



FELIPE CHAGAS STORTI

ESTUDO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE  
SEPARAÇÃO DA CÂMARA DE EXPANSÃO DO  
SEPARADOR VASPS

CAMPINAS  
2013





UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FELIPE CHAGAS STORTI

## ESTUDO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DA CÂMARA DE EXPANSÃO DO SEPARADOR VASPS

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Ciências e Engenharia de Petróleo na área de Exploração.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Pelaquim Mendes

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pelo aluno Felipe Chagas Storti, e orientado pelo Prof. Dr. José Ricardo Pelaquim Mendes.

A handwritten signature in black ink is written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to read "José Ricardo Pelaquim Mendes".

CAMPINAS  
2013

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

St75e Storti, Felipe Chagas, 1982-  
Estudo experimental da eficiência de separação da câmara de expansão do separador VASPS / Felipe Chagas Storti. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: José Ricardo Pelaquim Mendes.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.

1. Separação. 2. Fluido. 3. Vórtice. I. Mendes, José Ricardo Pelaquim, 1971-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Study of separation efficiency of expansion chamber of VASPS separator

**Palavras-chave em inglês:**

Separation

Fluid

Vortex

**Área de concentração:** Exploração

**Titulação:** Doutor em Ciências e Engenharia de Petróleo

**Banca examinadora:**

José Ricardo Pelaquim Mendes [Orientador]

Sérgio Nascimento Bordalo

Ricardo Augusto Mazza

Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales

Valdir Estevam

**Data de defesa:** 29-11-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Ciências e Engenharia de Petróleo



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

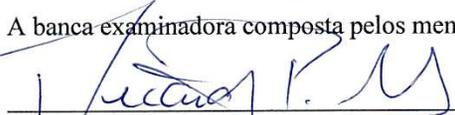
TESE DE DOUTORADO

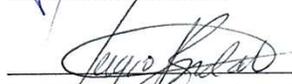
ESTUDO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE  
SEPARAÇÃO DA CÂMARA DE EXPANSÃO DO  
SEPARADOR VASPS

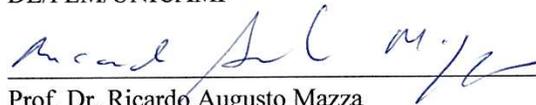
Autor: Felipe Chagas Storti

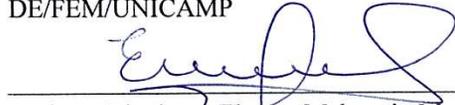
Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Pelaquim Mendes

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta tese:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Ricardo Pelaquim Mendes, Presidente  
DE/FEM/UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sérgio Nascimento Bordalo  
DE/FEM/UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza  
DE/FEM/UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales  
DAMEC/UTFPR

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Valdir Estevam  
PETROBRAS/RJ

Campinas, 29 de novembro de 2013.



## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho à minha família, especialmente a minha mãe Rosângela e ao meu pai Fernando que infelizmente não está mais entre nós.



## **AGRADECIMENTOS**

Várias pessoas tiveram colaboração para a conclusão deste trabalho. Gostaria aqui de deixar meus agradecimentos a cada uma delas.

Primeiramente gostaria de agradecer minha mãe por todo apoio fornecido, especialmente nos momentos mais difíceis.

A minha companheira Alessandra, pelo carinho, paciência e amor.

Ao Prof. Dr. José Ricardo Pelaquim Mendes, pela orientação, dedicação, paciência e pela amizade durante esses anos.

Aos amigos que participaram direta e indiretamente de todas as etapas da realização desse trabalho, especialmente aos meus amigos Jorge e William, pelo companheirismo, amizade e ajuda que eles me deram para a conclusão desta pesquisa.

Aos funcionários do LABPETRO, que também contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho, Natache, Vanessa, Matheus, Leandro e o Claudio.

Aos funcionários do CEPETRO, DEP e FEM.

À PETROBRAS pelo apoio ao projeto e ao Dr. Valdir Estevam pela atenção, conhecimento compartilhado e ajuda nos momentos difíceis.



“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”

Henry Ford



## RESUMO

O sistema de separação submarina VASPS (*Vertical Annular Separation and Pumping System*), que se utiliza tanto do efeito gravitacional quanto do centrífugo é composta por Câmara de Expansão, Helicóide de Separação e Piscina. Com o objetivo de se estudar um separador compacto e de menor custo, foi construído um protótipo da Câmara de Expansão em acrílico. Foram realizados testes de eficiência de separação do protótipo utilizando a mistura ar-água e a mistura ar-glicerina com diferentes viscosidades. Para realizar os testes de eficiência foi construído um circuito fechado todo equipado e instrumentado. Nestes testes de eficiência variou-se o diâmetro de bocal de entrada do separador e o nível de líquido na parte inferior do separador. Foi observado durante os testes experimentais a formação de um vórtice, principalmente para níveis mais baixos de líquido, diminuindo a eficiência do separador. Para solucionar esse problema foi desenvolvido e fabricado um dispositivo chamado Redutor de Vórtice, melhorando a eficiência do protótipo para certas condições de operação. Os resultados mostraram que a eficiência diminuiu para fluidos mais viscosos e também observou-se que o padrão de escoamento no bocal de entrada do separador teve influência na eficiência. Resultados do ângulo de inclinação e altura de elevação do filme de líquido na parede do separador também foram obtidos.

**Palavras Chave:** VASPS, Câmara de Expansão, separação gás-líquido, vórtice.



## ABSTRACT

The VASPS (Vertical Annular Separation and Pumping System) is a subsea separation system, which utilizes both the gravitational effect as the centrifugal and is composed by Expansion Chamber, Helicoide Separation and Pool. In order, to study a compact separator and with lower cost, we built a prototype of Expansion Chamber in acrylic. Separation efficiency of the prototype using the air-water mixture and air-glycerin mixture with different viscosities tests were performed. To perform efficiency tests was built a closed circuit all equipped and instrumented. In these tests of efficiency ranged the diameter of the separator inlet nozzle and the liquid level at the bottom of the separator. The formation of a vortex, especially for lower levels of liquid was observed during the experimental tests, decreasing the efficiency of the separator. To solve this problem was developed and manufactured a device called Vortex Reducer, improving the efficiency of the prototype for certain operating conditions. The results showed that the efficiency decreases for more viscous fluids and also observed that the flow pattern at the nozzle inlet separator had an influence in the efficiency. Results of tilt angle and lift height of the liquid film on the wall of the separator were also obtained.

**Key Word:** VASPS, Expansion Chamber, gas-liquid separation, vortex.



# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>vii</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xxi</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xxix</b>
<b>LISTA DE NOMENCLATURAS .....</b>	<b>xxxiii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1. Processamento submarino.....	7
2.2. Separação submarina.....	13
2.3. Separador VASPS .....	22
2.3.1. Aplicações da tecnologia VASPS.....	24
2.4. Câmara de Expansão.....	32
<b>3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>41</b>
3.1. Princípios de funcionamento do separador VASPS .....	41
3.2. escoamento bifásico .....	43
3.2.1. Terminologia em escoamento bifásico .....	43
3.2.2. Padrões de escoamento em tubos .....	44
3.2.3. Mapa do padrão de escoamento em tubo horizontal .....	47
3.3. Parâmetros relevantes para separação bifásica gás-líquido .....	50

3.4. Equação para medição de gás através de elementos laminadores de fluxo...	52
3.4.1. Correção da vazão volumétrica .....	53
3.4.2. Correção da vazão mássica.....	54
3.5. Obtenção experimental da eficiência de separação da Câmara de Expansão	56
<b>4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>59</b>
4.1. Fabricação do protótipo “Câmara de Expansão” do VASPS .....	59
4.1.1. Problemas e Soluções .....	66
4.2. Geometria da Câmara de Expansão do VASPS.....	71
4.3. Montagem experimental / circuito de teste .....	73
4.3.1. Descrição dos equipamentos instalados.....	75
4.4. Instrumentação .....	76
4.5. Sistema de aquisição de dados .....	77
4.6. Sistema de injeção de ar.....	80
4.6.1. Aquisição de dados para os medidores de ar .....	81
4.6.2. Fabricação do sistema de injeção de ar.....	88
<b>5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>91</b>
5.1. Procedimento experimental para testes com glicerina.....	95
5.2. Procedimento experimental para ângulo de inclinação do filme de líquido	100
5.3. Procedimento experimental para altura de elevação do filme de líquido....	101
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>103</b>
6.1. Resultados da eficiência de separação para mistura ar-água com/sem o redutor de vórtice .....	103

6.2. Eficiência de separação em relação ao padrão de escoamento em tubo horizontal .....	109
6.3. Eficiência de separação em relação ao diâmetro do bocal de entrada .....	114
6.4. Eficiência de separação em relação ao nível de líquido .....	117
6.5. Eficiência de separação em relação à viscosidade do fluido .....	119
6.6. Altura de elevação do filme de líquido .....	120
6.7. Ângulo de inclinação do filme de líquido.....	123
6.8. Resultados dos parâmetros relevantes para separação bifásica gás-líquido	126
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>133</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>135</b>
<b>APÊNDICE A – Calibração dos Instrumentos.....</b>	<b>139</b>
<b>APÊNDICE B – Análise de Incertezas Experimentais.....</b>	<b>143</b>
B.1 Matemática Básica para Análise de Incertezas por Amostragem Simples..	143
B.2 Análise de Incerteza para a vazão volumétrica do ar.....	145
B.3 Análise de Incerteza para a velocidade superficial do gás (ar).....	146
B.4 Análise de incerteza para a velocidade superficial do líquido.....	147
B.5 Análise de incerteza para a eficiência de separação .....	147
B.6 Precisão dos instrumentos de medição .....	147
B.7 Incertezas experimentais .....	148
<b>APÊNDICE C – Tabela dos Resultados Experimentais .....</b>	<b>149</b>
<b>APÊNDICE D – Gráficos para a mistura ar-glicerina .....</b>	<b>175</b>
<b>APÊNDICE E – Fotos da Montagem Experimental .....</b>	<b>181</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquemas de diferentes cenários de instalação do VASPS (não esta em escala); (a) poço falso; (b) leito marinho. ....	4
Figura 2.1 – Previsão da produção de óleo no mundo em águas profundas (ESTRELLA, 2003)..	8
Figura 2.2 - Diagrama fundamental de blocos para Processamento Submarino Completo (ABILI <i>et al.</i> 2012).....	11
Figura 2.3 – Esquema de um <i>layout</i> submarino considerado para bomba multifásica submarina (ALBUQUERQUE, <i>et. al.</i> , 2013).....	12
Figura 2.4 – Esquema de um <i>layout</i> submarino considerado para o projeto SSGL (ABULQUERQUE <i>et. al.</i> , 2013).....	15
Figura 2.5 – Blocos de construção para o projeto SSGL (ABULQUERQUE <i>et. al.</i> , 2013).....	16
Figura 2.6 – Representação esquemática; (a) Desgaseificador <i>Inline</i> ; (b) Desliquificador <i>Inline</i> . ....	18
Figura 2.7 – Esquema de um Sistema de Separação Caisson com BCS (HARRIS <i>et al.</i> , 2012)..	19
Figura 2.8 – Gráfico da eficiência de separação do separador Caisson (GILYARD e BROOKBANK, 2010). ....	20
Figura 2.9 – Esquema de um sistema submarino considerado para o sistema SSAO (ALBUQUERQUE <i>et al.</i> , 2013).....	21
Figura 2.10 – Principais dimensões dos modelos em escala reduzida, construídos no projeto P&D PETROBRAS/UNICAMP (ROSA <i>et al.</i> , 2001). ....	24
Figura 2.11 – Teste de eficiência de separação do protótipo VASPS instalado no campo de testes em Trecate (BENETTI e VILLA, 1997). ....	26
Figura 2.12 – (a) LCO medido no protótipo VASPS em função da vazão total de líquido e o nível do VASPS; (b) GCU medido no protótipo VASPS em função da vazão total de líquido (BENETTI e VILLA, 1997). ....	26
Figura 2.13 – Gráfico da capacidade de separação do protótipo VASPS instalado em Atalaia (VALE <i>et. al.</i> , 1998).....	27
Figura 2.14 – Curva de produção com e sem o VASPS (VALE <i>et al.</i> , 1998) .....	28
Figura 2.15 – Produção do poço MA-01 antes e depois do VASPS (VALE <i>et. al.</i> , 2002).....	30
Figura 2.16 – Razões de <i>shutdowns</i> do protótipo VASPS (PEIXOTO <i>et. al.</i> , 2005).....	31

Figura 2.17 – Eficiência operacional do VASPS e da planta de processo da plataforma P-08 (PEIXOTO <i>et. al.</i> , 2005). .....	31
Figura 2.18 – Esquema do protótipo do separador Câmara de Expansão. ....	33
Figura 2.19 – Esquema da Câmara de Expansão para diferentes condições de operação: (A) operação regular; (B) e (C) condições operacionais limitantes. ....	34
Figura 2.20 – Esquema do filme de líquido descendente dentro do separador (MORANDIN, 1999). ....	34
Figura 2.21 – Espessuras do filme de líquido em função da distância do bocal de entrada para vazão mássica de 2,3 kg/s (OFUCHI <i>et. al.</i> , 2011). ....	37
Figura 2.22 – Espessura do filme na saída do separador em função da vazão mássica para diferentes fluidos (OFUCHI <i>et al.</i> , 2011). ....	38
Figura 2.23 – Altura de elevação em função da vazão mássica, para quatro diferentes fluidos (OFUCHI <i>et al.</i> , 2011). ....	38
Figura 3.1 – Esquema do separador gás-líquido VASPS (Adaptado, ROSA <i>et al.</i> 2001). ....	42
Figura 3.2 – Padrões de escoamento bifásico gás-líquido em tubos horizontais (BRATLAND, 2010). ....	45
Figura 3.3 – Padrões de escoamento bifásico gás-líquido em tubos verticais (BRATLAND, 2010). ....	47
Figura 3.4 – Mapa do padrão de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane, 1973. ....	48
Figura 3.5 – Volume de controle utilizado para o cálculo da eficiência de separação. ....	56
Figura 4.1 – Foto do equipamento depois de aplicado a resina mostrando as bolhas e trincas de ar formadas em locais onde foi aplicada uma maior quantidade de resina. ....	60
Figura 4.2 – Máquina utilizada para aplicação da resina. ....	60
Figura 4.3 – Foto do teste para mostrar a transparência da resina aplicada. ....	61
Figura 4.4 – (a) Foto do tubo de acrílico; (b) Foto dos tubos quadrados de inox, cantoneiras de alumínio e das placas de policarbonatos. ....	62
Figura 4.5 – Corte transversal do equipamento detalhando a construção da estrutura quadrada. ....	63
Figura 4.6 – Foto com o detalhe de uma das extremidades do equipamento que foi selado com a resina Plexus. ....	63
Figura 4.7 – Esquema e foto da estrutura quadrada completa da Câmara de Expansão. ....	64
Figura 4.8 – Esquema e foto do tubo anular instalado na Câmara de Expansão. ....	65

Figura 4.9 – Esquema da tampa da parte inferior da Câmara de Expansão instalada no suporte.	65
Figura 4.10 – Foto da região onde foi aplicada resina da parte superior do tubo anular para colar e vedar a estrutura quadrada do hidrociclone.	66
Figura 4.11 – Foto mostrando o filme de líquido na parede de acrílico passando direto pelo helicóide.	67
Figura 4.12 – (a) Foto da borracha colada em toda a extremidade do helicóide; (b) Foto do hidrociclone em operação mostrando que a vedação da borracha funcionou.	67
Figura 4.13 – (a) Foto do conjunto Kevlar com a cola de poliuretano; (b) Foto do processo de colagem do conjunto nas superfícies superior e inferior de ambos os helicóides.	68
Figura 4.14 – Foto que mostra com detalhe a chapa de Inox dobrada no início do helicóide.	69
Figura 4.15 – Foto do vórtice formado no fundo da Câmara de Expansão durante seu funcionamento.	69
Figura 4.16 – Forma quase ótima para estrutura de baixo arrasto.	70
Figura 4.17 – (a) Foto do Redutor de Vórtice; (b) Foto do Redutor de Vórtice instalado no fundo do hidrociclone.	70
Figura 4.18 – (a) Foto do bocal de 1” e 2” de diâmetro; (b) Foto do bocal de 1” de diâmetro instalado no interior do bocal de 2” de diâmetro.	71
Figura 4.19 – Vista do corte longitudinal vertical do protótipo hidrociclone.	72
Figura 4.20 – Vista do corte transversal do protótipo hidrociclone.	73
Figura 4.21 – Esquema geral do aparato experimental instalado.	74
Figura 4.22 – Visão geral (foto) da montagem experimental.	75
Figura 4.23 – Foto do CLP da marca Altus modelo FBs-24MAT.	78
Figura 4.24 – Tela da planta de processo do Supervisório Elipse SCADA.	78
Figura 4.25 – Tela da planta de processo do Supervisório LabVIEW.	80
Figura 4.26 – Esquema da montagem experimental para medição da vazão de ar.	81
Figura 4.27 – Fator de correção da umidade relativa para viscosidade do ar.	85
Figura 4.28 – Gráfico do fator de correção da viscosidade do ar para umidade de 90%.	86
Figura 4.29 – Gráfico do fator de correção da umidade do ar para umidade relativa de 100%.	87
Figura 4.30 – Gráfico do fator de correção da umidade do ar para umidade relativa de 20%.	87
Figura 4.31 – Esquema e foto do corpo do difusor de ar fabricado no LABPETRO.	88
Figura 4.32 – Foto do bico injetor.	88

Figura 4.33 – Foto frontal do difusor de ar finalizado.....	89
Figura 4.34 – Foto do difusor de ar completo e em funcionamento.....	89
Figura 5.1 – Foto do fundo da Câmara de Expansão com os diferentes níveis de líquido estudado. .....	93
Figura 5.2 – Esquema do procedimento experimental utilizado. ....	93
Figura 5.3 – Foto do Reômetro Mars III e esquema da geometria cone/placa utilizada nas análises reológicas da glicerina. ....	96
Figura 5.4 – Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para viscosidade de 83 cP, a 25 °C.....	97
Figura 5.5 – Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para viscosidade de 53 cP, a 25 °C.....	97
Figura 5.6 – Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para viscosidade de 23 cP, a 25 °C.....	98
Figura 5.7 – Gráfico de rampa de temperatura para viscosidade da glicerina de 83 cP (25 °C)...	99
Figura 5.8 – Gráfico de rampa de temperatura para viscosidade da glicerina de 53 cP (25 °C)...	99
Figura 5.9 – Gráfico de rampa de temperatura para viscosidade da glicerina de 23 cP (25 °C).	100
Figura 5.10 – Foto dos transferidores instalados na parede do separador durante seu funcionamento. ....	101
Figura 5.11 – Esquema do método utilizado para determinar a altura de elevação do filme de líquido na parede do separador (Adaptado, OFUCHI <i>et al.</i> 2012).....	102
Figura 5.12 – Foto da régua milimétrica instalada para aferir a medida da altura de elevação do filme de líquido.....	102
Figura 6.1 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação (bocal 2”), sem o redutor de vórtice, para: (a) Nível 1; (b) Nível 2. Incerteza da eficiência $u_{\eta} = 2,7\%$ . ....	104
Figura 6.2 – Gráficos do tipo matriz da eficiência de separação (Bocal 2”) para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência $u_{\eta} = 2,7\%$ .....	105
Figura 6.3 – Comparação da eficiência de separação com e sem o redutor de vórtice com $Q_G = 8 \text{ m}^3/\text{h}$ para: (a) Nível 1; (b) Nível 2.....	106
Figura 6.4 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação (bocal 1”) para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência $u_{\eta} = 2,7\%$ .....	108

Figura 6.5 – Comparação dos mapas de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane (1973) para diferentes misturas. ....	110
Figura 6.6 – Representação dos pontos experimentais para a mistura ar-água no mapa de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane (1973). ....	111
Figura 6.7 – Representação dos pontos experimentais para a mistura ar-glicerina (83 cP) no mapa de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane (1973). ....	111
Figura 6.8 – Representação dos pontos experimentais para a mistura ar-glicerina (53 cP) no mapa de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane (1973). ....	112
Figura 6.9 – Representação dos pontos experimentais para a mistura ar-glicerina (23 cP) no mapa de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane (1973). ....	112
Figura 6.10 – Média da eficiência de separação em relação ao padrão de escoamento para diferentes misturas. ....	113
Figura 6.11 – Média da eficiência em função do nível para o bocal de 2” e 1” e mistura ar-água. ....	114
Figura 6.12 – Média da eficiência em função do nível para o bocal de 2” e 1” e mistura ar-glicerina (83 cP). ....	115
Figura 6.13 – Média da eficiência em função do nível para o bocal de 2” e 1” e mistura ar-glicerina (53 cP). ....	115
Figura 6.14 – Média da eficiência em função do nível para o bocal de 2” e 1” e mistura ar-glicerina (23 cP). ....	116
Figura 6.15 – Eficiência de separação em relação ao nível de líquido para diferentes misturas. ....	117
Figura 6.16 – Foto real do vórtice para a mistura: (a) ar-água; (b) ar-glicerina. ....	118
Figura 6.17 – Eficiência de separação em relação a viscosidade, para o Nível 1, bocal de 1” e vazões $Q_G = 8\text{ m}^3/\text{h}$ e $Q_L = 9\text{ m}^3/\text{h}$ . ....	119
Figura 6.18 – Altura de elevação em função da vazão mássica da mistura para: (a) $Q_{ar} = 2,5\text{ m}^3/\text{h}$ ; (b) $Q_G = 4\text{ m}^3/\text{h}$ ; (c) $Q_G = 5,5\text{ m}^3/\text{h}$ ; (d) $Q_G = 7\text{ m}^3/\text{h}$ e (e) $Q_G = 8\text{ m}^3/\text{h}$ . ....	121
Figura 6.19 – Altura de elevação adimensional em função do número de Reynolds do filme para: (a) $Q_G = 2,5\text{ m}^3/\text{h}$ ; (b) $Q_G = 4\text{ m}^3/\text{h}$ ; (c) $Q_G = 5,5\text{ m}^3/\text{h}$ ; (d) $Q_G = 7\text{ m}^3/\text{h}$ e (e) $Q_G = 8\text{ m}^3/\text{h}$ . ....	122
Figura 6.20 – Gráficos do ângulo de inclinação em função da vazão mássica da mistura para (a) $Q_G = 2,5\text{ m}^3/\text{h}$ ; (b) $Q_G = 4\text{ m}^3/\text{h}$ ; (c) $Q_G = 5,5\text{ m}^3/\text{h}$ ; (d) $Q_G = 7\text{ m}^3/\text{h}$ e (e) $Q_G = 8\text{ m}^3/\text{h}$ . ....	124

Figura 6.21 – Gráficos do ângulo de inclinação em função do número de Reynolds do filme para (a) $Q_G = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (b) $Q_G = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (c) $Q_G = 5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (d) $Q_G = 7 \text{ m}^3/\text{h}$ e (e) $Q_G = 8 \text{ m}^3/\text{h}$ . .....	125
Figura 6.22 – Eficiência de separação em relação ao número de Froude do bocal.....	126
Figura 6.23 – Eficiência de separação em relação ao número de Froude na Câmara de Expansão. ....	127
Figura 6.24 – Altura de elevação do filme de líquido em relação a vazão mássica da mistura para diferentes viscosidades: (a) 1 cP; (b) 23 cP; (c) 53 cP; (d) 83 cP.....	128
Figura 6.25 – Comparação entre a altura do filme de líquido obtida utilizando o modelo matemático em relação a altura obtida experimentalmente.....	129
Figura 6.26 – Comparação entre a altura do filme de líquido obtida utilizando o modelo matemático com ajuste em relação a altura obtida experimentalmente. ....	130
Figura 6.27 – Comparação entre a altura do filme de líquido obtida utilizando o modelo matemático modificado em relação a altura obtida experimentalmente. ....	131
Figura A. 1 – Curva de calibração do transdutor de pressão na saída do separador ( $P_G$ ). ....	140
Figura A. 2 – Curva de calibração do transdutor de pressão na saída do separador ( $DP_G$ ).....	140
Figura A. 3 – Curva de calibração do sensor de temperatura ( $T_G$ ) na entrada do separador.....	141
Figura A. 4 – Curva de calibração do sensor de temperatura ( $T_G$ ) na saída do separador. ....	141
Figura D. 1 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (83 cP) e bocal 2” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência $u_\eta = 2,7\%$ . ....	175
Figura D. 2 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (83 cP) e bocal 1” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência $u_\eta = 2,7\%$ . ....	176
Figura D. 3 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (53 cP) e bocal 2” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência $u_\eta = 2,7\%$ . ....	177
Figura D. 4 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (53 cP) e bocal 1” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência $u_\eta = 2,7\%$ . ....	178
Figura D. 5 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (23 cP) e bocal 2” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência $u_\eta = 2,7\%$ . ....	179
Figura D. 6 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (23 cP) e bocal 1” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência $u_\eta = 2,7\%$ . ....	180

Figura E. 1 - Vista geral (foto) do tanque de armazenamento de água ou glicerina. ....	181
Figura E. 2 – Bomba centrífuga instalada na linha de entrada de líquido do separador. ....	181
Figura E. 3 – Bomba centrífuga instalada na linha de saída de líquido do separador. ....	181
Figura E. 4 – Foto dos inversores de frequência para as bombas (entrada e saída). ....	182
Figura E. 5 – Medidores de vazão de líquido; (a) Entrada; (b) Saída. ....	182
Figura E. 6 – Carrinho onde foram instalados o conjunto de instrumentos necessários para medir a vazão volumétrica de ar. ....	182
Figura E. 7 – (a) Transdutor digital (CD223) e transdutor de pressão com sensor 40; (b) Transdutor digital (CD223) e transdutor de pressão com sensor 26. ....	183
Figura E. 8 – Elementos de escoamento laminar.....	183
Figura E. 9 – Foto dos módulos de aquisição de dados instalados no chassi NI USB 9162/9172. ....	183
Figura E. 10 – (a) Medidor de pressão manométrica na entrada de gás; (b) Medidor de diferencial de pressão na entrada de gás. ....	184



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Benefícios da produção de óleo utilizando processamento submarino (FJOSNE, 2002).....	10
Tabela 2.2 – Benefícios e algumas relutâncias para o uso de sistemas de separação submarina..	14
Tabela 3.1 – Coordenadas para os limites de transições do mapa de padrões de escoamento proposto por Mandhane, 1973.....	49
Tabela 4.1 – Variáveis medidas no sistema de aquisição Elipse SCADA.....	79
Tabela 4.2 – Variáveis medidas no sistema de aquisição de dados LabVIEW.....	79
Tabela 4.3 – Valores de cada constante utilizada para o cálculo da viscosidade em função da temperatura e densidade.....	84
Tabela 5.1 – Valores das vazões volumétricas de água e glicerina para cada valor de vazão volumétrica de ar.....	92
Tabela 5.2 – Dados das características da glicerina bi destilada fornecidos pelo fabricante.....	95
Tabela 6.1 – Valores dos parâmetros usados como critério para o sistema ar-água e ar-glicerina.....	109
Tabela 6.2 – Média da eficiência de separação e seus respectivos desvios padrão para diferentes diâmetros de bocais e níveis de líquido.....	116
Tabela B. 1 – Precisão dos instrumentos de medição segundo o fabricante.....	148
Tabela B. 2 – Incertezas calculadas para os experimentos.....	148
Tabela C. 1 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 2”, Nível 1, com redutor de vórtice.....	149
Tabela C. 2 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 2”, Nível 2, com redutor de vórtice.....	150
Tabela C. 3 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 2”, Nível 3, com redutor de vórtice.....	151
Tabela C. 4 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 2”, Nível 2, sem redutor de vórtice.....	151
Tabela C. 5 – Teste de eficiência, ar-água, bocal 2”, Nível 1, sem redutor de vórtice.....	152
Tabela C. 6 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 1”, Nível 1, com redutor de vórtice.....	153
Tabela C. 7 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 1”, Nível 2, com redutor de vórtice.....	154
Tabela C. 8 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 1”, Nível 3, com redutor de vórtice.....	155

Tabela C. 9 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 2”, Nível 1, com redutor de vórtice. ....	156
Tabela C. 10 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 2”, Nível 2, com redutor de vórtice. ....	157
Tabela C. 11 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 2”, Nível 3, com redutor de vórtice. ....	158
Tabela C. 12 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 1”, Nível 1, com redutor de vórtice. ....	159
Tabela C. 13 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 1”, Nível 2, com redutor de vórtice. ....	160
Tabela C. 14 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 1”, Nível 3, com redutor de vórtice. ....	161
Tabela C. 15 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 2”, Nível 1, com redutor de vórtice. ....	162
Tabela C. 16 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 2”, Nível 2, com redutor de vórtice. ....	163
Tabela C. 17 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 2”, Nível 3, com redutor de vórtice. ....	164
Tabela C. 18 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 1”, Nível 1, com redutor de vórtice. ....	165
Tabela C. 19 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 1”, Nível 2, com redutor de vórtice. ....	166
Tabela C. 20 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 1”, Nível 3, com redutor de vórtice. ....	167
Tabela C. 21 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 2”, Nível 1, com redutor de vórtice. ....	168
Tabela C. 22 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 2”, Nível 2, com redutor de vórtice. ....	169
Tabela C. 23 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 2”, Nível 3, com redutor de vórtice. ....	170

Tabela C. 24 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 1”, Nível 1, com redutor de vórtice.....	171
Tabela C. 25 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 1”, Nível 2, com redutor de vórtice.....	172
Tabela C. 26 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 1”, Nível 3, com redutor de vórtice.....	173



## LISTA DE NOMENCLATURAS

### Letras Latinas

$A_b$	Área da secção transversal do bocal	[m <sup>2</sup> ]
$D_b$	Diâmetro do bocal de entrada do separador	[m]
$D_{CaEx}$	Diâmetro da Câmara de Expansão	[m]
$Fr$	Número de Froude do bocal	[-]
$Fr_{CaEx}$	Número de Froude na Câmara de Expansão	[-]
$H$	Altura de elevação do filme de líquido (modelo)	[m]
$J_G$	Velocidade superficial do gás	[m/s]
$J_L$	Velocidade superficial do líquido	[m/s]
$L$	Comprimento do tubo	[m]
$\dot{m}_m$	Vazão mássica da mistura	[kg/s]
$\dot{m}_G$	Vazão mássica do gás	[kg/s]
$\dot{m}_L$	Vazão mássica do líquido	[kg/s]
$\dot{m}_{std}$	Vazão mássica do ar na condição padrão de pressão e temperatura	[kg/s]
$\dot{m}_{P,T}$	Vazão mássica do ar na condição de pressão e temperatura qualquer	[kg/s]
$P$	Pressão manométrica do gás	[Pa]
$Q_G$	Vazão volumétrica de gás	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_L$	Vazão volumétrica de líquido	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_{std}$	Vazão volumétrica do ar na condição padrão de pressão e temperatura	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_{P,T}$	Vazão volumétrica do ar na condição de pressão e temperatura qualquer	[m <sup>3</sup> /s]
$Re_b$	Número de Reynolds no bocal de entrada do separador	[-]
$RGO$	Razão gás-líquido	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> std]
$T_{std}$	Temperatura do ar na condição padrão de pressão e temperatura	[°C]
$T_{P,T}$	Temperatura do ar na condição de pressão e temperatura qualquer	[°C]
$V_G$	Velocidade da fase gás	[m/s]
$V_L$	Velocidade da fase líquida	[m/s]

## Letras Gregas

$\mu_G$	Viscosidade dinâmica do gás	[Pa.s]
$\mu_L$	Viscosidade dinâmica do líquido	[Pa.s]
$\mu_{std}$	Viscosidade do ar na condição padrão de pressão e temperatura	[Pa.s]
$\mu_{P,T}$	Viscosidade do ar na condição de pressão e temperatura qualquer	[Pa.s]
$\rho_G$	Massa específica do gás	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_L$	Massa específica do líquido	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Tensão superficial	[mN/m]
$\Delta$	Varição	[-]
$\eta$	Eficiência de separação	[%]

---

# 1. INTRODUÇÃO

As plataformas offshore de produção de petróleo possuem plantas de processamento para separação de óleo, gás e água produzidos. A qualidade desta separação no local de extração é fundamental para a lucratividade do empreendimento. O bom desempenho das plantas de processamento é um dos principais fatores para manter os produtos dentro das especificações de qualidade. Apesar da relativa simplicidade dos processos de separação, estas plantas operam com grande variação de vazão, devido às características dos métodos de elevação e escoamento dos poços produtores.

Na produção de hidrocarbonetos (óleo e gás), há necessidade de dotar os campos (marítimos e terrestres) de “facilidades de produção”, que são instalações destinadas a efetuar, sob condições controladas, o “processamento primário dos fluidos”, ou seja:

- A separação do óleo, do gás e da água com as impurezas em suspensão;
- O tratamento ou condicionamento dos hidrocarbonetos, para que possam ser transferidos para as refinarias, onde será efetuado o processamento propriamente dito;
- O tratamento de água para a re-injeção ou descarte.

As descobertas mais recentes de reservatórios de óleo têm ocorrido mais frequentemente em alto mar e em lâminas d’água cada vez mais profundas, especialmente no Brasil, onde o volume da reserva sofreu incrementos expressivos nos anos recentes.

Mesmo que a exploração de reservatórios em águas profundas seja tecnicamente bem sucedida, o alto custo da produção, associado com convencionais planos de desenvolvimento, muitas vezes faz com que tais campos não sejam lucrativos. Como consequência, desde o ano de 1990, muito dos operadores tem se envolvido no desenvolvimento de rentabilidade e competitivas tecnologias submarinas para maximizar as taxas de produção e recuperação de reservas (VALE *et al.*, 2002).

Entre as tecnologias submarinas, a separação submarina tem sido considerada uma das alternativas mais promissoras, pois as tecnologias de separação utilizadas pela indústria do petróleo até recentemente são baseadas nos processos por gravidade e vasos separadores horizontais, que consistem em grandes plantas de processamento localizados nas plataformas. Estes sistemas de separação utilizam equipamentos grandes e pesados, além de ter um alto custo e ficarem fixos nas plataformas. Portanto, para operações em reservas *offshore* esses sistemas convencionais se tornaram inviáveis devido às características citadas, o que levou ao desenvolvimento de tecnologias mais compactas e com custos reduzidos.

A introdução de um separador de petróleo, no fundo do mar, entre a cabeça do poço e a plataforma de produção, colabora para a manutenção de baixas pressões em todo o sistema, diminuindo a contra pressão nos poços e, conseqüentemente, aumentando as vazões de equilíbrio.

Pode-se dispensar a utilização da energia de pressão dos reservatórios para o escoamento da cabeça do poço até a facilidade de produção, pois é promovido um fornecimento de energia da plataforma. Como não é utilizada a energia de pressão dos reservatórios pode-se trabalhar com uma menor pressão na cabeça dos poços, causando uma menor resistência à produção imposta a fonte. Esta menor contra-pressão sentida pela cabeça do poço de petróleo facilita as condições de produção do mesmo, resultando em um aumento de vazão.

Além do aumento da vazão, há também o aumento das reservas explotáveis. Este volume de óleo adicional que se pode produzir é resultado do aumento do período de vida útil dos reservatório. Isto é, um determinado reservatório necessita de uma pressão mínima para conseguir produzir para uma facilidade de produção segundo um arranjo pré-definido, em escoamento multifásico. Quando promovemos a separação submarina na própria cabeça do poço e fornecemos energia para a transferência da fase líquida esta pressão diminui e o reservatório poderá continuar produzindo até que nova pressão seja atingida.

O desenvolvimento do conceito de separação utilizando-se um ciclone se adequou bem as características das reservas *offshore*, pois, além da simplicidade, possui um formato compacto e um custo inferior quando comparado com os sistemas convencionais. O sistema de separação submarina vertical VASPS (*Vertical Annular Separation and Pumping System*), que se utiliza tanto do efeito gravitacional quanto do centrífugo, é um conceito inovador de separação submarina de duas fases e sistema de bombeamento, o que permite uma elevada capacidade de

separação entre as fases líquida e gasosa, ainda no leito marinho, integrado a sistemas de bombeamento.

O VASPS é um conceito comprovado de campo. Foi operado por pouco tempo até sua primeira falha (falha operacional) em 2001. Depois disso, o VASPS operou de 2004 até 2008, ou seja, por quase quatro anos ininterruptamente quando teve uma falha no conector elétrico na BCS (Bomba Centrífuga Submersa). Os bons resultados estimularam novos estudos e algumas novidades foram adicionadas em seu conceito, como por exemplo, um novo projeto do separador (helicóide e câmara de expansão) foi desenvolvido entre a Petrobras e Universidades Brasileiras.

Convencionalmente o VASPS é instalado em um poço falso e a BCS é instalada no interior do separador, como mostra o esquema da Figura 1.1(a). Porém, uma nova aplicação da tecnologia VASPS está sendo considerada nos Campos de Congro, Malhado e Corvina, localizados na Bacia de Campos no Estado do Rio de Janeiro, Brasil, onde o VASPS pode ser instalado fora de um poço falso e é integrado com um *manifold* para a produção dos poços produtores substituindo uma plataforma em um campo maduro, como mostra o esquema da Figura 1.1(b). O separador VASPS pode ser instalado verticalmente no leito marinho (fundo do mar), permitindo que o separador tenha um comprimento menor e maior diâmetro. Nesse novo projeto do VASPS é considerado o uso do VASPS juntamente com uma S-BCSS (*Seafloor Horizontal Electrical Submersible Pump*) para esses cenários que permitam a sua manutenção / recuperação sem intervenção no próprio separador. Essas novas características não só reduziram significativamente a sua despesa operacional, mas também aumentaram sua capacidade de separação, nos Campos de Congro e Corvina, de 1500 m<sup>3</sup>/d (líquido) e 190000 Nm<sup>3</sup>/d (gás) para 3600 m<sup>3</sup>/d e 768000 Nm<sup>3</sup>/d (gás) (EUPHEMIO, *et. al*; 2009). Porém os valores máximos para cada sistema VASPS são da ordem de 6000 m<sup>3</sup>/d (líquido) e 1000000 Nm<sup>3</sup>/d (gás).

Esse novo projeto da unidade VASPS é composta essencialmente por três invólucros concêntricos: Câmara de Expansão, Helicóide de Separação e Piscina. Na Câmara de Expansão ocorre a separação primária, onde a maior parte do gás é separado. A separação secundária ocorre no Helicóide de Separação, onde todo o gás restante sofre separação centrífuga e penetra na tubulação central por meio de pequenos orifícios na parede interna. Por fim, a piscina é responsável pela separação terciária, onde uma pequena quantidade de gás ainda se separa por gravidade.

Com essa possibilidade de instalar o VASPS diretamente no leito marinho, motivou o estudo de um separador ciclônico mais leve, menor e de baixo custo.

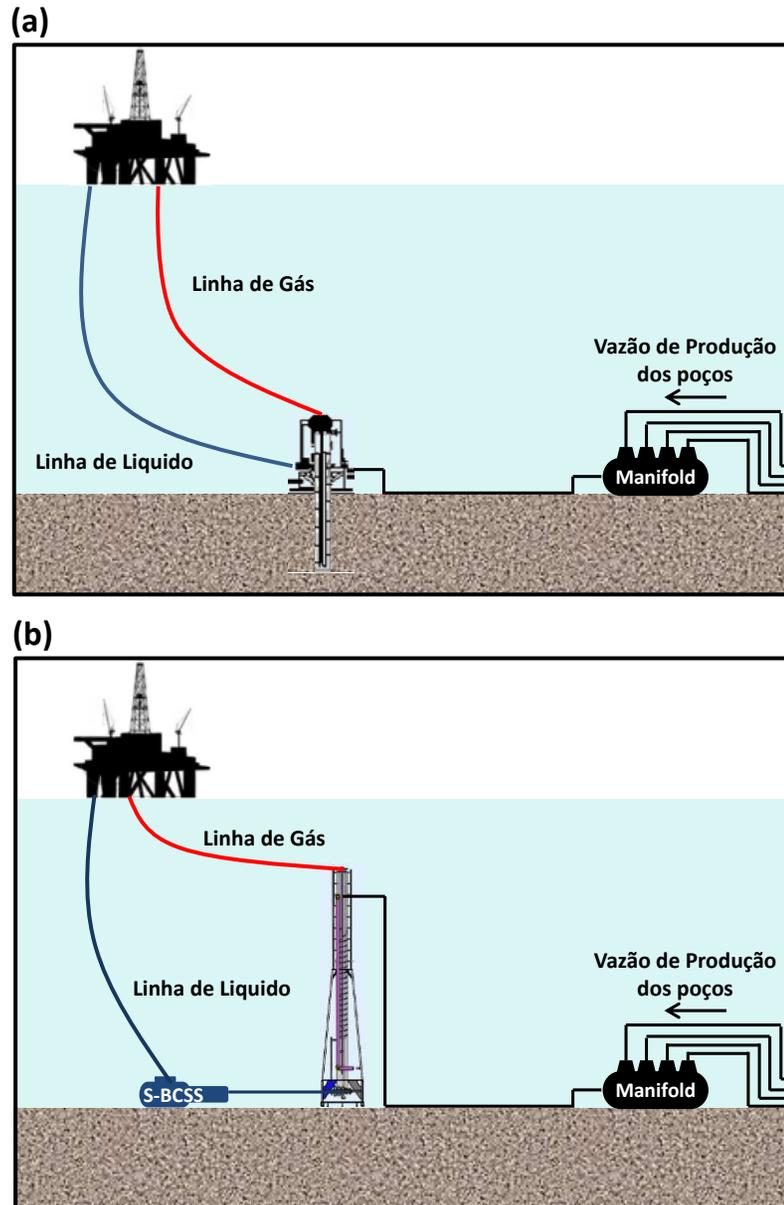


Figura 1.1 – Esquemas de diferentes cenários de instalação do VASPS (não está em escala); (a) poço falso; (b) leito marinho.

Assim sendo, o foco principal deste trabalho é verificar a eficiência de uma tecnologia de separação ciclônica. Na literatura são encontrados vários trabalhos referentes ao separador VASPS, que mostram tanto sua aplicação em campos ativos de petróleo como também seu

desempenho e eficiência de separação, porém existem poucos trabalhos estudando somente a Câmara de Expansão.

Portanto, o objetivo deste trabalho é estudar e medir a eficiência de separação para diferentes padrões ou condições de funcionamento do separador. Para atingir o objetivo proposto, foi construído um protótipo da Câmara de Expansão e uma bancada experimental.

Este trabalho está organizado em mais seis capítulos. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a tendência e os benefícios de utilizar o processamento submarino incluindo a separação submarina, apresentando também os conceitos e definições do VASPS e da Câmara de Expansão. No Capítulo 3 é descrito fundamentos teóricos que estão diretamente relacionados a este trabalho, como conceitos básicos de escoamento multifásico, padrões de escoamento, mapa de padrão de escoamento, eficiência de separação e alguns parâmetros relevantes para a separação bifásica gás-líquido. No Capítulo 4 é descrito todo o desenvolvimento experimental, desde a fabricação do protótipo da Câmara de Expansão (problemas e soluções), circuito de testes instalado no laboratório e a instrumentação utilizada. O Capítulo 5 descreve o procedimento experimental utilizado para cada teste realizado no separador. Os resultados obtidos e suas respectivas análises são mostrados no Capítulo 6. E por fim o Capítulo 7 resume as conclusões sobre o trabalho e expõe sugestões para trabalhos futuros.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste Capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica referente às vantagens e desvantagens de se utilizar processamento submarino e o conceito de separação submarina na produção de petróleo. É apresentada a definição e utilização do VASPS em campos de petróleo em operação. Também é mostrado, todo o conceito do separador Câmara de Expansão, assim como sua possível aplicação na indústria de petróleo.

### **2.1. Processamento submarino**

Os desafios de produção em águas profundas e ultra-profundas no Brasil teve que ser enfrentado, uma vez que, a sua superação era a única alternativa para alcançar os níveis de produção desejados, bem como, atender ao ritmo de desenvolvimento dos campos de petróleo.

Esse novo cenário exige uma contínua expansão das tecnologias existentes e também o desenvolvimento de novas tecnologias que permitam que a produção de petróleo em águas ultra-profunda se torne economicamente viáveis.

O desenvolvimento de novas tecnologias em águas ultra-profunda tem um custo elevado, fazendo com que a colaboração entre operadores e fornecedores de tecnologia se torne um fator essencial para esse desenvolvimento (BELL *et al.*, 2005).

A Figura 2.1 mostra uma tendência do aumento da produção de óleo no Brasil em águas profundas e ultra-profundas até o período do ano de 2010 (ESTRELLA, 2003).

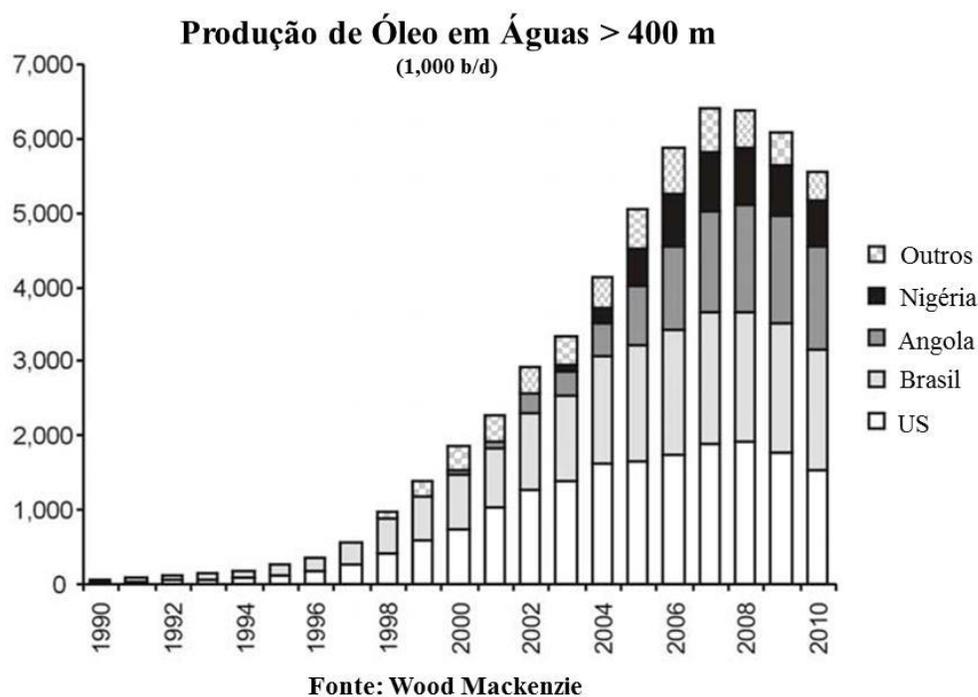


Figura 2.1 – Previsão da produção de óleo no mundo em águas profundas (ESTRELLA, 2003).

Neste contexto a busca de exploração e desenvolvimento da produção em águas profundas e ultra-profundas, de forma técnica e economicamente viável, requer um esforço contínuo de pesquisa. Uma das soluções adotadas foi o desenvolvimento de tecnologia e processamento submarino.

Hoje em dia, o processamento submarino é reconhecido como uma forma eficiente de aumento de produção de petróleo e gás, especialmente para reservatórios em áreas com características desafiadoras ou situado em águas ultra-profundas. Estes campos marginais devem ser desenvolvidos com soluções eficientes de custo e tecnologias inovadoras para permitir uma recuperação econômica das reservas.

Existem três definições muito bem aceitas para processamento submarino:

- McClimans e Fantoft, em 2006, definiram o processamento submarino como qualquer manipulação ativa e tratamento de fluidos produzidos abaixo ou no próprio leito marinho.
- Davies *et al* em 2010, definiram processamento submarino em um processo envolvendo uma ou mais combinações de condicionamento de fluido e pressão de

elevação do escoamento do fluido do poço (de um reservatório) no leito marinho. O condicionamento pode incluir a separação da água do óleo, separação de líquidos do gás, separação de areia e outros sólidos dos fluidos.

- K Janardhanan e Mac McKee em 2011, também consideram o processamento submarino como um processamento que abrange sistemas tais como bombas, separadores, sistemas de distribuição de energia e compressores, instalados no fundo do mar. Para os sistemas de óleo, estes equipamentos submarinos proporcionam pressurização, processamento, maior separação de água e injeção de água do mar para manter a pressão do reservatório. Já para os sistemas de gás, o processamento inclui compressão submarina de gás e controle submarino do ponto de orvalho / desidratação do gás para garantia de escoamento.

A rápida aceleração dos sistemas de produção submarina representa uma significativa tendência nas operações de processamento quando comparado aos processos convencionais de processamento de fluidos na superfície. A complexidade de ambientes submarinos têm gerado desafios cada vez maiores em relação à tecnologia. Conseqüentemente as complexidades dos sistemas submarinos de processamento aumentaram, abrindo espaço para grandes desafios técnicos.

Bringedal *et al.*, 1999, mostrou que o processamento submarino tem significantes benefícios, pois pode ser uma das soluções viáveis para os desafios de garantia de escoamento (escoamento multifásico e a formação de hidratos) para o desenvolvimento de áreas remotas e em águas profundas.

Um conceito baseado em processamento submarino também oferece a opção de fornecer energia adicional ao fluido do poço para que este possa atingir as instalações de tratamento (*offshore* ou *onshore*). Isto pode aumentar a recuperação final e/ou acelerar a produção.

Independente da concepção escolhida, a capacidade de manter os poços em operação é o fator mais importante, determinando o desenvolvimento econômico do campo. Para processamento submarino, o desempenho do equipamento associado aos custos de operação previstos está sujeito a alterações. Além disso, intervenções submarinas são mais caras e são associadas com o longo tempo de espera do navio de intervenção (CHIESA *et al.*, 2000).

Os benefícios do processamento submarino são muitos. Na Tabela 2.1 é apresentado um breve resumo dos benefícios gerais do processamento submarino.

**Tabela 2.1 – Benefícios da produção de óleo utilizando processamento submarino (FJOSNE, 2002).**

<b>Benefícios do Processamento Submarino</b>	<b>Campos Produtores</b>	<b>Novos Desenvolvimentos</b>
<i>By-pass topside bottlenecks</i>	✓	
Re-injeção da produção de água para suporte de pressão	✓	
Extensão da vida de produção	✓	
Aumento da produção e recuperação	✓	✓
Melhora o desempenho de fluxo / garantia de fluxo	✓	✓
Permite a conexão com campos satélites	✓	
Reduz CAPEX devido a redução de investimento <i>topside</i>		✓
Acelera / melhora a produção	✓	✓
Permitem campos com longos <i>tie-backs</i> / águas profundas	✓	✓
Permite o desenvolvimento de campos marginais	✓	✓
Evita o despejo de / poluentes com produção de água	✓	✓
Reduz o uso de produtos químicos / inibidores	✓	✓
Minimiza o consumo de energia / emissão por bbl	✓	✓

No trabalho Abili *et al*, em 2012, foi apresentado a definição de Processamento Submarino Completo (*Full Subsea Processing - FSP*) que significa o completo “manuseio ativo, tratamento ou condicionamento” dado para fluidos de hidrocarbonetos livres provenientes do reservatório, para permitir que cheguem nas instalações de *topside*/recebimento para exportar/refinar/usar.

A Figura 2.2, mostra um diagrama de blocos do conceito de Processamento Submarino Completo. Os fluidos do reservatório, normalmente, chegam através do poço na Estação de Processamento Submarino Completo, onde primeiramente ocorre a prevenção de produção de areia e outros sólidos da formação (através de *Gravel Pack*) seguidos por separação do fluido em gás e líquido. O líquido é também separado em óleo e água. Água e areia produzida são

descartados. O gás é comprimido no Equipamento de Compressão de Gás (*Gas Compression Equipment – GCE*), enquanto o óleo vai para a Bomba Monofásica (*Single Phase Pump – SPP*). Condicionamento químico e aquecimento ativo submarino podem ser aplicados se necessário antes dos fluidos processados serem bombeados para as instalações de recebimento. O gás talvez possa ser usado para elevação artificial (*gas lift*). Se também for necessário, a água pode ser tratada e injetada no reservatório para manter a pressão.

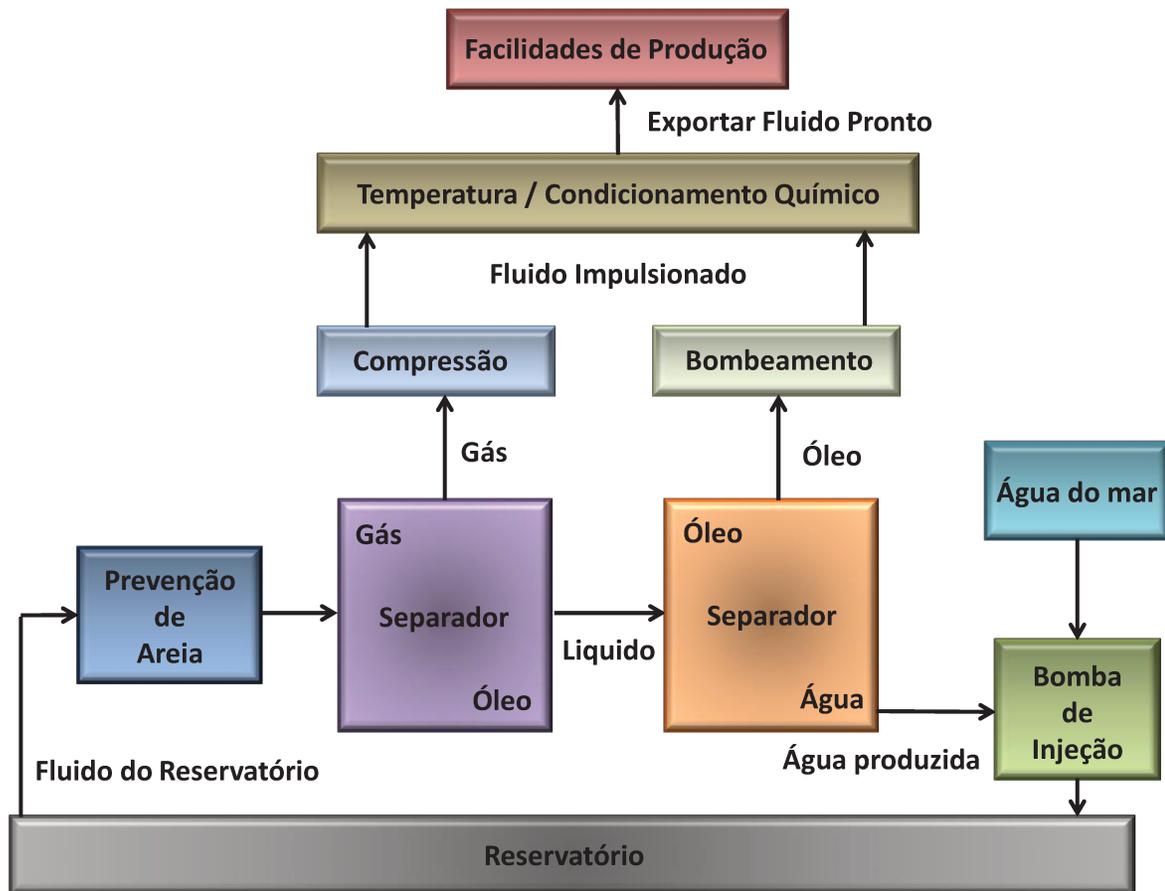


Figura 2.2 - Diagrama fundamental de blocos para Processamento Submarino Completo (ABILI *et al.* 2012).

No entanto, os processos que recebem maior atenção são:

- Bombeio multifásico / bombeamento;
- Sistema de distribuição de energia;
- Sistema submarino de compressão do gás;
- Processos de separação.

Com relação ao bombeio multifásico é sempre considerado como uma boa alternativa para desenvolver campos de petróleo, principalmente para áreas remotas, e tem sido comercialmente disponível desde 1993. O esquema de um *layout* submarino considerado para a bomba multifásica submarina é apresentado na Figura 2.3. É atualmente conhecido como uma tecnologia madura, embora o número de fabricantes comerciais continue limitado. Essa tecnologia consiste em uma bomba capaz de transmitir fluidos nas fases líquida e gasosa em uma única linha não necessitando de outros equipamentos submarinos. A bomba consegue lidar com frações volumétricas de até 97% de gás. A presença de partículas sólidas pode danificar o sistema e o seu consumo de energia pode ser bastante alto quando o bombeio necessitar ser realizado para grandes distâncias (MELO, 2008). A PETROBRAS investiu muito no desenvolvimento de duplo parafuso e conceitos helicoaxial para bombas multifásicas, visando aplicações com diferencial de pressões de até 60 bar. Recentemente, as análises indicaram que o Bombeamento Submarino de Alta Pressão Diferencial (*High Differential Pressure Subsea Boosting*) de até 150 bar, é economicamente e tecnicamente atraente para os vários cenários da PETROBRAS e por isso, vários esforços estão sendo feitos para desenvolver esta tecnologia (ALBUQUERQUE *et. al.*, 2013).

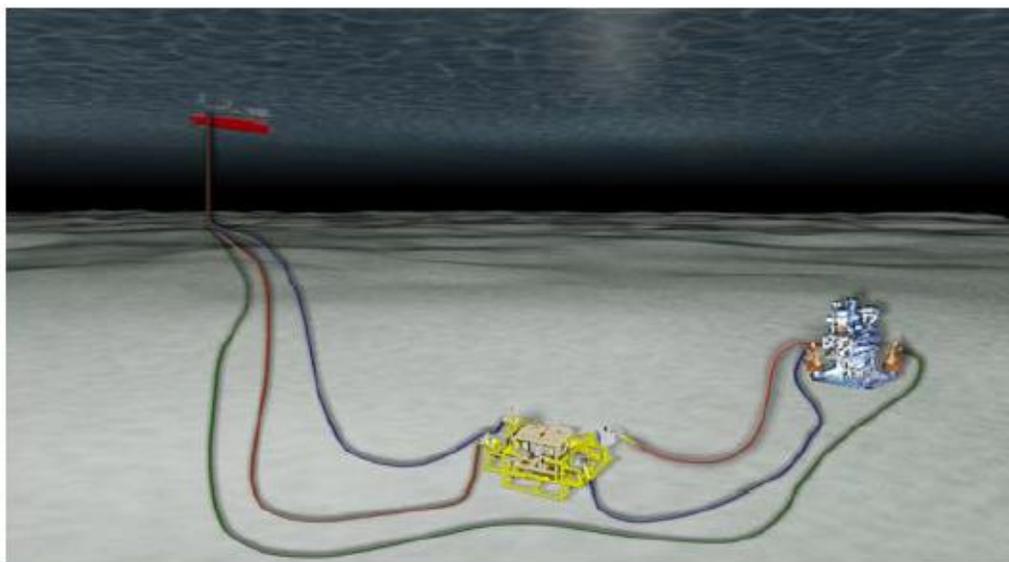


Figura 2.3 – Esquema de um *layout* submarino considerado para bomba multifásica submarina (ALBUQUERQUE, *et. al.*, 2013).

Já a tecnologia do sistema submarino de compressão de gás tem como objetivo aumentar a pressão do gás produzido, onde os potenciais desenvolvimentos podem ser endereçados para

aplicações e/ou condições como o aumento da recuperação do reservatório, manter o patamar de produção o maior tempo possível, acelerar a produção, reduzir as emissões de gases ácidos ou aumentar a recuperação do óleo de um campo por meio de um sistema de re-injeção do gás e reduzir os custos de desenvolvimento de um campo.

Neste contexto apresentado, o foco principal desse trabalho será referente ao processo de separação submarina gás-líquido apresentado na próxima seção.

## **2.2. Separação submarina**

A tecnologia de separação submarina gás-líquido é aplicada com o objetivo de aumentar a vazão de óleo e também melhorar o fator de recuperação de um campo de petróleo. Em cenários específicos, a separação submarina gás-líquido pode ser uma tecnologia capacitada a permitir a produção de óleo em áreas em que o desenvolvimento econômico não seria viável com a utilização de tecnologias de separação convencionais. Assim, o seu desenvolvimento é muito atraente para as empresas de petróleo, uma vez que a qualificação de uma solução robusta pode trazer benefícios para uma ampla variedade de cenários.

A separação submarina de gás-líquido pode ser um caminho para o futuro do desenvolvimento de campos submarinos e a exploração de campos marginais. Essa tecnologia envolveria o bombeamento da fase líquida através de uma linha, enquanto o gás fluirá sem reforço por meio de uma linha separada. Mesmo com todas as vantagens da separação submarina de gás-líquido, há uma relutância em adotar esse esquema para a maioria dos novos desenvolvimentos (DEVEGOWDA e SCOTT, 2003). Os benefícios e algumas das razões para esta hesitação por parte de todos operadores de aplicar esse conceito, são listados na Tabela 2.2.

Apesar de todas as vantagens apresentadas na Tabela 2.2, relacionadas com a separação submarina gás-líquido, há poucos destes sistemas operacionais hoje em dia, pois se devem considerar os desafios tecnológicos implicados no projeto, instalação e operação desses sistemas complexos.

No entanto, além desses desafios tecnológicos do desenvolvimento de um equipamento compacto e sistemas adequados para a separação de óleo, gás e água em um ambiente submarino, outras dificuldades surgem desde a instalação e a concepção do processamento submarino.

A confiabilidade e a disponibilidade são consideradas os principais fatores para determinar a mudança de separação em *topsides* para a separação submarina.

**Tabela 2.2 – Benefícios e algumas relutâncias para o uso de sistemas de separação submarina.**

Benefícios	Relutância
Redução da contrapressão imposta na região de areia do reservatório permitindo uma maior taxa de produção melhorando a recuperação final.	A complexidade da arquitetura submarina aumenta com a utilização de separadores. Manifolds, válvulas, sistemas de controle, instrumentação, todos aumentam os custos e a complexidade do sistema. Portanto o uso de sistema de separação submarina depende da relação custo/benefício.
A possibilidade de o gás ser re-comprimido e re-injetado para fornecer a pressão de suporte para o reservatório.	A estação de bombeamento de líquido requer enormes quantidades de energia, para o qual uma fonte de energia pode ou não existir em uma plataforma.
A possibilidade de utilizar bombas centrífuga para elevar o líquido.	
A linha de gás sofre uma queda de pressão mais baixa, reduzindo a necessidade de re-compressão do gás.	
Ajuda nos problemas de garantia de escoamento, pois como uma grande porcentagem do hidrocarboneto mais leve é desviada através da linha de gás, ajudando a evitar problemas de formação de hidratos ou reduzir a quantidade de metano a ser injetado.	
Despressurização do separador e da linha de escoamento de líquido através da linha de gás podendo eliminar a formação de hidratos durante as paradas de produção.	
A pressão do separador pode ser abaixada para permitir mais facilmente a re-partida dos poços.	
O esquema de separação submarina gás-líquido permite também a redução do diâmetro dos <i>risers</i> e linhas de escoamento ( <i>flowlines</i> ).	
O correto processamento de fluidos no leito marinho também permite estações menores de processo hospedadas nas plataformas.	

Há também alguns desafios a serem superados para que esta tecnologia seja adotada no desenvolvimento de campos recentes. Algumas das soluções poderiam ser:

- O uso de mini-TLPs (*Tension-Leg Plataforma*), mini-FPSOs (*Floating Production Storage and Offloading*) ou bóias para agir como estações de energia para os campos;
- Um pouco do gás separado poderia ser re-associado com o líquido no *riser* da base para reduzir o efeito de *slugging* e para proporcionar o efeito de gás *lift*. Alguns campos dessa natureza existem e funcionam;
- *Tieback* do fluxo gás-líquido separado para campos existentes onde o escoamento multifásico pode ser um problema.

Hoje em dia os cenários da indústria do petróleo se tornam mais complexos, uma vez que se tem a intenção de aplicar a tecnologia de separação gás-líquido em águas ultra-profundas, para altas taxas de vazão e em altas pressões de separação. No trabalho de Albuquerque *et. al.*, em 2013, para superar estes desafios, é apresentado um projeto específico chamado de SSGL (Separação Submarina Gás-Líquido). A Figura 2.4 mostra uma visão esquemática do sistema submarino considerado para um possível cenário do projeto SSGL.

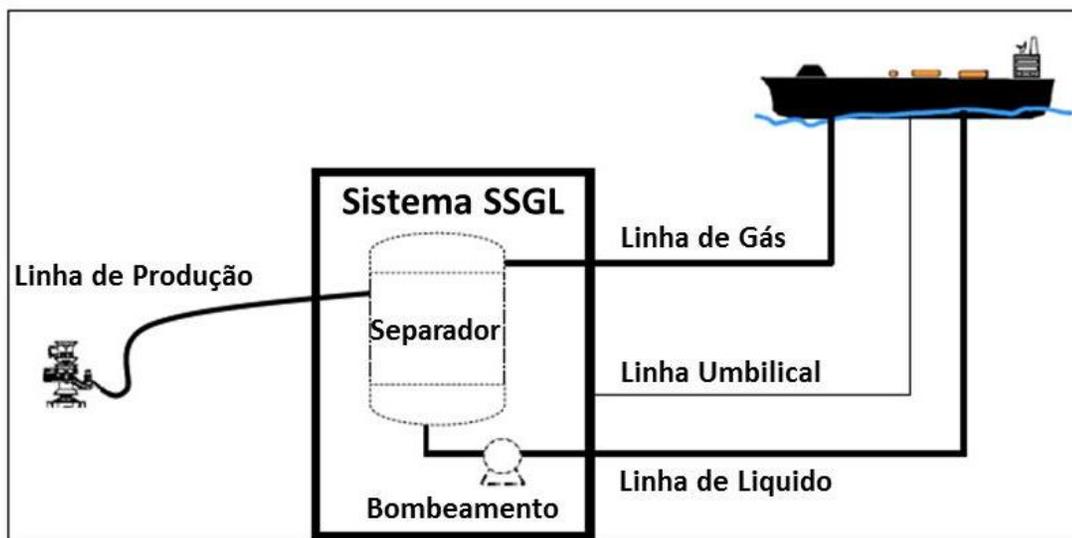


Figura 2.4 – Esquema de um *layout* submarino considerado para o projeto SSGL (ABULQUERQUE *et. al.*, 2013).

A primeira etapa deste projeto foi a avaliação das tecnologias disponíveis onde alguns deles foram testados em *skids* de laboratório ou em campos de aplicação (aplicações *onshore* ou em Unidades de Produção). A análise considerou como potencial alternativa o uso do separador VASPS em vez do uso de tecnologias de separação convencionais.

Além dos desafios inerentes à separação gás-líquido, o sistema também deve lidar com a produção de sólidos, de modo a não afetar o desempenho da separação e também evitar o desgaste prematuro dos componentes.

Para o cenário com média pressão de separação, o separador será associado com um sistema de bombeamento para aumentar ainda mais a taxa de vazão de óleo. Na Figura 2.5 é mostrado um diagrama com os principais blocos considerados para a construção do projeto SSGL.

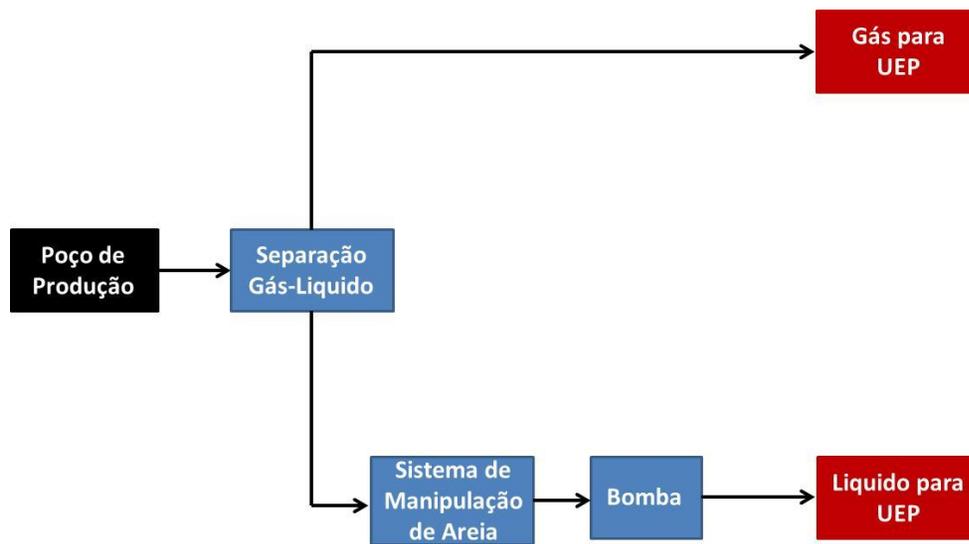


Figura 2.5 – Blocos de construção para o projeto SSGL (ABULQUERQUE *et. al.*, 2013).

Existem muitas tecnologias diferentes disponíveis de *topsides* de separação gás-líquido. Uma abordagem lógica é a de melhorar a tecnologia de *topsides* a fim de realizar a separação gás-líquido para tirar vantagem da experiência operacional existente. No entanto, também novas tecnologias têm sido desenvolvidas para o uso submarino.

Alguns dos métodos de separação submarina gás-líquido a ser explorada são citadas abaixo:

- Convencionais separadores gravitacionais de gás-líquido (horizontal / vertical);
- Separador *Inline* (CDS / Statoil);

- Sistema Caisson de Separação com BCS (Shell);
- Separação Submarina Água-Óleo (SSAO);
- VASPS.

O primeiro é um exemplo de tecnologias tradicionais de *topsides*, que estiveram presentes durante muitas décadas, enquanto que os três últimos são tecnologias mais recentes.

A tecnologia *Inline* é o resultado de um programa de desenvolvimento conjunto entre CDS e Statoil. Recentemente, a tecnologia *Inline* tem recebido muita atenção devido ao peso considerável e a redução de espaço que pode ser conseguida. Separadores *Inline*, são baseados na tecnologia ciclônica e podem ser considerados como mono-ciclones.

Dois tipos de separadores *Inline* estão disponíveis e qualificados para o mercado. Esses dois separadores são como uma nova geração de deslíquidificadores e desgaseificadores de elevada eficiência, com inserção em tubulações de processo já existentes. É por isso que eles são descritos como “*Inline*”. Um deslíquidificador remove líquidos do gás na linha do poço com maior quantidade de gás enquanto um desgaseificador separa o gás do líquido na linha do poço com maior quantidade de líquido. O princípio básico consiste na utilização de elementos de redemoinho estático, que induzem fluxos ciclônicos para pressionar o líquido para fora em direção às paredes dos tubos durante a condução do gás para o interior para criar um núcleo de gás (KREMLEVA, *et al.*, 2010).

A Figura 2.6(a) mostra uma representação esquemática de um Desgaseificador *Inline*. Em um Desgaseificador (*Degasser*) o líquido que domina a linha de fluxo é passado através de um elemento de mistura. A finalidade deste misturador é criar bolhas no líquido, de modo a evitar um escoamento estratificado. A jusante do misturador está situado um elemento espiral estacionário que faz com que o fluido rotacione. Devido à diferença de densidade entre o gás e o líquido, o gás migra para o centro do ciclone na medida em que o líquido forma uma película de líquido (que está girando) na parede do tubo do sistema. O gás sai do ciclone por uma seção anular na região do ciclone (SCHOOK e ASPEREN, 2005).

Uma representação esquemática de um Deslíquidificador é apresentada na Figura 2.6(b). Também no Deslíquidificador (*Deliquidiser*), o escoamento estratificado tem que ser evitado. Por esse motivo, um elemento de mistura pode ser posicionado no separador de entrada, se

necessário. O fluido entra em um elemento estacionário de redemoinho, no qual faz com que a mistura entre em rotação. Devido à diferença de densidade, um filme de líquido é criado na parede do tubo. No tubo principal um tubo de diâmetro menor é inserido através do qual o gás é removido. O líquido entra no espaço entre os dois tubos e é recolhido em uma seção vertical (SCHOOK e ASPEREN, 2005)..

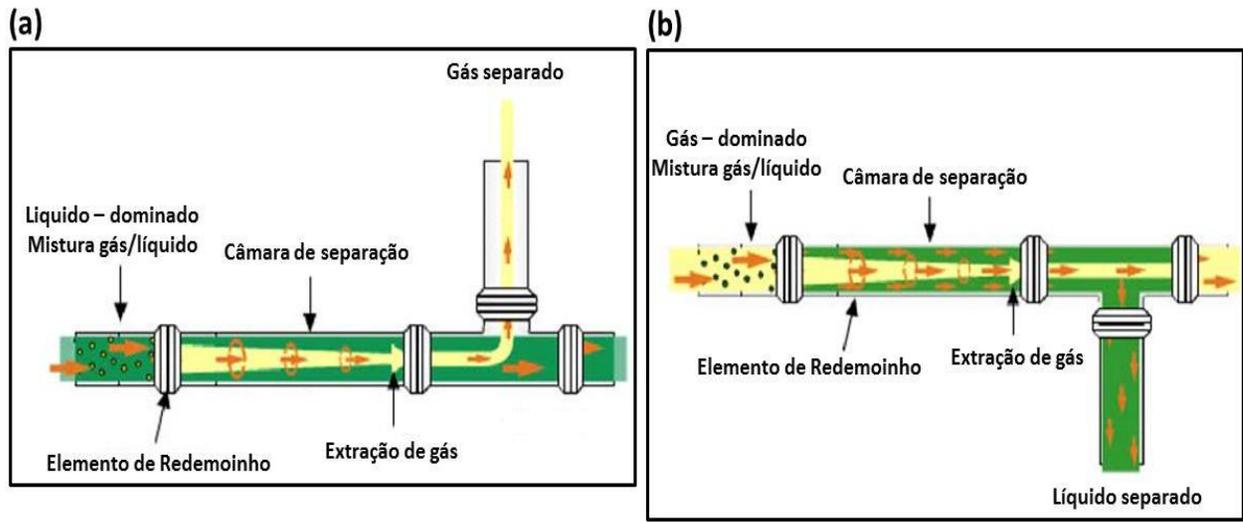


Figura 2.6 – Representação esquemática; (a) Desgaseificador *Inline*; (b) Desliquificador *Inline*.

A indústria do petróleo tem demonstrado grande interesse na utilização de separadores *Inline* para uma ampla gama de aplicação. A tecnologia *Inline* gás/líquido é uma tecnologia compacta e com baixo custo de separação adequada para diversas aplicações. Novas aplicações e designs melhores estão rapidamente sendo explorados. No trabalho de Kremleva, *et al.*, em 2010, são apresentados alguns benefícios da utilização da tecnologia de separação *Inline*, como se segue:

- A tecnologia pode ser facilmente adaptada em esquemas de processos existentes;
- Redução considerável de espaço e peso quando comparado com sistemas tradicionais;
- A tecnologia *Inline* pode ser aplicada em regiões com diferentes condições climáticas, como por exemplo, no Ártico;
- O design de estrutura aberta garante um ótimo desempenho ao ser insensível a incrustação;

- Soluções sob medida para caso para melhor separação;
- A tecnologia é passiva, ou seja, não exige um controle humano e nem a exigência de uma fonte de energia externa;
- A tecnologia *Inline* ajuda a encontrar uma solução para problemas ecológicos;
- A aplicação da tecnologia de separação *Inline* gás/líquido para o teste de poço fornece resultados mais confiáveis devido a sua eficiência de separação. Essa tecnologia é de fácil instalação e operação.

A tecnologia de separação Caisson foi desenvolvida pela Shell e consiste em um separador de duas fases situado no leito marinho. O esquema de um Sistema de Separação Caisson com BCS é apresentado no esquema da Figura 2.7. A separação do gás e líquido ocorre tanto na entrada inclinada e tangencial, bem como no interior do próprio Caisson. O líquido sendo mais pesado é dirigido para a parede do separador, onde escoar para baixo para a BCS. O gás que é mais leve migra para a parte superior do Caisson e sai através da saída de gás. Uma BCS é instalada na região de líquido do separador (parte inferior do separador) para o transporte do líquido para a Unidade Estacionária de Produção (UEP). A BCS funciona como um dispositivo de controle do nível de líquido do sistema Caisson (DEUEL *et al.*, 2011).

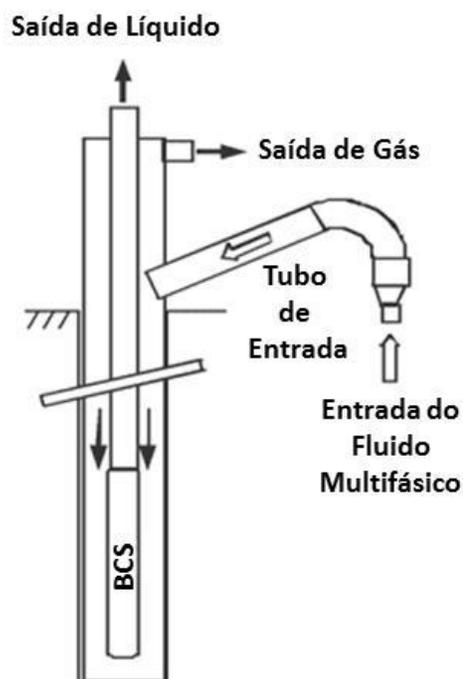


Figura 2.7 – Esquema de um Sistema de Separação Caisson com BCS (HARRIS *et al.*, 2012).

Esse sistema foi aplicado pela Shell no campo de Perdido localizado no Golfo do México e no Parque das Conchas (BC-10) no Brasil. Ambos estão localizados em águas profundas, onde Perdido tem aproximadamente 3000 metros de lâmina d'água e Parque das Conchas tem aproximadamente 2000 m de lâmina d'água.

No trabalho de Gilyard e Brookbank de 2010, foi realizado um teste de eficiência de separação do separador Caisson. Esse teste foi realizado com duas BCSs operando em série constituindo 23 estágios e com motor de 800 HP. Ambas as bombas foram operadas com uma unidade de variação de frequência. A Figura 2.8 mostra um gráfico da eficiência de separação do separador Caisson para diferentes vazões e taxas de gás.

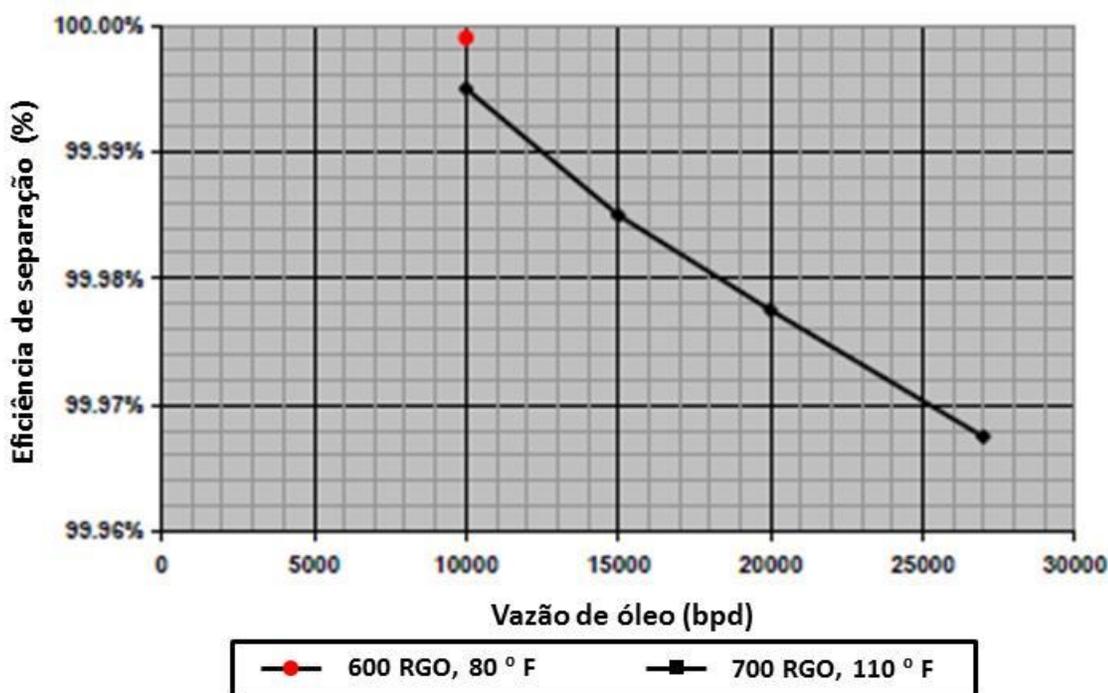


Figura 2.8 – Gráfico da eficiência de separação do separador Caisson (GILYARD e BROOKBANK, 2010).

O Campo do Parque das Conchas demonstrou-se eficaz, tanto no seu processamento submarino, como também no sistema de produção em torno do separador vertical Caisson e BCSs.

A Separação Submarina Água-Óleo (SSAO) tem como principal objetivo o processamento primário dos fluidos no leito marinho, fazendo com que a água produzida tenha outro destino ao invés de ir para a plataforma de produção.

Os benefícios da aplicação do sistema SSAO estão relacionados em aliviar a planta de produção, que permanece apenas com uma quantidade residual de água, eliminando novas construções na área de convés. Uma bomba submarina também pode ser acoplada ao sistema SSAO para aumentar a vazão de óleo.

O sistema SSAO é usado principalmente em campos maduros, e também pode ser considerado para aplicação em uma área específica, com uma infraestrutura já existente, ou para o propósito de revitalização de um campo maduro em uma região remota.

Nos últimos 15 anos, foram instalados alguns sistemas SSAO. O sistema piloto chamado Troll foi o primeiro sistema SSAO instalado, no ano de 1999. Em 2007, o sistema Tordis, projetado para vazões mais elevadas, foi mais um sistema SSAO instalado. O Marlim SSAO 3-Phase foi instalado em 2012 e é o primeiro sistema para separação em águas profundas de óleo pesado e água, na qual é re-injetada no mesmo reservatório produtor.

A Figura 2.9 apresenta um esquema de um sistema submarino composto por 3 poços produtores ligados em um manifold. O manifold está ligado ao sistema de Separação Submarina Água-Óleo, onde a água separada é re-injetada através de 3 poços injetores e o óleo e o gás separados, chegam a plataforma de produção cada um em um *raiser*.

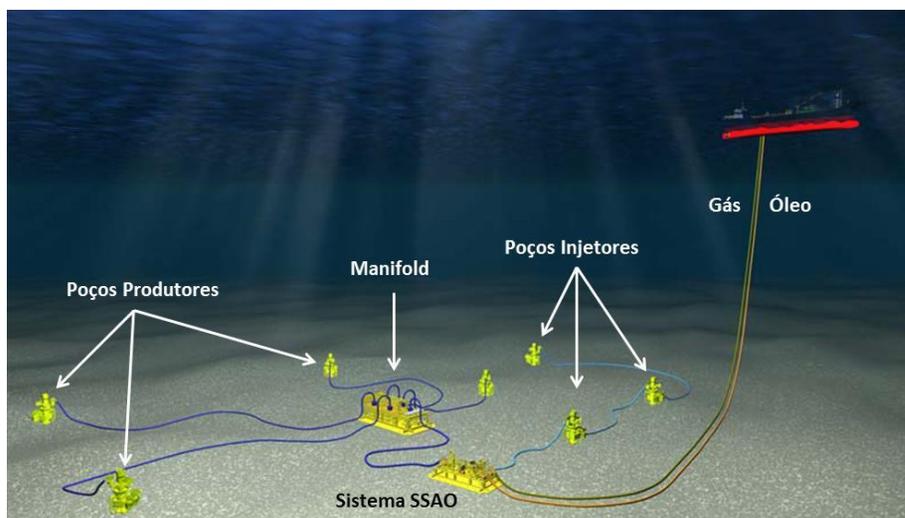


Figura 2.9 – Esquema de um sistema submarino considerado para o sistema SSAO (ALBUQUERQUE *et al.*, 2013).

Já o VASPS (*Vertical Annular Separation Pumping System*), que é o separador estudado nesse trabalho é um separador gás-líquido associado a um sistema de elevação de líquido. Tem

sido operado pela PETROBRAS desde o final de 2001 (MCCLIMANS e FANTOFT, 2006). Essa tecnologia oferece mais benefícios que a separação submarina padrão de gás-líquido. O VASPS usa um pequeno poço perfurado próximo a base do *riser* de produção e uma BCS (Bomba Centrifuga Submersa). O fluido produzido que sai do *manifold* é entregue para o sistema VASPS e o fluxo de gás e líquido é separado dentro do segundo poço. O gás escoo para a superfície de forma natural sem a necessidade de energia adicional de elevação e o líquido é bombeado para a superfície com a BCS. O sistema VASPS é melhor definido na próxima seção.

Portanto, embora haja sempre a preocupação de que o ritmo de adoção de novas tecnologias seja insuficiente para manter-se com a demanda de desenvolvimento em águas ultra-profundas, a tecnologia tem sido, e continuará a ser responsável para o crescimento e sucesso da produção neste tipo de cenário *offshore*.

### **2.3. Separador VASPS**

A tecnologia VASPS foi desenvolvida com uma parceria entre companhias internacionais de petróleo (BP, Conoco, Agip, Mobil e Baker Jardine) através de projeto multicliente. Teve início depois de alguns estudos iniciais em 1990, com testes de laboratório em uma unidade de escala para definir o modelo matemático dos campos de fluxo dentro da unidade (ENTRESS *et al.*, 1991).

Entre os anos de 1993 e 1995 foi testado um protótipo de separador VASPS no campo de testes da AGIP em Trecate, na Itália, para verificar o desempenho do separador com hidrocarbonetos. Nesta fase, a instalação de uma bomba elétrica submersa foi omitida para não aumentar as dificuldades de interpretação dos resultados obtidos.

Com resultados positivos nos testes, foi realizado em 1996 um estudo para verificar o comportamento do VASPS como sistema de bombeamento e da necessidade de ter tecnologias paralelas necessárias para as fases futuras, tais como, o sensor de nível e controle do sistema (BENNETI e VILLA, 1997).

No ano de 1997, foi desenvolvida a fase pré-submarina no campo de testes da PETROBRAS, localizado em Atalaia, no Brasil.

Por fim, entre os anos de 1998 e 2002, foi dado início à fase de demonstração submarina, onde o VASPS foi instalado na Bacia de Campos, no Brasil (VALE *et al.*, 2002).

Também, vale lembrar, que houve um projeto P&D entre a PETROBRAS e a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), entre os anos 1994-1997 e entre os anos 2000-2002, onde esse projeto foi fundamental para o desenvolvimento da tecnologia VASPS.

O objetivo desse projeto foi o desenvolvimento de um modelo para os processos hidrodinâmico bifásico que ocorrem no interior do separador. O escoamento hidrodinâmico e os processos de segregação de fase no interior do separador são descritos no item 3.1 deste trabalho. Já os modelos desenvolvidos para a Câmara de Expansão, são apresentados no item 3.3.

Os estudos e experimentos tiveram como foco o desempenho do separador quando operado com líquidos de viscosidades moderadas, de 1 cP até 21 cP. Durante esse período, foram construídos protótipos em escala reduzida e dados experimentais foram tomados para ajustar o modelo e validá-lo.

A Figura 2.10 mostra os três protótipos em escala reduzida, Modelo I, Modelo II-A e Modelo II-B, que foram construídos nesse projeto PETROBRAS/UNICAMP e suas respectivas dimensões. O Modelo I é aproximadamente 3 vezes maior que o Modelo II-A. A parte superior do separador, chamada de Câmara de Expansão, é diferente entre o Modelo II-A e o Modelo II-B. No Modelo II-A, a Câmara de Expansão possui um formato cônico, enquanto no Modelo II-B a Câmara de Expansão possui um formato cilíndrico. Foram testadas três hélices de aço inoxidável com alturas diferentes. No Modelo I, foi usado uma hélice com  $10^\circ$  de inclinação e no Modelo II-A e Modelo II-B foram usadas hélices substituíveis, com ângulos de inclinação de  $10^\circ$  a  $18^\circ$ .

Os estudos através de simulações numéricas e testes experimentais revelaram que, o filme de líquido na Câmara de Expansão com a parede cilíndrica, é mais fino. Portanto, uma vez que, o filme de líquido mais fino facilita a separação das fases e a parede cilíndrica é mais fácil de ser construída, o Modelo II-B foi o mais indicado para melhor eficiência de separação.

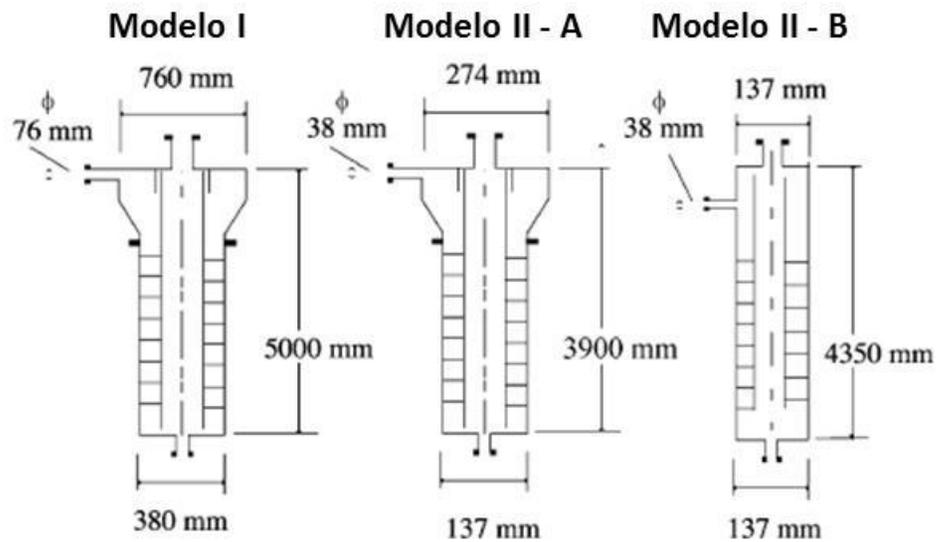


Figura 2.10 – Principais dimensões dos modelos em escala reduzida, construídos no projeto P&D PETROBRAS/UNICAMP (ROSA *et al.*, 2001).

### 2.3.1. Aplicações da tecnologia VASPS

As primeiras aplicações do sistema VASPS foram pensadas e mostradas no trabalho de Baker e Entress em 1991, onde foram propostas algumas aplicações para o separador VASPS combinando a funcionalidade da separação submarina remota e o sistema de bombeamento com a do sistema de medição multifásica. A configuração básica pode ser facilmente adaptada para várias aplicações específicas como:

- Produção submarina remota: a aplicação primária da atual configuração é um sistema de produção submarina remota utilizando uma unidade por poço.
- Locais ambientalmente sensíveis: o uso do VASPS como um dispositivo de produção remota não é limitada para aplicações submarinas. O sistema tem potencial aplicação em qualquer lugar que existem complicações no fornecimento de instalações de processamento perto da cabeça do poço.
- Produção submarina localizada e teste estendido de poço: a configuração padrão pode facilmente ser adaptada para fornecer uma separação de dois estágios com óleo estabilizado e água medida e bombeada para um navio tanque localmente ancorado e/ou para uma unidade de armazenamento.

- Medidor de vazão multifásica: A configuração padrão do VASPS pode ser facilmente adaptada para servir como um medidor de vazão multifásico, substituindo a bomba de produção de líquido com uma unidade *manifold* pequeno e adequado.
- Separador de teste: Uma unidade VASPS poderia também ser utilizada como uma compacta e eficiente alternativa para plataforma convencional baseado em separador de teste e em sondas de perfuração para teste de poços, etc.

No trabalho de Benetti e Villa em 1997, foi construído e testado um protótipo do VASPS em escala total (com 30” de diâmetro e 60-70 m de altura) para alcançar uma capacidade nominal de 80 m<sup>3</sup>/h. O protótipo foi instalado e testado no Circuito de Teste Multifásico da Agip em Trecate, que faz parte das instalações de produção de Trecate, como um campo *onshore* operado pela Agip na Itália. Esse circuito é operado em um desvio da produção com um óleo cru leve de 40 °API, proveniente de vários poços com um máximo de vazão de líquido de 100 m<sup>3</sup>/h (aprox. 15000 bbl/dia) associado com uma razão gás/óleo (GOR) de cerca de 71 Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (aprox. 400 Scf/Stb) na condição de estoque no tanque ou 30 Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (aprox. 170 Scf/Stb) na condição de trabalho (60 bar e 55 °C).

Os resultados dos testes de eficiência de separação do líquido e do gás, do protótipo VASPS instalado no campo de testes de Trecate, são mostrados na Figura 2.11.

O desempenho do separador depende da medida da quantidade de líquido que é transportado pela saída de gás (*Liquid Carried Over* – LCO) e da quantidade de gás transportado pela saída de líquido (*Gas Carried Under* – GCU) ou para a eficiência de separação de líquido pretendido como a quantidade de líquido no gás referente à vazão de entrada de líquido e vice e versa para o gás. De acordo com o gráfico da Figura 2.11, pode-se observar que para vazão de líquido de 78 m<sup>3</sup>/h tanto a eficiência de separação do líquido (linha sólida) como a do gás (linha pontilhada) é de cerca de 99,5%. Também se observa que a eficiência de separação é alta, acima de 92%, para vazões de até 80 m<sup>3</sup>/h.

Sendo assim, o desempenho do separador pode ser resumido em dois pontos. Primeiro ponto é o aparecimento do LCO (maior que 0,5 m<sup>3</sup>/h) com uma vazão de líquido de 75-80 m<sup>3</sup>/h dependendo do nível (Figura 2.12(a)). O segundo ponto é que o GCU (medido como fração de

vazio na saída de líquido do VASPS) é desprezível, pois é menor que 1% da fração de vazio na saída de líquido, para vazão de líquido de até 80 m<sup>3</sup>/h (Figura 2.12(b)).

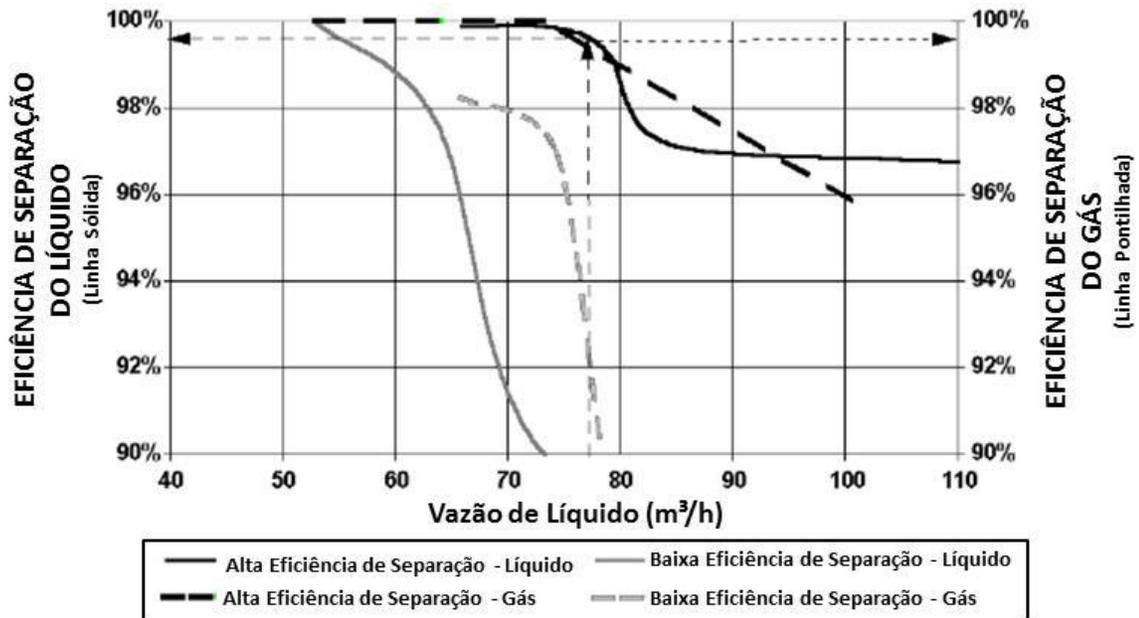


Figura 2.11 – Teste de eficiência de separação do protótipo VASPS instalado no campo de testes em Trecate (BENETTI e VILLA, 1997).

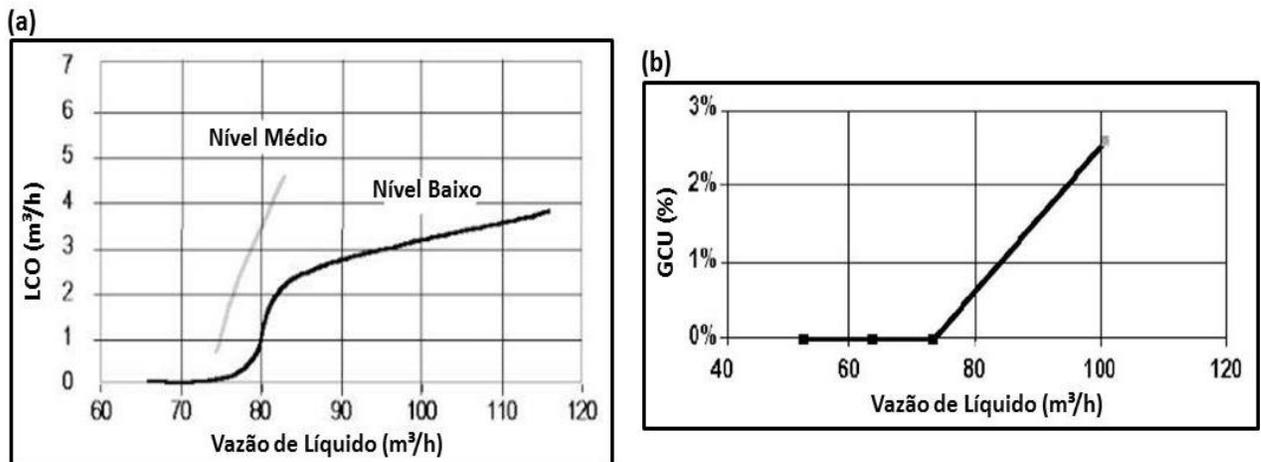


Figura 2.12 – (a) LCO medido no protótipo VASPS em função da vazão total de líquido e o nível do VASPS; (b) GCU medido no protótipo VASPS em função da vazão total de líquido (BENETTI e VILLA, 1997).

Depois do sucesso dos testes desse protótipo VASPS, todo esse conjunto foi levado ao local de teste em Atalaia no Brasil, onde o autor Vale *et al.* em 1998, diferentemente de Benetti avaliou o desempenho do VASPS quando usado óleo com alta viscosidade.

O objetivo dos testes realizados em Atalaia foi de verificar a precisão do projeto VASPS ao prever o desempenho de separação em diferentes situações. Obviamente, como os experimentos foram realizados em Atalaia com óleos mais viscosos, se esperava que a capacidade da unidade VASPS fosse um pouco mais baixa do que os resultados obtidos em Trecate.

A estratégia do teste foi verificar a eficiência do separador com baixa vazão de óleo (tipicamente de 20 m<sup>3</sup>/h, com fração de vazio local de 0,6 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), aumentando a vazão gradativamente. Fração de vazio local de até 2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (alta GOR) também foram testados.

No teste de Atalaia, três conceitos na configuração interna do VASPS foram testados. O primeiro conceito é chamado de Hélice A, que não possui a Câmara de Expansão no topo do VASPS. Os outros dois conceitos chamados Hélice B e Hélice C possuem uma Câmara de Expansão no topo da unidade VASPS, de modo que a separação centrífuga do gás-óleo ocorra antes do canal helicoidal. Hélice A e B também foram ambas testadas em Trecate. Os três conceitos de configuração do VASPS (Hélice A, Hélice B e Hélice C), foram obtidos através do projeto P&D entre a PETROBRAS e a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) entre os anos de 1994 a 1997. A capacidade de separação do protótipo para fração de vazio local de 0,6 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, com diferentes viscosidades do óleo e para todos os conceitos do *design* interno, é mostrado no gráfico da Figura 2.13.

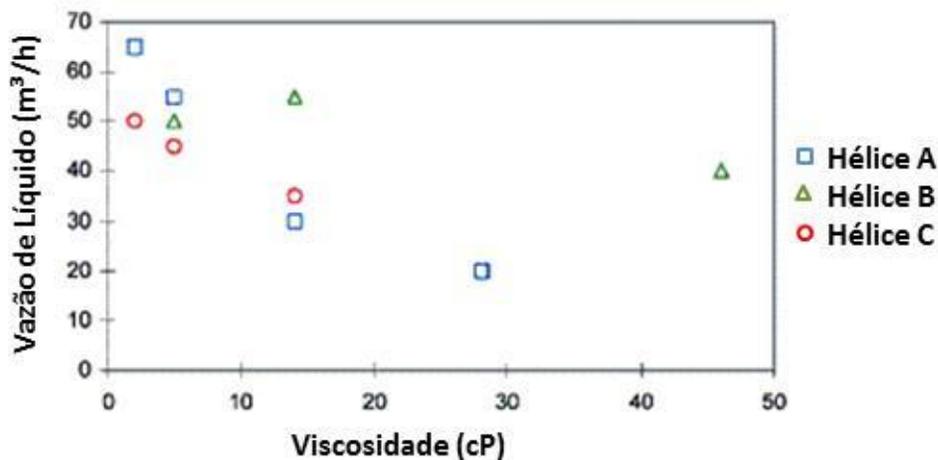


Figura 2.13 – Gráfico da capacidade de separação do protótipo VASPS instalado em Atalaia (VALE *et al.*, 1998).

Os testes da Hélice A e B, com viscosidade do óleo de 5 cP em Atalaia, mostraram uma reprodutibilidade dos resultados de Trecate. Os resultados apresentados no gráfico da Figura 2.13, resumem os resultados obtidos tanto no campo de teste de Atalaia como de Trecate. Em geral, parece que há uma tendência para uma diminuição do desempenho de separação à medida que aumenta a viscosidade do óleo. Os resultados obtidos com viscosidade do óleo de 65 cP foram omitidos, devido a inconsistência dos resultados. Testes com alta razão gás-óleo (GOR) mostraram uma redução no desempenho de separação para uma dada vazão de líquido. Portanto os resultados mostraram que o VASPS é também viável como um separador gás-líquido durante o processamento de óleo bruto com viscosidade de até 46 cP.

Vale *et al.* também apresentaram um gráfico de comparação da curva de produção estimada com e sem o VASPS, mostrado na Figura 2.14, para o cenário de aplicações e desenvolvimentos na Bacia de Campos.

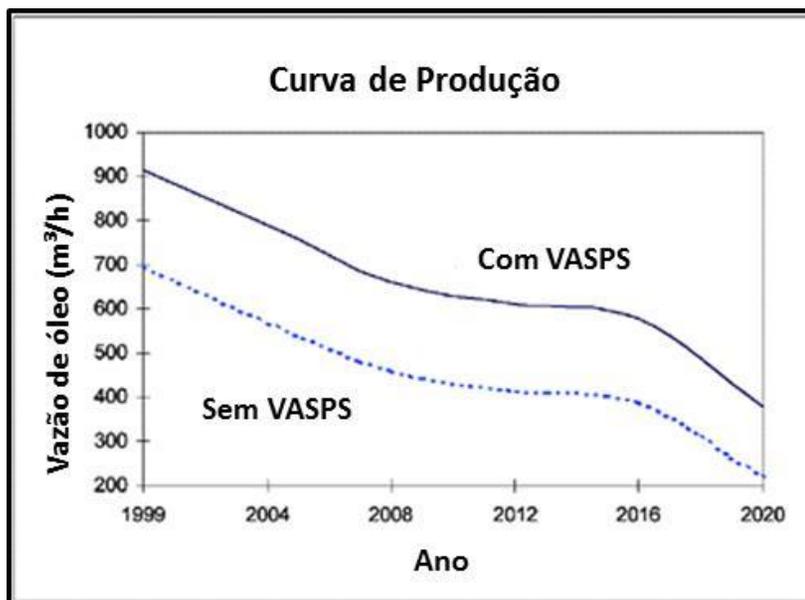


Figura 2.14 – Curva de produção com e sem o VASPS (VALE *et al.*, 1998)

Com o sucesso dos testes do protótipo VASPS nos anos anteriores, foi instalada uma unidade submarina do VASPS em julho de 2001, no poço MA-01 do campo de Marimbá, localizado na Bacia de Campos no Brasil. Vale *et al.* em 2002, mostraram que a produção do poço MA-01, utilizando o VASPS é simples no que diz respeito à produção de poços similares com *gas-lift*.

Foi demonstrada a viabilidade da instalação e do controle do sistema. A medição do nível de líquido dentro do separador é fundamental para o correto funcionamento do sistema VASPS. O controle do sistema utiliza sensores de nível para monitorar o nível de líquido dentro do separador pelas seguintes razões:

- Manter o nível de líquido em um ponto ótimo para maximizar a eficiência do separador;
- Manter o nível de líquido acima da entrada da bomba BCS para evitar danos na bomba;
- Manter o nível de líquido abaixo da saída de gás para evitar que o líquido saia pela linha de saída de gás (LCO).

O sistema foi operado em um dos dois modos, MANUAL ou AUTOMÁTICO. No modo MANUAL o operador é completamente responsável para o controle do nível e no modo AUTOMÁTICO o *software* do sistema torna-se responsável pelo controle do sistema.

Antes de o sistema VASPS ser instalado, o poço MA-01 estava produzindo 750 m<sup>3</sup>/d com assistência do *gas-lift* de 100000 m<sup>3</sup>/d e com uma pressão de escoamento de 36 kgf/cm<sup>2</sup>. Já com o VASPS instalado e com o sistema no modo AUTOMÁTICO, a produção tem uma média de 1000 m<sup>3</sup>/d sem a utilização do *gas-lift* para MA-01. A Figura 2.15 mostra os efeitos que o VASPS teve sobre a taxa de produção do poço MA-01 e redução do volume de *gas-lift*.

A pressão do escoamento também foi reduzida de 36 kgf/cm<sup>2</sup> para 11 kgf/cm<sup>2</sup>, permitindo que o poço MA-01 produzisse a uma taxa superior sem *gas-lift*, proporcionando um impacto positivo sobre o dia a dia das operações.

A partir dessa instalação a tecnologia VASPS foi considerada qualificada para participar de estudos de desenvolvimento de campos de petróleo na PETROBRAS como uma viável alternativa quando analisada as opções de produção.

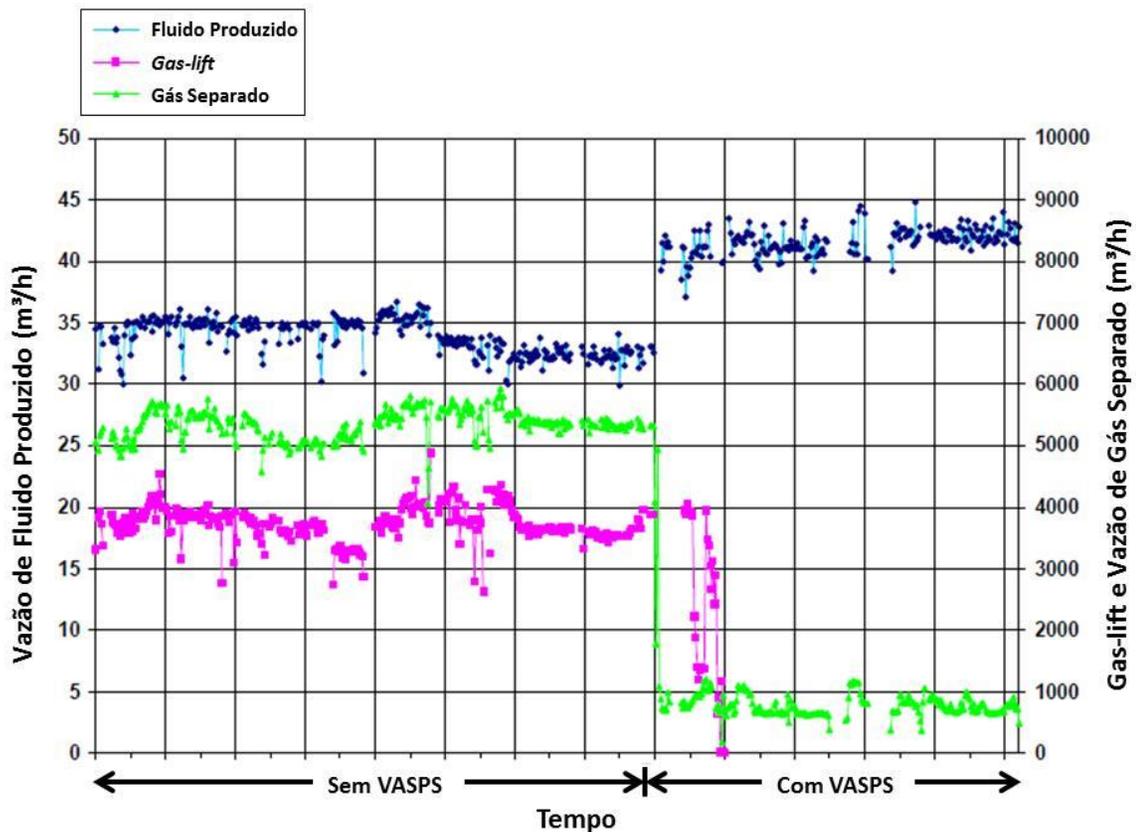


Figura 2.15 – Produção do poço MA-01 antes e depois do VASPS (VALE *et. al.*, 2002).

Após cinco meses de operação o protótipo VASPS apresentou uma falha quando o sistema de controle e proteção da BCS não agiu conforme o esperado após um mau funcionamento na planta de processo. As primeiras investigações detectaram uma falha na bomba BCS, onde ocorreu a rotação dos difusores (efeito *spin*) devido a uma falha operacional.

Peixoto *et al.*, em 2005, mostram que em janeiro de 2004 uma plataforma de intervenção foi utilizada para a substituição da BCS. O protótipo VASPS retomou a operação em maio de 2004. Enquanto isso, foram implementados vários ajustes no sistema de controle, de modo a aumentar a confiabilidade do protótipo.

Para medir o desempenho do sistema ao longo do tempo, uma verificação mensal foi implementada para verificar itens como, as razões de *shutdowns* do VASPS (Figura 2.16) e a eficiência operacional do VASPS e da planta de processo da plataforma P-08 (Figura 2.17).

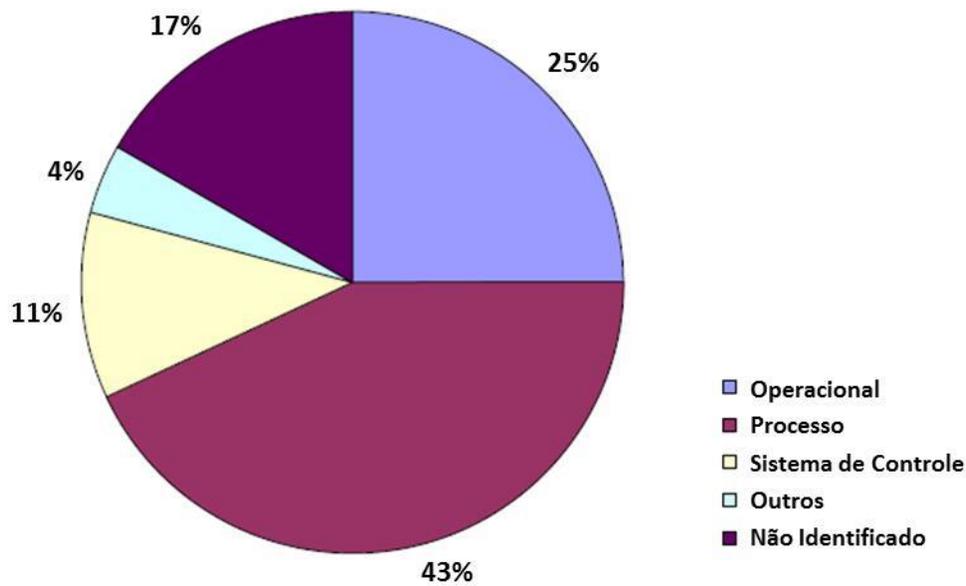


Figura 2.16 – Razões de *shutdowns* do protótipo VASPS (PEIXOTO *et. al.*, 2005).

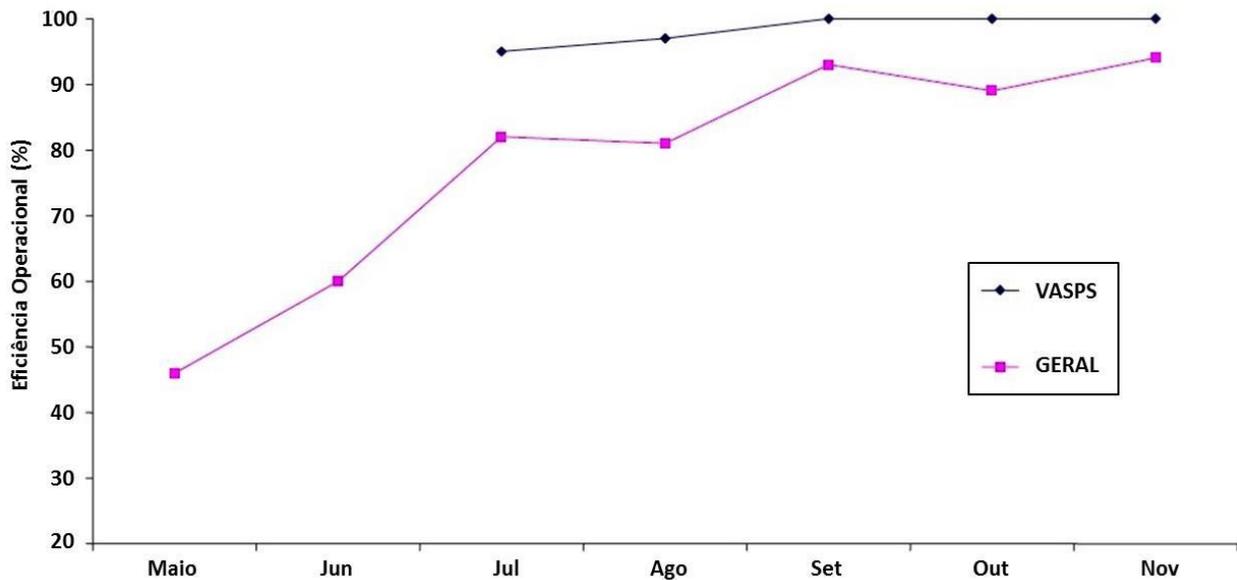


Figura 2.17 – Eficiência operacional do VASPS e da planta de processo da plataforma P-08 (PEIXOTO *et. al.*, 2005).

A experiência acumulada nessas campanhas operacionais do VASPS mostra que ainda existe um potencial para melhorias para esse separador submarino que podem ser exploradas, com a aplicação de novos equipamentos e recursos de automação.

## 2.4. Câmara de Expansão

O princípio e o projeto básico do hidrociclone convencional tem quase 100 anos, mas esta tecnologia não têm encontrado significativa aplicação na indústria até depois da Segunda Guerra Mundial. Houve um rápido crescimento no uso de hidrociclones com a indústria química, mineral e carvão. As razões para essa popularidade encontram-se na concepção de projeto e simplicidade operacional, alta capacidade, pouca manutenção, baixo custo operacional e o pequeno tamanho físico do dispositivo (SVAROVSKY, 1984).

Um hidrociclone típico consiste de uma seção cilíndrica com um tubo central conectado com uma seção cônica com um tubo de descarga. Um tubo interno é ligado com a seção do topo do cilindro (NARASIMHA *et al.*, 2005).

Esse hidrociclone típico com formato cônico é muito utilizado quando se tem misturas líquido-sólidos. Entretanto, esses dispositivos também podem ser eficientes para separar misturas de gás-líquido. Devido ao sucesso desse separador, nos últimos anos, a indústria de petróleo tem mostrado interesse no desenvolvimento e aplicação da tecnologia de separação ciclônica.

Há vários tipos de hidrociclones com variações do seu projeto e de suas funcionalidades. No caso do hidrociclone/Câmara de Expansão estudado nesse trabalho não possui o formato cônico, como nos hidrociclones típicos utilizado em outras indústrias. A Figura 2.18 mostra um esquema do protótipo da Câmara de Expansão utilizado na realização desse trabalho que consiste em dois tubos cilíndricos concêntricos.

A mistura gás-líquido entra pelo bocal de entrada na direção tangencial a parede cilíndrica do separador. Uma parte do gás é separada nesse ponto, mas a mistura ainda persiste. Esta mistura começa a girar sobre a parede, formando um filme de líquido com bolhas dispersas. Sob a ação de um forte campo centrífugo, as bolhas tendem a se moverem ao longo da direção radial e eventualmente chegando à interface. Como o filme gira, mais gás é separado (ROSA *et al.*, 2001). Assim o gás sai através da linha de saída de gás no topo do separador e o líquido sai pela linha de líquido que se encontra na parte inferior da Câmara de Expansão.

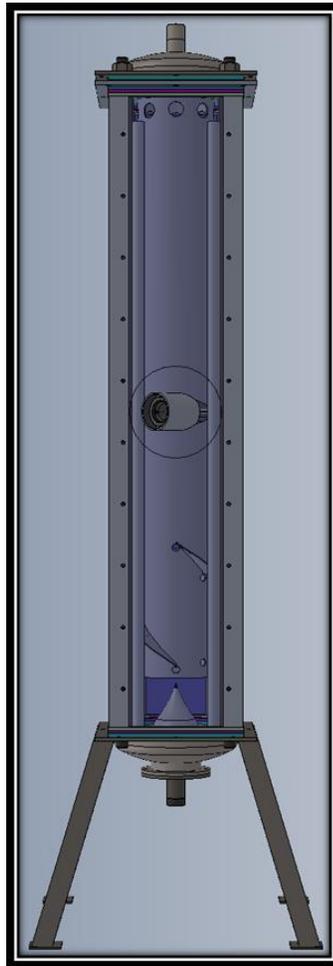


Figura 2.18 – Esquema do protótipo do separador Câmara de Expansão.

O cenário de funcionamento da Câmara de Expansão descrito acima é o que ocorre em condição regular de operação do VASPS como mostra a Figura 2.19 (A). Na Figura 2.19 (B) e (C) mostra duas condições limitantes na Câmara de Expansão, devido ao excesso de vazão de gás e líquido (ROSA *et al.*, 2001). Quando o primeiro ocorre, existe o *carry-over* de líquido (LCO), que resulta do fato de que o filme sobe a parede e atinge os orifícios que ligam o separador e a linha de descarga. No segundo caso ocorre a inundação da Câmara de Expansão devido à excessiva vazão de líquido. Para garantir um bom desempenho de separação, estas duas condições devem ser evitadas.

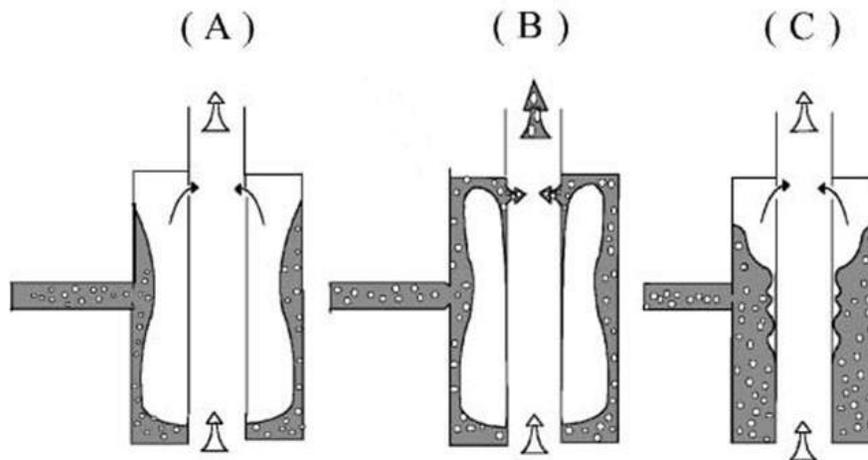


Figura 2.19 – Esquema da Câmara de Expansão para diferentes condições de operação: (A) operação regular; (B) e (C) condições operacionais limitantes.

No trabalho de Morandin em 1999, foi desenvolvido um modelo para distribuição do filme de líquido descendente num hidrociclone cilíndrico. A formulação foi desenvolvida em condições de escoamento monofásico, ou seja, apenas líquido escoando pelo separador. A ação combinada dos campos gravitacional e centrífugo faz com que a fase líquida se comporte como um filme de espessura reduzida, escoando junto à parede cilíndrica da Câmara de Expansão e descrevendo uma trajetória em espiral descendente, como mostra o esquema da Figura 2.20.

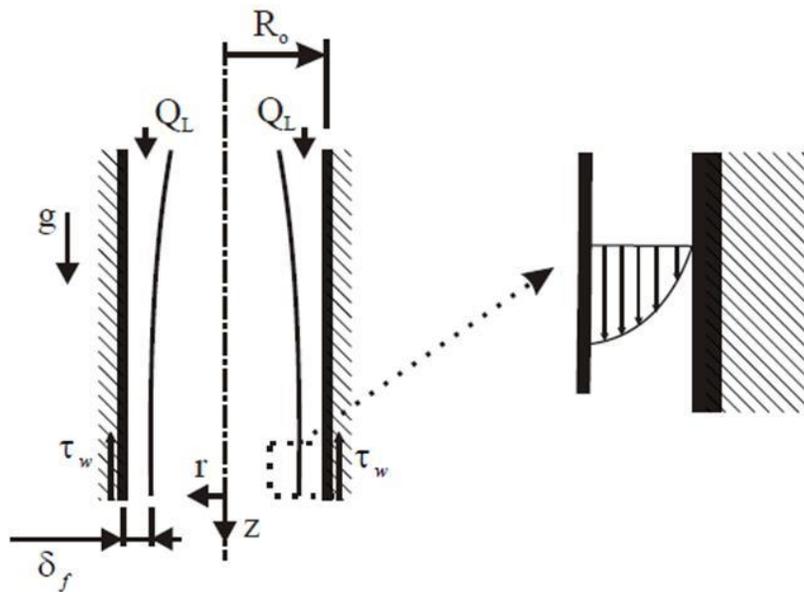


Figura 2.20 – Esquema do filme de líquido descendente dentro do separador (MORANDIN, 1999).

Considerando uma região do separador em que as forças viscosas e gravitacionais se igualem é possível calcular analiticamente a espessura do filme de líquido, considerando um escoamento vertical plano e liso, assumindo que o filme de líquido é muito menor que o raio da Câmara de Expansão.

Morandin 1999 determinou, através de um modelo analítico, a espessura do filme, considerando as seguintes hipóteses:

- Pressão constante no interior do equipamento;
- Perfil de velocidade parabólico;
- Condição de não deslizamento nas paredes;
- Tensão superficial entre líquido e gás nulo;
- Escoamento em queda livre do filme;
- Escoamento sobre uma placa plana vertical;
- Espessura uniforme do filme sobre a parede.

Utilizando o balanço da quantidade de movimento, em termos gravitacionais e cisalhantes, e assumindo escoamento turbulento ( $1500 < \text{Re}_\delta < 10^5$ ), a espessura final do filme de líquido e a tensão de cisalhamento na parede do separador são dadas por:

$$\delta_f = \left[ \frac{0,24}{8} \cdot \left( \frac{Q_L}{2\pi R_0} \right)^{7/4} \cdot \frac{v^{0,25}}{g} \right]^{1/3} \quad (2.1)$$

$$\tau_w = 0,03\rho V^2 \text{Re}_\delta^{-0,25} \quad (2.2)$$

$$\text{Re}_\delta = \frac{Q_L}{2\pi R_0 v} \quad (2.3)$$

$$\bar{V} = \frac{Q_L}{2\pi R_0 \delta_f} \quad (2.4)$$

onde  $\delta_f$  é a espessura do filme (m),  $Q_L$  é a vazão volumétrica do líquido (m<sup>3</sup>/s),  $R_0$  é o raio da Câmara de Expansão (m),  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido (m<sup>2</sup>/s),  $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>),  $\tau_w$  é a tensão de cisalhamento,  $\bar{V}$  é a velocidade média do filme (m/s) e  $Re_\delta$  é o número de Reynolds do filme de líquido.

Para o caso de escoamento laminar ( $Re_\delta < 1500$ ) a equação da espessura do filme e da tensão de cisalhamento na parede do equipamento é dado por:

$$\delta_f = \left[ \frac{1}{0,67} \cdot \frac{\nu}{g} \cdot \frac{Q_L}{2\pi R_0} \right]^{1/3} \quad (2.5)$$

$$\tau_w = \rho g \delta_f \quad (2.6)$$

No trabalho de Ofuchi *et al.*, em 2011, foi realizado uma simulação numérica do escoamento no interior da Câmara de Expansão, tendo como objetivo compreender melhor as características de operação do separador em função da vazão mássica e da viscosidade do fluido, através de diferentes fatores como a espessura do filme na parede da Câmara de Expansão e a altura de elevação do fluido no interior do separador.

Para a validação dos resultados obtidos através da simulação numérica foi realizada uma comparação entre os resultados numéricos para a espessura do filme com a solução analítica e resultados experimentais obtidos por Morandin (1999). A Figura 2.21 mostra uma comparação entre os resultados experimentais obtidos por Morandin (1999) e os resultados de simulação numérica para a espessura do filme de líquido utilizando uma vazão mássica de 2,3 kg/s. O fluido utilizado nessa comparação entre os resultados numéricos e analíticos foi a água. Ofuchi *et al.*, também apresenta outros resultados dessa comparação para outros valores de vazão mássica,

porém todos os resultados tiveram o mesmo comportamento e portanto não são apresentados aqui.

A Figura 2.21 mostra que ambos os resultados se encontram entre os limites superior e inferior da incerteza experimental. Também observa-se, que no resultado numérico há uma diminuição da espessura do filme para distâncias maiores a partir do bocal de entrada, o que está de acordo com a teoria, de que o filme fica mais fino para maiores distâncias. Já no resultado analítico esse fenômeno não é observado, embora essa tendência não é totalmente explicada no trabalho de Morandin (1999).

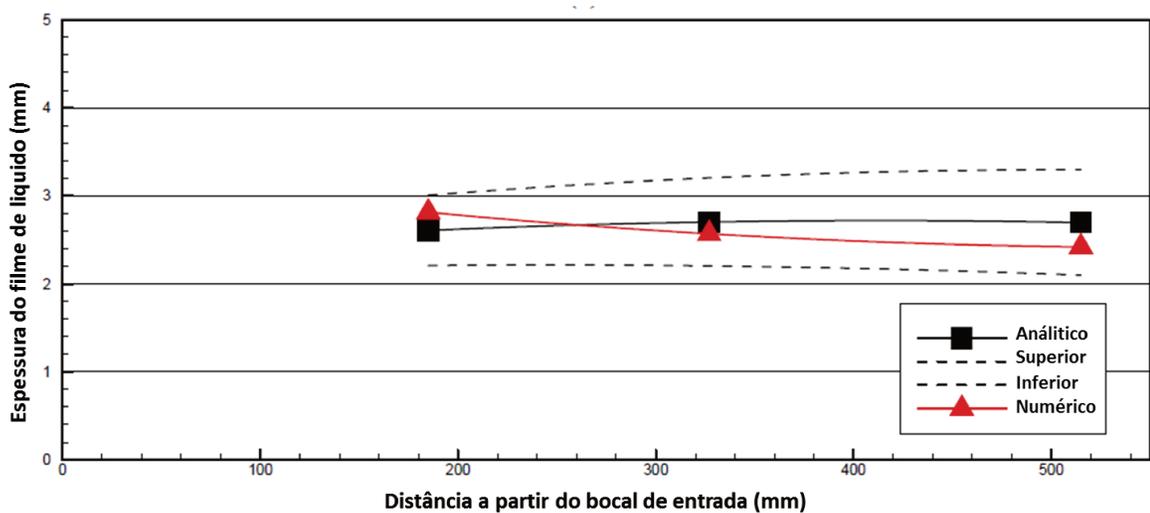


Figura 2.21 – Espessuras do filme de líquido em função da distancia do bocal de entrada para vazão mássica de 2,3 kg/s (OFUCHI *et. al.*, 2011).

Como os resultados obtidos por comparação entre a solução numérica e a solução analítica foram bons, a metodologia numérica é considerada consistente e com isso foi aplicada para obter os resultados da espessura do filme de líquido na parede do separador em função da vazão mássica.

Os resultados das simulações numéricas foram avaliados considerando que o padrão de escoamento na entrada do separador é de bolhas dispersas. As simulações numéricas foram realizadas para o fluido de Camorin ( $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ ), o fluido de Coqueiro ( $\rho = 870 \text{ kg/m}^3$ ), o fluido de Siriri ( $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$ ) e para água ( $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ ) com as viscosidades de 16,7 cP, 27,5 cP, 65,3 cP e 1 cP, respectivamente. A Figura 2.22 mostra o comportamento da espessura do filme de líquido em função da vazão mássica na saída da Câmara de Expansão para diferentes fluidos.

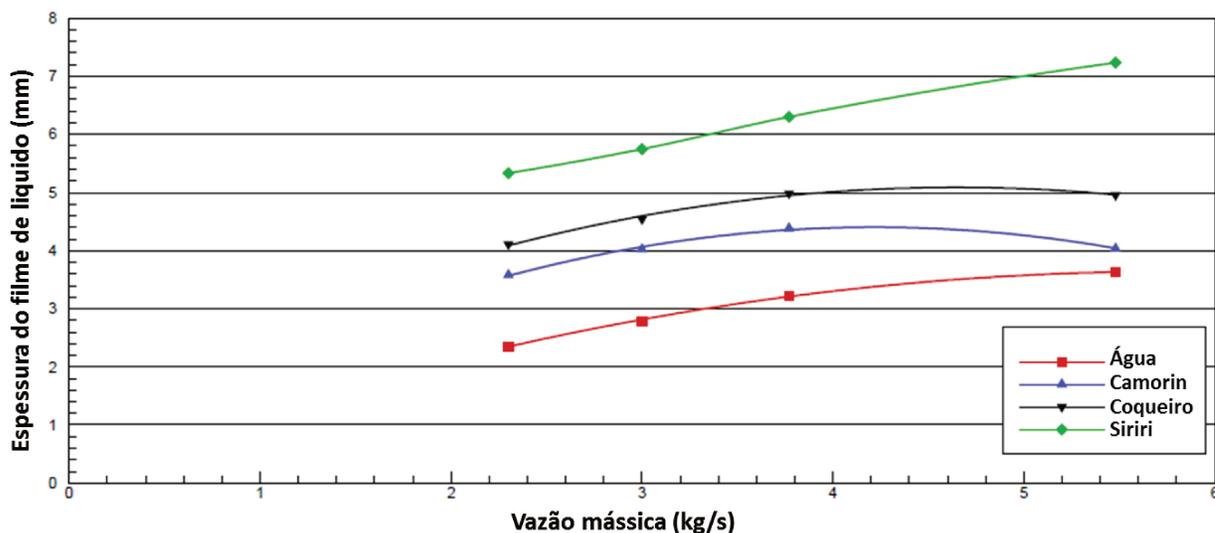


Figura 2.22 – Espessura do filme na saída do separador em função da vazão mássica para diferentes fluidos (OFUCHI *et al.*, 2011).

Observa-se na Figura 2.22 que a espessura do filme aumenta com a vazão mássica e é maior para os fluidos mais viscosos. À medida que a vazão mássica aumenta, maior é a quantidade de líquido que entra na Câmara de Expansão, fazendo com que o filme de líquido fique mais espesso. Além disso, para fluidos mais viscosos, a resistência da parede da Câmara de Expansão tende a ser maior, provocando um maior acúmulo de líquido na parede do separador.

A Figura 2.23 mostra a altura de elevação do fluido na parede da Câmara de Expansão em função da vazão mássica, para os quatro diferentes fluidos considerados.

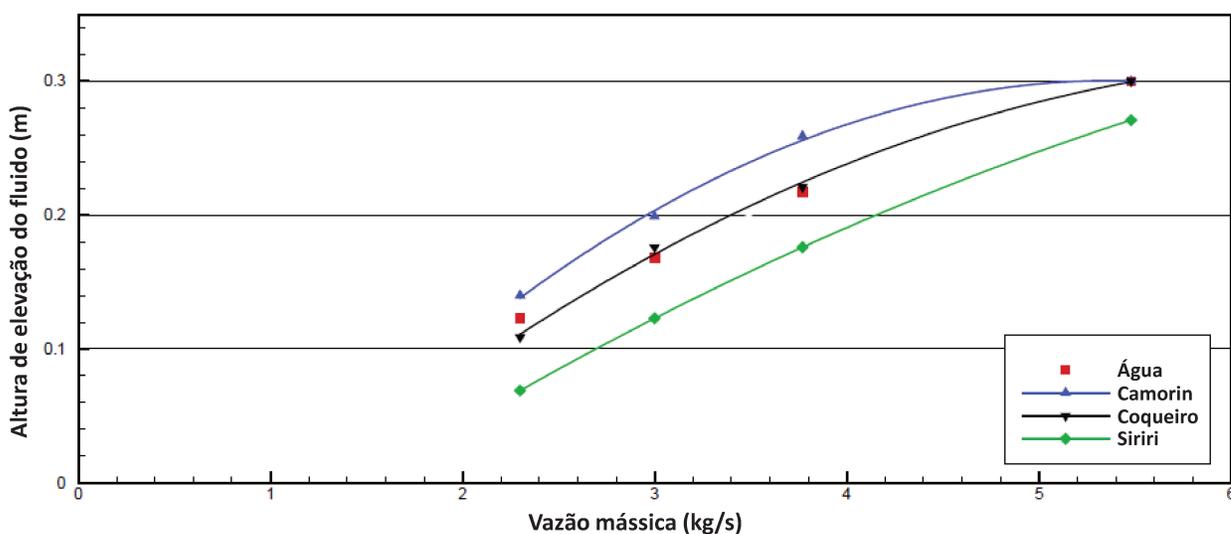


Figura 2.23 – Altura de elevação em função da vazão mássica, para quatro diferentes fluidos (OFUCHI *et al.*, 2011).

Observam-se no gráfico da Figura 2.23 que foram mostrados apenas as curvas para os diferentes óleos e para a água são mostrados apenas os símbolos, pois para a água, na qual o escoamento é turbulento, esta propriedade comporta-se diferentemente quando comparado com os casos de comportamento laminar. Nota-se, em geral, que o fluido eleva-se com maior intensidade quando se aumenta a vazão mássica e diminui-se a viscosidade. Era esperado que os valores obtidos para água fossem maiores do que os valores para os outros fluidos considerados, mas a estrutura do escoamento turbulento conseguiu diminuir a elevação do fluido, provavelmente porque o campo do escoamento centrífugo, ou seja, o movimento para baixo seja mais favorável para escoamento turbulento. Resumindo, considerando um regime de escoamento único, a altura de elevação do fluido aumenta quando aumenta a vazão mássica, pois há um aumento direto da velocidade do fluido e diminui com a viscosidade, devido à resistência da parede da Câmara de Expansão.



### **3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Neste capítulo são apresentados primeiramente os princípios de funcionamento do separador VASPS. Em seguida são apresentados alguns dos fundamentos do escoamento bifásico, como sua terminologia, padrões de escoamento em tubos (verticais e horizontais) e o mapa de padrão de escoamento em tubo horizontal. Alguns parâmetros relevantes para a separação bifásica, como o número de Froude no bocal e na Câmara de Expansão, altura de elevação do filme de líquido e o número de Reynolds no bocal de entrada do separador, são apresentados. Por fim são mostradas as equações para medição de gás através de elementos laminadores de fluxo, utilizadas na obtenção experimental da eficiência de separação da Câmara de Expansão.

#### **3.1. Princípios de funcionamento do separador VASPS**

Nesta seção é apresentado o processo de separação gás-líquido do equipamento. O sucesso da operação é alcançado quando a mistura de entrada é separada em duas linhas de escoamentos. A vazão de gás deve ser livre de líquido ou a quantidade de líquido deve ser muito baixa. O inverso é válido para o escoamento de líquido.

A Figura 3.1 mostra um esquema da unidade VASPS que é composta por: Câmara de Expansão, Helicóide de Separação e Piscina.

A mistura de gás e líquido entra no separador pela sua parte superior através do bocal de entrada da Câmara de Expansão. Uma parte do gás é liberada neste ponto, mas o líquido e uma parte do gás disperso no líquido formam um filme na parede da Câmara de Expansão devido ao efeito do campo centrífugo. Parte do gás liberado é ventilada para a saída de gás através de orifícios laterais.

O filme é acelerado na direção vertical e entra na seção dos helicoides. A mistura flui para baixo nos helicóides como um fluxo de canal aberto. A força motriz principal é a gravidade, compondo um campo centrífugo moderado e uma tensão de cisalhamento na parede, fazendo com que o líquido escoie contra a parede exterior formando a interface do filme. Como ainda na seção dos helicoides há gás residual disperso no filme de líquido, o padrão de escoamento bifásico pode ser classificado como uma mistura de bolhas dispersas. A interface do filme está

inclinada em relação ao eixo principal de simetria. O gás livre flui ao longo da parte superior interna do helicóide antes da linha de saída de gás através dos orifícios perfurados na parte superior da parede do canal interno.

A terceira e última parte da fase de separação ocorre na parte inferior do separador pela ação da gravidade. Nesta região da piscina, parte do gás disperso no líquido é separado pelo efeito da gravidade. Uma tarefa adicional da piscina é conduzir o líquido à linha de sucção da bomba. A piscina é a última barreira para evitar a presença de gás na bomba.

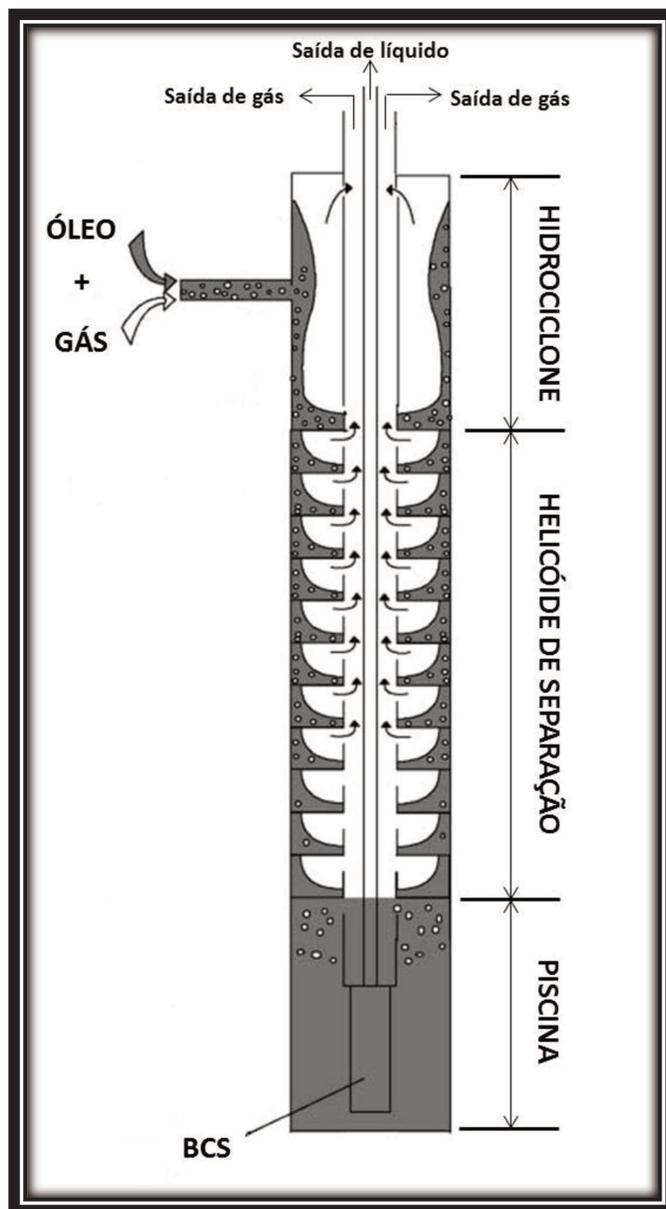


Figura 3.1 – Esquema do separador gás-líquido VASPS (Adaptado, ROSA *et al.* 2001).

### 3.2. Escoamento bifásico

O escoamento bifásico gás-líquido ocorre em vários campos industriais importantes, como na indústria do petróleo, química, nuclear e indústrias geotermiais.

Na indústria do petróleo o escoamento bifásico ocorre principalmente durante a produção e o transporte de óleo e gás. O escoamento ocorre em tubos horizontais, inclinados e verticais, em ambos os poços e linhas de escoamento. Na produção *offshore*, as linhas de produção podem ter comprimentos substanciais antes de atingir instalações de separação. Métodos de projeto são necessários para determinar a queda de pressão ou fração de volume de líquido para classificar as linhas de escoamento e instalações de separação. Em muitos casos o escoamento bifásico determina a eficiência e segurança dos processos e equipamentos onde ocorrem.

#### 3.2.1. Terminologia em escoamento bifásico

Quando se estuda escoamento bifásico, devem-se definir alguns termos específicos a este assunto, bem como as equações relativas ao mesmo. Neste texto serão mostradas as definições apresentadas por Shoham (2006).

A vazão mássica da mistura definida por  $\dot{m}_m$  é dada por:

$$\dot{m}_m = \dot{m}_G + \dot{m}_L \quad (3.1)$$

onde  $\dot{m}_G$  e  $\dot{m}_L$  é a vazão mássica do gás e do líquido, respectivamente.

Sendo que:

$$\dot{m}_G = \rho_G \cdot Q_G \quad (3.2)$$

$$\dot{m}_L = \rho_L \cdot Q_L \quad (3.3)$$

onde  $\rho_G$  e  $\rho_L$  é a massa específica do gás e do líquido, respectivamente e  $Q_G$  e  $Q_L$  é a vazão volumétrica do gás e do líquido, respectivamente.

Considerando o escoamento bifásico de líquido e gás no interior de uma tubulação com determinada área de seção transversal  $A$ , temos que as velocidades superficiais do líquido ( $J_L$ ) e

do gás ( $J_G$ ), serão dadas pela razão da vazão volumétrica  $Q_L$  e  $Q_G$ , respectivamente e a área total da seção transversal do duto.

$$J_L = \frac{Q_L}{A}; \quad J_G = \frac{Q_G}{A} \quad (3.4)$$

A velocidade superficial aparece como variável nas coordenadas dos eixos dos mapas de escoamento, e é usada na modelagem fenomenológica das correlações que expressam a interação entre as fases. Estas velocidades também poderiam ser definidas como as velocidades que as fases exibiriam se estivessem escoando sozinhas através da área total da seção do tubo.

### **3.2.2. Padrões de escoamento em tubos**

Uma breve revisão dos diferentes tipos de padrão de escoamento em tubos é necessária uma vez que o padrão de escoamento no tubo de entrada do separador pode influenciar na sua eficiência de separação.

A diferença fundamental entre escoamento monofásico e escoamento bifásico gás-líquido é a existência de padrões de escoamento ou regimes de escoamento em escoamentos bifásicos (SHOHAM, 2006).

Os arranjos geométricos das interfaces entre os fluidos no escoamento gás-líquido apresentam diferentes configurações quando as duas fases escoam juntas dentro de uma mesma tubulação. Estas configurações dependem das condições de operação (vazão, pressão, temperatura), da geometria da tubulação (dimensão, inclinação) e das propriedades dos fluidos (densidade, viscosidade e tensão interfacial). A combinação destas características determina o padrão de escoamento.

Neste trabalho são apresentadas as classificações dos padrões de escoamento observados, no tubo horizontal e vertical, por Bratland, 2010 e Shohan, 2006. Na Figura 3.2 são mostrados os padrões de escoamento que podem ser encontrados em um tubo horizontal com escoamento bifásico gás-líquido.

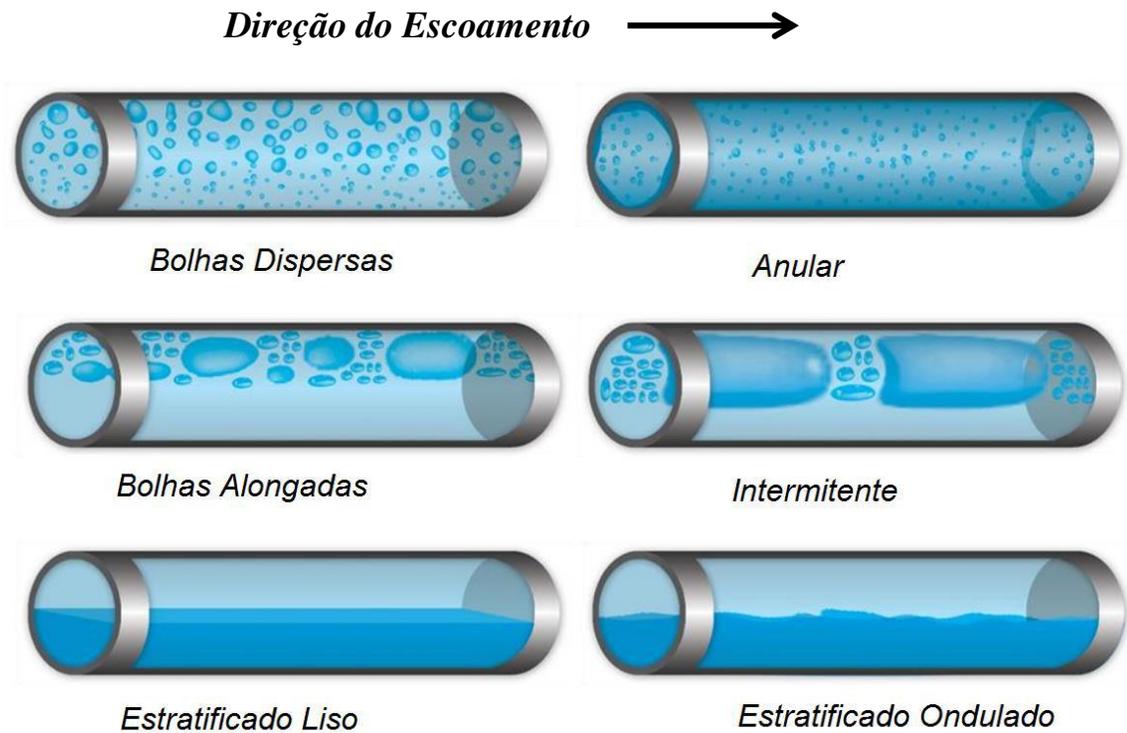


Figura 3.2 – Padrões de escoamento bifásico gás-líquido em tubos horizontais (BRATLAND, 2010).

Os padrões de escoamento existentes em tubo horizontais são classificados em Escoamento Estratificado (Estratificado Liso e Estratificado Ondulado), Intermitente (Bolhas Alongadas), Anular e Bolhas Dispersas. As definições e os aspectos de cada classificação do escoamento para tubo horizontal são apresentados abaixo:

- *Escoamento Estratificado*: têm uma forte tendência em ocorrer em escoamento horizontal e em declive com vazões de gás e líquido relativamente baixas. As duas fases são separadas por gravidade, onde a fase líquida escoar na parte inferior do tubo e a fase gás escoar na parte superior do tubo. Esse tipo de escoamento é subdividido em Estratificado Liso, onde a interface gás-líquido é lisa e em Estratificado Ondulado, na qual são formadas ondas estáveis na interface.
- *Escoamento Intermitente*: caracteriza-se pela alternância do escoamento do líquido e do gás. Pistões de líquido que ocupam todo o diâmetro do tubo são separados por bolhas de gás, que se movem sobre um filme de líquido presente na parte inferior

do tubo. O escoamento de bolhas alongadas é regido pelos mesmos mecanismos do padrão intermitente, porém com uma vazão de gás um pouco menor.

- *Escoamento Anular*: ocorre para velocidades superficiais de gás elevadas. A fase gasosa concentra-se na parte central enquanto a fase líquida escoava em forma de filme na parede do tubo. A interface entre o filme de líquido e o núcleo de gás é dinâmica, apresentando um perfil ondulatório.
- *Bolhas Dispersas*: ocorre para vazões muito altas de líquidos a fase gasosa é distribuída na forma de bolhas discretas no interior de uma fase líquida contínua, com a tendência de aglomerarem-se na parte superior da tubulação devido aos efeitos gravitacionais.

Os padrões de escoamento que ocorrem na direção vertical ascendente são semelhantes aos que ocorrem na horizontal, porém os padrões de escoamento na vertical são simétricos na parede interna do tubo e menos influenciados pela gravidade. Os padrões de escoamento em tubos verticais são classificados em Escoamento em Bolhas, Intermitente, Agitado (*Churn*) e Anular, como mostra a Figura 3.3. As definições e os aspectos de cada classificação do escoamento para tubo vertical são apresentados abaixo:

- *Escoamento em Bolhas*: ocorre em baixas vazões de líquido e o tubo é preenchido quase completamente de líquido e a fase de gás livre está presente na forma de pequenas bolhas. As bolhas movem-se para cima em trajetória helicoidal, onde a distribuição do gás na tubulação é quase homogênea com baixo nível de turbulência apresentando escorregamento entre as fases.
- *Escoamento Intermitente*: a fase gasosa é mais pronunciada. Esse tipo de padrão em tubos verticais é simétrico em torno do eixo do tubo. As bolhas possuem um formato alongado e estas ocupam, transversalmente, quase a totalidade do diâmetro interno do tubo. Tais bolhas são denominadas bolhas de Taylor.
- *Escoamento Agitado*: é caracterizado pela instabilidade do padrão de escoamento intermitente, quando ocorre a fragmentação das bolhas principais devido ao comportamento altamente turbulento do escoamento. Também é chamado em inglês de escoamento *churn* que é devido ao fato deste padrão de escoamento

possuir um comportamento caótico e de característica transiente entre o padrão de escoamento intermitente e anular.

- *Anular*: é caracterizada pela formação de um filme de líquido na parede interna do tubo e a região central ocupada pela fase gasosa com a presença de gotículas da fase líquida desprendida do filme, ou seja, esse padrão de escoamento é semelhante ao padrão em tubos horizontais.

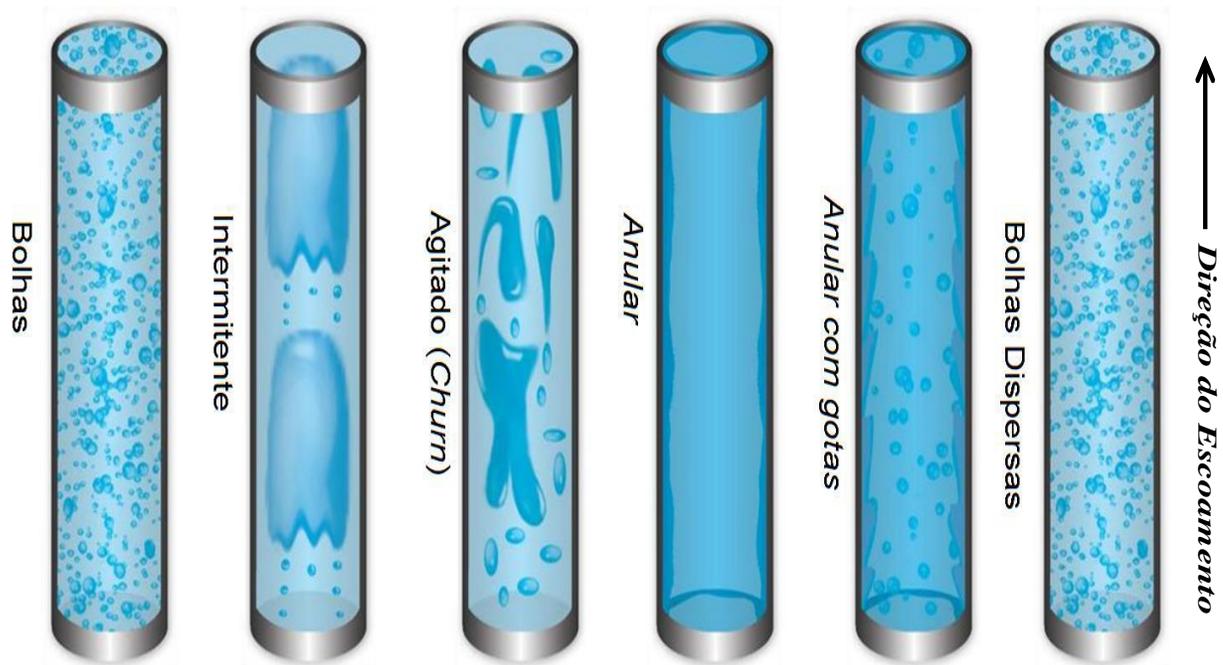


Figura 3.3 – Padrões de escoamento bifásico gás-líquido em tubos verticais (BRATLAND, 2010).

### 3.2.3. Mapa do padrão de escoamento em tubo horizontal

Os mapas semi-empíricos típicos de padrões de escoamento são elaborados a partir de dados experimentais que podem ser oriundos da observação do próprio autor ou de outros. Esses mapas são compostos por linhas de transição, que representam fronteiras de regiões nas quais a ocorrência de um padrão específico é observada.

Na literatura existem diversos trabalhos, realizado ao longo dos anos, dedicados à proposição de mapas de padrões de escoamento onde se procura associar os regimes de escoamento bifásico a parâmetros globais do escoamento, como vazões das fases ou outros parâmetros que incluem a vazão das fases. As transições de fases entre os diferentes regimes são

reconhecidamente um problema complexo governado por diversas grandezas que controlam o escoamento e a interação entre as fases. A tentativa de caracterizar as regiões de ocorrência de determinados padrões de escoamento e suas transições com um par de parâmetros, resulta em mapas de validade restrita as condições experimentais para as quais os dados foram gerados. De qualquer modo, mapas de padrão de escoamento são úteis e largamente empregados na caracterização de escoamentos bifásicos.

Com o objetivo de realizar um estudo das influências dos padrões de escoamento do tubo de entrada horizontal na eficiência de separação da Câmara de Expansão, foi utilizado o mapa de padrão de escoamento estudado e desenvolvido por Mandhane *et. al*, em 1973.

Mandhane (1973), a partir da literatura, verificou que certas melhorias poderiam ser feitas em relação às análises do padrão de mapas de padrões de escoamento. No interesse da simplicidade, optou-se por gerar um mapa básico do padrão de escoamento com base nos dados de ar-água e em seguida aplicou-se correções das propriedades físicas dos fluidos. Este mapa tornou-se um dos mais simples de ser utilizado, bem como apresentou melhor concordância com os demais mapas existentes.

O mapa de padrão de escoamento proposto por Mandhane (1973) é mostrado na Figura 3.4.

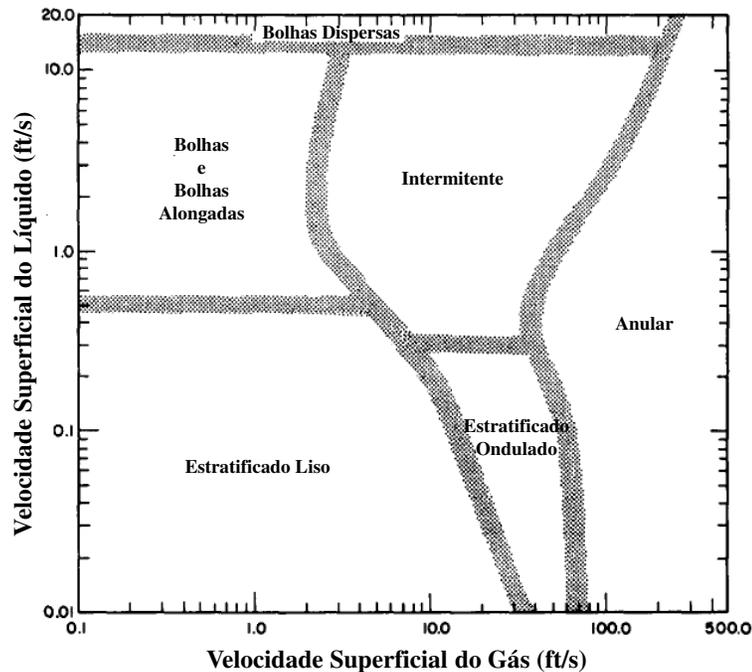


Figura 3.4 – Mapa do padrão de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane, 1973.

As coordenadas dos limites de transição entre os padrões de escoamento do gráfico da Figura 3.4 são apresentadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Coordenadas para os limites de transições do mapa de padrões de escoamento proposto por Mandhane, 1973.**

<b>Limites de Transição</b>	<b>J<sub>G</sub> (ft/s)</b>	<b>J<sub>L</sub> (ft/s)</b>	<b>Correção das Propriedades Físicas - Multiplica por:</b>
<b>Estratificado Liso para Bolhas Alongadas</b>	0,1	0,5	<b>1/Y</b>
	5	0,5	
<b>Estratificado Alongado para Intermitente</b>	7,5	0,3	<b>Y</b>
	40	0,3	
<b>Bolhas Alongadas e Intermitente para Bolhas Dispersas</b>	0,1	14,0	<b>Y</b>
	230	14,0	
<b>Estratificado Liso e Bolhas Alongadas para Intermitente e Estratificado Ondulado</b>	35	0,01	<b>X</b>
	14	0,1	
	10,5	0,2	
	2,5	1,15	
	2,5	4,8	
	3,25	14,0	
<b>Estratificado Ondulado e Intermitente para anular</b>	70	0,01	<b>X</b>
	60	0,1	
	38	0,3	
	40	0,56	
	50	1	
	100	2,5	
	230	14	
<b>Bolhas Dispersas para Anular</b>	230	14	<b>X</b>
	269	30	

As equações finais para a correção das propriedades físicas são expressas nas Equações (3.5) e (3.6), onde o efeito da viscosidade foi adicionado.

$$X = \left( \frac{\rho_G}{0,0808} \right)^{0,2} \left( \frac{\rho_L \cdot 72,4}{62,4 \cdot \sigma} \right)^{0,25} \left( \frac{\mu_G}{0,018} \right)^{0,2} \quad (3.5)$$

$$Y = (\mu_L)^{0,2} \left( \frac{\rho_L \cdot 72,4}{62,4 \cdot \sigma} \right)^{0,25} \quad (3.6)$$

onde  $\rho_G$  e  $\rho_L$  são a densidade do ar e do líquido, respectivamente, dados em lb/ft<sup>3</sup>,  $\mu_G$  e  $\mu_L$  são a viscosidade do ar e do líquido, respectivamente, dados em cP e  $\sigma$  é a tensão superficial dada em dyne/cm. Estes fatores são aplicados aos limites dos padrões de escoamento e não aos eixos do mapa. Os novos limites do padrão de escoamento podem ser obtidos aplicando as Equações (3.5) e (3.6) conforme mostra a Tabela 3.1.

### 3.3. Parâmetros relevantes para separação bifásica gás-líquido

Alguns parâmetros adimensionais são importantes para separação gás-líquido, pois estes devem atender alguns critérios de escoamento, que serão aqui descrito. O número de Froude (do bocal e da Câmara de Expansão) e a razão gás-líquido são exemplos desses parâmetros adimensionais. Outro parâmetro importante é a altura de elevação com o objetivo de evitar o carregamento de líquido pela linha de gás.

A modelagem e a validade dos critérios de escoamento dos parâmetros adimensionais, foram desenvolvidas no projeto P&D PETROBRAS/UNICAMP já citado anteriormente. Iniciou-se com os resultados mostrados no trabalho de França *et al.*, em 1996 e em 2001 no trabalho de Rosa *et al.*, onde foi dada continuação do projeto. A seguir são apresentados alguns desses resultados relevantes para o desenvolvimento dessa Tese.

O número de Froude é um número adimensional que relaciona o efeito das forças de inércia com as forças de gravidade que atuam no fluido. Seguindo o manual teórico do dimensionamento do VASPS, o número de Froude no bocal ( $Fr$ ) é dado por:

$$Fr = 2 \cdot \left( \frac{V_L^2}{g \cdot D_{CaEx}} \right) \quad (3.7)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>],  $D_{CaEx}$  é o diâmetro do tubo externo da câmara de expansão [m] e  $V_L$  é a velocidade da fase líquida [m/s], dada por:

$$V_L = 4 \cdot \left( \frac{Q_L}{\pi \cdot D_b^2} \right) \quad (3.8)$$

onde  $Q_L$  é a vazão volumétrica do líquido [ $m^3/s$ ] e  $D_b$  é o diâmetro interno do bocal de entrada do separador [m].

O critério de escoamento que o número de Froude do bocal, definido na Equação (3.7), deve obedecer é de que seu valor deve estar entre 1 e 10 (FRANÇA *et al.*, 1996). Caso estes valores não possam ser atingidos, recomenda-se alterar o diâmetro interno da saída do bocal.

Já o valor do número de Froude da Câmara de Expansão ( $Fr_{CaEx}$ ), que é apresentado pela Equação (3.9), deve estar entre 2 e 40. Se estes valores não forem respeitados, ou seja, não possam ser atingidos, deve-se alterar o diâmetro interno da saída do bocal ( $D_b$ ).

$$Fr_{CaEx} = \frac{V_L^2}{g \cdot \frac{D_{CaEx}}{2}} \quad (3.9)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ],  $D_{CaEx}$  é o diâmetro do tubo externo da câmara de expansão [m] e  $V_L$  é a velocidade da fase líquida [m/s].

A razão gás-líquido na saída do bocal (RGO) é calculada pela Equação e deve ter valor entre 0 e 40.

$$RGO = \frac{V_G}{V_L} \quad (3.10)$$

onde  $V_L$  é a velocidade da fase líquida [m/s] e  $V_G$  é a velocidade da fase gás [m/s] dada por:

$$V_G = 4 \cdot \left( \frac{Q_G}{\pi \cdot D_b^2} \right) \quad (3.11)$$

sendo que  $Q_G$  é a vazão volumétrica do líquido [ $m^3/s$ ] e  $D_b$  é o diâmetro interno do bocal de entrada do separador [m].

Com o objetivo de comparar com os dados experimentais, a equação da altura de elevação do filme de líquido na parede da Câmara de Expansão (ROSA *et al.*, 2001) é dada por:

$$H = \sqrt{A_b \cdot Fr_{CaEx}} \cdot 1,36818 \cdot (Re_b^{0,022}) \cdot (1 + RGO)^{0,25} \quad (3.12)$$

onde  $A_b$  é a área da secção transversal do bocal de entrada do separador [ $m^2$ ],  $Fr_{CaEx}$  é o número de Froude na Câmara de Expansão,  $Re_b$  é o número de Reynolds no bocal de entrada e RGO é a razão gás-líquido. O número de Reynolds no bocal ( $Re_b$ ) é dado por:

$$Re_b = \frac{V_L \cdot \sqrt{A_b} \cdot \rho_L}{\mu_L} \quad (3.13)$$

onde  $\rho_L$  é a densidade do líquido [ $kg/m^3$ ] e  $\mu_L$  é a viscosidade do líquido [Pa.s].

### 3.4. Equação para medição de gás através de elementos laminadores de fluxo

Neste trabalho, para determinar a eficiência de separação da Câmara de Expansão, foram realizadas medidas da vazão de ar na entrada e na saída do separador.

O instrumento utilizado para tal objetivo é chamado de elementos laminadores de fluxo (*Laminar Flow Elements – LFE*), que são excelentes instrumentos para medição de vazão de gás de 0,2 ft<sup>3</sup>/min (0,000012 m<sup>3</sup>/h) até 2250 ft<sup>3</sup>/min (3822,8 m<sup>3</sup>/h) na condição de temperatura e pressão padrão, conforme informado pela manual da *Meriam Instruments*, que é um dos principais fornecedores desse equipamento. Os maiores detalhes desse instrumento e seu funcionamento são apresentados nos itens 4.4 e 4.6.

Este equipamento baseia-se no escoamento laminar permanente completamente desenvolvido, independente das condições do escoamento no tubo principal. Esse tipo de escoamento também é conhecido como escoamento de Poiseuille.

Considerando o escoamento de um fluido viscoso através de um tubo cilíndrico, de modo que o escoamento seja laminar e estacionário, podemos utilizar a equação de Poiseuille para determinar a vazão volumétrica, que é dada por:

$$Q = \frac{\pi \Delta P D^4}{128 \mu L} \quad (3.14)$$

onde  $\Delta P$  é o diferencial de pressão,  $D$  é o diâmetro do tubo,  $\mu$  é a viscosidade do fluido e  $L$  é o comprimento do tubo.

Percebe-se na Equação (3.14) que a vazão volumétrica é diretamente proporcional ao diferencial de pressão sobre o fluido e inversamente proporcional à viscosidade.

Geralmente os elementos laminadores de fluxo são calibrados na condição padrão de temperatura e pressão (*U. S. Standard Conditions* 70 °F e 1 ATM). Sendo assim, a curva de calibração pode ser apresentada em função somente do diferencial de pressão no seguinte formato:

$$Q_{std} = B\Delta P^2 + C\Delta P^2 \quad (3.15)$$

onde  $B$  e  $C$  são constantes de calibração do medidor, fornecido pelo fabricante.

Portanto, para poder utilizar esse tipo de instrumento em condições diferentes das condições de calibração é necessário realizar algumas correções, como a correção da viscosidade para a correção da vazão volumétrica e a correção da densidade ( $\rho$ ) para a correção da vazão mássica.

### 3.4.1. Correção da vazão volumétrica

Escrevendo a Equação (3.14) de outra maneira, percebe-se que a vazão é proporcional por uma parte geométrica, conforme mostra a seguinte equação:

$$Q = \left( \frac{\pi D^4}{128L} \right) \cdot \frac{\Delta P}{\mu} \quad (3.16)$$

Para o mesmo medidor a parte geométrica da equação não muda. Definindo a vazão ( $Q$ ) na condição padrão de pressão e temperatura como  $Q_{std}$  e a vazão ( $Q$ ) na condição atual de pressão e temperatura como  $Q_{P,T}$ , temos:

$$\frac{Q_{std}}{Q_{P,T}} = \left( \frac{\pi D^4}{128L} \right) \cdot \frac{\Delta P}{\mu_{std}} \times \frac{1}{\left( \frac{\pi D^4}{128L} \right) \cdot \frac{\Delta P}{\mu_{P,T}}} \quad (3.17)$$

onde  $\mu_{std}$  é a viscosidade do fluido na condição padrão de pressão e temperatura e  $\mu_{P,T}$  é a viscosidade do fluido na condição atual de pressão e temperatura.

Para o mesmo diferencial de pressão ( $\Delta P$ ) e realizando as simplificações obtemos:

$$\frac{Q_{std}}{Q_{P,T}} = \frac{\mu_{P,T}}{\mu_{std}} \quad (3.18)$$

Substituindo a equação da vazão na condição padrão (Equação (3.15)) na Equação (3.18), obtemos:

$$Q_{P,T} = (B\Delta P + C\Delta P^2) \times \frac{\mu_{std}}{\mu_{P,T}} \quad (3.19)$$

### 3.4.2. Correção da vazão mássica

Sabe-se que para o mesmo diferencial de pressão, a vazão mássica que atravessa o equipamento é diferente da vazão mássica quando o equipamento está operando em uma condição de pressão e temperatura diferente da condição de calibração.

Dessa forma podemos apresentar a seguinte razão entre vazões mássicas:

$$\frac{\dot{m}_{std}}{\dot{m}_{P,T}} = \frac{\rho_{std} Q_{std}}{\rho_{P,T} Q_{P,T}} \quad (3.20)$$

onde  $\dot{m}_{std}$  e  $\dot{m}_{P,T}$  é a vazão mássica na condição padrão e na condição atual de pressão e temperatura, respectivamente. A densidade na condição padrão e na condição de pressão e temperatura atual é dada por  $\rho_{std}$  e  $\rho_{P,T}$ , respectivamente.

Considerando gás ideal, temos a seguinte relação para a densidade ( $\rho$ ):

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3.21)$$

onde P é a pressão absoluta, T é a temperatura absoluta e R é a constante do gás.

Substituindo as Equações (3.15), (3.19) e (3.21) na Equação (3.20), obtemos:

$$\frac{\dot{m}_{std}}{\dot{m}_{P,T}} = \frac{\frac{P_{std}}{RT_{std}}}{\frac{\mu_{std}}{\mu_{P,T}} \cdot \frac{P_{P,T}}{RT_{P,T}}} \quad (3.22)$$

Simplificando a Equação (3.22) obtemos a seguinte equação:

$$\dot{m}_{P,T} = \dot{m}_{std} \times \frac{\mu_{std}}{\mu_{P,T}} \times \frac{P_{P,T}}{P_{std}} \times \frac{T_{std}}{T_{P,T}} \quad (3.23)$$

A vazão mássica na condição padrão de temperatura e pressão é dada por:

$$\dot{m}_{std} = \rho_{std} \cdot Q_{std} \quad (3.24)$$

Substituindo a Equação (3.24) na Equação (3.23) temos:

$$\dot{m}_{P,T} = (\rho_{std} \cdot Q_{std}) \times \frac{\mu_{std}}{\mu_{P,T}} \times \frac{T_{std}}{T_{P,T}} \times \frac{P_{P,T}}{P_{std}} \quad (3.25)$$

Substituindo a Equação (3.15) da curva de calibração na Equação (3.25) obtemos enfim a equação completa para a correção da vazão mássica que atravessa o equipamento e gera o mesmo diferencial de pressão das condições de calibração:

$$\dot{m}_{P,T} = (B\Delta P + C\Delta P^2) \cdot \rho_{std} \times \left( \frac{\mu_{std}}{\mu_{P,T}} \right) \times \left( \frac{T_{std}}{T_{P,T}} \right) \times \left( \frac{P_{P,T}}{P_{std}} \right) \quad (3.26)$$

### 3.5. Obtenção experimental da eficiência de separação da Câmara de Expansão

O volume de controle definido para o cálculo da eficiência de separação da “Câmara de Expansão” é mostrado na Figura 3.5.

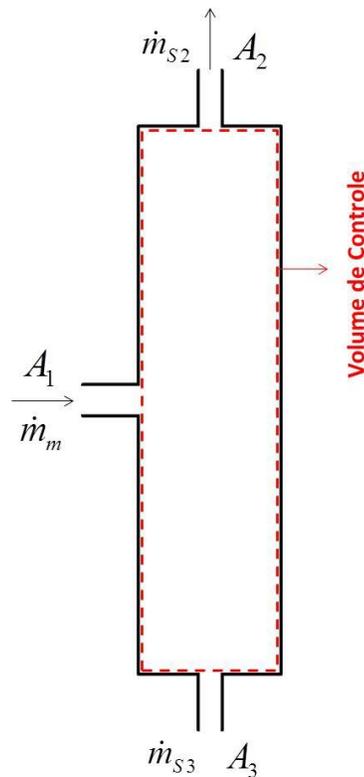


Figura 3.5 – Volume de controle utilizado para o cálculo da eficiência de separação.

Onde  $\dot{m}_m$  é a vazão mássica da mistura (ar + água ou glicerina) na entrada do separador,  $\dot{m}_{s2}$  é a vazão mássica de saída de gás e  $\dot{m}_{s3}$  é a vazão mássica de saída de gás (que não foi separado) e líquido (água ou glicerina).

Utilizando a equação da continuidade temos:

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dv + \oint_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.27)$$

Considerando escoamento de regime permanente, onde as fases escoam com a mesma velocidade e processo adiabático temos:

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dv = 0 \quad (3.28)$$

$$\int_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = \int_{A_1} \rho_m \vec{V}_m \cdot d\vec{A}_1 + \int_{A_2} \rho_{S2} \vec{V}_{S2} \cdot d\vec{A}_2 + \int_{A_3} \rho_{S3} \vec{V}_{S3} \cdot d\vec{A}_3 = 0 \quad (3.29)$$

$$\int_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = -\dot{m}_m + \dot{m}_{S2} + \dot{m}_{S3} = 0 \quad (3.30)$$

Sendo que:

$$\dot{m}_m = \rho_{ge} Q_{ge} + \rho_{Le} Q_{Le} \quad (3.31)$$

$$\dot{m}_{S2} = \rho_{gS2} Q_{gS2} \quad (3.32)$$

$$\dot{m}_{S3} = \rho_{gS3} Q_{gS3} + \rho_{LS3} Q_{LS3} \quad (3.33)$$

Para que a eficiência de separação seja total, todo o ar injetado junto com o líquido que entra no separador pela entrada  $A_1$  deve ser separado e sair pela saída  $A_2$ . Portanto a eficiência de separação do gás em porcentagem é dada por:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{S2}}{\dot{m}_{ge}} \cdot 100[\%] \quad (3.34)$$

Para melhor entendimento, a eficiência de separação da Câmara de Expansão em porcentagem é a razão entre a vazão mássica de saída e de entrada do separador na condição de pressão e temperatura atual, dada por:

$$\eta = \frac{(\dot{m}_{P,T})_{Saída}}{(\dot{m}_{P,T})_{Entrada}} \cdot 100[\%] \quad (3.35)$$

Substituindo a Equação (3.26) que é a equação completa para a correção da vazão mássica que atravessa o equipamento na Equação (3.35) da eficiência de separação obtemos:

$$\eta = \frac{(\dot{m}_{P,T})_{saída}}{(\dot{m}_{P,T})_{entrada}} = \frac{\rho_{std} \left[ (B\Delta P + C\Delta P^2) \times \left( \frac{\mu_{std}}{\mu_{P,T}} \right) \times \left( \frac{T_{std}}{T_{P,T}} \right) \times \left( \frac{P_{P,T}}{P_{std}} \right) \right]_{saída}}{\rho_{std} \left[ (B\Delta P + C\Delta P^2) \times \left( \frac{\mu_{std}}{\mu_{P,T}} \right) \times \left( \frac{T_{std}}{T_{P,T}} \right) \times \left( \frac{P_{P,T}}{P_{std}} \right) \right]_{entrada}} \quad (3.36)$$

Note que, podemos simplificar a massa específica do ar na condição padrão ( $\rho_{std}$ ). Portanto a equação completa da eficiência de separação é dada por:

$$\eta = \frac{(\dot{m}_{P,T})_{saída}}{(\dot{m}_{P,T})_{entrada}} = \frac{\left[ (B\Delta P + C\Delta P^2) \times \left( \frac{\mu_{std}}{\mu_{P,T}} \right) \times \left( \frac{T_{std}}{T_{P,T}} \right) \times \left( \frac{P_{P,T}}{P_{std}} \right) \right]_{saída}}{\left[ (B\Delta P + C\Delta P^2) \times \left( \frac{\mu_{std}}{\mu_{P,T}} \right) \times \left( \frac{T_{std}}{T_{P,T}} \right) \times \left( \frac{P_{P,T}}{P_{std}} \right) \right]_{entrada}} \quad (3.37)$$

O procedimento adotado para o cálculo de cada termo da Equação (3.37) é apresentado no item 4.6.1 deste trabalho.

## **4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**

Para a realização dos testes experimentais, com o objetivo de determinar a eficiência de separação, foram reproduzidas em laboratório as condições de operação de um protótipo da Câmara de Expansão instalado no Laboratório Kelsen Valente Serra (LABPETRO) do Departamento de Engenharia de Petróleo (DEP/FEM/UNICAMP).

O protótipo da Câmara de Expansão foi fabricado de acordo com o padrão geométrico (dimensões padrão) adotado no projeto P&D entre PETROBRAS e a UNICAMP, já citado no item 2.3 deste trabalho.

A seguir, serão apresentados o processo de fabricação do protótipo da Câmara de Expansão e a montagem experimental utilizada.

### **4.1. Fabricação do protótipo “Câmara de Expansão” do VASPS**

Nesse item do trabalho será descrito os problemas e as soluções encontradas durante o processo de construção\* da Câmara de Expansão.

A maior dificuldade encontrada na fabricação foi no processo de resinagem, com uma resina a base de poliuretano CYTEC Conopytic 30312 DPDM. O sistema de resinagem utilizado não atendeu ao processo de maneira satisfatória, pois nos pontos onde a quantidade de resina aplicada foi maior, houve formação de bolhas devido ao grande aquecimento gerado (Figura 4.1). Este aquecimento aparentemente ocorreu devido à uma reação isotérmica.

Depois do insucesso no processo de resinagem o projeto foi modificado para apenas um casco, pois no processo anterior o equipamento era dividido em três cascos (topo, meio e fundo) e necessitava de uma grande quantidade de resina.

lixlixii—

\* A construção da Câmara de Expansão foi feita utilizando as instalações da AUTIC (Automação e Instrumentação de Indústria).

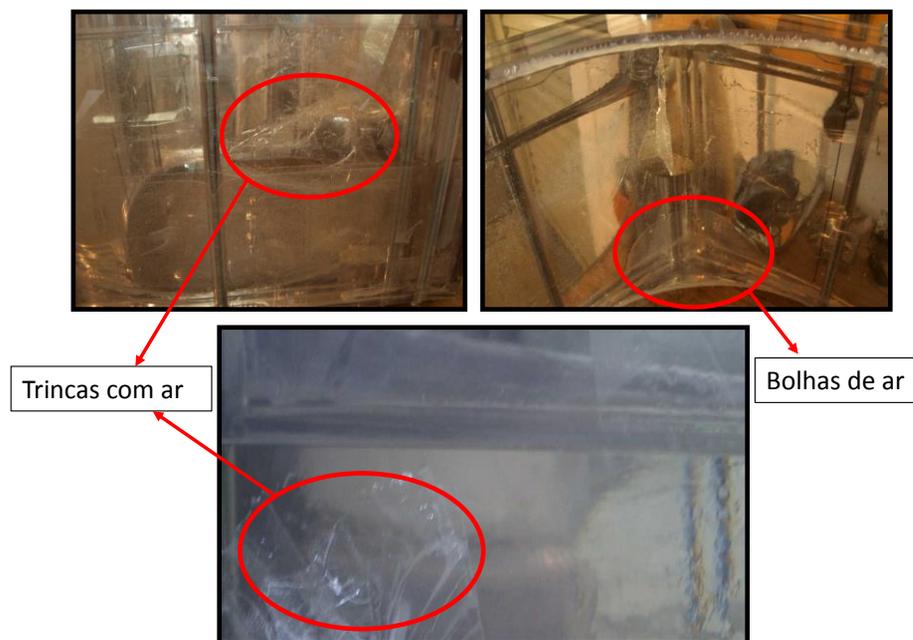


Figura 4.1 – Foto do equipamento depois de aplicado a resina mostrando as bolhas e trincas de ar formadas em locais onde foi aplicada uma maior quantidade de resina.

A máquina utilizada para aplicação da resina foi uma bomba de prato duplo (Figura 4.2), que é um aplicador para resina bi componente na proporção de 1:1. Essa máquina opera por deslocamento positivo, com bombas de pistão que garante precisão na aplicação e pode dosar ininterruptamente com uma vazão máxima de 5 L/min.



Figura 4.2 – Máquina utilizada para aplicação da resina.

Também foi realizado um teste aplicando a resina sobre uma peça plástica para constatar a sua resistência e a sua transparência. Na Figura 4.3 percebe-se que essa resina se mostrou muito boa com relação a transparência.

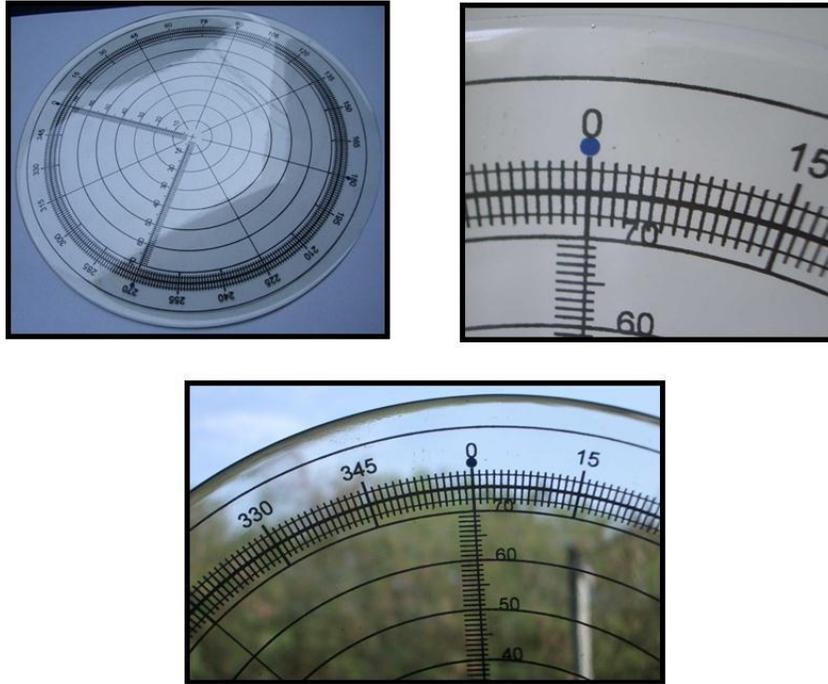


Figura 4.3 – Foto do teste para mostrar a transparência da resina aplicada.

No projeto com apenas um casco foi utilizado um tubo de acrílico com 400 mm de diâmetro e 5 mm de espessura mostrado na Figura 4.4(a).

Para diminuir a quantidade de resina aplicada ao equipamento e assim evitar a formação de bolhas que diminui a transparência e a qualidade da resina, foi desenvolvido uma estrutura quadrada. Esta nova estrutura é construída com quatro tubos quadrados de inox 304 de 70x70 mm e espessura de 3 mm, quatro cantoneiras de alumínio de 63x63 mm e espessura de 6 mm e quatro placas de policarbonato com 10 mm de espessura costurada com 80 parafusos de inox 304 M10x25 mostrados na Figura 4.4(b).

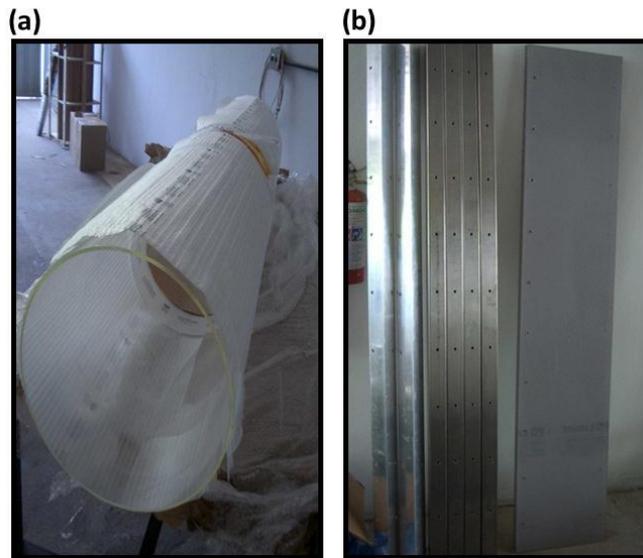


Figura 4.4 – (a) Foto do tubo de acrílico; (b) Foto dos tubos quadrados de inox, cantoneiras de alumínio e das placas de policarbonatos.

Na Figura 4.5, podemos observar com maiores detalhes, um corte transversal mostrando como os tubos quadrados de inox, as cantoneiras de alumínio e as placas de policarbonatos, foram dispostos para construir a estrutura quadrada do hidrociclone. Para diminuir mais ainda os espaços vazios onde será injetada a resina CYTEC foram adicionados em cada canto da estrutura quadrada dois vergalhões de alumínio de 38 mm na extensão do casco que também irá ajudar a evitar bolhas e trincas provenientes do calor gerado pela reação isotérmica devido a grande quantidade de resina a ser aplicada (Figura 4.5).

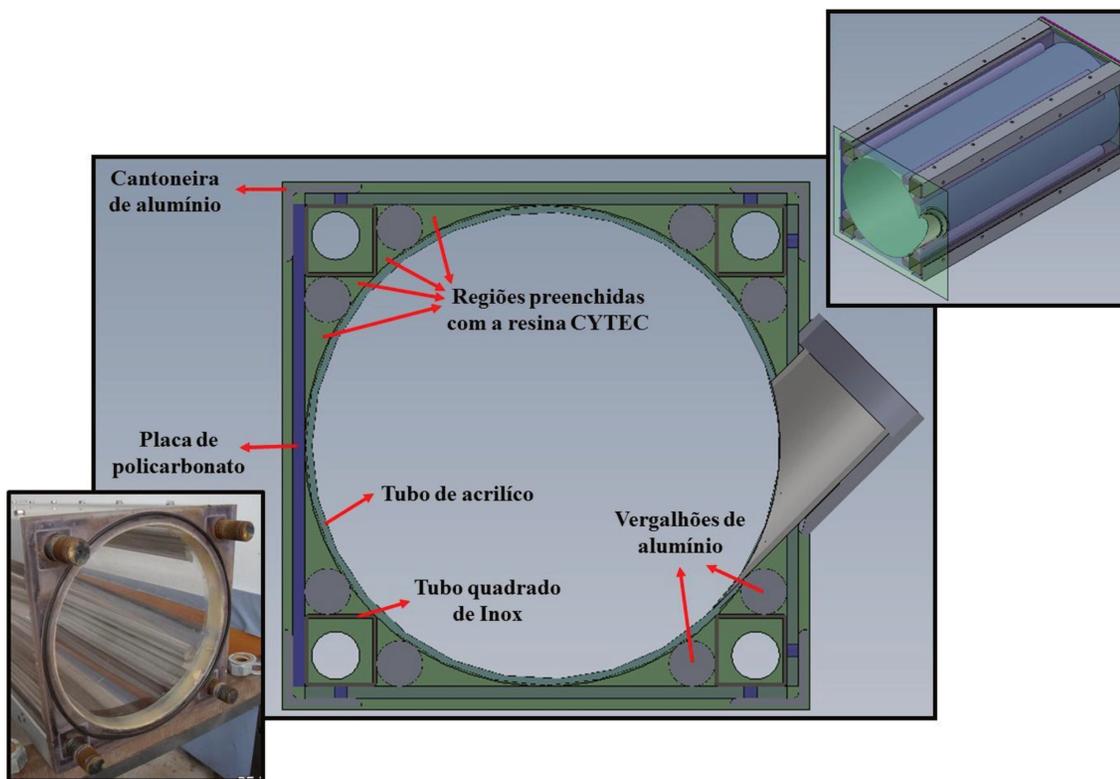
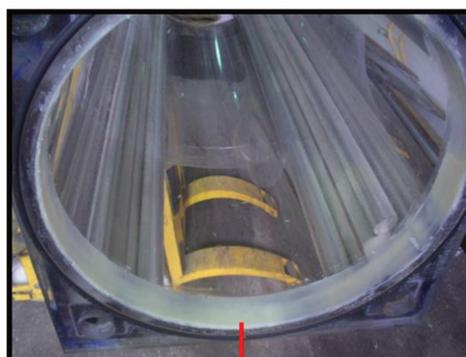


Figura 4.5 – Corte transversal do equipamento detalhando a construção da estrutura quadrada.

Com a estrutura quadrada construída, o tubo de acrílico foi posicionado no centro dessa estrutura e depois selado em uma das extremidades com uma resina acrílica (Figura 4.6) Plexus MA310 do fabricante Huntsman, deixando a outra extremidade do equipamento livre para a injeção da resina CYTEC.



Camada selante com a resina Plexus

Figura 4.6 – Foto com o detalhe de uma das extremidades do equipamento que foi selado com a resina Plexus.

Um dos pontos mais importantes da construção desse equipamento é a injeção da resina CYTEC entre as paredes de policarbonato e o tubo de acrílico (Figura 4.5). Para obter-se um bom processo de resinagem é necessário aquecer (aproximadamente 60<sup>0</sup>C) as paredes onde a resina entrará em contato, eliminando assim a umidade impregnada nas paredes das peças. Outro importante cuidado é de manter o bico do misturador estático, que é usado para o processo de mistura da resina, sempre afogado dentro da poça de resina já aplicada, pois isso evita a formação de bolhas causadas pelo arraste de umidade do ar feito pela resina quando dispensada de certa altura da poça de aplicação. A Figura 4.7 mostra o esquema e a foto da estrutura quadrada do hidrociclone completa.

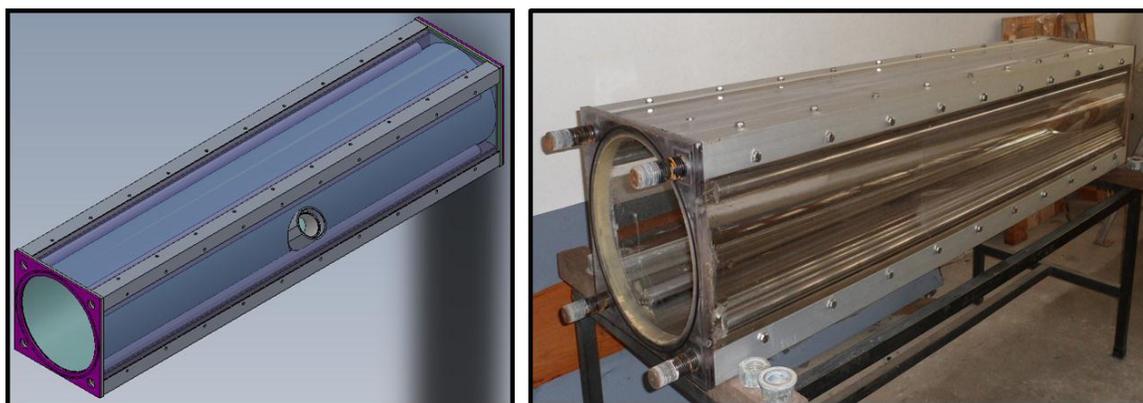


Figura 4.7 – Esquema e foto da estrutura quadrada completa da Câmara de Expansão.

Foi construído um tubo que fica posicionado no centro do tubo de acrílico da estrutura quadrada da Câmara de Expansão mostrado na Figura 4.8. Esse tubo anular tem a função de permitir e conduzir o escoamento do gás separado do líquido até a saída de gás. Possui furos na sua extremidade superior para passagem do gás separado devido às forças centrífugas exercidas sobre o líquido na parede de acrílico do separador para o tubo anular. Foram instaladas hastes (helicoides) no tubo para ajudar no escoamento centrífugo do líquido fazendo com que mais gás e bolhas dispersas no escoamento sejam separadas.

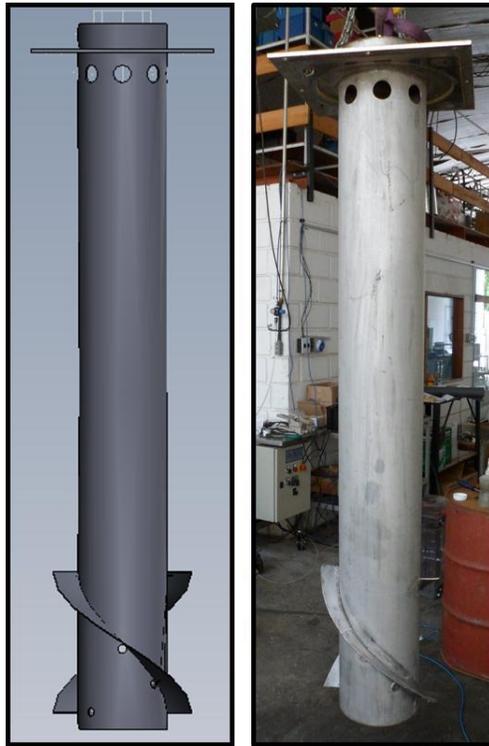


Figura 4.8 – Esquema e foto do tubo anular instalado na Câmara de Expansão.

Por fim, a estrutura quadrada pronta (Figura 4.7) foi colada e vedada na parte superior do tubo anular (Figura 4.8) e na tampa da parte inferior da Câmara de Expansão, já instalada no suporte (Figura 4.9).

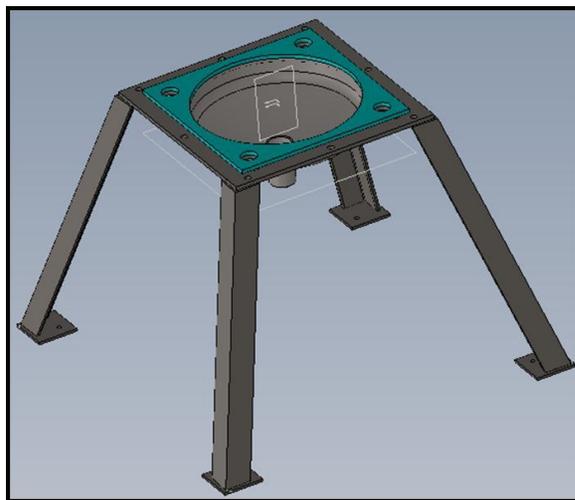
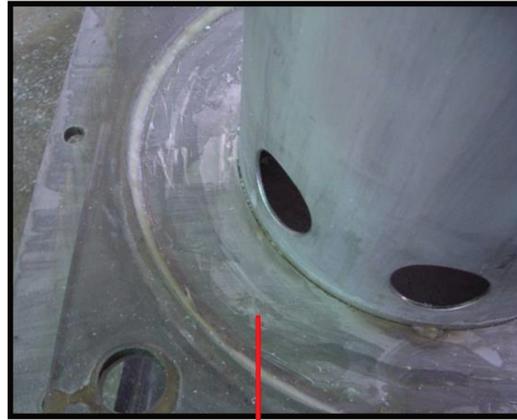


Figura 4.9 – Esquema da tampa da parte inferior da Câmara de Expansão instalada no suporte.

Para fazer a vedação e a colagem das partes foi utilizada a resina acrílica Plexus MA310 da Huntsman, pois tinha que ser uma resina que fosse possível colar diferentes materiais entre eles, como o aço Inox, acrílico e o policarbonato (Figura 4.10).



Região que foi aplicada a resina acrílica

Figura 4.10 – Foto da região onde foi aplicada resina da parte superior do tubo anular para colar e vedar a estrutura quadrada do hidrociclone.

#### 4.1.1. Problemas e Soluções

Depois de pronto, o protótipo foi instalado e testado no Laboratório Kelsen Valente Serra (LABPETRO) onde foram observados problemas importantes durante o seu funcionamento.

O primeiro problema observado foi que o líquido que entrava tangencialmente na Câmara de Expansão passava direto pelos helicoides do tubo anular como mostra a Figura 4.11. Os helicoides estavam sem função alguma, fazendo com que o filme de líquido na parede de acrílico escoasse direto até o fundo do separador produzindo mais bolhas de ar (como uma cachoeira) e o filme de líquido não tinha o devido escoamento centrífugo.



Figura 4.11 – Foto mostrando o filme de líquido na parede de acrílico passando direto pelo helicóide.

A Figura 4.12 (a) mostra a foto de uma das soluções encontradas para sanar esse problema que foi vedar com uma borracha em toda a extremidade dos helicóides (ver Figura 4.12 (b)). Porém, devido ao fato de que o equipamento fica exposto às condições climáticas e ao constante fluxo de líquido, essa borracha foi se descolando dos helicóides, ficando solta dentro do separador atrapalhando o escoamento centrífugo do líquido.

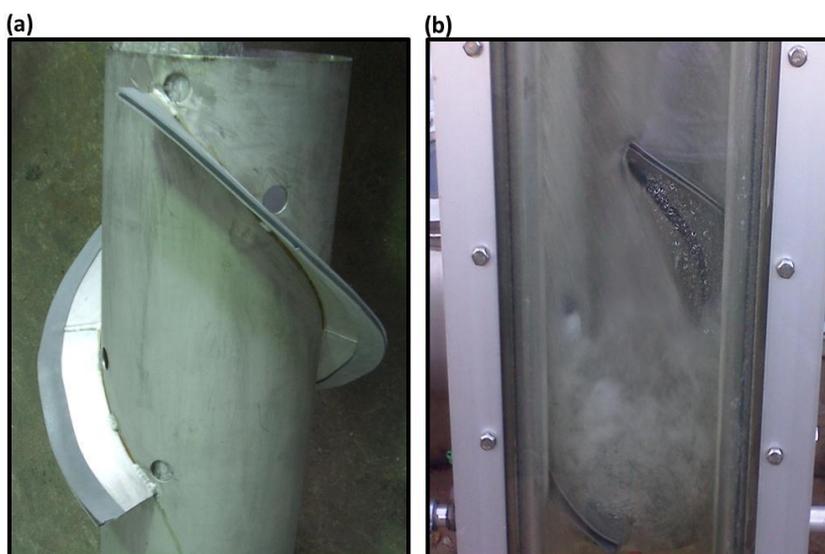


Figura 4.12 – (a) Foto da borracha colada em toda a extremidade do helicóide; (b) Foto do hidrociclone em operação mostrando que a vedação da borracha funcionou.

Assim, outra solução foi escolher um material mais resistente que a borracha para fazer a vedação. O escolhido foi o Kevlar em conjunto com uma cola de poliuretano recortados sobre medida para cobrir totalmente a superfície superior e inferior de ambos os helicoides (Figura 4.13 (a)). Esse conjunto foi colado utilizando a cola de poliuretano sobre as superfícies dos helicoides com uma sobra nas laterais (Figura 4.13 (b)) para realizar a vedação sem riscar e danificar o tubo externo de acrílico durante o processo de remontagem do hidrociclone.

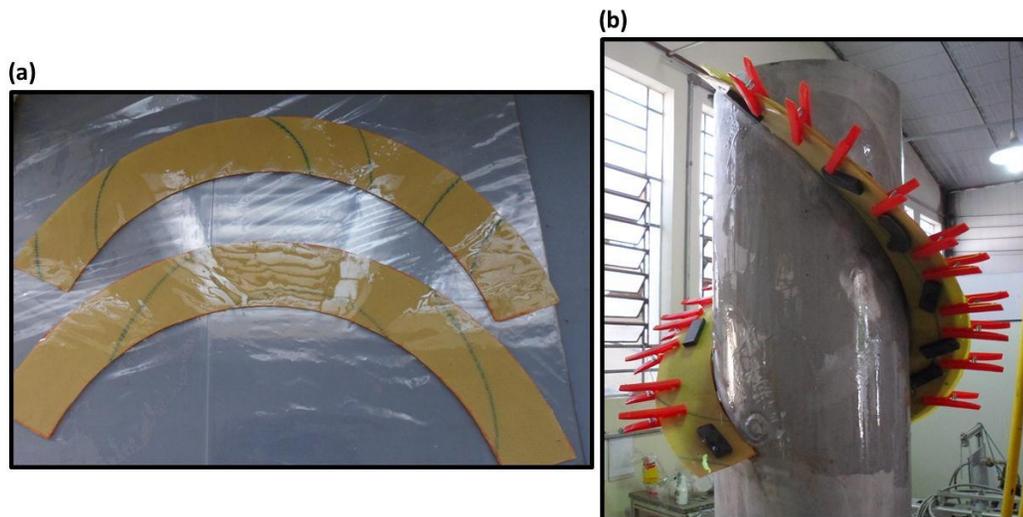


Figura 4.13 – (a) Foto do conjunto Kevlar com a cola de poliuretano; (b) Foto do processo de colagem do conjunto nas superfícies superior e inferior de ambos os helicoides.

Como foi observado que a outra borracha começou a se soltar no início e no fim dos helicóides, foi adotada a solução de uma chapa de Inox dobrada no início e no final de ambos os helicóides, como mostra a Figura 4.14. Dessa forma todos os problemas possíveis relacionados com a vedação entre o helicóide e a parede do tubo de acrílico foram resolvidos.

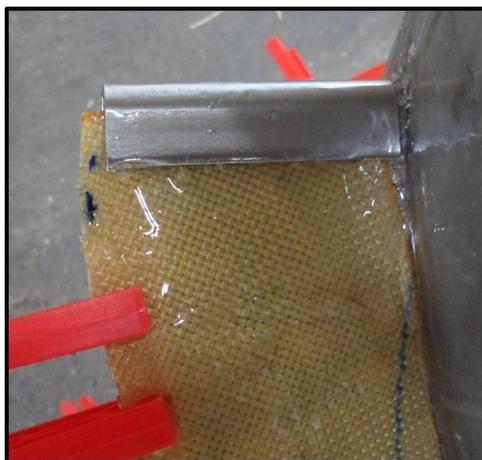


Figura 4.14 – Foto que mostra com detalhe a chapa de Inox dobrada no início do helicóide.

O segundo problema observado durante o funcionamento da Câmara de Expansão, foi a formação de um vórtice no fundo do separador que se forma devido ao escoamento centrífugo do líquido e a sucção da bomba de saída de líquido, como mostra a Figura 4.15.



Figura 4.15 – Foto do vórtice formado no fundo da Câmara de Expansão durante seu funcionamento.

Avanços recentes tornaram possível o desenvolvimento de formas de baixo arrasto. Alguns experimentos levaram ao desenvolvimento de uma distribuição de pressão que impede a separação enquanto mantém a camada-limite turbulenta numa condição de atrito superficial desprezível. Além disso, métodos aperfeiçoados para cálculo da geometria de corpos visando uma desejada distribuição de pressão levaram ao desenvolvimento de formas quase ótimas para estruturas espessas de baixo arrasto (FOX *et al.*, 2006). A Figura 4.16 mostra um exemplo desses resultados.

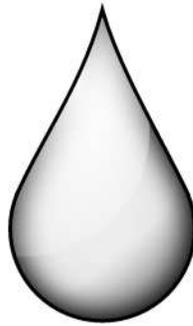


Figura 4.16 – Forma quase ótima para estrutura de baixo arrasto.

Tendo essa forma quase ótima para estrutura de baixo arrasto, foi fabricado um dispositivo chamado de Redutor de Vórtice (Figura 4.17 (a)). Este dispositivo foi instalado no fundo da Câmara de Expansão (Figura 4.17 (b)), resolvendo assim o problema de vórtice no fundo durante a operação do equipamento. A cor vermelha é devido ao tratamento químico aplicado que protege o dispositivo de corrosão. Vale ressaltar que na parte inferior da base do separador foi desenvolvido um sistema com flange para que o dispositivo possa ser removido facilmente, sem precisar desmontá-lo, possibilitando a realização de testes de eficiência com e sem o dispositivo. Nota-se também que os furos que foram feitos na parte inferior do dispositivo é tangencial, tendo o mesmo sentido do escoamento centrífugo do líquido no interior da Câmara de Expansão diminuindo os efeitos que possam prejudicar o escoamento.

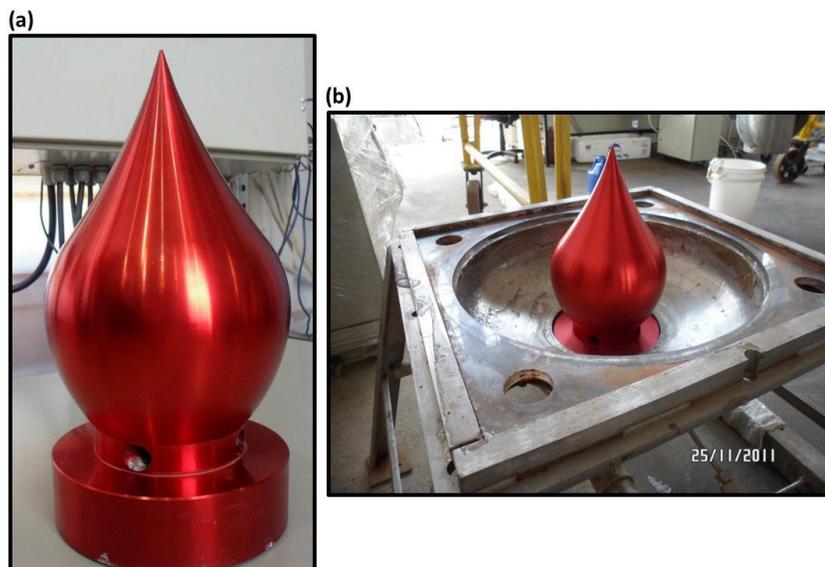


Figura 4.17 – (a) Foto do Redutor de Vórtice; (b) Foto do Redutor de Vórtice instalado no fundo do hidrociclone.

Até o fechamento deste texto, o dispositivo Redutor de Vórtice está em processo de depósito de patente, através da Agência de Inovação (INOVA) da UNICAMP.

O terceiro e último problema foi referente ao bocal de entrada do separador que possui um diâmetro de 4". Foi observado que o bocal não era todo preenchido com o líquido devido a baixa vazão, pois o tubo que se conecta com o bocal é de 2". Com a finalidade de resolver esse problema e ter a possibilidade de operar a Câmara de Expansão para diferentes velocidades superficiais e diferentes números de Froude do bocal, foram fabricados dois bocais, de 1" e 2" de diâmetro, que se encaixam perfeitamente no interior do bocal de 4" (Figura 4.18 (a)). Para utilizar o bocal de 1" de diâmetro, foi necessário encaixá-lo dentro do bocal de 2" antes dele ser instalado no bocal da Câmara de Expansão (Figura 4.18 (b)).

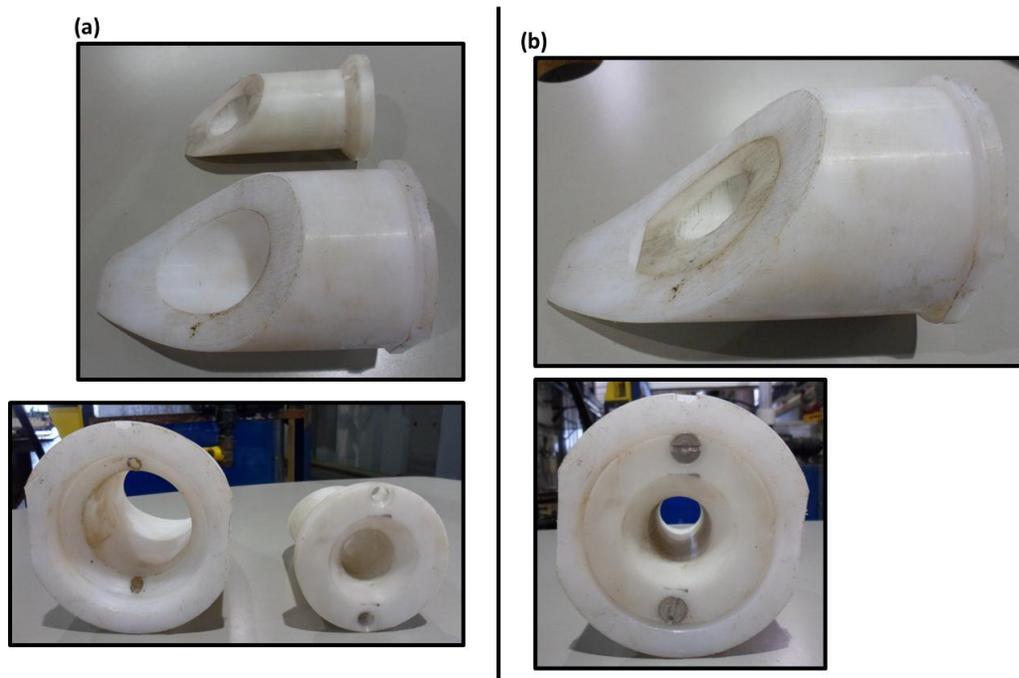


Figura 4.18 – (a) Foto do bocal de 1" e 2" de diâmetro; (b) Foto do bocal de 1" de diâmetro instalado no interior do bocal de 2" de diâmetro.

#### 4.2. Geometria da Câmara de Expansão do VASPS

A geometria que será descrita é referente ao domínio do fluido, onde existe o escoamento tanto de líquido como de gás e não a região externa que delimita o separador. Abaixo são apresentados os parâmetros geométricos do protótipo do separador, dividido em Câmara de Expansão, bocal de entrada e corpo do separador.

A Câmara de Expansão apresenta as seguintes medidas:

- Comprimento total: 2062 mm
- Comprimento acima e abaixo do bocal: 1031 mm

O bocal do separador apresenta as seguintes dimensões:

- Diâmetro interno: 109 mm
- Diâmetro externo: 125 mm
- Comprimento: 238,90 mm

O corpo do separador constituído por dois tubos concêntricos, formando um espaço entre eles, onde é realizada a separação das fases gás-líquido. Suas dimensões são:

- Tubo externo: 392 mm
- Tubo interno: 249 mm

A Figura 4.19 mostra um corte longitudinal vertical da Câmara de Expansão, onde é mostrado o comprimento total do protótipo, bem como a posição do bocal e o diâmetro externo do tubo externo do separador.

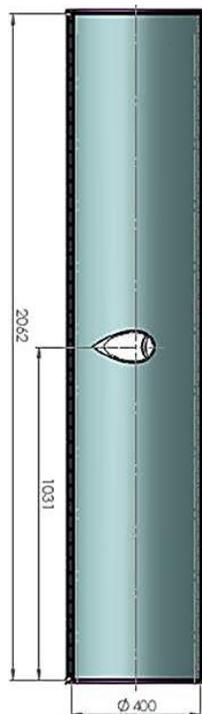


Figura 4.19 – Vista do corte longitudinal vertical do protótipo hidrociclone.

Na Figura 4.20 mostra a vista de um corte transversal do separador, onde é mostrado o comprimento e o diâmetro interno do bocal e os diâmetros do tubo interno e externo que compõe a Câmara de Expansão.

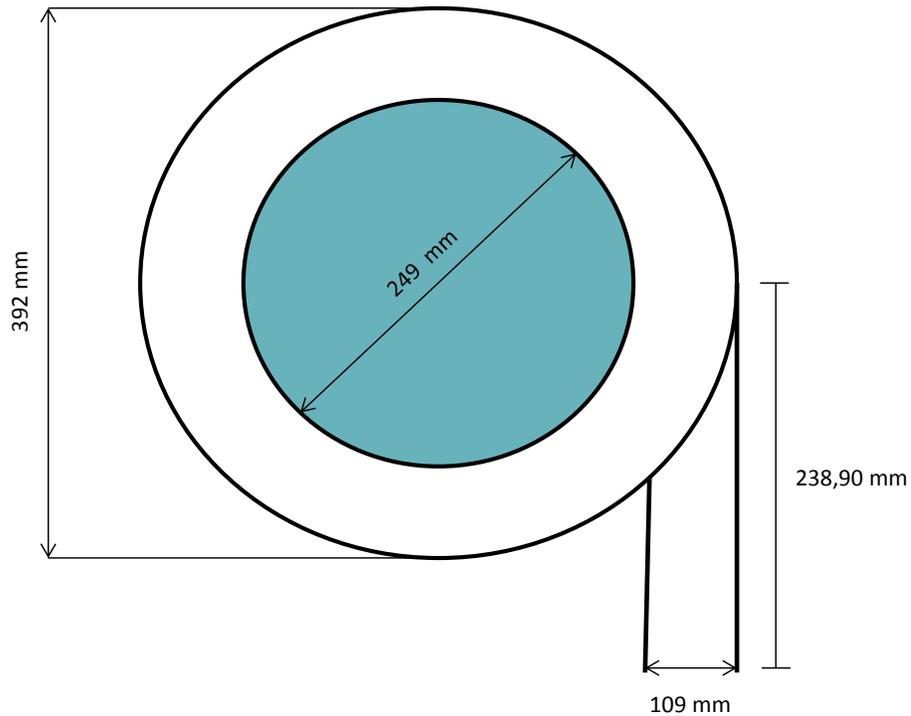


Figura 4.20 – Vista do corte transversal do protótipo hidrociclone.

### 4.3. Montagem experimental / circuito de teste

Foi montado um circuito de teste composto basicamente por duas bombas centrífugas, um tanque de água, protótipo da Câmara de Expansão, manômetros de pressão, difusor de ar, medidores de vazão de ar (entrada e saída) e dois medidores de vazão de fluido. Para referência, a Figura 4.21 mostra a representação esquemática da montagem.

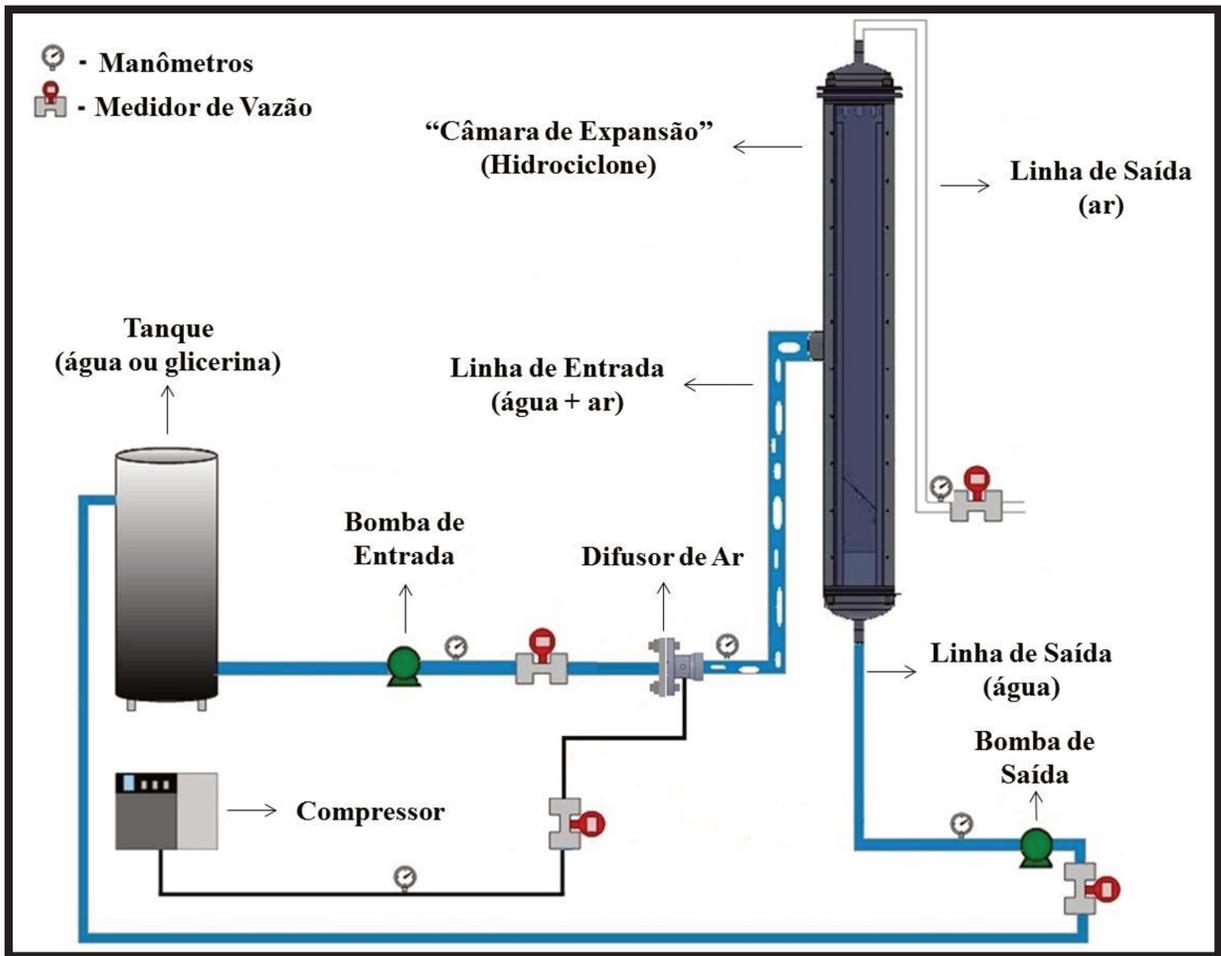


Figura 4.21 – Esquema geral do aparato experimental instalado.

No início do circuito, o ar procedente do compressor é mensurado pelos medidores de vazão volumétrica e temperatura, onde sua vazão de entrada no circuito é regulada por uma válvula do tipo agulha. A água e a glicerina procedem do tanque e sua vazão é controlada pela frequência da bomba de entrada e é mensurada pelo medidor de vazão volumétrica instalado no circuito. No difusor de ar, o ar é injetado no escoamento de água ou glicerina, tornando um escoamento de bolhas dispersas antes de entrar no separador. A “Câmara de Expansão” possui duas saídas, uma inferior e outra superior. O ar separado sai pela linha de saída superior do separador, onde é mensurado a sua vazão volumétrica e temperatura. A água ou glicerina sai pela saída inferior e sua vazão é controlada pela frequência da bomba de saída, retornando ao tanque. A Figura 4.22 mostra a visão geral (foto) da montagem experimental.



Figura 4.22 – Visão geral (foto) da montagem experimental.

#### 4.3.1. Descrição dos equipamentos instalados

A seguir serão descritos e detalhados os equipamentos instalados para a montagem experimental. As fotos dos equipamentos são apresentadas no APÊNDICE D.

- ✓ Para o armazenamento de água ou glicerina foi utilizado um tanque de 2000 litros.
- ✓ Bomba centrífuga do fabricante Somar/Weg modelo MOTOBOMBA SM22-275, com 7,5 hp de potência TRIF, 3 estágios AL-SF, vazão máxima de 22,5 m<sup>3</sup>/h, pressão máxima e mínima de 95 MCA e 20 MCA respectivamente. Este modelo de bomba está instalado na entrada da “Câmara de Expansão”.
- ✓ Bomba centrífuga do fabricante Somar/Weg modelo MOTOBOMBA SM21-250, com 5 hp de potência, 2 estágios AL-trifásico, vazão máxima de 21,9 m<sup>3</sup>/h, pressão máxima e mínima de 65 MCA e 10 MCA respectivamente. Este modelo de bomba está instalado na saída da Câmara de Expansão.
- ✓ Um amperímetro na bomba de saída de água ou glicerina.
- ✓ Dois inversores de frequência para as bombas, da marca Weg série CFW-08.

#### 4.4. Instrumentação

A instrumentação utilizada para obtenção de todas as medidas necessárias é descrita neste item, enquanto que o arranjo dela é mostrado no esquema da montagem experimental da Figura 4.21. A calibração dos instrumentos é mostrada no APÊNDICE A. A precisão e a incerteza de cada medidor são mostradas no APÊNDICE B. As fotos dos instrumentos são mostradas no APÊNDICE D. A instrumentação pode ser dividida em medidores de vazão volumétrica, temperatura, pressão e instrumentação de aquisição dos sinais dos medidores.

Os medidores de vazão volumétrica são utilizados para mensurar as vazões de ar, água e glicerina que escoam na linha de testes.

Para medir a vazão volumétrica de água e glicerina foram utilizados dois medidores instalados na entrada e na saída da Câmara de Expansão:

- ✓ Medidor de entrada da Câmara de Expansão do fabricante Contech, com feixe de vazão de 0 à 13,8 m<sup>3</sup>/h, sensor do tipo turbina, número de série 07110176, modelo SVTL 1”, com módulo eletrônico também do fabricante Contech, número de série 07110178 e modelo CTH2265I.
- ✓ Medidor de saída da Câmara de Expansão do fabricante Contech, com feixe de vazão de 0 à 13,8 m<sup>3</sup>/h, sensor do tipo turbina, número de série 09010538, modelo SVTL 1”, com módulo eletrônico também do fabricante Contech, número de série 09010539 e modelo CTH2265I.

Para medir a vazão volumétrica de ar na entrada e na saída da Câmara de Expansão foram utilizados os seguintes medidores:

- ✓ Transdutor Digital modelo CD223 do fabricante Validyne e transdutor de pressão modelo DP15-26 com sensor número 40 (*range* 86.0 kPa) para medir pressão manométrica da saída de ar do separador.
- ✓ Transdutor Digital modelo CD223 do fabricante Validyne e transdutor de pressão modelo DP15-26 com sensor número 26 (*range* 25 kPa) para medir a diferença de pressão da saída de ar do separador.

- ✓ Elementos de escoamento laminar (LFE – *Laminar Flow Elements*) modelo 50MJ10-12 e 50MW20-1 da fabricante Meriam, utilizado para medição da vazão volumétrica de gás na entrada e na saída de gás respectivamente.
- ✓ Medidor de pressão modelo 1151 *smart* da fabricante Rosemount com calibração de 0 a 4 bar (1605,8 *in* H<sub>2</sub>O), utilizado para medição da pressão manométrica na entrada de gás.
- ✓ Medidor de pressão modelo 2051CD da fabricante Rosemount com calibração de 0 a 8 *in* H<sub>2</sub>O (0,02 bar) utilizado para medição do diferencial de pressão na entrada de gás.

Para medir a temperatura do ar na entrada e na saída da Câmara de Expansão foram utilizados dois sensores de temperatura PT 100 com faixa de operação de 0 a 100 °C.

As instrumentações utilizadas para receber os sinais para o sistema de aquisição de dados foram:

- ✓ Aquisição de sinais da fabricante National Instruments, modelo NI USB 9162/9172 que é um chassi para módulo de aquisição de sinais com saída USB.
- ✓ Módulo de aquisição de dados da fabricante National Instruments, modelo NI 9203 que é um condicionador de sinais analógicos de 8 canais, 4-20 mA e taxa de aquisição de 200 kS/s.
- ✓ Módulo de aquisição da fabricante National Instruments, modelo NI 9201 que é um condicionador de sinais analógicos de 8 canais  $\pm 10$  V e taxa de aquisição de 500 kS/s.

#### **4.5. Sistema de aquisição de dados**

Todos os processos envolvidos no funcionamento do protótipo são realizados através de um controlador lógico programável (CLP – Figura 4.23) conectado a um computador. Para o controle e o gerenciamento de todo o processo foi instalado o *software* Supervisório Elipse SCADA (*Supervisory, Control, and Data Acquisition System*), onde o *start* e *stop* do equipamento são realizados diretamente no software, bem como a configuração dos parâmetros para realizar os experimentos.



Figura 4.23 – Foto do CLP da marca Altus modelo FBs-24MAT.

Com o programa Supervisório é possível alterar as porcentagens (frequência) das bombas de entrada e saída, saber a vazão de líquido na entrada e na saída do separador e a temperatura no interior do mesmo.

A aquisição dos dados gerados no equipamento em funcionamento é realizada através do próprio Supervisório. A tela da planta de processo do Supervisório Elipse SCADA é apresentada na Figura 4.24.

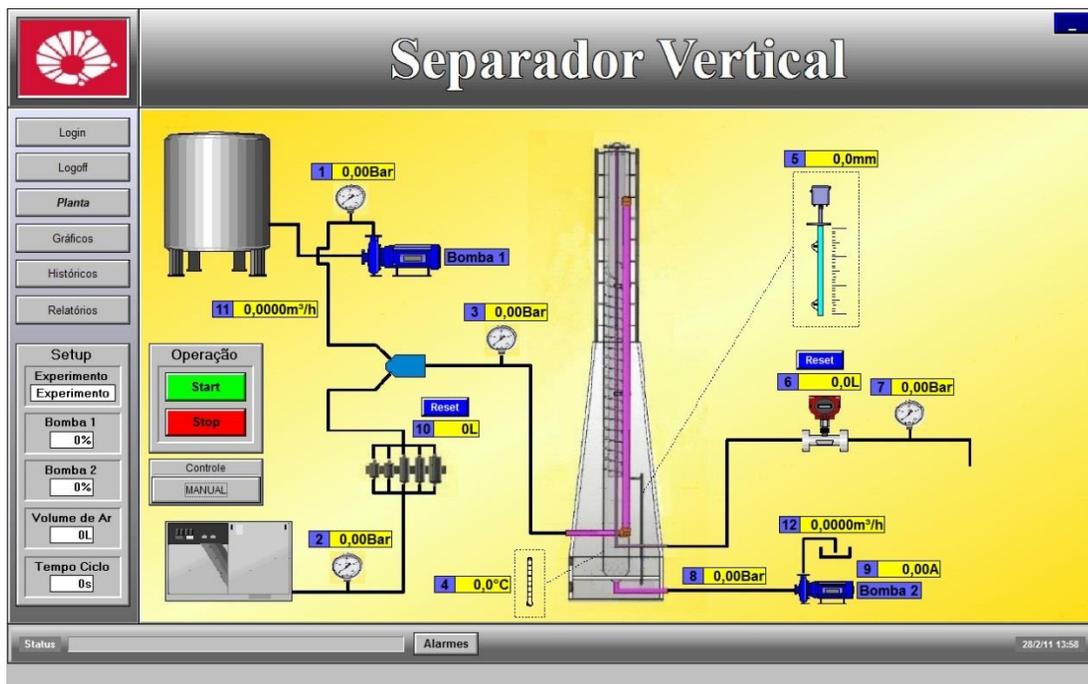


Figura 4.24 – Tela da planta de processo do Supervisório Elipse SCADA.

O Supervisório da Figura 4.24 foi inicialmente desenvolvido para realizar testes de um controlador de nível de um protótipo do VASPS. Portanto para a Câmara de Expansão não serão utilizadas todas as funções dele como mostrada na Figura 4.24. Na Tabela 4.1 é mostrada as variáveis medidas durante o processo de operação da Câmara de Expansão utilizando o Supervisório Elipse SCADA.

**Tabela 4.1 – Variáveis medidas no sistema de aquisição Elipse SCADA.**

Variável	Descrição	Unidade
$T_L$	Temperatura do líquido na Câmara de Expansão	[°C]
$Q_{L(e)}$	Vazão volumétrica do líquido (água ou glicerina) na entrada da Câmara de Expansão	[m <sup>3</sup> /h]
$Q_{L(s)}$	Vazão volumétrica do líquido (água ou glicerina) na saída da Câmara de Expansão	[m <sup>3</sup> /h]

Para determinar a eficiência de separação da Câmara de Expansão foi instalado o *software* LabVIEW®. As variáveis medidas durante o processo de injeção de ar no separador e suas respectivas unidades encontram-se na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Variáveis medidas no sistema de aquisição de dados LabVIEW.**

Variável	Descrição	Unidade
$P_{G(e)}$	Pressão manométrica no medidor laminar de vazão de gás na entrada	[kPa]
$P_{G(s)}$	Pressão manométrica no medidor laminar de vazão de gás na saída	[kPa]
$\Delta P_G$	Pressão diferencial do medidor laminar de vazão de gás na entrada e saída	[in H <sub>2</sub> O]
$T_{G(e)}$	Temperatura no medidor laminar de vazão de gás na entrada	[°C]
$T_{G(s)}$	Temperatura no medidor laminar de vazão de gás na saída	[°C]
$\dot{m}_G$	Vazão mássica de ar na entrada e saída	[kg/h]
$Q_{G(e)}$	Vazão volumétrica do ar na entrada	[m <sup>3</sup> /h]
$Q_{G(s)}$	Vazão volumétrica do ar na saída	[m <sup>3</sup> /h]
$\eta$	Eficiência de separação da Câmara de Expansão	[%]

A Figura 4.25 mostra o Supervisório LabVIEW para aquisição dos dados da eficiência de separação do hidrociclone quando injetado ar.

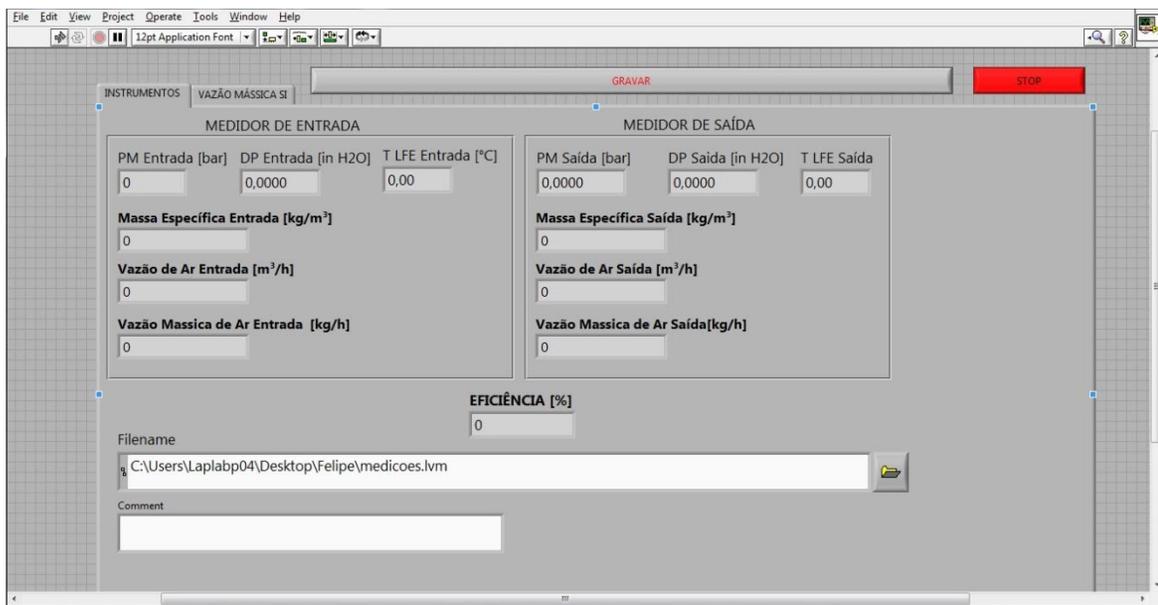


Figura 4.25 – Tela da planta de processo do Supervisório LabVIEW.

#### 4.6. Sistema de injeção de ar

Para medir a vazão volumétrica de ar na entrada e na saída da Câmara de Expansão foram utilizados medidores chamados elemento de escoamento laminar (Figura E. 8), selecionados de acordo com a vazão volumétrica necessária para realizar os testes experimentais.

Esses medidores, também chamados de medidores de resistência linear, são capazes de medir vazões bem pequenas e moderadas de gás ou líquido. Nesses medidores a vazão é linearmente proporcional à diferença de pressão. Essa diferença de pressão gerada no escoamento pelo dispositivo é a própria perda de carga, em outras palavras, a diferença de pressão medida através do equipamento é a expressão da dissipação viscosa do escoamento entre a saída e a entrada do dispositivo. Portanto essa relação entre queda de pressão e vazão depende da viscosidade do fluido, fazendo com que seja necessário saber a medida da temperatura do fluido para uma medição precisa quando utilizado esse tipo de medidor.

Independentemente do tipo de escoamento no tubo da linha de gás, no medidor o escoamento é laminar, pois o interior desse medidor é preenchido por vários tubos com diâmetros suficientemente pequenos para que o escoamento tenha essa característica. Portanto para cada um desses tubos de escoamento laminar têm-se o escoamento de Poiseulli, dada pela Equação (3.14).

Os dois medidores de elemento de escoamento laminar foram montados e instalados em série conforme mostra o esquema da Figura 4.26. Os medidores de pressão manométrica, diferencial de pressão e temperatura foram ligados nos seus respectivos módulos da *National Instruments* e estes módulos ligados ao chassi da NI (Figura E. 9) que está conectado por cabo USB no computador, onde é utilizado o Supervisor LABVIEW para fazer a leitura das medidas.

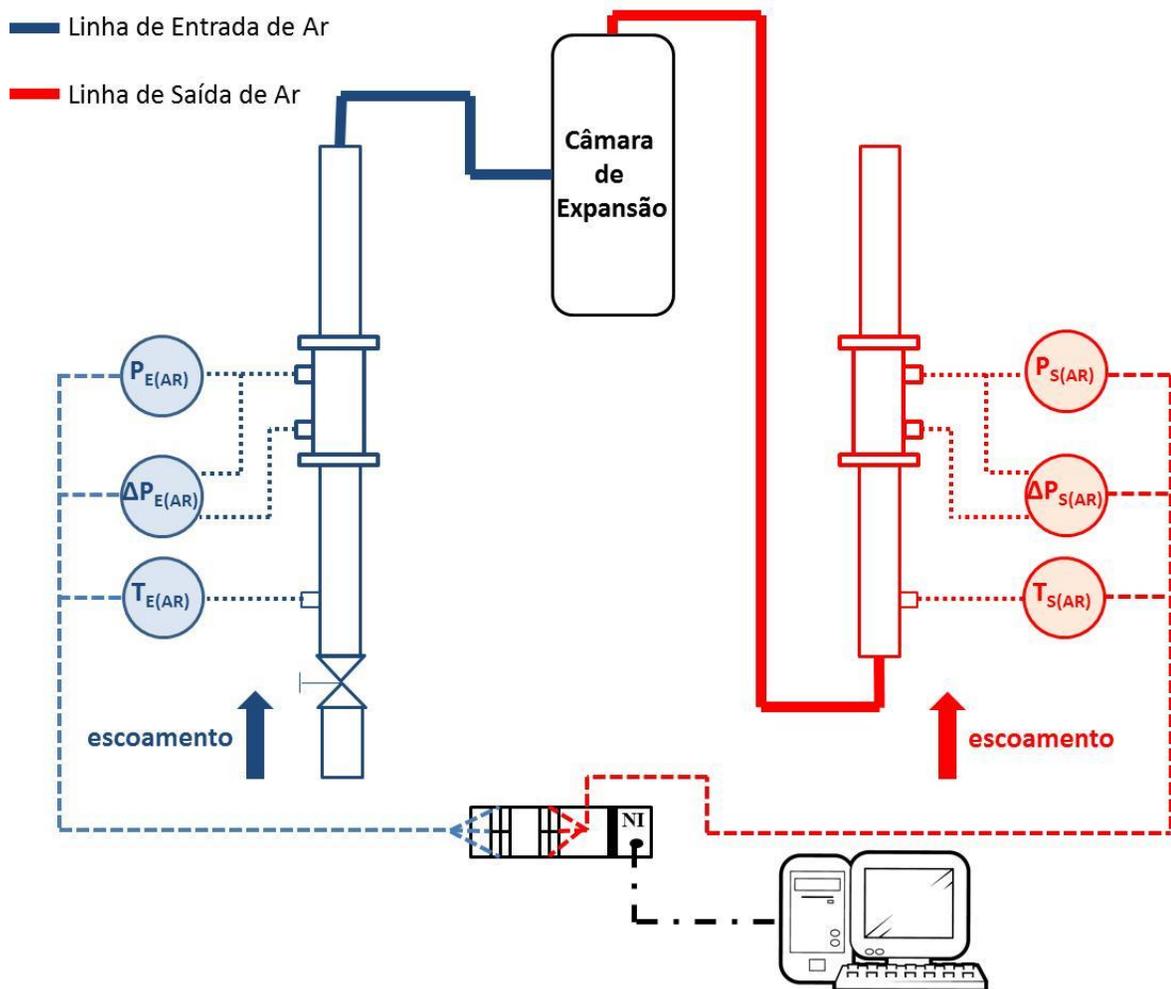


Figura 4.26 – Esquema da montagem experimental para medição da vazão de ar.

#### 4.6.1. Aquisição de dados para os medidores de ar

Depois de montado e instalado os medidores de vazão volumétrica de ar na saída e entrada da Câmara de Expansão, o sistema foi ligado somente com ar, para realizar um teste de eficiência de separação com a válvula fechada da saída de líquido na parte inferior do separador. A eficiência mostrada no supervisor LabVIEW<sup>®</sup> variou pouco com valores entre 99,9 a 100%, o

que era de se esperar, pois a vazão de ar que entra tem que ser a mesma vazão que sai do separador. Com esse teste também foi possível realizar uma verificação de pontos de vazamento na união de tubos e até mesmo no separador e assim possibilitando o reparo e a solução do problema.

Agora, no teste de ar + água, com a “Câmara de Expansão” funcionando nas condições normais, com ar sendo injetado junto com a água e todas as válvulas abertas foi observado um problema na medição da eficiência de separação. Os valores de eficiência de separação que estavam sendo mostrado pelo Supervisório não estavam coerentes com a condição de operação do separador. Analisando o que estava acontecendo, foi percebido que os valores de vazão volumétrica de ar medido na linha de entrada estavam coerentes, ou seja, estavam de acordo com o teste com ar somente, porém o valor de vazão volumétrica de ar na linha de saída estava incoerente.

Sabendo que o problema estava na linha de saída de ar, esta foi desmontada. Verificou-se que havia uma quantidade significativa de água no interior dos tubos próximos ao medidor. Concluímos que o ar separado do líquido que sai da Câmara de Expansão é um ar muito úmido e quando passa pela tubulação com menor diâmetro a pressão aumenta fazendo com que o ar condense, formando a água. Também foi observada a presença de água nos medidores de elemento de escoamento laminar, o que não era desejável, pois esse medidor estava calibrado para medir somente ar e não água, causando a medição incorreta da vazão volumétrica de ar na saída do separador. Sendo assim, adotou-se correções no Supervisório, considerando a vazão volumétrica de ar com 90% de umidade. Para maior precisão para a medida de ar da linha de entrada, foram feitas as mesmas correções, porém foi considerado a vazão volumétrica de ar com 20% de umidade.

A curva de calibração do medidor de elemento de escoamento laminar é fornecida pelo fabricante Merian. Ele considera taxa de escoamento de ar seco na unidade pé cubico por minuto [CFM] versus o diferencial de pressão ( $\Delta P$ ) em polegadas de água [in H<sub>2</sub>O] para 4 °C. Essa curva é gerada usando a equação quadrada de segunda ordem, mostrada na Equação (4.1):

$$Q_{std} = B\Delta P^2 + C\Delta P^2 \quad (4.1)$$

onde  $B = 0,404162$  e  $C = -0,00362925$  são constantes da calibração para o medidor na entrada do separador. Para o medidor na saída a constante  $B = 1,07654$  e  $C = -0,010176$ .

Multiplicando a Equação (4.1) pelos fatores de correção da viscosidade, temperatura, pressão e densidade obtêm-se a equação fornecida pelo manual da Meriam para vazão volumétrica na condição padrão para o ar úmido dado pela Equação (4.2).

$$Q_{wet-air} = (B\Delta P + C\Delta P^2) \times \left( \frac{\mu_{std}}{\mu_f} \right) \times \left( \frac{T_{std}}{T_f} \right) \times \left( \frac{P_f}{P_{std}} \right) \times \left( \frac{\rho_{wet}}{\rho_{dry}} \right) \quad (4.2)$$

O termo  $(\mu_{std} / \mu_f)$  é referente à razão entre a viscosidade na condição padrão do ar ( $\mu_{std}$ ) e a viscosidade do fluido (ar) úmido. Onde a equação para a viscosidade do fluido ( $\mu_f$ ) é dada por:

$$\mu_f = \mu_{wet-air} = \left( \frac{14,58 \times (T)^{\frac{3}{2}}}{(110,4 + T)} \right) \times \left( \frac{\mu_{wet}}{\mu_{dry}} \right) \quad (4.3)$$

Na Equação (4.3) que é também fornecida pelo manual, o primeiro termo foi substituído por outro, pois depois de implementado no supervisor, a vazão volumétrica de ar ainda apresentava incoerência. Isso ocorreu porque o primeiro termo da Equação (4.3) ser em função apenas da temperatura e não também da densidade. Para resolver isso foi realizada uma pesquisa bibliográfica. Foi selecionado o trabalho de K. Kadoya *et al.* de 1985, onde é feita uma avaliação crítica dos dados mais recentes da viscosidade do ar apresentando um conjunto consistente de correlações para essas propriedades em uma ampla faixa de pressão e temperatura. Portanto a seguinte equação foi utilizada para calcular a viscosidade em função da temperatura e da densidade  $\mu(T_r, \rho_r)$ .

$$\mu(T_r, \rho_r) = H \cdot [\mu_0(T_r) + \Delta\mu(\rho_r)] \quad (4.4)$$

onde

$$\mu_0(T_r) = A_1 T_r + A_{0,5} T_r^{0,5} + \sum_{i=0}^{-4} A_i T_r^i \quad (4.5)$$

$$\Delta\mu(\rho_r) = \sum_{i=1}^4 B_i \rho_r^i \quad (4.6)$$

$$T_r = T/T^* \quad (4.7)$$

$$\rho_r = \rho/\rho^* \quad (4.8)$$

As constantes utilizadas para a Equação (4.4) são mostradas na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Valores de cada constante utilizada para o cálculo da viscosidade em função da temperatura e densidade.**

Constantes	Valor	Constantes	Valor
<b>T*</b>	132,5 [K]	B <sub>2</sub>	1,26469
<b>ρ*</b>	314,3 [kg/m <sup>3</sup> ]	B <sub>3</sub>	-0,511425
<b>H</b>	6,16090 [10 <sup>-6</sup> Pa.s]	B <sub>4</sub>	0,274600
<b>A<sub>1</sub></b>	0,128517		
<b>A<sub>0,5</sub></b>	2,60661		
<b>A<sub>0</sub></b>	-1		
<b>A<sub>-1</sub></b>	-0,709661		
<b>A<sub>-2</sub></b>	0,662534		
<b>A<sub>-3</sub></b>	-0,197846		
<b>A<sub>-4</sub></b>	0,00770147		
<b>B<sub>1</sub></b>	0,465601		

Substituindo a Equação (4.4) na Equação (4.3) temos a viscosidade do fluido na saída ( $\mu_{sf}$ ) do separador dada por :

$$\mu_{sf} = \mu_{wet-air} = \mu(T_r, \rho_r) \times \left( \frac{\mu_{wet}}{\mu_{dry}} \right) \quad (4.9)$$

A viscosidade do fluido para ar seco, ou seja, da entrada do separador ( $\mu_{ef}$ ) não tem o segundo termo da Eq. (4.9), e é dado por:

$$\mu_{ef} = \mu(T_r, \rho_r) \quad (4.10)$$

O fator de correção da viscosidade para umidade ( $\mu_{wet} / \mu_{dry}$ ) é dado por um gráfico que se encontra no manual do fabricante Meriam (Figura 4.27).

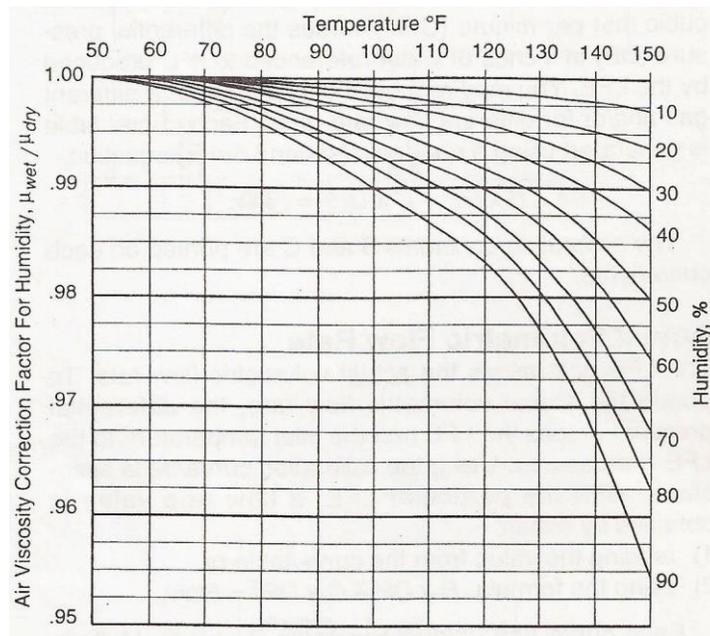


Figura 4.27 – Fator de correção da umidade relativa para viscosidade do ar.

A partir do gráfico da Figura 4.27, foi feito um gráfico somente para umidade de 90 % do fator de correção da viscosidade do ar para umidade em função da temperatura em °C, como mostra o gráfico da Figura 4.28.

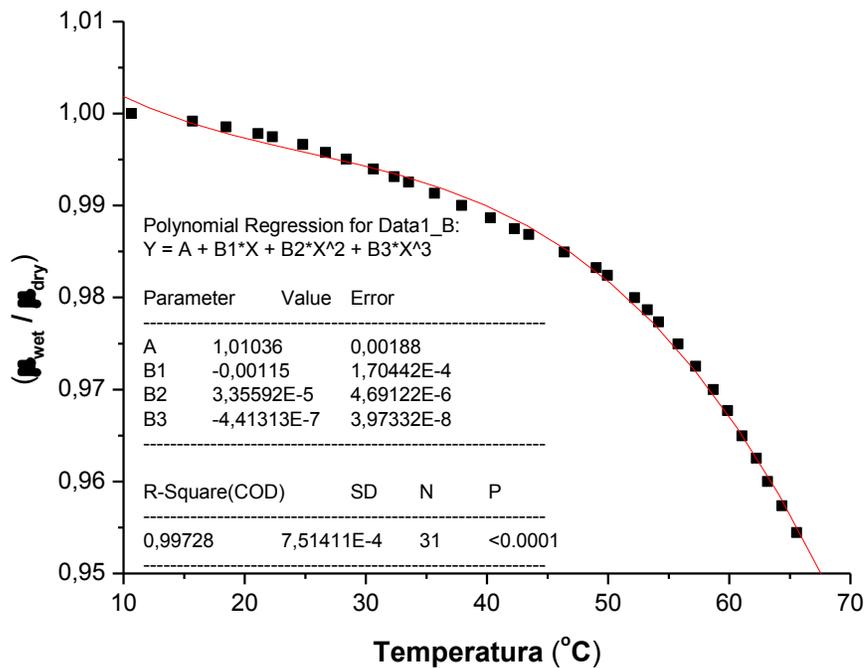


Figura 4.28 – Gráfico do fator de correção da viscosidade do ar para umidade de 90%.

O segundo e o terceiro termo da Equação (4.2) são utilizados quando se deseja a vazão volumétrica nas condições padrão ou *standard*. O termo  $(T_{std} / T_f)$  é a razão entre a temperatura na condição padrão ( $T_{std}$ ) e a temperatura do fluido (ar) ( $T_f$ ). Já o termo  $(P_f / P_{std})$  é a razão entre a pressão do fluido (ar) ( $P_f$ ) e a pressão do ar na condição padrão ( $P_{std}$ ).

O quarto e ultimo termo da Equação (4.2) é referente ao fator de correção da umidade do ar que é igual a  $(\rho_{wet} / \rho_{dry})$ . A diferença entre a densidade do ar úmido ( $\rho_{wet}$ ) e a densidade do ar seco ( $\rho_{dry}$ ) aumenta com a temperatura e umidade. Sendo assim foi construído um gráfico (Figura 4.29) de  $(\rho_{wet} / \rho_{dry})$  em função da temperatura em °C, para umidade relativa de 100%, utilizado na saída do separador.

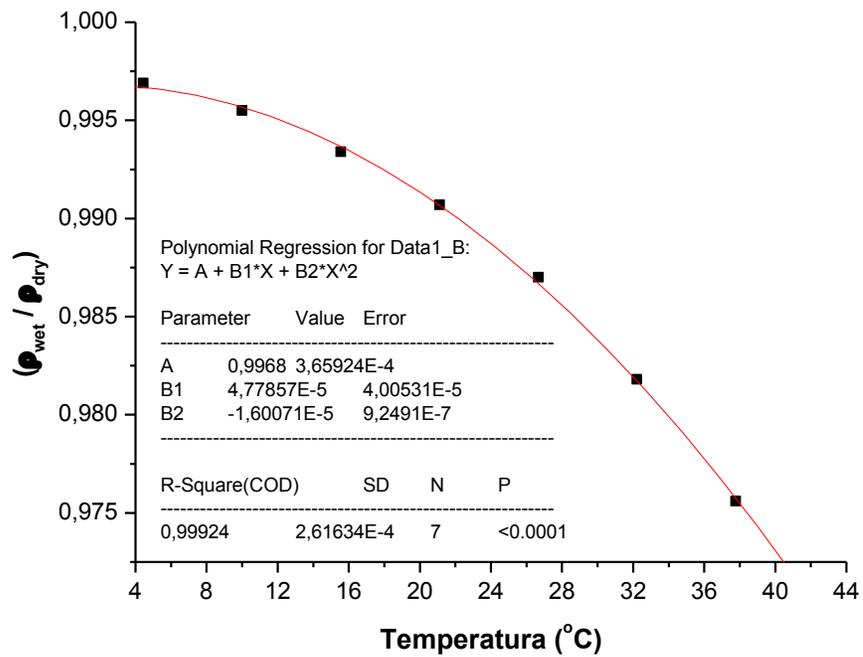


Figura 4.29 – Gráfico do fator de correção da umidade do ar para umidade relativa de 100%.

Para a entrada do separador também foi construído um gráfico da razão  $(\rho_{wet} / \rho_{dry})$  em função da temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ , só que agora para umidade relativa de 20%, como mostra o gráfico da Figura 4.30.

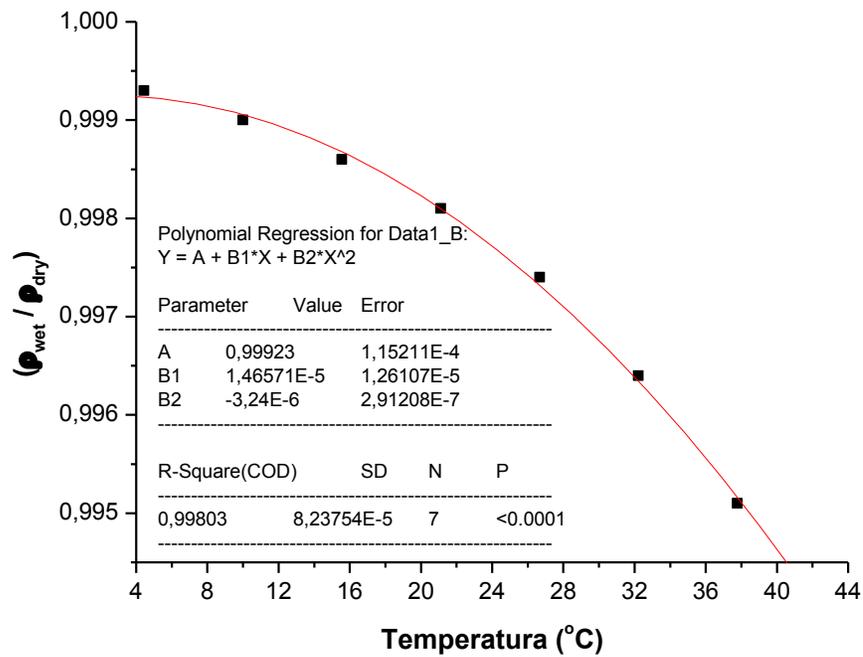


Figura 4.30 – Gráfico do fator de correção da umidade do ar para umidade relativa de 20%.

#### 4.6.2. Fabricação do sistema de injeção de ar

Para injetar ar na Câmara de Expansão, foi fabricado no Laboratório Kelsen Valente Serra (LABPETRO) um difusor de ar. Primeiramente foi fabricado uma flange com um prolongamento, onde em sua extremidade interna foram colocados dois anéis o-ring para o encaixe e vedação de um tubo de acrílico utilizado para visualização do escoamento e em sua lateral foram feitos quatro furos para fixar os bicos injetores (Figura 4.31).

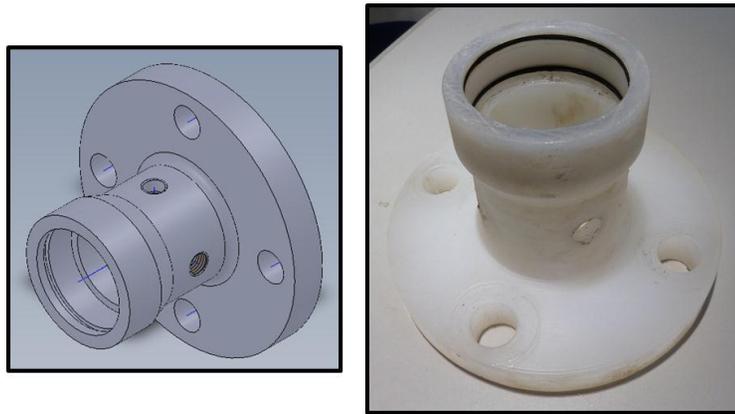


Figura 4.31 – Esquema e foto do corpo do difusor de ar fabricado no LABPETRO.

Os bicos injetores foram fabricados em latão e possuem três fileiras verticais com cinco furos cada de 0,5 mm de diâmetro. A Figura 4.32 mostra a foto de um bico injetor.



Figura 4.32 – Foto do bico injetor.

Esses bicos são instalados no corpo do difusor de forma que essas três fileiras de furos fiquem na mesma direção e sentido do escoamento do líquido. Os bicos são interligados entre eles por mangueiras e conectores finalizando o processo de fabricação do equipamento, como mostra a Figura 4.33.

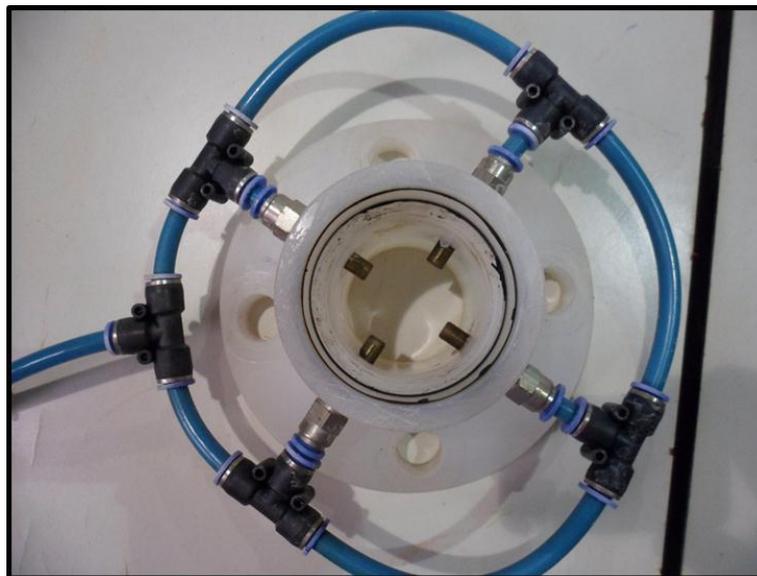


Figura 4.33 – Foto frontal do difusor de ar finalizado.

Esse difusor de ar foi fabricado com o objetivo de homogeneizar a mistura. A Figura 4.34 mostra o difusor de ar completo em funcionamento.



Figura 4.34 – Foto do difusor de ar completo e em funcionamento.



## 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizados ensaios experimentais com o objetivo de determinar a eficiência de separação da Câmara de Expansão operando em diferentes condições.

O valor da vazão volumétrica de líquido (água ou glicerina) na entrada do hidrociclone foi obtido com a variação da frequência da bomba de entrada, controlada utilizando o Supervisório Elipse SCADA.

Para obter os valores de vazão volumétrica de gás (ar) entrada/saída foi utilizado o Supervisório LabVIEW<sup>®</sup>. A vazão de entrada de ar é regulada através de uma válvula agulha instalada antes dos medidores (Figura 4.26).

Foram realizados testes preliminares para determinar quais valores de vazão volumétrica de água na entrada do separador seriam utilizadas. Verificou-se que para que o escoamento do fluido preenchesse todo o tubo do bocal de entrada de 2" de diâmetro, a vazão volumétrica tinha que ser igual a 4,57 m<sup>3</sup>/h (ou frequência da bomba igual a 9,92 Hz). Assim foram determinados seis valores para vazão volumétrica de entrada de líquido partindo de 4,5 m<sup>3</sup>/h até 12 m<sup>3</sup>/h, em intervalos de 1,5 m<sup>3</sup>/h, respeitando o limite do medidor de vazão volumétrica de líquido com valor máximo de 12,8 m<sup>3</sup>/h.

Também para a vazão volumétrica de ar, foram determinados cinco valores partindo de 2,5 m<sup>3</sup>/h até 8,0 m<sup>3</sup>/h, em intervalos de 1,5 m<sup>3</sup>/h, respeitando o *range* do medidor de diferencial de pressão que é de 0 a 8 bar.

Para estudar a eficiência de separação da Câmara de Expansão, variando a viscosidade do líquido, foi utilizada a glicerina em diferentes viscosidades (23 cP, 53 cP e 83 cP). A Tabela 5.1 mostra os valores de vazão volumétrica de ar e água/glicerina utilizados durante a obtenção dos resultados de eficiência de separação.

**Tabela 5.1 – Valores das vazões volumétricas de água e glicerina para cada valor de vazão volumétrica de ar.**

<b>Vazão Volumétrica (m<sup>3</sup>/h)</b>				
<b>Ar</b>	<b>Água</b>	<b>Glicerina (23 cP)</b>	<b>Glicerina (53 cP)</b>	<b>Glicerina (83 cP)</b>
2,5	4,5	4,5	4,5	4,5
	6,0	6,0	6,0	6,0
	7,5	7,5	7,5	7,5
	9,0	9,0	9,0	9,0
	10,5	10,5	10,5	-
	12,0	-	-	-
4,0	4,5	4,5	4,5	4,5
	6,0	6,0	6,0	6,0
	7,5	7,5	7,5	7,5
	9,0	9,0	9,0	9,0
	10,5	10,5	10,5	-
	12,0	-	-	-
5,5	4,5	4,5	4,5	4,5
	6,0	6,0	6,0	6,0
	7,5	7,5	7,5	7,5
	9,0	9,0	9,0	9,0
	10,5	10,5	10,5	-
	12,0	-	-	-
7,0	4,5	4,5	4,5	4,5
	6,0	6,0	6,0	6,0
	7,5	7,5	7,5	7,5
	9,0	9,0	9,0	9,0
	10,5	10,5	10,5	-
	12,0	-	-	-
8,0	4,5	4,5	4,5	4,5
	6,0	6,0	6,0	6,0
	7,5	7,5	7,5	7,5
	9,0	9,0	9,0	9,0
	10,5	10,5	10,5	-
	12,0	-	-	-

As medidas foram realizadas, da forma que, para cada bocal de entrada (de 2” e 1”), variou-se o nível de líquido no fundo do separador, pois foi observado que o nível influenciava na

eficiência de separação. O valor da altura do nível é em relação ao centro do bocal de entrada da Câmara de Expansão e o primeiro nível foi definido logo abaixo do helicóide, como é mostrado na foto do fundo do separador na Figura 5.1. Como o protótipo do separador foi instalado na parte externa do laboratório o monitoramento do nível de líquido durante a realização das medidas era realizado através de uma *webcam* instalada em um tripé para que ficasse perpendicular com a parede do separador. O monitoramento era feito em tempo real, utilizando o computador dentro do laboratório.



Figura 5.1 – Foto do fundo da Câmara de Expansão com os diferentes níveis de líquido estudado.

A Figura 5.2 mostra um esquema do procedimento experimental. O procedimento experimental para os testes de eficiência de separação com glicerina, medição do ângulo de inclinação e medição da altura de elevação do filme de líquido na parede do separador será descrito na seção 5.1, seção 5.2 e na seção 5.3, respectivamente deste capítulo.

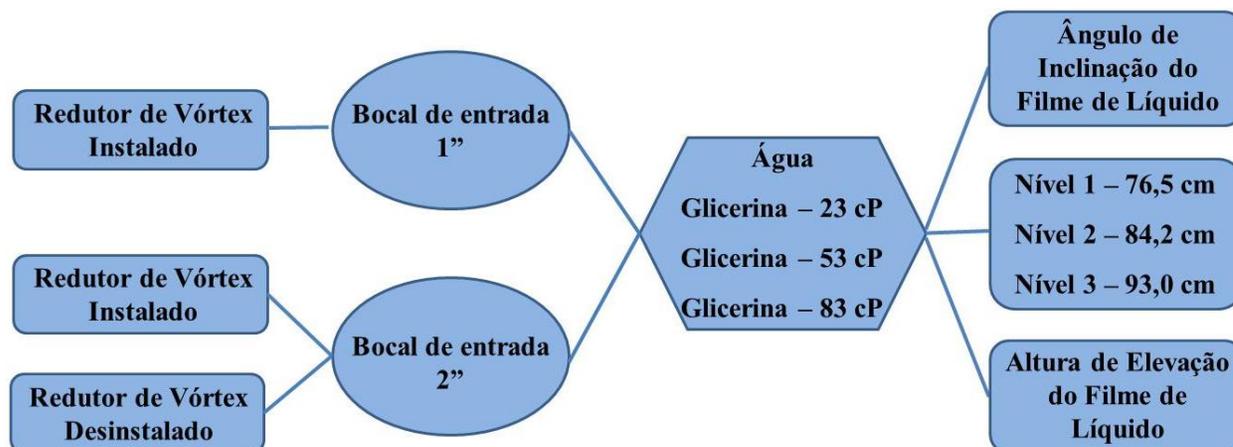


Figura 5.2 – Esquema do procedimento experimental utilizado.

Uma mesma rotina experimental foi seguida para todos os testes realizados. Os testes foram realizados utilizando dois computadores cada um com um supervisor. Vale ressaltar que cada teste foi realizado em 1 dia, pois não era possível terminar dois testes no mesmo dia. Esse cuidado é importante, pois como o separador está instalado na parte externa do laboratório, não era desejado a influência das condições do tempo, principalmente em testes que usavam glicerina para diferentes viscosidades.

O procedimento experimental adotado para os testes está descrito abaixo.

- Passo 1: ligar os computadores e o painel elétrico do circuito. Conectar no computador com o Supervisor LabVIEW<sup>®</sup> o cabo usb do chassi NI já com os módulos de aquisição de dados devidamente instalados. Verificar se as válvulas de saída de líquido, saída de ar e as válvulas de entrada de líquido estão abertas. Verificar o nível de líquido do tanque de armazenamento de água ou glicerina.
- Passo 2: com a válvula de entrada de ar fechada, colocar a pressão da linha do compressor com uma pressão de 7 bar.
- Passo 3: acionar a bomba de entrada de líquido para obter a vazão desejada. Logo que a Câmara de Expansão começa a encher, abre-se a válvula agulha de entrada de ar, para que o fluxo de líquido não entre na linha de entrada de ar, enchendo os medidores de elemento de escoamento laminar de entrada, através dos bicos injetores instalados no difusor de ar.
- Passo 4: acionar a bomba de saída de líquido, para manter e estabilizar o nível desejado no fundo da Câmara de Expansão.
- Passo 5: definir a vazão de ar, a vazão de líquido na entrada e o nível de líquido a ser medido e esperar de 10 a 15 minutos para que a Câmara de Expansão se estabilize.
- Passo 6: quando a eficiência de separação, vazão de ar, vazão de líquido na entrada e o nível de líquido estiverem estabilizados aperta-se o botão gravar do Supervisor LabVIEW. A vazão de líquido na entrada e a temperatura do líquido no fundo do hidrociclone são anotadas.

- Passo 7: repetir os passos 5 e 6 para os outros valores de vazão de ar e líquido mostrados na Tabela 5.1.

### 5.1. Procedimento experimental para testes com glicerina

Além dos testes de eficiência de separação da Câmara de Expansão com água e ar, foram realizados testes para diferentes viscosidades de líquido, utilizando a glicerina em diferentes viscosidades: 83 cP, 53 cP e 23 cP.

O procedimento experimental nos testes com glicerina foi o mesmo que o utilizado nos teste com água. A glicerina bi-destilada comprada é da fabricante ALMAD e suas características originais são mostradas na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 – Dados das características da glicerina bi destilada fornecidos pelo fabricante.**

Análises	Métodos	Unidade	Níveis de Garantia	Resultado
Áspects 25 °C	Visual	Visual	Liq. Visc. Transparente	Liq. Visc. Transparente
Glicerol	IAQB – 410	%	99,50 min	99,74
Densidade	IAQB – 400	25 °C	-	1,2599
Cor	IAQB – 300	Apha	10 Max	5,0
Cloretos		mg NaCl/kg	10 Max	5,0
Ácidos Graxos e Ésteres	IAQB – 390	ppm	0,1% Max	0,01
Odor	Organoléptico		Leve, Caract.	Característico
Umidade			Max 0,50 %	0,20
pH			5,0 – 7,5	6,09

Foi realizado um estudo reológico da glicerina com o objetivo de determinar a sua viscosidade e a viscosidade em função do decaimento da temperatura. O equipamento utilizado para essa análise reológica foi um Reômetro Mars III, fornecido pela PreciLabo. A geometria utilizada no reômetro foi a de cone/placa. O cone utilizado (sensor) foi o 60/1° Ti L onde os números representam o diâmetro e o ângulo do cone, respectivamente. A placa apresenta um diâmetro igual a do cone e ambos são confeccionados em titânio. A quantidade de amostra que foi utilizada para realizar as análises utilizando esse sensor foi de 1 ml aproximadamente para que o líquido preenchesse por completo o espaço entre o cone e a placa que é de 0,052 mm. A Figura 5.3 mostra uma foto do reômetro e o esquema da geometria cone/placa utilizada.

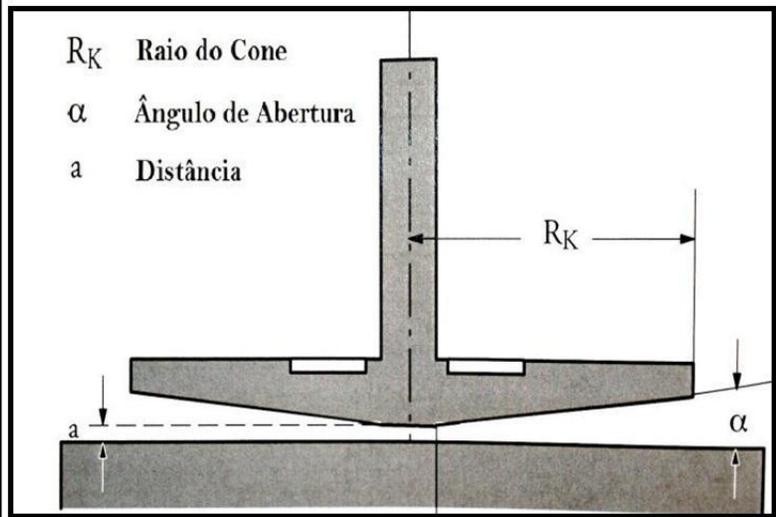
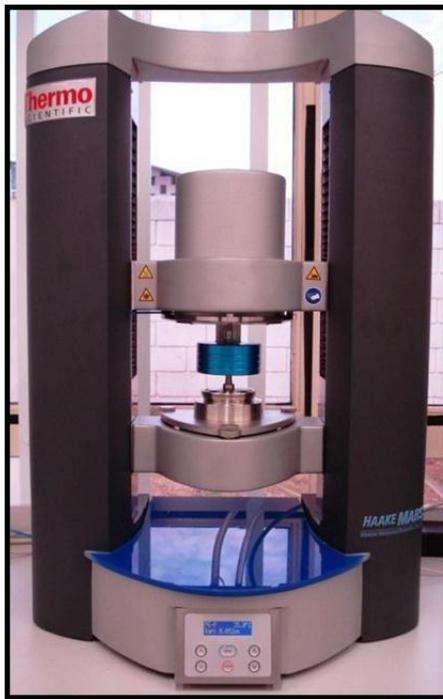


Figura 5.3 – Foto do Reômetro Mars III e esquema da geometria cone/placa utilizada nas análises reológicas da glicerina.

Sabendo que a glicerina é um fluido newtoniano, podemos utilizar a definição da viscosidade dinâmica ou absoluta, para determinar sua viscosidade. O fluido newtoniano apresenta uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, mostrada na Equação (5.1).

$$\tau = \mu_G \cdot \frac{dv}{dy} \quad (5.1)$$

onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento,  $\mu_G$  é a viscosidade dinâmica da glicerina e  $dv/dy$  é a taxa de deformação.

A glicerina foi diluída utilizando água para obter a viscosidade desejada para cada teste. A Figura 5.4, Figura 5.5 e a Figura 5.6 mostram o gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação onde foi feito um ajuste linear para determinar a viscosidade de 83 cP, 53 cP e 23 cP respectivamente, na temperatura ambiente de 25 °C. Pode-se observar que a mistura glicerina e água também se comporta como um fluido newtoniano.

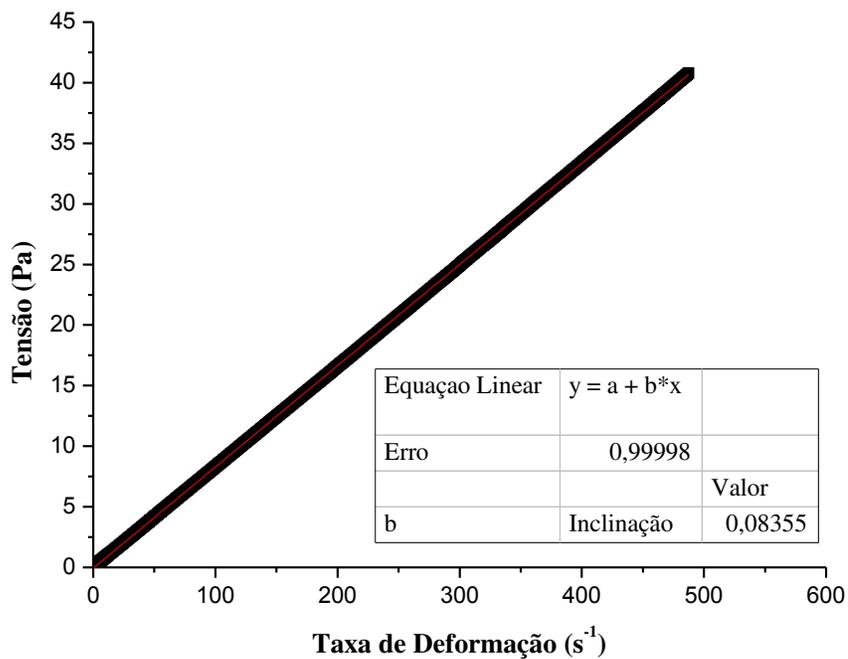


Figura 5.4 – Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para viscosidade de 83 cP, a 25 °C.

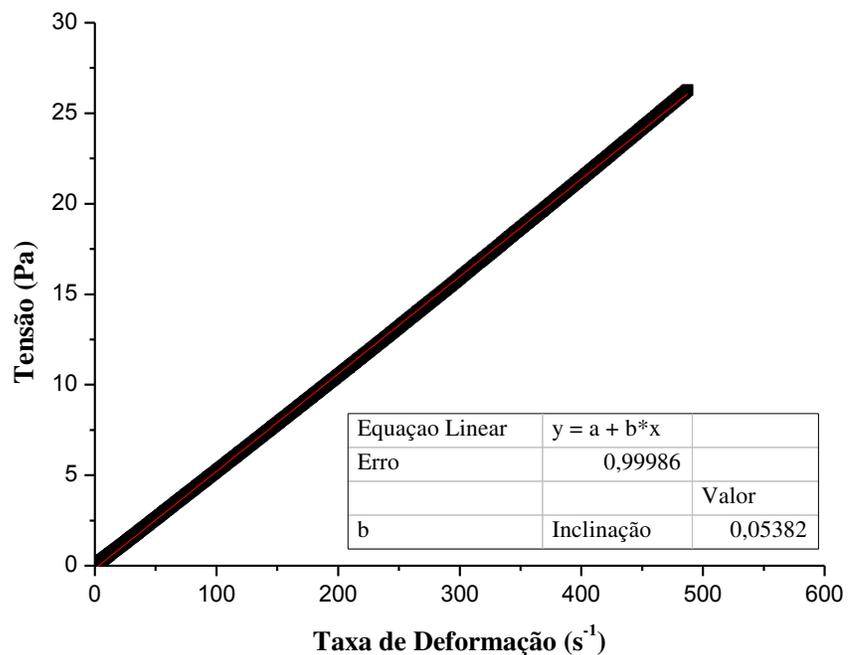


Figura 5.5 – Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para viscosidade de 53 cP, a 25 °C.

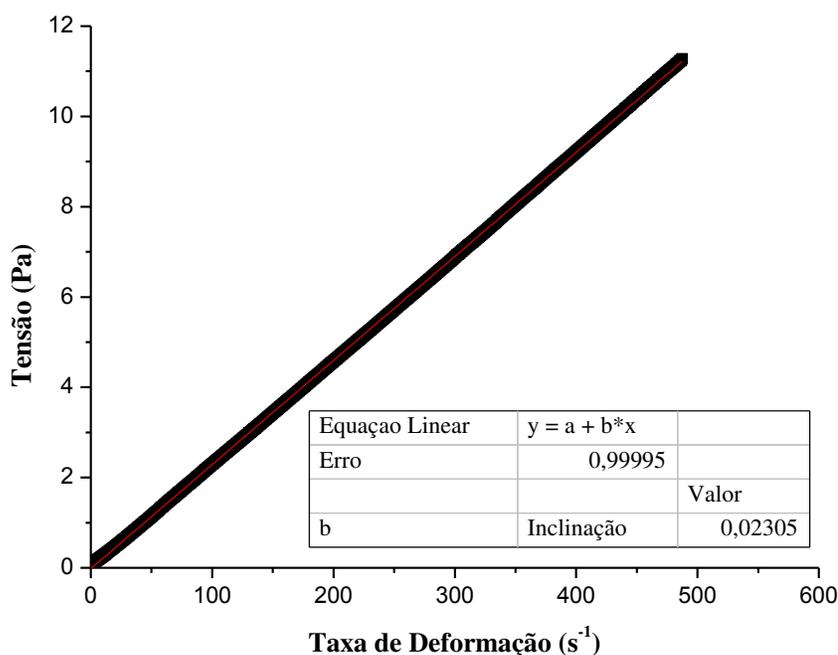


Figura 5.6 – Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para viscosidade de 23 cP, a 25 °C.

Vale ressaltar que as viscosidades selecionadas sempre foram conferidas no reômetro antes de realizar cada teste de eficiência de separação.

Como dito anteriormente, que o protótipo está instalado na área externa do laboratório, onde este é afetado pelas condições do tempo, ou seja, a temperatura no interior da “Câmara de Expansão” está sempre variando ao longo do dia. Sendo assim foi feito um estudo reológico da viscosidade da glicerina em função da temperatura, possibilitando saber a viscosidade correta para determinado ponto experimental. A rampa de temperatura para as viscosidades de 83 cP, 53 cP e 23 cP são mostradas na Figura 5.7, Figura 5.8 e na Figura 5.9, respectivamente.

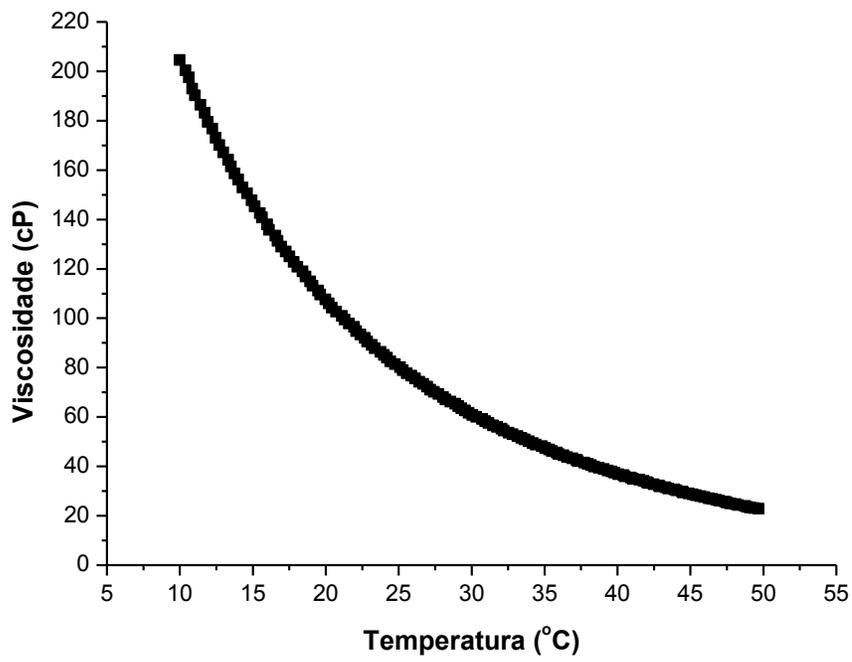


Figura 5.7 – Gráfico de rampa de temperatura para viscosidade da glicerina de 83 cP (25 °C).

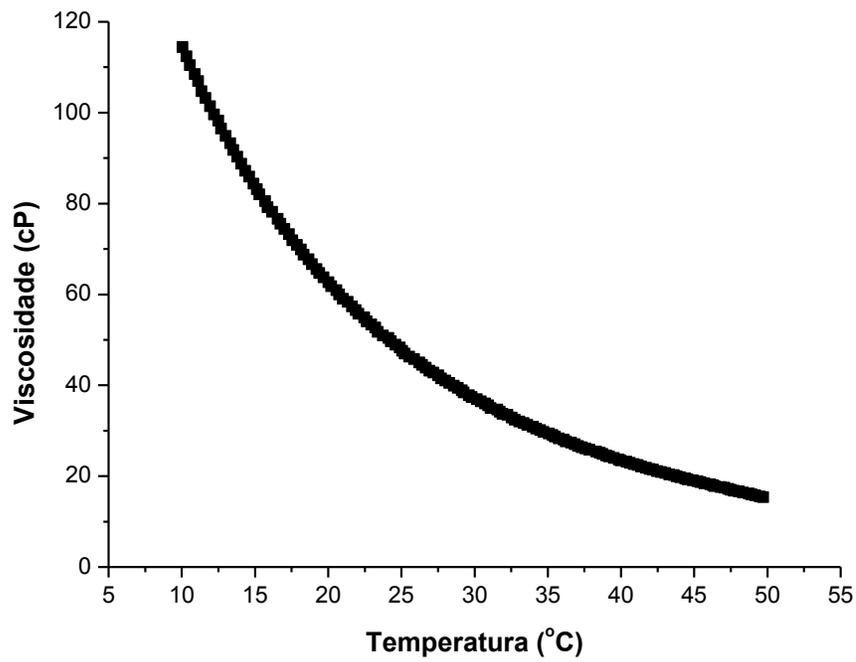


Figura 5.8 – Gráfico de rampa de temperatura para viscosidade da glicerina de 53 cP (25 °C).

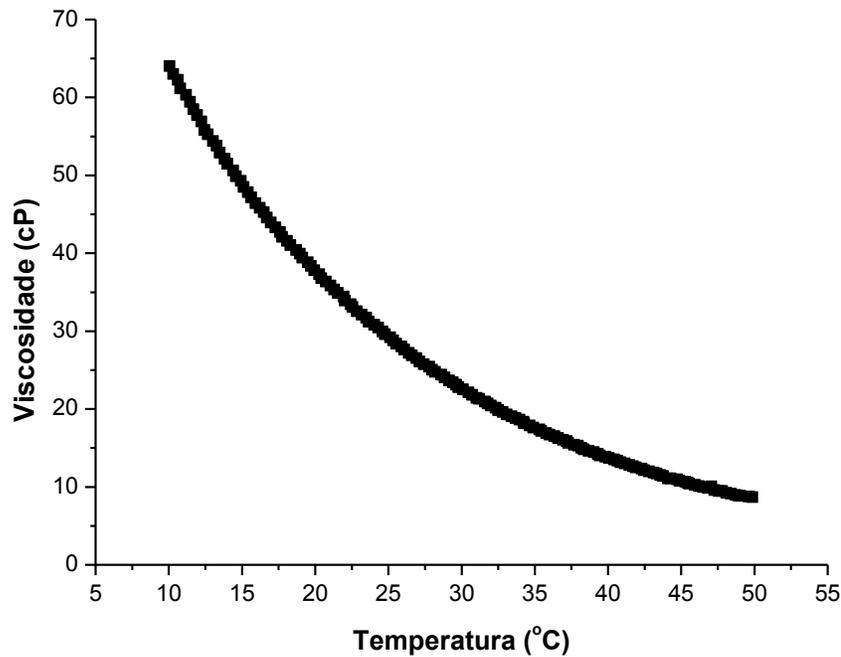


Figura 5.9 – Gráfico de rampa de temperatura para viscosidade da glicerina de 23 cP (25 °C).

## 5.2. Procedimento experimental para ângulo de inclinação do filme de líquido

As medidas do ângulo de inclinação do filme de líquido na parede da Câmara de Expansão foram obtidas durante a realização dos testes, através de três transferidores instalados do lado externo da parede oposta ao bocal de entrada do protótipo do separador. As medidas dos ângulos das linhas de corrente foram tomadas com o eixo horizontal. No APÊNDICE B pode-se encontrar a precisão das medidas dos ângulos. A posição dos transferidores instalados na parede do separador foi definida da seguinte maneira:

- ✓ Um pouco antes do helicóide, para determinar o ângulo que o filme chega ao helicóide, para diferentes condições de operação;
- ✓ Na mesma altura do centro do bocal de entrada do separador;
- ✓ Posição entre os outros transferidores.

A Figura 5.10 mostra a disposição dos transferidores instalados na parede da Câmara de Expansão.



Figura 5.10 – Foto dos transferidores instalados na parede do separador durante seu funcionamento.

Apesar de existirem três transferidores instalados, apenas os valores experimentais obtidos no último transferidor, contando de cima para baixo, foram utilizados. Pois para os outros não foi possível obter uma maior precisão na medida, tanto para o bocal de 2” quanto para o bocal de 1” de diâmetro, instalados na entrada do separador durante seu funcionamento.

### **5.3. Procedimento experimental para altura de elevação do filme de líquido**

As medidas da altura de elevação do filme de líquido na parede da Câmara de Expansão foram realizadas também durante os testes, através de uma régua transparente instalada no canto direito da parede externa oposta do bocal de entrada do separador. O valor da altura de elevação é obtido a partir do centro do bocal de entrada do separador, como mostra o esquema da Figura 5.11.

A precisão das medidas de altura de elevação do filme de líquido na parede do separador se encontra no APÊNDICE B.

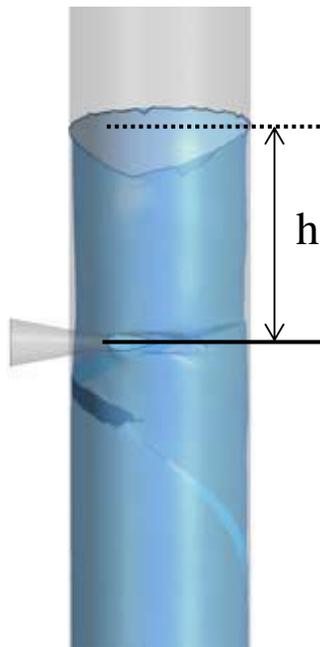


Figura 5.11 – Esquema do método utilizado para determinar a altura de elevação do filme de líquido na parede do separador (Adaptado, OFUCHI *et al.* 2012).

A Figura 5.12 mostra a foto da régua instalada para realizar a medida.

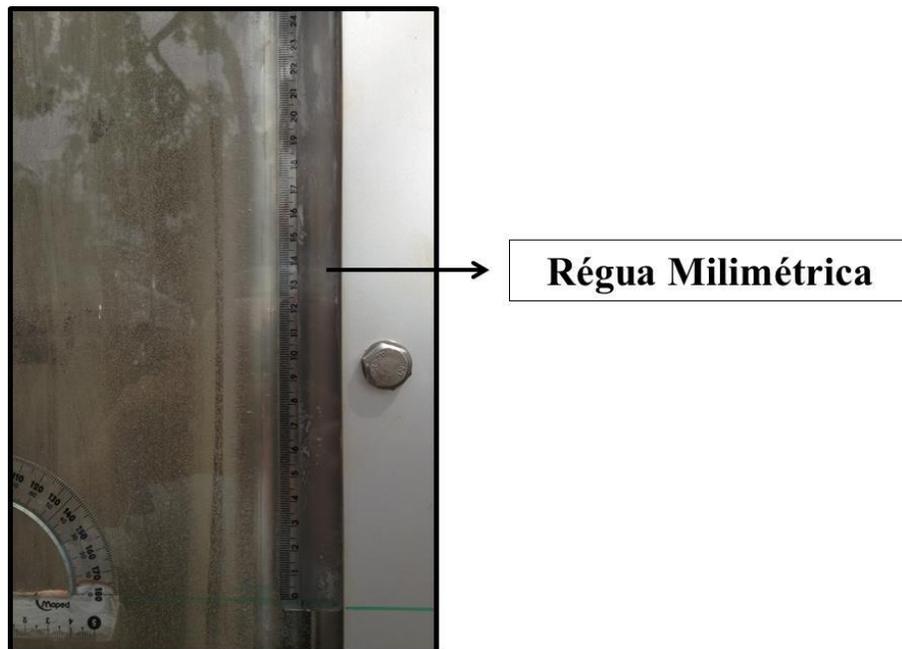


Figura 5.12 – Foto da régua milimétrica instalada para aferir a medida da altura de elevação do filme de líquido.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos para o teste de eficiência da Câmara de Expansão. São apresentados os resultados dos testes do separador, seguindo a metodologia descrita no Capítulo 5 e o esquema da Figura 5.2. As incertezas das medidas encontram-se no APÊNDICE B. As tabelas com os resultados experimentais se encontram no APÊNDICE C.

Com o objetivo de estruturar os resultados, organizou-se o capítulo da forma descrita a seguir. Primeiramente, são apresentados os resultados de eficiência de separação da mistura ar-água (com e sem o redutor de vórtice instalado). Os resultados da eficiência de separação, para a mistura ar-glicerina para as viscosidades de 83 cP, 53 cP e 23 cP são apresentados no APÊNDICE D. Em seguida são apresentados os resultados da eficiência de separação em relação ao padrão de escoamento, ao diâmetro do bocal de entrada, ao Nível de líquido e em relação a viscosidade. Depois são apresentados os resultados da espessura do filme de líquido, da altura de elevação do líquido e o ângulo de inclinação do filme de líquido na parede cilíndrica do separador. Por fim, são apresentados os resultados referentes aos parâmetros relevantes para a separação bifásica gás-líquido.

### 6.1. Resultados da eficiência de separação para mistura ar-água com/sem o redutor de vórtice

Os resultados de eficiência de separação que são aqui apresentados são gráficos da velocidade superficial do líquido em função da velocidade superficial do gás (gráficos do tipo matriz), ambos com unidade em [m/s]. A velocidade superficial do gás foi calculada utilizando a pressão e temperatura do gás no bocal de entrada do separador. Em cada ponto experimental do gráfico é mostrado o valor da porcentagem da eficiência de separação (em vermelho) da Câmara de Expansão. Os dados também foram obtidos para três diferentes níveis de líquido (Figura 5.1), dois diâmetros de bocal diferentes e para fluidos diferentes, seguindo o esquema da Figura 5.2.

Os resultados da eficiência de separação quando o separador estava em operação com bocal de 2” de diâmetro e sem o redutor de vórtice são mostrados nos gráficos do tipo matriz apresentados na Figura 6.1 para diferentes níveis de líquido (Nível 1 e Nível 2). Vale ressaltar

que não se conseguiu obter resultados da eficiência de separação para o Nível 3 quando o redutor de vórtice não estava instalado, pois não foi possível manter o nível de líquido constante devido a grande quantidade de ar que escapava pela saída de líquido diminuindo a eficiência da bomba de saída.

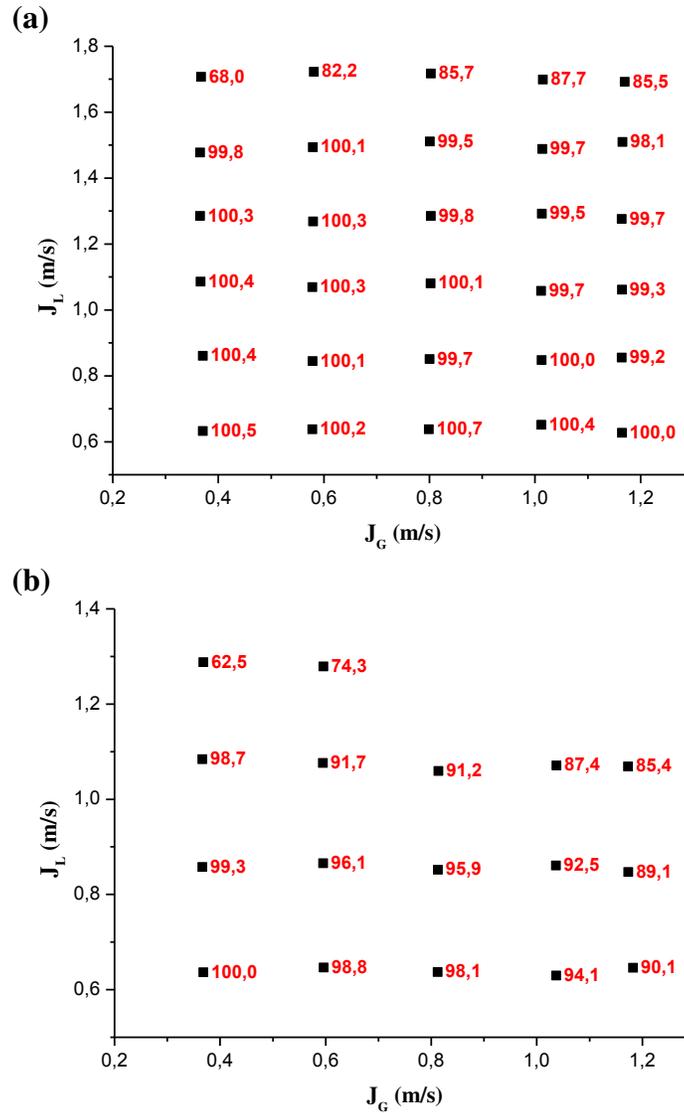


Figura 6.1 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação (bocal 2”), sem o redutor de vórtice, para: (a) Nível 1; (b) Nível 2. Incerteza da eficiência  $u_\eta = 2,7\%$ .

Já na Figura 6.2 são apresentados os gráficos do tipo matriz da eficiência de separação, para os três diferentes níveis de líquido, obtido durante o funcionamento do separador com o redutor de vórtice instalado.

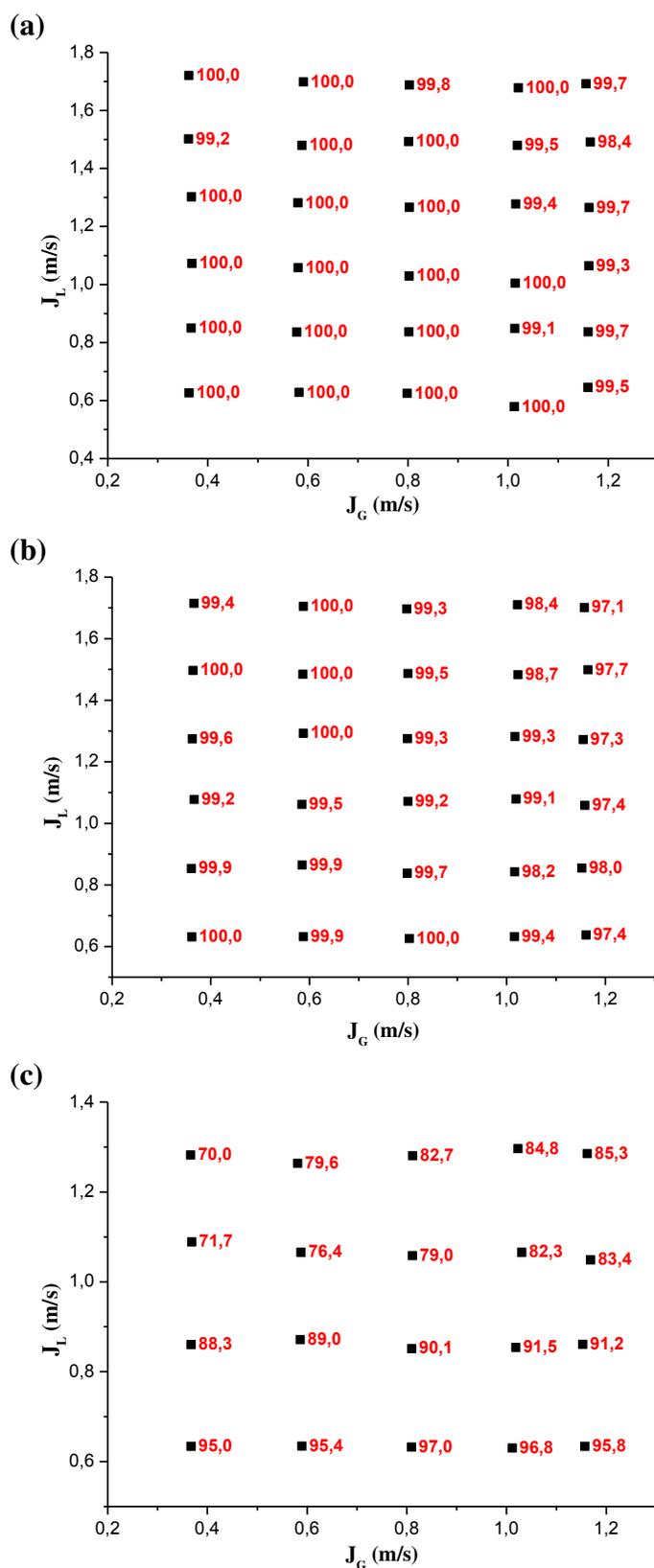


Figura 6.2 – Gráficos do tipo matriz da eficiência de separação (Bocal 2'') para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência  $u_\eta = 2,7\%$ .

A partir dos gráficos da Figura 6.1 e da Figura 6.2 observa-se que a eficiência de separação diminui consideravelmente quando o separador é operado sem o redutor de vórtice. Considerando um valor fixo de  $8 \text{ m}^3/\text{h}$  para a vazão volumétrica de gás na entrada do separador e bocal de 2" de diâmetro, a Figura 6.3 mostra uma comparação entre a eficiência de separação com e sem o redutor de vórtice instalado no separador, para dois níveis de líquido.

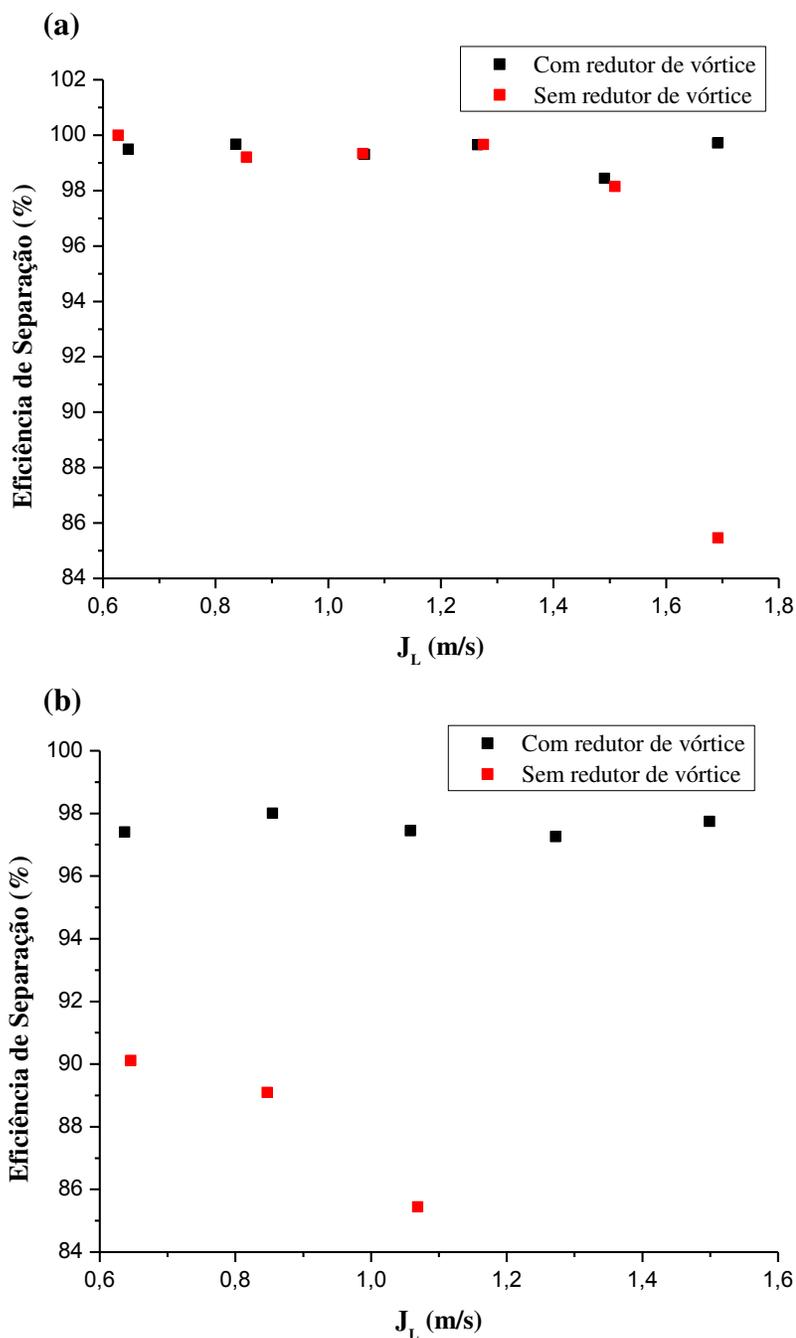


Figura 6.3 – Comparação da eficiência de separação com e sem o redutor de vórtice com  $Q_G = 8 \text{ m}^3/\text{h}$  para: (a) Nível 1; (b) Nível 2.

Analisando a Figura 6.3 (a) pode-se dizer que não houve alteração na eficiência de separação para baixos valores da velocidade superficial do gás e do líquido quando o separador foi operado no Nível 1 de líquido, com ou sem o redutor de vórtice. Porém para valores altos da velocidade superficial do gás e do líquido houve uma queda na eficiência quando operado sem o redutor de vórtice mesmo com o líquido no Nível 1.

Já na Figura 6.3 (b) percebe-se uma redução considerável na eficiência de separação quando a Câmara de Expansão é operada no Nível 2 e sem o redutor de vórtice, principalmente para maiores valores da velocidade superficial do gás e do líquido.

Portanto a partir desse ponto, todos os resultados que serão apresentados nesse trabalho, foram obtidos com o separador operando com o redutor de vórtice instalado na sua parte inferior.

Os resultados da eficiência de separação para a mistura ar-água e bocal de 1” de diâmetro são mostrados na Figura 6.4, onde são apresentados os gráficos do tipo matriz com o valor da eficiência de separação em cada ponto experimental para diferentes níveis de líquido.

Comparando e analisando todos os gráficos dos resultados obtidos para a mistura ar-água, tanto para o bocal de 2” (Figura 6.2) e bocal de 1” (Figura 6.4) de diâmetro, é possível observar um comportamento padrão do valor da eficiência de separação, pois quando aumenta-se a velocidade superficial do gás e a velocidade superficial do líquido a eficiência da Câmara de Expansão diminui. No trabalho de Gomez *et al.* (1999) foi apresentado, que as altas velocidades tangenciais (mistura gás-líquido) causam bolhas de gás que são arrastadas para a fase líquida e pode ser transportada para baixo através do escoamento de líquido. Isso pode ocorrer quando se tem alta vazão de gás e/ou líquido. De acordo com o estudo de Hoffman e Stein (2002) as velocidades na entrada do ciclone variam de 15 a 18 m/s para ciclones muito carregados e velocidades de 23 a 26 m/s para ciclones não muito carregados. Entretanto, dependendo da sua aplicação, ciclones podem operar relativamente bem com velocidades de entrada tão baixas quanto 5 m/s.

Também é observado que o menor valor da eficiência de separação ocorre quando o separador é operado com a mistura ar-água e com o bocal de 1” para o Nível 3 de líquido. Isso ocorre pelo fato de que a velocidade superficial do gás e do líquido são maiores com o Bocal de 1”, fazendo com que haja a formação de um vórtice maior do que quando operado com o bocal de 2”, carregando maior quantidade de gás para a bomba de saída de líquido.

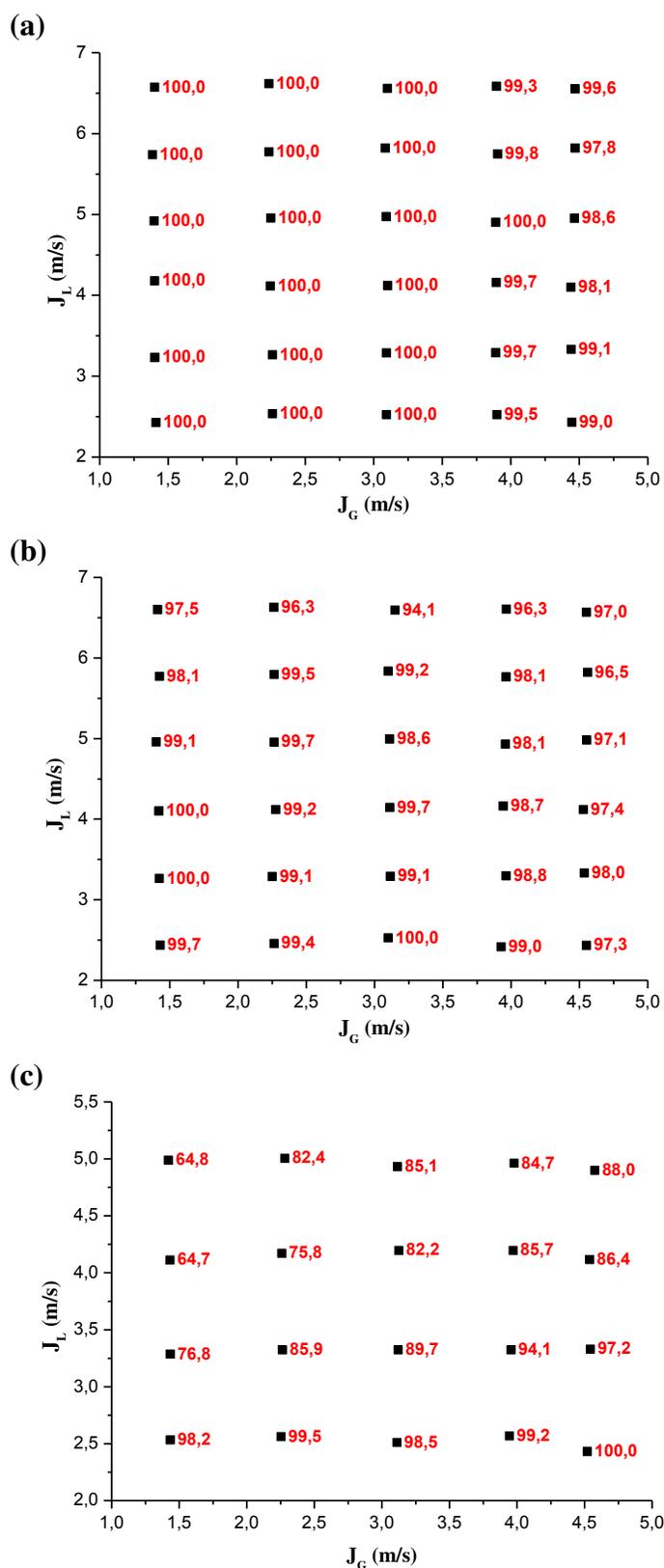


Figura 6.4 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação (bocal 1”) para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência  $u_\eta = 2,7\%$ .

Além dos resultados apresentados acima para a mistura ar-água, também foram realizados testes de eficiência de separação para a mistura ar-glicerina para diferentes viscosidades (83 cP, 53 cP e 23 cP), bocal de entrada de 2” e 1” de diâmetro e para diferentes níveis de líquido, com o redutor de vórtice instalado. Os gráficos são apresentados no APÊNDICE D deste trabalho. Os resultados da eficiência para essa mistura também apresentaram o mesmo comportamento da mistura ar-água, ou seja, a eficiência diminui para maiores valores da velocidade superficial do gás e do líquido.

## 6.2. Eficiência de separação em relação ao padrão de escoamento em tubo horizontal

Para visualizar o padrão de escoamento para diferentes misturas foi feito um gráfico, apresentado na Figura 6.5, que compara o mapa do padrão de escoamento para a mistura ar-água e para a mistura ar-glicerina com as viscosidades de 83 cP, 53 cP e 23 cP. Essa comparação foi feita utilizando o mapa de padrão de escoamento para tubo horizontal proposto por Mandhane, 1973, em termos das velocidades superficiais do gás ( $J_G$ ) e do líquido ( $J_L$ ), com suas coordenadas em escalas logarítmicas. Para a mistura ar-água foi utilizado os dados da Tabela 3.1. Já para a mistura ar-glicerina foram feitas as correções necessárias para cada viscosidade, aplicando os dados fornecidos na Tabela 6.1, nas Equações (3.5) e (3.6). Na Tabela 6.1 são apresentados os valores dos parâmetros utilizados no sistema ar-água e ar-glicerina.

**Tabela 6.1 – Valores dos parâmetros usados como critério para o sistema ar-água e ar-glicerina.**

Mistura									
Ar-água					Ar-glicerina				
$\rho_L$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_G$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu_L$ [cP]	$\mu_G$ [cP]	$\sigma_{\text{Água}}$ [mN/m]	$\rho_L$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_G$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu_L$ [cP]	$\mu_G$ [cP]	$\sigma_{\text{Glicerina}}$ [mN/m]
998	1,2	1	0,02	73	1259	1,2	83/53/23	0,02	63

Na Figura 6.5 pode-se perceber que há deslocamentos verticais das linhas horizontais dos limites dos padrões de escoamento do mapa, proposto por Mandhane (1973), quando se muda as propriedades físicas do líquido, nesse caso. Já as linhas verticais dos limites não apresentaram grandes variações, pois as propriedades físicas do gás (ar) foram mantidas iguais para as duas misturas.

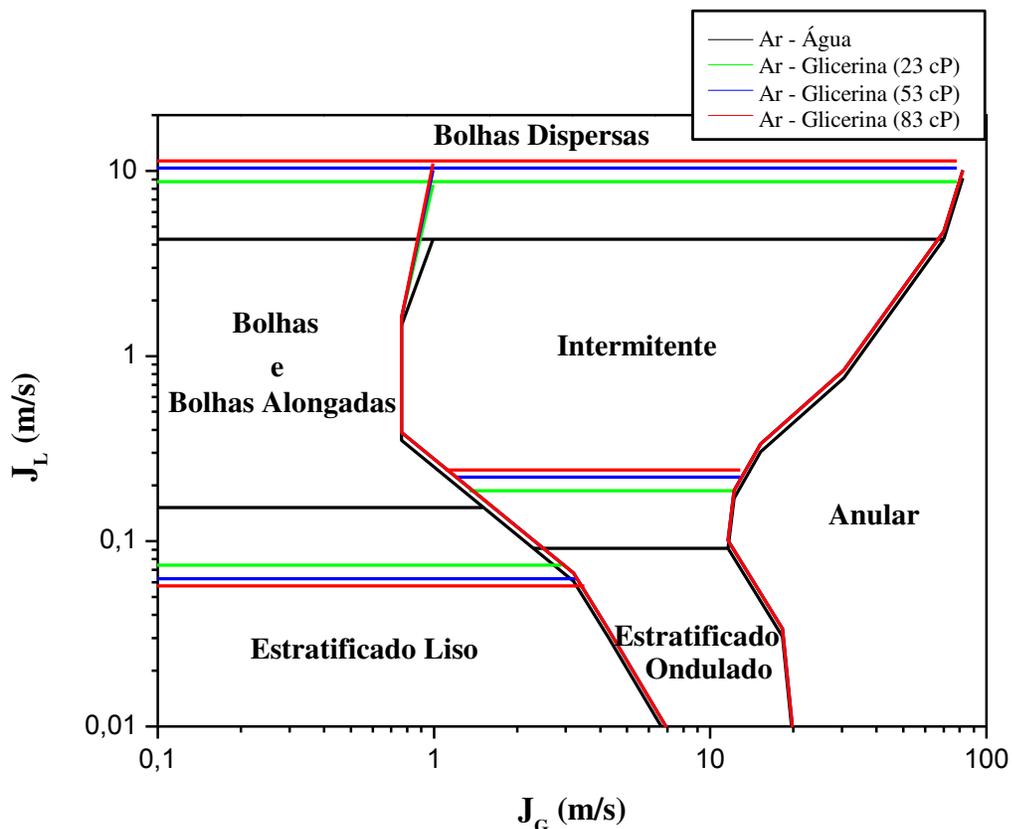


Figura 6.5 – Comparação dos mapas de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane (1973) para diferentes misturas.

Para identificar o padrão de escoamento para cada combinação de vazão aplicada aos fluidos usados foi possível construir o mapa de padrão de escoamento. Os pontos experimentais da matriz de teste, todos para o Nível 1 de líquido, foram aplicados no mapa de padrão de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane (1973). A Figura 6.6, mostra os pontos experimentais para a mistura ar-água e a Figura 6.7, Figura 6.8 e a Figura 6.9 mostram os pontos experimentais para a mistura ar-glicerina para as viscosidades de 83 cP, 53 cP e 23 cP, respectivamente. Como no gráfico anterior, os gráficos foram feitos em termos das velocidades superficiais do gás no bocal do separador ( $J_G$ ) e da velocidade superficial do líquido ( $J_L$ ), com suas coordenadas em escalas logarítmicas.

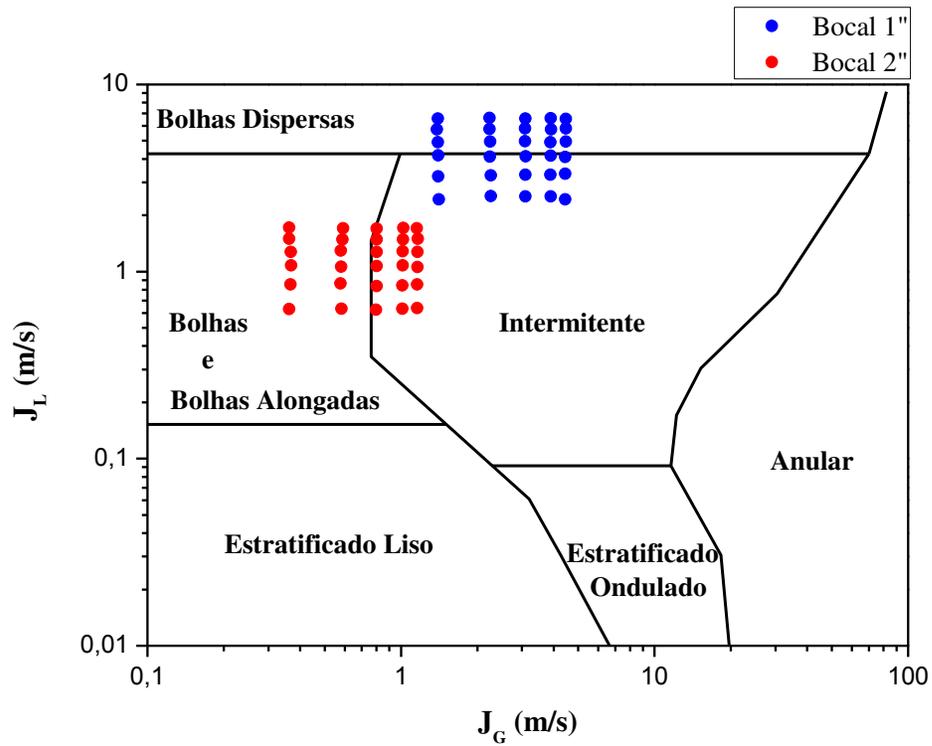


Figura 6.6 – Representação dos pontos experimentais para a mistura ar-água no mapa de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane (1973).

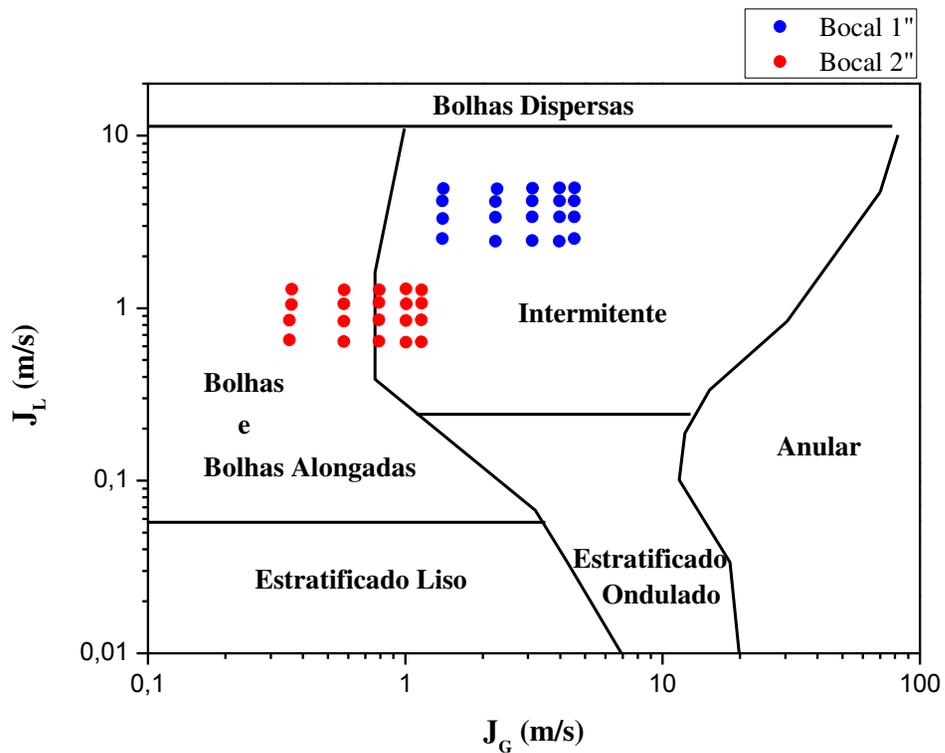


Figura 6.7 – Representação dos pontos experimentais para a mistura ar-glicerina (83 cP) no mapa de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane (1973).

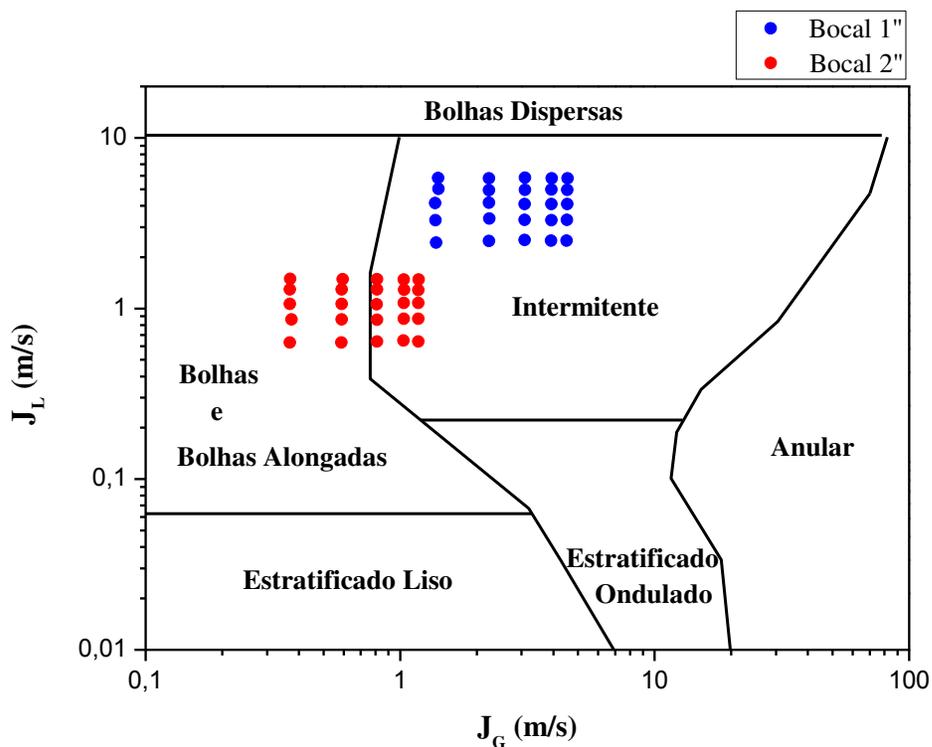


Figura 6.8 – Representação dos pontos experimentais para a mistura ar-glicerina (53 cP) no mapa de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane (1973).

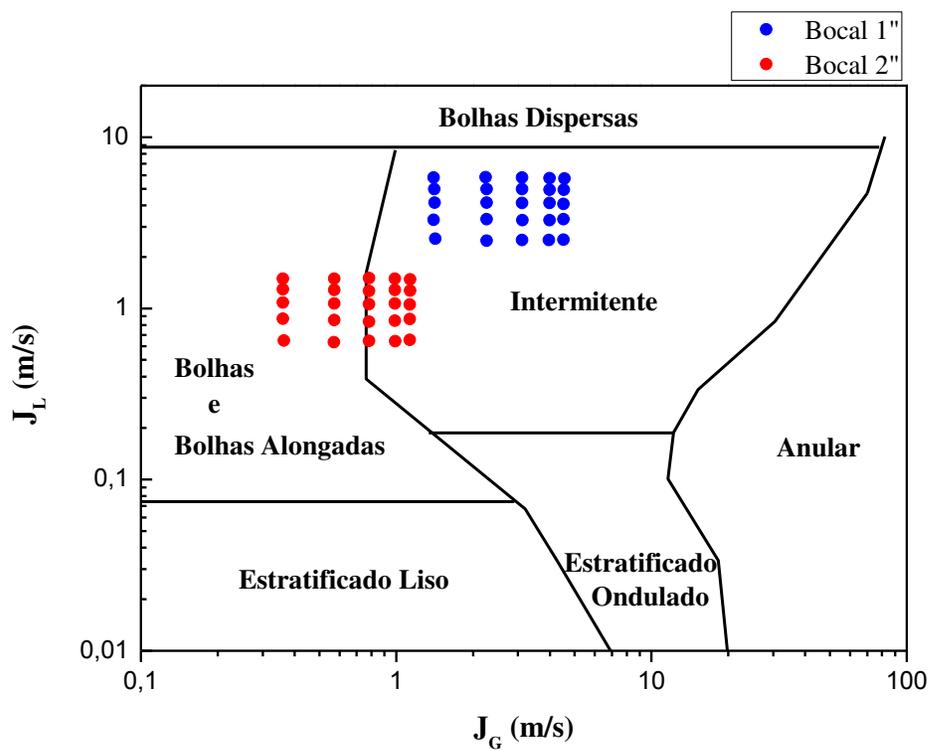


Figura 6.9 – Representação dos pontos experimentais para a mistura ar-glicerina (23 cP) no mapa de padrões de escoamento em tubo horizontal proposto por Mandhane (1973).

Analisando a Figura 6.6 a Figura 6.9 temos que o padrão de escoamento dos pontos experimentais obtidos com o bocal de 1” para a mistura ar-glicerina foi apenas o padrão intermitente e para a mistura ar-água foi uma parte em bolhas dispersas e a outra parte no padrão intermitente. Já para os pontos experimentais obtidos com o bocal de 2” o padrão de escoamento tanto para a mistura ar-água e a mistura ar-glicerina foi uma parte no padrão de bolhas alongadas e a outra parte foi no padrão intermitente.

O gráfico da Figura 6.10 apresenta a média da eficiência de separação dos pontos experimentais obtidos para o bocal de 1” e 2” no Nível 1 de líquido em relação ao padrão de escoamento, para a mistura ar-água e ar-glicerina em diferentes viscosidades (83 cP, 53 cP e 23 cP). Pode-se dizer que para esse nível de líquido houve influência do padrão de escoamento na eficiência de separação da Câmara de Expansão, principalmente para fluidos viscosos.

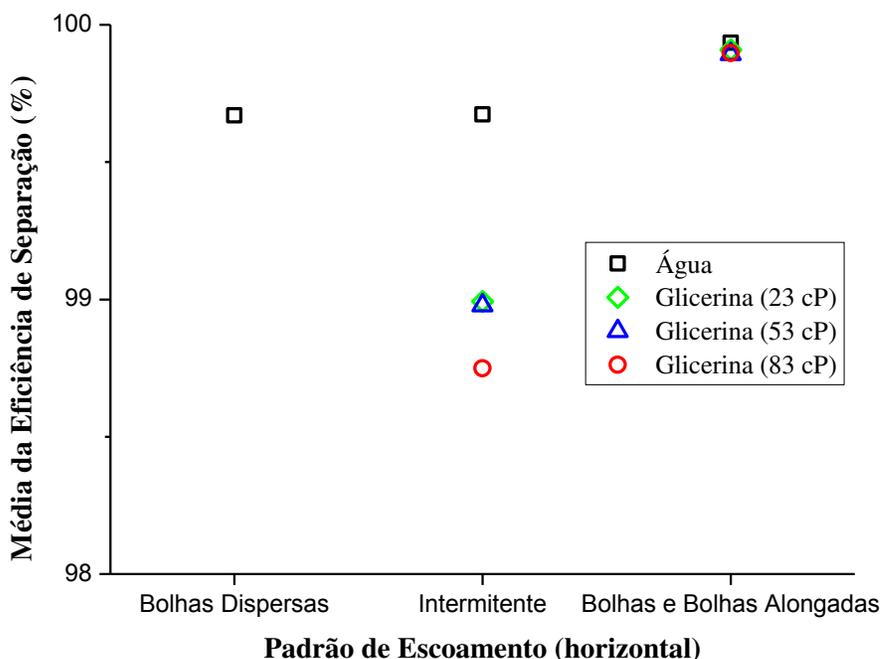


Figura 6.10 – Média da eficiência de separação em relação ao padrão de escoamento para diferentes misturas.

### 6.3. Eficiência de separação em relação ao diâmetro do bocal de entrada

Para observar se existe algum efeito relacionado com o diâmetro do bocal de entrada do separador com sua eficiência de separação, foi realizado um estudo utilizando a média aritmética da eficiência, para cada bocal em diferentes níveis de líquido.

A Figura 6.11, apresenta um gráfico da média da eficiência de separação e o desvio padrão, de cada ponto experimental, em função do nível de líquido para o bocal de entrada do separador de 2" e 1", para a mistura ar-água.

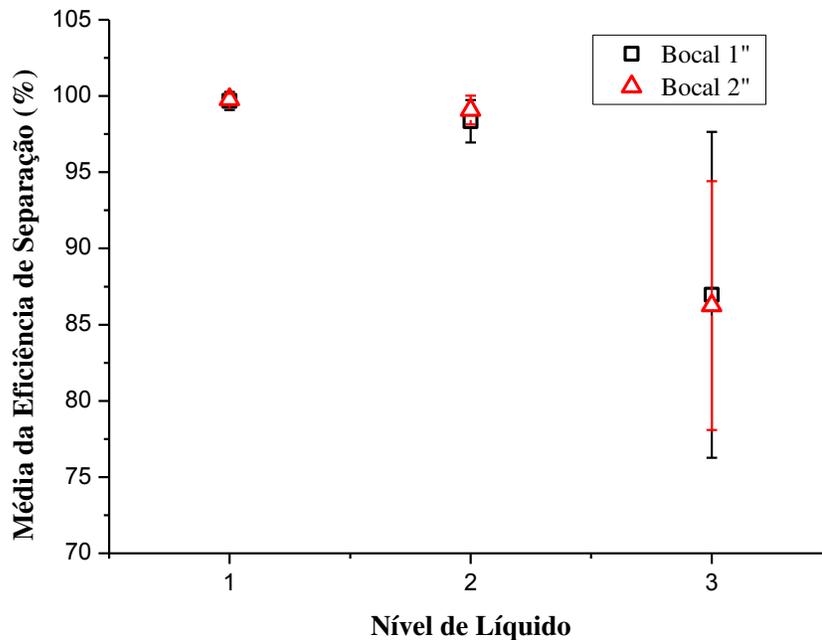


Figura 6.11 – Média da eficiência em função do nível para o bocal de 2" e 1" e mistura ar-água.

Também foram feitos gráficos da média da eficiência de separação e o desvio padrão em função do nível de líquido para diferentes diâmetros do bocal de entrada utilizando mistura ar-glicerina para as viscosidades de 83 cP, 53 cP e 23cP, apresentados na Figura 6.12, Figura 6.13 e Figura 6.14, respectivamente.

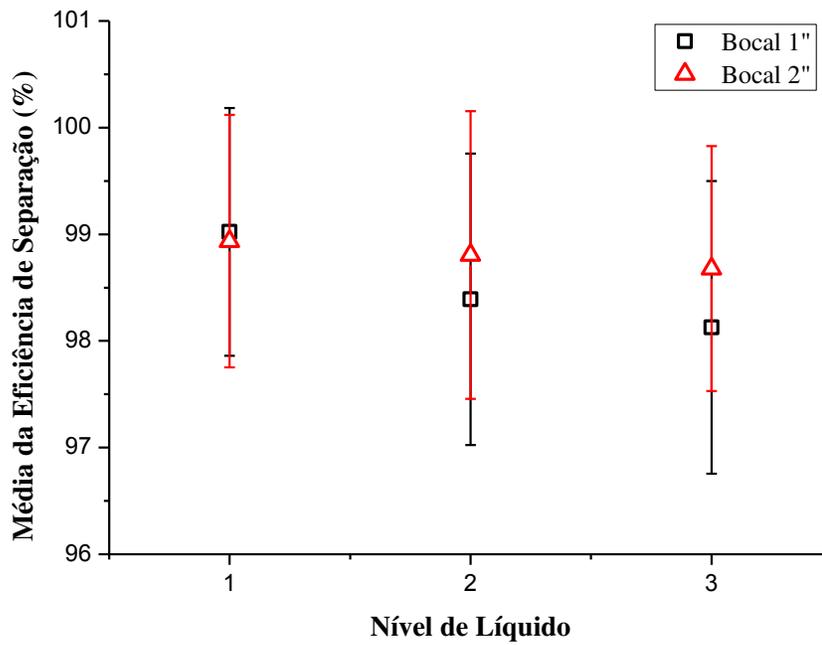


Figura 6.12 – Média da eficiência em função do nível para o bocal de 2'' e 1'' e mistura ar-glicerina (83 cP).

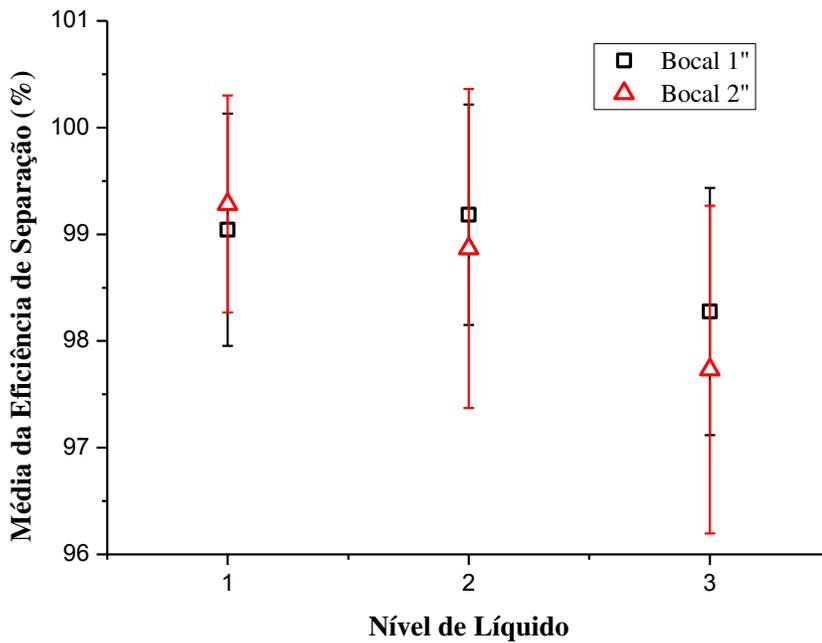


Figura 6.13 – Média da eficiência em função do nível para o bocal de 2'' e 1'' e mistura ar-glicerina (53 cP).

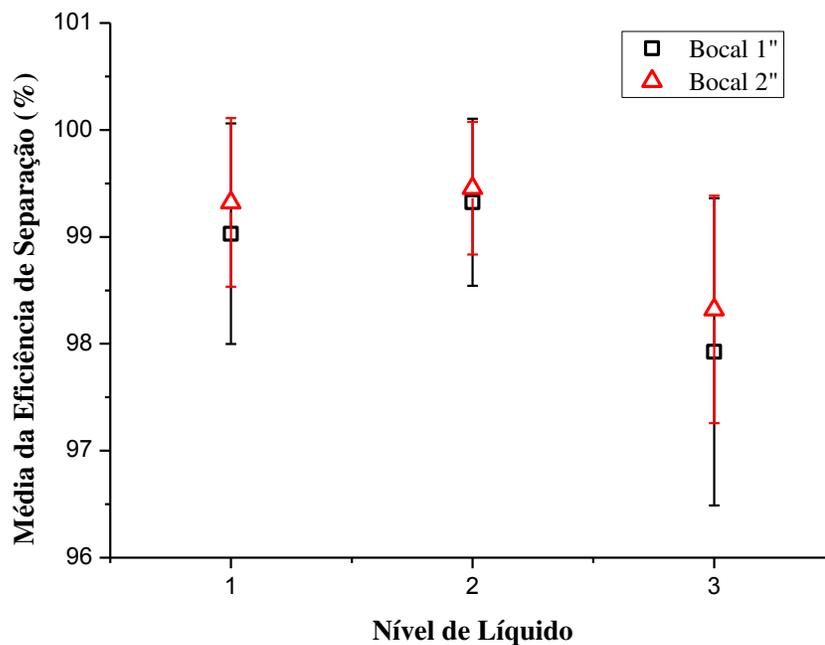


Figura 6.14 – Média da eficiência em função do nível para o bocal de 2” e 1” e mistura ar-glicerina (23 cP).

Os valores da média da eficiência e seus respectivos desvios padrão para os diferentes níveis de líquido e diâmetros do bocal de entrada são apresentados na Tabela 6.2.

**Tabela 6.2 – Média da eficiência de separação e seus respectivos desvios padrão para diferentes diâmetros de bocais e níveis de líquido.**

Bocal	Nível de Líquido	MISTURA							
		Ar-água		Ar-glicerina 83 cP		Ar-glicerina 53 cP		Ar-glicerina 23 cP	
		Média [%]	Desvio Padrão	Média [%]	Desvio Padrão	Média [%]	Desvio Padrão	Média [%]	Desvio Padrão
1”	1	99,7	0,6	99,0	1,2	99,0	1,1	99,0	1,0
	2	98,3	1,4	98,4	1,4	99,2	1,0	99,3	0,8
	3	86,9	10,7	98,1	1,4	98,3	1,2	97,9	1,4
2”	1	99,8	0,4	98,9	1,2	99,3	1,0	99,3	0,8
	2	99,1	0,9	98,8	1,3	98,9	1,5	99,5	0,6
	3	86,3	8,2	98,7	1,2	97,7	1,5	98,3	1,1

Analisando os gráficos da Figura 6.11 a Figura 6.14 observa-se que tanto para a mistura ar-glicerina e, principalmente, para a mistura ar-água a diferença do valor da média da eficiência entre os bocais é muito pequena, mesmo em diferentes níveis de líquido, ou seja, o bocal não está influenciando no aumento ou na diminuição da eficiência de separação. A maior diferença da

média da eficiência entre os bocais ocorre para a mistura ar-glicerina a 53 cP e nível 3 (Figura 6.13) que é de 0,6 %. Também é apresentado nestes gráficos o desvio padrão de cada medida da média da eficiência, pois o desvio padrão nos indica como os valores se comportam quando distantes da média, ou seja, seu grau de dispersão e sua probabilidade de acontecer a certa distância da média.

Assim, a partir daqui, os resultados que serão apresentados neste trabalho, foram obtidos com o bocal de 1” instalado na entrada da Câmara de Expansão.

#### 6.4. Eficiência de separação em relação ao nível de líquido

Como foi observado, nos gráficos do tipo matriz para as diferentes misturas, variações na eficiência de separação com relação ao nível de líquido foi realizado um estudo através da Figura 6.15 que mostra um gráfico da eficiência de separação em relação ao nível de líquido. Esses pontos experimentais foram obtidos com o bocal de 1” e para as máximas vazões de gás e líquido, neste caso, de 8 m<sup>3</sup>/h e 9 m<sup>3</sup>/h (máxima vazão para a glicerina com 83 cP), respectivamente. As máximas vazões foram utilizadas pelo fato de ser ter observado que a eficiência diminui quando se aumenta as vazões de gás e líquido, como dito anteriormente.

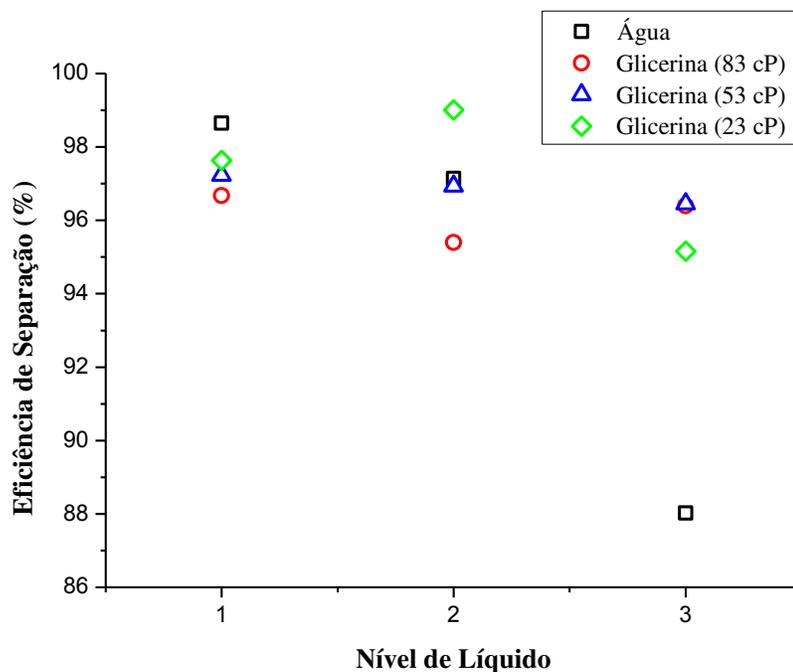


Figura 6.15 – Eficiência de separação em relação ao nível de líquido para diferentes misturas.

No Figura 6.15 observa-se para a mistura ar-água uma tendência de diminuição da eficiência com relação ao nível, ou seja, a eficiência diminui quando o separador é operado em níveis baixos de líquido (nível mais distante do centro do bocal de entrada). Isso pode ser explicado pelo fato de como a água é um fluido menos viscoso que a glicerina, há a formação de um vórtice maior na região de líquido na parte inferior do separador, mesmo com o redutor de vórtice instalado. Esse fenômeno foi observado durante a realização dos testes de eficiência, pois já era esperado uma vez que a formação do vórtice é produzida pela ação da força centrífuga que age no líquido em rotação, devido a componente tangencial da velocidade do fluido. Isso ocorre geralmente para líquidos de baixa viscosidade. A Figura 6.16 mostra uma foto real do vórtice formado na parte inferior da Câmara de Expansão para a mistura ar-água (a) e para a mistura ar-glicerina (b) ambas tiradas nas mesmas condições de operação, com bocal de entrada de 1” e a glicerina com viscosidade de 23 cP.

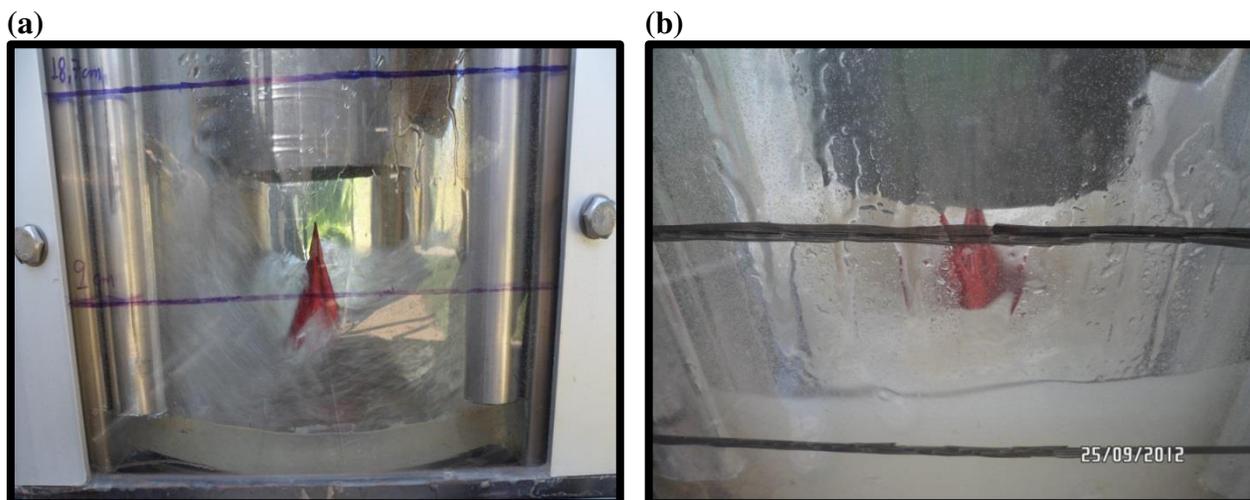


Figura 6.16 – Foto real do vórtice para a mistura: (a) ar-água; (b) ar-glicerina.

Em relação à mistura ar-glicerina não houve uma influência considerável do nível de líquido na eficiência, ou seja, para fluidos mais viscosos o separador pode ser operado com níveis mais baixos sem afetar a sua eficiência.

### 6.5. Eficiência de separação em relação à viscosidade do fluido

Para verificar a influência da viscosidade na eficiência de separação, foi feito um gráfico da eficiência em função da viscosidade do fluido para o Nível 1, bocal de 1” e vazão de gás e de líquido de  $8 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $9 \text{ m}^3/\text{h}$ , respectivamente, mostrado na Figura 6.17. O objetivo de se utilizar dados experimentais para as máximas vazões de gás e de líquido é pelo fato que foi observado que a eficiência é menor para maiores vazões.

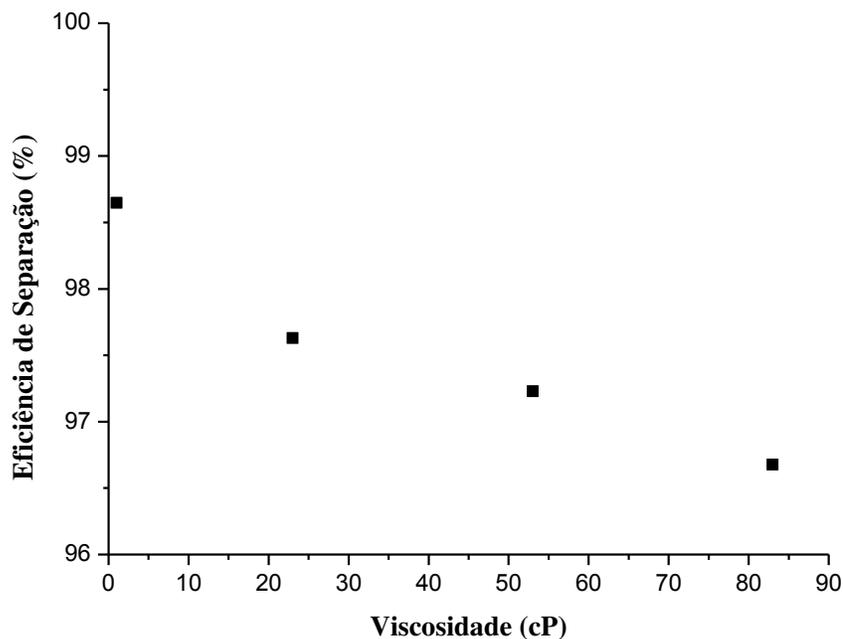


Figura 6.17 – Eficiência de separação em relação a viscosidade, para o Nível 1, bocal de 1” e vazões  $Q_G = 8 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $Q_L = 9 \text{ m}^3/\text{h}$ .

A Figura 6.17 mostra uma diminuição da eficiência de separação quando se aumenta a viscosidade do fluido. Lembrando que houve uma variação da temperatura do líquido no interior do separador, houve também uma variação no valor da viscosidade. Através dos gráficos da reologia da glicerina apresentados anteriormente neste trabalho, pode-se determinar a real viscosidade para cada ponto. Para a viscosidade de 23 cP a temperatura era de  $34,5 \text{ }^\circ\text{C}$  e a viscosidade real para essa temperatura era de 18,2 cP. Já para a viscosidade de 53 cP a temperatura era de  $33,5 \text{ }^\circ\text{C}$  e a viscosidade real para essa temperatura foi de 32,2 cP. Por fim, para a viscosidade de 83 cP a temperatura era de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  e a viscosidade real para essa temperatura foi de 47,5 cP. Os valores da temperatura do líquido ( $T_L$ ) de cada ponto experimental obtido, encontram-se nas tabelas dos resultados no APÊNDICE C.

## 6.6. Altura de elevação do filme de líquido

O fluido entra tangencialmente a parede da Câmara de Expansão, onde o fluido se espalha, de tal forma que uma parte eleva-se sobre a parede do separador e outra parte inicia um movimento espiralado para baixo. Dessa forma a altura máxima de elevação do líquido sobre a parede da Câmara de Expansão deve ser controlada, pois não pode atingir o topo do separador, o que levaria o carregamento de líquido pela linha de saída de gás, fenômeno mostrado anteriormente no esquema da Figura 2.19 (b).

Os resultados que serão aqui apresentados são referentes aos dados obtidos com a Câmara de Expansão operando com o bocal de 1” de diâmetro e para o Nível 1 de líquido.

Os gráficos da altura de elevação em função da vazão mássica da mistura para cada vazão volumétrica de ar ( $Q_G$ ) e para fluidos com diferentes viscosidades, são apresentados na Figura 6.18. Observa-se em todos os gráficos que a altura de elevação aumenta com a vazão e para uma mesma vazão a altura de elevação é maior para fluidos menos viscosos, nesse caso a água. A altura de elevação do fluido aumenta quando aumenta-se a vazão mássica, onde há um aumento direto da velocidade do fluido e essa altura diminui com a viscosidade, devido a resistência da parede da Câmara de Expansão.

Para realizar uma análise adimensional, foram feitos gráficos da altura de elevação adimensional ( $h^*$ ) em função do número de Reynolds do filme ( $Re_\delta$ ), apresentados na Figura 6.19. A variável adimensional da altura de elevação é definida pela relação:

$$h^* = \frac{h}{R_0} \quad (6.1)$$

Observa-se na Figura 6.19 que para os fluidos menos viscosos os valores da altura de elevação adimensional aumentam. Também pode-se observar que independente da viscosidade do fluido, os valores da altura adimensional aumentam para valores maiores do número de Reynolds do filme.

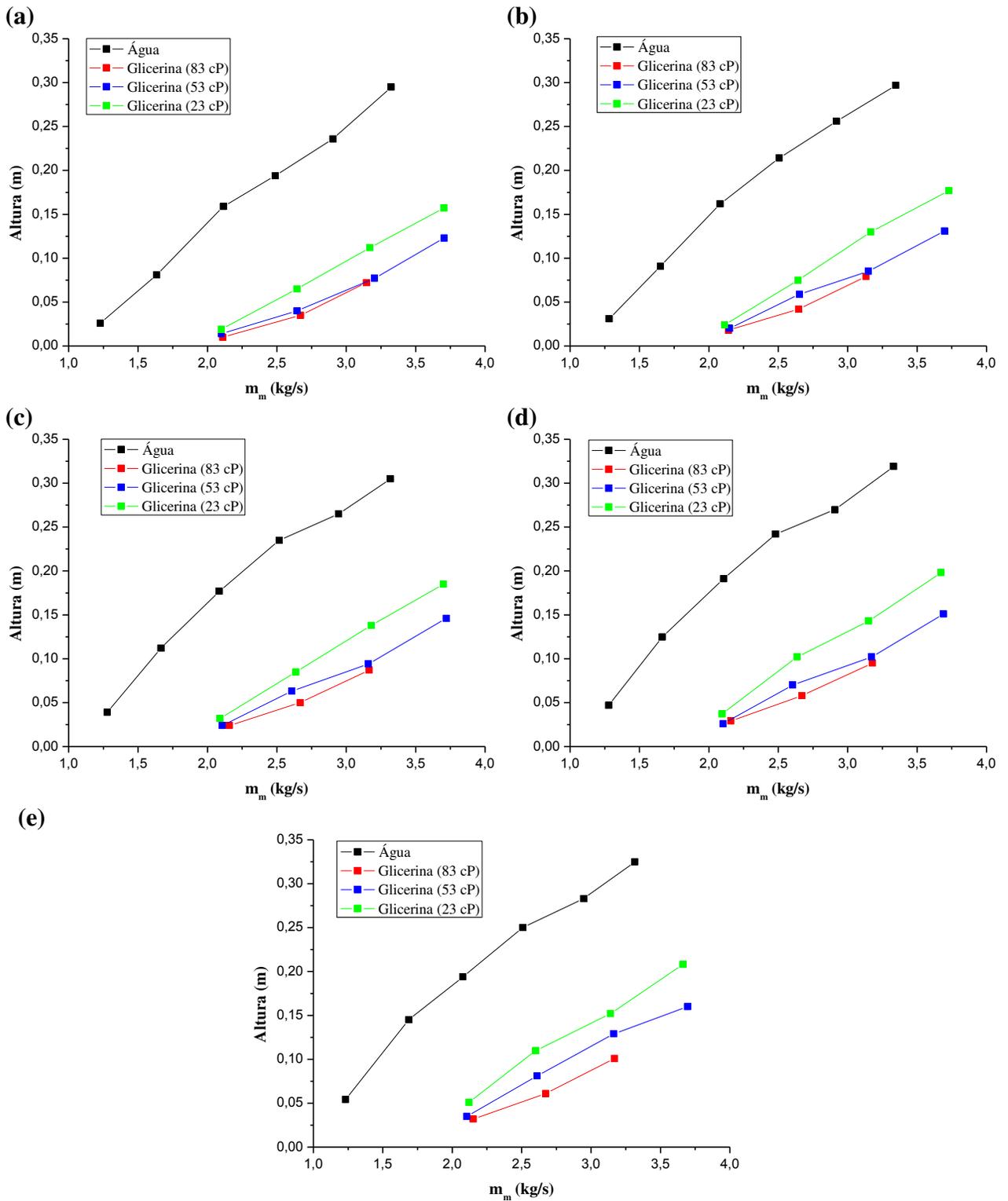


Figura 6.18 – Altura de elevação em função da vazão mássica da mistura para: (a)  $Q_{ar} = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (b)  $Q_G = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (c)  $Q_G = 5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (d)  $Q_G = 7 \text{ m}^3/\text{h}$  e (e)  $Q_G = 8 \text{ m}^3/\text{h}$ .

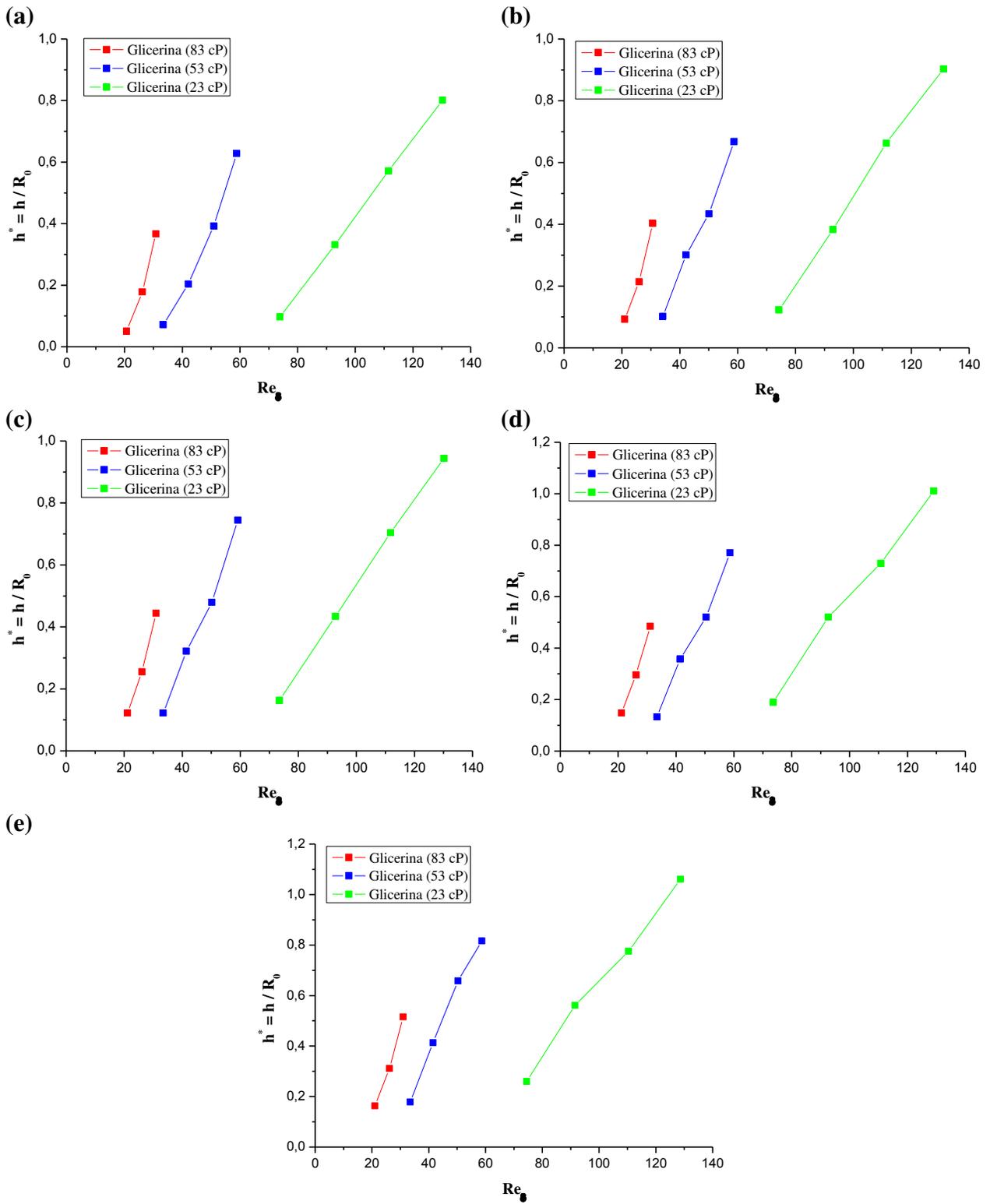


Figura 6.19 – Altura de elevação adimensional em função do número de Reynolds do filme para: (a)  $Q_G = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (b)  $Q_G = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (c)  $Q_G = 5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (d)  $Q_G = 7 \text{ m}^3/\text{h}$  e (e)  $Q_G = 8 \text{ m}^3/\text{h}$ .

## 6.7. Ângulo de inclinação do filme de líquido

O estudo da inclinação das linhas de corrente do filme de líquido na parede do separador é importante para projetos de helicoides instalados no tubo anular do separador e a transição do filme da Câmara de Expansão/Helicoide no separador VASPS.

Os resultados que serão aqui apresentados são referentes aos dados obtidos com a Câmara de Expansão operando com o bocal de 1” de diâmetro e para o Nível 1 de líquido. Como dito anteriormente, esses ângulos foram medidos apenas pelo último transferidor (contando de cima para baixo na Figura 5.10) instalado na parede externa do equipamento.

Na Figura 6.20 é mostrado o ângulo de inclinação das linhas de corrente do filme de líquido em função da vazão mássica da mistura ar-água e ar-glicerina em diferentes viscosidades (83 cP, 53 cP e 23 cP).

Para realizar um estudo com variáveis adimensionais foram feitos gráficos do ângulo de inclinação do filme em função do número de Reynolds do filme, para a mistura ar-glicerina, apresentados na Figura 6.21.

Analisando os gráficos da Figura 6.20 e da Figura 6.21, observa-se que o ângulo de inclinação das linhas de corrente do filme diminui com o aumento da vazão mássica e do número de Reynolds do filme ( $Re_\delta$ ), que aumentam o espalhamento do fluido na parede do separador e também intensifica o efeito centrífugo. Quando o efeito centrífugo se intensifica, a aceleração gravitacional se torna menos predominante para a queda do fluido, de tal forma que o fluido chegue ao fundo do separador com um ângulo menos inclinado em relação a horizontal. Na Figura 6.20 observa-se uma inconstância (variação) nos resultados para a mistura ar-água, pois para essa mistura o escoamento no interior do separador é turbulento. Também é observado na Figura 6.21 que quanto maior a viscosidade maior a diminuição do ângulo de inclinação.

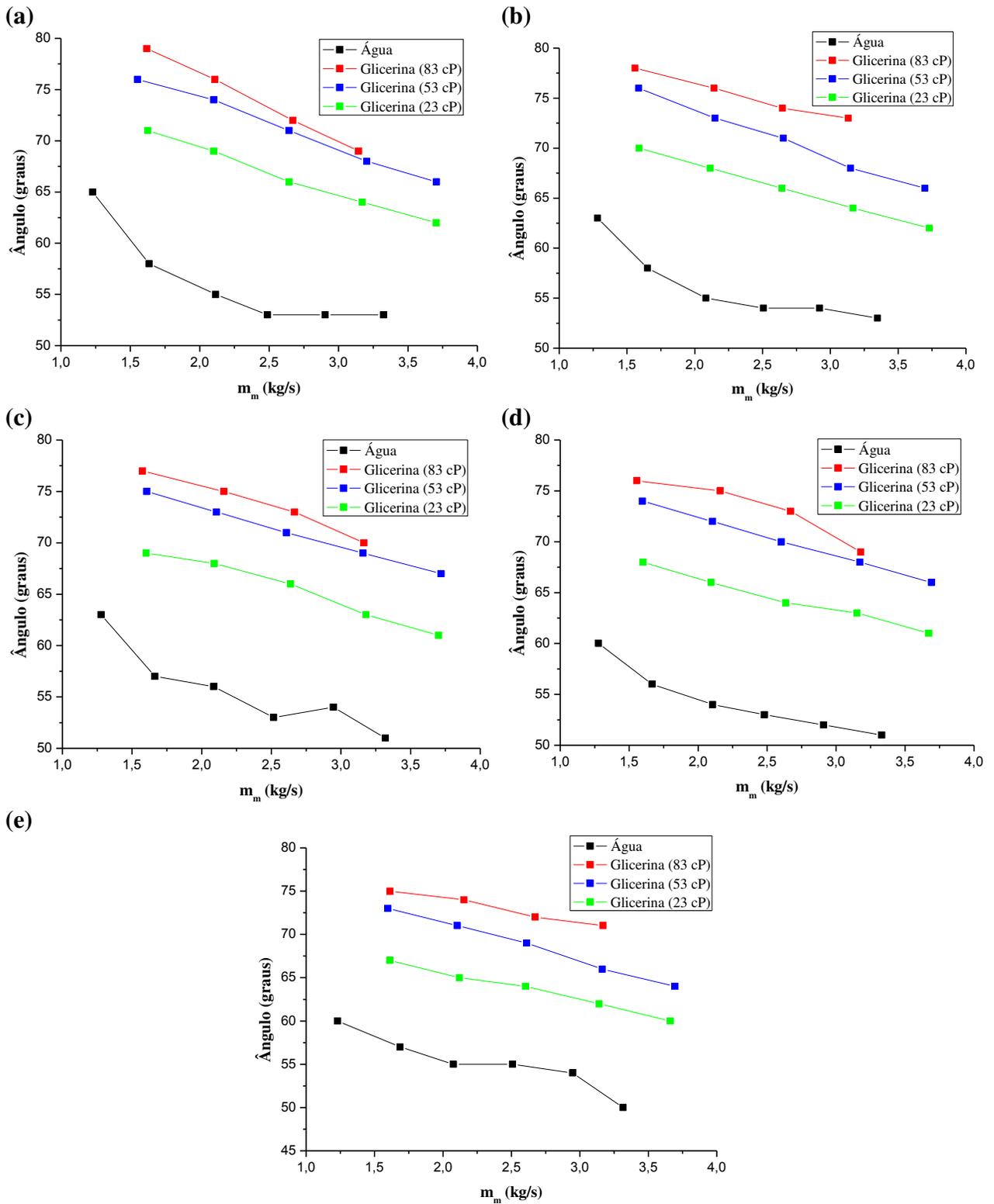


Figura 6.20 – Gráficos do ângulo de inclinação em função da vazão mássica da mistura para (a)  $Q_G = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (b)  $Q_G = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (c)  $Q_G = 5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (d)  $Q_G = 7 \text{ m}^3/\text{h}$  e (e)  $Q_G = 8 \text{ m}^3/\text{h}$ .

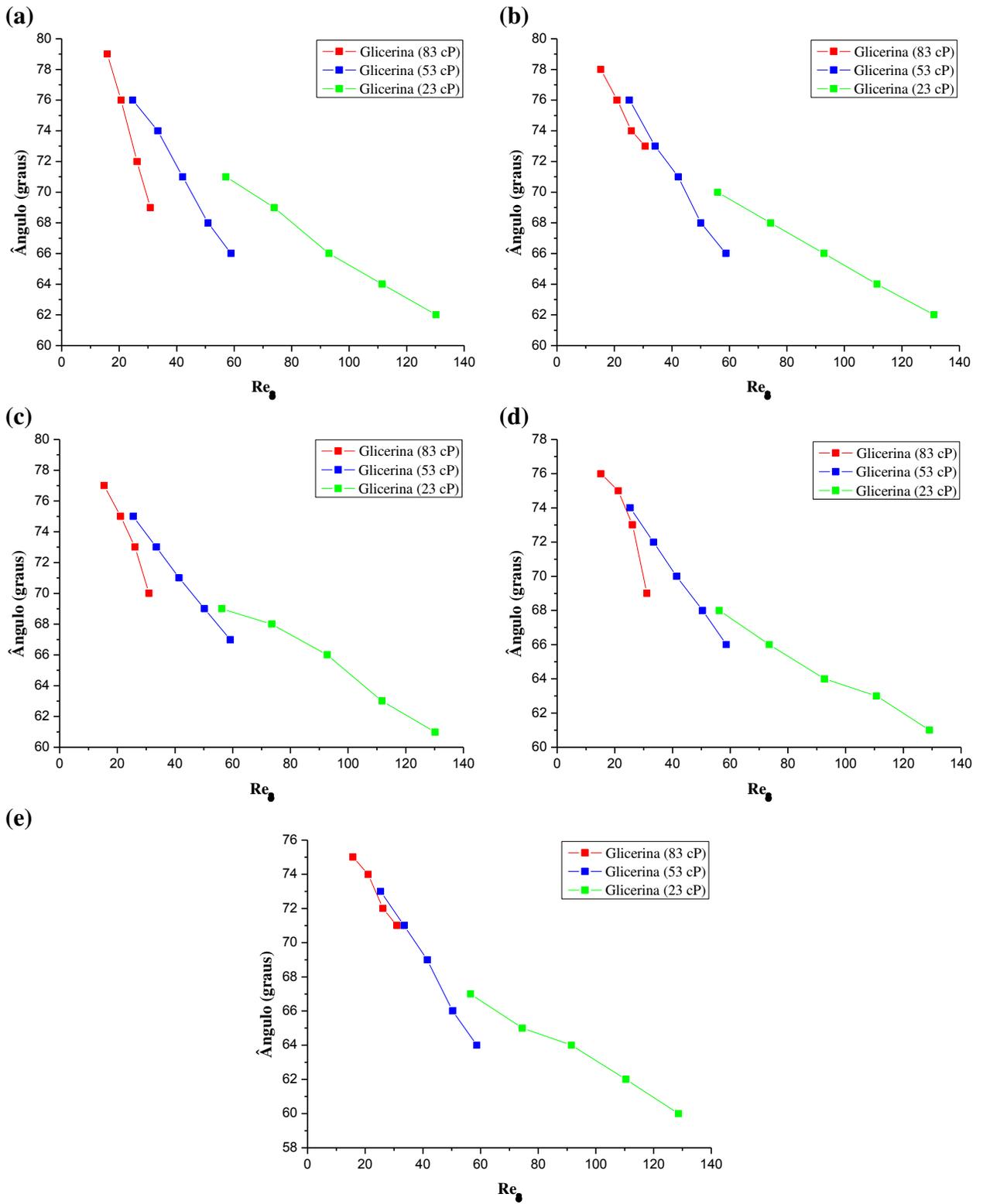


Figura 6.21 – Gráficos do ângulo de inclinação em função do número de Reynolds do filme para (a)  $Q_G = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (b)  $Q_G = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (c)  $Q_G = 5,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (d)  $Q_G = 7 \text{ m}^3/\text{h}$  e (e)  $Q_G = 8 \text{ m}^3/\text{h}$ .

## 6.8. Resultados dos parâmetros relevantes para separação bifásica gás-líquido

A Figura 6.22 mostra os valores da eficiência de separação da mistura ar-água em relação ao número de Froude do bocal ( $Fr$ ) de entrada da Câmara de Expansão para o bocal de 1" e de 2" de diâmetro e para o Nível 1 de líquido. As linhas vermelhas verticais representam os limites do número de Froude em que o separador deveria estar operando. Estes limites representam o critério de escoamento para o bocal, onde os valores do número de Froude devem ser entre 1 e 10. Para melhor visualização, o eixo horizontal do número de Froude está em escala logarítmica.

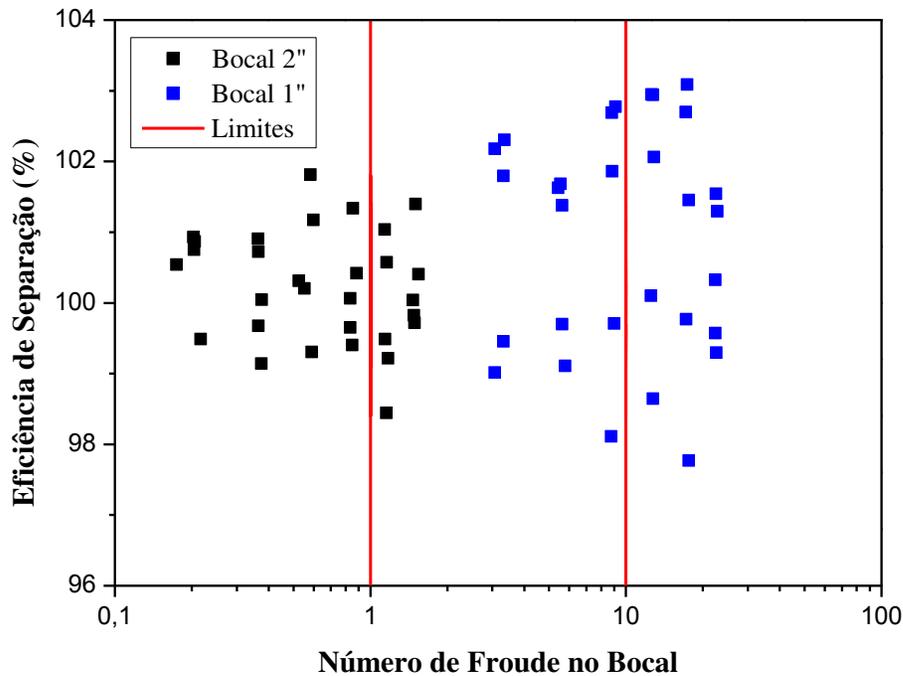


Figura 6.22 – Eficiência de separação em relação ao número de Froude do bocal.

Analisando o gráfico da Figura 6.22 temos que os limites não foram respeitados em todos os pontos experimentais obtidos, porém mesmo os pontos fora dos limites tiveram uma boa eficiência de separação.

Também foi feito um gráfico da eficiência de separação da mistura ar-água em relação ao número de Froude da Câmara de Expansão ( $Fr_{CaEx}$ ) para o bocal de 1" e 2" de diâmetro e para o Nível 1 de líquido, apresentado na Figura 6.23. As linhas vermelhas verticais também representam os limites do número de Froude em que o separador deveria estar operando. Estes limites representam o critério de escoamento para a Câmara de Expansão, onde os valores do

número de Froude devem ser entre 2 e 40. Também para melhor visualização, o eixo horizontal do número de Froude está em escala logarítmica.

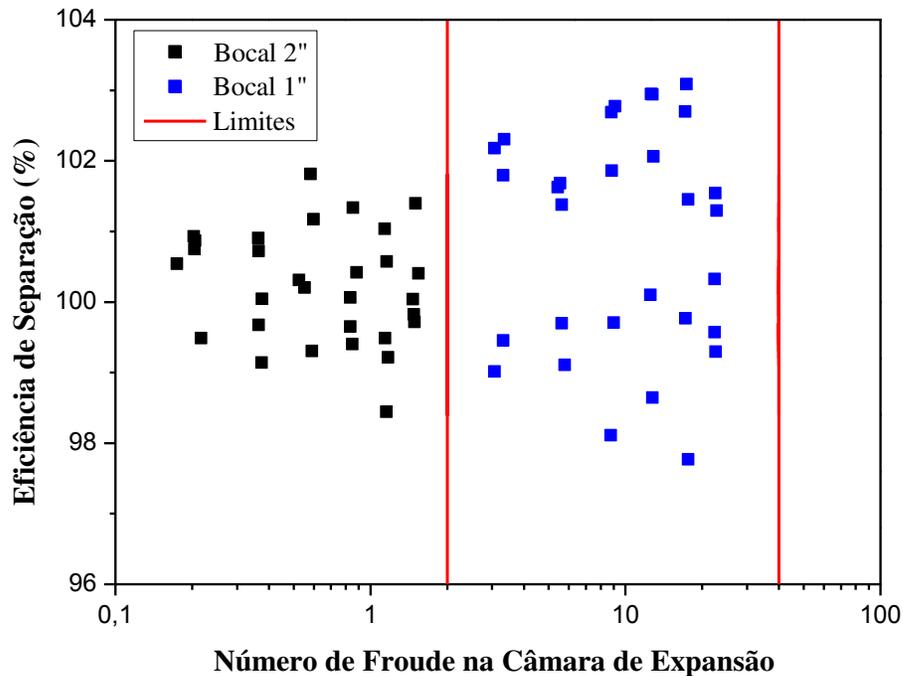


Figura 6.23 – Eficiência de separação em relação ao número de Froude na Câmara de Expansão.

Observa-se no gráfico da Figura 6.23 que os pontos experimentais obtidos com o bocal de 1" respeitam os limites e os pontos referentes ao bocal de 2" estão todos fora dos limites do critério de escoamento para a Câmara de Expansão. Independentemente dos limites propostos os dados obtidos para ambos os bocais obtiveram uma ótima eficiência de separação.

Com o objetivo de comparar os dados experimentais da altura de elevação do filme com o modelo matemático dado pela Equação (3.12), foram feitos gráficos da altura de elevação do filme de líquido utilizando o modelo matemático e os dados experimentais em relação à vazão mássica da mistura, para a mistura ar-água e a mistura ar-glicerina em diferentes viscosidade (23 cP, 53 cP e 83 cP), apresentados na Figura 6.24. Ambos os resultados foram obtidos para o bocal de 1" de diâmetro na entrada do separador. Observa-se que tanto para a mistura ar-água e a mistura ar-glicerina em diferentes viscosidades não houve uma correlação entre os dados obtidos utilizando o modelo matemático e os dados experimentais.

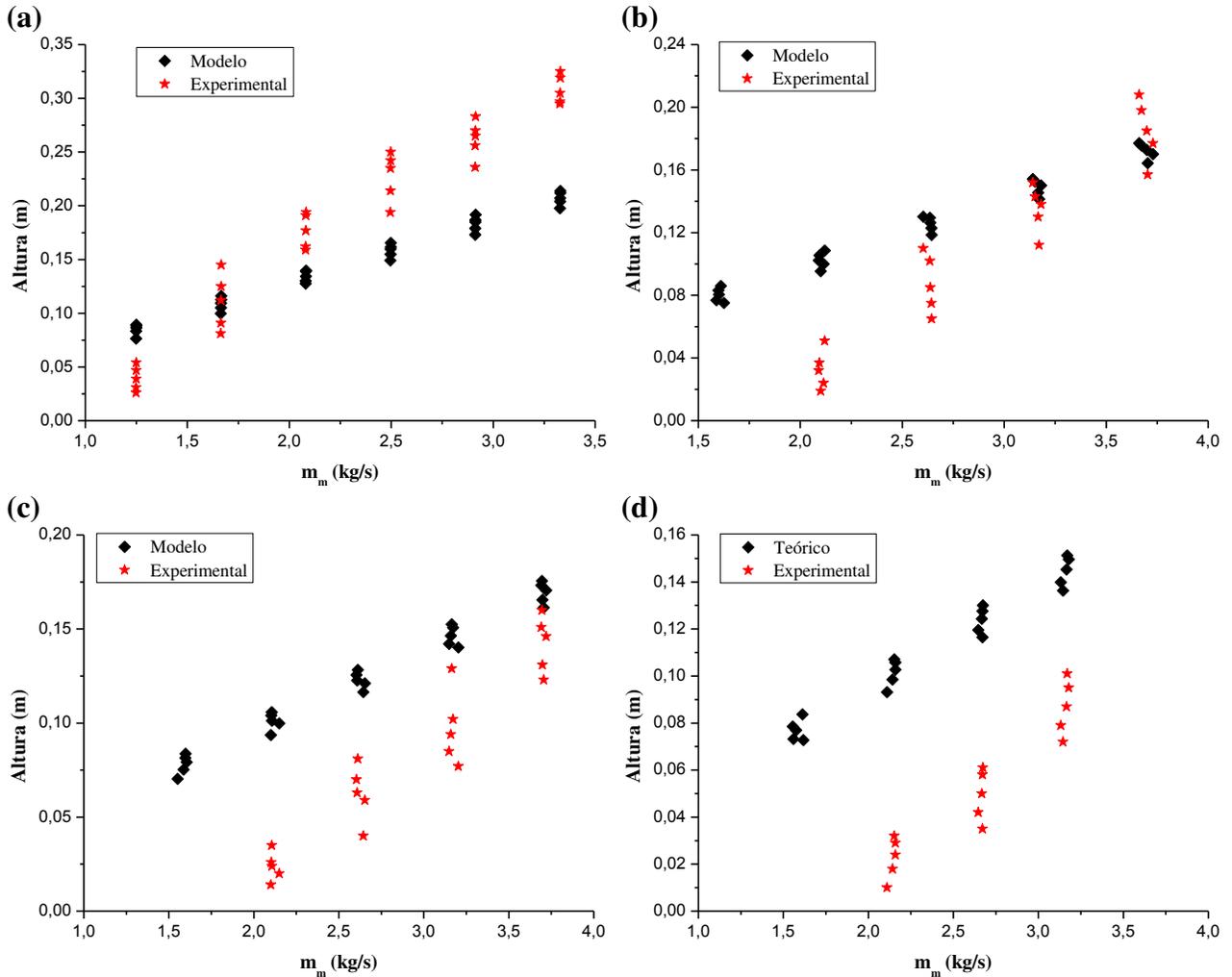


Figura 6.24 – Altura de elevação do filme de líquido em relação a vazão mássica da mistura para diferentes viscosidades: (a) 1 cP; (b) 23 cP; (c) 53 cP; (d) 83 cP.

Portanto, para realizar um estudo melhor da relação entre o modelo matemático e os dados experimentais, foram feitos gráficos da altura de elevação do filme de líquido utilizando o modelo matemático em relação à altura de elevação do filme de líquido obtido experimentalmente, para a mistura ar-água e a mistura ar-glicerina em diferentes viscosidade (23 cP, 53 cP e 83 cP), apresentados na Figura 6.25. Neste gráfico é apresentado uma linha de referência (linha preta) e seu erro de  $\pm 20\%$  (linhas vermelhas pontilhadas). Observa-se novamente que não houve uma correlação entre os pontos obtidos através do modelo matemático dado pela Equação (3.12) e os pontos experimentais.

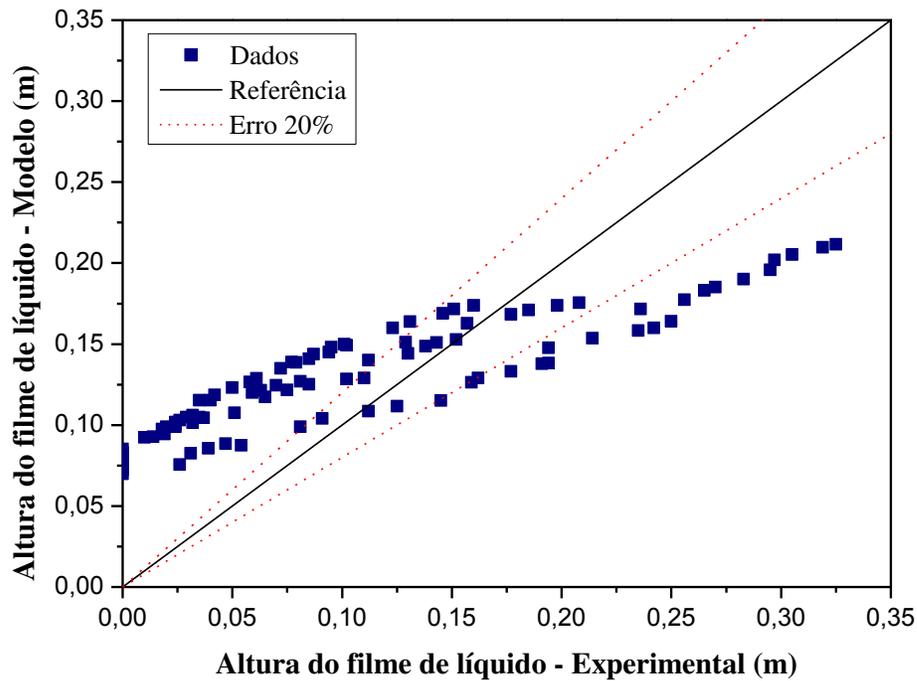


Figura 6.25 – Comparação entre a altura do filme de líquido obtida utilizando o modelo matemático em relação a altura obtida experimentalmente.

Sendo assim, é proposto um ajuste nos valores das constantes da equação do modelo matemático da altura de elevação do filme de líquido, dada pela Equação (3.12). Substituindo as três constantes da Equação (3.12) e chamando-as de  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , temos que:

$$H = \sqrt{A_b \cdot Fr_{CaEx}} \cdot C_1 \cdot (Re_b^{C_2}) \cdot (1 + RGO)^{C_3} \quad (6.2)$$

O melhor ajuste das constantes utilizadas para melhor representar os dados experimentais foi de:

$$C_1 = 0,16967$$

$$C_2 = 0,2412$$

$$C_3 = -0,0465$$

O gráfico da altura de elevação do filme de líquido utilizando o modelo matemático com o ajuste em relação à altura de elevação do filme de líquido obtido experimentalmente, para a mistura ar-água e a mistura ar-glicerina em diferentes viscosidade (23 cP, 53 cP e 83 cP) é mostrado na Figura 6.26. Neste gráfico também é apresentado uma linha de referência (linha preta) e seu erro de  $\pm 20\%$  (linhas vermelhas pontilhadas).

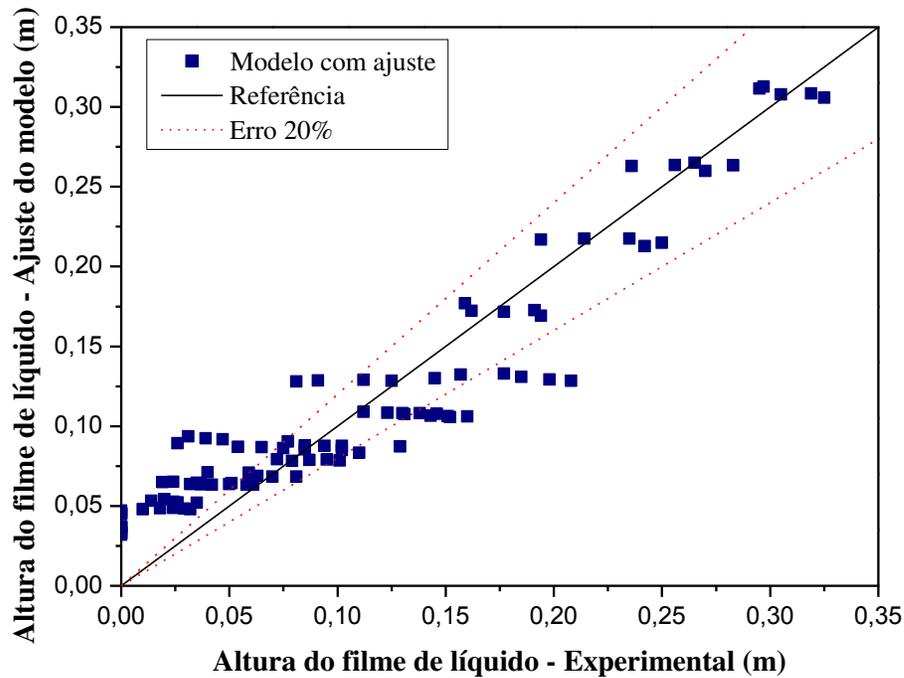


Figura 6.26 – Comparação entre a altura do filme de líquido obtida utilizando o modelo matemático com ajuste em relação a altura obtida experimentalmente.

Para que o modelo represente melhor os dados experimentais, é proposta uma modificação na Equação (18) adicionando uma constante ( $C_4$ ), obtendo a seguinte equação:

$$H = \sqrt{A_b \cdot Fr_{CdEx}} \cdot C_1 \cdot (Re_b^{C_2}) \cdot (1 + RGO)^{C_3} + C_4 \quad (6.3)$$

Para este caso, o melhor ajuste das constantes utilizadas para melhor representar os dados experimentais foi de:

$$C_1 = 1,07113$$

$$C_2 = 0,1055$$

$$C_3 = 0,3508$$

$$C_4 = -0,12557$$

A Figura 6.27 mostra o gráfico da altura de elevação do filme de líquido utilizando o modelo matemático modificado em relação à altura de elevação do filme de líquido obtido experimentalmente, para a mistura ar-água e a mistura ar-glicerina em diferentes viscosidade (23 cP, 53 cP e 83 cP). Neste gráfico também é apresentado uma linha de referência (linha preta) e seu erro de  $\pm 20\%$  (linhas vermelhas pontilhadas).

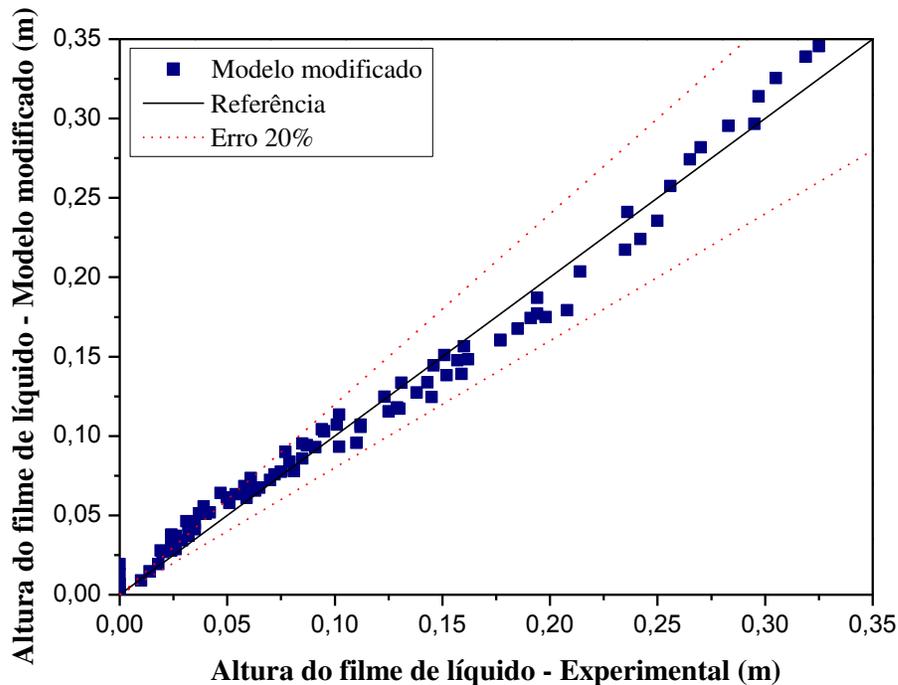


Figura 6.27 – Comparação entre a altura do filme de líquido obtida utilizando o modelo matemático modificado em relação a altura obtida experimentalmente.

Analisando o gráfico da Figura 6.25, da Figura 6.26e da Figura 6.27, observa-se que o modelo que melhor representou os dados experimentais foi o modelo modificado com a adição de uma constante.



## 7. CONCLUSÕES

O protótipo do separador Câmara de Expansão, se mostrou um equipamento adequado para realização dos experimentos. Por ter sido construído em acrílico, foi possível fazer um estudo não somente quantitativo, mas também um estudo qualitativo do equipamento para diferentes condições de operação.

Identificou-se um padrão nos resultados da eficiência de separação tanto para a mistura ar-água quanto para a mistura ar-glicerina, onde a eficiência diminuía com o aumento da velocidade superficial do gás e/ou do líquido, comprovado por outros autores que estudaram separadores ciclônicos.

Os padrões de escoamento em tubo horizontal, que foram utilizados durante os testes de eficiência para a mistura ar-água e mistura ar-glicerina, tiveram influência na eficiência de separação da Câmara de Expansão, principalmente para fluidos viscosos.

Os resultados mostraram que a eficiência de separação está diretamente relacionada com o nível de líquido na região inferior do separador. Foi observado que quando o separador era operado com níveis de líquido mais baixo, havia a formação de vórtices maiores, que carregavam certa quantidade de ar para a bomba de saída de líquido, principalmente para fluidos menos viscosos. Foi possível verificar que para o nível de líquido mais baixo (Nível 3) a eficiência de separação foi comprometida, quando comparado, com os resultados da eficiência para o nível mais alto (Nível 1) para a mistura ar-água.

Para diminuir esse efeito da formação de vórtice, foi desenvolvido e fabricado um dispositivo chamado Redutor de Vórtice, que foi instalado no fundo da Câmara de Expansão, onde este se mostrou eficiente em reduzir a formação de vórtice, aumentando assim a eficiência de separação, como mostraram os resultados.

Com relação à viscosidade do líquido, os resultados mostraram uma leve diminuição na eficiência com o aumento da viscosidade.

Os resultados de espessura, ângulo de inclinação e altura de elevação do filme de líquido na parede cilíndrica da Câmara de Expansão se mostraram consistente com resultados encontrados na literatura.

Mesmo com o separador operando em algumas condições fora do critério do número de Froude do bocal e da Câmara de Expansão, verificou-se que não houve interferência na eficiência de separação, onde esse critério poderia ser modificado para outros valores.

Por fim, com relação a comparação da altura de elevação do filme na parede do separador obtida pelo modelo matemático e experimentalmente, os resultados mostraram que não houve uma correlação entre eles, sendo assim neste trabalho foi feito um ajuste das constantes da equação do modelo e também foi proposto uma modificação na equação do modelo, onde foi obtida uma boa correlação com os dados experimentais.

Baseados nas conclusões citadas anteriormente são sugeridos algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Estender a matriz experimental abrangendo condições experimentais ainda não testadas, com o objetivo de obter resultados de eficiência de separação para outros padrões de escoamento na entrada do separador.
- Automatizar o acionamento das válvulas de controle de fluxo facilitando a realização dos testes. Com o uso de válvulas automatizadas é possível obter melhor precisão com relação ao valor de vazão volumétrica de gás e líquido, permitindo um intervalo menor entre as medidas, aumentando a matriz de teste.
- Automatizar a altura do nível de líquido no fundo do separador. Com o uso de um medidor de nível é possível identificar de uma forma mais precisa, qualquer variação no nível de líquido. O tempo de espera para identificar a estabilidade do nível de líquido também diminuiria, permitindo realizar mais testes em um mesmo dia.

## REFERÊNCIAS

ABILI, N.; UDOFOT, O.; KARA, F.. Subsea Processing: A Holistic Approach to Marginal Field Developments. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-25, maio 2012.

ALBUQUERQUE, F. A.; RIBEIRO, M. G. G.; ORLOWSKI, R. T. C.; VIANNA, F. L. V.; KUCHPIL, C.; MORAES, C. A. C.; ALVES, R. P.. Subsea Processing Systems: Future Vision. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. ,p. 1-14, maio 2013.

BAKER, A. C.; LUCAS, D. C.. Application of Subsea Separation and Pumping to Marginal and Deepwater Field Developments. **Society Of Petroleum Engineers**, New Orleans, n. , p.783-789, set. 1990.

BAKER, A. C.; ENTRESS, J. H.. The VASPS Subsea Separation and Pumping System Applied to Marginal Field Developments. **Society Of Petroleum Engineers**, Aberdeen, n. , p.193-202, set. 1991.

BELL, J. M.; CHIN, Y. D.; HANRAHAN, S.. State of the Art of Ultra Deepwater Production Technologies. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-13, maio 2005.

BENETTI, M.; VILLA, M.. Field Tests on VASPS Separation and Pumping System. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-19, maio 1997.

BRINGEDAL, B.; INGEBRETSEN, T.; HAUGEN, K.. Subsea Separation and Reinjection of Produced Water. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-7, maio 1999.

CHIESA, G.; ERIKSEN, R.; VERITAS, D. N.. Subsea Processing - The Solution to Cost Efficient Deepwater Field Developments. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-10, maio 2000.

DAVIES, S.; BAKKE, W.; RAMBERG, RM,; JENSEN, RO.. Experience to Date and Future Opportunities for Subsea Processing in Statoil Hydro. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-24, maio 2010.

DEUEL, C.; CHIN, Y. D.; HARRIS, J.; GERMANESE, J.; SEUNSON, N.. Field Validation and Learning of the Parque das Conchas (BC-10) Subsea Processing System and Flow Assurance Design. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p. 1-12, maio 2011.

DEVEGOWDA, D.; SCOTT, S. L.. An Assessment of Subsea Production Systems. **Society Of Petroleum Engineers**, Denver, n. , p.1-9, out. 2003.

ENTRESS, J. H.; PRIDDEN, D. L.; BAKER, A. C.. The Current State of Development of the VASPS Subsea Separation and Pumping System. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.627-635, maio 1991.

ESTRELLA, G.. The Importance of Brazilian Deepwater Activities to the Oil Industry Technological Development. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-7, maio 2003.

EUPHEMIO, M. L. L.; KUCHPIL, C.; FIGUEIREDO, M. W.. Subsea Processing and Boosting – Building Blocks for Scenarios. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-7, maio 2009.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J.. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: Ltc, 2006. 798 p.

FJOSNE, E.. Subsea Processing - Maximising Value In Areas With Existing Infrastructure. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-5, maio 2002.

FRANÇA, F. A.; ROSA, E. S.; BANNWART, A. C.; MOURA, L. F.; ALHANAT, F. J.. Hydrodynamic Studies on a Cyclonic Separator. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.281-289, maio 1996.

GILYARD, D.; BROOKBANK, E. B.. The Development of Subsea Boosting Capabilities for Deepwater Perdido and BC-10 Assets. **Society of Petroleum Engineers**, Florence, n. , p. 1-16, set. 2010.

GOMEZ, L.; MOHAN, R.; SHOHAM, O.; MARRELLI J.; KOUBA G.. Aspect Ratio Modeling and Design Procedure for GLCC Compact Separators. **Asme Journal Of Energy Resources Technology**, Vo. 121, n. , p.15-23, mar. 1999.

HARRIS, D.; BODE, W.; MARTINEZ, I.; RIVERA, R.; HINES, N.. BC-10: The First Successful Replacements of Caisson ESPs in Deepwater Brazil. **Society of Petroleum Engineers**, Latin American and Caribbean, n. , p. 1-13, abr. 2012.

HOFFMANN, A.; STEIN, L.. Gas Cyclones and Swirl Tubes. Principles, Desing and Operation. **Editorial Springer**, Germany, n. , p.265-266, 2002.

JANARDHANAN, K.; McKEE, M.. Subsea Processing Advances to Meet Industry Needs. **Offshore**, vol. 71, 2011.

KADOYA, K.; MATSUNAGA, N.; NAGASHIMA, A.. Viscosity and Thermal Conductivity of Dry in the Gaseous Phase. **J. Phys. Chem.**, Vol. 14, No. 4, n. , p.947-970, 1985.

KREMLEVA, E.; FANTOFT, R.; MIKELSEN, R.; AKDIM, R.. Inline Technology – New Solutions for Gas/Liquid Separation. **Society of Petroleum Engineers**, Moscou, n. , p.1-12, out. 2010.

MANDHANE, J. M.; GREGORY, G. A.; AZIZ, K.. A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. **Int. J. Multiphase Flow**, Vol. 1, p.537-553.

MCCLIMANS, O. T.; FANTOFT, R.. Status and New Developments in Subsea Processing. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-10, maio 2006.

MELO, A. V.. **Desenvolvimento de Controladores Inteligentes para o Sistema VASPS**. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MORANDIN, M. L.. **Modelagem de um Filme Líquido Sob a Ação Combinada dos Campos Centrífugo e Gravitacional de Forças: Hidrociclones**. 1999. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

NARASIMHA, M.; SRIPRIYA, R.; BANERJEE, P. K.. CFD Modelling of Hydrocyclone - Prediction of Cut Size. **International Journal Of Mineral Processing**, Philidelphia, p. 53-68. 06 abr. 2005.

OFUCHI, E.; SANTANA, F. O.; STEL, H.; FRANCO, A. T.; MORALES, R. E. M.; ESTEVAM, V.; AUGUSTUS, M.. Numerical Study of the Hydrocyclonic Flow in a Cylindrical Expansion Chamber. **XXXII Iberian Latin-American Congresso n Computational Methods in Engineering CILAMCE**, Ouro Preto, Anais do XXII-CILAMCE, 2011.

OFUCHI, E. M.; GENARO, J.; STEL, H.; FRANCO, A. T.; AUGUSTUS, M.; ESTEVAM, V.; MORALES, R. E. M.. Estudo Numérico do Escoamento com Superfície Livre em um Hidrociclone. **3º Encontro Brasileiro Sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos**, Curitiba, 07 maio 2012.

PEIXOTO, G. A.; RIBEIRO, G. A. S.; BARROS, P. R. A.; MEIRA, M. A.; BARBOSA, T. M.. VASPS Prototype in Marimba Field – Workover and Re-Start. **Society of Petroleum Engineers**, Rio de Janeiro, n. , p.1-11, jun. 2005.

ROSA, E. S.; FRANÇA, F. A.; RIBEIRO, G. S.. The cyclone gas-liquid separator: operation and mechanistic modeling. **Journal Of Petroleum Science & Engineering**, Philidelphia, n. , p.87-101, 29 dez. 2001.

SCHOOK, R.; ASPEREN, V.. Compact Separation By Means of Inline Technology. **Society of Petroleum Engineers**, Bahrain, n. , p.1-7, 12 mar. 2005.

SVAROVSKY, L.. **Hydrocyclones**. Lancaster: Technomic Publishing Co., 1984. 196 p.

VALE, O. R.; RIBEIRO, G. S.; BENETTI, M.; VILLA, M.. VASPS Pre-subsea Phase Development: High Viscosity Field Tests and Outlook for Subsea Prototype. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-13, maio 1998.

VALE, O. R. do; GARCIA, J. E.; VILLA, M.. VASPS Instalation and Operation at Campos Basin. **Offshore Technology Conference**, Houston, n. , p.1-13, maio 2002.

## APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

A calibração dos instrumentos de medição é importante para garantir a qualidade dos resultados das medidas obtidas pelo instrumento. Essa calibração consiste em um conjunto de operações que estabelecem uma relação entre os valores medidos por um instrumento e os valores correspondentes estabelecidas por padrões.

Neste apêndice, são apresentadas informações referentes ao processo de calibração dos instrumentos de medição utilizado nos ensaios experimentais. A descrição da variável medida por cada instrumento é descrita na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2. Nos gráficos que aqui são apresentados, são mostradas também, as equações de ajuste dos dados coletados, assim como o coeficiente de covariância ( $R^2$ ).

Os transdutores de pressão utilizados na saída de ar da Câmara de Expansão (Figura E. 7) foram calibrados por meio de um calibrador Druck DPI 615 com precisão de 0,1 kPa. O procedimento de calibração consiste em, através do calibrador, aplicar uma pressão conhecida ao instrumento e medir o sinal analógico de saída correspondente à pressão aplicada. Esse sinal analógico de corrente elétrica (4-20 mA) é condicionado e salvo através de sistema de aquisição de dados National Instruments<sup>TM</sup>. Esse procedimento foi repetido aumentando se a pressão até ser atingido o fundo de escala do sensor. Atingido esse valor máximo lido pelo instrumento, repete-se o procedimento diminuindo a pressão do valor máximo até a pressão atmosférica. A realização da calibração no sentido crescente e decrescente da medição tem como objetivo diminuir os erros de histerese. A Figura A. 1 e a Figura A. 2 mostram os resultados das calibrações dos transdutores de pressão utilizados para medir  $P_G$  (pressão manométrica do gás) e  $DP_G$  (diferencial de pressão), na saída do separador, respectivamente.

Os medidores de pressão utilizados na entrada da Câmara de Expansão (Figura E. 10) possuem o certificado de calibração emitido pelo fabricante. O ajuste da retransmissão do sinal analógico de corrente (4-20 mA) foi feito utilizando apenas os limites de operação do instrumento.

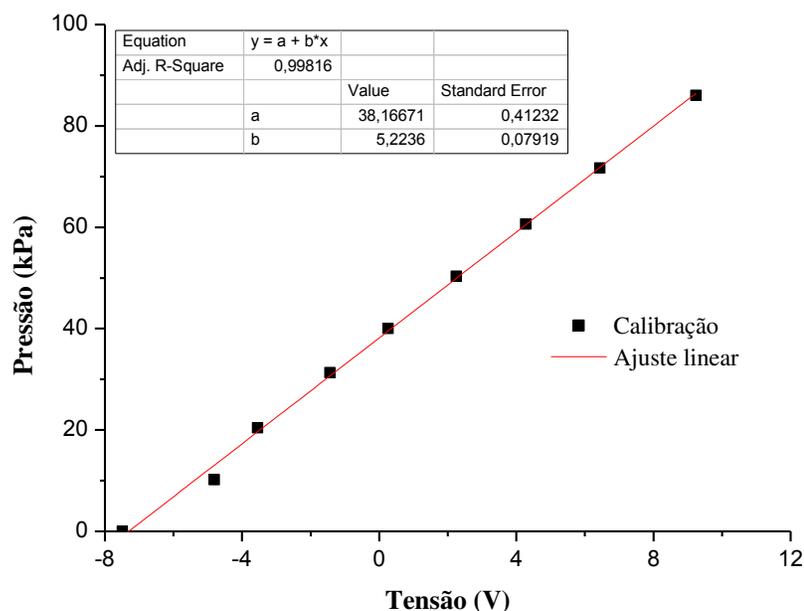


Figura A. 1 – Curva de calibração do transdutor de pressão na saída do separador ( $P_G$ ).

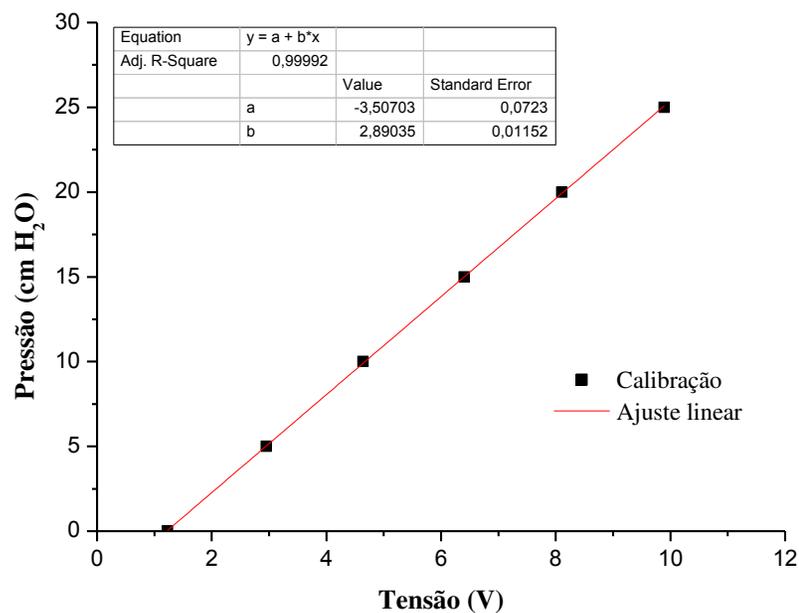


Figura A. 2 – Curva de calibração do transdutor de pressão na saída do separador ( $DP_G$ ).

A medição da temperatura foi realizada através de termoresistências do tipo Pt-100. As calibrações das termoresistências foram feitas por meio de um banho termostático e uma termoresistência padrão. O procedimento de calibração consiste em colocar as termoresistências imersas no banho termostático, fixar a temperatura do banho, medir essa temperatura por meio da termoresistência padrão e medir a resistência elétrica nos terminais dos sensores a serem calibrados. Repete-se esse procedimento tanto para o aquecimento quanto para o resfriamento do

banho, abrangendo toda a faixa de trabalho do instrumento, obtendo-se assim, a relação temperatura versus resistência para os instrumentos. A Figura A. 3 e a Figura A. 4 mostram o gráfico de calibração dos medidores tipo PT-100 utilizado para medir  $T_G$  na entrada e na saída de ar da Câmara de Expansão, respectivamente.

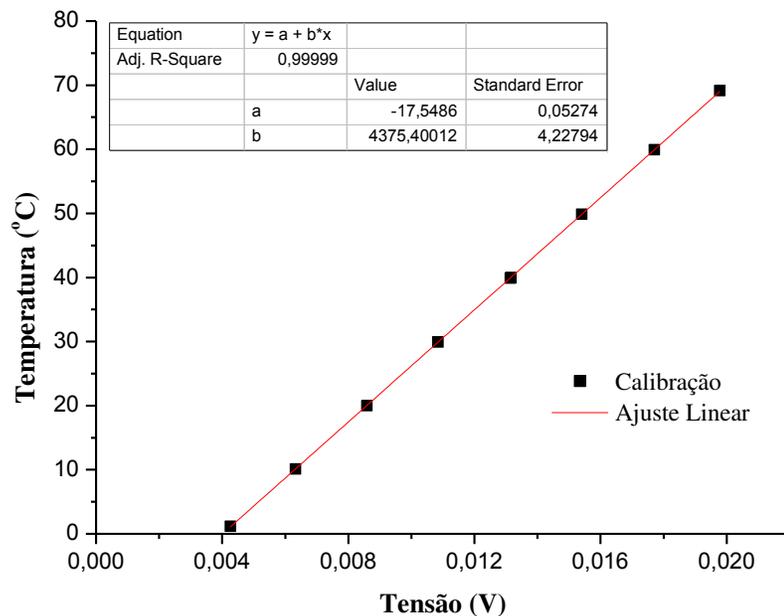


Figura A. 3 – Curva de calibração do sensor de temperatura ( $T_G$ ) na entrada do separador.

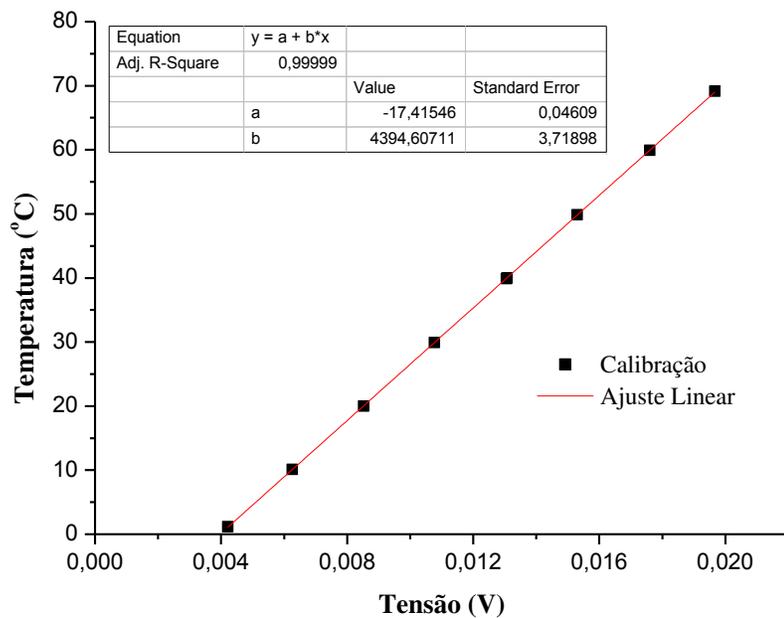


Figura A. 4 – Curva de calibração do sensor de temperatura ( $T_G$ ) na saída do separador.

Como mostrado no item 4.6 desse trabalho, os Elementos de Escoamento Laminar (LFE, de *Laminar Flow Element*) foram utilizados para a medição da vazão volumétrica de gás (entrada e saída do separador). Foram aplicados dois medidores com diferentes faixas operacionais, de acordo com a vazão medida. Assim como nos medidores de pressão na entrada do separador, os laminadores de fluxo possuem curva de calibração fornecida pelo fabricante e o ajuste da retransmissão foi realizado utilizando apenas os limites de operação do instrumento.

## APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

Quando se relata o resultado de uma medição de uma grandeza física, é obrigatório que seja dada uma indicação quantitativa da qualidade do resultado de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar sua faixa de dúvidas. Sem esta indicação, resultados das medições não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência dados numa especificação ou numa norma. Assim, a confiabilidade de resultados experimentais está associada ao grau de incerteza dessas variáveis.

Este apêndice apresenta a metodologia empregada na análise de incertezas associadas às grandezas estudadas neste trabalho. Esta metodologia é baseada no trabalho de Moffat de 1988.

### B.1 Matemática Básica para Análise de Incertezas por Amostragem Simples

Pesquisas experimentais em mecânica dos fluidos geralmente são experimentos de amostragem simples, onde cada ponto medido é verificado uma única vez, ou no máximo algumas poucas vezes. A seguir, é apresentada a metodologia para a análise das incertezas por amostragem simples.

Considere a variável  $x_i$ , na qual possui uma incerteza conhecida  $\delta x_i$ . A forma para representar essa variável é:

$$x_i = x_i(\text{medido}) \pm \delta x_i \quad (\text{B.1})$$

onde a melhor estimativa de  $x_i$  é  $x_i(\text{medido})$ . A incerteza de  $x_i$  tem 95% de probabilidade de estar entre  $\pm \delta x_i$ .

O valor de  $x_i(\text{medido})$  representa a observação em um experimento de amostragem simples, ou seja, representa a medida realizada. O valor de  $\delta x_i$  representa  $2s$ , onde  $s$  é o desvio padrão da população de possíveis medidas, das quais a única amostra  $x_i(\text{medido})$  foi realizada. O desvio padrão da população  $s$  pode ser calculado a partir do desvio padrão da amostra  $S$ , obtido do experimento utilizando-se a distribuição de Student.

O resultado R obtido a partir de um conjunto de medições de um experimento pode ser representado por:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (\text{B.2})$$

O objetivo consiste em expressar a incerteza no resultado calculado nas mesmas condições que foram utilizadas para estimar as incertezas nas medidas. Essa questão foi levantada por Kline e McClintock (1953) na qual eles mostraram que a incerteza do resultado calculado R pode ser estimada utilizando-se uma combinação dos efeitos individuais de cada variável sobre o resultado. Se apenas uma variável com incerteza associada é utilizada no cálculo do resultado R, a incerteza do resultado calculado devido ao efeito dessa variável é dado por:

$$\delta R_{x_i} = \frac{\delta R}{\delta x_i} \delta x_i \quad (\text{B.3})$$

A derivada parcial de R em função de  $x_i$  é o coeficiente de sensibilidade do resultado R em relação a variável  $x_i$ . Quando diversas variáveis independentes são utilizadas no cálculo de R, as incertezas individuais de cada variável são combinadas da seguinte forma:

$$\delta R = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta R}{\delta x_i} \delta x_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.4})$$

A Equação B.4 é válida quando as medições das variáveis são independentes e expressas com a mesma probabilidade. Quando o resultado calculado R é expresso na forma de produto das variáveis medidas, tal como na Equação B.5,

$$R = x_1^a \cdot x_2^b \cdot x_3^c \dots x_n^m \quad (\text{B.5})$$

a incerteza da grandeza calculada R pode ser expressa por:

$$\frac{\delta R}{R} = \left[ \left( a \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left( b \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left( m \frac{\delta x_n}{x_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.6})$$

Considerando as incertezas relativas  $\mu_R$  e  $\mu_{x_i}$  dadas pelas Equações B.7 e B.8, e substituindo-as na Equação B.6, tem-se uma forma conveniente (Equação B.9), de se expressar a incerteza da grandeza calculada R em função das incertezas relativas de cada variável independente  $\mu_{x_i}$ .

$$\frac{\delta R}{R} = \mu_R \quad (\text{B.7})$$

$$\frac{\delta x_i}{x_i} = \mu_{x_i} \quad (\text{B.8})$$

$$\mu_R = \left[ \left( a \cdot \mu_{x_1} \right)^2 + \left( b \cdot \mu_{x_2} \right)^2 + \dots + \left( m \cdot \mu_{x_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.9})$$

As incertezas relativas  $\mu_R$  e  $\mu_{x_i}$  representam um valor de incerteza em relação ao valor medido, ou seja, essa incerteza é uma fração do valor medido.

## **B.2 Análise de Incerteza para a vazão volumétrica do ar**

A vazão volumétrica de ar é calculada, tanto na saída como na entrada do separador, através de um medidor de elementos laminadores de fluxo, que leva em consideração o diferencial de pressão no medidor de fluxo, a pressão manométrica e a temperatura. A equação é dada pelo manual do fabricante do medidor e é expressa por:

$$Q_G = (B \times \Delta P + C \times \Delta P^2) \times \left( \frac{\mu_{std}}{\mu_G} \right) \times \left( \frac{T_{std}}{T_G} \right) \times \left( \frac{P_G}{P_{std}} \right) \quad (\text{B.10})$$

As constantes B e C são também fornecidas pelo fabricante a depender do medidor a ser usado. No caso, para o medidor instalado na entrada do separador, B = 0,404162 e C = -0,00362925, enquanto para o medidor instalado na saída, B = 1,07654 e C = -0,010176. O valor da incerteza associada à vazão volumétrica do ar é dada por:

$$u_{Q_G} = \sqrt{\frac{(B + 2C\Delta P)^2 \mu_{std}^2 P_G^2 T_{std}^2 u_{DP}^2}{\mu_G^2 P_{std}^2 T_G^2}} + \sqrt{\frac{(B\Delta P + C\Delta P^2)^2 \mu_{std}^2 P_G^2 T_{std}^2 u_{\mu_G}^2}{\mu_G^4 P_{std}^2 T_G^2}} + \sqrt{\frac{(B\Delta P + CDP^2)^2 \mu_{std}^2 T_{std}^2 u_{P_G}^2}{\mu_G^2 P_{std}^2 T_G^2}} + \sqrt{\frac{(B\Delta P + C\Delta P^2)^2 \mu_{std}^2 P_G^2 T_{std}^2 u_{T_G}^2}{\mu_G^2 P_{std}^2 T_G^4}} \quad (\text{B.11})$$

### B.3 Análise de Incerteza para a velocidade superficial do gás (ar)

A equação da velocidade superficial do ar é dada por:

$$J_G = \frac{Q_G}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (\text{B.12})$$

Portanto a incerteza associada ao cálculo da velocidade superficial do ar é:

$$u_{J_G} = \frac{D_{bocal}^2}{Q_G} \cdot \sqrt{\frac{4Q_G^2 \cdot u_{D_{bocal}}^2 + D_{bocal}^2 \cdot u_{Q_G}^2}{D_{bocal}^6}} \quad (\text{B.13})$$

#### B.4 Análise de incerteza para a velocidade superficial do líquido

A equação da velocidade superficial do líquido é dada por:

$$J_L = \frac{Q_L}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (\text{B.14})$$

Portanto a incerteza associada ao cálculo da velocidade superficial do líquido é dada por:

$$u_{J_L} = \frac{D_{bocal}^2}{Q_L} \cdot \sqrt{\frac{4Q_L^2 \cdot u_{D_{bocal}}^2 + D_{bocal}^2 \cdot u_{Q_L}^2}{D_{bocal}^6}} \quad (\text{B.15})$$

#### B.5 Análise de incerteza para a eficiência de separação

A eficiência de separação da Câmara de Expansão é calculada por:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{saída}}{\dot{m}_{entrada}} = \frac{(\rho_{std} \cdot Q_{G(std)})_{saída}}{(\rho_{std} \cdot Q_{G(std)})_{entrada}} \Rightarrow \eta = \frac{(Q_{G(std)})_{saída}}{(Q_{G(std)})_{entrada}} \quad (\text{B.16})$$

Portanto a incerteza associada ao cálculo da eficiência de separação é dada por:

$$u_\eta = \left[ (u_{Q_G})_{saída}^2 + (u_{Q_G})_{entrada}^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.17})$$

#### B.6 Precisão dos instrumentos de medição

A precisão dos instrumentos utilizados nos ensaios experimentais é dada conforme o catálogo do fabricante. Esses valores são apresentados na Tabela B. 1. A incerteza do instrumento será considerada igual à precisão declarada pelo fabricante, geralmente denominada Incerteza do Tipo B. Entretanto, a utilização dos instrumentos na faixa inicial de sua escala conduz à obtenção de incertezas mais elevadas.

**Tabela B. 1 – Precisão dos instrumentos de medição segundo o fabricante.**

<b>Variável</b>	<b>Representação</b>	<b>Precisão (catálogo)</b>	<b>Incerteza Relativa</b>
<b>P<sub>G</sub></b>	Pressão manométrica de ar (entrada/saída)	0,25% do fundo de escala	$u_{P_G} = \pm 0,25\%$
<b>ΔP</b>	Diferencial de pressão do ar (entrada/saída)	0,75% do fundo de escala	$u_{DP} = \pm 0,75\%$
<b>T<sub>G</sub></b>	Temperatura do ar (entrada/saída)	0,1% sobre o valor lido	$u_{T_G} = \pm 0,1\%$
<b>T<sub>L</sub></b>	Temperatura do líquido	0,1% sobre o valor lido	$u_{T_L} = \pm 0,1\%$
<b>D<sub>bocal</sub></b>	Comprimento medido com um paquímetro (digital)	0,01% sobre o valor lido	$u_{D_{bocal}} = \pm 0,02\%$
<b>Θ<sub>filme</sub></b>	Ângulo de inclinação do filme de líquido na parede do separador	1° sobre o valor lido	$u_{\theta_{filme}} = \pm 2\%$
<b>h</b>	Altura do filme de líquido na parede do separador	0,5 mm sobre o valor lido	$u_h = \pm 0,5\%$
<b>Q<sub>L</sub></b>	Vazão volumétrica do líquido	0,5% do fundo de escala	$u_{Q_L} = \pm 0,5\%$

### **B.7 Incertezas experimentais**

A seguir, são apresentadas as incertezas calculadas. A Tabela apresenta os resultados das incertezas calculadas para os experimentos realizados.

**Tabela B. 2 – Incertezas calculadas para os experimentos.**

<b>Variável</b>	<b>Incerteza relativa</b>
Vazão volumétrica de ar	$u_{Q_G} = \pm 1,87\%$
Velocidade superficial do ar (bocal 1'')	$u_{J_G(bocal1'')} = \pm 1,75\%$
Velocidade superficial do ar (bocal 2'')	$u_{J_G(bocal2'')} = \pm 1,03\%$
Velocidade superficial do líquido (bocal 1'')	$u_{J_L(bocal1'')} = \pm 3,15\%$
Velocidade superficial do líquido (bocal 2'')	$u_{J_L(bocal2'')} = \pm 1,38\%$
Eficiência de separação	$u_{\eta} = \pm 2,7\%$

## APÊNDICE C – TABELA DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Tabela C. 1 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 2”, Nível 1, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,50	2,51	4,43	26,6	26,7	26,7	12,23	1,05	100,8
2,53	2,54	6,01	26,4	26,6	26,7	12,39	1,07	100,0
2,54	2,58	7,58	25,8	26,2	26,8	12,83	1,11	101,2
2,54	2,54	9,20	25,5	25,7	26,7	12,78	1,15	100,4
2,51	2,48	10,62	23,2	23,2	26,3	12,38	1,33	99,2
2,51	2,51	12,16	23,3	23,5	26,5	12,71	1,32	100,4
4,03	4,08	4,44	23,8	24,5	26,8	25,27	1,54	100,9
4,00	4,02	5,91	24,0	24,7	26,8	24,91	1,52	100,9
4,02	4,11	7,48	24,6	25,3	26,9	25,61	1,50	101,8
4,01	4,05	9,06	24,7	25,2	27,1	25,77	1,48	101,3
4,07	4,12	10,46	24,7	25,3	27,1	26,60	1,50	101,0
4,08	4,15	12,00	25,1	25,5	27,5	27,16	1,48	101,4
5,53	5,58	4,42	24,9	25,8	27,5	40,59	1,75	100,9
5,55	5,59	5,91	25,4	26,2	27,6	40,58	1,72	100,7
5,54	5,57	7,28	27,2	27,6	27,9	41,75	1,68	100,2
5,54	5,55	8,95	27,0	27,8	28,2	41,99	1,68	100,1
5,53	5,58	10,55	26,8	27,8	28,2	42,33	1,68	100,6
5,54	5,53	11,93	26,9	27,9	28,5	42,47	1,67	99,8
7,01	7,05	4,09	26,9	27,8	28,4	58,34	1,99	100,5
7,01	6,96	5,99	26,8	27,9	28,4	58,34	1,97	99,1
7,02	7,04	7,10	26,6	27,6	28,4	58,51	1,97	100,3
7,03	7,00	9,03	26,5	27,5	28,4	58,63	1,96	99,4
7,04	7,00	10,46	26,3	27,3	28,6	59,08	1,96	99,5
7,06	7,06	11,86	26,0	27,1	28,7	59,48	2,01	100,0
8,04	7,99	4,56	25,1	25,7	28,6	69,64	2,24	99,5
8,05	8,01	5,91	24,7	25,2	28,5	69,27	2,26	99,7
8,05	7,99	7,53	24,5	25,2	28,7	69,47	2,27	99,3
8,06	8,03	8,94	24,3	25,0	28,7	69,87	2,28	99,7
8,07	7,95	10,54	24,0	24,8	28,7	70,08	2,27	98,4
8,01	8,00	11,96	23,9	24,6	29	69,92	2,28	99,7

Tabela C. 2 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 2”, Nível 2, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,50	2,51	4,46	29,4	29,3	25,5	12,02	1,08	100,0
2,50	2,50	6,03	29,3	29,4	25,6	11,99	1,06	99,9
2,54	2,54	7,62	29,3	29,3	25,7	12,55	1,07	99,2
2,51	2,51	9,01	29,1	29,2	25,8	12,56	1,05	99,6
2,52	2,54	10,58	29,0	29,1	25,9	12,95	1,10	100,2
2,53	2,53	12,12	29,1	29,1	26,1	13,43	1,06	99,4
4,07	4,07	4,46	28,7	28,9	26,3	25,68	1,34	99,9
4,05	4,07	6,11	28,6	28,9	26,3	25,61	1,34	99,9
4,05	4,02	7,50	28,6	28,8	26,5	25,65	1,35	99,5
4,07	4,11	9,14	28,7	29,0	26,6	26,32	1,36	101,3
4,06	4,06	10,49	28,9	29,2	26,7	26,35	1,35	100,1
4,06	4,08	12,05	29,0	29,2	26,9	26,73	1,36	100,1
5,56	5,57	4,42	28,5	28,7	27	41,46	1,66	100,1
5,53	5,52	5,92	28,4	28,7	27,1	41,07	1,65	99,7
5,54	5,51	7,57	28,2	28,6	27,1	41,41	1,65	99,2
5,54	5,49	9,01	28,0	28,5	27,1	41,43	1,66	99,3
5,54	5,51	10,51	27,7	28,3	27,4	41,82	1,68	99,5
5,52	5,49	11,99	27,6	28,1	27,5	41,80	1,65	99,3
7,05	7,01	4,46	27,4	27,9	27,6	58,50	2,01	99,4
7,05	6,92	5,95	27,3	27,8	27,6	58,33	1,98	98,2
7,07	7,02	7,63	27,1	27,6	27,7	58,89	2,03	99,1
7,05	6,99	9,06	26,8	27,5	27,8	58,84	2,02	99,3
7,09	7,02	10,48	26,6	27,3	27,9	59,59	2,05	98,7
7,08	6,99	12,09	26,3	26,9	28,1	59,62	2,04	98,4
8,07	7,85	4,50	26,1	26,7	28,1	70,25	2,26	97,4
8,01	7,85	6,04	25,8	26,5	28,1	69,52	2,26	98,0
8,05	7,84	7,48	25,8	26,3	28,1	70,07	2,26	97,4
8,02	7,81	8,99	25,6	26,2	28,1	69,88	2,26	97,3
8,09	7,90	10,60	25,5	26,2	28,2	70,97	2,29	97,7
8,04	7,85	12,03	25,3	26,0	28,2	70,57	2,28	97,1

Tabela C. 3 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 2”, Nível 3, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,54	2,41	4,48	22,4	22,4	26,8	11,75	1,35	95,0
2,54	2,25	6,08	22,5	22,5	26,9	11,48	1,31	88,3
2,55	1,76	7,69	22,5	22,5	26,9	11,10	1,23	71,7
2,53	1,80	9,06	22,5	22,5	26,9	11,25	1,22	70,0
4,08	3,91	4,48	22,6	22,7	27,3	25,76	1,57	95,4
4,05	3,63	6,16	23,3	23,5	27,4	24,14	1,46	89,0
4,06	3,15	7,53	23,1	23,5	27,4	23,22	1,38	76,4
4,01	3,17	8,93	23,1	23,4	27,3	23,19	1,39	79,6
5,61	5,44	4,47	23,1	23,5	27,4	41,00	1,80	97,0
5,61	5,05	6,02	22,9	23,2	27,5	39,74	1,74	90,1
5,62	4,45	7,48	22,8	23,2	27,4	38,36	1,63	79,0
5,62	4,68	9,05	22,8	23,1	27,5	39,36	1,67	82,7
7,03	6,82	4,45	22,7	23,0	27,7	56,97	2,10	96,8
7,07	6,46	6,03	22,6	23,0	27,7	56,13	2,03	91,5
7,14	5,97	7,53	22,6	23,0	27,7	55,67	1,94	82,3
7,09	5,98	9,16	22,5	22,9	27,9	55,43	1,95	84,8
8,04	7,72	4,48	22,4	22,8	28,1	68,46	2,31	95,8
8,01	7,33	6,08	22,4	22,7	28,1	67,16	2,23	91,2
8,10	6,81	7,41	22,2	22,8	28,2	66,69	2,14	83,4
8,08	6,89	9,08	21,7	22,3	27,7	66,63	2,18	85,3

Tabela C. 4 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 2”, Nível 2, sem redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,53	2,55	4,50	31,3	31,2	31,3	12,72	2,22	100,2
2,51	2,50	6,06	31,8	31,8	31,7	12,92	2,17	99,3
2,51	2,48	7,66	31,9	31,9	31,7	13,24	2,16	98,7
2,52	1,44	9,10	32,0	32,1	32	11,44	1,95	62,5
4,06	1,80	4,57	33,6	34,1	33	27,24	1,84	98,8
4,06	4,14	6,12	33,5	34,2	33,3	28,06	2,26	96,1
4,06	3,57	7,61	33,8	34,4	33,3	26,67	2,15	91,7
4,06	3,05	9,04	33,9	34,5	33,5	25,62	2,04	74,3
5,55	5,60	4,50	33,9	34,7	33,7	44,38	2,55	98,1
5,56	5,54	6,02	33,9	34,7	33,7	44,38	2,53	95,9
5,56	5,02	7,49	33,6	34,6	33,6	43,17	2,42	91,2
7,10	6,73	4,45	33,4	34,5	33,9	62,65	2,79	94,1
7,10	6,89	6,08	33,5	34,7	33,8	62,84	2,82	92,5
7,09	6,18	7,57	33,6	34,7	34	61,01	2,66	87,4
8,10	7,23	4,57	33,6	34,6	34,1	74,23	2,89	90,1
8,04	7,24	5,99	33,6	34,5	34,2	73,39	2,90	89,1
8,03	6,82	7,55	33,6	34,6	34,2	72,46	2,80	85,4

Tabela C. 5 – Teste de eficiência, ar-água, bocal 2”, Nível 1, sem redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,59	2,51	4,47	28,6	28,8	27,2	12,81	2,41	100,5
2,59	2,64	6,08	28,6	28,8	27,4	13,05	2,43	100,4
2,55	2,59	7,67	28,8	28,8	27,6	13,11	2,39	100,4
2,54	2,58	9,09	29,2	29,0	28	13,17	2,35	100,3
2,54	2,54	10,44	29,5	29,2	27,9	13,39	2,31	99,8
2,54	1,84	12,07	29,8	29,8	28,5	12,36	2,16	68,0
4,02	4,04	4,51	30,0	30,1	28,5	26,31	2,52	100,2
4,02	4,03	5,97	30,1	30,2	28,7	26,20	2,50	100,1
4,01	3,99	7,56	30,4	30,6	28,8	26,46	2,47	100,3
4,02	4,06	8,96	30,8	31,0	29,1	26,84	2,46	100,3
4,02	4,00	10,56	30,5	30,8	28,8	26,97	2,45	100,1
4,02	3,25	12,18	31,0	31,1	29,2	25,52	2,29	82,2
5,54	5,59	4,51	32,2	32,8	29,6	43,79	2,70	100,7
5,55	5,53	6,01	32,2	33,0	29,9	43,51	2,66	99,7
5,56	5,57	7,64	31,9	32,8	30,1	43,86	2,67	100,1
5,56	5,54	9,08	31,5	32,7	30,2	43,95	2,65	99,8
5,55	5,53	10,68	32,1	32,8	30,1	44,14	2,64	99,5
5,55	4,87	12,14	32,2	32,9	30,3	42,53	2,51	85,7
7,02	7,04	4,61	31,8	32,7	30,7	61,52	2,94	100,4
7,02	7,07	5,99	31,9	32,7	30,8	61,51	2,95	100,8
7,01	6,99	7,47	32,0	32,9	30,7	61,44	2,95	99,7
7,02	6,99	9,13	31,6	32,8	30,7	61,68	2,95	99,5
7,02	6,99	10,52	31,5	32,8	30,8	61,94	2,93	99,7
7,02	6,27	12,01	31,6	32,8	31	60,02	2,79	87,7
8,08	8,11	4,43	31,5	32,7	31,2	74,91	3,19	100,1
8,08	8,02	6,04	32,0	32,8	31,1	74,86	3,17	99,2
8,08	8,05	7,50	31,7	32,8	31,1	75,20	3,18	99,3
8,07	8,03	9,02	31,9	32,8	31,3	75,03	3,16	99,7
8,08	7,92	10,67	31,9	32,9	31,3	75,18	3,14	98,1
8,09	7,18	11,96	31,5	32,4	31,4	73,22	2,96	85,5

Tabela C. 6 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 1”, Nível 1, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\Theta_f$ [graus]	$h$ [m]	$\eta$ [%]
2,56	2,60	4,43	21,2	21,3	24,2	16,35	1,92	65	0,026	102,2
2,53	2,60	5,89	21,9	22,0	24,5	19,67	1,88	58	0,081	101,6
2,53	2,62	7,63	22,3	22,2	24,5	24,75	1,86	55	0,159	102,8
2,53	2,58	8,97	22,8	22,7	24,6	29,20	1,84	53	0,194	102,9
2,50	2,58	10,47	23,6	24,4	25,1	34,96	1,80	53	0,236	103,4
2,52	2,57	11,99	24,1	24,8	25,4	41,51	1,76	53	0,295	101,5
4,08	4,19	4,62	25,5	25,8	25,5	30,45	2,01	63	0,031	102,3
4,07	4,16	5,95	25,7	26,3	25,8	33,81	2,00	58	0,091	101,7
4,04	4,17	7,51	25,8	26,2	26	38,14	1,99	55	0,162	102,7
4,05	4,18	9,04	25,7	26,3	25,9	43,82	1,99	54	0,214	102,9
4,02	4,15	10,53	26,0	26,6	26,2	49,73	1,97	54	0,256	103,1
4,02	4,06	12,07	26,4	26,8	26,4	56,46	1,97	53	0,297	101,3
5,57	5,69	4,60	26,0	26,7	26,6	46,44	2,28	63	0,039	101,8
5,57	5,66	6,00	25,8	26,8	26,7	49,91	2,26	57	0,112	101,4
5,59	5,70	7,52	25,9	26,9	26,6	55,02	2,26	56	0,177	101,9
5,57	5,69	9,07	26,0	26,9	26,7	60,13	2,26	53	0,235	102,1
5,55	5,65	10,62	25,8	27,0	26,8	66,27	2,27	54	0,265	101,5
5,58	5,60	11,96	25,8	27,1	26,9	72,69	2,24	51	0,305	100,3
7,03	7,00	4,60	25,6	26,9	26,9	63,07	2,53	60	0,047	99,5
7,01	7,00	6,00	25,8	27,0	27,1	66,40	2,53	56	0,125	99,7
7,02	7,01	7,59	25,8	27,1	27	71,18	2,53	54	0,191	99,7
7,02	7,01	8,95	25,6	27,1	27	75,97	2,52	53	0,242	100,1
7,03	7,02	10,48	25,7	26,9	27,4	82,07	2,52	52	0,27	99,8
7,02	7,00	12,01	25,6	27,0	27,4	89,27	2,52	51	0,319	99,3
8,02	7,94	4,43	25,8	26,9	27,5	74,43	2,70	60	0,054	99,0
8,01	7,94	6,08	25,6	27,0	27,6	78,52	2,73	57	0,145	99,1
8,01	7,86	7,48	25,5	26,6	27,6	82,09	2,72	55	0,194	98,1
8,05	7,97	9,04	25,4	26,3	27,6	88,35	2,74	55	0,25	98,6
8,06	7,87	10,62	25,3	26,1	27,7	94,23	2,72	54	0,283	97,8
8,06	8,02	11,95	25,0	26,2	27,7	101,06	2,76	50	0,325	99,6

Tabela C. 7 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 1”, Nível 2, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,57	2,56	4,44	21,4	21,2	25,5	16,38	1,56	99,7
2,55	2,56	5,95	21,7	21,5	25,7	19,70	1,56	100,3
2,55	2,54	7,48	21,9	21,7	25,8	24,07	1,55	100,2
2,51	2,51	9,05	22,1	22,0	26	29,02	1,53	99,1
2,55	2,53	10,53	22,5	22,3	26,3	35,21	1,52	98,1
2,53	2,48	12,04	22,8	22,7	26,5	41,48	1,49	97,5
4,06	4,04	4,48	23,3	23,2	26,7	29,75	1,75	99,4
4,03	3,98	6,00	23,5	23,6	26,7	33,96	1,72	99,1
4,08	4,08	7,51	23,7	23,8	26,8	38,01	1,73	99,2
4,05	4,05	9,04	23,8	23,8	26,9	43,49	1,71	99,7
4,05	4,04	10,57	24,0	23,9	26,9	49,63	1,70	99,5
4,05	3,89	12,09	24,0	24,1	26,9	56,44	1,67	96,3
5,56	5,60	4,61	25,4	25,8	26,9	46,38	1,94	100,7
5,59	5,54	6,00	25,4	25,8	27,1	49,71	1,91	99,1
5,58	5,57	7,56	25,5	26,0	27,2	54,34	1,92	99,7
5,58	5,50	9,11	25,6	26,0	27,1	59,71	1,91	98,6
5,55	5,52	10,65	25,7	26,1	27,4	65,87	1,91	99,2
5,64	5,32	12,03	25,7	26,3	27,4	72,48	1,87	94,1
7,05	6,99	4,41	25,5	26,3	27,5	62,26	2,22	99,0
7,11	7,03	6,01	25,5	26,2	27,7	66,92	2,23	98,8
7,07	6,98	7,59	25,5	26,3	27,6	71,21	2,22	98,7
7,10	6,97	9,00	25,6	26,3	27,6	76,10	2,21	98,1
7,11	6,98	10,51	25,5	26,2	27,6	82,37	2,20	98,1
7,11	6,86	12,05	25,7	26,5	27,9	89,38	2,19	96,3
8,17	7,95	4,44	25,7	26,4	27,9	75,41	2,41	97,3
8,15	7,99	6,08	25,7	26,6	27,7	79,49	2,42	98,0
8,13	7,94	7,51	25,7	26,6	27,9	83,16	2,41	97,4
8,17	7,95	9,09	25,8	26,7	28	88,87	2,40	97,1
8,19	7,90	10,62	25,6	26,5	28	94,98	2,38	96,5
8,16	7,91	11,98	25,6	26,3	28,2	101,19	2,39	97,0

**Tabela C. 8 – Teste de eficiência, ar-água, bocal de 1”, Nível 3, com redutor de vórtice.**

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,56	2,53	4,62	23,2	23,2	26,8	16,55	1,52	98,2
2,56	2,41	5,99	23,6	23,5	26,9	19,60	1,48	76,8
2,55	1,88	7,50	24,0	23,6	27,2	23,22	1,36	64,7
2,53	1,74	9,10	24,1	23,7	27,2	28,16	1,34	64,8
4,03	4,01	4,67	24,1	23,9	27,3	30,02	1,74	99,5
4,05	3,63	6,06	24,3	24,3	27,3	32,58	1,65	85,9
4,03	3,28	7,61	24,5	24,6	27,6	36,42	1,57	75,8
4,07	3,38	9,13	24,6	24,6	27,7	42,47	1,58	82,4
5,57	5,50	4,58	24,8	25,0	27,6	46,08	1,93	98,5
5,58	5,21	6,06	24,8	25,0	27,8	48,76	1,86	89,7
5,58	4,71	7,65	24,8	25,1	27,9	52,50	1,75	82,2
5,56	4,71	8,99	24,9	25,2	27,9	57,07	1,75	85,1
7,07	7,01	4,68	24,9	25,3	28,1	63,20	2,22	99,2
7,08	6,68	6,06	24,9	25,2	28,1	65,92	2,14	94,1
7,10	6,22	7,65	24,9	25,3	28,1	69,39	2,06	85,7
7,11	6,04	9,05	24,9	25,4	28,2	73,84	2,01	84,7
8,11	8,07	4,43	24,9	25,4	28,2	75,16	2,43	100,0
8,15	7,95	6,07	25,0	25,5	28,2	79,22	2,40	97,2
8,12	7,10	7,51	25,1	25,6	28,3	80,62	2,23	86,4
8,19	7,16	8,93	25,2	25,6	28,4	86,12	2,23	88,0

**Tabela C. 9 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 2”, Nível 1, com redutor de vórtice.**

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,51	2,56	4,62	19,3	19,4	24,1	14,02	2,66	101,6
2,51	2,51	6,02	20,0	20,1	24,6	14,22	2,62	100,6
2,55	2,55	7,42	20,5	20,5	24,7	14,61	2,59	100,6
2,55	2,57	9,10	20,8	21,1	25,2	14,92	2,58	100,7
4,06	4,09	4,51	21,4	21,7	25,5	29,36	2,79	100,4
4,06	4,04	5,94	21,5	22,0	25,9	26,80	2,77	99,2
4,06	4,11	7,47	21,7	22,1	25,9	27,16	2,76	100,7
4,06	4,06	9,00	22,0	22,4	26,8	27,39	2,74	100,0
5,55	5,57	4,55	22,6	23,0	27,4	42,66	3,02	99,9
5,54	5,49	6,04	22,7	23,7	27,5	42,64	2,97	99,1
5,54	5,46	7,61	22,8	24,8	27,7	42,96	2,94	99,3
5,54	5,39	9,01	22,9	25,3	28,1	43,10	2,93	97,2
7,04	6,99	4,48	23,1	26,2	28,7	60,39	3,25	99,5
7,04	6,91	5,99	23,2	27,5	28,8	60,57	3,24	98,1
7,05	6,87	7,48	23,1	25,6	29,1	60,40	3,20	97,7
7,04	6,86	9,14	23,3	25,3	29,3	60,58	3,18	97,4
8,07	8,01	4,50	23,5	25,5	29,9	72,69	3,43	99,0
8,07	7,96	6,03	23,5	25,5	30	72,81	3,40	98,7
8,07	7,84	7,53	23,7	25,7	30,3	72,80	3,37	97,5
8,06	7,77	9,02	23,8	26,0	30,8	72,85	3,36	96,1

Tabela C. 10 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 2”, Nível 2, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,55	2,58	4,61	26,9	27,1	31,6	14,40	2,18	100,9
2,52	2,54	6,02	27,0	27,3	31,7	14,05	2,17	100,8
2,52	2,54	7,49	27,1	27,4	31,9	14,23	2,15	100,7
2,52	2,52	9,14	27,1	27,5	32,3	14,43	2,14	100,1
4,02	4,03	4,55	27,0	27,5	32,2	28,37	2,40	100,0
4,02	4,04	6,00	27,1	27,6	32,5	26,68	2,40	100,4
4,02	4,03	7,49	27,2	27,6	32,5	26,84	2,40	100,1
4,03	3,99	9,17	27,2	27,8	32,8	27,04	2,39	99,2
5,51	5,53	4,48	27,1	27,9	32,9	42,51	2,70	100,2
5,51	5,48	6,15	27,0	27,9	33	42,57	2,68	99,4
5,51	5,44	7,49	27,1	28,0	33,2	42,56	2,66	98,4
5,51	5,36	9,15	27,2	28,2	33,3	42,76	2,63	97,3
7,05	7,06	4,61	27,5	28,4	33,7	60,55	2,99	99,9
7,05	6,96	6,15	27,5	28,6	33,8	60,47	2,95	98,8
7,05	6,88	7,45	27,4	28,6	33,9	60,49	2,94	97,6
7,05	6,78	9,15	27,6	28,7	33,9	60,55	2,91	96,2
8,06	7,91	4,51	27,5	28,5	34,1	72,67	3,17	98,1
8,06	7,86	6,13	27,5	28,5	34,4	72,60	3,15	97,7
8,06	7,81	7,46	27,6	28,6	34,3	72,70	3,13	97,0
8,05	7,77	9,17	27,6	28,6	34,5	73,01	3,13	96,5

Tabela C. 11 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 2”, Nível 3, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,55	2,54	4,49	25,0	26,5	30	12,89	2,40	100,2
2,51	2,52	6,15	25,4	26,8	30,8	13,00	2,33	100,2
2,51	2,48	7,65	25,6	26,3	31,3	13,13	2,29	100,4
2,51	2,52	9,16	25,8	26,3	31,7	13,44	2,28	100,0
4,04	4,05	4,54	25,8	26,5	31,9	27,23	2,55	100,5
4,04	4,00	6,19	25,8	26,5	32,1	26,32	2,52	98,9
4,07	4,03	7,44	25,8	26,5	32,3	26,70	2,51	99,0
4,04	4,02	9,13	25,8	26,5	32,6	26,77	2,50	99,2
5,56	5,55	4,53	26,0	26,9	33,1	42,28	2,78	100,0
5,55	5,47	6,04	26,0	27,0	33,3	42,32	2,76	98,2
5,56	5,50	7,52	26,3	27,3	33,5	42,82	2,76	98,7
5,56	5,47	9,01	26,3	27,2	33,8	43,06	2,74	98,3
7,08	7,04	4,59	27,0	27,8	34,4	60,46	3,05	99,7
7,09	6,95	6,21	27,0	28,0	34,4	60,49	3,02	97,9
7,06	6,89	7,51	26,9	28,1	34,5	60,23	3,00	97,5
7,09	6,92	9,00	27,1	28,0	34,9	65,62	2,99	97,3
8,07	7,83	4,48	27,2	28,3	35	75,07	3,18	96,8
8,07	7,86	5,99	27,2	28,0	35,1	73,96	3,18	97,4
8,08	7,85	7,52	27,0	28,1	35,2	73,46	3,18	97,2
8,07	7,86	8,99	27,0	27,8	35,4	73,87	3,18	97,4

Tabela C. 12 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 1”, Nível 1, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\Theta_f$ [graus]	$h$ [m]	$\eta$ [%]
2,51	2,53	4,62	19,8	20,3	27,9	24,99	2,59	79	x	101,0
2,52	2,51	6,03	20,1	20,7	28,1	28,00	2,55	76	0,01	100,3
2,50	2,54	7,64	20,5	21,1	28,4	33,19	2,53	72	0,035	100,7
2,52	2,56	8,99	20,9	21,4	28,8	38,44	2,52	69	0,072	100,9
4,02	4,12	4,45	21,9	22,4	29,6	36,26	2,72	78	x	102,5
4,01	4,05	6,12	22,3	23,5	29,8	40,24	2,68	76	0,018	100,7
4,01	4,03	7,56	22,5	23,9	30,1	44,55	2,67	74	0,042	100,6
4,06	4,03	8,95	22,8	24,8	30,8	50,03	2,65	73	0,079	99,4
5,55	5,59	4,50	23,1	24,5	31,5	52,59	2,93	77	x	100,7
5,54	5,53	6,17	23,4	24,4	32	55,61	2,89	75	0,024	99,7
5,54	5,51	7,62	23,5	24,5	32,3	60,33	2,88	73	0,05	99,6
5,54	5,46	9,05	23,7	24,8	32,8	65,17	2,85	70	0,087	98,6
7,06	7,01	4,44	23,7	24,8	33,2	68,00	3,17	76	x	99,1
7,06	6,95	6,17	23,9	25,0	33,6	72,40	3,15	75	0,029	98,2
7,06	6,96	7,63	24,0	25,3	33,8	76,89	3,13	73	0,058	98,9
7,05	6,85	9,08	24,2	25,3	34	81,60	3,10	69	0,095	97,0
8,05	7,97	4,60	24,4	25,3	34,3	80,03	3,34	75	x	98,8
8,05	7,79	6,15	24,5	25,5	34,6	83,16	3,29	74	0,032	96,8
8,04	7,87	7,64	24,7	25,7	34,7	87,96	3,30	72	0,061	97,7
8,05	7,80	9,05	24,8	25,7	35	92,91	3,27	71	0,101	96,7

Tabela C. 13 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 1”, Nível 2, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,56	2,61	4,47	27,3	27,4	35	20,65	2,13	101,7
2,58	2,56	6,07	27,1	27,5	35,1	25,37	2,13	98,9
2,55	2,55	7,65	27,3	27,6	35,2	30,18	2,12	99,8
2,53	2,51	9,13	27,1	27,5	35,5	35,52	2,12	99,4
4,06	4,07	4,60	27,0	27,5	35,5	35,48	2,40	100,3
4,05	4,01	6,03	26,8	27,5	35,7	38,06	2,38	98,7
4,05	4,00	7,48	26,8	27,5	35,8	42,57	2,37	98,5
4,04	3,98	9,14	26,8	27,5	36	48,37	2,37	98,0
5,55	5,57	4,56	26,7	27,3	36,1	49,88	2,68	100,4
5,55	5,51	6,07	26,8	27,5	36,2	53,52	2,67	99,2
5,54	5,46	7,55	26,8	27,6	36,2	58,15	2,66	98,4
5,54	5,43	9,16	26,8	27,7	36,3	64,31	2,65	97,5
7,02	7,01	4,59	26,8	27,8	36,4	67,01	2,97	99,5
7,03	6,82	6,11	26,9	27,9	36,6	71,03	2,93	98,9
7,04	6,98	7,61	26,8	27,9	36,6	75,87	2,96	99,0
7,03	6,82	9,06	26,8	27,8	36,8	80,67	2,92	96,7
8,02	7,78	4,55	26,8	27,8	36,6	78,25	3,12	96,7
8,02	7,74	6,02	26,9	27,8	36,8	82,18	3,12	96,5
8,02	7,77	7,50	26,9	28,1	36,8	86,75	3,13	96,7
8,03	7,67	8,90	26,8	28,0	37	91,86	3,09	95,4

Tabela C. 14 – Teste de eficiência, ar-glicerina (83 cP), bocal de 1”, Nível 3, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,56	2,58	4,58	18,0	18,4	29,8	21,52	2,74	100,8
2,52	2,49	6,18	18,5	18,6	30	25,94	2,70	99,0
2,51	2,52	7,56	18,6	18,7	30,3	30,97	2,68	100,6
2,50	2,51	9,13	18,7	19,1	30,4	36,80	2,66	99,4
4,07	3,96	4,50	19,0	19,1	30,4	37,36	2,88	97,2
4,07	4,04	6,10	19,1	19,2	30,7	39,55	2,87	99,4
4,06	4,01	7,54	19,2	19,4	30,7	43,79	2,86	98,9
4,06	3,97	9,13	19,2	19,4	31	49,88	2,84	98,1
5,54	5,51	4,41	19,3	19,4	31	51,93	3,12	98,8
5,54	5,46	6,08	19,4	19,6	31,1	54,36	3,10	98,9
5,53	5,44	7,48	19,4	19,4	31,2	58,84	3,09	98,4
5,53	5,47	9,09	19,5	19,5	31,3	65,16	3,08	98,8
7,04	6,97	4,49	19,6	19,9	31,2	66,80	3,36	99,3
7,03	6,83	6,19	19,6	20,0	31,5	71,00	3,33	97,3
7,03	6,88	7,65	19,7	20,3	31,7	75,97	3,34	97,8
7,03	6,78	9,08	19,8	20,3	31,8	81,09	3,32	96,5
8,06	7,74	4,46	20,0	20,6	31,8	78,05	3,49	96,0
8,08	7,72	6,09	20,5	21,1	32,1	82,62	3,48	95,3
8,09	7,83	7,49	20,6	21,2	32,1	87,92	3,50	96,9
8,08	7,78	9,17	20,9	21,8	32,4	93,39	3,48	96,4

Tabela C. 15 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 2”, Nível 1, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,53	2,56	4,46	26,6	27,0	31,5	13,73	2,31	100,8
2,57	2,60	6,10	26,5	27,0	31,8	14,25	2,29	100,8
2,53	2,55	7,52	26,6	27,1	32,5	14,20	2,27	100,5
2,52	2,53	9,14	26,9	27,3	32,8	14,29	2,24	100,3
2,53	2,52	10,52	26,7	27,3	33,1	14,60	2,22	99,5
4,02	4,05	4,47	26,7	27,4	33,3	29,50	2,50	100,2
4,02	4,04	6,10	26,7	27,5	33,8	26,45	2,48	99,9
4,02	4,02	7,52	26,7	27,6	33,7	26,48	2,46	100,4
4,02	4,01	9,14	26,7	27,6	33,8	26,76	2,47	100,0
4,06	4,04	10,50	26,7	27,7	34,1	27,20	2,46	99,5
5,54	5,57	4,53	26,6	27,7	34,7	41,99	2,74	101,0
5,53	5,54	6,05	26,6	27,7	34,9	42,11	2,73	100,0
5,53	5,54	7,49	26,7	27,8	34,8	42,37	2,72	100,4
5,53	5,55	9,13	26,7	27,9	35	42,90	2,72	99,9
5,53	5,47	10,50	26,8	27,9	34,9	43,00	2,69	98,9
7,05	7,07	4,58	26,8	27,9	35,3	59,91	3,03	100,0
7,06	7,02	6,15	26,7	27,8	35,6	59,84	3,02	99,3
7,07	7,03	7,60	26,7	27,8	35,4	60,41	3,02	99,2
7,07	6,92	9,08	26,8	27,9	35,7	60,41	2,99	98,2
7,06	6,81	10,45	26,8	27,9	35,7	60,10	2,98	96,1
8,06	7,98	4,52	26,8	28,1	35,9	71,98	3,23	99,2
8,05	7,97	6,13	26,8	28,0	36,1	71,95	3,22	99,0
8,06	7,91	7,61	26,8	28,1	35,9	72,17	3,21	98,0
8,06	7,90	9,07	26,8	28,0	36	72,41	3,20	97,9
8,07	7,85	10,42	26,9	28,0	36,2	72,74	3,19	97,4

Tabela C. 16 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 2”, Nível 2, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,54	2,55	4,58	19,0	19,4	28,9	13,89	2,75	100,3
2,56	2,60	6,09	19,4	19,9	29,8	13,73	2,73	100,7
2,52	2,55	7,45	19,6	20,2	29,9	13,62	2,70	100,7
2,54	2,55	9,14	19,9	20,4	30	13,92	2,66	100,6
2,54	2,58	10,55	20,2	20,7	30,2	14,31	2,69	100,6
4,07	4,09	4,45	20,5	21,1	30,5	28,71	2,89	100,5
4,07	4,10	6,13	20,7	21,2	30,6	26,50	2,87	100,2
4,06	4,08	7,61	21,2	21,7	30,7	26,65	2,84	99,8
4,06	4,04	9,09	21,5	22,0	30,8	26,82	2,80	99,4
4,05	4,05	10,49	21,9	22,3	31,1	27,03	2,79	99,7
5,58	5,61	4,53	22,2	22,8	31,3	42,84	3,06	100,1
5,58	5,60	6,09	22,4	22,8	31,4	42,70	3,04	100,2
5,59	5,55	7,56	22,5	23,0	31,6	42,84	3,03	99,6
5,58	5,56	9,02	22,8	23,3	31,5	43,33	3,02	99,6
5,57	5,54	10,64	22,9	23,3	31,8	43,41	3,01	99,4
7,07	7,05	4,64	23,2	23,7	32,4	60,35	3,30	99,9
7,08	6,98	6,01	23,3	23,9	32,4	60,28	3,27	98,6
7,08	6,97	7,50	23,4	24,0	32,5	60,58	3,26	98,3
7,10	6,93	9,97	23,4	24,1	32,8	60,85	3,25	97,6
7,08	6,86	10,62	23,6	24,4	32,9	60,79	3,22	96,7
8,06	7,89	4,56	23,7	24,5	33,6	72,00	3,43	97,8
8,07	7,83	6,13	23,8	24,5	33,8	72,04	3,41	96,7
8,08	7,92	7,44	23,9	24,6	34,2	72,75	3,42	97,6
8,08	7,72	8,93	24,0	24,9	34,4	72,30	3,38	95,4
8,08	7,69	10,56	24,0	25,2	34,5	72,61	3,36	95,4

Tabela C. 17 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 2”, Nível 3, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,54	2,53	4,59	28,0	28,4	34,9	13,53	2,12	99,8
2,55	2,57	6,01	28,1	28,6	35,1	13,71	2,13	100,3
2,55	2,54	7,44	28,0	28,5	35,1	13,99	2,12	99,6
2,56	2,53	9,07	28,0	28,5	35,3	14,36	2,12	98,9
2,56	2,59	10,43	28,0	28,6	35,5	14,70	2,13	99,9
4,04	3,96	4,50	28,0	28,6	35,5	28,61	2,37	97,2
4,05	4,01	6,01	28,0	28,7	35,5	26,73	2,39	98,8
4,05	4,03	7,62	27,9	28,7	35,7	26,90	2,39	98,8
4,05	4,04	9,05	27,8	28,6	35,7	27,28	2,39	99,4
4,05	3,95	10,42	27,7	28,6	35,8	27,37	2,36	98,0
5,56	5,57	4,60	27,7	28,6	36,1	42,69	2,69	100,0
5,55	5,44	6,15	27,7	28,7	36,1	42,53	2,65	97,7
5,56	5,37	7,58	27,7	28,9	36,2	42,71	2,64	96,7
5,55	5,34	8,98	27,7	28,9	36,2	42,75	2,65	96,6
5,55	5,33	10,56	27,7	29,0	36,3	43,04	2,63	96,5
7,04	6,91	4,47	27,7	29,0	36,5	60,05	2,95	98,3
7,03	6,83	6,05	27,7	29,0	36,8	59,63	2,94	97,0
7,02	6,82	7,49	27,7	28,9	36,8	59,92	2,94	97,0
7,03	6,80	9,12	27,7	28,8	36,8	60,30	2,93	97,0
7,02	6,79	10,49	27,7	28,9	36,7	60,42	2,92	96,7
8,08	7,67	4,60	27,7	29,0	36,8	72,09	3,12	94,6
8,08	7,81	6,12	27,7	28,9	36,8	72,80	3,15	97,0
8,08	7,75	7,62	27,7	28,9	36,9	72,72	3,13	95,8
8,08	7,74	9,07	27,7	28,8	37,1	73,09	3,13	96,0
8,08	7,75	10,56	27,7	29,0	37,2	73,21	3,17	96,1

Tabela C. 18 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 1”, Nível 1, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\Theta_f$ [graus]	$h$ [m]	$\eta$ [%]
2,54	2,56	4,43	18,5	18,8	23,7	20,52	2,79	76	x	101,0
2,52	2,50	6,00	19,0	19,7	23,8	24,88	2,73	74	0,014	100,6
2,50	2,53	7,56	19,5	20,1	24,2	30,15	2,69	71	0,04	100,5
2,57	2,60	9,16	19,9	20,4	24,6	37,07	2,66	68	0,077	100,6
2,56	2,57	10,59	20,5	20,9	25,3	43,25	2,64	66	0,123	100,0
4,06	4,10	4,53	20,9	21,4	26,5	36,44	2,85	76	x	100,7
4,05	4,10	6,14	21,0	21,6	26,8	38,06	2,83	73	0,02	100,3
4,05	4,03	7,58	21,4	22,0	27,1	42,68	2,81	71	0,059	99,5
4,03	4,06	9,00	21,6	22,3	27,5	48,04	2,80	68	0,085	100,0
4,02	4,00	10,57	21,9	22,8	28,2	54,89	2,77	66	0,131	99,4
5,54	5,52	4,58	22,1	23,3	29,4	49,20	3,03	75	x	99,6
5,54	5,55	6,02	22,1	23,8	29,7	53,25	3,03	73	0,024	100,1
5,54	5,51	7,45	22,2	24,0	30,1	57,66	3,00	71	0,063	99,4
5,54	5,54	9,03	22,4	24,4	30,7	64,30	3,02	69	0,094	99,8
5,53	5,48	10,63	22,5	24,5	31,2	71,51	2,99	67	0,146	98,9
7,02	6,99	4,56	22,8	24,6	31,9	66,36	3,29	74	x	99,7
7,01	6,89	6,01	22,9	24,9	32,2	69,95	3,25	72	0,026	98,3
7,01	6,92	7,44	23,0	25,1	32,4	74,58	3,26	70	0,07	98,8
7,02	6,89	9,06	23,1	25,3	32,6	80,97	3,24	68	0,102	97,8
7,02	6,86	10,55	23,3	25,5	32,9	87,54	3,23	66	0,151	97,7
8,04	7,90	4,56	25,8	26,2	32,8	79,84	3,30	73	x	98,2
8,07	7,90	6,01	25,4	26,1	32,9	83,71	3,29	71	0,035	97,7
8,08	7,92	7,46	25,4	26,4	33	88,18	3,29	69	0,081	97,7
8,08	7,89	9,04	25,4	26,5	33,4	94,13	3,30	66	0,129	97,2
8,08	7,82	10,56	25,5	26,6	33,9	101,09	3,29	64	0,16	96,3

Tabela C. 19 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 1”, Nível 2, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,58	2,64	4,50	18,6	18,7	27,1	21,06	2,76	100,9
2,56	2,60	6,10	18,7	19,0	28,3	25,81	2,74	100,6
2,53	2,53	7,47	18,9	19,3	28,2	29,40	2,71	100,4
2,57	2,57	9,09	19,2	19,6	28,6	36,04	2,69	100,5
2,56	2,57	10,63	19,4	19,7	28,9	43,05	2,68	99,9
4,09	4,13	4,44	19,7	20,1	29,3	33,14	2,91	100,9
4,08	4,08	6,09	19,8	20,2	29,5	37,57	2,88	100,5
4,06	4,07	7,48	20,0	20,3	29,6	42,25	2,90	100,1
4,05	4,05	9,09	20,2	20,5	29,9	48,54	2,87	100,3
4,04	4,01	10,62	20,4	20,7	30,2	55,50	2,86	99,4
5,54	5,55	4,55	20,5	20,9	30,3	49,32	3,14	100,0
5,54	5,57	6,08	20,5	21,1	30,4	53,55	3,14	100,1
5,54	5,52	7,50	20,5	21,1	30,6	58,15	3,11	99,4
5,54	5,54	9,06	20,5	21,0	30,8	64,58	3,11	99,7
5,53	5,47	10,64	20,6	21,1	31	71,80	3,06	99,0
7,08	7,03	4,59	21,1	21,6	31,7	67,07	3,38	99,1
7,09	7,04	6,05	21,2	21,9	31,9	70,81	3,38	99,2
7,09	7,02	7,47	21,2	22,0	31,9	75,42	3,37	99,2
7,09	7,00	9,07	21,2	22,0	32,2	81,89	3,36	99,1
7,09	6,92	10,64	21,2	21,9	32,4	89,19	3,33	97,6
8,05	7,92	4,51	21,3	22,0	32,5	78,09	3,54	98,3
8,06	7,94	6,03	21,3	22,0	32,7	82,01	3,54	98,7
8,05	7,86	7,47	21,4	22,2	32,7	86,35	3,52	97,5
8,08	7,82	9,05	21,6	22,3	33,1	92,62	3,51	96,9
8,08	7,81	10,61	21,5	22,3	33,2	99,67	3,49	96,7

Tabela C. 20 – Teste de eficiência, ar-glicerina (53 cP), bocal de 1”, Nível 3, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,57	2,56	4,50	24,0	24,1	33,3	20,50	2,38	100,3
2,56	2,58	6,08	23,9	24,2	32,9	24,74	2,38	100,2
2,57	2,57	7,47	24,0	24,3	33,2	29,10	2,38	100,0
2,55	2,52	9,09	24,0	24,5	33,3	35,14	2,37	99,5
2,54	2,54	10,59	24,1	24,7	33,6	42,07	2,36	99,7
4,08	4,06	4,63	24,2	24,8	33,7	37,11	2,63	99,7
4,08	4,03	6,04	24,0	24,7	33,9	37,66	2,62	98,5
4,07	4,03	7,44	23,9	24,6	34	41,98	2,62	98,5
4,07	4,00	9,01	23,9	24,6	34	48,28	2,61	98,4
4,06	3,99	10,53	24,0	24,6	34,1	55,57	2,61	98,3
5,60	5,56	4,49	23,9	24,7	34,2	50,35	2,91	99,1
5,58	5,50	6,13	24,0	24,9	34,3	53,07	2,90	98,5
5,58	5,50	7,55	23,9	24,8	34,4	58,50	2,90	98,6
5,58	5,53	9,15	23,9	24,8	34,6	64,90	2,89	98,7
5,58	5,44	10,46	24,0	24,9	34,5	70,84	2,87	97,2
7,08	6,96	4,55	24,0	25,1	35	66,63	3,18	98,2
7,08	6,97	6,03	23,9	25,0	35	70,17	3,18	98,0
7,09	6,92	7,51	23,9	24,9	35	74,82	3,17	97,9
7,09	6,90	9,06	23,9	24,9	35,2	80,97	3,16	97,4
7,09	6,83	10,54	23,9	24,9	35,4	86,99	3,16	97,0
8,04	7,77	4,47	23,8	24,8	35,2	77,55	3,34	96,4
8,05	7,84	6,20	23,8	24,8	35,4	82,18	3,36	97,2
8,05	7,87	7,63	23,8	24,9	35,3	86,68	3,38	97,5
8,06	7,78	9,02	23,7	24,7	35,5	91,96	3,35	96,5
8,06	7,73	10,56	23,7	24,7	35,5	98,92	3,34	96,2

Tabela C. 21 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 2”, Nível 1, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,59	2,62	4,59	19,8	20,0	22,1	13,21	2,89	100,9
2,56	2,60	6,15	19,8	20,1	23,2	13,06	2,87	100,9
2,56	2,59	7,65	19,8	20,1	23,1	13,28	2,86	100,8
2,56	2,61	9,12	19,7	19,8	23,3	13,50	2,85	100,7
2,56	2,58	10,53	19,7	19,9	23,5	13,68	2,84	100,9
4,06	4,08	4,47	19,8	20,1	23,7	26,69	3,08	100,5
4,06	4,10	6,03	19,8	20,1	23,9	25,89	3,06	100,6
4,06	4,06	7,54	19,8	20,2	23,9	25,86	3,05	99,8
4,06	4,05	9,06	19,7	20,2	23,9	25,99	3,05	99,5
4,06	4,06	10,51	19,8	20,3	24	26,22	3,04	99,8
5,57	5,58	4,57	19,8	20,1	24,3	41,80	3,32	100,3
5,57	5,58	5,91	19,7	20,2	24,3	41,67	3,32	100,1
5,57	5,53	7,46	19,7	20,3	24,4	41,47	3,31	99,2
5,57	5,57	8,94	19,7	20,3	24,4	41,89	3,31	99,7
5,57	5,54	10,64	19,7	20,3	24,5	42,17	3,29	99,0
7,05	7,03	4,54	19,7	20,3	24,7	58,55	3,58	99,6
7,04	7,00	6,00	19,5	20,1	24,8	58,70	3,58	99,5
7,04	6,98	7,55	19,5	20,1	24,8	58,76	3,57	99,2
7,04	6,96	9,04	19,5	20,0	24,9	58,92	3,57	99,1
7,04	6,93	10,53	19,4	19,9	24,9	59,14	3,56	98,3
8,06	7,98	4,62	19,3	19,7	25	70,75	3,78	98,9
8,06	7,90	6,11	19,3	19,8	25,1	70,57	3,77	98,0
8,06	7,93	7,44	19,1	19,7	25,1	70,70	3,78	98,2
8,07	7,90	8,96	19,0	19,5	25,1	70,83	3,77	97,5
8,07	7,91	10,44	18,9	19,4	25,2	71,25	3,78	97,7

Tabela C. 22 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 2”, Nível 2, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,58	2,59	4,55	16,3	16,4	24,1	13,10	3,10	100,6
2,54	2,54	6,00	16,3	16,3	24,1	12,96	3,06	100,6
2,54	2,55	7,59	16,3	16,3	24,1	13,20	3,06	100,1
2,54	2,54	8,96	16,3	16,3	24,1	13,40	3,06	99,9
2,54	2,54	10,50	16,3	16,4	24,2	13,73	3,04	99,7
4,05	4,12	4,64	16,3	16,1	24,2	27,74	3,29	101,0
4,05	4,08	6,09	16,2	16,2	24,4	26,42	3,28	99,8
4,00	4,02	7,52	16,2	16,2	24,5	25,69	3,27	100,9
4,01	4,04	9,09	16,3	16,3	24,6	25,94	3,27	100,1
4,01	4,00	10,67	16,3	16,5	24,6	26,19	3,25	99,8
5,53	5,57	4,50	16,5	16,3	24,8	42,02	3,53	100,7
5,52	5,56	6,01	16,5	16,4	24,8	41,77	3,51	100,3
5,52	5,53	7,63	16,5	16,6	25	41,53	3,51	100,0
5,52	5,50	9,03	16,5	16,7	25	41,80	3,50	99,4
5,55	5,49	10,58	16,5	16,9	25,2	42,28	3,50	98,9
7,07	6,13	4,55	16,4	16,7	25,3	58,97	3,63	99,3
7,07	7,04	6,08	16,4	16,8	25,3	58,79	3,79	99,8
7,08	4,35	7,50	16,3	16,6	25,3	59,33	3,33	99,1
7,08	6,99	9,16	16,3	16,8	25,6	59,31	3,78	98,8
7,07	7,00	10,53	16,3	16,8	25,7	59,66	3,78	99,0
8,07	7,99	4,40	16,8	16,9	25,9	70,94	3,96	98,9
8,07	7,98	6,02	16,9	17,3	25,9	71,16	3,96	99,1
8,07	7,97	7,48	16,9	17,2	26	70,90	3,95	98,5
8,07	7,97	9,08	16,8	17,0	25,9	71,35	3,94	98,5
8,07	7,89	10,48	16,8	17,2	26	71,34	3,93	97,8

Tabela C. 23 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 2”, Nível 3, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,55	2,57	4,64	16,6	16,7	25,6	12,97	3,21	100,3
2,56	2,54	6,07	16,5	16,6	25,7	13,06	3,21	99,0
2,56	2,55	7,48	16,5	16,6	25,8	13,36	3,20	99,2
2,57	2,56	9,01	16,4	16,4	25,6	13,65	3,21	99,4
2,52	2,49	10,53	16,3	16,4	25,8	13,51	3,19	99,1
4,03	4,05	4,47	16,1	16,1	26,1	27,20	3,24	99,9
4,03	3,99	6,14	16,0	16,1	26	25,81	3,23	99,1
4,03	4,01	7,51	15,8	16,1	26,1	25,68	3,24	99,0
4,05	4,01	9,09	16,0	16,2	26	26,11	3,24	98,9
4,10	4,07	10,60	15,9	16,1	26,2	26,96	3,25	98,8
5,51	5,44	4,59	15,9	16,2	26,1	40,74	3,50	99,0
5,52	5,48	6,02	15,9	16,2	26,2	40,82	3,51	99,0
5,52	5,40	7,65	15,9	16,2	26,3	40,68	3,50	97,8
5,52	5,40	9,01	15,8	16,0	26,3	40,94	3,50	97,7
5,51	5,29	10,58	16,0	16,1	26,8	41,02	3,48	97,4
7,06	4,18	4,59	16,3	16,4	26,7	58,64	3,32	99,1
7,07	6,94	6,11	16,2	16,7	26,7	58,32	3,79	98,5
7,07	6,87	7,55	16,2	16,7	26,8	58,35	3,76	97,7
7,07	6,93	9,16	16,1	16,5	26,8	58,73	3,77	97,6
7,07	6,93	10,51	16,2	16,7	27	59,07	3,77	97,9
8,03	7,75	4,50	16,3	16,2	27	69,33	3,93	96,4
8,04	7,83	6,02	16,2	16,5	27,1	69,54	3,94	97,6
8,05	7,80	7,49	16,1	16,5	27,1	69,68	3,94	96,6
8,05	7,77	9,11	15,9	16,4	27,3	69,88	3,93	96,3
8,05	7,80	10,53	15,8	16,3	27,2	70,46	3,94	96,8

Tabela C. 24 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 1”, Nível 1, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\Theta_f$ [graus]	$h$ [m]	$\eta$ [%]
2,58	2,63	4,65	22,1	22,3	26,2	20,85	2,73	71	x	101,2
2,53	2,53	6,00	22,6	22,8	28	23,26	2,65	69	0,019	100,9
2,54	2,56	7,56	22,9	23,1	28,1	28,31	2,63	66	0,065	100,6
2,53	2,53	9,06	23,4	23,7	28,4	33,95	2,58	64	0,112	100,2
2,52	2,57	10,59	23,6	23,7	28,7	40,65	2,56	62	0,157	100,6
4,07	4,12	4,54	23,9	24,1	29,1	35,75	2,81	70	x	100,7
4,07	4,09	6,04	24,1	24,5	29,2	37,37	2,76	68	0,024	100,1
4,06	4,05	7,55	24,4	24,8	29,5	42,15	2,74	66	0,075	99,6
4,05	4,07	9,05	24,5	25,0	29,7	48,25	2,72	64	0,13	99,8
4,01	4,01	10,66	24,9	25,2	30,2	54,48	2,69	62	0,177	99,5
5,57	5,61	4,57	24,9	25,4	31,1	49,72	2,98	69	x	100,1
5,57	5,61	5,97	25,0	25,7	31,4	53,18	2,96	68	0,032	99,8
5,56	5,56	7,54	25,3	26,0	31,6	57,99	2,94	66	0,085	99,7
5,56	5,52	9,09	25,3	26,0	31,9	63,82	2,92	63	0,138	99,2
5,55	5,46	10,57	25,6	26,1	32,3	70,62	2,90	61	0,185	98,2
7,07	7,03	4,57	28,5	28,5	32,7	68,84	3,09	68	x	99,2
7,09	7,03	5,98	28,3	28,8	33,4	71,33	3,08	66	0,037	99,0
7,10	6,98	7,53	28,1	29,0	33,3	76,27	3,05	64	0,102	98,2
7,07	6,95	9,00	28,5	29,2	33,6	81,98	3,03	63	0,143	98,1
7,07	6,90	10,50	28,3	29,1	33,7	88,82	3,02	61	0,198	97,6
8,03	7,91	4,60	28,5	29,4	34,1	78,70	3,23	67	x	98,2
8,02	7,85	6,05	28,5	29,5	34,2	82,58	3,21	65	0,051	97,6
8,01	7,83	7,44	28,5	29,4	34,3	86,65	3,21	64	0,11	97,4
8,05	7,86	8,97	28,5	29,4	34,5	93,10	3,21	62	0,152	97,6
8,09	7,84	10,46	28,7	29,5	34,7	100,28	3,18	60	0,208	97,0

Tabela C. 25 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 1”, Nível 2, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,56	2,58	4,45	35,0	35,2	30,8	19,70	1,91	100,7
2,56	2,55	6,01	35,0	35,1	31,5	23,67	1,89	100,6
2,56	2,57	7,55	35,0	35,1	32,1	28,57	1,89	100,5
2,56	2,57	9,03	35,1	35,3	32,3	34,36	1,88	100,0
2,55	2,54	10,50	35,1	35,2	32,6	41,10	1,86	99,1
4,04	4,07	4,51	34,9	35,0	33	35,38	2,15	100,2
4,04	4,08	6,08	34,8	35,0	33,1	37,99	2,17	100,6
4,03	4,11	7,59	34,8	35,1	33,1	42,94	2,16	100,9
4,02	4,00	9,13	34,9	35,1	33,4	48,58	2,13	99,4
4,02	4,00	10,61	34,8	35,1	33,4	55,60	2,14	98,8
5,53	5,54	4,53	34,6	34,8	33,8	50,68	2,48	100,2
5,53	5,54	6,14	34,7	35,1	33,9	54,48	2,46	99,9
5,53	5,54	7,54	34,6	34,9	34	58,66	2,46	100,1
5,52	5,47	9,10	34,6	34,9	34,1	64,47	2,45	98,9
5,51	5,46	10,61	34,6	35,1	34,3	71,79	2,44	98,6
7,09	7,13	4,56	34,4	35,1	34,9	68,84	2,81	100,3
7,09	7,07	6,06	34,3	34,9	35,2	73,04	2,80	99,8
7,10	7,00	7,62	34,1	34,6	35,4	77,82	2,78	98,8
7,10	7,03	8,97	34,0	34,6	35,4	83,04	2,79	99,0
7,10	6,95	10,48	33,9	34,5	35,6	89,72	2,78	97,9
8,09	8,03	4,45	33,7	34,3	35,7	81,46	3,02	99,2
8,09	8,01	6,11	33,5	34,2	35,9	85,52	3,03	98,8
8,10	7,99	7,51	33,4	34,0	36,1	89,84	3,03	98,9
8,10	8,04	9,08	33,3	34,0	36,1	95,79	3,05	99,0
8,11	7,87	10,60	33,3	33,9	36,2	102,31	3,01	97,0

Tabela C. 26 – Teste de eficiência, ar-glicerina (23 cP), bocal de 1”, Nível 3, com redutor de vórtice.

$Q_{G(e)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{G(s)}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_L$ [m <sup>3</sup> /h]	$T_{G(e)}$ [°C]	$T_{G(s)}$ [°C]	$T_L$ [°C]	$P_{G(e)}$ [kPa]	$P_{G(s)}$ [kPa]	$\eta$ [%]
2,56	2,59	4,53	20,0	20,2	22,7	19,69	2,90	100,3
2,56	2,55	6,11	20,1	20,3	23,2	23,99	2,89	100,2
2,56	2,59	7,45	20,2	20,3	23	28,29	2,88	100,3
2,55	2,56	8,95	20,2	20,4	23,4	33,89	2,85	99,7
2,55	2,51	10,66	20,3	20,5	23,8	41,28	2,82	98,5
4,06	4,06	4,63	20,4	20,5	24,3	34,16	3,06	99,5
4,05	4,04	6,04	20,5	20,6	24,3	36,60	3,06	99,6
4,07	4,03	7,56	20,5	20,7	24,7	41,59	3,04	98,9
4,08	4,03	9,07	20,5	20,9	24,7	47,57	3,04	98,4
4,08	3,97	10,56	20,6	21,0	24,8	54,36	3,01	97,5
5,58	5,51	4,51	20,7	21,1	25,2	49,35	3,28	98,5
5,54	5,45	6,11	20,7	21,1	25,3	52,46	3,30	98,0
5,54	5,44	7,47	20,8	21,2	25,4	56,59	3,26	97,9
5,53	5,39	8,96	20,8	21,3	25,5	62,38	3,25	97,3
5,53	5,32	10,46	20,9	21,4	25,5	69,07	3,23	96,0
7,08	6,97	4,52	21,1	21,4	26,2	66,11	3,55	97,9
7,07	6,93	5,98	21,1	21,5	26,4	69,47	3,54	97,9
7,07	6,84	7,55	21,2	21,6	26,5	74,32	3,53	96,6
7,11	6,95	9,07	21,3	21,8	26,4	80,94	3,52	97,7
7,07	6,77	10,55	21,4	21,9	26,5	87,00	3,48	95,7
8,11	7,91	4,57	23,2	23,4	26,7	79,24	3,61	97,3
8,02	7,80	6,04	22,9	23,5	26,9	81,10	3,59	97,7
8,02	7,81	7,49	22,9	23,6	27	85,40	3,59	97,2
8,02	7,64	9,03	22,8	23,6	27,1	90,87	3,55	95,2
8,01	7,63	10,57	22,8	23,6	27,4	97,69	3,54	95,3



## APÊNDICE D – GRÁFICOS PARA A MISTURA AR-GLICERINA

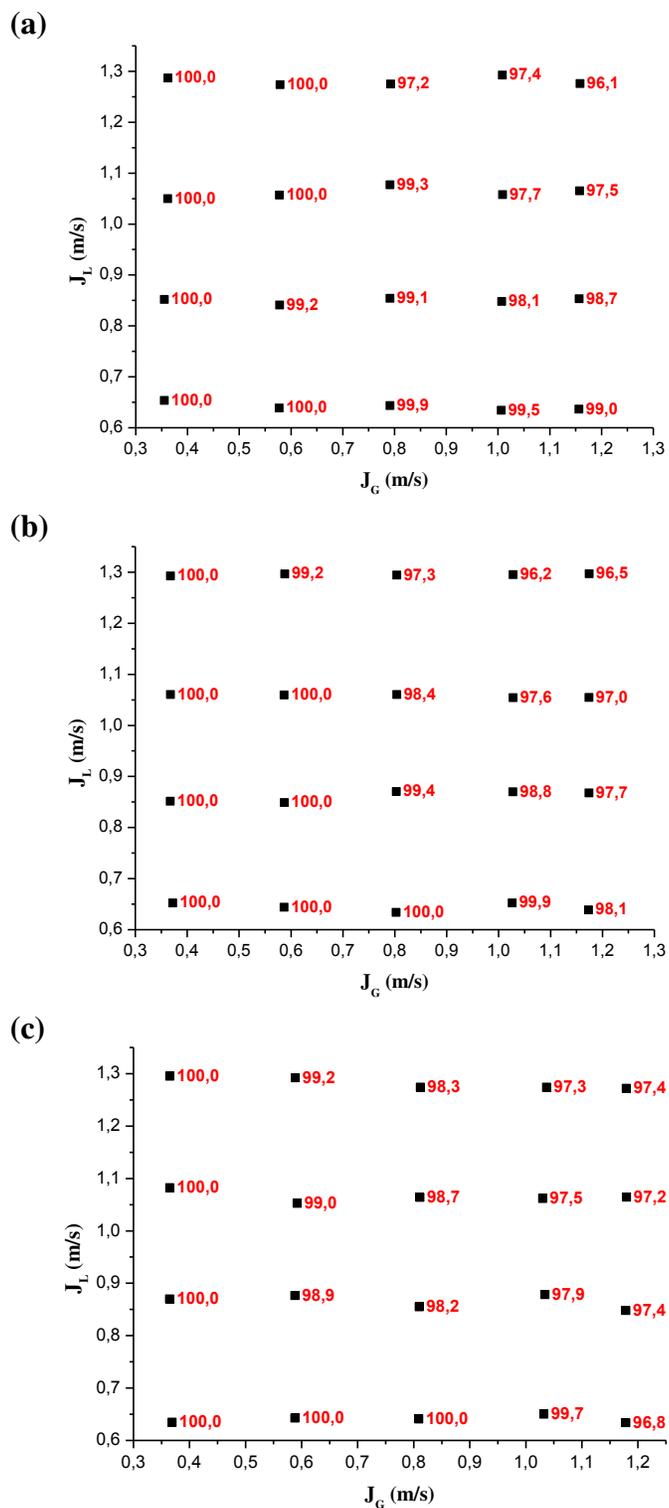


Figura D. 1 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (83 cP) e bocal 2” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência  $u_{\eta} = 2,7\%$ .

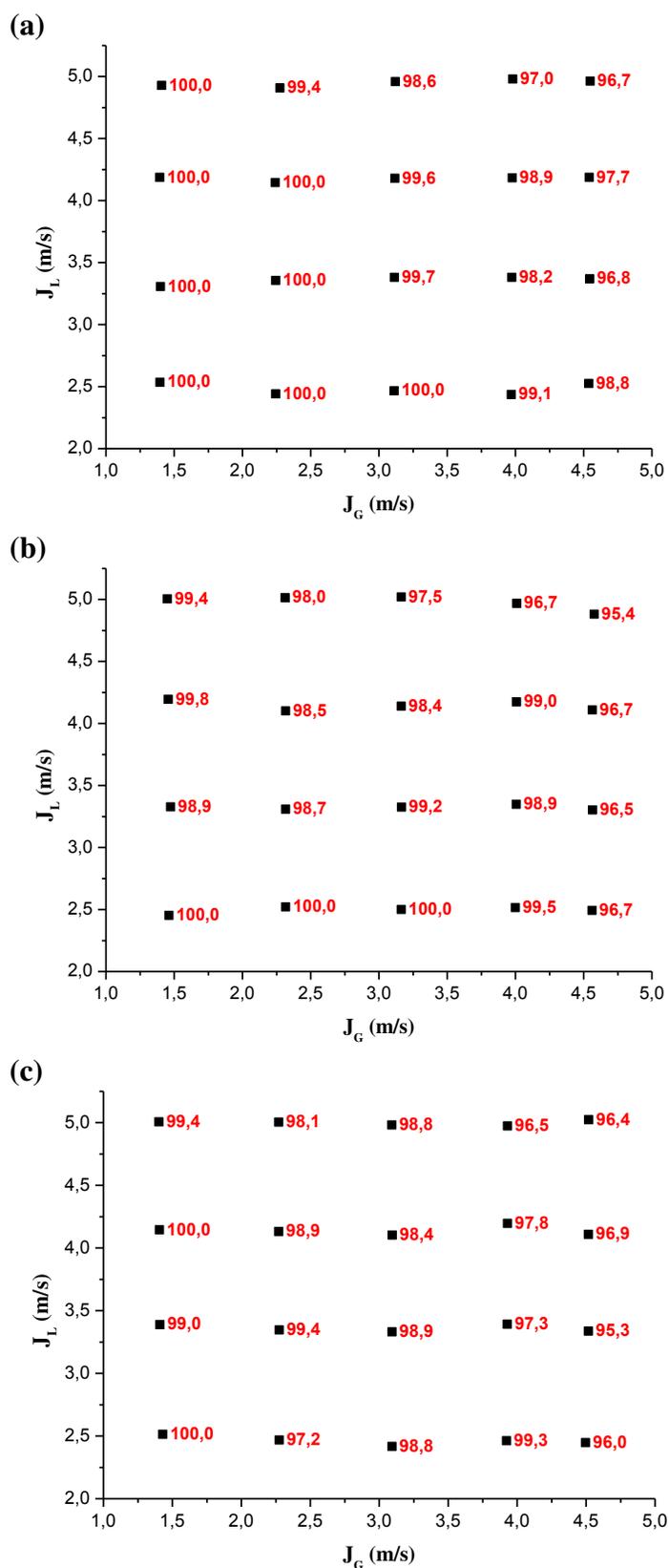


Figura D. 2 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (83 cP) e bocal 1” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência  $u_\eta = 2,7\%$ .

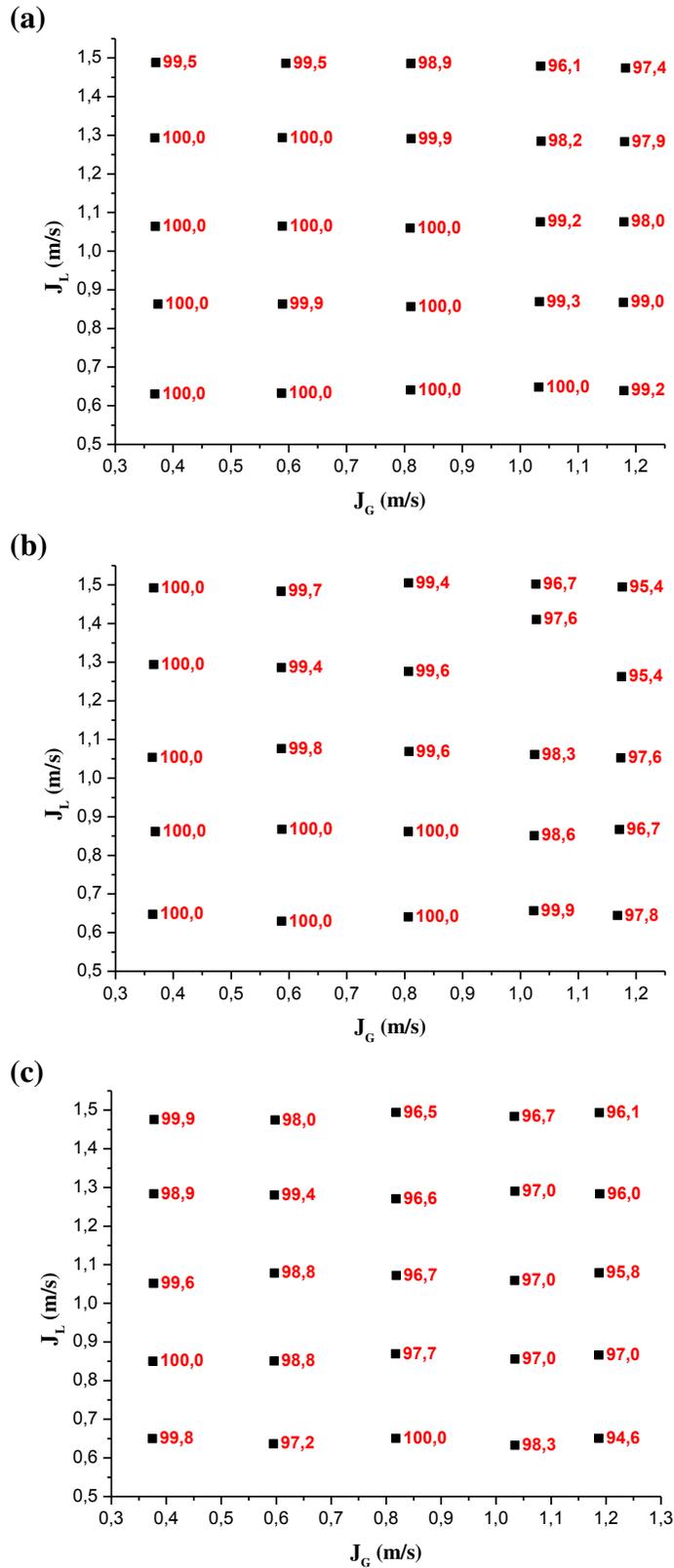


Figura D. 3 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (53 cP) e bocal 2” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência  $u_\eta = 2,7\%$ .

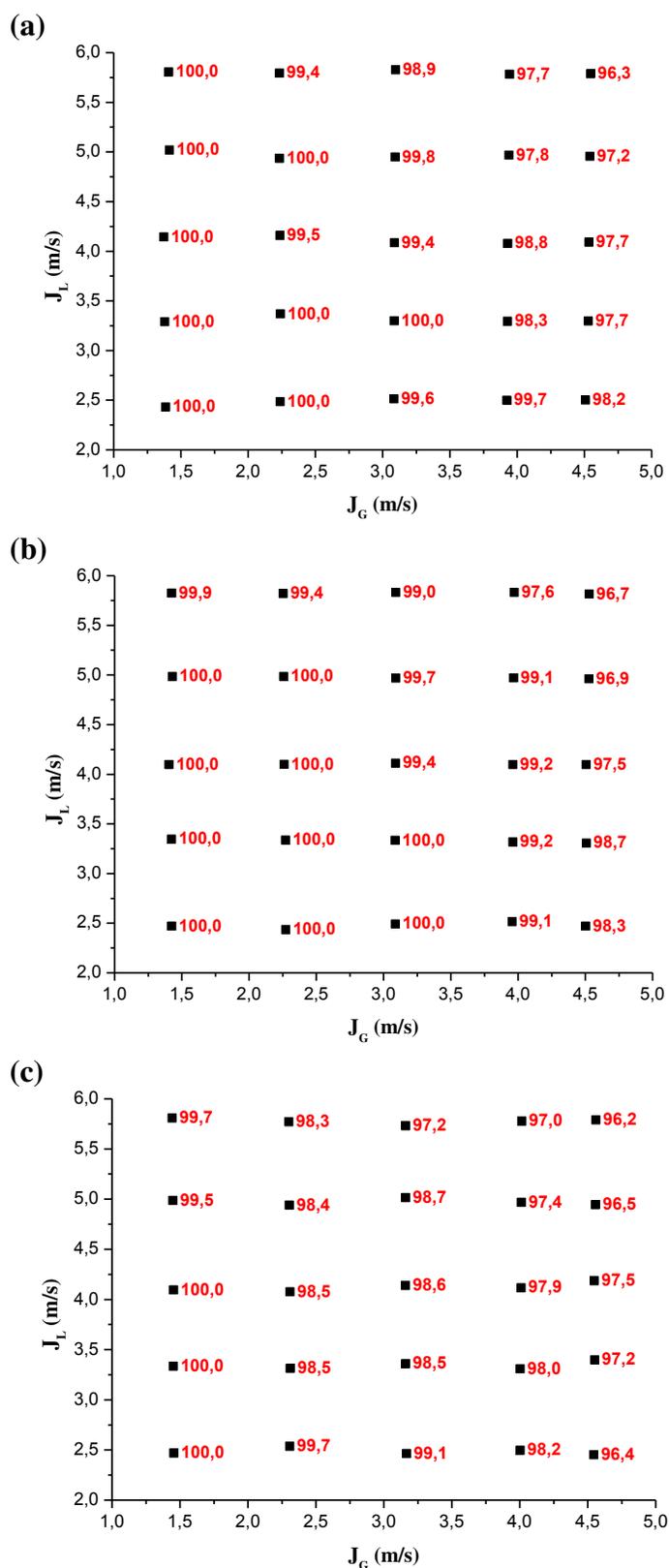


Figura D. 4 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (53 cP) e bocal 1” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência  $u_\eta = 2,7\%$ .

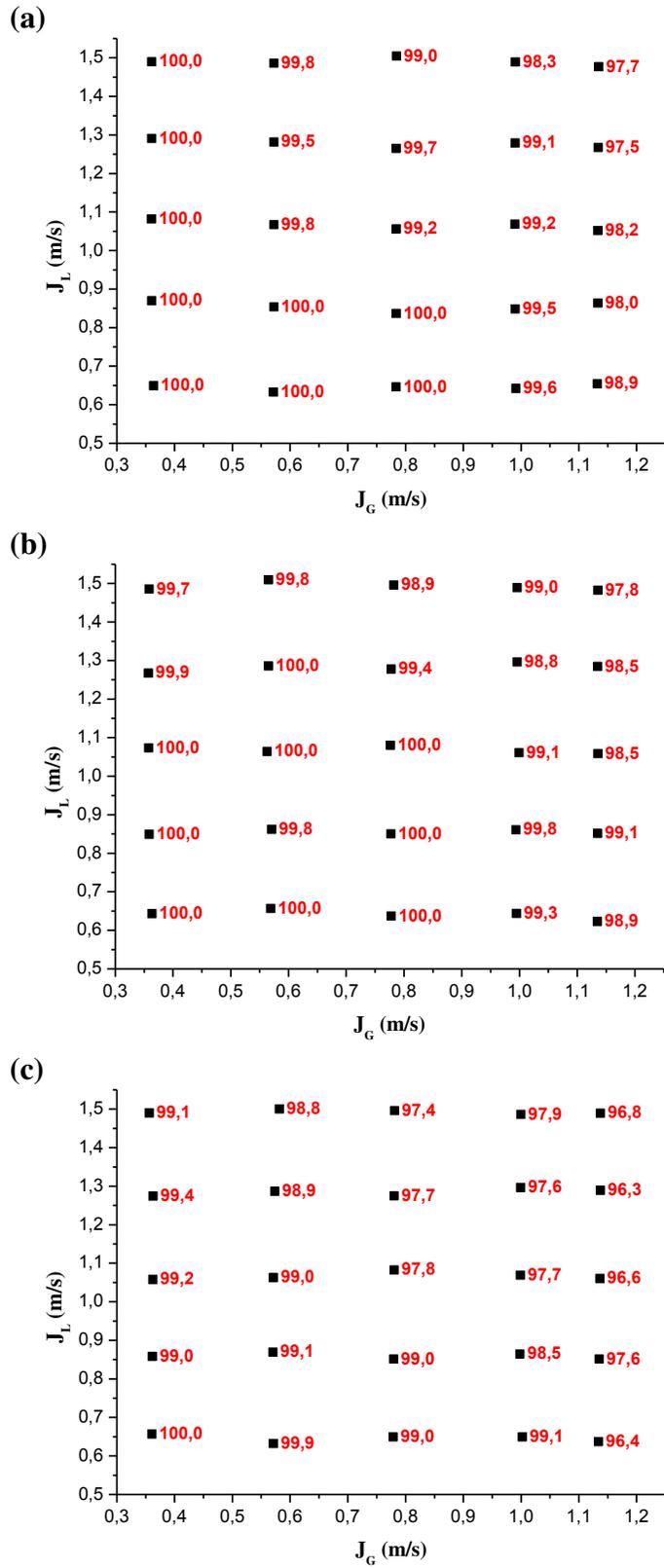


Figura D. 5 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (23 cP) e bocal 2” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência  $u_{\eta} = 2,7\%$ .

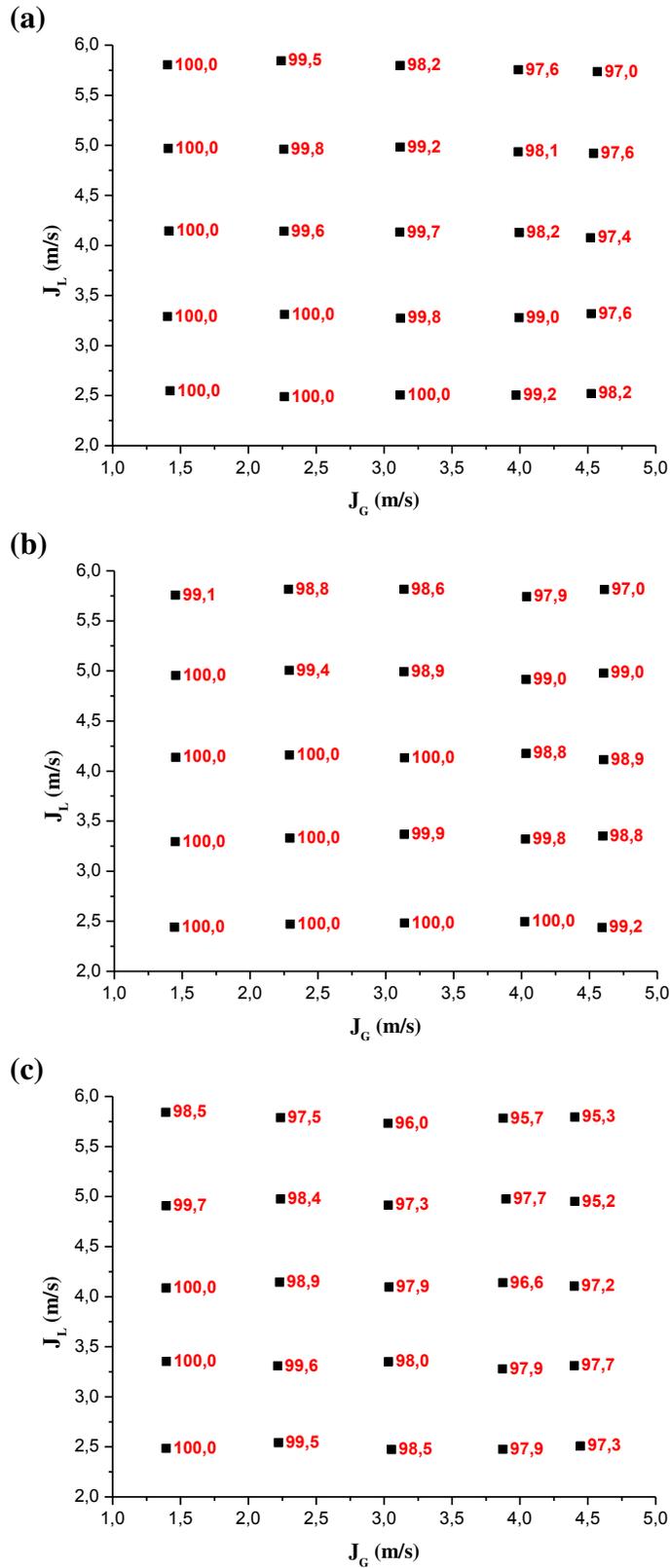


Figura D. 6 – Gráfico do tipo matriz com a eficiência de separação para mistura ar-glicerina (23 cP) e bocal 1” para: (a) Nível 1; (b) Nível 2; (c) Nível 3. Incerteza da eficiência  $u_{\eta} = 2,7\%$ .

## APÊNDICE E – FOTOS DA MONTAGEM EXPERIMENTAL



Figura E. 1 - Vista geral (foto) do tanque de armazenamento de água ou glicerina.



Figura E. 2 – Bomba centrífuga instalada na linha de entrada de líquido do separador.



Figura E. 3 – Bomba centrífuga instalada na linha de saída de líquido do separador.



Figura E. 4 – Foto dos inversores de frequência para as bombas (entrada e saída).

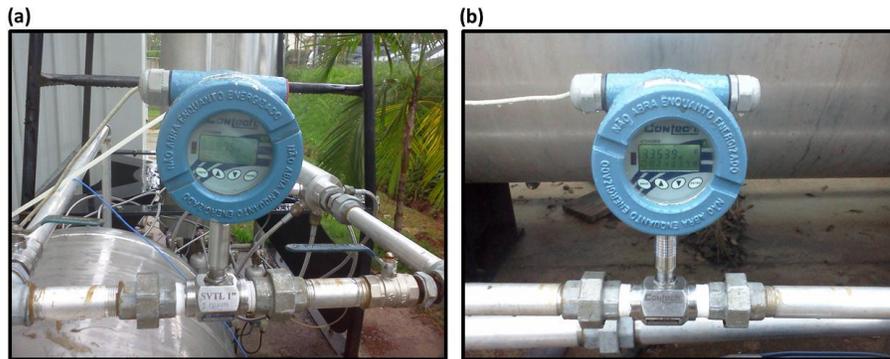


Figura E. 5 – Medidores de vazão de líquido; (a) Entrada; (b) Saída.



Figura E. 6 – Carrinho onde foram instalados o conjunto de instrumentos necessários para medir a vazão volumétrica de ar.

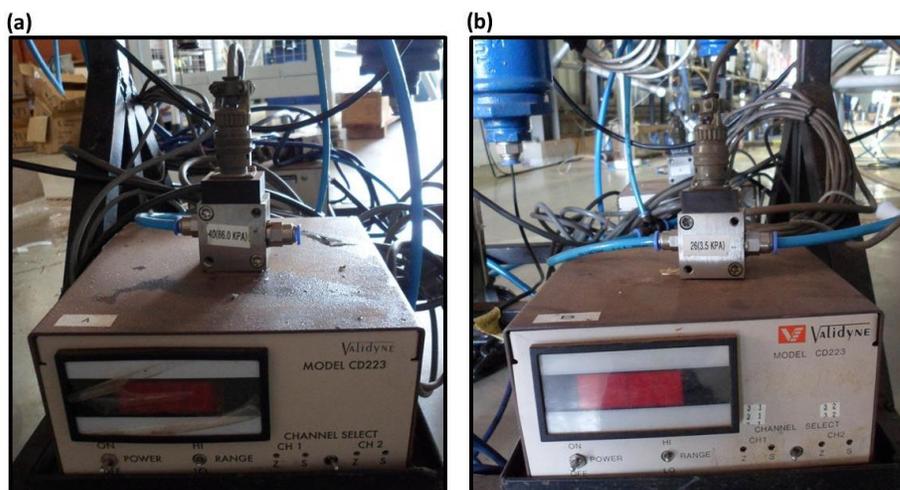


Figura E. 7 – (a) Transdutor digital (CD223) e transdutor de pressão com sensor 40; (b) Transdutor digital (CD223) e transdutor de pressão com sensor 26.



Figura E. 8 – Elementos de escoamento laminar.

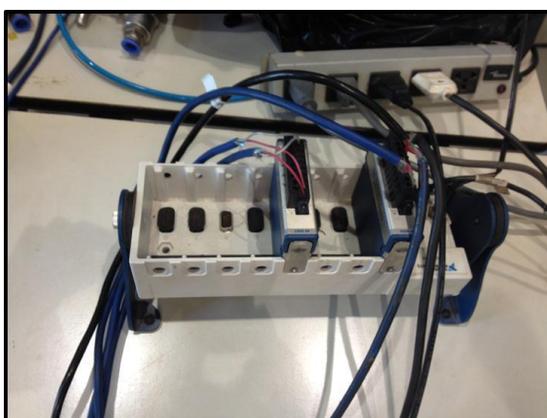


Figura E. 9 – Foto dos módulos de aquisição de dados instalados no chassi NI USB 9162/9172.

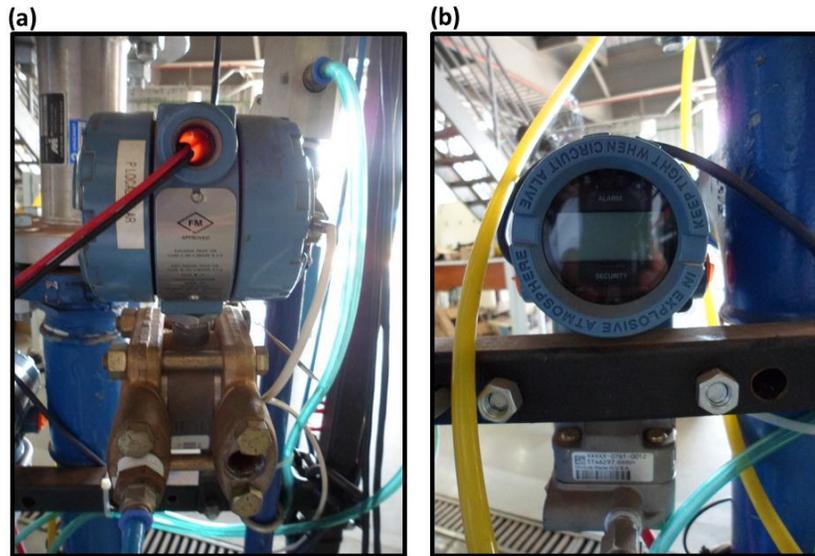


Figura E. 10 – (a) Medidor de pressão manométrica na entrada de gás; (b) Medidor de diferencial de pressão na entrada de gás.