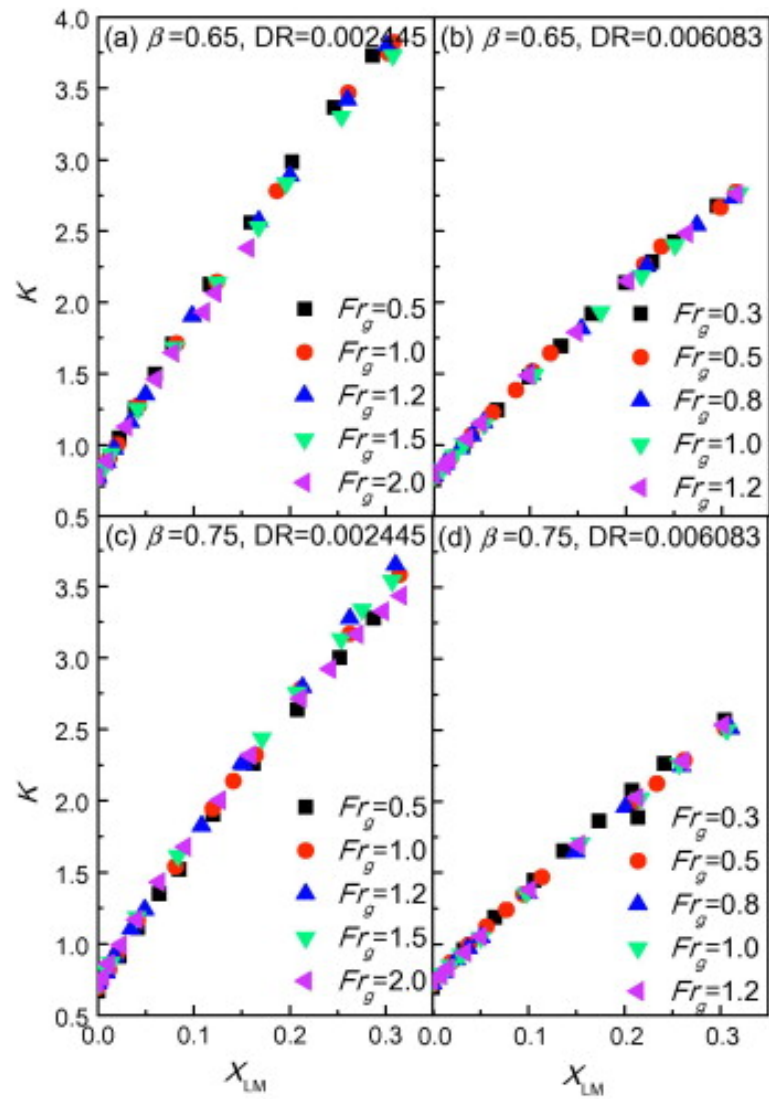


Figura 23 – Influência do Fr_g sobre K (a) $\beta = 0.65, DR = 0.002445$; (b) $\beta = 0.65, DR = 0.006083$; (c) $\beta = 0.75, DR = 0.002445$ e (d) $\beta = 0.75, DR = 0.006083$ (HE; BAI, 2014b)

4 Resultados e Análises

Os dados brutos, obtidos em campanha com medidor cone invertido de $\beta = 0,75$, foram tratados pelo critério de Chauvenet, e então foi determinada a superestimação da medição devido à presença de líquido.

Na figura 24 são apresentados os dados obtidos na planta em forma da superestimação - SE das leituras de vazão de ar em relação ao medidor de referência, em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli.

O aumento do parâmetro de Lockhart-Martinelli indica um aumento da quantidade de líquido no escoamento de ar e, conforme esperado, é observado um aumento na superestimação da medição. Foram obtidos erros de até 40% na leitura para valores de Lockhart-Martinelli de 0,3.

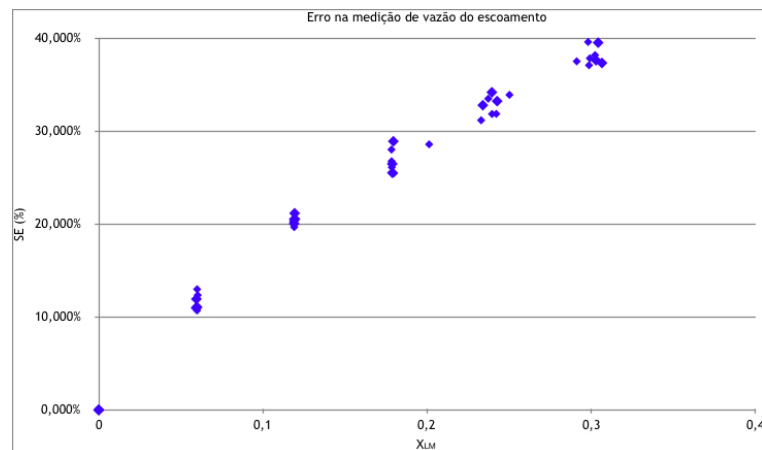


Figura 24 – Superestimação na medição de gás úmido a partir dos dados obtidos em laboratório.

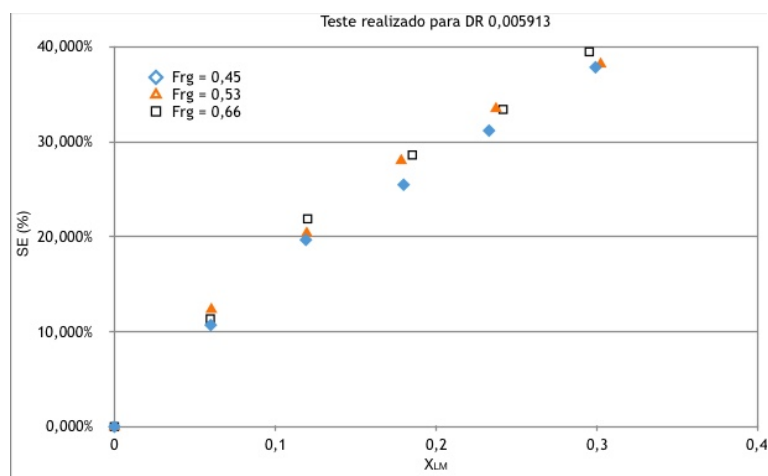
A figura 24 apresenta uma dispersão dos dados coletados. Essa dispersão é devida às diferentes condições do experimento que foram estabelecidas pela metodologia. O fato de ocorrer tal dispersão sugere que outros parâmetros, diferentes de Lockhart-Martinelli têm influência na leitura do medidor sob as condições de gás úmido. Logo, é necessária uma avaliação dos possíveis parâmetros que possam estar influenciando nessa dispersão.

As figuras 25a e 25b apresentam a influência do número de Froude no comportamento do medidor cone invertido em duas razões de densidade - DRs distintas, com valores de 0,00591 e 0,00830 respectivamente.

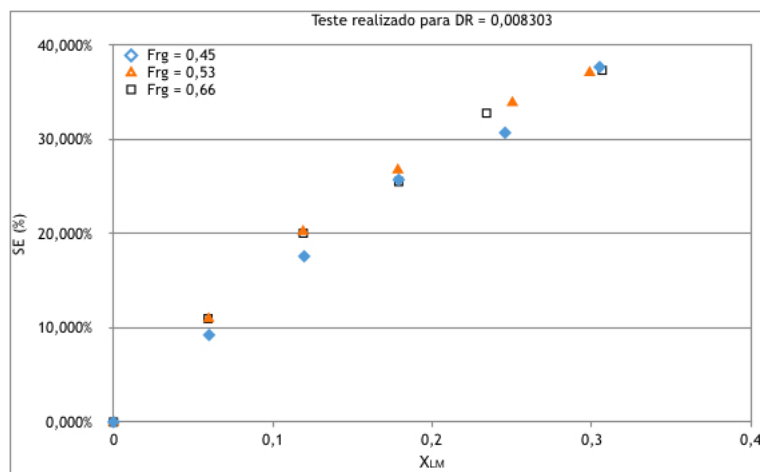
É percebido um aumento de erro (ou superestimação) como aumento no número de Froude. Em todos os testes realizados neste estudo, as velocidades não eram suficientemente altas para que se alcançasse um regime de escoamento além do padrão estratificado

ondulado. Nesse regime, a maior parte do líquido se encontra na parte inferior da tubulação.

Em condições de regime de escoamento estratificado e estratificado ondulado, o contato interfacial entre o a fase gasosa e a fase líquida é relativamente menor que o contato interfacial dos escoamentos em regime anular e névoa, já que nessas condições, a fase líquida está dispersa em partículas menores. Então, em escoamento estratificado e estratificado ondulado, a variação da área de contato entre as duas fases, se altera muito pouco com a variação do número de Froude. Quanto menor a interface entre as fases, menor a perda de carga imposta ao escoamento. Por esse motivo, apesar de haver um aumento da superestimação concomitante ao Froude, esse aumento não é tão significativo já que não há um aumento significativo da interface de contato das fases.



(a) Influência do Fr_g para um DR de 0,005913

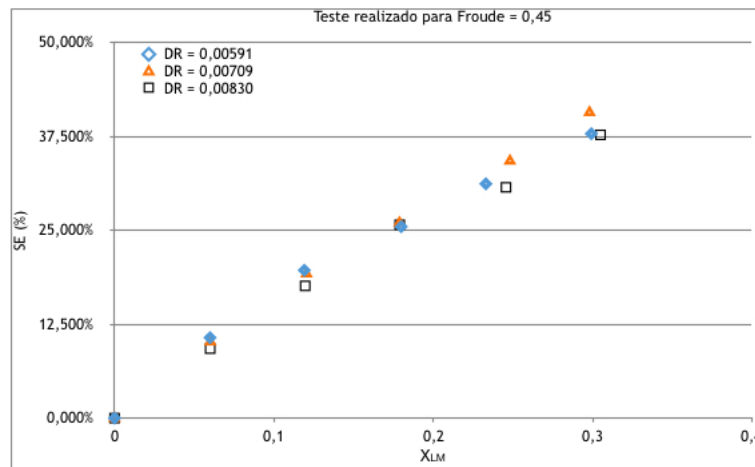


(b) [Influência do Fr_g para um DR de 0,008303

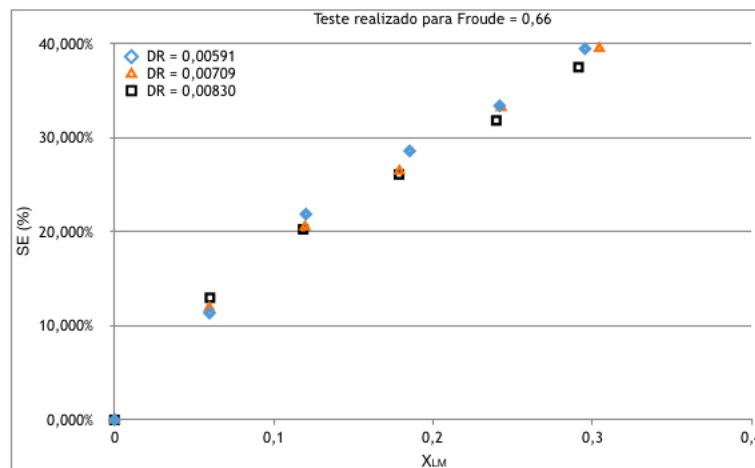
Figura 25 – Influência do Fr_g sobre a superestimação da leitura de gás

As figuras 26a e 26b mostram como a razão de densidades - DR modifica a leitura do medidor tipo cone para dois valores distintos de Froude, sendo eles $Fr_g = 0,45$ e $0,66$ respectivamente. Pode ser visto que um aumento de DR acarreta em uma diminuição do erro ou superestimação. Em pressões mais altas, o gás tende a carrear o líquido de forma

mais efetiva, diminuindo a fração de área ocupada pelo líquido e dessa forma reduzindo a superestimação.



(a) Influência do DR para um Fr_g de 0,45



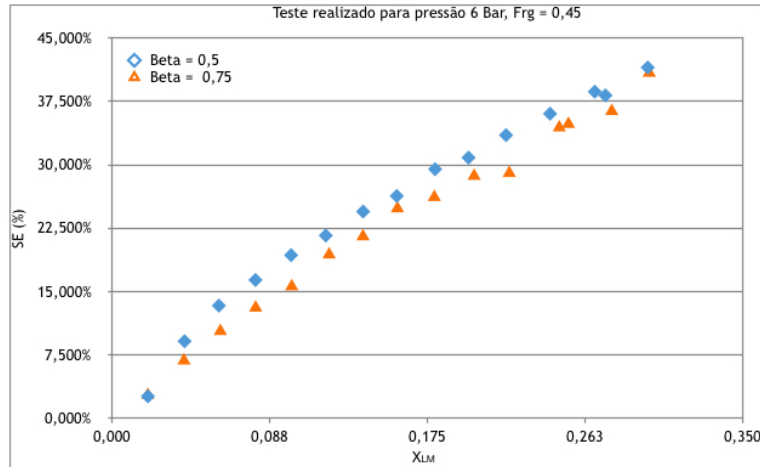
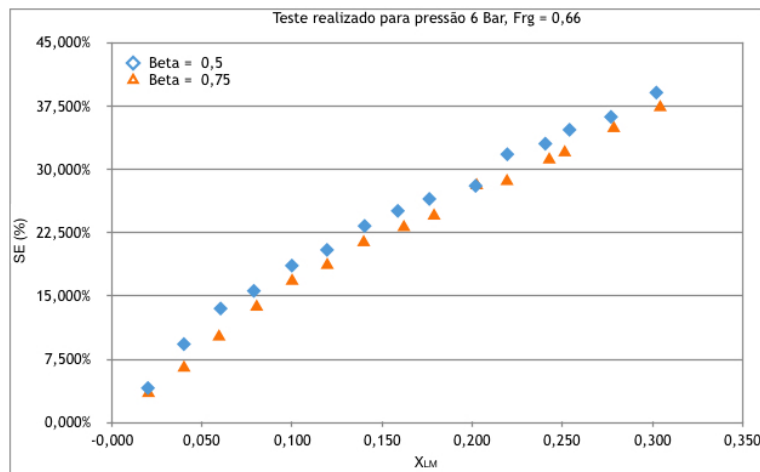
(b) [Influência do DR para um Fr_g de 0,66

Figura 26 – Influência do Fr_g sobre a superestimação da leitura de gás

Os dados das figuras 27a e 27b mostram como o parâmetro beta - β influencia na Leitura do medidor. Um aumento no beta (β) implica em uma diminuição da superestimação.

Diante dos resultados obtidos e apresentados acima e análise dimensional de Buckingham-Pi (seção 2.2), observa-se que uma proposta de correlação adequada para correção da superestimação seria aquela que leva em consideração o parâmetro de Lockhart-Martinelli (X_{LM}), a razão de densidades (DR), número de Froude do gás (Fr_g) e a razão beta (β).

Visto que o parâmetro β é uma característica geométrica construtiva e individual de cada medidor e que não é tarefa fácil correlacionar tantos parâmetros em uma mesma equação, o desenvolvimento das correlações tendem a considerar X_{LM} , DR e Fr_g para cada Cone com seu respectivo β . Neste trabalho serão avaliados resultados para um Cone

(a) Influência do β para um Fr_g de 0,45 e um DR de 0,00709(b) [Influência do β para um Fr_g de 0,66 e um DR de 0,00709Figura 27 – Influência do Fr_g sobre a superestimação da leitura de gás

de $\beta = 0,75$.

4.1 Validação de Correlações Anteriores

No capítulo 3 foram apresentadas três correlações que avaliam a influência da presença de líquido no escoamento de gás com base na superestimação da medição- SE : i) a correlação de Steven (STEVEN; KEGEL; BRITTON, 2005) e ii) a correlação modificada de De Leeuw [ref], e iii) uma correlação mais recente desenvolvida por He et. al. que mostra a influência do líquido com base em um coeficiente de fluxo de massa para duas fases - K.

A correlação de Steven (eq. 3.2), discutida na seção 3.5.1, foi desenvolvida por regressão, usando dados de experimentos de um medidor V-Cone com diâmetro de 6 (seis) polegadas, razão beta de 0,75 e para escoamento de gás e hidrocarbonetos leves no estado líquido. A correlação de De Leeuw modificada (eq. 3.7) discutida na seção 3.5.2, também foi desenvolvida para um V-Cone de beta igual a 0,75, com gás e hidrocarbonetos leves ou

gás e água. As correlações dadas pelas equações 3.2 e 3.7 foram aplicadas sobre os dados experimentais no presente trabalho, quando foi avaliada a eficácia de cada para corrigir a superestimação.

Na figura 28 é visualizada a comparação entre a superestimação experimental e as estimativas por correlação empírica para os dados experimentais. A correlação de He et. al. (HE; BAI, 2014b) será discutida separadamente, já que não trata com a superestimação - SE , mas introduz um coeficiente de fluxo de escoamento bifásico - K , que substitui o coeficiente de descarga monofásico do medidor cone.

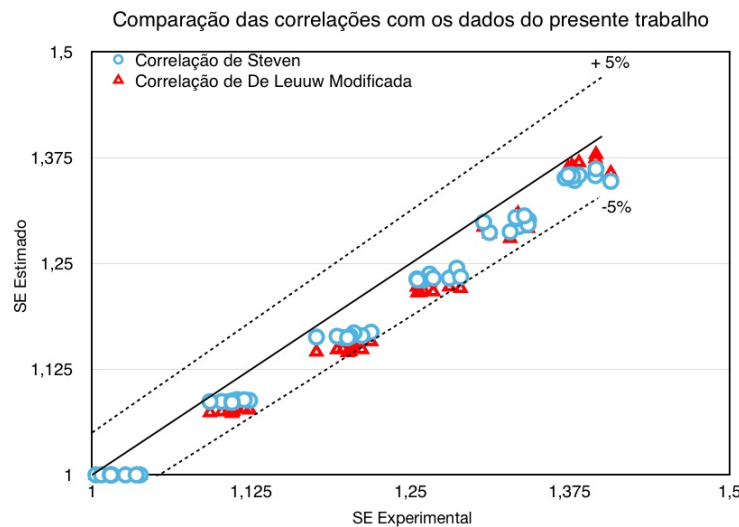


Figura 28 – Uso das correlações de Steven 3.2 e de Leeuw modificada 3.7 no presente trabalho para efeito de comparação

Como pode ser visto na figura 28, ambas as correlações estimam a superestimação - SE com diferenças entre -5% a 0% de maneira uniforme na faixa avaliada.

Por sua vez, na figura 29 é visualizada a aplicação das correlações de Steven (eq. 3.2) e Leuw (eq. 3.7) aos dados originais de He et al. Observa-se que é obtido um comportamento semelhante para a correção dos dados de He. Observa-se também que os dados de He permitem a visualização de uma faixa mais ampla de superestimação, apresentando uma maior dispersão dos dados na faixa de superestimação acima de 1,4.

Na figura 29 é visualizado que uma parte significativa dos resultados corrigidos pelas correlações de Steven e Leuw estão compatíveis com os resultados do presente trabalho quando comparada com a figura 28. Todavia, parte dos dados apresentam erros inferiores a -5% , que pode ser explicado pela região de atuação da planta do presente trabalho, que é significativamente mais limitada que a planta de He. A capacidade do compressor, bomba, medidores de vazão, transmissores de pressão e pressão diferencial, diâmetro das tubulações e outros fatores em conjunto, contribuiriam para que a planta de testes só operasse em uma faixa mais restrita de testes. A planta atual não opera para valores de Fr_g inferiores a 0,4 e superiores a 0,7. Sendo que He realizou testes para valores

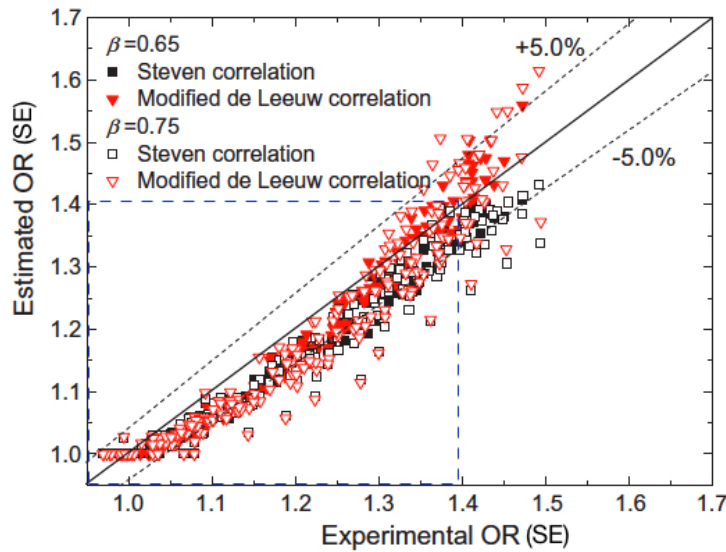


Figura 29 – Uso das correlações de Steven 3.2 e de Leeuw modificada 3.7 no trabalho de He. Fonte: He et al. (HE; BAI, 2014b)

de Fr_g entre 0,3 e 2,0. Ademais, devido à configuração de saída do circuito de teste, a pressão mínima possível para testes era de 5 barA, que limita o DR mínimo a 0,005, ao passo que os testes de He eram realizados para um DR mínimo de cerca de 0,002. Devido a essas diferenças impostas pelas plantas de testes, atribui-se as diferenças dos resultados.

Embora para os dados testados nesse estudo as correlações de Steven e de Leuw modificada retonassem valores entre 0% e -5%, nos valores testados por He é observado que as correlações não atendem tão bem. He et al. (HE; BAI, 2014b) atribui o fato às seguintes razões: (1) as correlações foram desenvolvidas para escoamentos de gás e hidrocarboretos leves, enquanto seu trabalho faz uso de ar e água. A influência das propriedades na resposta de medição é discutida por Steven (STEVEN, 2009); (2) a pressão de operação para desenvolver as correlações são de 15-60 bar, que é bem acima daquela usada em seu trabalho, não podendo ser axtrapoladas sem uma influência significativa; (3) Uso de V-cone com diâmetro de $1^{1/2}$ " com razão beta de 0,65 e 0,75. Estudos mostram que tanto a razão de diâmetros, quanto o diâmetro influenciam na resposta (STEVEN, 2009); (4) medidores V-Cone não são padronizados como as placas de orifício, podendo ter diferenças representativas nos detalhes de construção (por exemplo, ângulo de abertura do cone frontal ou traseiro). Tais diferenças causam desvios de medição da superestimação.

4.1.1 Performance da Correlação de Steven

Na figura 30 são apresentados os valores da superestimação do medidor e suas respectivas correções pela aplicação da correlação de Steven (eq. 3.2). Uma correlação idealizada projetaria todos os valores superestimados ao valor de erro (SE) igual a 0%, uma vez que seria capaz de corrigir o valor medido para o valor de referência. Quando os

valores dos erros corrigidos ficam superiores a 0%, significa que a correlação está corrigindo a vazão do gás para um valor maior do que o necessário, superestimando, portanto, o erro corrigido. Por outro lado, quando os valores dos erros corrigidos são inferiores a 0%, significa que a correlação está corrigindo a vazão do gás a um valor menor do que o necessário, logo, subestimando o erro corrigido.

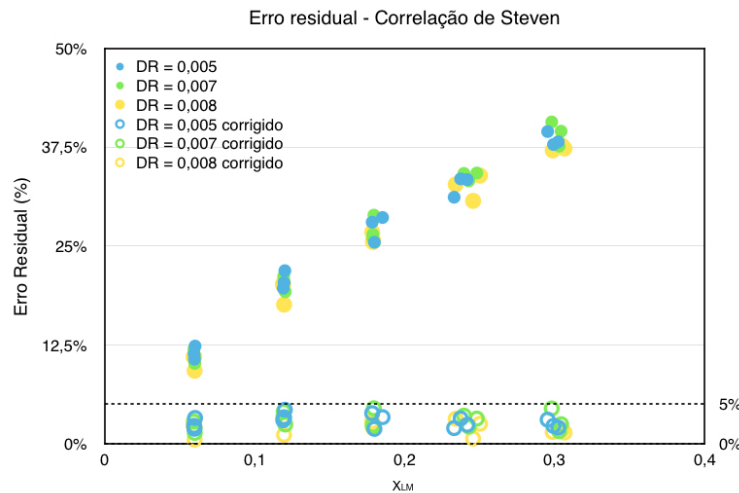


Figura 30 – Superestimação das medidas e suas correções pelo uso das correlações de Steven

Observa-se que a correlação proposta por Steven para a correção de vazão em um V-Cone, com razão $\beta = 0,75$ tende a superestimar a correção. Os erros residuais, após a correção de Steven, ainda prevaleceram entre 0% e +5%, independente das razões de densidades – DR avaliadas.

4.1.2 Performance da Correlação de Leuw Modificada

Na figura 31 são apresentados os valores da superestimação do medidor e suas respectivas correções pela aplicação da correlação de De Leuw (eq. 3.7) corrigida.

Observa-se que a correlação de De Leuw modificada para um V-Cone com razão $\beta = 0,75$ se apresenta, graficamente, de maneira similar à correlação de Steven. Essa correlação tende a superestimar a correção. Os erros residuais após a correção ainda prevaleceram relativamente altos, ficando entre 0% e +6%, independente das razões de densidades – DR avaliadas.

4.1.3 Performance da Correlação de He

A aplicação dos dados experimentais na correlação de He, que se baseia em um coeficiente (K) de fluxo de massa para duas fases (eq. 3.13), também foi avaliada para correção do erro percebido no cone em condições de gás úmido. A figura 32 mostra uma

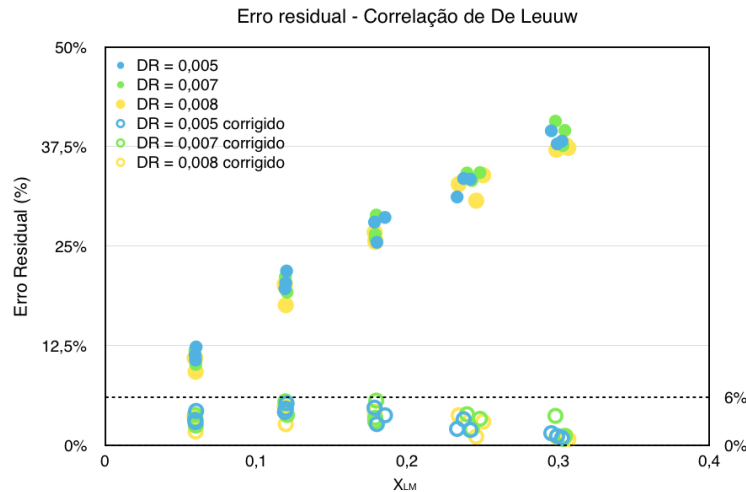


Figura 31 – Superestimação das medidas e suas correções pelo uso da correlação de Leuw Modificada 3.7

comparação entre os coeficientes K' s obtidos experimentalmente e teoricamente para uma vazão bifásica.

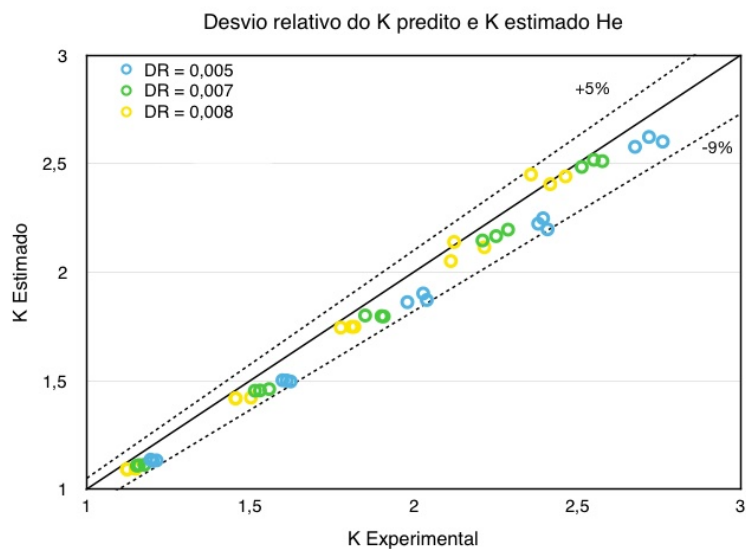


Figura 32 – Comparação dos valores de K experimentais com os valores estimados por He.

Como pode ser visto, via de regra, a correlação de He subestima o valor de K . Parte dos valores alcançam um erro relativo mínimo de até -9% . A mesma comparação foi feita por He com os dados obtidos por ele (HE; BAI, 2014b), conforme mostrado na figura 33.

Na figura 33 os erros alcançam o valor máximo de $\pm 5\%$. Essas diferenças se encontram mais ajustadas à sua correlação. Esse comportamento pode ser explicado pela ampla faixa de condições utilizada naquele trabalho, mais abrangente do que o presente estudo. Também podem existir diferenças de calibração nos instrumentos.

Por outro lado, conforme proposto por He et al. para um medidor tipo venturi

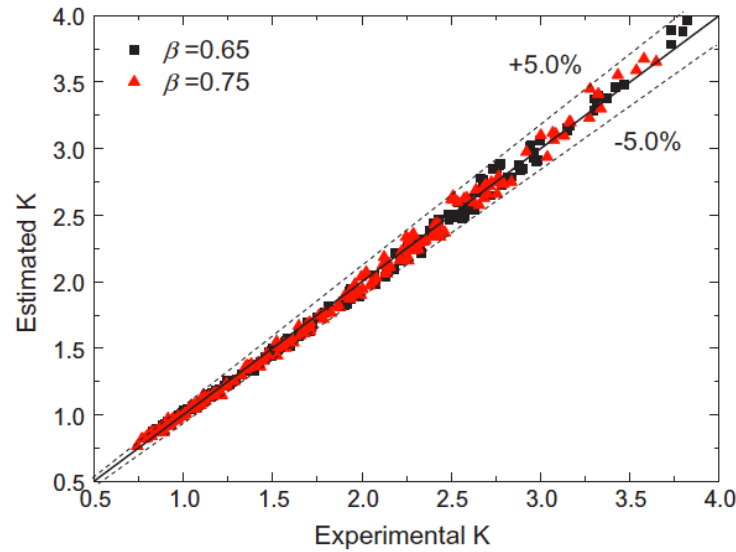


Figura 33 – Comparação dos valores de K experimentais com valores de K estimados, feita por He.

(HE; BAI, 2014a), combinando as equações 2.7, 3.9, 3.10 e 3.11, obtém-se o modelo da equação 4.1. Agora, a vazão corrigida pela equação 4.1 é então comparada com a vazão de referência para se estimar o erro residual na medição ($ER(\%)$).

$$(m_{g,corrigida})_{He} = \frac{K \frac{A\beta\sqrt{2\rho_g\Delta P_{bf}}}{1-\beta^4}}{1 + \frac{X_{LM}}{\sqrt{DR}}} \quad (4.1)$$

A vazão mássica do gás corrigida pela equação 4.1, quando comparada com a de referência, permite uma avaliação do erro residual. Na figura 34 são apresentados os valores da superestimação do medidor e suas respectivas correções pela aplicação da correlação de He (eq. 4.1).

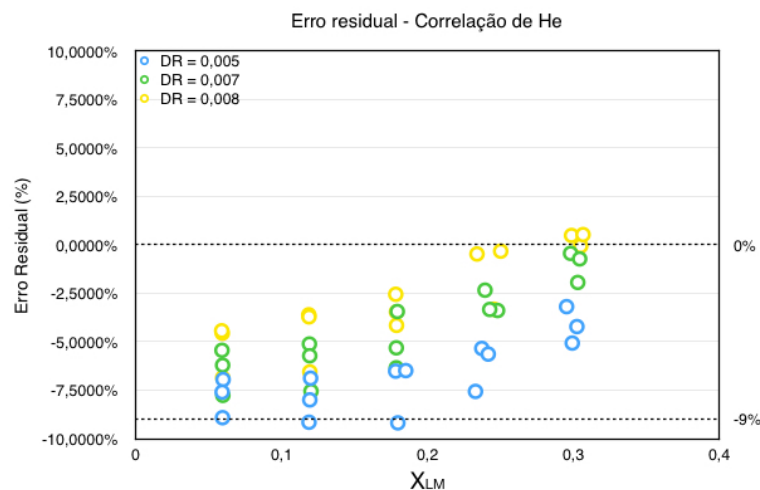


Figura 34 – Superestimação das medidas e suas correções pelo uso das correlações de He

Na proposta desenvolvida por He para correção de vazão de gás seco em um V-Cone com razão $\beta = 0,75$, os erros residuais após a aplicação da correção equação 4.1, prevaleceram relativamente altos, ficando entre 1% e -9%. Esta correlação tende, então, a subestimar os valores preditos.

Na figura 32 é visto que os valores de K estimado em relação aos valores de K experimental, apresentam desvios semelhantes àqueles vistos na figura 34.

O coeficiente K é desenvolvido para uma correção da vazão mássica do escoamento bifásico, ou seja, da soma das massas de líquido e de gás no seu estado real. A figura 35 mostra que mesmo se baseando nesta abordagem os desvios permanecem semelhantes.

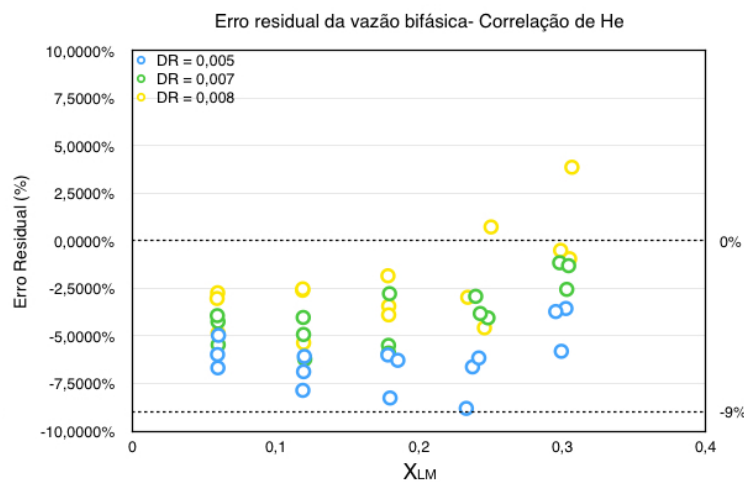


Figura 35 – Superestimação das medidas do escoamento bifásico e suas correções pelo uso das correlações de He

Mesmo para uma correção aplicada especificamente à vazão mássica do gás úmido (duas fases), a correção de He mostra performance inferior às correlações propostas por Steven (STEVEN; KEGEL; BRITTON, 2005) e a de De Leuw modificada por Steven (STEVEN, 2009).

Assim, conclui-se que, embora as condições usadas por He para o desenvolvimento da correlação do coeficiente K sejam similares às condições do presente trabalho, quando a correção dos dados foi aplicada, observou-se que sua performance de correção foi inferior às correções propostas por Steven e de Leuw Modificada.

4.1.4 Coeficiente de He Modificado

Nessa seção está sendo proposto o uso de um coeficiente K^* , cuja definição é proposta por He et. al. (HE; BAI, 2014b) para K , porém distinguindo-se um do outro através do modelo para obtenção da correlação, que apresenta aspectos diferentes. Conforme discutido na seção 3.5.3, He et al. observou que o comportamento do coeficiente K com o parâmetro de Lockhart-Martinelli apresenta forma da equação 3.13. Na equação 3.13, o

coeficiente linear b da equação tem o valor do coeficiente de fluxo de gás seco do medidor. Também foi mostrado que o coeficiente angular k é dependente dos parâmetros X_{LM} , Fr_g e DR , adequado a cada valor de β , sendo expresso pela equação 3.15.

Foi observado que o efeito do número densimétrico de Froude afeta o coeficiente angular k quadraticamente como pode ser visto na figura 36. Assim, neste trabalho, propõe-se um modelo de k^* ajustado quadraticamente, segundo a equação 4.2.

$$k^* = a_0 + \frac{a_1}{DR} - a_2 Fr_g^2 \quad (4.2)$$

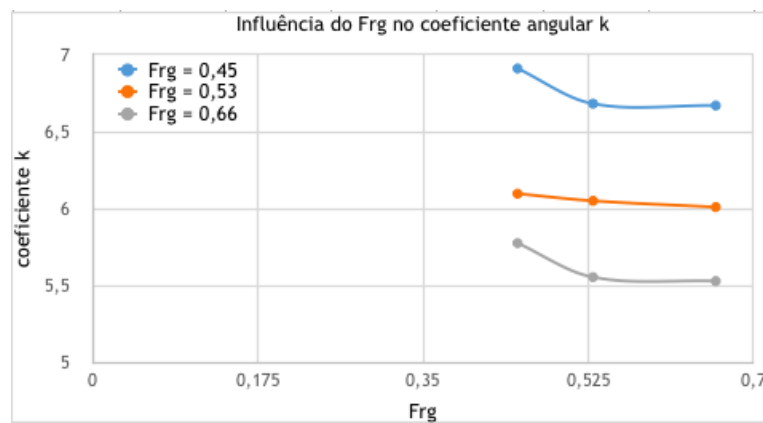


Figura 36 – Influência do Fr_g no coeficiente angular k

Quando essa abordagem foi aplicada, os novos coeficientes da correlação obtidos por regressão linear passaram a ser mais expressivos. Usando os dados experimentais obtidos nesse trabalho e ajustando-os, a equação do K^* desenvolvida para $\beta = 0,75$ passa a ser:

$$K_{0,75}^* = \left(3,2479 + \frac{0,02339}{DR} - 0,8425 Fr_g^2 \right) X_{LM} + 0,7639 \quad (4.3)$$

O novo modelo de coeficiente K^* , calculado utilizando a correlação 4.3, foi então usado para estimar os novos erros residuais. A figura 37 mostra uma comparação dos valores experimentais de K^* com os valores de estimados segundo a equação 4.3.

Quando esta nova correlação foi aplicada aos dados experimentais, a comparação entre K^* estimados e experimentais foram melhor ajustados, ficando entre -5% e $+5\%$. Na figura 38 são apresentados os valores dos erros residuais da correção pela aplicação da correlação modificada de He (eq. 4.3).

Nesta nova proposta para correção de vazão do V-Cone com $\beta = 0,75$, os erros residuais após a aplicação da correção prevaleceram relativamente altos, ficando entre -6% e 5% .

Da mesma forma como ocorreu com a correlação de He original, a modificada

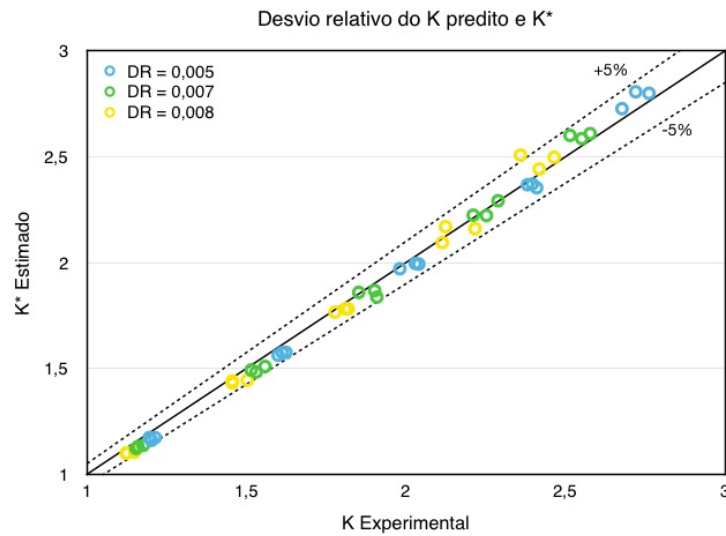


Figura 37 – Comparação dos valores de K experimentais com os valores estimados de K^* .

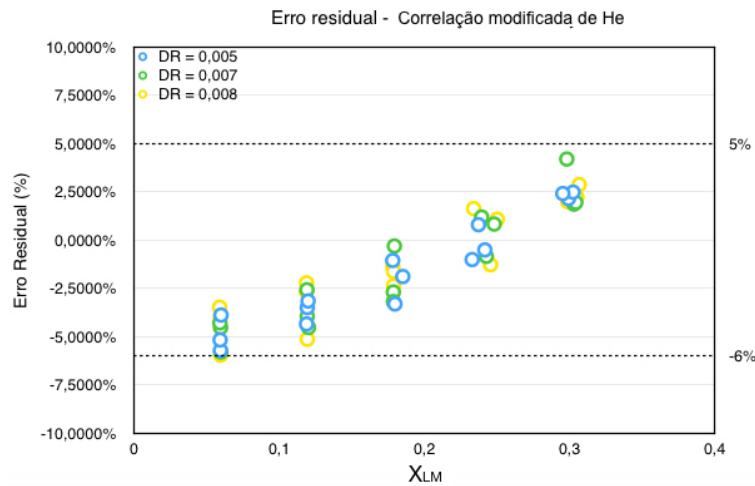


Figura 38 – Superestimação das medidas e suas correções pelo uso da correlação modificada de He

continua apresentando resultados inferiores quando comparada com as propostas Stevem e Leuw.

O erro residual da vazão de gás corrigida, apesar de ter ficado melhor distribuído em torno de zero, continua apresentando uma amplitude de dispersão similar àquele erros corrigidos pela correlação original de He.

A figura 39 mostra os resultados para os erros residuais da vazão bifásica corrigida.

Para essa aplicação de correção, a correlação modificada de He apresentou resultados superiores quando comparados à correlação original (figura 35). Os resultados dos erros residuais ficaram distribuídos entre -4% e $+4\%$.

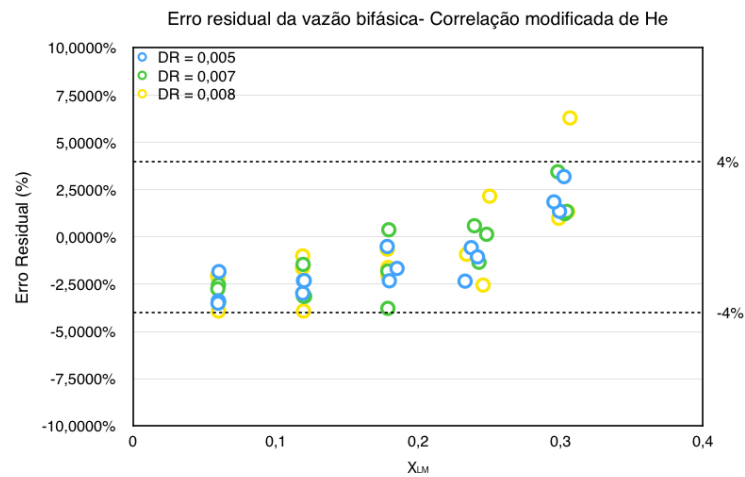


Figura 39 – Superestimação das medidas do escoamento bifásico e suas correções pelo uso da correlação modificada de He

5 Conclusão e Propostas para Trabalhos Futuros

O presente trabalho apresentou uma análise do medidor tipo cone para uma faixa de aplicação em condições de escoamento considerado de gás úmido, de acordo com o critério de Lockhart-Martinelli menor que 0,3. A faixa de medição foi mapeada em termos do mapa da Shell (fig. 14) apud (STEVEN, 2009), que indica que o padrão de escoamento da presente planta é conhecido como padrão estratificado.

Além disso, por meio de uma análise dimensional, pelo método de Pi de Buckingham e de observações experimentais procurou-se identificar as variáveis que mais afetam a leitura do medidor. De acordo com essa análise, os principais parâmetros que influem a superestimação são: X_{LM} , Fr_g , DR e β .

Para todos os parâmetros mantidos constantes, o erro de superestimação apresenta um comportamento muito próximo ao linear com o X_{LM} . A influência do número de Froude do gás - Fr_g sobre a superestimação foi observada, e notou-se que um aumento no número de Froude implica em um aumento de superestimação. A respeito da razão de densidades - DR , a observação feita foi de que um aumento de DR acarreta uma diminuição de superestimação. A razão β afeta a medição no seguinte sentido, um aumento em β provoca uma diminuição de superestimação.

Um dos objetivos desse trabalho foi comparar as correlações existentes na literatura para correção da superestimação de leitura em medidor tipo cone em escoamento bifásico, além de propor uma nova correlação.

Sobre a comparação observou-se que, para os dados avaliados, a correlação de Steven 3.2 corrige melhor a superestimação (0% a -5%) do que as correlações de Leuw modificada (eq. 3.7) (0% a -6%) e a de He et al. (0% a -9%).

Por outro lado, uma nova proposta de correlação para os dados do presente trabalho, baseada metodologia de He et al. (HE; BAI, 2014b) apresentou uma diferença de (-5% a +5%) considerada similar a performance do trabalho original.

Esse comportamento indica que a metodologia de estabelecer uma correlação para correção da superestimação não deve alcançar resultados melhores do que os apresentados na literatura e no presente trabalho. Dessa forma outras técnicas devem ser aplicadas para se obter a superestimação com mais precisão.

Também, considerando que resultados da literatura (ORLANDO, 2010) indicam uma melhor aproximação com a metodologia de Steven (STEVEN, 2009), mas para condições operacionais similares, leva a crer que a similaridade hidrodinâmica de escoamentos

bifásicos depende de outros fatores além de X_{LM} , Fr_g , DR e β .

Diante disso, supõe-se que em se tratando de escoamento bifásico, as correlações disponíveis podem não ser suficientes para generalizar um comportamento tão complexo para quaisquer condições operacionais. Por exemplo, as correlações de Steven, Leuw e He, corrigem as leituras, desde que as condições operacionais sejam similares àquelas para o qual os dados foram obtidos e utilizando os mesmo fluidos.

Nos testes executados nesse trabalho, foi realizada uma modificação na correlação de He et al. (HE; BAI, 2014b) a fim de melhor ajustar os dados experimentais. Quando utilizando a correlação original, a correção ficou na faixa de 0% a -9%. Já a correlação ora proposta obteve uma aproximação de $\pm 5\%$.

Apesar disso (erros em $\pm 5\%$), a aplicação dessa correlação para correção da vazão de gás apresentou resultados inferiores a essa faixa. Logo, uma boa estimativa de K não implica necessariamente a uma boa correção da vazão mássica de gás. O K é desenvolvido para corrigir a vazão mássica bifásica e não a monofásica do gás, por isso pode-se explicar parte dos desvios. Usar tal expressão para corrigir uma vazão monofásica depende de inferências e mais erros estão associados. O trabalho de He et al. propõe um coeficiente de descarga bifásico para o medidor cone, mas não corrige a superestimação.

Como trabalhos futuros, recomenda-se que estudos sejam feitos afim de avaliar uma maior gama de condições experimentais. Avaliação de números de Froude mais altos, a fim de testar outros padrões de escoamento e estudar sua influência. O mesmo para as razões de densidades. Uma avaliação com mais dados nesses sentido para que se possa avaliar a influência da pressão. Com uma nuvem de dados, conforme a proposta, uma correlação mais significativa pode ser obtida.

Também é recomendado que testes futuros sejam realizados com gás natural, água e hidrocarbonetos. A variação das propriedades dos fluidos pode ser avaliada para demonstrar os efeitos da viscosidade e tensão superficial, que não estão definidos nos parâmetros citados nesse trabalho, podem modificar o escoamento e apresentar efeitos de interesse no estudo.

É fortemente recomendável que sejam estudadas novas técnicas de obtenção da vazão do líquido. Atualmente é necessário que a vazão do líquido seja fornecida por uma fonte externa de medição. Uma sugestão é que se estudem medidores cone com dupla queda de pressão. Essa é uma tecnologia de fácil obtenção, necessitando apenas que uma nova tomada de pressão seja introduzida. Pelo uso do princípio de queda dupla de pressão, é possível que duas correlações sejam obtidas e combinadas para solucionar as duas variáveis que se busca encontrar, vazão do gás e do líquido.

Referências

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Manual of Petroleum Measurement Standards*. First. [S.l.], 2005. Citado na página 24.
- ANP/INMETRO. *Portaria Conjunta*. [S.l.]: DOU - Diário Oficial da União, 2000. Citado na página 23.
- ANP/INMETRO. *RTM-001/2000: Regulamento técnico metrológico de petróleo e gás natural*. Citado na página 23.
- ASME. *Wet Gas Flowmetering Guideline ASME MFC-19G-2008*. New York, USA, 2008. Citado na página 24.
- BATINGA, H. Vcone-nova tecnologia para medição de gás úmido. *Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP*, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 13, 23 e 41.
- CHISHOLM, D. Flow of incompressible two-phase mixtures through sharp-edged orifices. *Journal of Mechanical Engineering Science*, SAGE Publications, v. 9, n. 1, p. 72–78, 1967. Citado na página 26.
- CHISHOLM, D. Research note: two-phase flow through sharp-edged orifices. *Journal of Mechanical Engineering Science*, SAGE Publications, v. 19, n. 3, p. 128–130, 1977. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 26 e 31.
- EVANS, R.; IFFT, S. A. Wet gas performance of differential pressure flowmeters. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference*. [S.l.], 2007. p. 195–200. Citado na página 26.
- FERREIRA, A. L. A. da S. *TECNOLOGIA ULTRASSÔNICA NA MEDIÇÃO DE VAZÃO EM ESCOAMENTOS INCOMPRESSÍVEIS*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2010. Citado na página 21.
- HE, D.; BAI, B. A new correlation for wet gas flow rate measurement with venturi meter based on two-phase mass flow coefficient. *Measurement*, Elsevier, v. 58, p. 61–67, 2014. Citado na página 73.
- HE, D.-H.; BAI, B.-F. Two-phase mass flow coefficient of v-cone throttle device. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier, v. 57, p. 77–85, 2014. Citado 15 vezes nas páginas 13, 14, 24, 29, 59, 60, 61, 62, 63, 69, 70, 72, 74, 79 e 80.
- IFFT, S. A. Installation effects on the v-cone flowmeter. In: *3rd International Fluid Flow Symposium, San Amonio, Texas*. [S.l.: s.n.], 1995. Citado na página 24.
- IFFT, S. A. Wet gas testing with the v-cone flowmeter. In: *North Sea Flow Measurement Workshop 1997 (Norway)*. [S.l.: s.n.], 1997. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 34.
- IFFT, S. A.; MIKKELSEN, E. D. Pipe elbow effects on the v-cone flowmeter. *ASME-PUBLICATIONS-FED*, ASME, v. 161, p. 37–37, 1993. Citado na página 35.
- INMETRO. *RTM-64: Regulamento técnico metrológico referente à medição dinâmica de*

- petróleo, derivados líquidos e álcool. Citado na página 23.
- ISO. *ISO 5167: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full*. Geneva, 2014. Citado na página 31.
- ISO. *Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full*. Citado na página 24.
- LAWRENCE, P. A. Wet gas measurement. *84th International School of Hydrocarbon Measurement*, 2009. Citado na página 34.
- LEEUW, R. D. Liquid correction of venturi meter readings in wet gas flow. In: *North Sea Flow Measurement Workshop*. [S.l.: s.n.], 1997. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 48 e 59.
- LOCKHART, R.; MARTINELLI, R. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chem. Eng. Prog.*, v. 45, n. 1, p. 39–48, 1949. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 31.
- MURDOCK, J. Two-phase flow measurement with orifices. *Journal of basic engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 84, n. 4, p. 419–432, 1962. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 31.
- ORLANDO, A. de F. *Avaliação metrológica do desempenho do medidor tipo v-cone para medição de vazão de gás úmido*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2010. Citado 7 vezes nas páginas 15, 24, 25, 36, 37, 38 e 79.
- READER-HARRIS, M.; HODGES, D.; GIBSON, J. Venturi-tube performance in wet gas using different test fluids. In: *North sea flow measurement workshop*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.
- STEVEN, R. Horizontally installed differential pressure meter wet gas flow performance review. *North sea flow mea*, 2006. Citado na página 25.
- STEVEN, R. V-cone wet gas metering. In: CITESEER. *North Sea Flow Measurement Workshop 2007 (Norway)*. [S.l.], 2007. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.
- STEVEN, R. Horizontally installed cone differential pressure meter wet gas flow performance. *Flow measurement and Instrumentation*, Elsevier, v. 20, n. 4, p. 152–167, 2009. Citado 14 vezes nas páginas 13, 24, 25, 27, 28, 31, 38, 42, 44, 48, 58, 70, 74 e 79.
- STEVEN, R.; HALL, A. Orifice plate meter wet gas flow performance. *Flow Measurement and Instrumentation*, Elsevier, v. 20, n. 4, p. 141–151, 2009. Citado na página 27.
- STEVEN, R.; KEGEL, T.; BRITTON, C. An update on v-cone meter wet gas flow metering research flomeko 2005. *Peebles, Scotland*, 2005. Citado 5 vezes nas páginas 26, 40, 58, 68 e 74.
- STEVEN, R.; KINNEY, J.; BRITTON, C. Liquid property and diameter effects on venturi meters used with wet gas flows. In: *International Fluid Flow Measurement Symposium, Mexico*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado na página 25.
- STEVEN, R.; LAWRENCE, P. Research developments in wet gas metering with v-cone meters. In: *North sea flow measurement workshop*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 26.

- STEVEN, R.; PETERS, R. Wet gas metering with v-cone meters. In: *3rd International SE Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado na página 26.
- STEVEN, R.; TING, F.; STOBIE, G. A re-evaluation of axioms regarding orifice meter wet gas flow performance. In: *SE Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop, Kuala Lumpur*. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 26.
- STEVEN, R. N. Wet gas metering with a horizontally mounted venturi meter. *Flow measurement and Instrumentation*, Elsevier, v. 12, n. 5, p. 361–372, 2002. Citado na página 25.
- STEWART, D. et al. Wet gas metering with v-cone meters. In: *North sea flow measurement workshop*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 2–4. Citado na página 25.
- STEWART, D. G. Application of differential pressure meters to wet gas flow. In: *2nd International South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop, 25th-28th March*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 34.
- TAN, C. et al. Oil-water two-phase flow measurement with a v-cone meter in a horizontal pipe. In: IEEE. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009. I2MTC'09. IEEE*. [S.l.], 2009. p. 62–67. Citado na página 31.