UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

Luiz Carlos Tosta da Silva

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE POÇO ALOJADOR DE BOMBEIO

RIO DE JANEIRO – RJ
2010

Luiz Carlos Tosta da Silva

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE POÇO ALOJADOR DE BOMBEIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Orientador: Ricardo de Andrade Medronho

RIO DE JANEIRO – RJ

2010

Simulação Numérica de Poço Alojador de Bombeio

Luiz Carlos Tosta da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS DA ESCOLA DE QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

Orientada por:

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
(Presidente da Banca)

Aprovada por:

Prof. Marcio Nele de Souza, D.Sc.

Prof. Príamo Albuquerque Melo Jr., D.Sc.

Prof. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales, D.Sc

Dr. Valdir Estevam, D.Sc.

Rio de Janeiro – RJ, Brasil
23 de Fevereiro de 2010

Tosta da Silva, Luiz Carlos

Simulação Numérica de Poço Alojador de Bombeio / Luiz Carlos Tosta da Silva - 2010.

150 f.: il.

Dissertação M.Sc. – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola de Química - EQ, Rio de Janeiro, 2010.

Orientador: Ricardo de Andrade Medronho

1. Introdução. 2. Revisão Bibliográfica. 3. Metodologia. 4. Resultados e Discussões. 5. Conclusão e Recomendações – Tese. I. Medronho, Ricardo de Andrade. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. III. Título.

Dedico este trabalho a Isabela Brito pelo amor
que não me deixou esmorecer e pelos
valores e sonhos compartilhados
por tantos anos.

Aos meus filhos que hoje
enchem minha vida de alegrias e a todos
que me ajudaram nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as graças e realizações.

Agradeço a meus Pais pela minha existência e a Tia Deborah por todo o apoio, acolhimento e pela oportunidade oferecida para que eu pudesse chegar onde estou.

Sou muito grato aos meus colegas de trabalho pela amizade, carinho e presteza.

Agradeço enormemente a minha esposa Isabela, pelo seu companheirismo incondicional, amor verdadeiro e o incentivo, que foram fundamentais durante a execução deste trabalho.

Em especial, agradeço ao meu orientador, Ricardo de Andrade Medronho, pela receptividade, pelo conhecimento passado, pela troca de experiências, ideias, sugestões, pelos favores e é claro pela paciência.

Agradeço a todos que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, em particular ao colega Eduardo Gaspari; à Equipe do Laboratório de Mecânica dos Fluidos (PETROBRAS/CENPES/PDP/TE); ao José Roberto e ao Portella, pela confiança e oportunidade oferecida; aos queridos colegas Dr. Elísio Caetano e Dr. Valdir Estevam pelo incentivo e orientações. Sou bastante grato também, aos colegas da ESSS: João, Rafael, Fábio, Daniel Bruno e Ricardo Damian, pelas dicas e colaborações para realização deste trabalho.

RESUMO

Tosta da Silva, Luiz Carlos. Simulação Numérica de Poço Alojador de Bombeio. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química / Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

Um dos grandes desafios na produção de petróleo de reservas *offshore* é a garantia da economicidade ao longo da concessão explotatória do campo. A produção de óleo e gás em águas profundas e ultraprofundas passa, necessariamente, pelo desenvolvimento de várias técnicas de produção, entre elas as técnicas de elevação artificial. A PETROBRAS vem desenvolvendo um sistema de elevação artificial com bomba submarina, conhecido como Módulo de Bombeio (MOBO). Neste trabalho, este MOBO foi simulado com o auxílio da fluidodinâmica computacional (CFD). Para tal, foram construídas duas geometrias do MOBO (com e sem furos) para simular a dinâmica do escoamento de uma corrente bifásica água e ar dentro do MOBO. Para a validação dos resultados obtidos na simulação numérica, estes foram comparados com os resultados experimentais obtidos no CENPES/PETROBRAS, apresentando boa concordância. Pode-se concluir que furos no *shroud* atenuam de forma expressiva a descontinuidade de fases na região de sucção da bomba, minimizando eventos de descarga de gás. As simulações com óleo e gás com as características dos produzidos no Campo de Jubarte, da Bacia de Campos, mostraram ausência de descargas de gás, nas condições testadas por similaridade (3034 $m^3.d^{-1}$ de óleo com 10% ou 40% de gás).

ABSTRACT

Tosta da Silva, Luiz Carlos. Numeric Simulation of a Dummy Well Pumping Module. Dissertation (Master of Science) – Technology of Chemical and Biochemical Processes of the School of Chemistry / Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

A major challenge in oil production from offshore reservoir is to keep profitable operation during the period of field exploitation concession. Oil and gas production in deep and ultra deep waters requires the development of new production techniques, as novel artificial elevation techniques. At the moment, PETROBRAS is developing a novel submarine pump module known as MOBO for artificial oil elevation. In this work, this MOBO system was simulated through computational fluid dynamics (CFD). Two geometries of MOBO were built (with and without holes) to simulate a two-phase (water and air) flux inside the MOBO. For numerical results validation, these were compared to the experimental results obtained in CENPES/PETROBRAS laboratories, and they presented good agreement. It could be concluded that holes in the shroud attenuate in an expressive way phase discontinuities in the suction region of the pump, minimizing events of gas discharges. Simulations with oil and gas with the same characteristics of those produced in Jubarte field in Campos Basin showed absence of gas discharges, within the conditions tested by similarity (3034 $m^3.d^{-1}$ of oil with 10% or 40% of gas).

SUMÁRIO

NOMENCLATURA ..... **XI**

1. INTRODUÇÃO **17**

1.1. Motivação **17**

1.2. Principais Métodos Artificiais de Elevação e Escoamento de Petróleo **18**
1.2.1. *Gas-lift* Contínuo (GLC) **18**
1.2.2. Métodos Pneumáticos Intermitentes **19**
1.2.3. Métodos Bombeados **20**

1.3. Bombeamento Submarino **25**

1.4. Módulo de Bombeio - MOBO **28**

1.5. Estudo Experimental do Poço Alojador de BCSS no Campo de Jubarte **29**

1.6. Objetivo **34**

1.7. Estrutura do Trabalho **34**

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **37**

2.1. Modelo de Dois Fluidos e as Forças Interfaciais **37**

2.2. Simulação Numérica **38**

2.3. Fluidodinâmica Computacional **39**

2.4. Representatividade e/ou Validade das Soluções Numéricas **41**

2.5. *CFD* - Etapas para Realização de uma Simulação **44**
2.5.1. Geometria **44**
2.5.2. Malha **44**
2.5.3. Pré-Processamento: Modelagem e Condições de Contorno **46**
2.5.4. *Solver* **47**
2.5.5. Pós-Processamento: Avaliação dos Resultados **47**

2.6. *CFD* – Modelagem de Escoamento Multifásico **48**
2.6.1. Classificação de Modelos para Escoamentos Multifásicos **48**
2.6.2. Forças Interfaciais **49**
2.6.3. Equações do Modelo de Dois Fluidos **54**

3. METODOLOGIA **56**

3.1. Análise dos Resultados Experimentais **56**
3.1.1. Seleção dos Resultados Experimentais **58**
3.1.2. Resultados Experimentais Selecionados – *shroud* sem furos laterais **59**

3.1.3. Resultados Experimentais Selecionados – *shroud* com furos laterais 62
3.1.4. Elaboração da Matriz de Simulação 63
3.1.5. Balanço de Forças no Rotâmetro 64
3.1.6. Correções das Vazões de Ar e PGL da Matriz Experimental 67

3.2. Matrizes de Simulação Computacional 69
3.2.1. Matriz Simulação – Shroud com e sem furos 69
3.2.2. Matrizes de Simulação Computacional para Óleo e Gás de Jubarte 70

3.3. Estudo das Malhas 70
3.3.1. Geometria das Malhas do Módulo de Bombeio (MOBO) 70
3.3.2. A Modelagem Utilizada – Estudo das Malhas 75
3.3.3. Resultados do Estudo das Malhas do Modelo Módulo de Bombeio (MOBO) 76

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 86

4.1. Validação do Modelo Computacional MOBO 86
4.1.1. Predefinições da Modelagem do MOBO – Etapa de Validação 87

4.2. Validação da Simulação da Matriz – *shroud* sem furos 88
4.2.1. Estudo Experimental contra Estudo Computacional – Resultados Gerais *shroud* sem furos ... 89
4.2.2. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q1.PGL07.SF-S.A 90
4.2.3. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q1.PGL15.SF-S.A 93
4.2.4. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q2.PGL07.SF-S.A 95
4.2.5. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q2.PGL12.SF-S.A 98

4.3. Simulação da Matriz – *shroud* com furos 102
4.3.1. Estudo Experimental contra Estudo Computacional – Resultados Gerais *shroud* com furos. 104
4.3.2. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q1.PGL08.CF-S.A 105
4.3.3. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q1.PGL16.CF-S.A 109
4.3.4. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q2.PGL07.SCF-S.A 113
4.3.5. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q2.PGL13.CF-S.A 118

4.4. Simulação com Óleo e Gás no Modelo MOBO – *shroud* com e sem furos 123
4.4.1. Simulação com Óleo e Gás – 10% de PGL – Com e Sem Furos no *shroud* 125
4.4.2. Simulação com Óleo e Gás – 40% de PGL – Com e Sem Furos no *shroud* 130

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES 139

5.1. Conclusões 139

5.2. Recomendações para a Continuidade do Trabalho 140

REFERÊNCIAS 141

APÊNDICE A – ESTUDO DE SIMILARIDADE 145

APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO ESTUDO DAS MALHAS .. 148

NOMENCLATURA

β	-	Grandeza relativa das malhas
$Q_{G_{Medidor}}$	-	Vazão de gás medido no rotâmetro
P_3	-	Pressão absoluta na entrada do poço alojador
P_2	-	Pressão absoluta no ponto de mistura do ar com a água
Q_L	-	Vazão de líquido medido no rotâmetro
V_F	-	Volume do flutuador
ρ	-	Massa específica do fluido em escoamento
g	-	Aceleração gravitacional
C_D	-	Coeficiente de arraste
v	-	Velocidade do gás
A_P	-	Área projetada do flutuador na direção do escoamento
ρ_F	-	Massa específica do flutuador
Q	-	Vazão no rotâmetro
A	-	Área exposta ao escoamento no rotâmetro
Q_{G1}	-	Vazão de gás na condição P_1 e T_1
$Q_{G\,Ref}$	-	Vazão de gás indicada no medidor calibrado para a condição de P_{Ref} e T_{Ref}
P_{Ref}	-	Pressão absoluta de calibração do rotâmetro
T_{Ref}	-	Temperatura absoluta de calibração do rotâmetro
P_1	-	Pressão absoluta de operação do rotâmetro
T_1	-	Temperatura absoluta de operação do rotâmetro
PM_{Ref}	-	Peso Molecular do gás de referência
PM_1	-	Peso Molecular do gás em escoamento no rotâmetro na condição de P_1 e T_1
C_D	-	Coeficiente de arraste
Fa	-	Força de arraste
ρ_c		Massa específica da fase contínua
U_r	-	Velocidade média relativa entre a fase contínua e a partícula dispersa
U_c	-	Velocidade média da fase contínua
U_d	-	Velocidade média da fase partícula dispersa
Ap	-	Área projetada da partícula dispersa na direção do fluxo
C_D	-	Coeficiente de arraste
Re_d	-	Número de Reynolds da fase dispersa
C_D	-	Coeficiente de arraste
C_D^{esfera}	-	Coeficiente de arraste de uma partícula dispersa esférica
$C_D^{elíptica}$	-	Coeficiente de arraste de uma partícula dispersa elíptica
C_D^{cap}	-	Coeficiente de arraste de uma partícula dispersa tipo semi-esfera

Re	-	Número de Reynolds expresso em vazão
Q_L	-	Vazão de líquido
ρ_L	-	Massa específica do líquido
μ_L	-	Viscosidade dinâmica do líquido
Fr	-	Número de Froude expresso em vazão
Di	-	Diâmetro interno do tubo a montante do poço alojador
g	-	Aceleração gravitacional
Di_M	-	Diâmetro interno do tubo do modelo experimental, a montante do poço alojador
Di_P	-	Diâmetro interno do tubo do protótipo, a montante do poço alojador
n	-	Fator de escala
Q_{L_M}	-	Vazão de líquido do modelo experimental
Q_{L_P}	-	Vazão de líquido do protótipo
ρ_{L_M}	-	Massa específica do líquido usado no modelo experimental
ρ_{L_P}	-	Massa específica do líquido usado no protótipo
μ_{L_M}	-	Viscosidade do líquido usado no modelo experimental
μ_{L_P}	-	Viscosidade do líquido usado no protótipo
$Vel_Anular\ Poço-Sh2$	-	Velocidade no anular poço alojador - *shroud* a 2,0 m da entrada do MOBO
$Área_Anular\ Poço-Sh2$	-	Área no anular poço alojador - *shroud* a 2,0 m da entrada do MOBO
$Vel_Anular\ Poço-Sh3$	-	Velocidade no anular poço alojador - *shroud* a 3,0 m da entrada do MOBO
$Área_Anular\ Poço-Sh3$	-	Área no anular poço alojador - *shroud* a 3,0 m da entrada do MOBO
Vel_Intake	-	Velocidade nos *intake* 1 e 2
$Área_AM-1$	-	Área de cada *intake*
$Vel_Saída\ MOBO$	-	Velocidade na saída do MOBO
$Área_AM-2$	-	Área da saída do MOBO
A	-	Água
ANC	-	Árvore de Natal Convencional
ANM	-	Árvore de Natal Molhada
BCP	-	Bomba de Cavidades Progressivas
BCS	-	Bomba centrífuga submersa
BCSS	-	Bomba centrífuga submersa submarina
CAPEX	-	*Capital Expenditure* (despesas de capital ou investimento em bens de capital)
CF	-	Com furos
CT TE	-	Comunicação Técnica da Tecnologia de Elevação e Escoamento
DE	-	Diâmetro Externo
DHSV	-	*Down hole safety valve*
DI	-	Diâmetro Interno
ESP	-	Acrônimo de *Electrical Submersible Pumping*
EVTE	-	Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica

F1	-	Furo 1 do *shroud* (Posição Vertical de 1,41 m da entrada do MOBO)
F4	-	Furo 4 do *shroud* (Posição Vertical de 2,00 m da entrada do MOBO)
F8	-	Furo 8 do *shroud* (Posição Vertical de 1,80 m da entrada do MOBO)
GLC	-	*Gas lift* contínuo
GLI	-	*Gas lift* intermitente
Intake 1	-	Furo que expressa a região de sucção do BCS, mesma cota do *Intake* 2
Intake 2	-	Furo que expressa a região de sucção do BCS, mesma cota do *Intake* 1
MOBO	-	Módulo de Bombeio Submarino
OG	-	Óleo e gás natural
OPEX	-	*Operational Expenditure* (despesas operacionais)
P_Entrada	-	Pressão média na entrada do MOBO
P_*shroud*	-	Pressão média na base do *shroud* (4,376 m da entrada do MOBO)
P1	-	Manômetro 1, posicionado na base do Modelo do MOBO
P2	-	Manômetro 2, posicionado no ponto de mistura do líquido e gás do Modelo do MOBO
P3	-	Manômetro 3, posicionado na entrada do Modelo do MOBO
PGL	-	Percentagem de Gás Livre
PM-1	-	Ponto monitorado no anular poço alojador - *shroud* a 2,0 m da entrada do MOBO
PM-2	-	Ponto monitorado no anular coluna de produção - *shroud* a 3,0 m da entrada do MOBO
PM-3	-	Ponto monitorado no anular coluna de produção - *shroud* a 2,0 m da entrada do MOBO
PM-4	-	Ponto monitorado no anular coluna de produção - *shroud* a 1,5 m da entrada do MOBO
Q1	-	Vazão de água correspondente à 9,0 L/min
Q2	-	Vazão de água correspondente à 13,5 L/min
Q3	-	Vazão de água correspondente à 15,0 L/min
QG	-	Vazão de gás
QL	-	Vazão de líquido
S	-	Simulação
SF	-	Sem furos
V_1	-	Vazão numa região 1 do rotâmetro
V_2	-	Vazão numa região 2 do rotâmetro
V_3	-	Vazão numa região 3 do rotâmetro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquemático Básico de um Sistema de Gas Lift Contínuo (Fonte: PETROBRAS) 19
Figura 1.2 - Principais Elementos do Sistema de Bombeio Mecânico (Fonte: PETROBRAS) 21
Figura 1.3 - Sistema de Bombeio por cavidades Progressivas (Fonte: PETROBRAS) 22
Figura 1.4 - Poço de petróleo equipado com Bombeamento Centrífugo 23
Figura 1.5 - Ilustrações de BCS, (a) Fornecedor Schlumberger e (b) Fornecedor Centrilift 24
Figura 1.6 - Comparação BCSS versus Gas Lift - Riser de 1500 m, Flowline de 6 polegadas 26
Figura 1.7 - Módulo de bombeio instalado numa estaca oca próxima do poço 28
Figura 1.8 - Esquema mais detalhado do poço alojador, com a indicação do caminho feito pela corrente bifásica até chegar na sucção da bomba (GASPARI et al, 2007) 30
Figura 1.9 - Esquema da estrutura de escoamento observada nos testes experimentais 32
Figura 1.10 - Ciclo intermitente do experimento (GASPARI et al, 2007) 34
Figura 1.11 - Etapas do trabalho realizado 36
Figura 2.1 - Métodos de Solução de um problema de Mecânica dos Fluidos (adaptação de ALMEIDA REGO, 2008) 43
Figura 2.2 – Exemplo de Malha Estruturada Bidimensional (Fonte Damian, 2007) 46
Figura 2.3 - Exemplo de Malha Não Estruturada Bidimensional (Fonte Damian, 2007) 46
Figura 2.4 - Coeficiente de Arraste vs. Número de Reynolds 52
Figura 3.1 - Modelo experimental - entrada e saída e leiaute do duto de entrada 57
Figura 3.2 - Detalhe do shroud (tubo de acrílico interno) 57
Figura 3.3 - Modelo experimental - coluna de acrílico (poço alojador – 4,55 m) 57
Figura 3.4 - Detalhe do furo que simula a sucção do BCSS 57
Figura 3.6 - Croqui do MOBO instalado no CENPES 71
Figura 3.7 - Detalhe Superior das 6 Malhas Geradas: (A) Malha1, (B) Malha 2, ... 72
Figura 3.8 - Detalhe Superior da Malha 5 do Modelo MOBO 73
Figura 3.9 - Vista Superior da Malha 5 do Modelo MOBO 74
Figura 3.10 - Detalhe Superior da Malha 6 do Modelo MOBO 74
Figura 3.11 - Uso de CPU e tamanho relativo das malhas (base: n° de nós da Malha 1) para simular 1,5 s 77
Figura 3.12 - Comparação da Velocidade no Anular Coluna - shroud a 1,5 m da 78
Figura 3.13 - Comparação da Velocidade no Anular Coluna - shroud 78
Figura 3.14 - Comparação da Velocidade no Anular Coluna - shroud 79
Figura 3.15 - Comparação da Velocidade no Anular Poço Alojador - shroud 79
Figura 3.16 - Comparação da Velocidade no Ponto Intake da Bomba x Configuração da Malha 80
Figura 3.17 - Pressão na Entrada do Modelo MOBO: Experimental x Simulação das Malhas 80
Figura 3.18 - Velocidade na Saída do Modelo MOBO: Experimental vs. Simulação das Malhas 81
Figura 3.19 - Pressão de Entrada e Velocidade de Saída do Modelo MOBO: 82
Figura 3.20 - Detalhes da Malha sem Furos: (a) Modelo MOBO, (b) Entrada e Saída do MOBO, (c) Vista Superior do MOBO com detalhamento 83
Figura 3.21 - Detalhes da Malha com Furos: (a) Modelo MOBO, (b) Entrada e Saída do MOBO, (c) Vista Superior do MOBO com detalhamento e (d) Detalhe de 1 dos 15 furos do shroud 84
Figura 4.1 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q1.PGL07.SF-S.A) 91
Figura 4.2 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q1.PGL07.SF-S.A) 92
Figura 4.3 - Visualização com descarga de líquido do anular poço alojador / shroud (Q1.PGL07.SF-S.A) 92
Figura 4.4 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q1.PGL15.SF-S.A) 93
Figura 4.5 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q1.PGL15.SF-S.A) 94
Figura 4.6 - Visualização com descarga de líquido do anular poço alojador / shroud (Q1.PGL15.SF-S.A) 95
Figura 4.7 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q2.PGL07.SF-S.A) 96
Figura 4.8 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q2.PGL07.SF-S.A) 97

Figura 4.9 - Visualização com descarga de líquido do anular poço alojador / shroud (Q2.PGL07.SF-S.A) 98
Figura 4.10 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q2.PGL12.SF-S.A) 99
Figura 4.11 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q2.PGL12.SF-S.A) 100
Figura 4.12 - Visualização com descarga de líquido do anular poço alojador / shroud (Q2.PGL12.SF-S.A) ... 101
Figura 4.13 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q1.PGL08.CF-S.A) 106
Figura 4.14 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q1.PGL08.CF-S.A) 107
Figura 4.15 - Monitoramento da PGL nos Furos de 1 a 5 (Q1.PGL08.CF-S.A) 108
Figura 4.16 - Monitoramento da PGL nos Furos 6 ao 10 (Q1.PGL08.CF-S.A) 108
Figura 4.17 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões 109
Figura 4.18 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q1.PGL16.CF-S.A) 110
Figura 4.19 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q1.PGL16.CF-S.A) 111
Figura 4.20 - Monitoramento da PGL nos Furos de 1 a 5 (Q1.PGL16.CF-S.A) 112
Figura 4.21 - Monitoramento da PGL nos Furos de 6 ao 10 (Q1.PGL16.CF-S.A) 112
Figura 4.22 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões 113
Figura 4.23 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q2.PGL07.CF-S.A) 114
Figura 4.24 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q2.PGL07.CF-S.A) 115
Figura 4.25 - Monitoramento da PGL nos Furos de 1 a 5 (Q2.PGL07.CF-S.A) 116
Figura 4.26 - Monitoramento da PGL nos Furos de 6 ao 10 (Q2.PGL07.CF-S.A) 117
Figura 4.27 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões 117
Figura 4.28 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q2.PGL13.CF-S.A) 118
Figura 4.29 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q2.PGL13.CF-S.A) 119
Figura 4.30 - Monitoramento da PGL nos Furos de 1 a 5 (Q2.PGL13.CF-S.A) 121
Figura 4.31 - Monitoramento da PGL nos Furos de 6 ao 10 (Q2.PGL13.CF-S.A) 121
Figura 4.32 - Monitoramento da PGL nos Furos de 11 ao 15 (Q2.PGL13.CF-S.A) 122
Figura 4.33 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões 122
Figura 4.34 - Escoamento no MOBO com Óleo e Gás Natural - OG.PGL10.SF – shroud sem furos 126
Figura 4.35 - Escoamento no MOBO com Óleo e Gás Natural - OG.PGL10.CF – shroud com furos 126
Figura 4.36 - Monitoramento da Pressão e PGL no MOBO - OG.PGL10.SF 128
Figura 4.37 - Monitoramento da Pressão e PGL no MOBO - OG.PGL10.CF 128
Figura 4.38 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões 129
Figura 4.39 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões 130
Figura 4.40 - Escoamento no MOBO com Óleo e Gás Natural - OG.PGL40.SF – shroud sem furos 131
Figura 4.41 - Escoamento no MOBO com Óleo e Gás Natural - OG.PGL40.CF – shroud com furos 131
Figura 4.42 - Monitoramento da Pressão e PGL no MOBO - OG.PGL40.SF 133
Figura 4.43 - Monitoramento da Pressão e PGL no MOBO - OG.PGL40.CF 133
Figura 4.44 - Monitoramento da PGL nos furos 1 ao 5 - OG.PGL40.CF 134
Figura 4.45 - Monitoramento da PGL nos furos 11 ao 15 - OG.PGL40.CF 134
Figura 4.46 - Visualização 1 da PGL - OG.PGL40.SF 135
Figura 4.47 - Visualização 2 da PGL - OG.PGL40.SF 135
Figura 4.48 - Visualização 1 da PGL - OG.PGL40.CF 136
Figura 4.49 - Visualização 2 da PGL - OG.PGL40.CF 137
Figura 4.50 - Visualização 3 da PGL - OG.PGL40.CF 137

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Matriz experimental: vazões de água e ar 58
Tabela 3.2 - Dados experimentais: Q1.PGL10.SF-E.A 60
Tabela 3.3 - Dados experimentais: Q1.PGL20.SF-E.A 60
Tabela 3.4 - Dados experimentais: Q2.PGL10.SF-E.A 61
Tabela 3.5 - Dados experimentais: Q2.PGL20.SF-E.A 61
Tabela 3.6 - Dados experimentais: Q1.PGL10.CF-E.A 62
Tabela 3.7 - Dados experimentais: Q1.PGL20.CF-E.A 62
Tabela 3.8 - Dados experimentais: Q2.PGL10.CF-E.A 63
Tabela 3.9 - Dados experimentais: Q2.PGL20.CF-E.A 63
Tabela 3.10 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q1.PGL7.SF-E.A 68
Tabela 3.11 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q1.PGL15.SF-E.A 68
Tabela 3.12 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q2.PGL7.SF-E.A 68
Tabela 3.13 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q2.PGL12.SF-E.A 68
Tabela 3.14 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q1.PGL8.CF-E.A 68
Tabela 3.15 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q1.PGL16.CF-E.A 68
Tabela 3.16 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q2.PGL7.CF-E.A 69
Tabela 3.17 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q2.PGL13.CF-E.A 69
Tabela 3.18 - Dimensões do MOBO instalado no CENPES 71
Tabela 3.19 – Estatística das Malhas Estudadas 75
Tabela 3.20 - Identificação dos pontos onde foram monitoradas as velocidades 76
Tabela 3.21 - Matriz Simulação - Shroud sem furos 69
Tabela 3.22 - Matriz Simulação - Shroud com furos 69
Tabela 3.23 - Condições Operacionais e Propriedades dos Fluidos Esperadas no MOBO de Jubarte 70
Tabela 4.1 - Predefinições da Modelagem do MOBO – Validação com e sem furos no shroud 87
Tabela 4.2 - Matriz Simulação - shroud sem furos 88
Tabela 4.3 - Matriz Simulação - Shroud com furos 102
Tabela 4.4 – Posição Vertical de cada Furo do shroud e Identificação da PGL 103
Tabela 4.5 - Predefinições da Modelagem Óleo e Gás no MOBO com e sem furos no Shroud 124
Tabela 4.6 - Condições de Contorno no MOBO - Óleo e Gás Natural, PGL 10,0% 125
Tabela 4.7 - Condições de Contorno no MOBO - Óleo e Gás Natural, PGL 40,0% 130
Tabela A.1 - Dimensional do Modelo Experimental, fator de escala n=7,5 145
Tabela A.2 - Tabela das propriedades dos fluidos 147
Tabela A.3 - Propriedades dos Fluidos - Relação de Similaridade 147
Tabela B.1 - Cálculo da Velocidade do Anular do Poço Alojador 148
Tabela B.2 - Cálculo da Velocidade do Anular Coluna de Produção 149
Tabela B.3 - Cálculo da Velocidade dos intakes 1 e 2 149
Tabela B.4 - Cálculo da Velocidade de Saída do MOBO 149
Tabela B.5 - Valores das Velocidades de Saída do MOBO Preditas e Seus Respectivos Erros 150
Tabela B.6 - Valores das Pressões na Entrada do MOBO Preditas e Seus Respectivos Erros 150

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Um dos grandes desafios na produção de petróleo de reservas *offshore* é a garantia da economicidade ao longo da concessão explotatória do campo. No Brasil, aproximadamente 86,3 % da produção de óleo e mais de 69 % da produção de gás foram provenientes de reservas marítimas, sendo a maioria dessas reservas em águas profundas, entre 400 e 1000 metros, e ultraprofundas, a partir de 1000 metros (PETROBRAS, 2010).

A descoberta de novos campos marítimos de petróleo e gás, como os campos gigantes de Tupi e Júpiter, entre outras acumulações no pré-sal, elevam ainda mais as reservas deste recurso mineral em áreas *offshore* de lâminas d'água ultraprofundas, e, conseqüentemente, aumentam também a necessidade de se utilizar sistemas flutuantes de exploração, produção e manutenção dos poços e equipamentos submarinos. O Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE), associada às análises de riscos operacionais e financeiros, determinam a atratividade de investimento explotatório da reserva. Entretanto, as incertezas dos cenários futuros, sejam elas econômicas e/ou comportamentais da acumulação petrolífera a ser produzida, podem comprometer os ganhos apontados no EVTE da fase de prospecção.

Assim, a produção de óleo e gás em águas profundas e ultraprofundas passam, necessariamente, pelo desenvolvimento de várias técnicas de produção, entre elas a técnica de elevação artificial e escoamento do petróleo até as facilidades operacionais. Variável que tem forte influência dentro do plano de produção e desenvolvimento de um campo petrolífero e que visa garantir as vazões economicamente compensatórias para os altos investimentos demandados na produção *offshore* de óleo e gás. Entre os métodos de elevação artificial disponíveis, que podem contribuir para o atendimento destes requisitos, está o BCS – Bombeamento Centrífugo Submerso (*ESP*, acrônimo de *Electrical Submersible Pumping*, na nomenclatura inglesa). Na PETROBRAS, o uso da nomenclatura BCSS refere-se a um Bombeamento Centrífugo Submerso Submarino, que se diferencia do BCS convencional pelo fato da bomba ser instalada num poço com Árvore de Natal Molhada (ANM) e ter conexão elétrica molhada.

1.2. Principais Métodos Artificiais de Elevação e Escoamento de Petróleo

A elevação é um dos principais desafios para a indústria de exploração do petróleo. Técnicos de operação e engenheiros das Unidades de Exploração e Produção precisam compreender e dominar os conceitos relacionados à elevação e escoamento de óleo, gás e água para que possam interagir e controlar esses processos.

A atividade de Elevação e Escoamento tem um papel fundamental na etapa de movimentação ascendente do fundo do poço até a planta de processamento primário, que permite a separação do óleo, gás, água e indesejados sólidos. Um processo de elevação e escoamento eficiente significa maior vazão de óleo e gás, além de um menor gasto de energia e recursos. Essas atividades devem ser orientadas para a busca de soluções econômicas e tecnicamente viáveis.

Freqüentemente, quando perfurados, os poços possuem energia suficiente para garantir a produção dos fluidos desde o fundo (reservatório) até a superfície (separador). Quando isso ocorre, os poços são ditos surgentes ou que produzem por elevação natural. Quando a energia do reservatório não é mais suficiente para garantir a produção do poço, ou seja, a pressão no fundo é incapaz de vencer todas as perdas de carga, é necessário acrescentar mais energia ao sistema ou criar meios de minimizar essas perdas. Assim, de uma forma ou de outra, a necessidade de elevação artificial se faz presente.

Os métodos artificiais de elevação podem ser classificados em *gas-lift* contínuo, pneumáticos intermitentes e métodos bombeados.

1.2.1. *Gas-lift* Contínuo (GLC)

***Gas-lift* Contínuo** é o método de elevação que reduz a perda de carga entre o fundo e a superfície, através da injeção contínua de gás em algum ponto da coluna de produção. A finalidade da injeção do gás é reduzir a densidade média dos fluidos produzidos. A energia contida no gás comprimido ajuda a diminuir o gradiente médio de pressão do fluxo no fundo, aumentando a vazão através da compensação da parcela de perda de carga em função da coluna hidrostática (gravitacional).

Embora haja variações, o esquema básico de um poço equipado para produzir por *gas-lift* contínuo é mostrado na Figura 1.1.

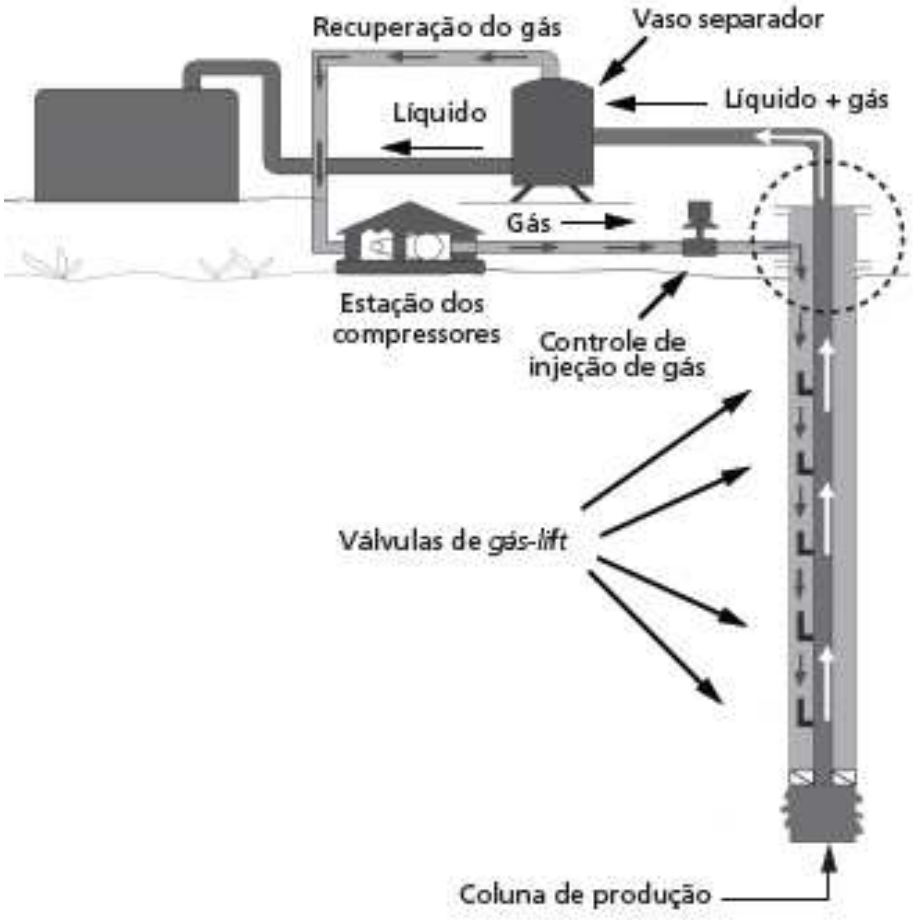


Figura 1.1 - Esquemático Básico de um Sistema de *Gas Lift* Contínuo (Fonte: PETROBRAS)

1.2.2. Métodos Pneumáticos Intermitentes

Métodos Pneumáticos Intermitentes são métodos de elevação artificial que utilizam a energia do gás comprimido para produzir a coluna de líquido (óleo + gás) por meio de golfadas. A intermitência é caracterizada por um período de alimentação do reservatório em que ocorre o aumento do nível de fluido dentro da coluna de produção e por um período de injeção de gás. Entre a coluna de líquido e a golfada de gás, uma interface mecânica poderá ser utilizada para minimizar as perdas de produção e minimizar problemas associados à garantia de escoamento como parafina e incrustações.

Os principais métodos de pneumáticos intermitentes utilizados na explotação de petróleo são:

⇒ ***Gas-lift* Intermitente (GLI)**

Método pneumático intermitente sem interface mecânica. A injeção de gás é feita a intervalos de tempo bem definidos e é normalmente controlada por uma válvula na superfície, chamada de válvula motora. A injeção de gás na coluna de produção é feita por meio de uma válvula de *gas-lift*.

⇒ ***Pig lift***

Método pneumático intermitente com interface mecânica (*pig*), que utiliza duas colunas de produção independentes e interligadas em sua extremidade inferior por um conector em forma de "U".

Existem outros métodos específicos de elevação artificial utilizados na explotação de petróleo. Entretanto, sua importância nos volumes produzidos é praticamente desprezível. Ainda que, para alguns cenários, esses métodos específicos de elevação artificial sejam a melhor opção para viabilizar a produção de um campo ou poço *onshore*.

1.2.3. Métodos Bombeados

Os métodos de elevação artificial baseados no funcionamento de uma bomba acionada por um elemento motriz são denominados métodos bombeados. Esses métodos, mediante o acréscimo de um incremento de pressão na bomba, produzem a energia necessária para elevar o petróleo até a superfície. Os principais métodos bombeados utilizados na explotação de petróleo são:

⇒ **Bombeio Mecânico (BM)**

Método de elevação artificial em que a energia é transmitida ao fluido através de uma bomba de deslocamento positivo, do tipo alternativa, posicionada no fundo do poço. O acionamento dessa bomba é provido por um motor elétrico ou de combustão interna, localizado na superfície. O movimento de rotação do motor é transformado em movimento alternativo através de uma engrenagem conhecida como Unidade de Bombeio (UB). A ligação entre a

unidade de bombeio e a bomba de fundo é feita através de uma coluna de barras de aço (hastes de bombeio). A Figura 1.2 apresenta os principais elementos que compõem o sistema de bombeio mecânico.

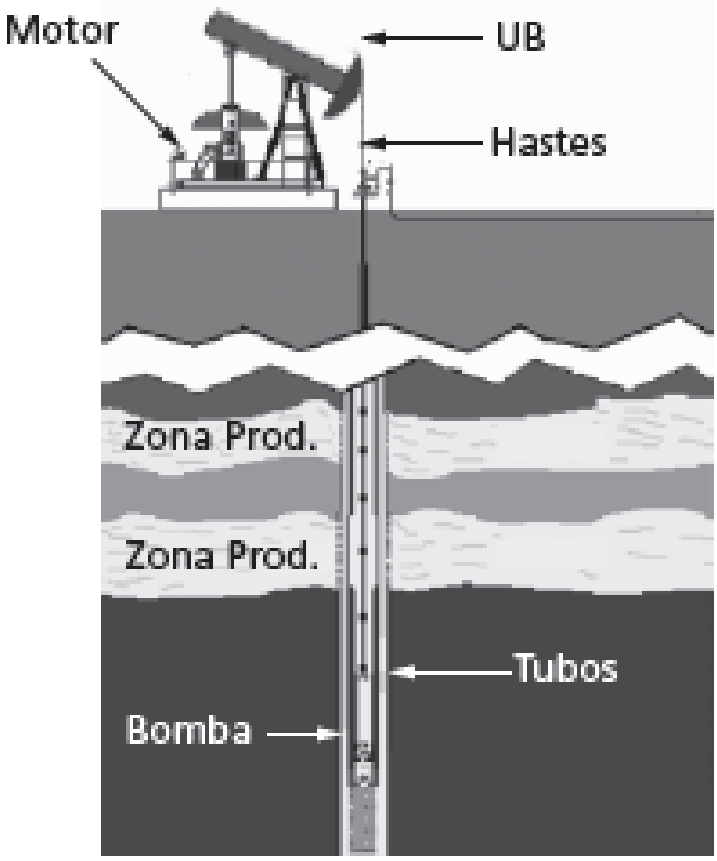


Figura 1.2 - Principais Elementos do Sistema de Bombeio Mecânico (Fonte: PETROBRAS)

⇒ Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP)

Método de elevação baseado no funcionamento de uma bomba de cavidades progressivas que, ao cria cavidades, permite o deslocando os fluidos ao longo do fluxo da própria bomba. A energia mecânica necessária ao acionamento da bomba (estator e rotor), localizada no fundo do poço, é transferida da superfície através de uma coluna de hastes. A rotação das hastes se dá através da redução da velocidade do motor elétrico de indução utilizando-se um acoplador mecânico, denominado cabeçote. A Figura 1.3 apresenta os principais elementos que compõem o sistema de bombeio por cavidades progressivas.

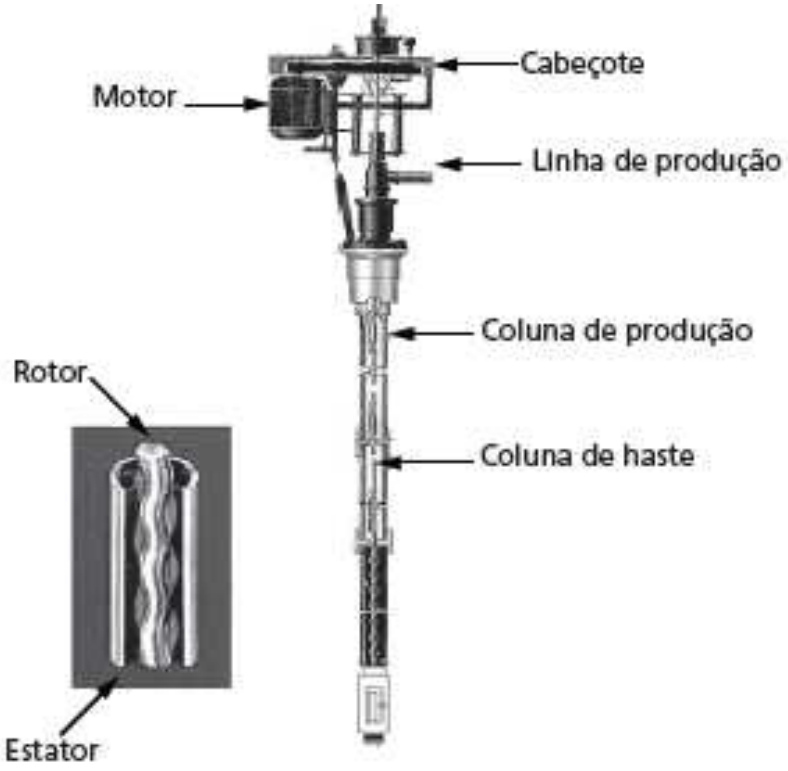


Figura 1.3 - Sistema de Bombeio por cavidades Progressivas (Fonte: PETROBRAS)

⇒ Bombeio Centrífugo Submerso (BCS)

O BCS é um método de elevação artificial utilizado e consagrado pela indústria de petróleo. Seu princípio consiste na utilização de uma bomba centrífuga como elemento motriz da mistura de fluidos produzida pelo reservatório. A bomba incrementa a energia disponível no reservatório em quantidade suficiente para transportar a mistura até uma plataforma ou a uma unidade de pré-processamento. Esta bomba tem múltiplos estágios, e o uso convencional a instala dentro do poço (*vide*
Figura 1.4), a uma determinada profundidade do leito marinho. O acionamento da BCS é feito com um motor elétrico, através de acoplamento com selos protetores. A energia elétrica necessária ao funcionamento da bomba é transferida por cabo elétrico, da superfície até o motor (Amaral, 2007).

“Cada estágio da bomba é composto por um difusor fixo e um impelidor rotativo. As dimensões geométricas de cada estágio, tais como diâmetro e altura do rotor, são fatores importantes que afetam a vazão e a altura de elevação do fluido bombeado. Parâmetros como pressão na sucção da bomba, as propriedades dos fluidos bombeados, a geometria do rotor e a

presença de gás no escoamento (escoamento bifásico) influenciam o desempenho, isto é, a curva característica desenvolvida pela bomba. Para uma determinada vazão, as características do fluido bombeado, o número de estágios da bomba e a rotação, definem a altura de elevação total (energia específica) e, conseqüentemente, a potência requerida para seu funcionamento." (Estevam, 2002).

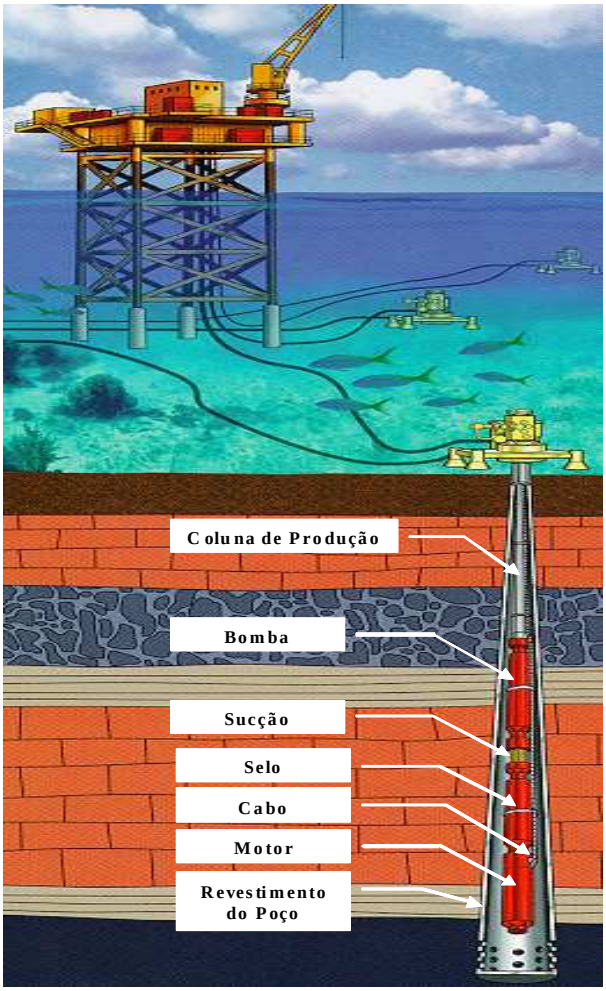


Figura 1.4 - Poço de petróleo equipado com Bombeamento Centrífugo Submerso Submarino – BCSS (Fonte: PETROBRAS)

A presença de gás nos impelidores (*vide* Figura 1.5) pode afetar o desempenho da bomba. Porque, nesta condição, os impelidores poderão não transferir energia suficiente para elevar os fluidos numa vazão econômica desejada de projeto até uma plataforma ou uma unidade de pré-processamento. Isto pode significar um prejuízo econômico expressivo para o projeto. Quando os poucos recursos operacionais disponíveis para reduzir os efeitos da presença desse

gás, tais como, aumento da pressão na superfície e a alteração da rotação do motor, não surtem efeito, a alternativa seria uma onerosa intervenção no poço para o aprofundamento, ou a troca do conjunto instalado. No caso de poços com completação submarina, muitas vezes, a indisponibilidade imediata e o tempo de intervenção com uso de recurso crítico (sondas e/ou barcos de completação) impactam de forma determinante nos resultados econômicos (lucro cessante) esperados pelo projeto de explotação da jazida.

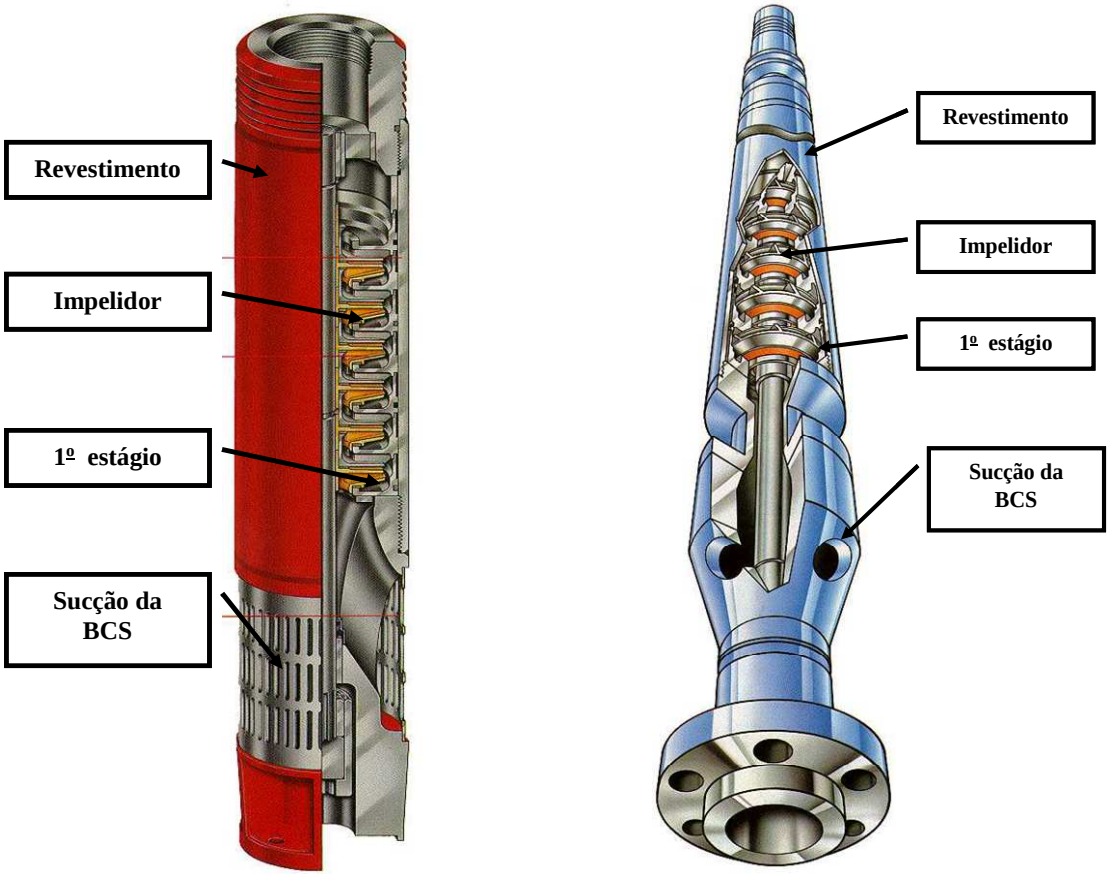


Figura 1.5 - Ilustrações de BCS, (a) Fornecedor Schlumberger e (b) Fornecedor Centrilift (Fonte: Catálogos dos respectivos Fornecedores)

Na PETROBRAS, o uso de BCS convencional, isto é, a aplicação da BCS com árvore de natal seca seja em plataforma fixa ou em poços terrestres, já é bastante consolidada. Dados do Sistema de Informação da Produção (SIP) de 2008 apontam que, no Brasil, dos 5500 poços produtores da PETROBRAS, apenas 3% estão equipados com BCS e apenas 13 poços são de completação molhada – BCSS, ou seja, a bomba está instalada num poço com árvore de natal

molhada - ANM. Entretanto, em termos de produção, o uso dessas bombas centrífugas submersas em completação com árvore de natal convencional (ANC) e molhada representa em torno de 10% da produção diária de óleo (algo em torno de 184.000 barris/dia, aproximadamente 29.253 m^3/dia).

1.3. Bombeamento Submarino

Na atividade *offshore*, a PETROBRAS foi pioneira em bombeamento submarino, instalando a primeira BCS em poço com ANM no mundo. A partir de então, o número de novas instalações pela PETROBRAS foi discreto. Outras operadoras utilizaram este conceito de forma mais extensiva. Entretanto os recentes descobrimentos em águas profundas e ultras profundas na costa brasileira e a necessidade de produzir áreas marginais recolocam a alternativa de elevação artificial por BCSS estratégica como uma opção na produção de óleo.

"O histórico de falhas de BCS na PETROBRAS, em campos terrestres e *offshore* com completação seca, é cerca de dois anos. Em 2001, a PETROBRAS começou a estudar uma alternativa para evitar a instalação de BCSS no interior de poços. A principal motivação foi que o BCSS, em caso de falha, pelo fato de não ser tão confiável como o *gas lift*, necessita de uma intervenção no poço submarino com uso de sonda e os custos desta operação podem atingir alguns milhões de dólares, além dos riscos associados a este tipo de intervenção. Se um BCSS instalado falha, a interrupção da produção causa uma grande perda de receita e o tempo aguardando por uma sonda disponível para efetuar uma intervenção no poço e troca do conjunto motor-bomba é normalmente longo, na ordem de 25 dias, e necessita de embarcações específicas dotadas de sonda com altos custos diários." (Rodrigues *et al*, 2005).

O *gas lift* se destaca pelo alto grau de confiabilidade e sua relativa simplicidade operacional. Vale aqui ressaltar que, para produção *offshore*, a atratividade pela aplicação do *gas lift* é plenamente justificada como uma boa alternativa técnico-econômica para cenários composto por poços próximos às unidades de produção, com baixa concentração de água e não muito pesado. Uma vez que para longas distâncias horizontais, a presença do gás injetado na coluna de produção contribui de forma significativa na parcela da perda de carga por fricção do sistema. E nas aplicações de águas profundas com óleo pesado, onde uma grande quantidade de água deve ser produzida ao longo do tempo, o método de elevação com uso de BCS torna-

se bastante competitivo (*vide* Figura 1.6), embora o mesmo não apresente a mesma confiabilidade, além de requerer um investimento inicial e um custo de operação / intervenção significativos (maiores CAPEX e OPEX).

Como a falha de um BCSS pode ocasionar a perda de produção por longo período, algumas contingências devem ser previstas, entre elas: *gas lift* redundante, conjunto de motor-bomba redundante ou BCSS fora do poço. Todas estas alternativas necessitam de facilidades para permitir um reparo rápido, preferencialmente a cabo.

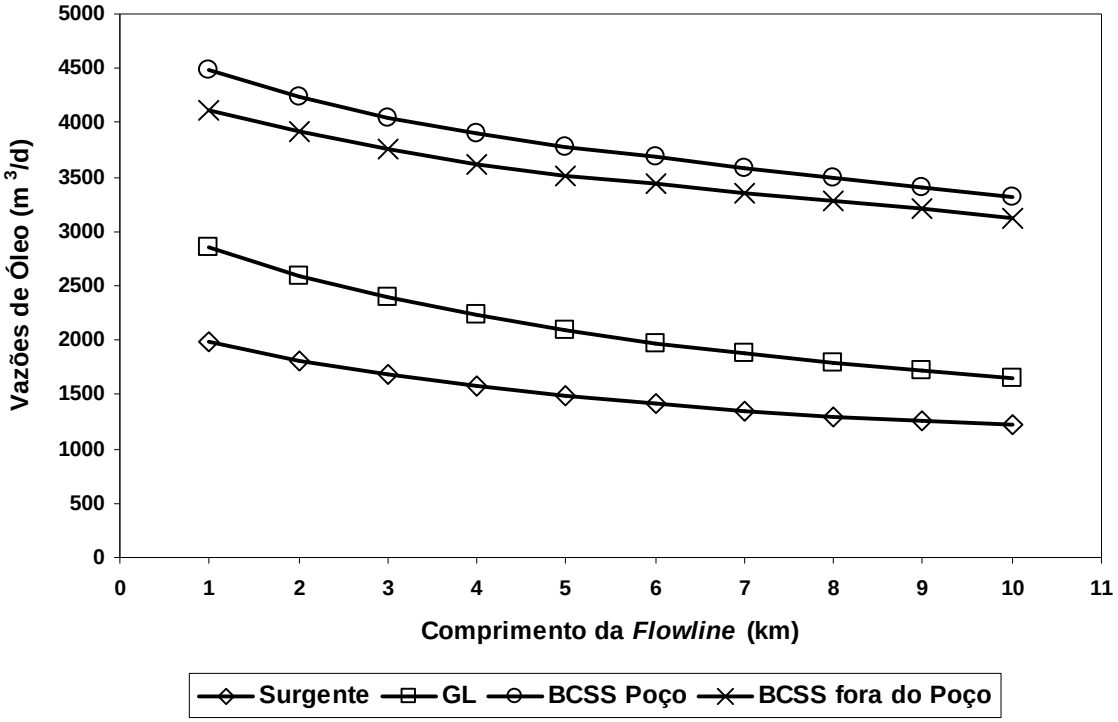


Figura 1.6 - Comparação BCSS *versus Gas Lift* - *Riser* de 1500 m, *Flowline* de 6 polegadas e motor da BCSS de 1200 hp (RODRIGUES, R. *et al*, 2005)

A utilização de sistemas de bombeamento submarino, entre eles o BCSS, aumenta significativamente a complexidade das operações e dos equipamentos para elevação e escoamento do petróleo. Uma vez que equipamentos convencionais (e.g., *manifold*, árvore de natal, bombas, motores, etc.) que ficam normalmente localizados nos conveses das plataformas de produção, são transferidos para o fundo do mar, passando por mudanças, adaptações e até mesmo fazendo uso de inéditas concepções.

Segundo, Baruzzi *et al* (2001) e Caetano (1999), o bombeamento submarino, além de ser, em alguns casos, o diferencial que torna técnica e/ou economicamente viável a explotação da jazida de petróleo, traz também diversos resultados positivos, dentre os quais se podem destacar:

a) **Antecipação da produção**: métodos de bombeamento submarino promovem um aumento da vazão de produção, em relação ao método *gas lift*, permitindo uma produção mais rápida, e conseqüentemente, antecipação de receitas;

b) **Conhecimento do reservatório**: sistemas de produção antecipada permitirão uma avaliação mais rápida de novos campos;

c) **Grandes distâncias e águas profundas**: sendo uma fonte adicional de energia, um sistema de bombeamento submarino pode viabilizar tecnicamente, a produção em alguns campos e economicamente, a produção de campos marginais que se encontrem distantes de existentes facilidades de produção;

d) **Fator de recuperação**: o sistema de bombeamento pode possibilitar a adoção de menores pressões de abandono, levando a maiores volumes recuperados e conseqüentemente, maiores fatores de recuperação;

e) **CAPEX**: potencial redução de investimentos devido à possibilidade da necessidade de menor número de poços e à maior possibilidade de escoamento da produção a longas distâncias e para outras infra-estruturas já existentes;

f) **Controle de vazão**: através de sistemas de bombeamento submarino, pode-se manter constante e previsível a produção do poço, através da redução das flutuações naturais do mesmo;

g) **Óleos pesados e de alta viscosidade**: a eficiência do método de elevação por *gas lift* decai com o aumento da viscosidade e densidade dos fluidos produzidos, tendo assim, os sistemas de bombeamento, papel fundamental na viabilização da explotação de campos com fluidos desse tipo.

h) ***Gas lift***: o bombeamento submarino usado em substituição a um sistema de *gas lift* possibilita o redirecionamento da capacidade de compressão da unidade de produção, antes usada para injeção do *gas lift*, para outros fins, como a exportação do gás produzido. O *gas lift* antes usado no sistema, poderá ser destinado a outros poços. O que é fator importante num cenário de carência de gás.

1.4. Módulo de Bombeio - MOBO

Para testar conceitos e desenvolver novos equipamentos de bombeamento submarino, a PETROBRAS trabalhou em conjunto com algumas empresas no projeto e construção de um protótipo denominado Módulo de Bombeio (MOBO) a ser instalado em um furo revestido no campo de Jubarte, localizado no Estado do Espírito Santo em lâmina d'água de 1400 m, na costa brasileira. Pretende-se, com este protótipo, testar uma nova alternativa que subsidiará a seleção de tecnologias a serem utilizadas nas fases seguintes de desenvolvimento da produção do Campo de Jubarte como também em outros campos. O protótipo é projetado para trabalhar com um BCSS de aproximadamente 30 m de comprimento. O furo revestido está localizado a cerca de 200 m do poço produtor (ver Figura 1.7).

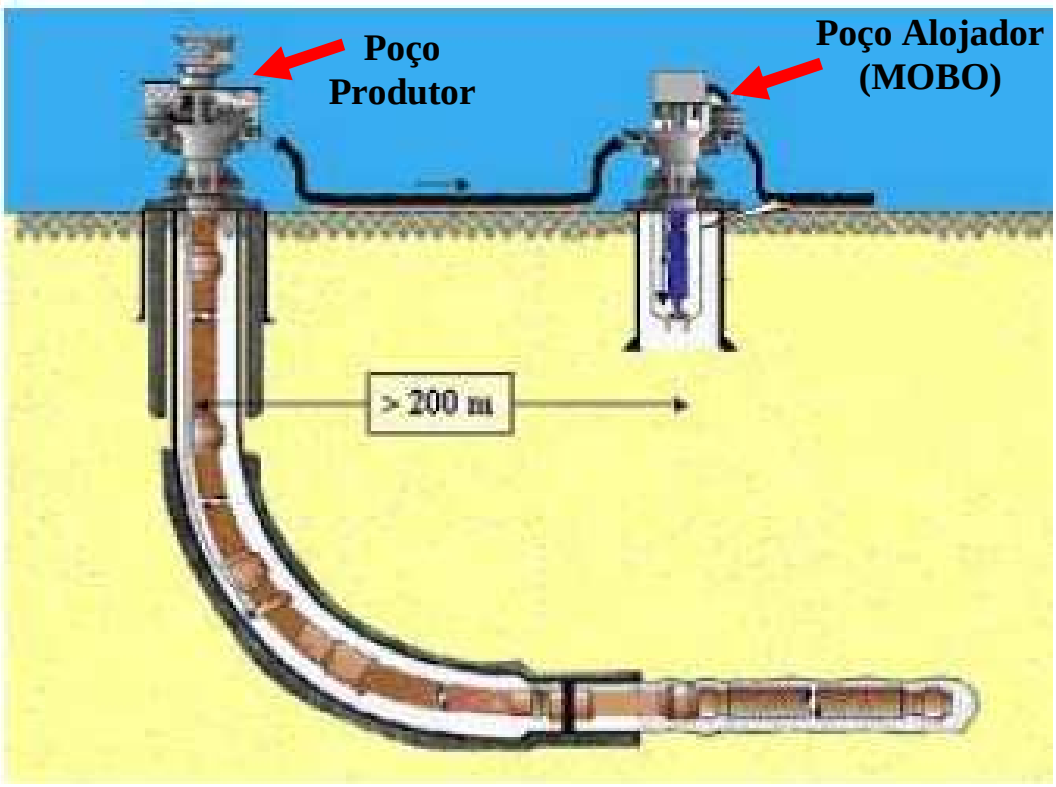


Figura 1.7 - Módulo de bombeio instalado numa estaca oca próxima do poço

(Fonte: RODRIGUES, R. *et al*, 2005)

A adoção desta distância considerou aspectos de segurança entre poços isolados sem DHSV[1] e a experiência da PETROBRAS. A proposta inovadora desta tecnologia é a instalação e recuperação de um módulo de bombeio no fundo do mar sem necessidade de uma intervenção no poço produtor com retirada da coluna de produção. Existe ainda a possibilidade futura da instalação e recuperação do MOBO ser executada através de cabo sem a necessidade do uso de embarcação dotada de sonda.

1.5. Estudo Experimental do Poço Alojador de BCSS no Campo de Jubarte

Um trabalho experimental foi realizado pela Gerência de Elevação e Escoamento do Centro de Pesquisa da PETROBRAS (CENPES), com o objetivo de identificar a dinâmica de escoamento em um modelo de acrílico do Módulo de Bombeio de Jubarte (*vide* Gaspari, 2007). O trabalho consistiu em elaborar um estudo de similaridade e executar testes experimentais buscando visualizar a dinâmica de escoamento dentro do poço alojador com alterações geométricas do s*hroud*[2] (com e sem furos laterais) e com diferentes vazões de água e gás na entrada do aparato experimental.

Segundo Gaspari *et al* (2007), a maior motivação deste estudo experimental foi buscar identificar a dinâmica de escoamento dentro do modelo do módulo de bombeio face à presença de gás na entrada do mesmo. Pois, paralelamente ao desenvolvimento de engenharia do Piloto do Módulo de Bombeio de Jubarte, surgiram dúvidas se a força de arraste entre as fases (óleo, água e gás) seria suficiente para garantir que a fase mais leve fosse capaz de descer até a base do *shroud*. Já que a região de escoamento descendente dentro do MOBO é a região de área transversal maior (*vide* Figura 1.8) e, por conseguinte, a que apresenta menor

[1] *Down Hole Safety Valve* - Dispositivo de segurança de subsuperfície, controlado da superfície, utilizado para impedir o fluxo descontrolado de hidrocarbonetos para o meio ambiente, pela coluna de produção, em caso de perda de integridade da árvore de natal, devido a um dano catastrófico a este equipamento.

[2] O *shroud* é um revestimento, opcionalmente instalado, no conjunto motor-bomba e que tem a função de promover a redução da área de passagem aos fluidos (petróleo, gás e água) e, por conseguinte, produzir uma maior troca térmica entre o motor e fluidos devido ao aumento da velocidade local.

velocidade média da fase líquida, podendo levar a um menor arraste da fase gasosa. Outra preocupação diz respeito à maneira que estas fases seriam lançadas no interior do MOBO, pois as fases poderiam se separar no momento da transição da área da tubulação para a área do anular externo do poço alojador, que é bem maior. Nesta situação de fases separadas, o arraste seria ainda menos eficiente para garantir a descida do gás, pois na própria transição das áreas, boa parte da energia da fase gasosa útil para sua descida, seria perdida. Este cenário seria ainda mais grave se o arranjo de fases na linha, logo antes da admissão do MOBO, for em golfadas, já que no momento em que as bolhas mais alongadas entrarem, o arraste será pequeno, pois se terá pouco líquido, somente o líquido que se encontra no filme.

Na situação mais grave, o arraste insuficiente para garantir a descida da fase mais leve para a base do *shroud* poderia gerar um *plug* de gás no poço alojador, proporcionando uma condição intermitente de deslocamento da corrente bifásica. Numa primeira fase deste processo intermitente, a incapacidade de arraste e o processo de separação que pode ocorrer na descarga das fases no poço alojador fariam com que apenas líquido (ou quase apenas líquido) conseguisse descer até a base do *shroud*. Sendo assim, apenas líquido seria bombeado.

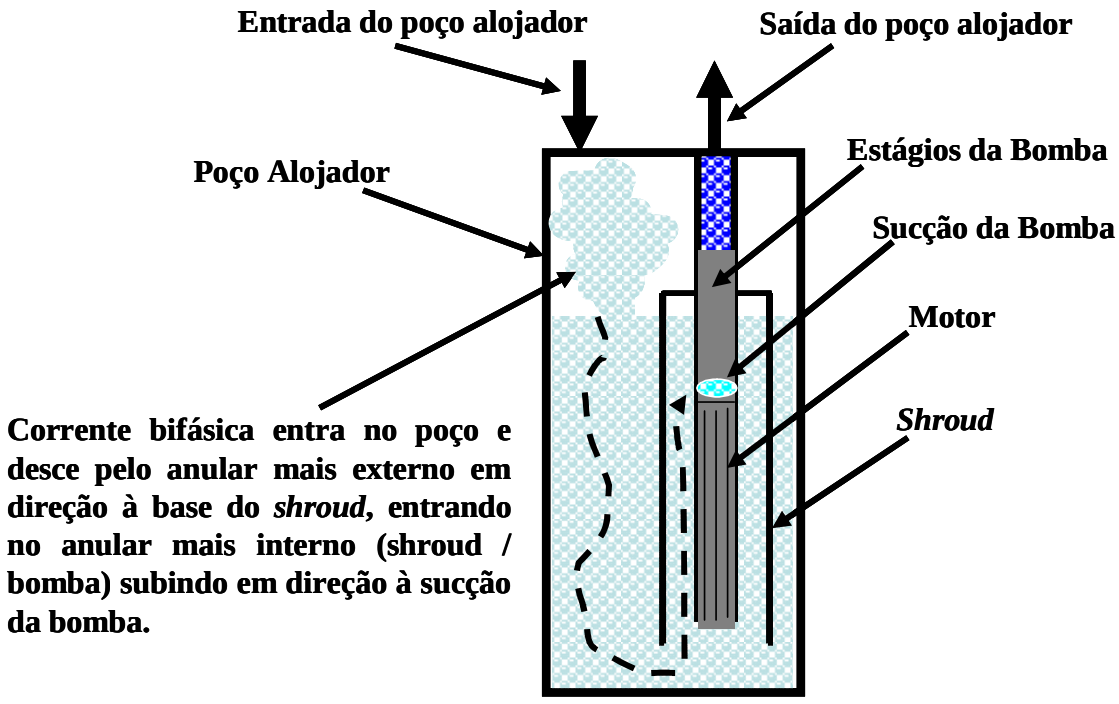


Figura 1.8 - Esquema mais detalhado do poço alojador, com a indicação do caminho feito pela corrente bifásica até chegar na sucção da bomba (GASPARI *et al*, 2007)

Nesta situação, a segunda fase do processo se estabeleceria, gás se acumularia na parte superior do poço, criando um nível dinâmico no anular externo. Como este gás não é produzido, o seu acúmulo levaria a um aumento de pressão no anular externo, que pelo princípio dos vasos comunicantes, resultaria do nível dinâmico a ficar cada vez mais baixo, até o ponto em que este nível chegasse à base do *shroud*. É neste momento que a terceira fase do processo poderia ocorrer, gerando uma violenta descarga de gás no anular interno, levando a sucção da bomba a receber uma fração de gás alta e a BCSS a um possível bloqueio de gás e, conseqüentemente, a uma falha prematura operacional.

Os estudos experimentais foram realizados em um modelo que em relação ao protótipo de Jubarte foi reduzido em uma escala de 7,5. A similaridade geométrica não só foi respeitada na redução do poço alojador propriamente dito, mas também no diâmetro da linha de produção que conduz a corrente bifásica ao MOBO, assim como em todos os acidentes existentes na linha antes de atingir a entrada do MOBO.

Conforme Gaspari *et al* (2007) , do que foi observado nos testes, o jato da entrada do aparato experimental, esquematicamente apresentado na Figura 1.9, pode ser admitido como monofásico, sendo que o gás se separa quase que automaticamente no momento que os fluidos entram no aparato. O jato tem uma função importante na formação do filme de líquido que escoará em um bom trecho do poço modelo. Logo antes do topo do *shroud*, o jato molha parcialmente tanto a parede externa da coluna, quanto à interna do revestimento, dando início ao filme de líquido descendente.

O topo do *shroud*, conforme esquema da Figura 1.9, é uma região de acumulação em que é difícil definir a forma do filme de líquido e sua espessura, parece ocorrer certa dispersão de gás na fase líquida, muito embora, alguns centímetros após esta região, aparentemente de fases dispersas, o filme de líquido volte a se tornar bem distinguível.

Para todos os casos estudados com presença de gás na entrada do poço alojador modelo, Gaspari *et al* (2007) identificaram um nível dinâmico no anular *shroud* – poço alojador estabelecido pela coleta de líquido que é transportado pelo filme e parte do gás existente no núcleo gasoso. Quando a massa de gás coletada no nível dinâmico é igual à massa de gás que entra no poço alojador modelo, tem-se então um sistema estável (*vide* Figura 1.10, detalhe 1).

Onde a quantidade de líquido e gás que entra na sucção da bomba é idêntica à quantidade destas fases que entra no poço alojador modelo, corrigindo apenas o tempo necessário para que as fases percorram o circuito que vai da entrada do poço até a sucção da bomba.

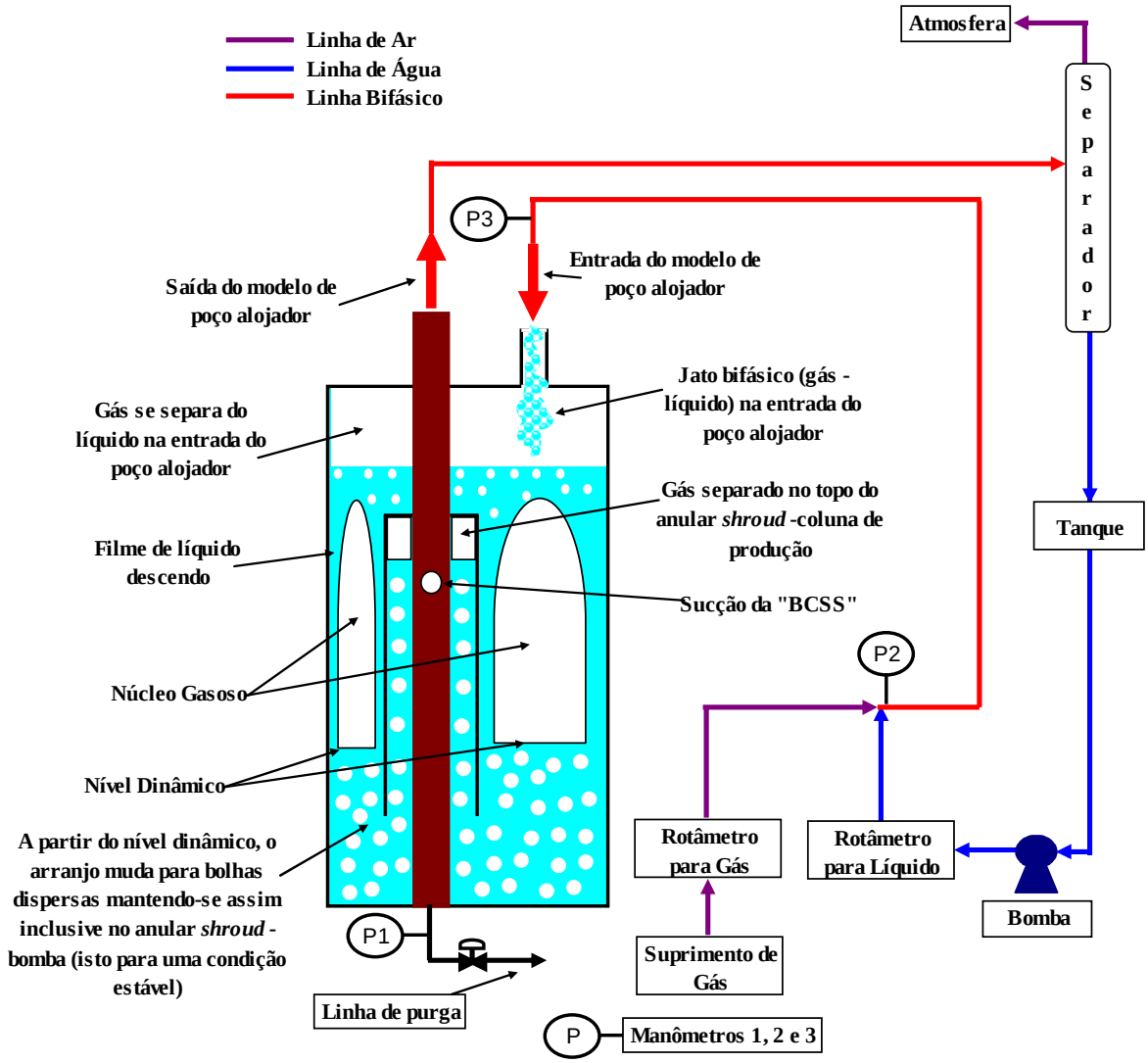


Figura 1.9 - Esquema da estrutura de escoamento observada nos testes experimentais

Para todos os casos estudados com presença de gás na entrada do poço alojador modelo, Gaspari *et al* (2007) identificaram um nível dinâmico no anular *shroud* – poço alojador estabelecido pela coleta de líquido que é transportado pelo filme e parte do gás existente no núcleo gasoso. Quando a massa de gás coletada no nível dinâmico é igual à massa de gás que entra no poço alojador modelo, tem-se então um sistema estável (*vide* Figura 1.10, detalhe 1). Onde a quantidade de líquido e gás que entra na sucção da bomba é idêntica à quantidade

destas fases que entra no poço alojador modelo, corrigindo apenas o tempo necessário para que as fases percorram o circuito que vai da entrada do poço até a sucção da bomba.

Caso a massa de gás coletada no nível dinâmico seja inferior à que entra, tem-se caracterizado uma situação de instabilidade (*vide* Figura 1.10, detalhe 2). O gás que se encontra no núcleo gasoso entre filmes irá se acumular, aumentando a pressão do MOBO. A variação de pressão ao longo do filme não deve ser grande, pois este deve ter um comportamento muito similar ao que se verifica em um filme de líquido ao redor de uma bolha de Taylor, ou seja, um filme em queda livre. Desconsiderando os termos de perda de carga, que devem ser pouco relevantes no sistema, quando comparados com os termos de hidrostática, temos caracterizado um tubo em U, o qual deve seguir um balanço do tipo: (pressão no núcleo + hidrostática da coluna de bolhas dispersas no anular externo) = (coluna de bolhas dispersas no *shroud* + pressão na sucção da bomba). Como a pressão no núcleo aumentou, para compensar o balanço de forças, a coluna de líquido gaseificada pelas bolhas no anular mais externo deve diminuir a sua altura, diminuindo a hidrostática. Se após esta alteração de nível, nada tenha mudado na massa de gás que é coletada no nível dinâmico ou que entra no poço, o desequilíbrio entre o que entra e o que sai continuará existindo e a pressão no núcleo gasoso continuará aumentando e levando a diminuição do nível dinâmico. Promovendo assim, uma danosa condição quando este encontra a base do *shroud*, permitindo o descarregamento de todo o gás acumulado no núcleo gasoso para dentro do anular *shroud*-bomba, indo em direção à sucção da bomba um escoamento com uma alta fração de gás (*vide* Figura 1.10, detalhes 3 e 4).

Entretanto, de acordo com Gaspari *et al* (2007), a dinâmica de escoamento apresentada na Figura 1.10 não se evidencia quando os mesmos experimentos, ou seja, quando as mesmas vazões de líquido e gás são estabelecidas no poço alojador modelo e o *shroud* encontra-se com furos laterais (15 furos de 1mm, dispostos de forma helicoidal ao longo do *shroud*). Durante os experimentos com o *shroud* contendo os furos laterais, foi constatado que não ocorria descarga do anular *shroud* – poço alojador modelo, ou seja, era instituído certo nível dinâmico de líquido neste referido anular. A explicação para esta dinâmica, apontada pelo Gaspari *et al* (2007), é que visualmente foi verificada a passagem preferencial de gás pelos furos laterais, de forma que parte do gás que possivelmente iria se acumular no anular *shroud* - poço alojador modelo, com a presença dos furos, escoou para o anular interno *shroud* – coluna de produção, possibilitando um equilíbrio entre esses dois anulares e conseqüentemente o estabelecimento de certo nível dinâmico de líquido no anular *shroud* - poço alojador modelo.

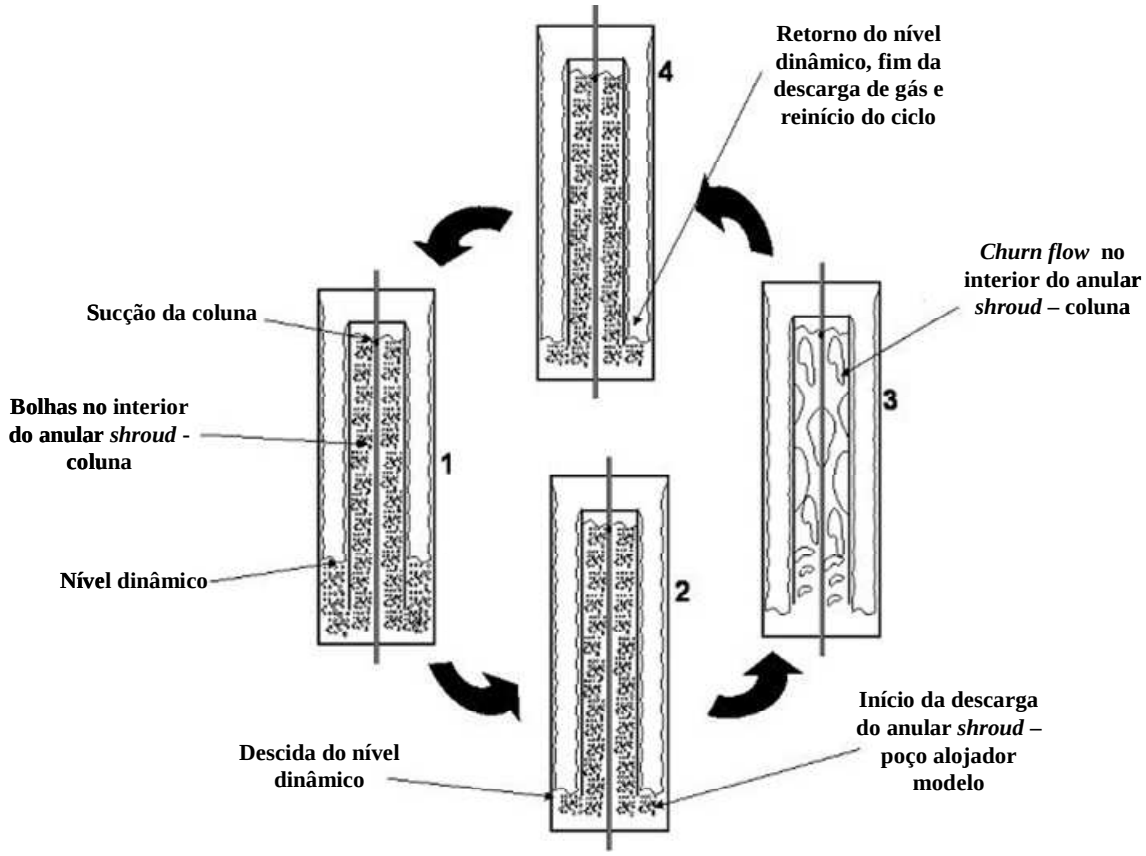


Figura 1.10 - Ciclo intermitente do experimento (GASPARI *et al*, 2007)

1.6. Objetivo

O objetivo deste trabalho é modelar e analisar, através de fluidodinâmica computacional a dinâmica de escoamento num poço alojador modelo. As simulações foram conduzidas com geometria e condições de contorno semelhantes às realizadas durante os experimentos e reportado por Gaspari *et al* (2007). Por fim, uma vez analisado e validado o modelo matemático, definiu-se um óleo e gás com características típicas do Campo de Jubarte e verificou-se o comportamento fluidodinâmico no modelo computacional com e sem furos laterais no *shroud*.

1.7. Estrutura do Trabalho

O estudo foi dividido em várias etapas, esquematizadas na Figura 1.11, que são apresentadas e discutidas ao longo do trabalho. A estrutura do trabalho é iniciada com uma análise dos

resultados experimentais obtidos por Gaspari *et al* (2007). Em seguida, foram selecionadas 2 vazões de líquido (água) e para cada uma, 2 variações de presença de gás livre (ar).

Uma vez selecionadas as vazões de água e ar, elaborou-se uma matriz de simulação que contemplava a variação geométrica do poço modelo experimental, ou seja, o *shroud* com furos e sem furos laterais. Além disso, visando uma investigação mais específica, foram realizadas simulações com fluido semelhante ao óleo e gás do Campo de Jubarte escoando nas condições de temperatura e pressão encontradas nas instalações submarinas.

Com uso do aplicativo *Workbench* do Ansys CFX 11, elaborou-se 2 geometrias do poço modelo experimental. Tais geometrias se diferenciam somente no *shroud*: uma delas tem 15 furos laterais de 1 mm de diâmetro cada, dispersos de forma helicoidal ao longo do *shroud* de 3,44 m de comprimento e na outra geometria não há furos laterais. De posse destas geometrias, gerou-se 6 malhas com uso do aplicativo CFX *Mesh*.

Com a definição das malhas, concebeu-se um modelo de escoamento de 2 fluidos (multifásico) no CFX *Pre* e foram estabelecidas as condições de contorno apresentadas na matriz de simulação elaborada a partir dos dados experimentais descritos por Gaspari *et al* (2007).

Os resultados das simulações permitiram validar a modelagem de escoamento proposta no Ansys CFX. A seguir iniciou-se a investigação do comportamento fluidodinâmico no modelo computacional frente a um líquido viscoso com presença de ar e com variação de geometria do *shroud*, com e sem furos. Investigou-se também de forma exploratória, com uso do CFX, a dinâmica de escoamento de um óleo e gás típico de Jubarte nas condições operacionais de pressão e temperatura do MOBO.

De posse dos resultados obtidos do comportamento fluidodinâmico no modelo computacional proposto frente aos diferentes conjuntos de condições de contorno deste trabalho, são apresentadas algumas impressões analíticas e recomendações.

Figura 1.11 - Etapas do trabalho realizado

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Modelo de Dois Fluidos e as Forças Interfaciais

O desenvolvimento do escoamento bifásico tem que considerar as interações entre fases, que dependem de condições operacionais, propriedades dos fluidos e também dos padrões de escoamento. No modelo de dois fluidos, cada fase é considerada separadamente. Assim, o modelo é formulado em termos de dois conjuntos de equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. A formulação original do modelo, Ishii 1975, foi feita a partir das equações diferenciai locais instantâneas de conservação às quais se aplicam procedimentos apropriados de médias temporais. O fechamento do sistema de equações requer o desenvolvimento de equações constitutivas. Os mecanismos físicos a serem modelados, segundo ele, são as forças de arrasto as que não são de arrasto (massa virtual, sustentação, força de parede), a pressão interfacial e a turbulência. Espera-se que o Modelo de Dois Fluidos tenha a capacidade de prever a distribuição das fases na seção transversal do escoamento. Isto foi estudado por Lahey Jr. (1990), que demonstrou que os fenômenos da segregação das fases só podem ser preditos se todos os mecanismos forem adequadamente modelados, incluindo a turbulência e as várias forças interfaciais.

As forças de arrasto foram estudadas pro Ishii e Zuber (1979) quando os autores desenvolveram equações para o coeficiente de arrasto a partir de critérios de similaridade entre um sistema com uma só partícula e um sistema multi-partícula, e a introdução do conceito da viscosidade de mistura. Os autores, através de inúmeros experimentos e dados publicados na literatura, propuseram uma lei para o coeficiente de arrasto de uma forma geral. Ishii e Pei (1980) estudaram o efeito da contaminação da superfície da bolha no arrasto. Quando a superfície da bolha não tivesse sido contaminada. Este fato reflete-se no coeficiente da força de arrasto que deve ser aumentado. Já para Kuo e Wallis (1988) o coeficiente de arrasto é uma função do número de Reynolds e do número de Weber, ambos calculados em função da velocidade relativa da bolha. Os autores concluíram que o coeficiente de arrasto pode variai de ± 50% do regime transiente para o regime permanente.

Se a velocidade entre o fluido e a partícula é constante, a única força atuante é a força de arrasto, quando o movimento é transiente ou não uniforme, outras forças que não são de arrasto atuam na partícula. As forças que não são de arrasto são divididas em pressão

interfacial, massa virtual e sustentação lateral. Alguns autores incluem dentro da força de sustentação lateral a força de parede. Esta força tem um sentido inverso da força de sustentação lateral e existe somente para uma região próxima da parede. Drew e Lahey Jr. (1987) fizeram um estudo de formulação das forças de massa virtual e a sustentação lateral e concluíram que separadamente cada uma das forças não é objetiva, mas quando somadas elas são objetivas, isto é, não dependem do caminho adotado ou do sistema de coordenadas empregadas para expressá-las.

A força de sustentação lateral pode ser entendida como força que uma esfera rígida sofre ao se deslocar em um escoamento cisalhante. Diversos autores ajustaram os dados experimentais com a força de sustentação lateral através do coeficiente de sustentação lateral, que é a constantes que aparece multiplicando a equação da força de sustentação lateral. Para o estudo realizado da simulação numérica do poço alojador de bombeio foi desconsiderada a influência da força de sustentação.

A força de massa virtual é a força necessária para acelerar a massa da fase contínua que circunda a fase dispersa quando há uma variação do movimento relativo. O coeficiente FDA força de massa virtual descreve o volume deslocado para compor a massa efetiva da fase dispersa. Para partículas esféricas Drew e Lahey Jr. (1987) sugeriram um valor igual a 0,5. Em outras geometrias que não a esférica estes valores variam. Para o estudo realizado da simulação numérica do poço alojador de bombeio foi desconsiderada a influência da força de massa virtual.

2.2. Simulação Numérica

Hill *et al* (1995) estudaram escoamentos tantos ascendentes como descendentes em escoamentos concorrentes. Os autores utilizaram o Modelo de Dois Fluidos e o modelo k-ε modificado para um escoamento em bolhas ascendente e outro descendente, sendo ambos os escoamentos concorrentes. Os autores também estudaram a influência da parede do escoamento. O modelo demonstrou ser capaz de predizer o escoamento em bolhas tanto no caso ascendente quanto no caso descendente.

Lahey Jr. (1995) reviu o estado da arte de escoamento multifásico, demonstrando mais uma vez que as modernas técnicas de mecânica dos fluidos computacionais são capazes de predizer a distribuição de fase em escoamentos dispersos. O autor fez as simulações com o *software* CFD PHOENICS. As comparações foram feitas com dados experimentais de dois trabalhos da literatura. Para os escoamentos ascendentes foi utilizado o trabalho de Serizawa (1975) e para os escoamentos descendentes foi utilizado o trabalho de Wang (1987).

Matos *et al* (1999) fizeram a análise experimental e numérica de um escoamento vertical ascendente em bolhas em um canal de seção quadrada. As medidas experimentais de fração de vazio local foram realizadas utilizando-se a técnica da sonda elétrica condutiva. As distribuições de fração de vazio experimentais foram comparadas com resultados numéricos obtidos com a simulação do Modelo de Dois Fluidos. O estudo numérico foi realizado em três dimensões e utilizando o modelo de turbulência k-ε com correções para a turbulência induzida por bolhas. O Modelo de Dois Fluidos descreveu com razoável precisão a distribuição da fração de vazio na seção do tubo quadrado. Entretanto, seu resultado para a região central do duto foi ainda ligeiramente superior aos valores medidos, enquanto que próximo às paredes o valor calculado é inferior.

Para simplificar o estudo dos escoamentos bifásicos considera-se que as fases, contínua e dispersa, estão em equilíbrio termodinâmico. Com esta premissa o problema é postulado apenas com as Equações de Conservação da Massa e Quantidade de Movimento. Para este trabalho aplicou-se também esta premissa. Entretanto, ressalta-se que devido ao ineditismo da geometria e os sentidos de escoamentos dentro do MOBO, não foi encontrada na Literatura pesquisada nenhuma referência de estudos com escoamento com características semelhantes às evidenciadas dentro do MOBO.

2.3. Fluidodinâmica Computacional

Fluidodinâmica computacional (*CFD – Computational Fluid Dynamics*) é o termo dado ao grupo de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais, usadas para obter, visualizar e interpretar soluções computacionais para as equações de conservação envolvidas em dado escoamento. A origem dessas equações de conservação é a teoria de fenômenos de transporte. Portanto, pode-se dizer que CFD é o conjunto das técnicas de simulação computacional

usadas para predizer os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos, os quais podem ser relacionados à ação e à interação de fatores como difusão, convecção, turbulência, etc. (Fontes *et al*, 2005).

É importante ressaltar que simulações em CFD possuem limitações. Na maioria dos casos, é necessário o desenvolvimento de modelos mais acurados como, por exemplo, nas aéreas de turbulência, radiação, combustão e escoamentos multifásicos. A aplicação de condições de contorno necessita do desenvolvimento de ferramentas cada vez melhores para descrever em detalhe a geometria do domínio de cálculo. Existe a necessidade constante de aperfeiçoamento das técnicas numéricas para ampliar a capacidade de resolução dos problemas mais complexos.

Devido ao uso de métodos numéricos para solução de equações diferenciais parciais, introduz-se uma aproximação. Como as equações não são precisamente iguais às originais, elas podem e provavelmente irão simular os fenômenos físicos não exatamente da mesma forma que as equações básicas o fariam. Matematicamente, essas diferenças se referem aos erros de truncamento.

Os efeitos dos erros de truncamento devem ser minuciosamente entendidos e controlados. Segundo Carneiro (2006), os erros gerados na solução numérica podem levar a pouca representatividade, ou a nenhuma, da solução, quando comparada com a realidade física. Logo, a ferramenta numérica é adequada e confiável quando se está de posse de um método numérico que resolva corretamente as equações diferenciais, e de um modelo matemático que represente com fidelidade o fenômeno físico. Vale ressaltar que a correta visualização e interpretação das soluções geradas são tão importantes quanto à solução em si.

Segundo Silva (2006), o primeiro passo na resolução de problemas envolvendo a fluidodinâmica computacional é a especificação do problema, incluindo geometria, condições de escoamento, e as necessidades da simulação. A geometria pode resultar de medidas de uma configuração existente ou pode ser associada ao desenho. As condições de escoamento devem ser incluídas. As necessidades das simulações envolvem questões como nível de precisão desejada, o tempo requerido, e a solução dos parâmetros de interesse.

Uma vez que o problema foi especificado, devem ser escolhidas apropriadas equações e condições de contorno. Em fluidodinâmica, os fenômenos são governados pela conservação da massa, do momento e da energia. As equações diferenciais parciais resultantes dessas leis de conservação referem-se às equações de Navier-Stokes. Estas equações são resolvidas em volumes de controle, que são escolhidos arbitrariamente, desde que estes contenham o fenômeno de interesse (Silva, 2006).

2.4. Representatividade e/ou Validade das Soluções Numéricas

As características necessárias para que a solução numérica seja representativa, ou seja, que tenha significado físico e que reproduza a realidade do escoamento, estão listadas abaixo (Versteeg e Malalasekera, 1995):

– Consistência: a consistência de uma solução é verificada pela diferença entre a equação discretizada e a exata, através do erro de truncamento. O erro de truncamento de um método consistente deve ser zero, quando o limite do tempo e espaço tenderem a zero: ($\Delta t \rightarrow 0$ e $\Delta x_i \rightarrow 0$).

– Estabilidade: o método de solução numérica é estável se não houver aumento dos erros ao longo do processo de solução numérica, ou seja, se os resultados não divergirem.

– Convergência: é a propriedade de um método numérico de produzir uma solução que se aproxima da solução exata das equações diferenciais, quando o espaçamento da malha, o tamanho do volume de controle ou do elemento tender a zero. Um método pode atingir uma solução convergente, mas a solução pode ser dependente da malha, isto é, se a malha mudar a solução muda. No entanto, há um tamanho de malha mínimo na qual a solução é independente dela.

– Conservação: um método iterativo pode chegar a uma solução das seguintes formas: quando o critério de convergência for o erro quadrático da raiz (*RMS - Root Mean Square*) das equações resolvidas; ou quando atingir um critério de convergência para o fechamento do balanço das equações simuladas. No estado estacionário, e na ausência de geração, a quantidade que sai dentro de um volume fechado é igual à quantidade que entra o mesmo volume, ou seja, baseados nas leis de conservação o que entra é igual ao que sai. No CFX a conservação pode ser avaliada pelo resultado dos balanços de momento e massa; que está mostrado no arquivo de extensão *.out*, ao término da simulação.

– Precisão: Existem três tipos de erro nas soluções numéricas de problemas de escoamento de fluidos. São eles: os **erros de modelagem**, introduzidos na solução por meio das suposições feitas nas derivações das equações de transporte, pela simplificação da geometria, do domínio e das condições de contorno; **erros de discretização**, introduzidos na solução por aproximações do sistema algébrico de equações discretizadas e, portanto, podem ser reduzidos usando interpolações, ou aplicando aproximações a regiões menores; **erros de convergência**, que são calculados pela diferença entre as soluções iterativas e exatas dos sistemas de equações algébricas. É essencial controlar e estimar erros de convergência e discretização antes de julgar a validade dos modelos de fenômenos físicos.

– Viabilidade da solução: devemos ter modelos projetados especificamente para resolução de alguns fenômenos muito complexos como, por exemplo, para turbulência, combustão, e escoamento multifásico, a fim de que os resultados tenham significado físico, e de que as soluções não divirjam.

A Figura 2.1 mostra um diagrama esquemático sobre as etapas e as formas de resolução de um problema físico de mecânica de fluidos por métodos experimentais através de testes em laboratório, ou por métodos teóricos através de modelos matemáticos, os quais podem ser resolvidos com métodos analíticos ou numéricos. A comparação dos resultados numéricos (RN) com os resultados analíticos (RA) das equações diferenciais, se existirem, ou com outros numéricos, caracteriza a validação numérica. Por outro lado, a comparação dos resultados numéricos (RN) com os resultados experimentais (RE) identifica a validação física.

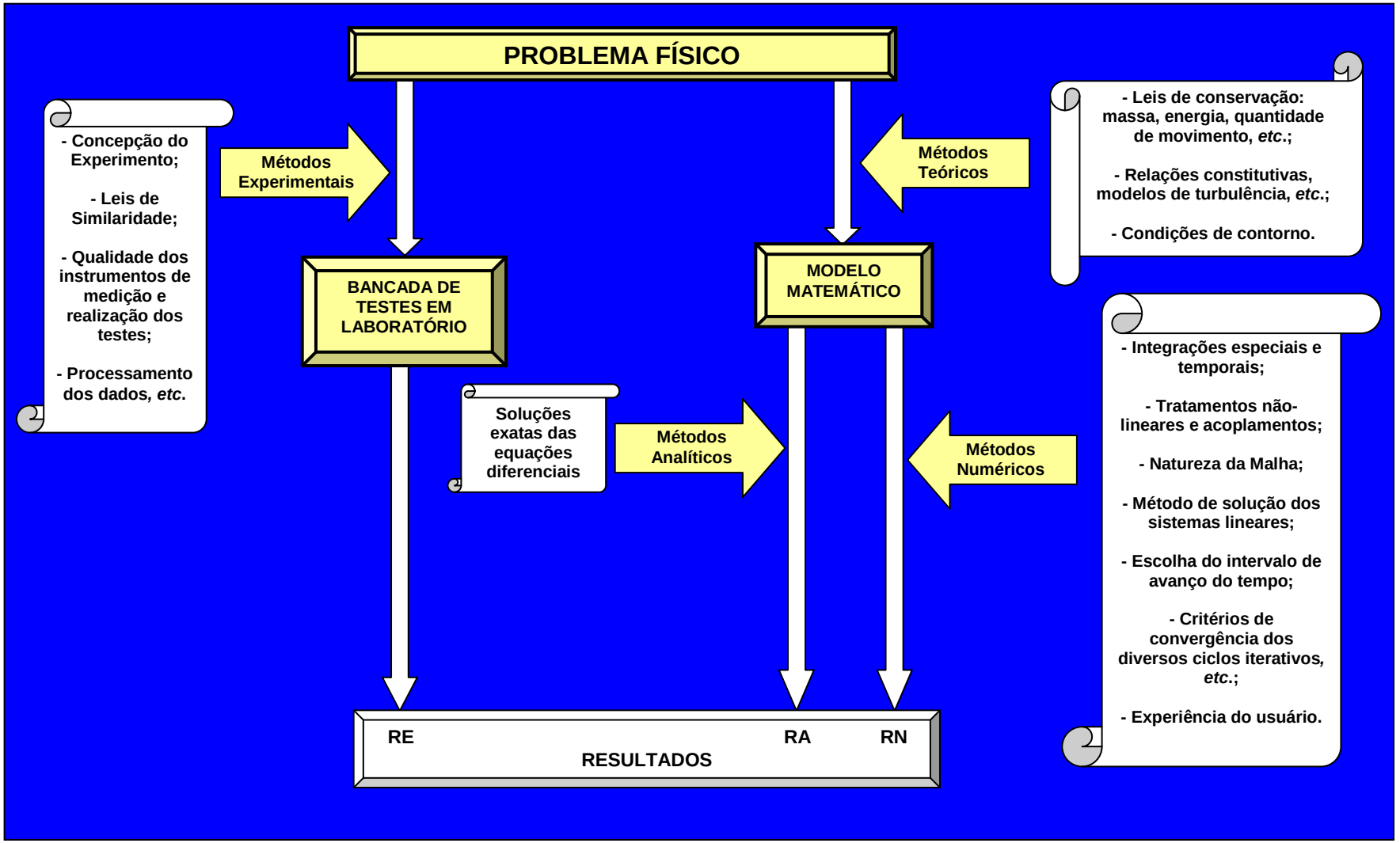


Figura 2.1 - Métodos de Solução de um problema de Mecânica dos Fluidos (adaptação de ALMEIDA REGO, 2008)

2.5. *CFD* - Etapas para Realização de uma Simulação

A grande maioria de softwares de *CFD* fornece um meio integrado de resolver e analisar problemas de escoamentos de fluidos, por isso eles costumam ser subdivididos em 5 (cinco) elementos principais: um módulo de *CAD* para construir a geometria, um gerador de malha, um pré-processador, um processador para obter solução (*Solver*) e um pós-processador.

2.5.1. Geometria

Através de ferramentas de *CAD* (*Computer Aided Design*), é possível desenhar qualquer objeto, ou seja, é possível criar o domínio, que é o espaço tridimensional onde se buscará a solução do problema.

2.5.2. Malha

Segundo Fontes *et al* (2005), depois de definir a descrição computacional do domínio, é necessário dividí-lo em pequenos subdomínios não sobrepostos, chamados elementos, pois a grande maioria dos métodos numéricos de solução de equações de transporte envolve cálculos a nível de subdomínios.

Este processo de subdivisão é a etapa chamada de geração de malha (em inglês, *grid* ou *mesh*). Deve-se notar que a forma como o domínio é subdividido depende em parte da metodologia numérica que será posteriormente aplicada. É importante ressaltar que a geometria representada não é uma réplica exata do original, porque os elementos usados têm lados retos ou faces planas, e sendo assim, ocorrem aproximações em curvas e superfícies da geometria. Desta forma, obtém-se o domínio computacional, que é uma aproximação da geometria modelada.

Basicamente, existem 2 (dois) tipos de malhas: as estruturadas e as não estruturadas. As malhas estruturadas são geradas pela subdivisão dos eixos coordenados em pequenos elementos unidimensionais, cujo produto cartesiano gera elementos bidimensionais e tridimensionais que são, em geral, quadriláteros (4 lados) e hexaedros (6 faces),

respectivamente. Nestas malhas, cada elemento tem sempre o mesmo número de elementos vizinhos, a não ser quando o mesmo pertence ao contorno. As malhas não-estruturadas são formadas por elementos que podem ter diversas formas. Em problemas bidimensionais, os elementos são polígonos: triângulos, quadriláteros, pentágonos, hexágonos, etc., sendo mais comum o uso de triângulos, que são os elementos mais simples. No caso tridimensional, os elementos são poliedros: tetraedros, pirâmides, prismas, hexaedros, etc., sendo os tetraedros os elementos mais usados. Malhas não-estruturadas conseguem representar mais facilmente as geometrias mais complexas, devido à maior flexibilidade de forma que seus elementos podem assumir.

A acurácia da solução de um problema em *CFD* depende do número de elementos e da forma de distribuição dos mesmos na malha. Em geral, a acurácia da solução melhora com o aumento do número de elementos na malha. Entretanto, conforme se aumenta o refino da malha, aumenta-se também o custo computacional. Sendo assim é necessário sempre balancear a acurácia da solução (obtida com o refino da malha) e o custo computacional, a fim de se obter a melhor solução possível no hardware disponível (Fontes *et al*, 2005).

As malhas podem, ainda, ser classificadas como uniformes, onde todas as células no domínio possuem o mesmo tamanho, ou não-uniformes, quando o tamanho das células pode variar. Malhas uniformes só podem ser obtidas em geometrias simples e são, usualmente, estruturadas. Na maioria dos casos práticos, são usadas malhas não-uniformes, pois é possível e desejável refinar a malha (usar elementos menores) apenas nas regiões onde os campos da solução sofrem grandes variações (gradientes elevados), usando uma malha mais grosseira (maiores elementos) nas regiões de pequenas variações. Neste caso, as malhas não estruturadas são mais adequadas que as estruturadas, uma vez que é possível fazer um refinamento local da malha. Para malhas estruturadas, o refinamento da malha não é local, propagando-se a partir da região de refinamento em todas as direções coordenadas. Isto pode ser visto na Figura 2.2, onde o refinamento da malha estruturada na região do ponto de expansão do duto é propagado longitudinalmente até o limite do domínio computacional, incluindo regiões onde o mesmo não seria desejado. Já para a malha não estruturada mostrada na Figura 2.3, o refinamento da malha na região próxima a expansão do duto não se propaga para outras regiões.

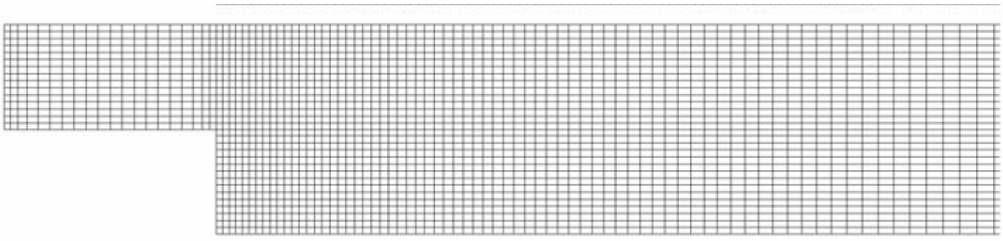


Figura 2.2 – Exemplo de Malha Estruturada Bidimensional (Fonte Damian, 2007)

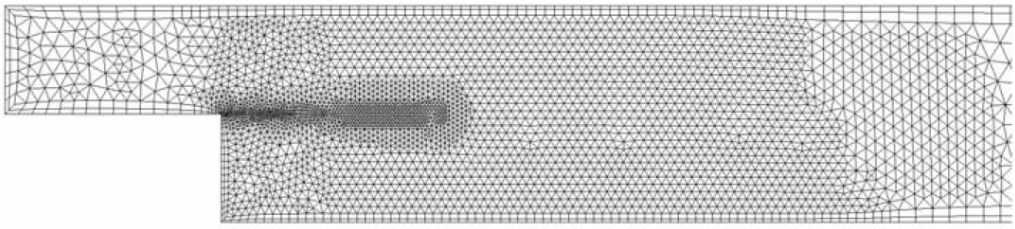


Figura 2.3 - Exemplo de Malha Não Estruturada Bidimensional (Fonte Damian, 2007)

Cabe ao usuário de *CFD* a importante tarefa de construir uma malha que conjugue da melhor forma possível a acurácia da solução do problema e o custo computacional desta solução, e para isto é necessário realizar um bom estudo de malha. Atualmente, mais de 50% do tempo gasto em um projeto usando *CFD* na indústria é dedicado à definição da geometria e à geração da malha. A maioria dos pacotes de *CFD* inclui uma interface *CAD* própria e/ou permitem a importação dos dados de outros *softwares CAD* e geradores de malha (Fontes *et al*, 2005).

2.5.3. Pré-Processamento: Modelagem e Condições de Contorno

De acordo com Fontes *et al* (2005), o pré-processamento consiste na modelagem de um problema de escoamento com a estruturação destas informações de forma que o *solver* possa usá-las. A modelagem envolve as seguintes informações:

– Seleção dos fenômenos físicos e/ou químicos que serão modelados e simulados;
– Definição das propriedades dos fluidos, como viscosidade, densidade, condutividade térmica, etc.;

– Especificação das condições de contorno apropriadas nos elementos da malha associados ao contorno do domínio.

Os pré-processadores mais recentes fornecem um banco de dados com as propriedades físicas dos fluidos mais comuns e permitem ao usuário evocar diversos modelos físicos e químicos como: modelos de turbulência, transferência de calor radiante, transferência de massa, reações químicas *etc*, já implementados no código ou ainda permitir a implementação de novos modelos.

2.5.4. *Solver*

É a parte principal de um pacote de *CFD*, pois ele contempla as técnicas numéricas de solução e seus parâmetros para resolver os problemas físicos do modo apropriado. Resumidamente, os métodos numéricos que formam a base do *solver* passam pelos seguintes passos:

– Aproximação das variáveis incógnitas do escoamento através de funções simples;
– Discretização, pela substituição das aproximações mencionadas acima nas equações de transporte que governam o escoamento, com manipulações matemáticas subseqüentes;
– Linearização do sistema de equações algébricas resultantes;
– Definição da estratégia de solução do sistema de equações algébricas lineares;
– Solução dos sistemas de equações algébricas lineares.

Existem várias técnicas numéricas de solução e suas diferenças estão associadas à forma com que as variáveis incógnitas são aproximadas e ao procedimento de discretização. Todas essas metodologias numéricas levam a sistemas de equações lineares (com matrizes cheias ou esparsas) com um grande número de equações e, portanto, uma abordagem numérica para a solução de tal sistema se torna necessária.

2.5.5. Pós-Processamento: Avaliação dos Resultados

Devido aos avanços tecnológicos em *hardware* e em *softwares* para gráficos, os principais pacotes de *CFD* estão equipados com ferramentas versáteis para visualização de campos escalares e vetoriais, incluindo:
– Visualização da geometria e da malha;

– Gráficos de vetores;
– Gráficos de contorno;
– Gráficos sobre superfícies no espaço tridimensional;
– Visualizações de linhas de corrente e de trajetórias das partículas;

A maioria dessas ferramentas também inclui a possibilidade de criar animações para facilitar a análise do resultado. Em adição às diferentes formas de visualização, todos os códigos oferecem arquivos de resultados em diferentes padrões, que podem ser exportados para outro *software* de visualização.

2.6. *CFD* – Modelagem de Escoamento Multifásico

O propósito desta seção é descrever as diferentes abordagens utilizadas para a formulação matemática de escoamentos multifásicos com uso do *CFD*. Segundo Paladino (2005), diversas classificações são apresentadas na literatura para modelos de escoamentos multifásicos. Uma das mais utilizadas na literatura classifica os modelos em duas grandes abordagens, Euleriana e Lagrangeana.

2.6.1. Classificação de Modelos para Escoamentos Multifásicos

Esta classificação refere-se a como são consideradas as fases dispersas. Na abordagem Euleriana tanto a fase contínua quanto a dispersa são consideradas como meios contínuos, enquanto que na Lagrangeana é resolvido um sistema de equações de conservação (massa, quantidade de movimento, energia etc.) para a fase contínua. Com os campos de velocidades desta fase, são calculadas as forças exercidas sobre as partículas dispersas (bolhas, gotas ou partículas sólidas), a partir das quais são calculadas as trajetórias destas partículas. A principal limitação deste modelo é que este é restrito a escoamentos dispersos, e com baixas frações volumétricas das fases dispersas, já que serão necessárias tantas equações quanto o número de partículas presentes no domínio. Quando as partículas são pequenas, ainda para baixas frações volumétricas, o número de partículas será muito grande, podendo inviabilizar a utilização deste modelo.

Segundo Paladino (2005), outra limitação da abordagem Lagrangeana é que para escoamentos com bolhas o modelo considera as partículas como sendo pontuais, ou seja, sem volume. Quando o tamanho das partículas é grande, como em escoamentos de bolhas, este modelo perde validade. No modelo Euleriano-Euleriano, para cada faixa de diâmetro considerada, devem ser consideradas diferentes "pseudo-fases" com diferentes tamanhos de partículas, requerendo a solução de um sistema de equações de conservação (massa e quantidade de movimento) adicional para cada faixa de diâmetros de partícula considerado. Nestes casos podem ainda ser utilizados tratamentos especiais para sistemas polidispersos como modelos de balanço populacional (MUSIG - *MUltiple Size Group*) (ver, por exemplo, Lo (2000), Alvarez *et al* (1994), Thompson & Stevens (1977)). Contudo estes modelos normalmente consideram que as partículas de todos os tamanhos se movimentam com a mesma velocidade.

Uma alternativa, quando se deseja calcular diferentes campos de velocidade para diferentes diâmetros de partícula é o modelo "*Slip*" Algébrico (ASM – Algebric Slip Model). Também chamado na literatura de *Drift Flux Model* (ver, por exemplo, Wallis, G. B. (1969)). Este modelo calcula uma velocidade relativa entre fases a partir de uma equação algébrica. Embora este modelo seja baseado numa abordagem Euleriana-Euleriana, o fato de se utilizarem equações algébricas para o cálculo das velocidades relativas faz com que possam ser considerados vários tamanhos de partículas sem aumentar consideravelmente o esforço computacional. Estas equações algébricas calcularão a velocidade terminal das partículas para as condições de escoamento em cada ponto do domínio. Desta forma, o modelo será válido para casos em que os tempos de relaxação das partículas, *i.e.*, os tempos em que as partículas atingem a sua velocidade terminal, são muito menores que os tempos característicos do escoamento (Paladino, 2005).

2.6.2. Forças Interfaciais

As forças interfaciais são comumente divididas em dois tipos: a força de arraste e outras forças (*drag force* e *non-drag forces*). De acordo com Paladino (2005), essa distinção é feita a partir do fato de que quando um corpo é submerso numa corrente fluida, as forças de não-arraste (massa virtual e sustentação são as mais comumente consideradas) aparecem mesmo quando a fase contínua é considerada invíscido.

As forças de interface geralmente levadas em consideração na modelagem de escoamentos multifásicos dispersos, são as forças de arraste, de massa virtual, de sustentação e de dispersão turbulenta. Diversos trabalhos (Kuo & Wallis (1988), Kowe *et al* (1988), Couet *et al* (1991)), entre outros, analisam as diferentes forças de interface que aparecem em escoamentos dispersos. De forma geral, apenas a força de arraste é considerada na maioria das aplicações e para este trabalho somente foi considerada a força de arraste na modelagem do escoamento estudado. Outras forças, como massa virtual, tem sido estudadas apenas do ponto de vista dos efeitos sobre a estabilidade do escoamento (Lahey *et al* (1980), Watanabe *et al* (1990)). Entretanto, para escoamentos acelerados, esta força, pode ter um efeito importante nos valores calculados, principalmente no gradiente de pressão (Paladino & Maliska (2004)).

- **A Força de Arraste**

A influência das diferentes forças de interface na estrutura do escoamento depende, *a priori*, do tipo de problema que está sendo estudado. Em escoamentos dispersos a força de arraste desempenha um papel fundamental, e é responsável pela maior parte da transferência de quantidade de movimento interfacial. Assim, esta força tem recebido grande atenção por parte dos pesquisadores da área, existindo inúmeros modelos para o seu cálculo. A forma padrão de expressar a força de arraste sobre um corpo numa corrente fluida é através do uso do coeficiente de arraste:

$$C_D = \frac{Fa}{\frac{1}{2} * \rho_c * U_r^{\,2} * Ap} \tag{2-1}$$

Sendo,

$$U_r = U_c - U_d \tag{2-2}$$

Onde,

- C_D - Coeficiente de arraste
- Fa - Força de arraste
- ρ_c - Massa específica da fase contínua
- U_r - Velocidade média relativa entre a fase contínua e a partícula dispersa
- U_c - Velocidade média da fase contínua
- U_d - Velocidade média da fase partícula dispersa
- Ap - Área projetada da partícula dispersa na direção do fluxo

Paladino (2001) afirma que a força de arraste sobre um corpo pode ser separada em duas parcelas, a força devida ao cisalhamento superficial e aquela exercida pela distribuição de pressão assimétrica no corpo, chamado de arraste de forma. Assim, para baixos números de Reynolds o arraste da partícula é principalmente devido ao atrito superficial. Quando o número de Re aumenta, o arraste de forma vai tendo maior influência, até que para altos valores de Re o arraste é dominado por este fenômeno. Dessa forma três regimes são amplamente conhecidos:

1- Regime de Stokes ($0 < Re_d < 0{,}2$). Neste regime, o coeficiente e arraste é dado pela Lei de Stokes e se caracteriza por um escoamento laminar (*vide* Figura 2.4).

$$C_D = \frac{24}{Re_d} \tag{2-3}$$

Onde,

C_D - Coeficiente de arraste
Re_d - Número de Reynolds da fase dispersa

2- Regime de Transição ($0 < Re_d < 10^3$). Nesta região tanto o atrito superficial (forças viscosas) quanto o arraste de forma são importantes (*vide* Figura 2.4).

Diversas correlações empíricas são avaliadas, entre elas estão as desenvolvidas por Schiller and Nauman, Ishii and Zuber e Ihme et al., citadas no manual do CFX (2009), que são escritas respectivamente como:

$$C_D = \frac{24}{Re_d} * \left(1 + 0{,}15 * Re_d^{\,0{,}687}\right) \tag{2-4}$$

$$C_D = \frac{24}{Re_d} * \left(1 + 0{,}10 * Re_d^{\,0{,}75}\right) \tag{2-5}$$

$$C_D = \frac{24}{Re_d} + 5{,}48 * Re_d^{\,-0{,}573} + 0{,}36 \tag{2-6}$$

Onde,

C_D - Coeficiente de arraste
Re_d - Número de Reynolds da fase dispersa

3- Regime de Newton ($10^3 < Re_d < 2 \times 10^5$). Nesta região o coeficiente de arraste se torna independe do valor do número de Reynolds, ou seja, das forças viscosas. Assumindo valor aproximado de 0,44 (*vide* Figura 2.4).

4- Regime Supercrítico ($Re_d > 2 \times 10^5$). Nesta região ocorre o descolamento da camada limite e a presença de um maior número de vórtices, causando uma drástica redução do coeficiente de atrito (*vide* Figura 2.4).

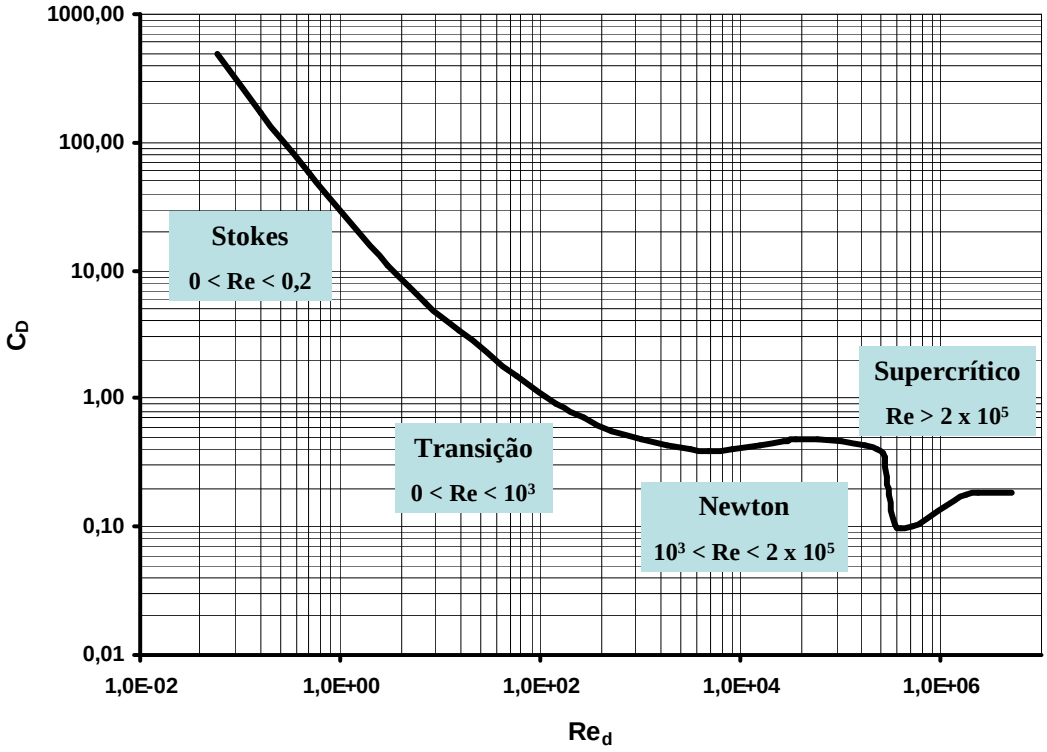


Figura 2.4 - Coeficiente de Arraste vs. Número de Reynolds
(Fonte: Mathematics Department at Indiana University of Pennsylvania)

Inúmeros outros modelos existem para o cálculo do coeficiente de arraste, entre outros, aqueles que levam em consideração a forma distorcida da bolha ou partícula, bolhas alongadas ou elipsoidais. Para este trabalho considerou-se a correlação de Ishii and Zuber para predição do coeficiente de arraste, pois a mesma contempla a existência de deformação na forma da fase dispersa e segue automaticamente a seguinte rotina presente no CFX 12 para o cálculo do coeficiente de arraste:

$$C_D^{esfera} \geq C_D^{elíptica} \Rightarrow C_D = C_D^{esfera} \tag{2-7}$$

$$C_D^{esfera} < C_D^{elíptica} \Rightarrow C_D = min\left(C_D^{elíptica}, C_D^{cap}\right) \tag{2-8}$$

Onde,

C_D - Coeficiente de arraste
C_D^{esfera} - Coeficiente de arraste de uma partícula dispersa esférica
$C_D^{elíptica}$ - Coeficiente de arraste de uma partícula dispersa elíptica
C_D^{cap} - Coeficiente de arraste de uma partícula dispersa tipo semi-esfera

- **A Força de Massa Virtual**

A força de massa virtual aparece devido à aceleração relativa de uma parcela de massa da fase contínua que é arrastada pela fase dispersa adquirindo a sua velocidade. Tal contribuição foi ignorada na modelagem do escoamento apresentado neste trabalho.

- **Força de sustentação**

A sustentação é dada pela rotação induzida pela vorticidade do campo de velocidade médias cujos gradientes possuem uma escala de comprimento muito maior que os diâmetros das bolhas, e muito maior que as escalas de comprimento dos gradientes de velocidades locais na superfície das bolhas. Estes gradientes de velocidades locais são os responsáveis pela força de arraste enquanto as forças de sustentação e massa virtual estão associadas às variações das velocidades promediadas (Paladino, 2001).

- **Força de dispersão turbulenta**

Esta força é o resultado das componentes flutuantes das forças atuando sobre uma partícula, e representa a promedição volumétrica das flutuações da força de arraste.

2.6.3. Equações do Modelo de Dois Fluidos

Um modelo geral para representar matematicamente um escoamento bifásico é o denominado Modelo de Dois Fluidos. As equações de conservação são escritas para as duas fases, que se acoplam através dos termos interfaciais. O Modelo de dois Fluidos foi formalizado por Ishii (1975), e complementado por Drew e Lahey (1979). O modelo contempla diversos mecanismos que determinam os campos de velocidade, pressão e temperatura das fases e da fração de vazio, o que determina também, como conseqüência, a distribuição das fases nas direções transversais ao escoamento principal. É um modelo geral na medida que, através de simplificações, chega-se a modelos mais simples. Por exemplo: modelo de difusão, modelo de deslizamento, modelo homogêneo, modelo de fases separadas. O leitor que estiver interessado em mais detalhes sobre um destes modelos mais simples deve procurar, por exemplo, o livro "*One-dimensional Two-phase Flow*", Wallis (1969).

O escoamento bifásico isotérmico e sem mudança de fase, as equações de conservação do Modelo de Dois Fluidos reduzem-se às Equações de Conservação da massa e da quantidade de Movimento. Assim, escritas em funções de valores médio-temporais das variáveis, as equações de conservação e a transferência interfacial são escritas, para duas fases representadas por $_{k=G}$ (gás) e $_{k=L}$ (líquido), como Ishii (1975):

Conservação de Massa

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla.(\alpha_k \rho_k \overline{V}_k) = 0 \tag{2-9}$$

$$\sum_{k=G,L} \alpha_k = 1 \tag{2-10}$$

Conservação da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_k \rho_k \overline{V}_k\right) + \nabla.(\alpha_k \rho_k \overline{V}_k \overline{V}_k) = \alpha_k \nabla p_k + \nabla.\left[\alpha_k \tau_k^{\mathrm{Re}}\right] + \alpha_k \rho_k \overline{g} + (p_{ki} - p_k)\nabla \alpha_k + \overline{M}_k^D \tag{2-11}$$

Transferência Interfacial

$$\sum_{k=G,L} \overline{M}_k^D = \overline{M_k^\sigma} \tag{2-12}$$

O subscrito i define os valores das variáveis na interface. A fração de vazio local é α_k, ρ_k representa a densidade da fase k, $\overline{V}_k$ é a sua velocidade, p_k é a pressão, $\overline{g}$ é o campo gravitacional, τ_k^{Re} é o tensor de tensão turbulento, $\overline{M}_k^D$ representa as forças interfaciais generalizadas e $\overline{M_k^{\sigma}}$ representa a força resultante da ação da tensão superficial. O fechamento do sistema de equações (4-9) a (4-12) é obtido recorrendo-se a equações constitutivas. As equações constitutivas são relações de estado, constantes, correlações, equações algébricas e/ou equações diferenciais representando as densidades das fases, o campo gravitacional, a força de pressão interfacial, as forças interfaciais generalizadas expressas por $\overline{M}_k^D$ além do tensor de tensão turbulento, ou tensor de Reynolds. Por exemplo, da relação de estado do gás perfeito para o ar determina-se sua densidade, em função da temperatura e pressão; a densidade da água e aceleração da gravidade são constantes de cálculo.

A força interfacial generalizada atuando na fase k, $\overline{M}_k^D$, é normalmente subdividida em força de arrasto e forças que não são de arrasto. As forças que não são de arrasto são a força de sustentação lateral, a força de parede e a força de massa virtual. Para este trabalho o modelo computacional aplicado somente considerou a contribuição da força de arrasto.

3. METODOLOGIA

3.1. Análise dos Resultados Experimentais

Com base na estimativa de produção de líquido e gás esperada para o poço produtor do Campo de Jubarte, vazão de líquido de 2000 m^3/d e 20% de percentagem de gás livre (PGL), Gaspari *et al* (2007) elaboraram um mapa de produção investigativo, cuja motivação era estabelecer possíveis cenários produtivos que o poço produtor poderia ter ao longo da sua vida produtiva (1000 m^3/d < vazão de líquido < 3000 m^3/d e 10% < PGL < 20%).

Com base neste mapa, Gaspari *et al* (2007) desenvolveram um estudo de similaridade (*vide* APÊNDICE A) para o duto a montante da entrada do poço alojador (*flowline* do poço produtor até o poço alojador do BCSS – *vide* Figura 3.1), baseando-se num escoamento padrão *slug*. Este é considerado factível para o arranjo produtivo estabelecido em Jubarte e com características maléficas para a operação do MOBO. Isto porque as fases líquida e gasosa já entrariam no poço alojador plenamente segregadas, implicando, muito provavelmente, numa morfologia de intermitência de líquido e gás na BCSS e, por conseguinte, numa perda de desempenho da bomba e possível comprometimento na refrigeração do motor, o que aumentaria sobremaneira o risco de falhas prematuras do BCSS.

Como extensão do estudo de similaridade, foi construído um modelo experimental do poço alojador 7,5 vezes menor (*vide* Figura 3.1 à Figura 3.4), cuja geometria foi perfeitamente seguida em relação ao protótipo que foi instalado no campo de Jubarte.

Na Tabela 3.1, são apresentadas as vazões de água e ar apontadas pelos estudos de similaridade de Gaspari *et al* (2007) e que foram empregadas durante os testes experimentais no poço alojador modelo instalado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos do Centro de Pesquisa da PETROBRAS - CENPES.

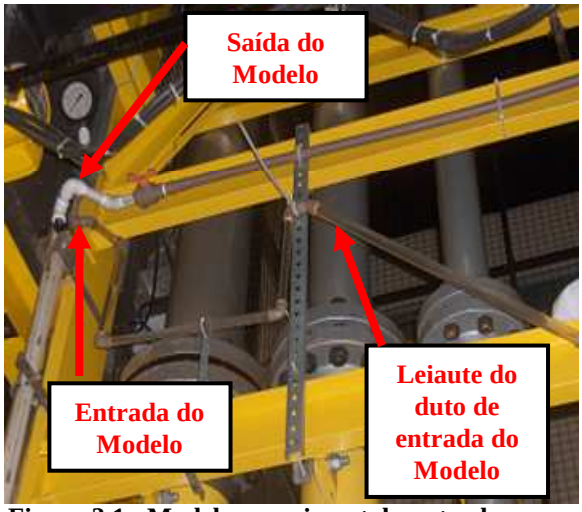


Figura 3.1 - Modelo experimental - entrada e saída e leiaute do duto de entrada

Figura 3.3 - Modelo experimental - coluna de acrílico (poço alojador – 4,55 m)

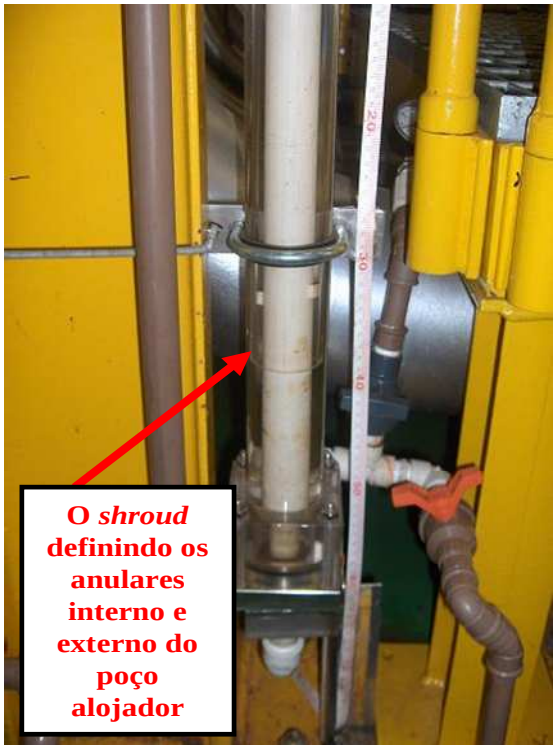


Figura 3.2 - Detalhe do *shroud* (tubo de acrílico interno)

Figura 3.4 - Detalhe do furo que simula a sucção do BCSS

Tabela 3.1 - Matriz experimental: vazões de água e ar

Vazão de Líquido no MOBO (m^3/d)	Percentagem de Gás Livre (PGL) e Vazões de Água (QL) e Ar (QG) no Modelo em L/min							
	10%		20%		30%		40%	
	QL	QG	QL	QG	QL	QG	QL	QG
1000	4,50	0,50	4,50	1,13	4,50	1,93	4,50	3,00
1500	6,80	0,75	6,80	1,70	6,80	2,90	6,80	4,51
2000	9,00	1,00	9,00	2,25	9,00	3,90	9,00	6,00
2500	11,30	1,25	11,30	2,82	11,30	4,80	11,30	7,50
3000	13,50	1,50	13,50	3,38	13,50	5,80	13,50	9,00

A equação do PGL foi definida como:

$$PGL = \frac{100 * \textit{Vazão de Ar na Entrada do MOBO}}{(\textit{Vazão de Ar na Entrada do MOBO} + \textit{Vazão de Água na Entrada do MOBO})} \quad (3\text{-}1)$$

3.1.1. Seleção dos Resultados Experimentais

Com base nos resultados experimentais obtidos por Gaspari *et al* (2007), foram selecionadas duas vazões de líquido para realizar os estudos de simulação computacional. Essas vazões foram 9,0 L/min (Q1) e 13,5 L/min (Q2), correspondentes por similaridade às vazões de líquido no MOBO para o Campo de Jubarte de 2000 e 3000 m^3/d (*vide*APÊNDICE A).

Para facilitar a compreensão, comparação, estudos e as análises, foi elaborada uma codificação para identificar os testes experimentais e as simulações que visavam validar o modelo computacional implementado no CFX. Tal codificação e simbologia são explicadas a seguir. Observe que somente as letras N, X, D e Y sofrem alterações na codificação padrão.

QN.PGLNN.XF-D.Y

QN – Os 2 primeiros dígitos referem-se às vazões de líquido, onde "N" pode assumir valores 1 ou 2, correspondendo, respectivamente, às vazões de água de 9,0 L/min (Q1) e de 13,5 L/min (Q2);

PGLNN – Estes 5 dígitos referem-se à quantidade de gás livre presente na entrada do poço alojador, onde “NN” representa o valor da percentagem de gás livre na entrada do poço alojador. Por exemplo, PGL05 significa 5,0% de gás livre na entrada do poço alojador, enquanto que PGL18 significa 18,0% de gás livre na entrada do poço alojador.

XF – Estes 2 dígitos representam se o *shroud* está com ou sem furos laterais. A letra “X” somente assume valores de “C” ou “S”. Por exemplo, CF significa *shroud* com furos laterais; SF significa *shroud* sem furos laterais.

D – Este dígito representa a natureza do teste, somente assume valores de “E” ou “S”. Correspondendo a teste experimental (E) ou simulado (S).

Y – Este dígito representa a natureza do fluido líquido usado, somente assume valor de “A”, correspondendo ao teste com água.

Assim, seguem 2 exemplos para elucidar a codificação apresentada:

Q1.PGL10.SF-E.A – Tal codificação refere-se a um teste experimental, cuja vazão de água foi de 9,0 L/min, a quantidade de gás livre na entrada do poço alojador foi de 10% e o teste foi realizado com o *shroud* sem furos laterais.

Q2.PGL05.CF-S.A – Tal codificação refere-se a uma simulação, cuja vazão de água foi de 13,5 L/min, a quantidade de gás livre na entrada do poço alojador foi de 5% e a simulação foi realizada considerando a malha contendo o *shroud* com furos laterais.

3.1.2. Resultados Experimentais Selecionados – *shroud* sem furos laterais

Para cada vazão de líquido selecionada Q1 e Q2, foram escolhidos 2 casos de presença de gás livre. A partir da Tabela 3.2 até a Tabela 3.5, são apresentados os pontos experimentais selecionados com suas respectivas observações experimentais verificadas durante os testes. As pressões P2 e P3, presentes nas tabelas a seguir, referem-se às pressões no ponto de mistura da água com o ar e entrada do poço alojador, respectivamente (*vide* Figura 1.9).

Nas Tabela 3.2 a Tabela 3.9, a descarga do anular poço alojador / *shroud* significa que bolsões de ar chegarão ao furo que representa a sucção da BCS, e se acaso tal fenômeno ocorresse no MOBO de Jubarte (caso real), durante o escoamento ascendente, esta corrente multifásica rica em gás não promoveria uma remoção eficiente do calor gerado pelo motor do BCS, e, ao chegar à sucção da BCS provocaria uma grande instabilidade na bomba com degradação da carga da bomba, comprometendo o seu desempenho. Além disso, com uma grande freqüência deste fenômeno, o motor trabalharia com uma temperatura mais elevada e devido às instabilidades operacionais na BCS o risco de uma falha prematura neste equipamento seria grande.

Tabela 3.2 - Dados experimentais: Q1.PGL10.SF-E.A

PGL (%)	**Vazão de água (L/min)**	**Vazão de ar no medidor (L/min)**	**P2 (kgf/cm^2)**	**P3 (kgf/cm^2)**
10	9,02	0,84	0,9	0,6
Observações Experimentais: - Observadas algumas descargas muito breves do anular poço alojador / *shroud*; - Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* variando de 4,1 a 4,2 metros da entrada do poço alojador.				

Tabela 3.3 - Dados experimentais: Q1.PGL20.SF-E.A

PGL (%)	**Vazão de água (L/min)**	**Vazão de ar no medidor (L/min)**	**P2 (kgf/cm2)**	**P3 (kgf/cm2)**
20	9,02	1,9	0,9	0,6
Observações Experimentais: - Observadas descargas do anular poço alojador / *shroud*; - Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* variando a 4,1 metros da entrada do poço alojador e descargas.				

Tabela 3.4 - Dados experimentais: Q2.PGL10.SF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
10	13,52	1,18	1,1	0,65
Observações Experimentais: - Não foi observada descarga no anular poço alojador / *shroud*. Possivelmente porque uma maior vazão de líquido produza um maior arraste do gás de tal forma que o acúmulo de gás existente no anular poço alojador / *shroud* não seja suficiente para promover a descarga do mesmo; - Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* variando de 4,1 a 4,25 metros da entrada do poço alojador. Nível muito próximo da entrada do anular interno do *shroud* que se encontra a 4,4 metros.				

Tabela 3.5 - Dados experimentais: Q2.PGL20.SF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
20	13,52	2,18	1,1	0,65
Observações Experimentais: - Foram observadas algumas descargas do anular poço alojador / *shroud*; - Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* variando de 4,2 a 4,3 metros da entrada do poço alojador. No interior do *shroud* são observadas capas de bolha que coalescem até formarem bolhas de Taylor com comprimento entre 5 e 10 cm e pistões com cerca de 30 cm.				

Analisando-se os resultados de visualização dos experimentos realizados, constata-se que há ocorrência de descarga do anular poço alojador / *shroud*, e quando esta tal dinâmica não aparece de forma bem clara o nível dinâmico de líquido no anular poço alojador / *shroud* se estabelece num valor muito crítico, ou seja, muito próximo da entrada do anular interno do *shroud*, na iminência de uma possível descarga do anular poço alojador / *shroud*.

3.1.3. Resultados Experimentais Selecionados – *shroud* com furos laterais

Seguem abaixo os resultados experimentais selecionados que foram obtidos com o uso do *shroud* com 15 furos laterais de 1 mm de diâmetro cada, distribuídos helicoidalmente ao longo do *shroud*.

Tabela 3.6 - Dados experimentais: Q1.PGL10.CF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
10	9,02	0,78	0,7	0,32
Observações Experimentais: - Não foram observadas descargas do anular poço alojador / *shroud*; - Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* se estabeleceu a 1,3 metros da entrada do poço alojador. Somente o primeiro furo ficou exposto ao ar.				

Tabela 3.7 - Dados experimentais: Q1.PGL20.CF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
20	9,02	1,75	0,7	0,32
Observações Experimentais: - Não foram observadas descargas do anular poço alojador / *shroud*; - Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* se estabeleceu a 1,5 metros da entrada do poço alojador. Segundo furo intermitentemente exposto ao ar.				

Tabela 3.8 - Dados experimentais: Q2.PGL10.CF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
10	13,52	1,16	0,9	0,47
Observações Experimentais: - Não foram observadas descargas do anular poço alojador / *shroud*; - Não foi possível verificar uma situação em que o primeiro furo fosse descoberto pelo nível dinâmico, desta forma, em nenhum momento se notou uma corrente de gás estabilizadora passando por nenhum furo. Poderia ser dito que isto é razoável, pois se está considerando um caso de vazão muito alta e baixa fração de gás, ou seja, a capacidade de arraste de gás pelo filme de líquido seria suficiente para se garantir um balanço de massa equilibrado no equipamento. Entretanto, apesar de não ocorrer a exposição dos furos ao ar, verificou-se que intermitentemente os furos ao longo do *shroud* permitiam a passagem de gás durante o escoamento descendente do filme de líquido que arrasta o gás.				

Tabela 3.9 - Dados experimentais: Q2.PGL20.CF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
20	13,52	2,18	0,9	0,47
Observações Experimentais: - Não foram observadas descargas do anular poço alojador / *shroud*; - Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* se estabeleceu a 1,3 metros da entrada do poço alojador. Primeiro furo intermitentemente exposto ao ar.				

3.1.4. Elaboração da Matriz de Simulação

Analisando-se os dados e resultados experimentais obtidos por Gaspari *et al* (2007), verificou-se que os valores das vazões de gás, que foram medidas com rotâmetros, não foram devidamente corrigidos, conforme procedimento necessário para correção das vazões medidas em rotâmetro que operam em condições diferentes das de calibração.

O rotâmetro para medição de ar estava calibrado para realizar medições de ar a 25 ^{o}C e 1,033228 kgf/cm^2 de pressão absoluta. Em Gaspari *et al* (2007), é reportado que os valores de vazão de ar estabelecidos no medidor foram corrigidos segundo a equação (3-2), considerando o ar como um gás ideal.

$$Q_{G_{Medidor}} = \frac{P_3 * PGL * Q_L}{P_2 * (100 - PGL)} \tag{3-2}$$

Onde:

$Q_{G_{Medidor}}$	-	Vazão de gás medido no rotâmetro
P_3	-	Pressão absoluta na entrada do poço alojador
P_2	-	Pressão absoluta no ponto de mistura do ar com a água
PGL	-	Percentagem de gás livre na entrada do poço alojador
Q_L	-	Vazão de líquido medido no rotâmetro

Desta forma, não se considerou a calibração do medidor nos estudos realizados. A proposta da Matriz de Simulação considerou os fatores necessários para correção das vazões de gás efetivamente medidas. Assim, é apresentado a seguir o desenvolvimento da expressão que foi implementada para realização dos cálculos e correção das percentagens de gás livre na entrada do poço alojador.

3.1.5. Balanço de Forças no Rotâmetro

Quando é estabelecido um escoamento no rotâmetro, passa a existir um equilíbrio do flutuador ao longo da escala graduada e calibrada do rotâmetro. Este equilíbrio pode ser representado pelo balanço de forças no flutuador, neste caso têm-se: a força de arraste, força empuxo e o peso do flutuador (ver Figura 3.5).

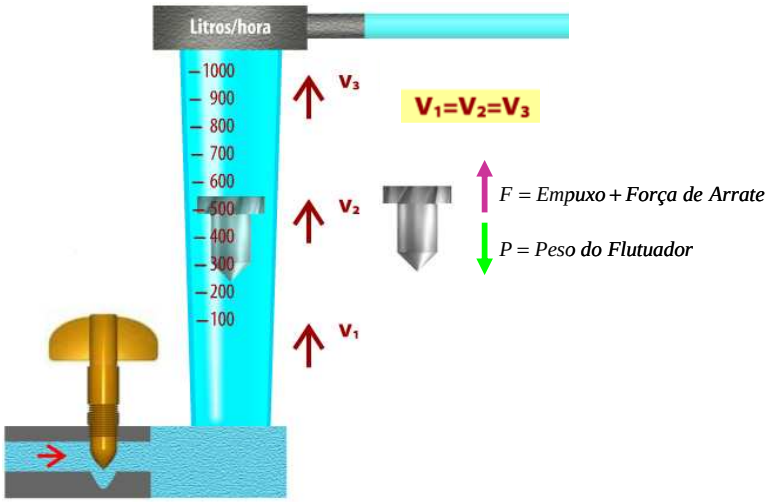


Figura 3.5 - Ilustração de um Rotâmetro (fonte:APPLITECH)

Assim, pode-se expressar que, no equilíbrio:

$$Empuxo + Força\ de\ arraste = Peso\ do\ Flutuador \tag{3-3}$$

$$V_F * \rho * g + \frac{C_D * \rho * v^2 * A_P}{2} = V_F * \rho_F * g \tag{3-4}$$

onde:

- V_F - Volume do flutuador
- ρ - Massa específica do fluido em escoamento
- g - Aceleração gravitacional
- C_D - Coeficiente de arraste
- v - Velocidade do gás
- A_P - Área projetada do flutuador na direção do escoamento
- ρ_F - Massa específica do flutuador

Reagrupando, tem-se:

$$v^2 = \frac{2 * V_F * g}{C_D * A_P} * \frac{(\rho_F - \rho)}{\rho} \tag{3-5}$$

E, expressando, em termos de vazão:

$$Q = \sqrt{\frac{2 * V_F * g * A^2}{C_D * A_P} * \frac{(\rho_F - \rho)}{\rho}} \tag{3-6}$$

onde:

Q - Vazão no rotâmetro
A - Área exposta ao escoamento no rotâmetro

Considerando-se que o termo $\sqrt{\frac{2 * V_F * g * A^2}{C_D * A_P}}$ é um fator restritamente dependente da constituição do flutuador e de variáveis que podem ser adotadas como uma constante "K" durante a flutuação do flutuador.

Assim:

$$Q = K * \sqrt{\frac{(\rho_F - \rho)}{\rho}} \tag{3-7}$$

Que para medição de gás, como $\rho = \rho_G <<< \rho_F$, pode-se considerar:

$$Q = K' * \sqrt{\frac{1}{\rho}} \tag{3-8}$$

Entretanto para o líquido, tal consideração anterior não deve ser realizada. Assim, retornando à equação(3-7) com $\rho = \rho_L$, tem-se:

$$Q = K * \sqrt{\frac{(\rho_F - \rho_L)}{\rho_L}} \tag{3-9}$$

Uma vez estabelecidas estas expressões que definem a vazão do rotâmetro em função de parâmetros constitutivos do flutuador, geometria do rotâmetro e do fluido em escoamento,

pode-se concluir que a relação de vazões para um escoamento num rotâmetro de um gás que apresenta o comportamento de um gás ideal é:

$$Q_{G1} = Q_{G\,Ref} * \sqrt{\frac{P_{Ref} * T_1 * PM_{Ref}}{P_1 * T_{Ref} * PM_1}} \tag{3-10}$$

onde:

Q_{G1}	-	Vazão de gás na condição P_1 e T_1
$Q_{G\,Ref}$	-	Vazão de gás indicada no medidor calibrado para a condição de P_{Ref} e T_{Ref}
P_{Ref}	-	Pressão absoluta de calibração do rotâmetro
T_{Ref}	-	Temperatura absoluta de calibração do rotâmetro
P_1	-	Pressão absoluta de operação do rotâmetro
T_1	-	Temperatura absoluta de operação do rotâmetro
PM_{Ref}	-	Peso Molecular do gás de referência
PM_1	-	Peso Molecular do gás em escoamento no rotâmetro na condição de P_1 e T_1

3.1.6. Correções das Vazões de Ar e PGL da Matriz Experimental

Com base na equação (3-10) e aplicando-se a equação abaixo:

$$Q_{G3} = Q_{G\,Med} * \sqrt{\frac{P_{Ref} * T_2}{P_2 * T_{Ref}}} * \frac{P_2 * T_3}{P_3 * T_2} \tag{3-11}$$

Onde se é corrigido a vazão indicada de calibração do rotâmetro para as condições de pressão e temperatura de entrada do poço alojador, tem-se como efetivas vazões de gás e percentagem de gás livre na entrada do poço alojador:

- **Correção do PGL da Matriz Experimental – *shroud* sem furos**

Aplicando-se a equação (3-11) nas Tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, tem-se, respectivamente, as correções das medições de vazão de ar e a geração das novas tabelas corrigidas para o caso do *shroud* sem furos (*vide* Tabela 3.10 a Tabela 3.13).

Tabela 3.10 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q1.PGL7.SF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
7	9,02	0,84	0,9	0,6

Tabela 3.11 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q1.PGL15.SF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm2)	P3 (kgf/cm2)
15	9,02	1,9	0,9	0,6

Tabela 3.12 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q2.PGL7.SF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
7	13,52	1,18	1,1	0,65

Tabela 3.13 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q2.PGL12.SF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
12	13,52	2,18	1,1	0,65

- **Correção do PGL da Matriz Experimental – *shroud* com furos**

Aplicando-se a equação (3-11) nas Tabelas 3.6, 3.7, 3.8 3 3.9, tem-se, respectivamente, as correções das medições de vazão de ar e a geração das novas tabelas corrigidas para o caso do *shroud* com furos (*vide* Tabela 3.14 a Tabela 3.17).

Tabela 3.14 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q1.PGL8.CF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
8	9,02	0,78	0,7	0,32

Tabela 3.15 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q1.PGL16.CF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
16	9,02	1,75	0,7	0,32

Tabela 3.16 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q2.PGL7.CF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
7	13,52	1,16	0,9	0,47

Tabela 3.17 - PGL corrigido - Dados Experimentais: Q2.PGL13.CF-E.A

PGL (%)	Vazão de água (L/min)	Vazão de ar no medidor (L/min)	P2 (kgf/cm^2)	P3 (kgf/cm^2)
13	13,52	2,18	0,9	0,47

3.2. Matrizes de Simulação Computacional

3.2.1. Matriz Simulação – Shroud com e sem furos

A Tabela 3.18 e Tabela 3.19 mostram as matrizes de simulação computacional empregadas nas geometrias do poço alojador com e sem furos na *shroud*. A corrente bifásica na entrada do modelo computacional era composta por bolhas de ar, com diâmetro de 0,5 cm, condição, dispersas em água.

Tabela 3.18 - Matriz Simulação - Shroud sem furos

Simulação	PGL (%)	$V_{média}$ na entrada do poço alojador (m/s)	Pressão na entrada do poço alojador (kgf/cm^2)	Pressão na saída do poço alojador (kgf/cm^2)
Q1.PGL7.SF-S.A	7,0	2,07	0,60	0,1
Q1.PGL15.SF-S.A	15,0	2,26	0,60	0,1
Q2.PGL7.SF-S.A	7,0	3,09	0,65	0,1
Q2.PGL12.SF-S.A	12,0	3,27	0,60	0,1

Tabela 3.19 - Matriz Simulação - Shroud com furos

Simulação	PGL (%)	$V_{média}$ na entrada do poço alojador (m/s)	Pressão na entrada do poço alojador (kgf/cm^2)	Pressão na saída do poço alojador (kgf/cm^2)
Q1.PGL8.CF-S.A	8,0	2,08	0,32	0,1
Q1.PGL16.CF-S.A	16,0	2,28	0,32	0,1
Q2.PGL7.CF-S.A	7,0	3,10	0,47	0,1
Q2.PGL13.CF-S.A	13,0	3,30	0,47	0,1

3.2.2. Matrizes de Simulação Computacional para Óleo e Gás de Jubarte

Buscando realizar um estudo exploratório do modelo computacional implementado no CFX, foi realizado um conjunto de simulações o qual teve como premissa básica o uso das geometrias contendo o *shroud* com e sem furos. Para cada geometria reportada foi simulada uma condição de 10% e 40%, condições esperadas em Jubarte ao longo da vida útil do poço, de percentagem de gás livre (PGL) na entrada do modelo computacional. Adotou-se também como premissa uma simulação isotérmica.

Os fluidos adotados para esse estudo exploratório têm características básicas do óleo e gás do Campo de Jubarte, como pode ser visto na Tabela 3.20.

Tabela 3.20 - Condições Operacionais e Propriedades dos Fluidos Esperadas no MOBO de Jubarte

Variáveis / Propriedades	Valores
Temperatura na Entrada do MOBO de Jubarte	65,0 ^{o}C
Pressão na Entrada do MOBO de Jubarte	57,0 barg
Vazão de Líquido na Entrada do MOBO de Jubarte	3034 m^3/d
Vazão de Gás na Entrada do MOBO de Jubarte (PGL = 40%)	2022 m^3/d
Vazão de Gás na Entrada do MOBO de Jubarte (PGL = 10%)	337 m^3/d
Massa Específica do Líquido na Entrada do MOBO de Jubarte	1008 kg/m^3
Massa Específica do Gás na Entrada do MOBO de Jubarte	39 kg/m^3
Viscosidade Dinâmica do Líquido na Entrada do MOBO de Jubarte	114,6 cP
Viscosidade Dinâmica do Gás na Entrada do MOBO de Jubarte	0,015 cP

3.3. Estudo das Malhas

3.3.1. Geometria das Malhas do Módulo de Bombeio (MOBO)

A construção da geometria do Módulo de Bombeio foi realizada através do módulo *Design Modeler* do *software ANSYS Workbench* versões 11.0 e 12.0. Para as Malhas de 1 a 5 utilizou-se a versão 11.0, já para a construção da geometria da Malha 6 adotou-se a versão 12.0 do *ANSYS Workbench* pelo fato de oferecer maior recurso construtivo e prover a possibilidade da geração de malha estruturada, de forma expedita, com uso do módulo *ANSYS Meshing Tools*, presente somente na versão *ANSYS Workbench* 12.0. Além disso, os estudos para as Malhas de 1 a 5 já haviam sido realizadas porque a versão *ANSYS Workbench* 12.0 somente foi lançada no início de 2009.

O dimensionamento da geometria foi baseado no aparato experimental montado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos do CENPES (vide Tabela 3.21 e Figura 3.6), atendendo fielmente a todos os aspectos dimensionais da estrutura física.

Tabela 3.21 - Dimensões do MOBO instalado no CENPES

Código	Descrição	Comprimento (m)
A	Diâmetro interno da entrada do MOBO	0,01
B	Distância da entrada do MOBO até o centro do intake	1,22
C	Diâmetro interno do poço alojador	0,05
D	Diâmetro externo do *shroud*	0,04
E	Diâmetro interno do *shroud*	0,034
F	Diâmetro da entrada do *intake*	0,008
G	Diâmetro externo da coluna de produção	0,025
H	Diâmetro interno da coluna de produção	0,02
I	Comprimento do *shroud*	3,44

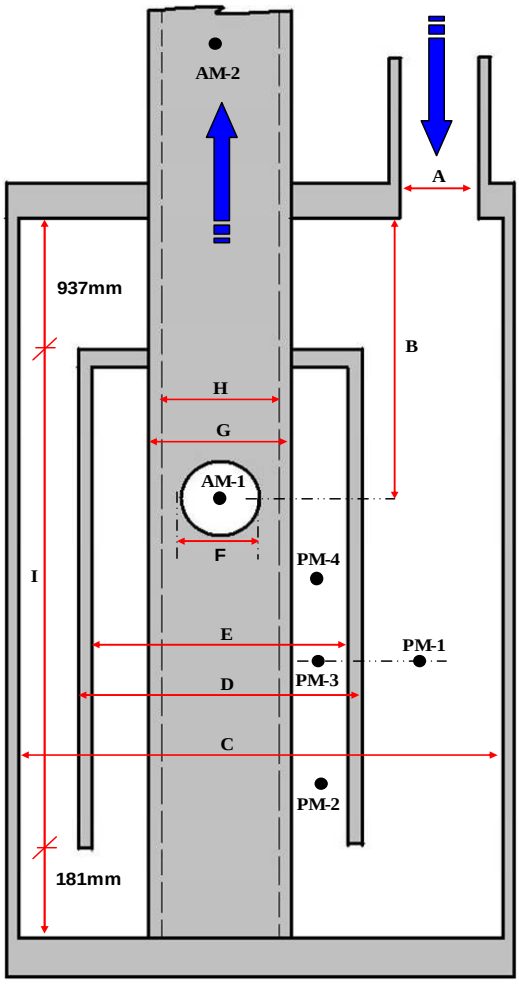
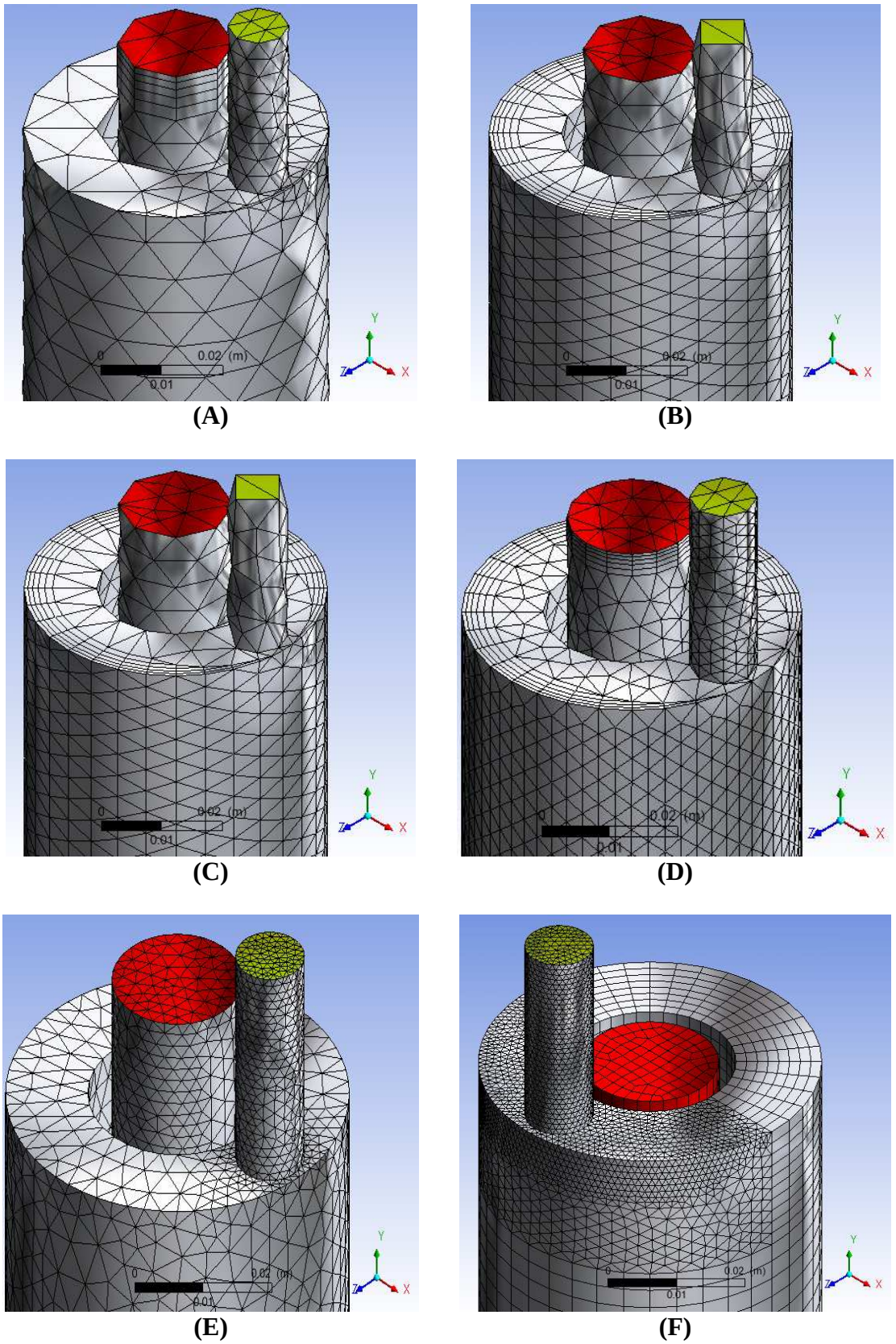


Figura 3.6 - Croqui do MOBO instalado no CENPES

A Figura 3.7 mostra uma visão geral de todas as 6 malhas estudadas neste trabalho.



(A) **(B)**

(C) **(D)**

(E) **(F)**

Figura 3.7 - Detalhe Superior das 6 Malhas Geradas: (A) Malha1, (B) Malha 2, (C) Malha 3, (D) Malha 4, (E) Malha 5 e (F) Malha 6

As malhas não-estruturadas, Malhas 1, 2, 3, 4 e a Malha 5 (*vide* detalhes na Figura 3.8 e Figura 3.9), foram geradas através do módulo *CFX-Mesh do ANSYS Workbench* 11.0, enquanto que a Malha 6 (Figura 3.10), malha basicamente estruturada, foi gerada na versão 12.0 do *ANSYS Workbench* (módulo *Meshing Tools*). A Malha 6 é dita basicamente estruturada porque para alguns subdomínios, visando um maior refinamento da malha, optou-se pela aplicação da malha não-estruturada. Entretanto, todas as malhas foram testadas/estudadas na versão 12.0 do *ANSYS CFX-Solver* e *CFX-Post*. As características básicas, das malhas estudas, podem ser observadas na Tabela 3.22.

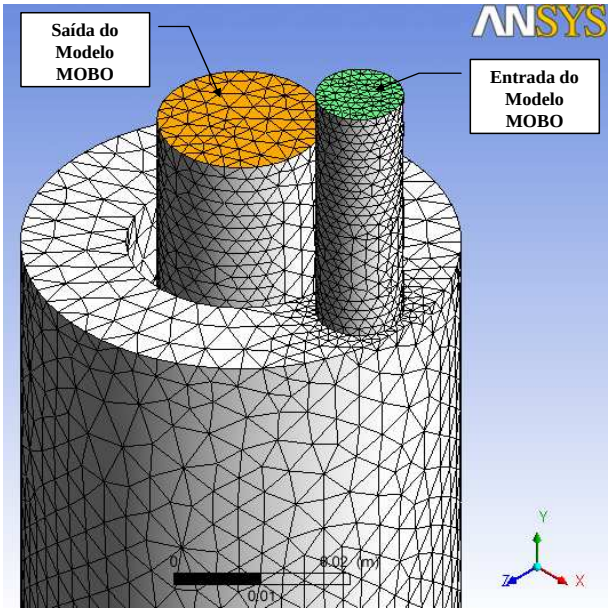


Figura 3.8 - Detalhe Superior da Malha 5 do Modelo MOBO

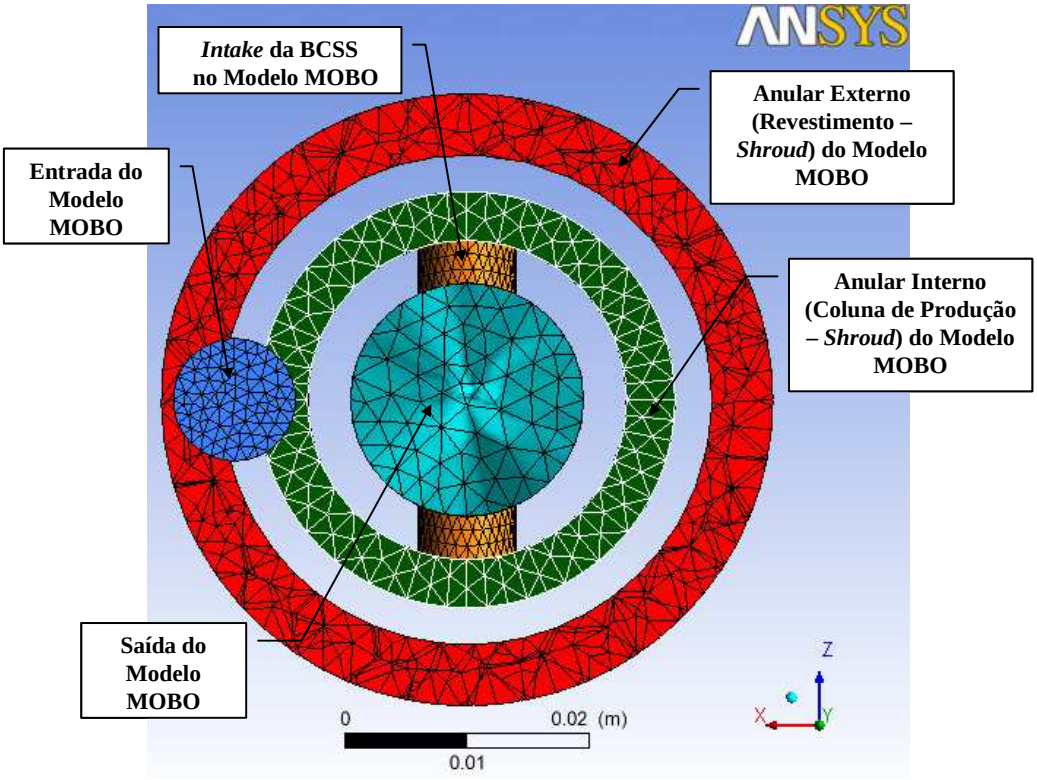


Figura 3.9 - Vista Superior da Malha 5 do Modelo MOBO

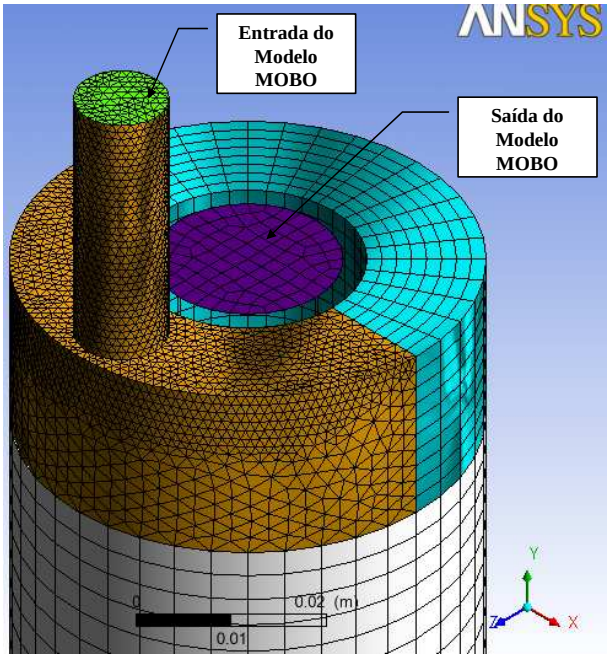


Figura 3.10 - Detalhe Superior da Malha 6 do Modelo MOBO

Tabela 3.22 – Estatística das Malhas Estudadas

Malha	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malha 6
Tipo de Malha	Não Estruturada	Não Estruturada	Não Estruturada	Não Estruturada	Não Estruturada	Basicamente Estruturada com alguns subdomínios Não Estruturados
Número de Nós	71.519	151.846	412.396	664.863	808.264	256.375
Número de elementos	190.580	466.958	1.192.005	2.938.803	3.740.489	240.086
Tetraedros	137.885	373.942	789.725	2.938.803	3.740.489	46.378
Prismas	50.570	87.887	383.070	0	0	0
Pirâmides	2.125	5.129	19.210	0	0	320
Hexaedros	0	0	0	0	0	193.388

3.3.2. A Modelagem Utilizada – Estudo das Malhas

A fim de se obter resultados das simulações que fossem independentes da qualidade da malha e otimizar o tempo das simulações, foram realizados testes com as 6 malhas contendo diferentes graus de refino. Estas malhas foram simuladas em regime transiente, no *CFX-Solver* versão 12.0, durante 1,5 segundos, com a mesma modelagem e condições de contorno. Face ao objetivo destes testes, optou-se por utilizar apenas água (escoamento monofásico) para diminuir o esforço computacional. A modelagem utilizada em todas as simulações do estudo das malhas encontra-se detalhada abaixo:

a) Condições Gerais:

- Simulação Transiente;
- Modelo de Turbulência k - ε;
- Escoamento Isotérmico (25 ^{o}C);
- Sistema Monofásico
  - ⇨ Fluido: água, massa específica de 997,0 kg/m^3, viscosidade de 0,89 cP
- Pressão de Referência: 1 atm;

b) Condição de Contorno da Entrada do Modelo MOBO:

- Velocidade (condição *Inlet*) = 3,18 m/s (Vazão medida = 15,0 L/min);

c) Condição de Contorno da saída do Modelo MOBO:

− Pressão (condição *Opening - Static Pressure and Direction*) = 9,8066e-02 bar;

3.3.3. Resultados do Estudo das Malhas do Modelo Módulo de Bombeio (MOBO)

Os resultados destas simulações foram avaliados em termos do tempo computacional requerido para a simulação alcançar o regime estacionário (em torno de 1,5 segundos), das velocidades em função do tempo em 4 pontos distintos com coordenadas fixas nos domínios das malhas estudadas, PM-1 a PM-4 (*vide* Figura 3.6 e Tabela 3.23), e em 2 áreas AM-1 e AM-2 , área do *intake* e área de saída do MOBO, respectivamente (*vide* Figura 3.6) e da comparação direta dos resultados experimentais (*vide* APÊNDICE B) contra os valores apontados nas simulações.

Tabela 3.23 - Identificação dos pontos onde foram monitoradas as velocidades

Código	Descrição	Coordenadas (m) - Base entrada do MOBO
PM-1	Ponto monitorado no anular poço alojador - *shroud* a 2,0 m da entrada do MOBO	[0,0085 ; -2,0 ; -0,02]
PM-2	Ponto monitorado no anular coluna de produção - *shroud* a 3,0 m da entrada do MOBO	[0,0085 ; -3,0 ; -0,012]
PM-3	Ponto monitorado no anular coluna de produção - *shroud* a 2,0 m da entrada do MOBO	[0,0085 ; -2,0 ; -0,012]
PM-4	Ponto monitorado no anular coluna de produção - *shroud* a 1,5 m da entrada do MOBO	[0,0085 ; -1,5 ; -0,012]

A seguir são apresentados gráficos que resumem de forma expedita os resultados obtidos do estudo das malhas.

A Figura 3.11 mostra o tempo requerido de CPU para simular 1,5 segundos em cada uma das 6 malhas e a grandeza relativa das malhas, tomando-se por base a Malha 1 (*vide* equação (3-12)).

$$\beta = \frac{Número\ de\ Nós\ da\ Malha}{Número\ de\ Nós\ da\ Malha\ 1} \tag{3-12}$$

Pode-se inferir, pela Figura 3.11, que a Malha 6 (cuja malha é basicamente estruturada, mas com alguns subdomínios não estruturados) foi a que apresentou a segunda menor demanda de recurso computacional para as mesmas condições de contorno impostas nas simulações realizadas.

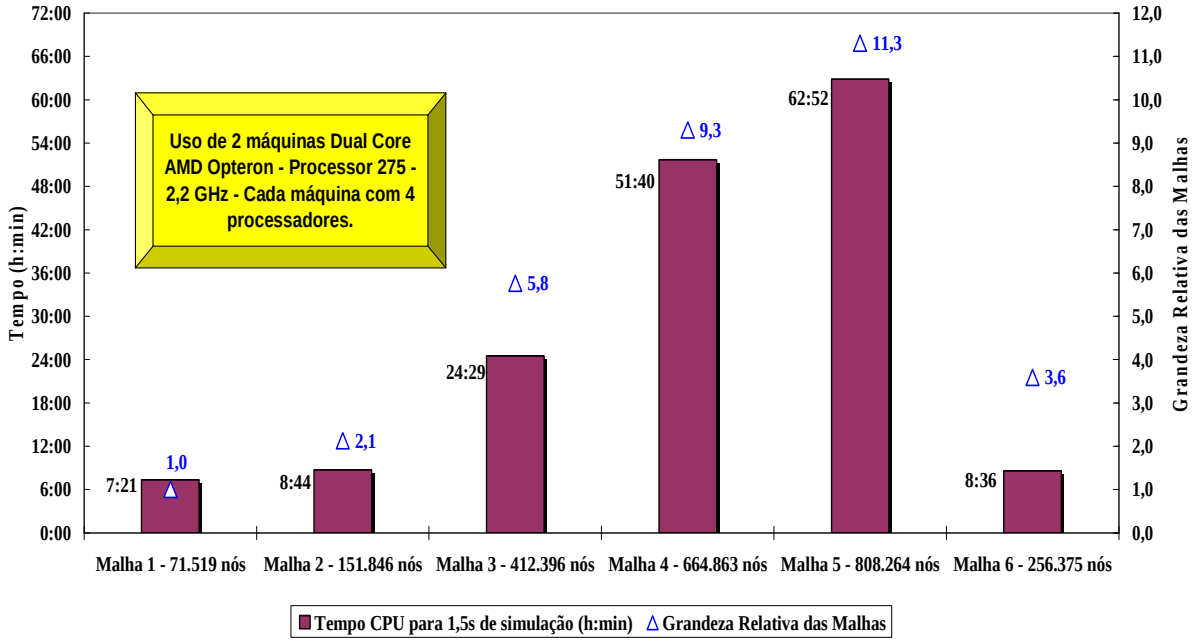
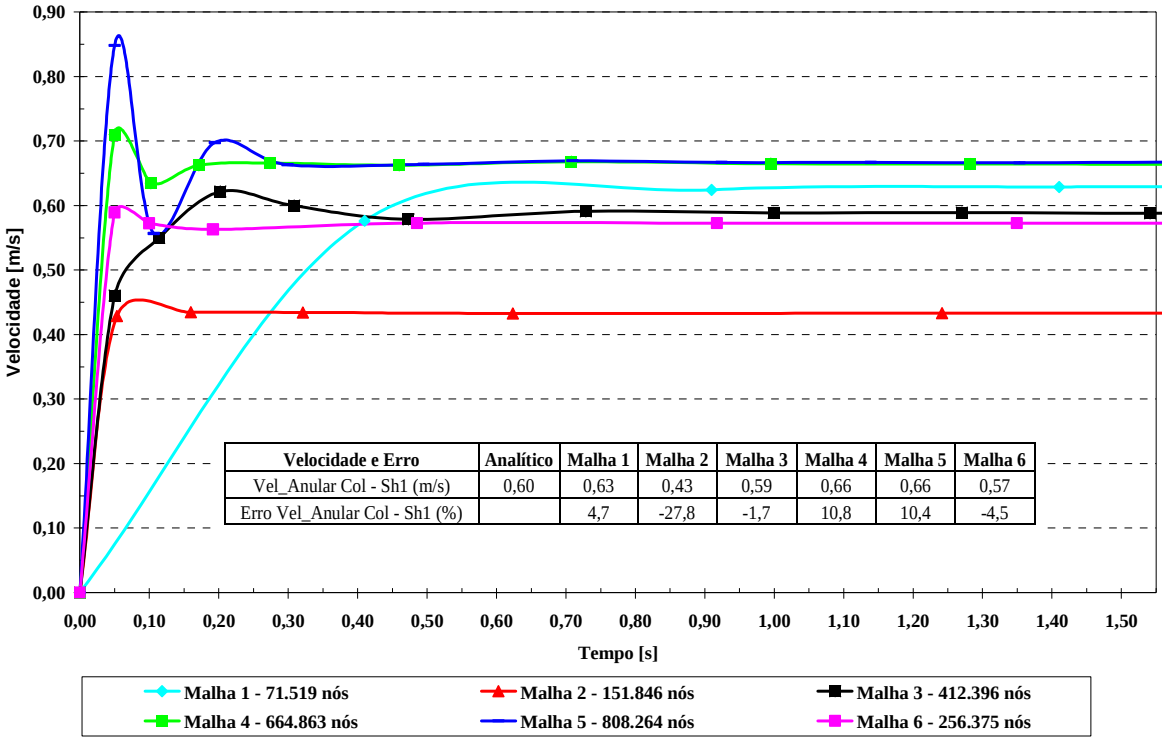


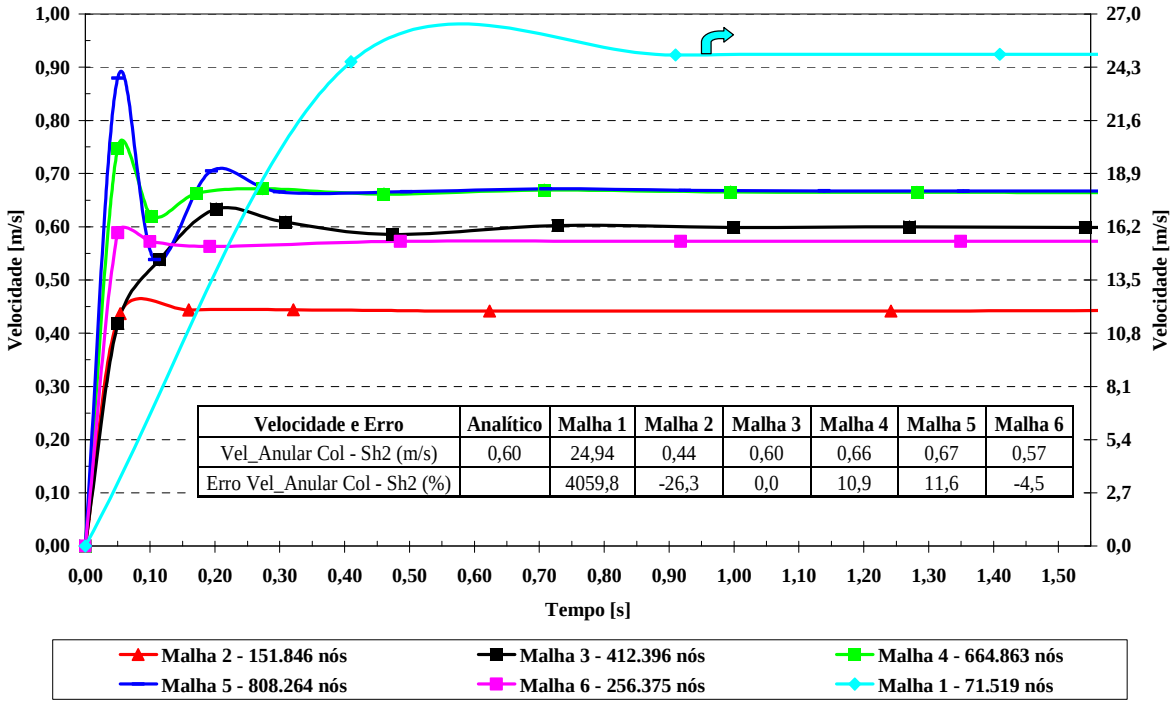
Figura 3.11 - Uso de CPU e tamanho relativo das malhas (base: n° de nós da Malha 1) para simular 1,5 s

Além disso, quando se compara os valores de velocidades presentes nos 6 pontos distintos de coordenadas fixas dos domínios das malhas estudadas e se faz uma comparação direta da solução analítica das velocidades nos respectivos pontos monitorados (PM1, PM2, PM3 e PM4) e nas áreas AM-1 e AM-2 contra os valores encontrados nas simulações, conclui-se que a Malha 6 é a que apresenta o melhor desempenho de predição global frente aos itens analisados. Inclusive para a predição da pressão de entrada do MOBO (valor experimental medido de 0,225 Pa), contra uma predição de 0,211 Pa (erro percentual de -4,4%). Constata-se também que o erro percentual da velocidade nos pontos pré-estabelecidos de análise, em relação ao valor analítico calculado, na Malha 6, ficou entre - 4,5% a + 5,0% (*vide* Figura 3.12 a Figura 3.16).



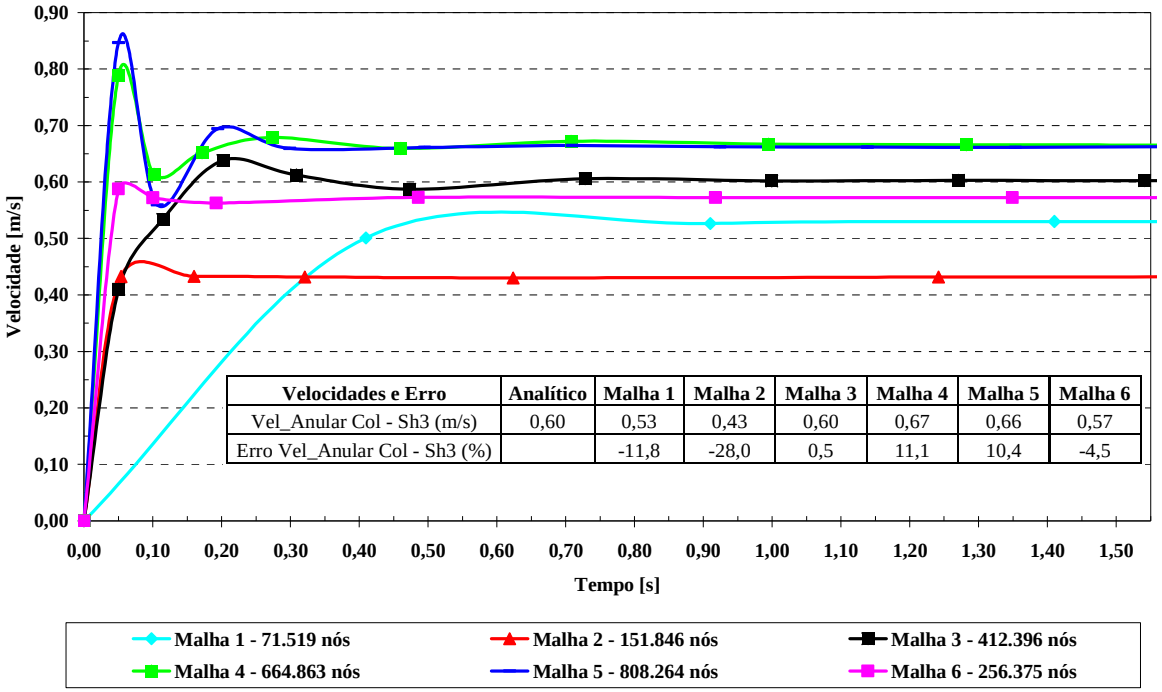
Velocidade e Erro	Analítico	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malha 6
Vel_Anular Col - Sh1 (m/s)	0,60	0,63	0,43	0,59	0,66	0,66	0,57
Erro Vel_Anular Col - Sh1 (%)		4,7	-27,8	-1,7	10,8	10,4	-4,5

Figura 3.12 - Comparação da Velocidade no Anular Coluna - *shroud* a 1,5 m da Entrada do Modelo MOBO x Configuração da Malha



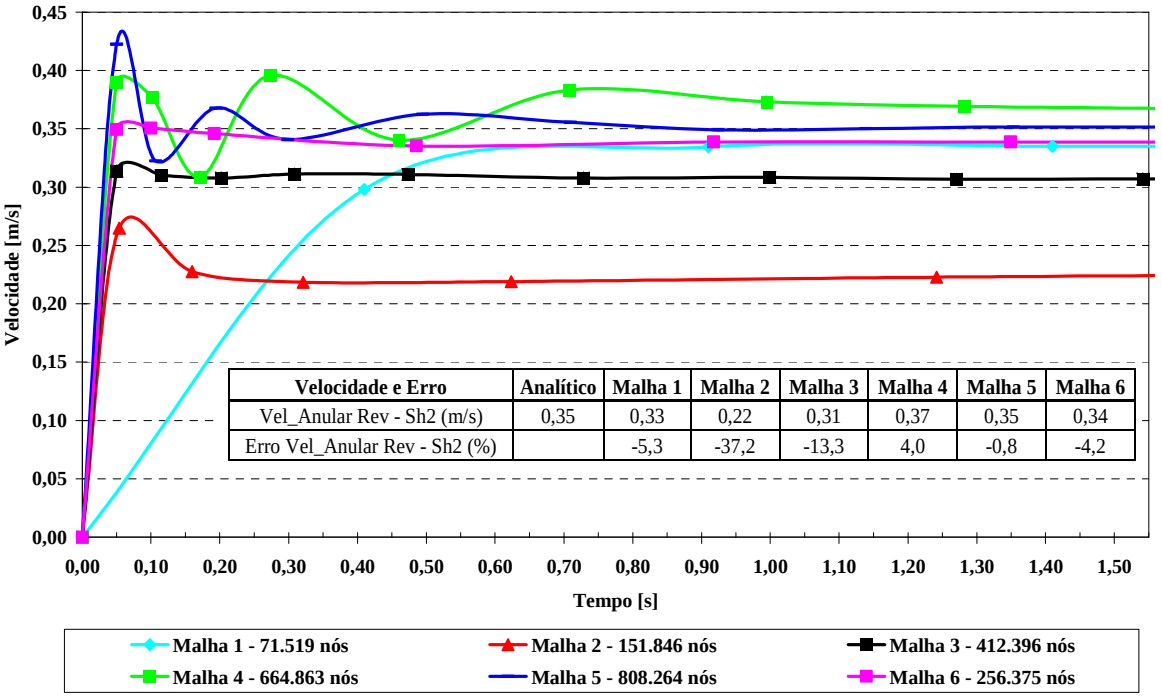
Velocidade e Erro	Analítico	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malha 6
Vel_Anular Col - Sh2 (m/s)	0,60	24,94	0,44	0,60	0,66	0,67	0,57
Erro Vel_Anular Col - Sh2 (%)		4059,8	-26,3	0,0	10,9	11,6	-4,5

Figura 3.13 - Comparação da Velocidade no Anular Coluna - *shroud* a 2,0 m da Entrada do Modelo MOBO x Configuração da Malha



Velocidades e Erro	Analítico	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malha 6
Vel_Anular Col - Sh3 (m/s)	0,60	0,53	0,43	0,60	0,67	0,66	0,57
Erro Vel_Anular Col - Sh3 (%)		-11,8	-28,0	0,5	11,1	10,4	-4,5

Figura 3.14 - Comparação da Velocidade no Anular Coluna - *shroud* a 3,0 m da Entrada do Modelo MOBO x Configuração da Malha



Velocidade e Erro	Analítico	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malha 6
Vel_Anular Rev - Sh2 (m/s)	0,35	0,33	0,22	0,31	0,37	0,35	0,34
Erro Vel_Anular Rev - Sh2 (%)		-5,3	-37,2	-13,3	4,0	-0,8	-4,2

Figura 3.15 - Comparação da Velocidade no Anular Poço Alojador - *shroud* a 2,0 m da Entrada do Modelo MOBO x Configuração da Malha

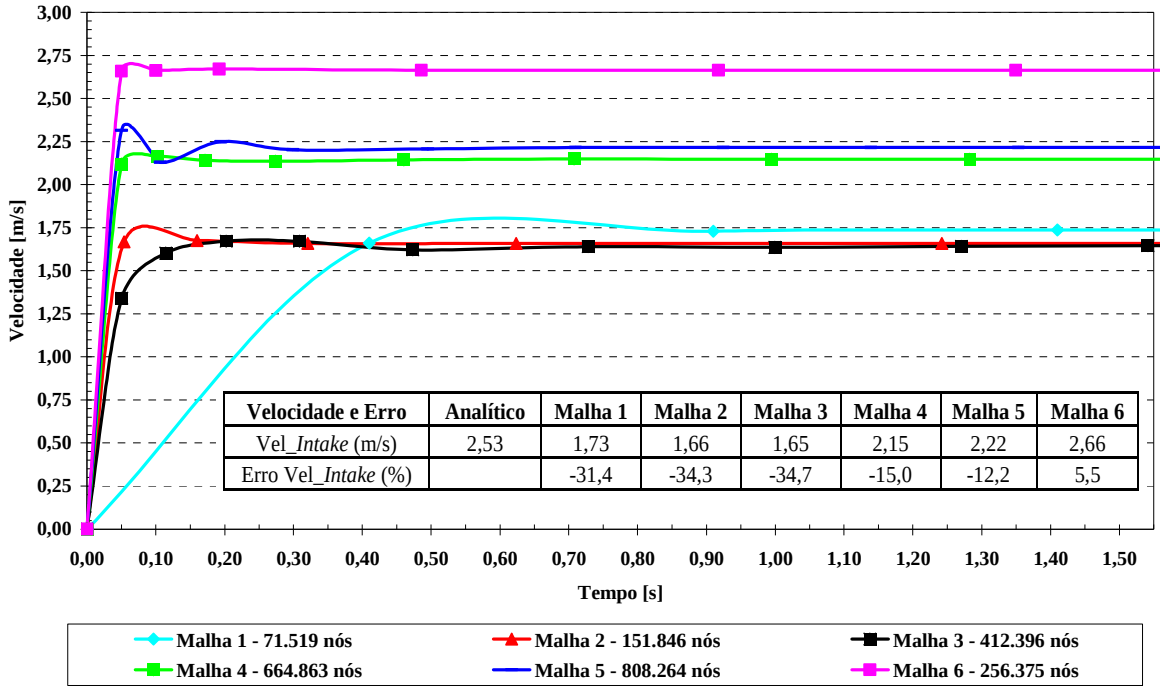


Figura 3.16 - Comparação da Velocidade no Ponto *Intake* da Bomba x Configuração da Malha

Observa-se também que a Malha 6 teve um bom desempenho de predição quando se compara os valores apontados pela simulação para a pressão de entrada (Figura 3.17) e velocidade de saída (Figura 3.18) no modelo MOBO em relação aos valores experimentais.

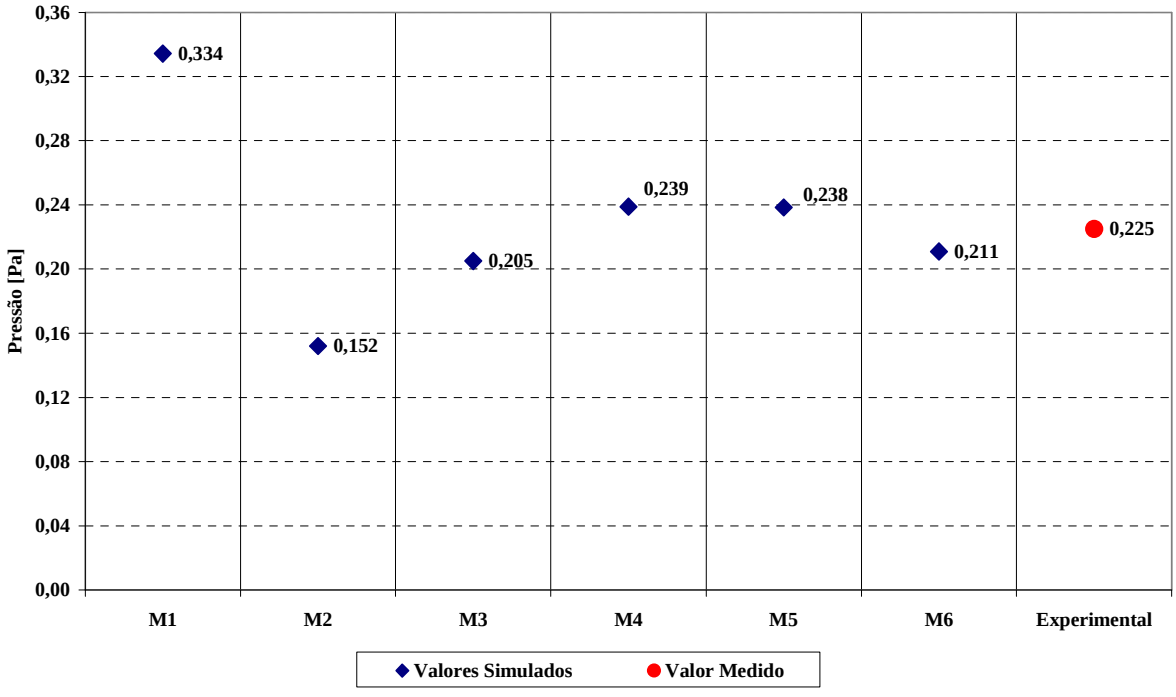


Figura 3.17 - Pressão na Entrada do Modelo MOBO: Experimental x Simulação das Malhas

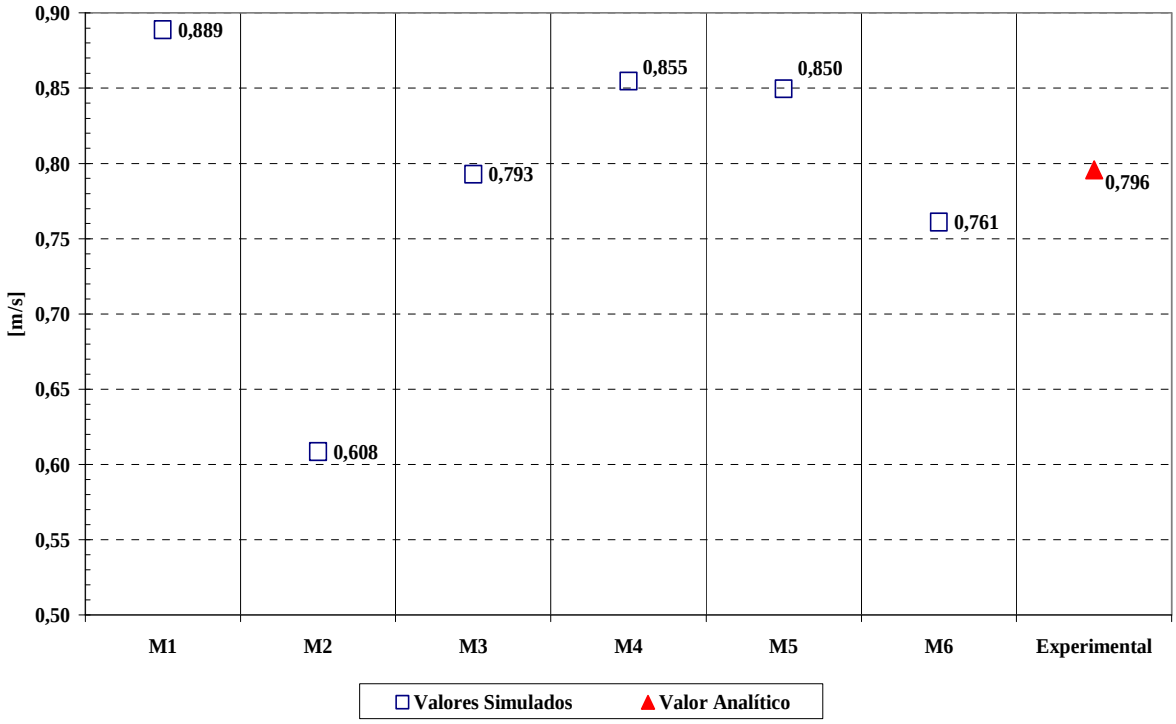


Figura 3.18 - Velocidade na Saída do Modelo MOBO: Experimental vs. Simulação das Malhas

Assim, nos resultados obtidos com as malhas e quando se compara os erros percentuais da pressão de entrada e da velocidade de saída (Figura 3.19) no modelo MOBO, em relação aos valores medidos experimentalmente, pode-se concluir que o acoplamento da Malha 6 com a modelagem computacional predefinida no CFX representa de forma satisfatória o modelo físico experimental do MOBO.

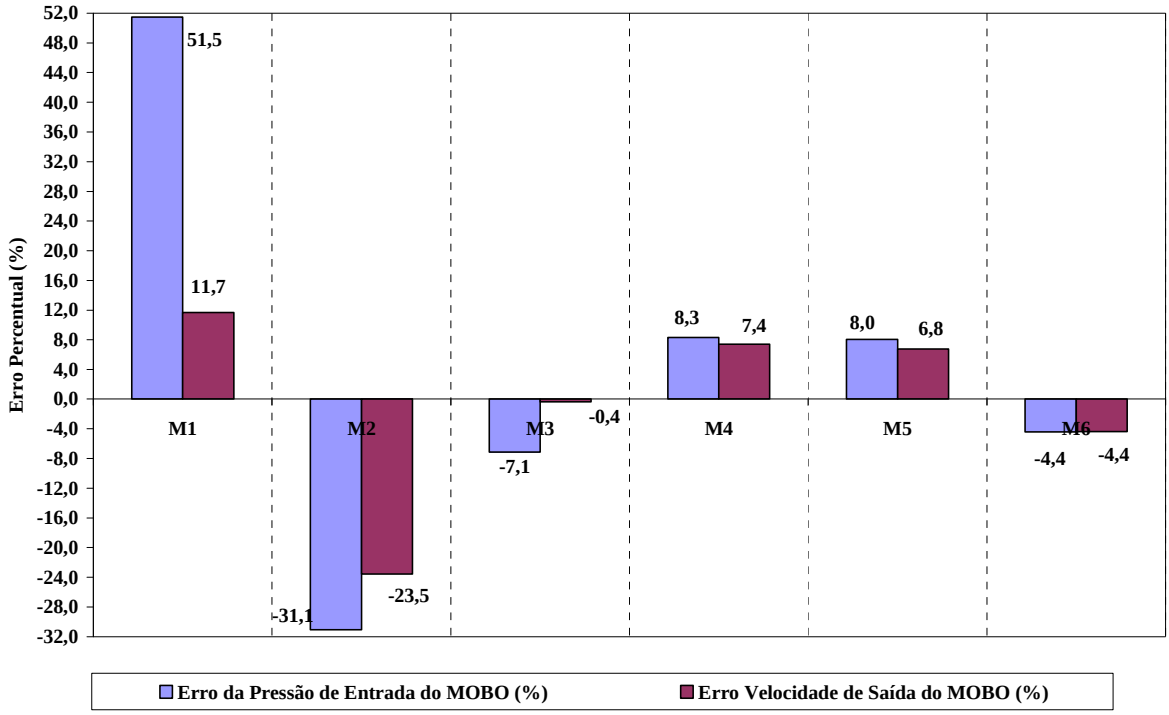


Figura 3.19 - Pressão de Entrada e Velocidade de Saída do Modelo MOBO: Erro Percentual (Experimental e Analítico) x Simulação das Malhas

Portanto, para a continuidade dos estudos propostos neste trabalho adotou-se a Malha 6 como a malha padrão *shroud* sem furos (SF), Figura 3.20. E nesta foram realizadas alterações como a inserção dos 15 furos de 1,0 mm cada, dispersos de forma helicoidal ao longo do *shroud*. Esta malha foi nomeada de *shroud* com Furos (CF), Figura 3.21. Com o uso destas duas malhas, SF e CF, foram realizados os estudos para validação da dinâmica de escoamento bifásico do modelo MOBO, baseando-se nos estudos experimentais realizado por Gaspari *et al* (2007). E, posteriormente, visando uma abordagem exploratória, aplicou-se um óleo e gás típico do Campo de Jubarte para avaliar a influência da viscosidade na dinâmica de escoamento bifásico do modelo MOBO.

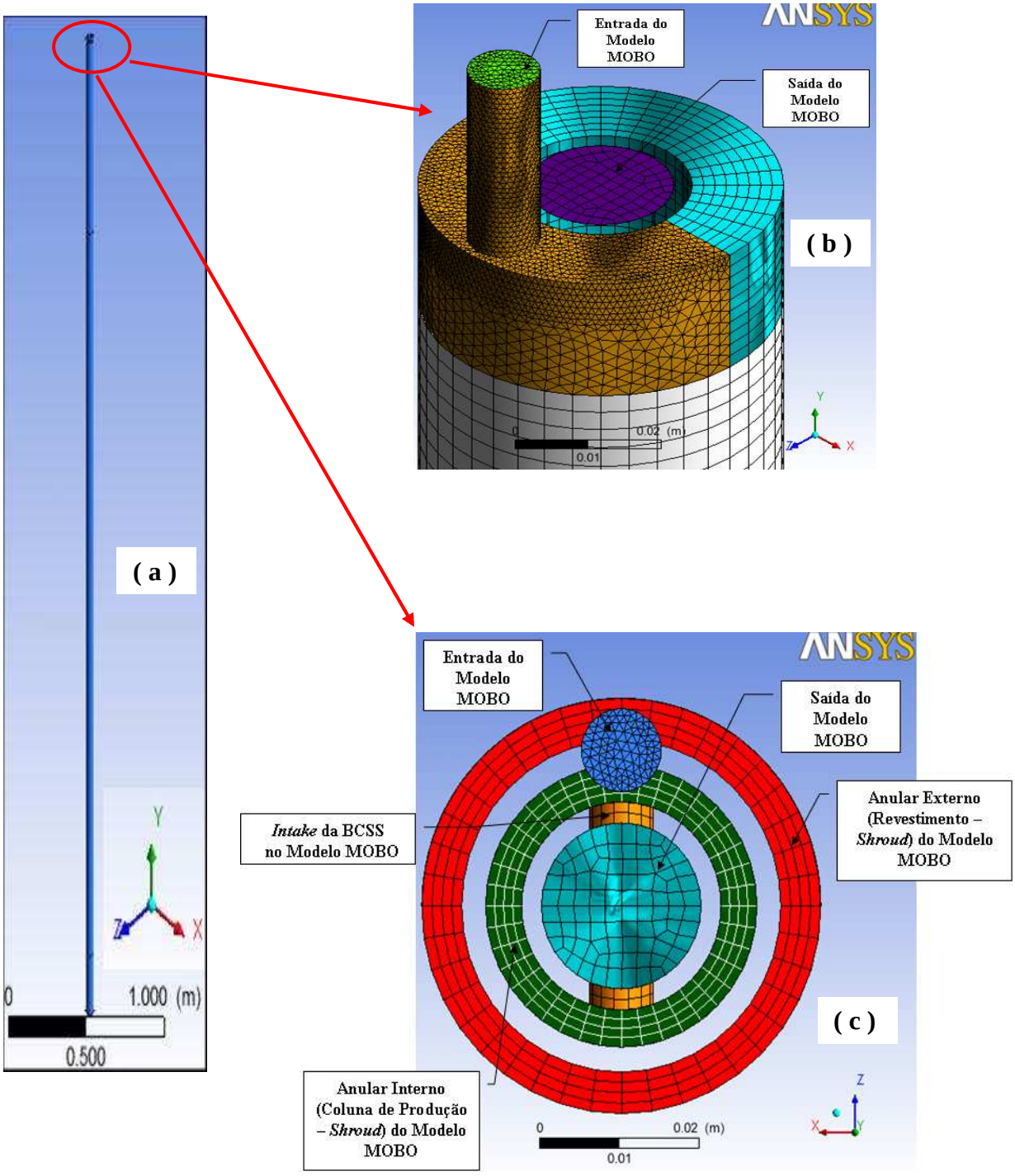


Figura 3.20 - Detalhes da Malha sem Furos: (a) Modelo MOBO, (b) Entrada e Saída do MOBO, (c) Vista Superior do MOBO com detalhamento

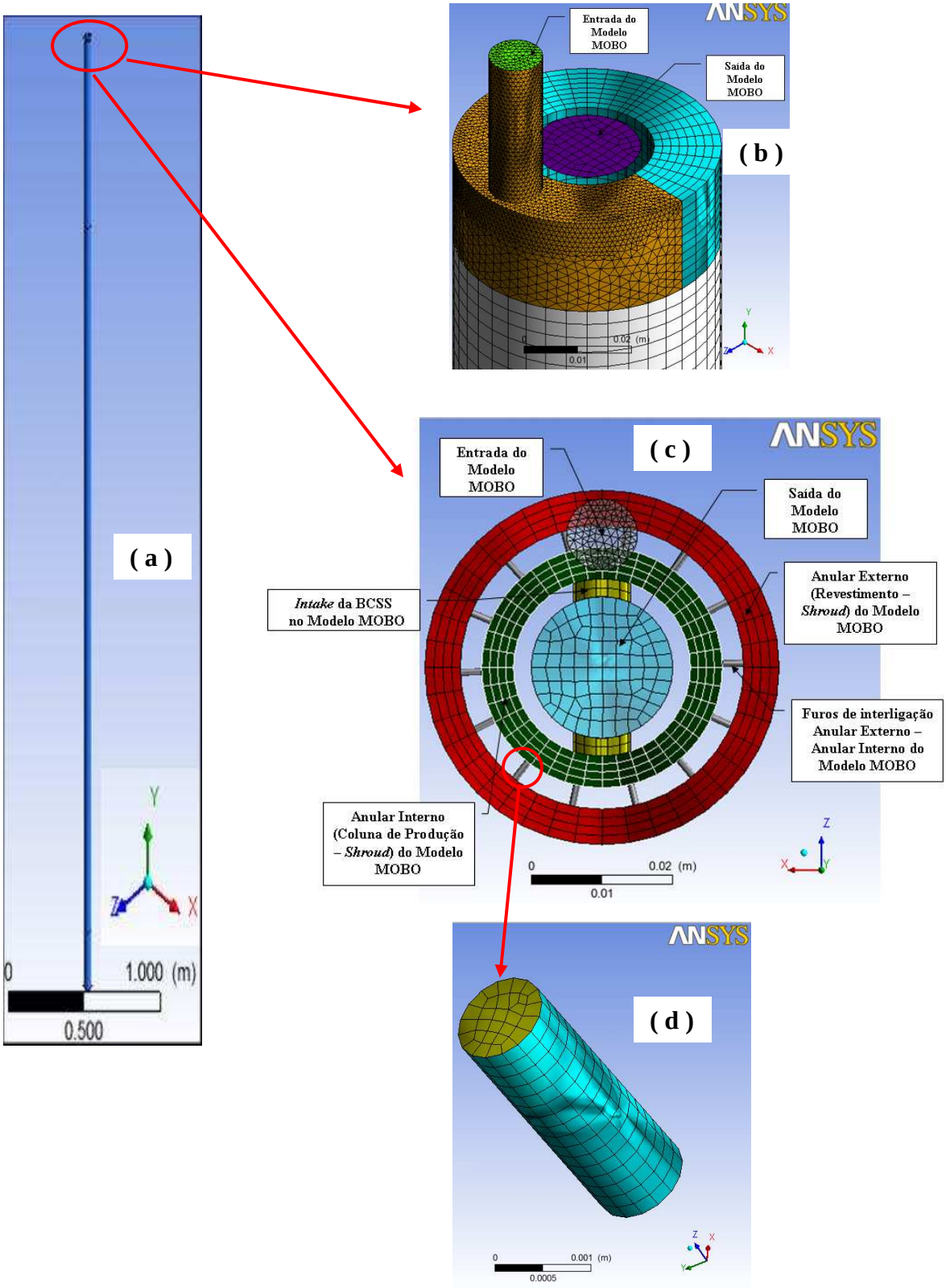


Figura 3.21 - Detalhes da Malha com Furos: (a) Modelo MOBO, (b) Entrada e Saída do MOBO, (c) Vista Superior do MOBO com detalhamento e (d) Detalhe de 1 dos 15 furos do *shroud*

Cabe aqui também ressaltar o resultado anômalo do perfil de velocidade no Anular Coluna – Shroud a 2,0 m da entrada do Modelo MOBO (Anular Interno) apontado pela Malha 1 (Figura 3.13). Como se monitorou 3 medidas de velocidade na mesma orientação espacial (mudando-se somente a altura de observação da variável), e, duas dessas medidas monitoradas apresentaram uma correspondência muito próxima do valor analítico, conclui-se que: o baixo grau de refinamento da Malha 1 na região de monitoramento da velocidade no Anular Coluna – Shroud a 2,0 m da Entrada do Modelo MOBO influenciou, sobremaneira, o resultado anômalo apontado pela simulação.

Outro comentário pertinente é o desempenho de predição da variável pressão e velocidade apontada pela Malha 3 (vide Figura 3.12 a Figura 3.19). Apesar do erro apresentado na predição da velocidade no intake da bomba estar anormalmente alto (vide Figura 3.16) e da Malha 3 ter em torno de 60% a mais de nós na sua geometria (impactando uma maior demanda de recurso computacional), para os demais pontos monitorados, a Malha 3 apresentou razoável desempenho de predição das variáveis pressão e velocidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Validação do Modelo Computacional MOBO

A validação do modelo computacional MOBO partiu da comparação direta dos resultados experimentais obtidos pelo estudo de visualização da dinâmica do escoamento num poço alojador modelo de BCSS realizado por Gaspari *et al* (2007).

Neste estudo comparativo, além da abordagem qualitativa de observação da descarga do anular revestimento – *shroud* (anular externo) e da informação registrada pelos estudos realizados por Gaspari *et al* (2007), buscou-se também quantificar a percentagem de gás livre no modelo MOBO como um todo (*vide* equação (4-1) e especificamente no ponto geométrico do *intake* da BCSS (*vide* equação (4-2).

$$PGL - MOBO = \frac{Volume\ de\ Gás\ dentro\ do\ MOBO}{Volume\ do\ MOBO} \tag{4-1}$$

$$PGL - Intake = \frac{Volume\ de\ Gás\ dentro\ de\ cada\ Intake}{Volume\ do\ Intake} \tag{4-2}$$

O estudo experimental realizado por Gaspari *et al* (2007) teve como premissa que a configuração geométrica das tubulações a montante da entrada do MOBO de Jubarte e as vazões e propriedades dos fluidos estabelecidos do poço produtor até a chegada do poço alojador de BCSS (MOBO) determinavam um escoamento em padrão de golfadas. Tal característica de escoamento foi devidamente comprovada nos estudos experimentais com a utilização de água e ar através dos estudos de similaridade.

Entretanto, para os estudos da modelagem computacional, optou-se por estabelecer uma condição de entrada no modelo MOBO de bolhas dispersas (diâmetro de bolha 0,5 cm), com o objetivo de garantir uma condição mais conservadora. Com isso, esperava-se identificar se os aspectos geométricos constitutivos do MOBO contribuiriam de forma decisiva para a segregação das fases água e ar, uma vez que no padrão de escoamento em golfadas tal segregação já está previamente estabelecida.

Afora a consideração de um escoamento em padrão de bolhas dispersas na entrada do modelo computacional MOBO, as demais características dos fluidos e geometria do modelo MOBO foram devidamente atendidas conforme os estudos experimentais realizados por Gaspari *et al* (2007). Registre-se que a modelagem computacional de validação do modelo MOBO só sofria alterações das condições de contornos características de cada simulação, como por exemplo: percentagem de gás, vazão e geometria da *shroud* com furos e sem furos.

4.1.1. Predefinições da Modelagem do MOBO – Etapa de Validação

Para as simulações de validação do modelo computacional do MOBO, foram adotadas as predefinições de modelagem que constam na Tabela 4.1. Os aspectos de variação geométrica do modelo (*shroud* com - CF e sem furos - SF) e as condições de contorno foram alterados conforme as matrizes de simulações predefinidas (*vide* Tabela 4.2 e Tabela 4.3).

Tabela 4.1 - Predefinições da Modelagem do MOBO – Validação com e sem furos no *shroud*

Definições da Modelagem	**Descrição**	
Dimensão Espacial	Tridimensional	
Coordenadas	Cartesianas	
Tipo de Escoamento	Bifásico	
Dependência com a Temperatura	Isotérmico (25 ^{o}C)	
Empuxo	Vetor Gravidade (0;-9,8;0) [m/s^2]	
Parâmetro Multifásico: Descrição das Fases	Fase Contínua	Fase Dispersa
	Água	Ar (bolhas dispersas) com diâmetro de 0,5 cm.
Dependência em Relação ao Tempo	Simulação Transiente	
Condição de Contorno Básica	Preenchido com Água	
Propriedades Físicas Constantes (1,0 bar$_{abs}$ e 25 ^{o}C)	Massa Específica	Água: 997,0
	Viscosidade Dinâmica (Pa.s)	Água: 8,899e-04 Ar: 1,831e-05
Modelo de Turbulência	k - ε	
Predição do Coeficiente de Arraste	Correlação de Ishii-Zuber	

4.2. Validação da Simulação da Matriz – *shroud* sem furos

Para cada simulação realizada da Matriz – *shroud* sem furos, cujas condições de contorno podem ser encontradas na Tabela 4.2, é apresentada uma comparação direta do resultado qualitativo experimental contra o obtido por simulação. Ressalte-se que a pressão na entrada do poço alojador foi um dado medido experimentalmente (e não foi usada como condição de contorno) e que a pressão na saída do poço alojador foi um valor adotado para as simulações realizadas e foi usada como condições de contorno.

Tabela 4.2 - Matriz Simulação - *shroud* sem furos

Simulação	PGL (%)	$V_{média}$ na entrada do poço alojador (m/s)	Pressão na entrada do poço alojador (kgf/cm^2)	Pressão na saída do poço alojador (kgf/cm^2)
Q1.PGL07.SF-S.A	7,0	2,07	0,60	0,1
Q1.PGL15.SF-S.A	15,0	2,26	0,60	0,1
Q2.PGL07.SF-S.A	7,0	3,09	0,65	0,1
Q2.PGL12.SF-S.A	12,0	3,27	0,60	0,1

O estudo computacional permitiu a implementação de expressões numéricas que possibilitaram monitorar, ao longo do tempo, a pressão média na entrada do MOBO (P_Entrada) e na entrada do *shroud* (P_*shroud*), localizada na base do MOBO. Como também a porcentagem de gás livre (PGL) dentro do MOBO ($PGL-MOBO$) e na região que simula o *intake* da BCSS ($PGL-Intake$ 1 e $PGL-Intake$ 2, pois o modelo experimental foi concebido com a existência de 2 furos que simulavam o *intake* do BCSS).

Os comportamentos dessas variáveis monitoradas corroboraram as informações apontadas pelo estudo experimental realizado por Gaspari *et al* (2007). Aquele estudo se restringia na observação da dinâmica de escoamento dentro do modelo físico experimental, e, de tal forma, registrava a ocorrência ou não de descarga de líquido e as instabilidades de escoamento do anular externo (*shroud* – revestimento do MOBO) frente às vazões e percentagem de gás livre impostas ao modelo experimental.

As figuras, a seguir, nas quais aparece a geometria do modelo MOBO, foram geradas no pós-processamento realizado com uso do aplicativo *Ensight*. Adotou-se um *layout* padrão de

figura para esta etapa do trabalho visando reunir o máximo de informação referente à dinâmica do escoamento dentro do modelo computacional do MOBO. Seguem as características básicas deste *layout*:

a) A apresentação de uma Vista Interna – MOBO (corte de ¼ do modelo) onde se tem uma escala colorimétrica da porcentagem de gás livre e o tempo decorrido de simulação, como também, a visualização dos internos do modelo MOBO;

b) Uma vista em detalhe dos 2 *intakes*, os quais representam a região de sucção do BCSS e onde é monitorada a porcentagem de gás livre;

c) A apresentação de uma Vista Externa – MOBO com o monitoramento da porcentagem de gás livre.

4.2.1. Estudo Experimental contra Estudo Computacional – Resultados Gerais *shroud* sem furos

Alguns resultados da simulação da mistura bifásica de água e ar, escoando numa geometria do MOBO sem furos no *shroud*, são apresentados a seguir. Tais resultados foram semelhantes para todas as simulações da Tabela 4.2.

a) Mesmo considerando-se uma corrente bifásica com bolhas dispersas na entrada do MOBO, a geometria do equipamento acoplada ao sentido inicial de escoamento descendente dos fluidos e as propriedades interativas da água / ar determinaram a segregação das fases (gás / líquido) dentro do MOBO;

b) A estabilização da pressão no *shroud* (P_*shroud*) e o aumento da pressão na entrada do MOBO (P_Entrada) é uma comprovação do acúmulo de ar no anular externo (poço alojador / *shroud*). Corroborando com as observações experimentais apontadas por Gaspari *et al* (2007);

c) Estabelece-se um nível dinâmico de líquido, caracterizado pela diferença dos valores das pressões no *shroud* (P_*shroud*) e da entrada do MOBO (P_Entrada). Constata-se também que

por vezes ocorre uma diminuição muito brusca desta diferença, caracterizando uma descarga temporária do anular poço alojador / *shroud* (presença de somente ar);

d) Enquanto não ocorre a descarga do anular externo (poço alojador / *shroud*), a corrente bifásica que chega à região que representa o *intake* da BCSS tem tipicamente a porcentagem de gás livre de entrada do MOBO.

A seguir são apresentados, de forma específica, os resultados de cada simulação da Tabela 4.2.

4.2.2. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q1.PGL07.SF-S.A

⇒ Observações Experimentais – Q1.PGL07.SF-S.A

- Observados alguns descarregamentos muito breves do anular poço alojador / *shroud*;

- Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* variando de 4,1 a 4,2 metros.

⇒ Resultados da Modelagem Computacional – Q1.PGL07.SF-S.A:

Alguns resultados da simulação da mistura bifásica de água e ar, escoando numa geometria do MOBO sem furos no *shroud*, são apresentados da Figura 4.1 à Figura 4.3. Neste caso (Q1.PGL07.SF-S.A), a vazão de líquido era de 9,0 litros/min e a porcentagem de gás livre, na forma de bolhas dispersas, era de 7,0% na entrada do MOBO. Assim, podem-se ressaltar desses resultados os seguintes pontos:

a) A Figura 4.1 comprova a ocorrência de segregação de fases, apontada no item 4.2.1;

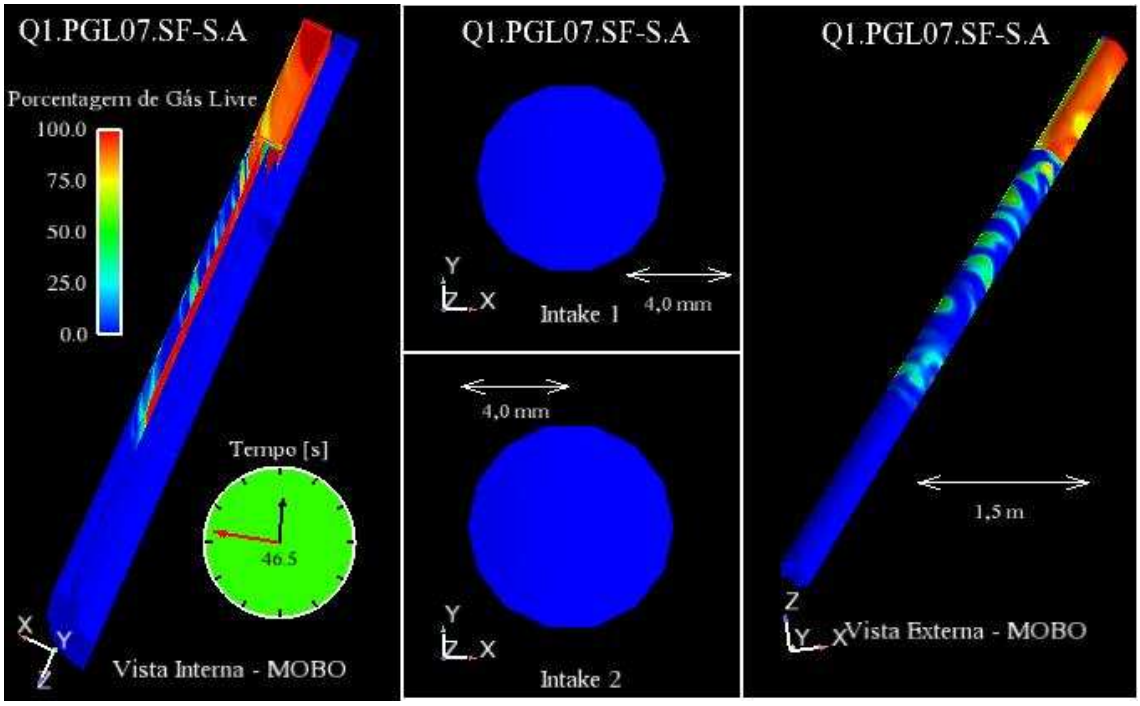


Figura 4.1 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q1.PGL07.SF-S.A)

b) Conforme a Figura 4.2, infere-se que:

- Para as condições simuladas, a descarga do anular ocorre em torno de 115,0 s e é obtida uma estabilização da porcentagem de gás livre dentro do MOBO. Entretanto, por vezes, é identificada a chegada de frente de gás nos *intakes* da BCSS;

- A média da pressão na entrada do MOBO (P_Entrada) apontada pela simulação no período de estabilização foi de 50.0000 Pa (0,5 kgf/cm^2), implicando num erro de predição de -17,0% em relação ao medido experimentalmente (*vide* Tabela 3.18).

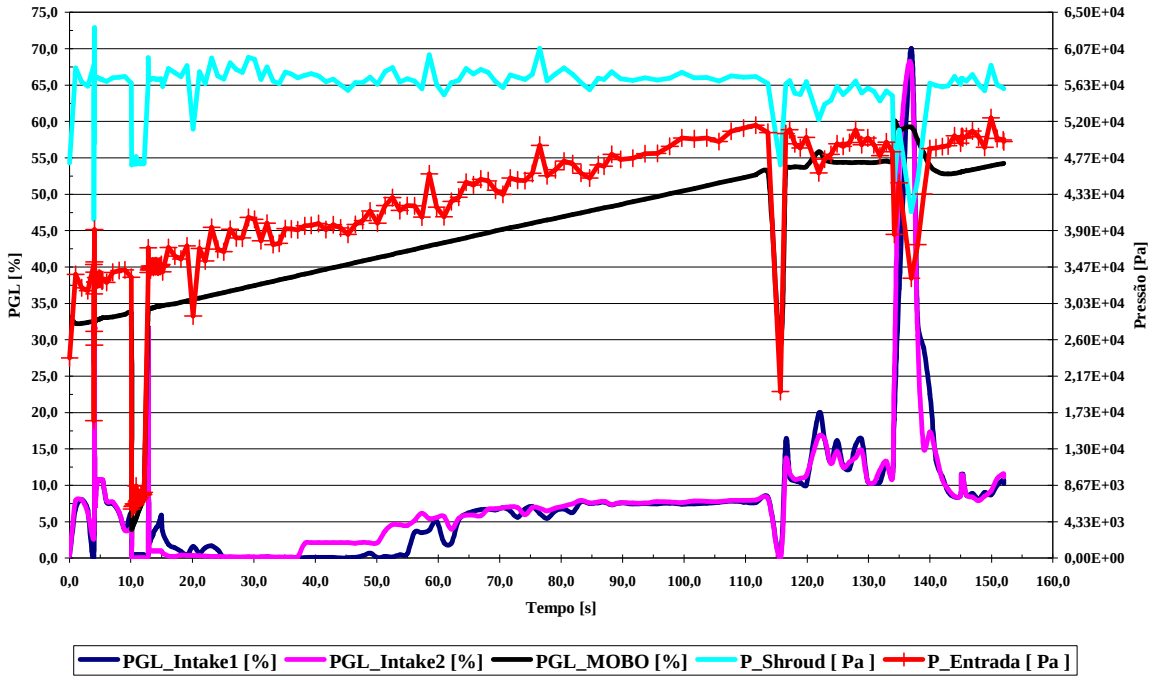


Figura 4.2 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q1.PGL07.SF-S.A)

c) Na Figura 4.3 é apresentada uma visão geral da porcentagem de gás livre (PGL) nas vistas interna e externa do MOBO, como também, em 2 detalhes, os *intakes* (que representam a região de sucção da BCSS) frente à descarga de líquido do anular poço alojador / *shroud*. Constata-se a chegada de uma corrente bifásica rica em ar.

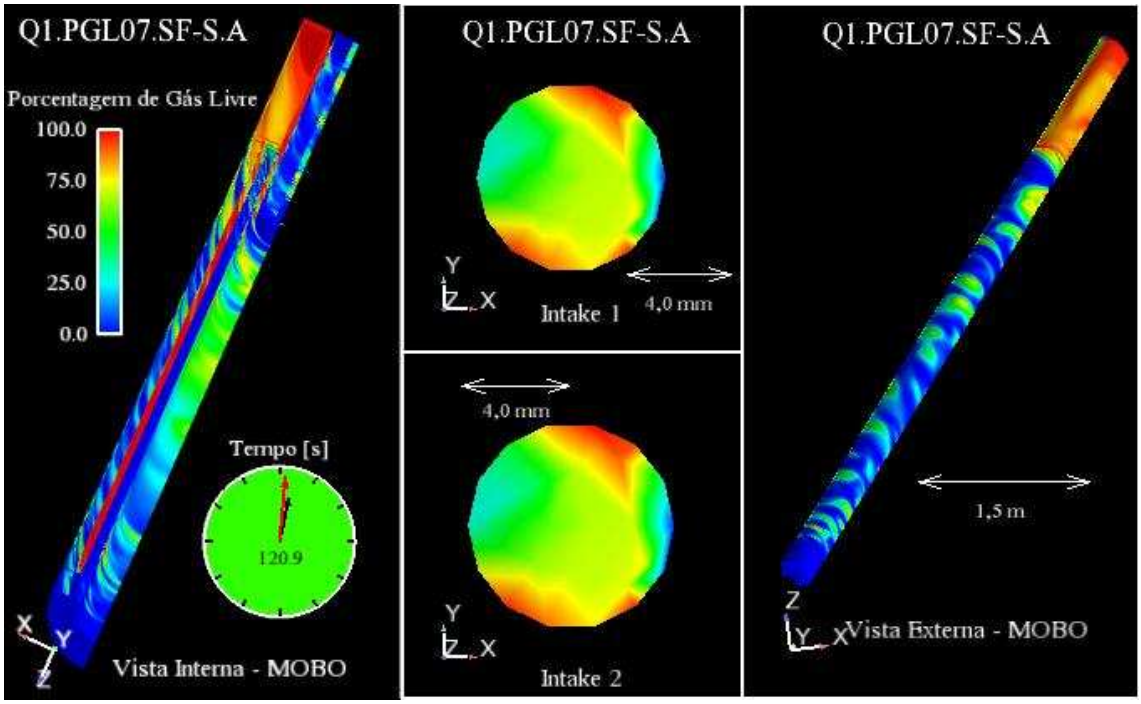


Figura 4.3 - Visualização com descarga de líquido do anular poço alojador / *shroud* (Q1.PGL07.SF-S.A)

4.2.3. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q1.PGL15.SF-S.A

⇒ Observações Experimentais – Q1.PGL15.SF-S.A

- Observados descarregamentos do anular poço alojador / *shroud*;

- Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* variando de 4,1 metros e descargas.

⇒ Resultados da Modelagem Computacional – Q1.PGL15.SF-S.A

Alguns resultados da simulação da mistura bifásica de água e ar, escoando numa geometria do MOBO sem furos no *shroud*, são apresentados da Figura 4.4 a Figura 4.6. Neste caso (Q1.PGL15.SF-S.A), a vazão de líquido era de 9,0 litros/min e a porcentagem de gás livre, na forma de bolhas dispersas, era de 15,0% na entrada do MOBO. Assim, podem-se ressaltar desses resultados os seguintes pontos:

a) A Figura 4.4 comprova a ocorrência de segregação de fases, apontada no item 4.2.1;

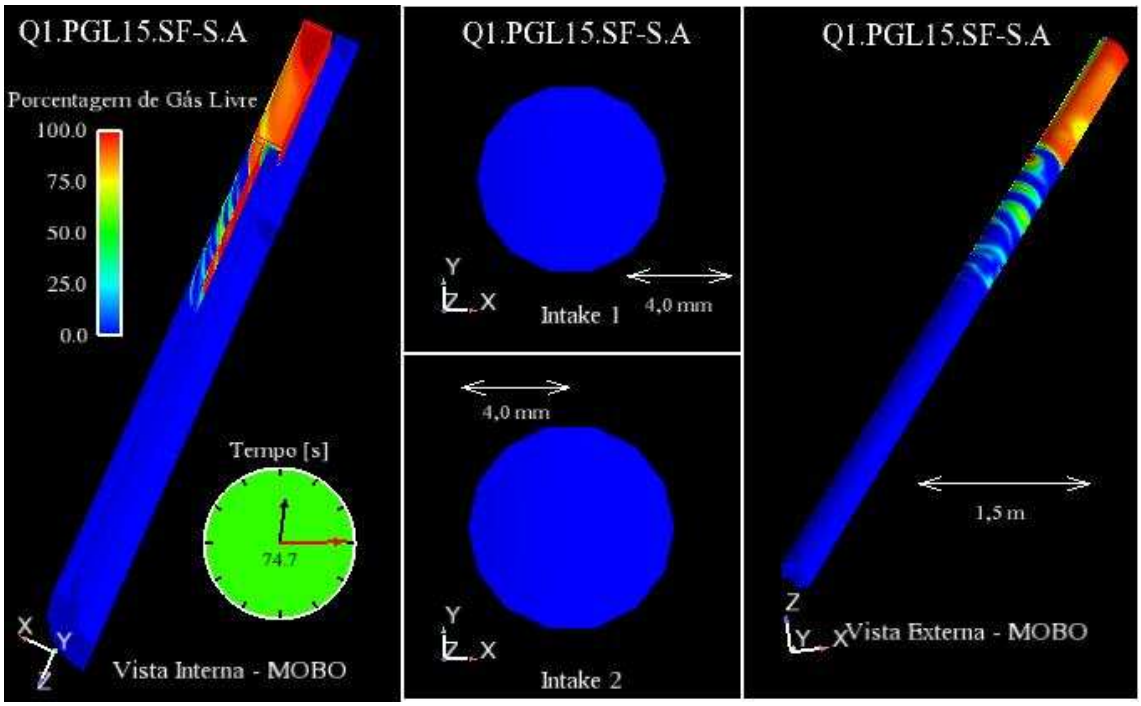


Figura 4.4 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q1.PGL15.SF-S.A)

b) Conforme a Figura 4.5 e a Figura 4.6, conclui-se que:

- Para as condições simuladas, a descarga do anular ocorre em torno de 120,0 s e é obtida uma estabilização da porcentagem de gás livre dentro do MOBO;

- Ocorre a estabilização da pressão no *shroud* (P_*shroud*) num valor em torno de 44.000 Pa. Enquanto que no caso Q1.PGL07.SF-S.A, esta estabilização ocorre num valor de 55.000 Pa. Tal comportamento está associado a uma maior quantidade de gás livre no anular mais interno (coluna de produção / *shroud*), demandando um nível de pressão menor no *shroud* para estabelecer o escoamento ascendente da corrente bifásica, efeito *gas lift*;

- A média da pressão P_Entrada apontada pela simulação no período de estabilização foi de 39.000 Pa (0,4 kgf/cm^2), implicando num erro de predição de -33,0% em relação ao medido experimentalmente (*vide* Tabela 3.18).

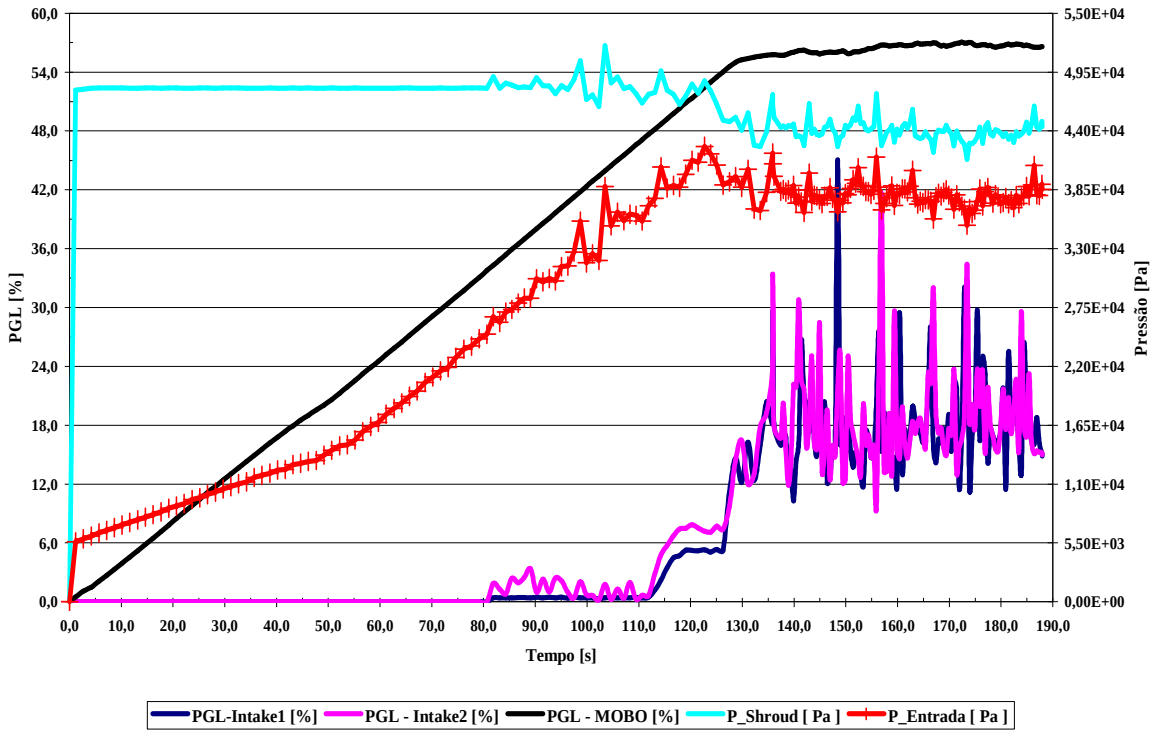


Figura 4.5 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q1.PGL15.SF-S.A)

- Na Figura 4.6 é apresentada uma visão geral da porcentagem de gás livre (PGL) nas vistas interna e externa do MOBO, como também, em 2 detalhes, os *intakes* (que representam a região de sucção da BCSS) frente à descarga de líquido do anular poço alojador / *shroud*. Constata-se que o anular interno do *shroud* encontra-se predominantemente com ar e que fatalmente chegará uma corrente bifásica rica em ar nos *intakes*.

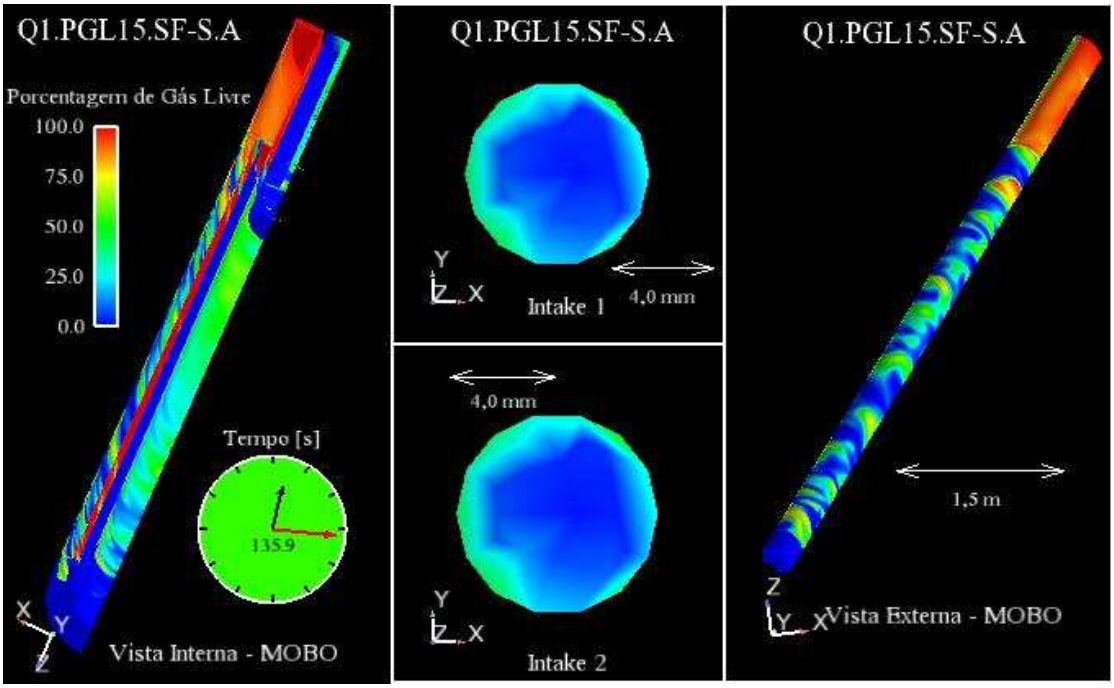


Figura 4.6 - Visualização com descarga de líquido do anular poço alojador / *shroud* (Q1.PGL15.SF-S.A)

4.2.4. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q2.PGL07.SF-S.A

⇒ Observações Experimentais – Q2.PGL07.SF-S.A:

- Não foi observada descarga no anular poço alojador / S*hroud*. Possivelmente devido a uma maior vazão de líquido ocorra um maior arraste do gás de tal forma que o acúmulo de gás existente no anular poço alojador / *shroud* não seja suficiente para promover a descarga do mesmo;

- Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* variando de 4,1 a 4,25 metros. Nível muito próximo da entrada do anular interno do *shroud* que se encontra a 4,4 metros.

⇒ Resultados da Modelagem Computacional – Q2.PGL07.SF-S.A:

Alguns resultados da simulação da mistura bifásica de água e ar, escoando numa geometria do MOBO sem furos no *shroud*, são apresentados da Figura 4.7 a Figura 4.9. Neste caso (Q2.PGL07.SF-S.A), a vazão de líquido era de 13,5 litros/min e a porcentagem de gás livre, na forma de bolhas dispersas, era de 7,0% na entrada do MOBO. Assim, podem-se ressaltar desses resultados os seguintes pontos:

a) A Figura 4.7 comprova a ocorrência de segregação de fases, apontada no item 4.2.1. Entretanto ressalta-se o aumento do tempo para o processo de segregação das fases (acúmulo de gás) na dinâmica de escoamento;

b) O aumento do tempo para o processo de segregação das fases na simulação Q2.PGL07.SF-S.A pode ser claramente identificado quando se compara a Figura 4.1 e a Figura 4.7. Pois, decorridos praticamente os mesmo tempos de simulação, verifica-se que para a simulação Q1.PGL07.SF-S.A a descarga de líquido do anular poço alojador / *shroud* já se faz presente. Enquanto que para a simulação Q2.PGL07.SF-S.A o acúmulo de gás ainda não havia alcançado 1/3 do referido anular. Tal comportamento está associado à maior vazão de líquido que implica num maior arraste do gás, retardando assim, o acúmulo de gás em relação ao identificado na simulação Q1.PGL07.SF-S.A.

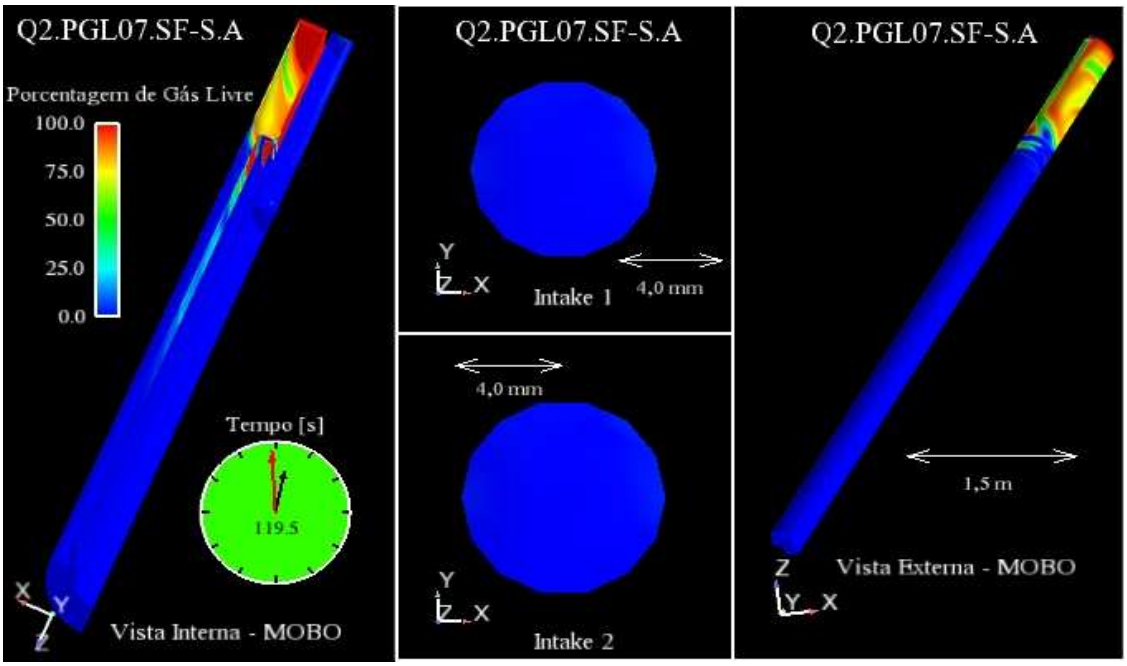


Figura 4.7 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q2.PGL07.SF-S.A)

c) Conforme a Figura 4.8 e a Figura 4.9, são apresentadas as seguintes inferências:

- Verifica-se que antes da estabilização da porcentagem de gás livre dentro do MOBO, a pressão no *shroud* (P_*shroud*) apresenta 3 comportamentos distintos. Até os 83,0 segundos de simulação, a pressão no *shroud* (P_*shroud*) encontra-se constante e em torno de 52.000 Pa. A partir deste período passa a existir certa oscilação no valor desta variável, representando a chegada da corrente bifásica na região de monitoramento do *shroud* (fato também indicado pelo aumento da porcentagem de gás livre nos *intakes*). Uns 20 segundos antes da estabilização da porcentagem de gás livre dentro do MOBO (em torno dos 219,0 segundos de simulação), constata-se uma leve queda da pressão no *shroud* (P_*shroud*), possivelmente ocasionado pela descarga de líquido do anular poço alojador / *shroud* (observação evidenciada pelo aumento do PGL na região que representa os *intakes* da BCSS). De acordo com os estudos apontados por Gaspari *et al* (2007), tal descarga não foi comprovada visualmente mas foi ressaltado o baixo nível de líquido reinante no anular poço alojador / *shroud*;

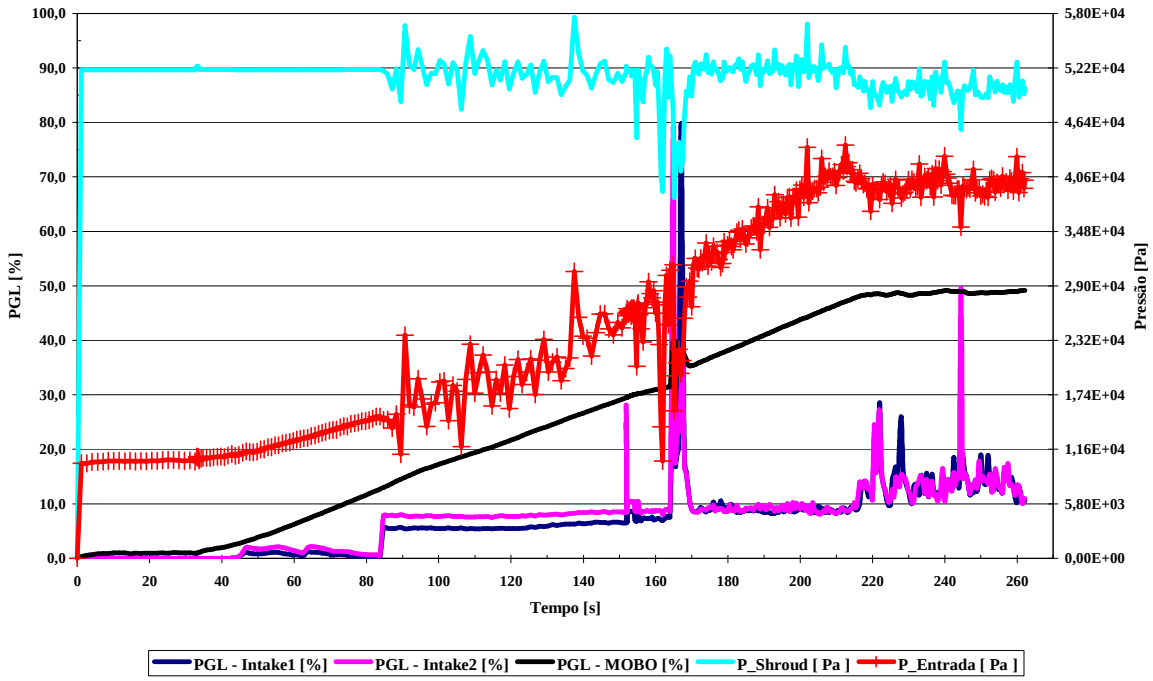


Figura 4.8 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q2.PGL07.SF-S.A)

- A média da pressão P_Entrada apontada pela simulação no período de estabilização foi de 40.000 Pa (0,4 kgf/cm^2), implicando num erro de predição de -38,0% em relação ao medido experimentalmente (*vide* Tabela 3.18).

- Observa-se descarga temporária do anular poço alojador / *shroud* (presença de somente ar), *vide* Figura 4.9;

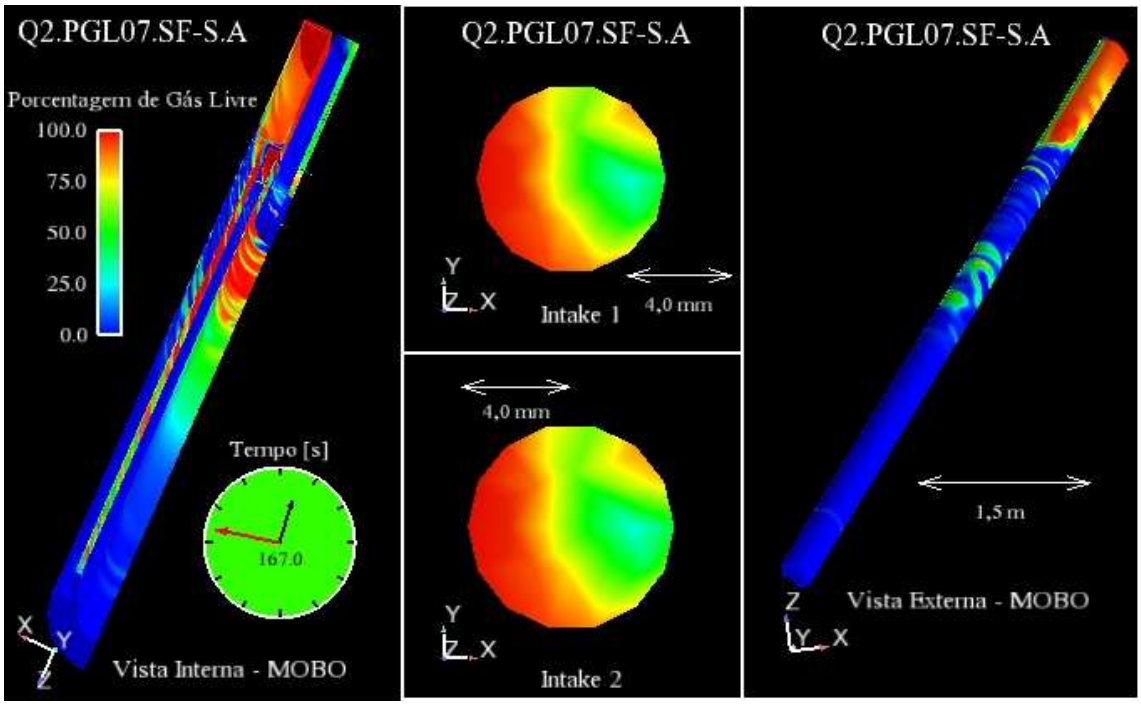


Figura 4.9 - Visualização com descarga de líquido do anular poço alojador / *shroud* (Q2.PGL07.SF-S.A)

4.2.5. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q2.PGL12.SF-S.A

⇒ Observações Experimentais – Q2.PGL12.SF-S.A:

- Foram observadas algumas descargas do anular poço alojador / *shroud*;

- Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* variando de 4,2 a 4,3 metros. No interior do *shroud* são observadas capas de bolha que vão se coalescendo até formarem bolhas de Taylor com comprimento entre 5 e 10 cm e pistões com cerca de 30 cm.

⇒ Resultados da Modelagem Computacional – Q2.PGL12.SF-S.A:

Alguns resultados da simulação da mistura bifásica de água e ar, escoando numa geometria do MOBO sem furos no *shroud*, são apresentados da Figura 4.10 a Figura 4.12. Neste caso (Q2.PGL12.SF-S.A), a vazão de líquido era de 13,5 litros/min e a porcentagem de gás livre, na forma de bolhas dispersas, era de 12,0% na entrada do MOBO. Assim, podem-se ressaltar desses resultados os seguintes pontos:

a) A Figura 4.10 comprova a ocorrência de segregação de fases, apontada no item 4.2.1. Entretanto ressalta-se o aumento do tempo para o processo de segregação das fases (acúmulo de gás) na dinâmica de escoamento;

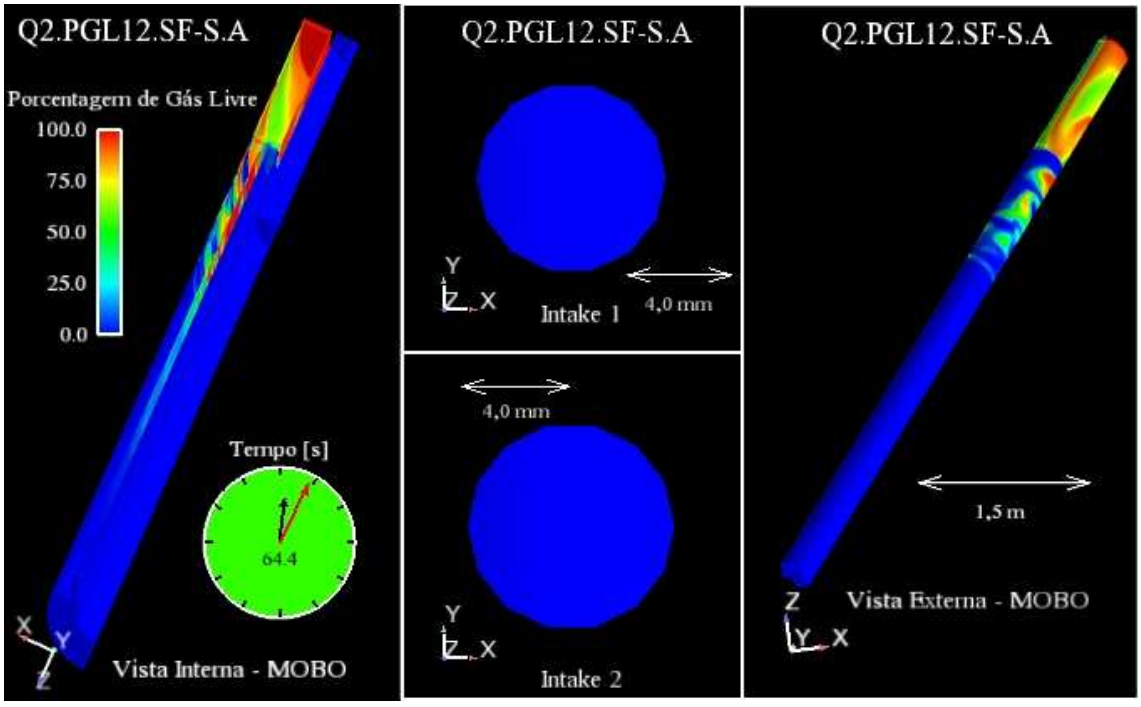


Figura 4.10 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q2.PGL12.SF-S.A)

b) Conforme a Figura 4.11 e a Figura 4.12, são apresentadas as seguintes inferências:

- Observa-se que não há um aumento do tempo para o processo de segregação das fases na simulação Q2.PGL12.SF-S.A quando comparado com a simulação Q1.PGL07.SF-S.A, pois, como pode ser verificado nas Figura 4.5 e Figura 4.11, o comportamento da dinâmica da

porcentagem de gás dentro do MOBO é muito similar. Esse comportamento revela que a possibilidade de um maior arraste de gás, devido ao aumento da vazão de líquido da simulação Q2.PGL12.SF-S.A, é praticamente anulado pelo aumento da fração de gás disperso na corrente de entrada do MOBO;

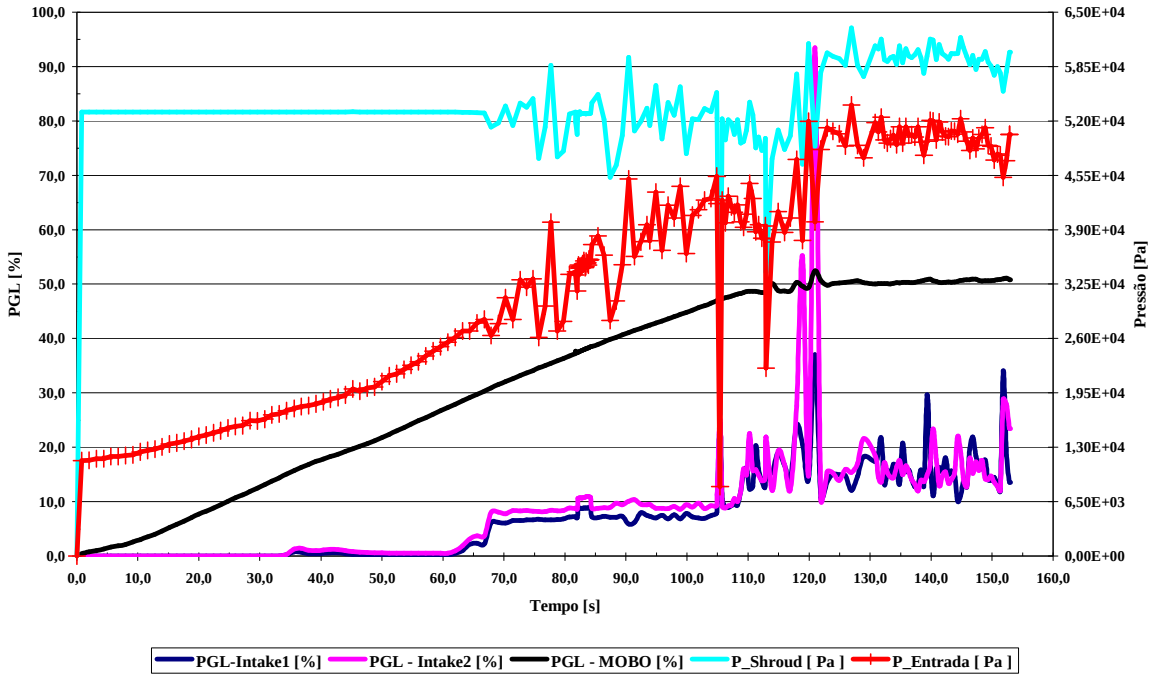


Figura 4.11 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q2.PGL12.SF-S.A)

- A média da pressão P_Entrada apontada pela simulação no período de estabilização foi de 50.000 Pa (0,5 kgf/cm^2), implicando num erro de predição de -17,0% em relação ao medido experimentalmente (*vide* Tabela 3.18).

- Que para as condições simuladas, a descarga do anular ocorre em torno de 110,0 s e é obtida uma estabilização da porcentagem de gás livre dentro do MOBO.

- Verifica-se que antes da estabilização da porcentagem de gás livre dentro do MOBO, a pressão no *shroud* (P_*shroud*) tem 2 comportamentos distintos. Até os 65,0 segundos de simulação, a pressão no *shroud* (P_*shroud*) encontra-se constante em 53.100 Pa. A partir deste período passa a existir certa oscilação no valor desta variável, representando a chegada da corrente bifásica na região de monitoramento do *shroud* (fato também indicado pelo aumento da porcentagem de gás livre nos *intakes*). Após a estabilização da porcentagem de gás livre dentro do MOBO (em torno dos 110,0 segundos de simulação), constata-se um

aumento da pressão (um novo patamar de estabilização) da pressão de entrada do MOBO (P_Entrada) e conseguintemente da pressão no *shroud* (P_*shroud*). Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de se estabelecer um padrão de escoamento em golfadas no anular interno do *shroud* implicando numa maior demanda de pressão do sistema para se estabelecer o escoamento no referido anular. Vale ressaltar que a intermitência no escoamento indicada no trabalho experimental de Gaspari *et al* (2007) foi também capturada e visualizada na simulação computacional realizada.

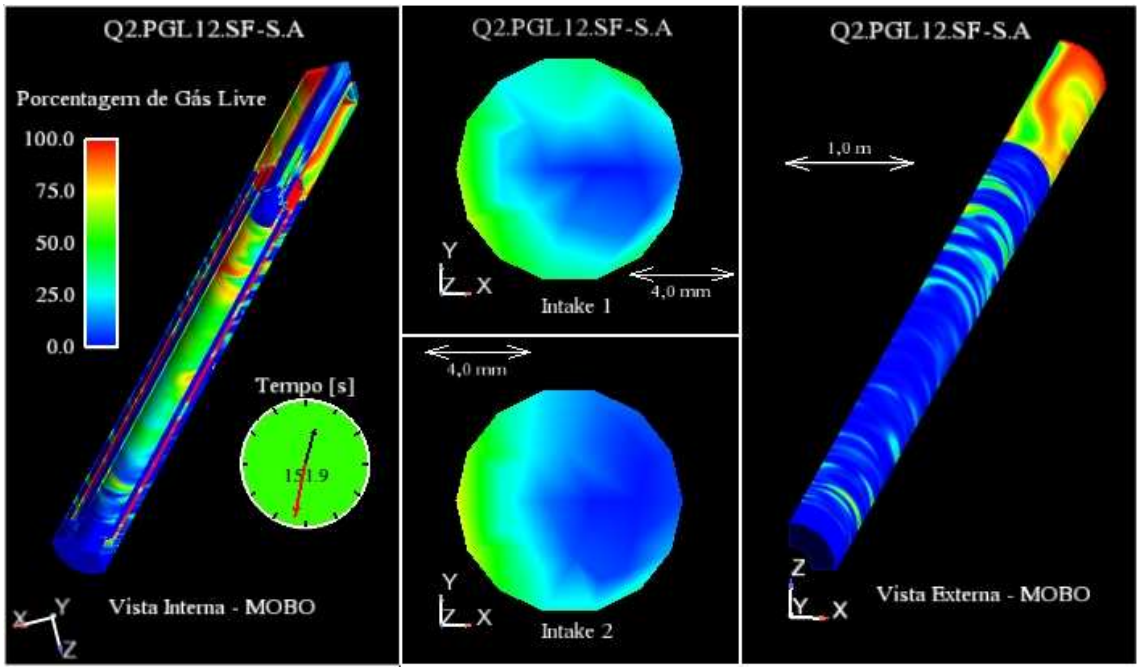


Figura 4.12 - Visualização com descarga de líquido do anular poço alojador / *shroud* (Q2.PGL12.SF-S.A)

Assim sendo, com base nos resultados das simulações obtidos pode-se concluir que o modelo computacional implementado no CFX representou de forma satisfatória os experimentos realizados por Gaspari *et al* (2007), cuja geometria contemplava a presença do *shroud* sem furos laterais.

O comportamento da dinâmica de escoamento no aparato experimental MOBO para cada caso estudado foi identificado de forma bastante satisfatória no modelo computacional. Entretanto para a predição da pressão de entrada do MOBO (P_Entrada), o modelo computacional não demonstrou uma boa acurácia para os casos estudados (erro de -17,0% para os casos Q1.PGL07.SF-S.A e Q2.PGL12.SF-S.A, e, erro de -33,0% e -38,0% para os casos

Q1.PGL15.SF-S.A e Q2.PGL07.SF-S.A, respectivamente). Mas cabe também ressaltar que as medições experimentais das pressões foram obtidas através de leituras de manômetros, devidamente calibrados e adequados para a faixa de medição, porém a leitura era visual e pontual, não sendo registradas as oscilações reinantes do processo dinâmico.

Outro ponto a se destacar é que experimentalmente não se mediu a pressão de saída do aparato MOBO. Adotou-se para as simulações uma pressão manométrica constante de 9.800 Pa (0,1 kgf/cm^2) na saída do modelo computacional de forma a garantir a existência de uma contra pressão no sistema.

A seguir serão confrontados os resultados experimentais do modelo MOBO, cuja geometria contemplava a presença do *shroud* com furos, contra o modelo computacional implementado no CFX.

4.3. Simulação da Matriz – *shroud* com furos

Para cada simulação realizada da Matriz – *shroud* com furos, cujas condições de contorno podem ser encontradas na Tabela 4.3, é apresentada uma comparação direta do resultado qualitativo experimental contra o obtido por simulação. Ressalta-se que a pressão na entrada do poço alojador foi um dado medido experimentalmente (e não foi usada como condição de contorno) e que a pressão na saída do poço alojador foi um valor adotado para as simulações realizadas e foi usada como condições de contorno.

Tabela 4.3 - Matriz Simulação - Shroud com furos

Simulação	PGL (%)	$V_{média}$ na entrada do poço alojador (m/s)	Pressão na entrada do poço alojador (kgf/cm^2)	Pressão na saída do poço alojador (kgf/cm^2)
Q1.PGL8.CF-S.A	8,0	2,08	0,32	0,1
Q1.PGL16.CF-S.A	16,0	2,28	0,32	0,1
Q2.PGL7.CF-S.A	7,0	3,10	0,47	0,1
Q2.PGL13.CF-S.A	13,0	3,30	0,47	0,1

Analogamente ao estudo de validação do modelo computacional MOBO, cuja geometria contemplava a presença do *shroud* sem furos, estudo similar foi realizado agora contemplando a existência do *shroud* com 15 furos laterais (de 1,0 mm cada) dispersos de forma helicoidal

ao longo dos 3,5 metros do *shroud*. Este estudo também permitiu a implementação de expressões numéricas que possibilitaram monitorar, ao longo do tempo, a pressão média na entrada do MOBO (P_Entrada) e na entrada do *shroud* (P_*shroud*), localizada na base do MOBO. Como também a porcentagem de gás livre (PGL) dentro do MOBO (PGL_MOBO) e na região que simula o *intake* da BCSS (PGL_Intake 1 e PGL_Intake 2, pois o modelo experimental foi concebido com a existência de 2 furos que simulavam a sucção da BCSS).

Além disto, monitorou-se a porcentagem de gás livre (PGL) na área de entrada de cada furo ao longo do *shroud*. Segue a Tabela 4.4 que contempla a identificação de cada PGL dos furos laterais do *shroud* e a posição vertical em relação à base do modelo MOBO.

Tabela 4.4 – Posição Vertical de cada Furo do *shroud* e Identificação da PGL

Furo (1,0 mm cada)	Posição Vertical [m] (referência: entrada do MOBO)	Código	Identificação
1	1,41	PGL - EF1	PGL na entrada do Furo-1
2	1,60	PGL - EF2	PGL na entrada do Furo-2
3	1,81	PGL - EF3	PGL na entrada do Furo-3
4	2,00	PGL - EF4	PGL na entrada do Furo-4
5	2,21	PGL - EF5	PGL na entrada do Furo-5
6	2,40	PGL - EF6	PGL na entrada do Furo-6
7	2,61	PGL - EF7	PGL na entrada do Furo-7
8	2,80	PGL - EF8	PGL na entrada do Furo-8
9	3,01	PGL - EF9	PGL na entrada do Furo-9
10	3,20	PGL - EF10	PGL na entrada do Furo-10
11	3,41	PGL - EF11	PGL na entrada do Furo-11
12	3,60	PGL - EF12	PGL na entrada do Furo-12
13	3,81	PGL - EF13	PGL na entrada do Furo-13
14	4,00	PGL - EF14	PGL na entrada do Furo-14
15	4,21	PGL - EF15	PGL na entrada do Furo-15

Os comportamentos dessas variáveis monitoradas corroboraram as informações apontadas pelo estudo experimental realizado por Gaspari *et al* (2007), que se restringiu à observação da dinâmica de escoamento dentro do equipamento experimental. Desta forma, aqueles autores registravam a ocorrência ou não de descarga de líquido e as instabilidades de escoamento do

anular externo (*shroud* – revestimento do MOBO) frente às vazões e percentagem de gás livre empregadas no experimento.

As figuras a seguir seguem um formato padrão para todas as simulações com furos no *shroud* e apresentam:

a) Uma vista Interna – MOBO (corte de ¼ do modelo computacional) onde se tem uma escala colorimétrica da porcentagem de gás livre e o tempo decorrido de simulação; a visualização dos internos do modelo MOBO e a identificação geográfica dos furos 1, 4 e 8. Cabe ressaltar que as simulações foram transcorridas considerando a geometria íntegra do modelo computacional;

b) Uma vista em detalhe dos furos 1, 4 e 8 e da região que representa o *intake* da BCSS, onde igualmente se é monitorada a porcentagem de gás livre;

c) Uma vista Externa – MOBO com o monitoramento da porcentagem de gás livre.

4.3.1. Estudo Experimental contra Estudo Computacional – Resultados Gerais *shroud* com furos

Alguns resultados da simulação da mistura bifásica de água e ar, escoando numa geometria do MOBO com furos no *shroud*, são apresentados a seguir. Tais resultados foram comuns para todas as simulações da Tabela 4.3.

a) Mesmo considerando-se uma corrente bifásica com bolhas dispersas na entrada do MOBO, a geometria do equipamento acoplada ao sentido inicial de escoamento descendente dos fluidos e as propriedades interativas da água / ar determinaram a segregação das fases (gás / líquido) dentro do MOBO;

b) A estabilização da pressão no *shroud* (P_*shroud*) e o aumento da pressão na entrada do MOBO (P_Entrada) é uma comprovação do acúmulo de ar no anular externo (poço alojador / *shroud*). Corroborando com as observações experimentais apontadas por Gaspari *et al* (2007).

c) É estabelecido um nível dinâmico de líquido, caracterizado basicamente pela diferença dos valores das pressões no *shroud* (P_*shroud*) e da entrada do MOBO (P_Entrada). Esta diferença traduz o quanto de pressão se faz necessário para estabelecer o fluxo no anular S*hroud* / poço alojador e manifesta, para as condíções simuladas, a existência de um nível dinâmico de líquido, pois, com a segregação das fases dentro do modelo MOBO e o sentido descendente de escoamento, o líquido escoa praticamente em queda livre até a região de interface líquido/gás (nível dinâmico). Como a diferença de pressão em escoamento na região de acumulação de gás no anular S*hroud* / poço alojador é praticamente desprezível, pode-se então considerar que a diferença dos patamares estabelecidos pelas pressões P_*shroud* e P_Entrada é a perda de carga para escoamento da nova corrente bifásica que se estabelece na dinâmica de escoamento dentro do modelo do MOBO;

A seguir são apresentados, de forma específica, os resultados de cada simulação da Tabela 4.2.

4.3.2. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q1.PGL08.CF-S.A

⇒ Observações Experimentais – Q1.PGL08.CF-S.A:

- Não foram observadas descargas do anular poço alojador / *shroud*;

- Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* se estabeleceu a 1,3 metros da entrada do poço alojador. Somente o primeiro furo ficou exposto ao ar.

⇒ Resultados da Modelagem Computacional – Q1.PGL08.CF-S.A:

Alguns resultados da simulação da mistura bifásica de água e ar, escoando numa geometria do MOBO com furos no *shroud*, são apresentados da Figura 4.13 a Figura 4.17. Neste caso (Q1.PGL08.CF-S.A), a vazão de líquido era de 9,0 litros/min e a porcentagem de gás livre, na forma de bolhas dispersas, era de 8,0% na entrada do MOBO. Assim, podem-se ressaltar desses resultados os seguintes pontos:

a) A Figura 4.13 comprova a ocorrência de segregação de fases, apontada no item 4.3.1.

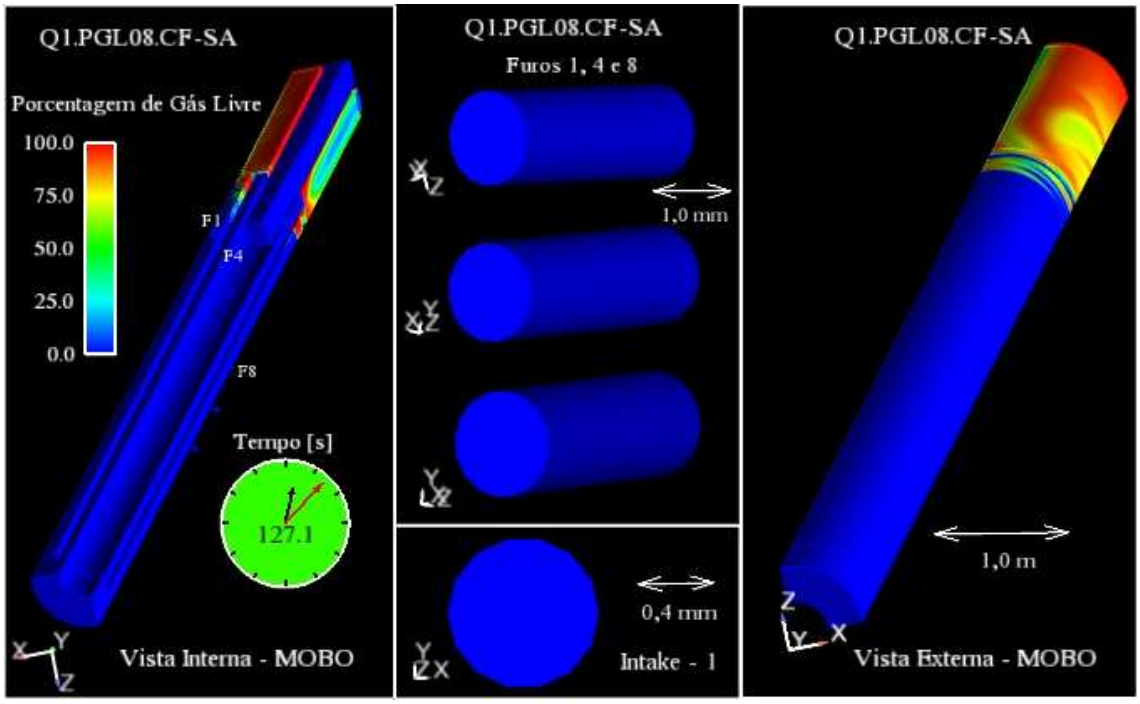


Figura 4.13 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q1.PGL08.CF-S.A)

b) Conforme a Figura 4.14, infere-se que:

- O aumento da pressão na entrada do MOBO (P_Entrada), como igualmente seu patamar de estabilização, se estabelece em valores bem inferiores (~ 30.000 Pa) ao encontrado para o exemplo simulado com o *shroud* sem furos (~ 50.000 Pa, Figura 4.2) e praticamente nas mesmas condições de contorno (Q1.PGL07.SF-S.A).

- A corrente bifásica tem uma PGL média no *Intake*-1 de 6,0% e no *Intake*-2 de 1,0% (após estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud*). Nas análises realizadas, não se identificou uma possível causa para este fenômeno. Entretanto acredita-se que este comportamento possa estar associado à própria dinâmica do escoamento na geometria modelada e às condições de contorno da simulação, pois comportamento com PGL invertido foi encontrado em outras simulações;

- Quando se faz uma análise conjunta com a Figura 4.15, que representa o monitoramento da PGL nos furos de 1 ao 5 do *shroud*, pode-se concluir que a descontinuidade que aparece no perfil de pressão e PGL monitorados da Figura 4.14, em torno do 142,0 segundos de

simulação, é ocasionada pela passagem de uma frente de gás nos furos 1, 2, 3, 4 e 5 do *shroud*;

- Estendendo-se, também, para uma análise conjunta da Figura 4.15 e Figura 4.16, pode-se concluir que o nível dinâmico da corrente bifásica se estabelece próximo do furo 3 (algo em torno de 1,6 metros da entrada do modelo do MOBO). Uma vez que para os demais furos abaixo a PGL monitorada não chega a 0,5 %. Este valor para o nível dinâmico corrobora bem com o valor experimental que ficou em torno de 1,3 metros, em relação à entrada do poço alojador, para o nível dinâmico;

- Para as condições simuladas foi obtida uma estabilização de 32,5% de porcentagem de gás livre dentro do MOBO;

- A média da pressão na entrada do MOBO (P_Entrada) apontada pela simulação no período de estabilização foi de 30.000 Pa (0,30 kgf/cm^2), implicando num erro de predição de apenas -6,0% em relação ao medido experimentalmente.

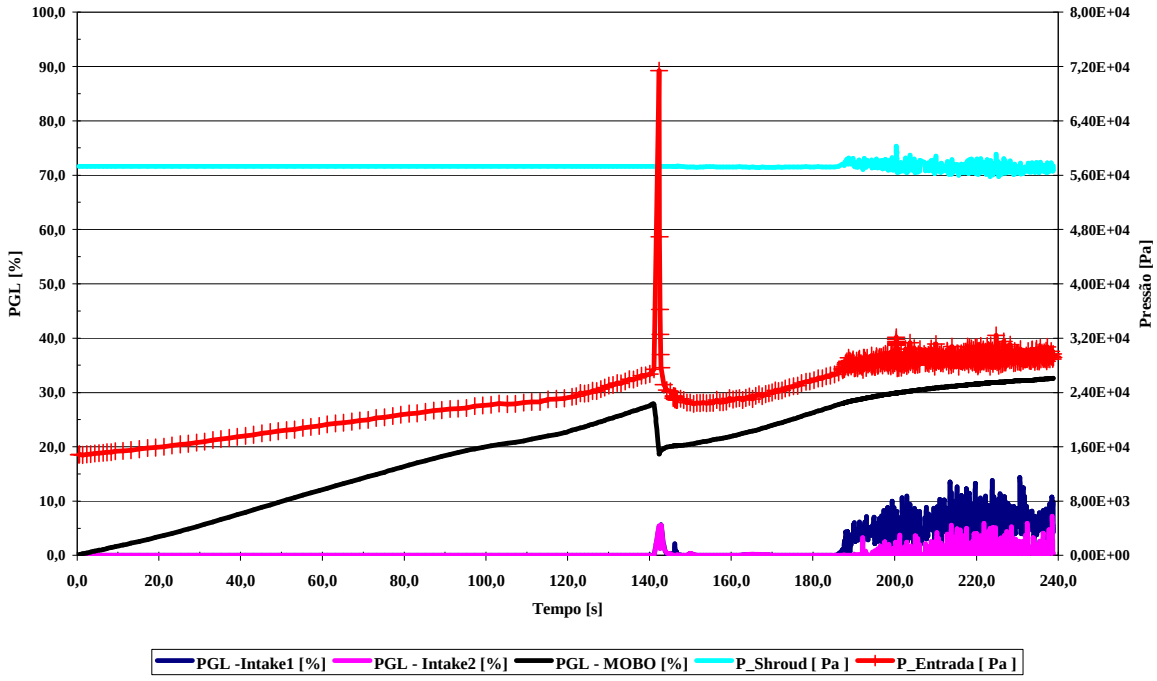


Figura 4.14 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q1.PGL08.CF-S.A)

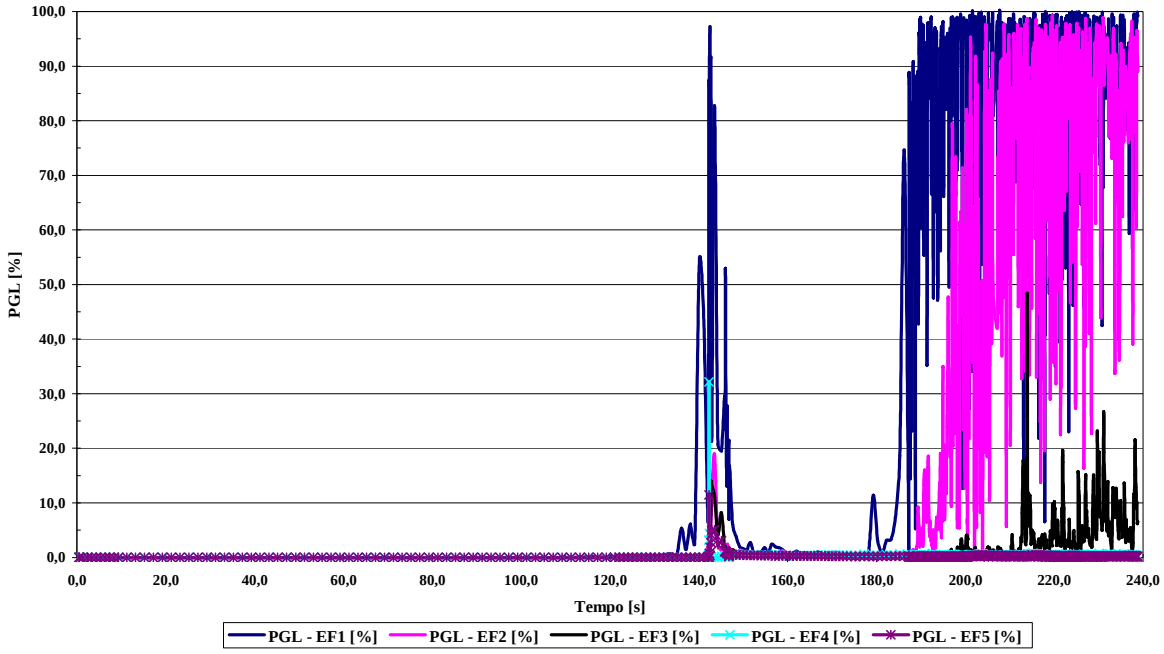


Figura 4.15 - Monitoramento da PGL nos Furos de 1 a 5 (Q1.PGL08.CF-S.A)

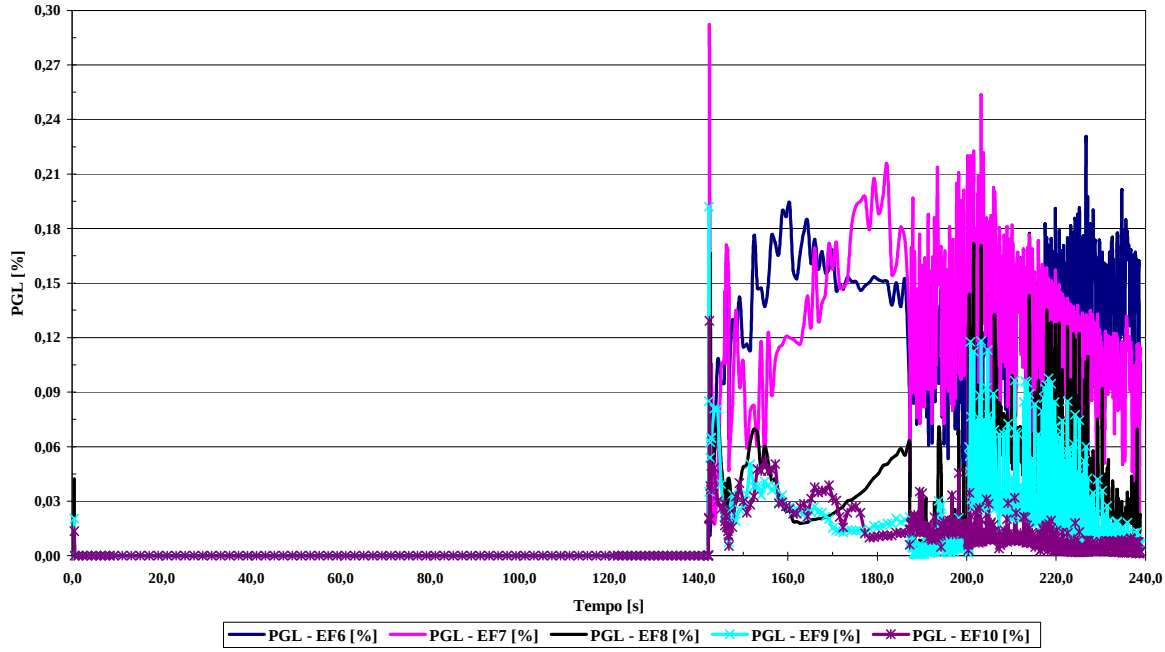


Figura 4.16 - Monitoramento da PGL nos Furos 6 ao 10 (Q1.PGL08.CF-S.A)

c) Na Figura 4.17, que apresenta uma visualização da simulação Q1.PGL08.CF-S.A no período de estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud*, pode-se constatar que o furo 1 está completamente tomado pelo ar, como observado experimentalmente, e que o furo 4

apresenta a passagem de um bolsão de ar. Cabe ressaltar que para as condições simuladas, Q1.PGL08.CF-S.A, o comportamento dos *intakes* 1 e 2 não apresentou PGL acima que 14,0%.

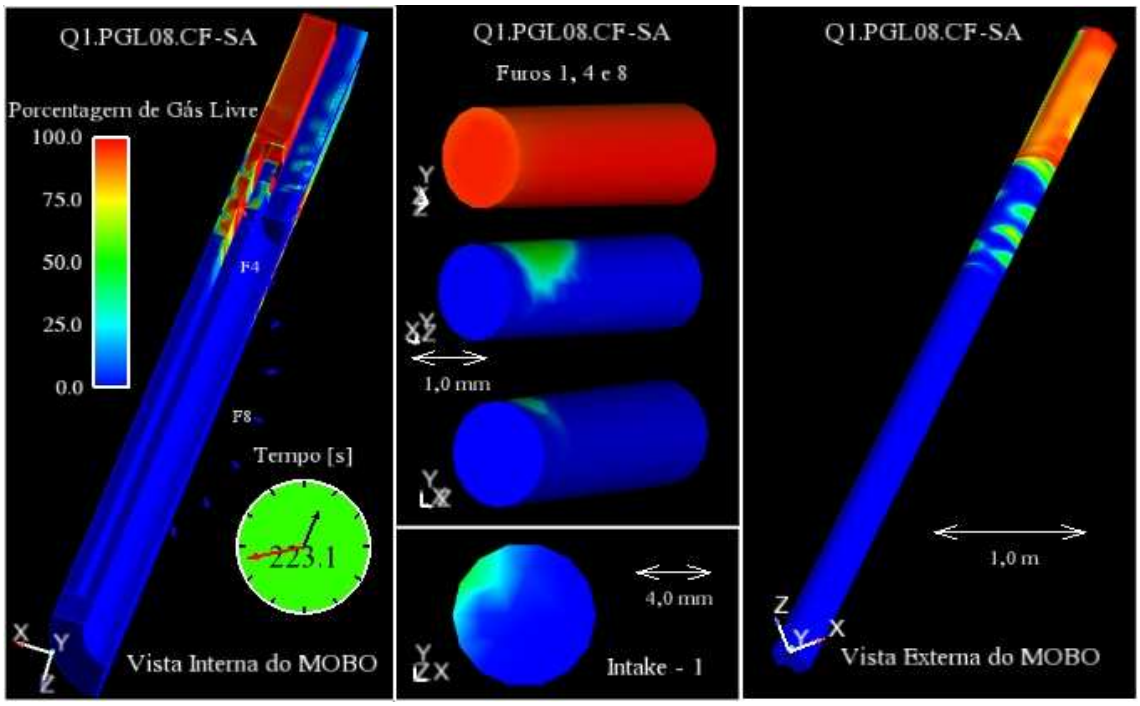


Figura 4.17 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud* (Q1.PGL08.CF-S.A)

4.3.3. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q1.PGL16.CF-S.A

⇒ Observações Experimentais – Q1.PGL16.CF-S.A:

- Não foram observadas descargas do anular poço alojador / *shroud*;

- Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* se estabeleceu a 1,5 metros da entrada do poço alojador. Segundo furo intermitentemente exposto ao ar.

⇒ Resultados da Modelagem Computacional – Q1.PGL16.CF-S.A:

Alguns resultados da simulação da mistura bifásica de água e ar, escoando numa geometria do MOBO com furos no *shroud*, são apresentados da Figura 4.18 à Figura 4.22. Neste caso (Q1.PGL16.CF-S.A), a vazão de líquido era de 9,0 litros/min e a porcentagem de gás livre, na

forma de bolhas dispersas, era de 16,0% na entrada do MOBO. Assim, podem-se ressaltar desses resultados os seguintes pontos:

a) A Figura 4.18 comprova a ocorrência de segregação de fases, apontada no item 4.3.1.

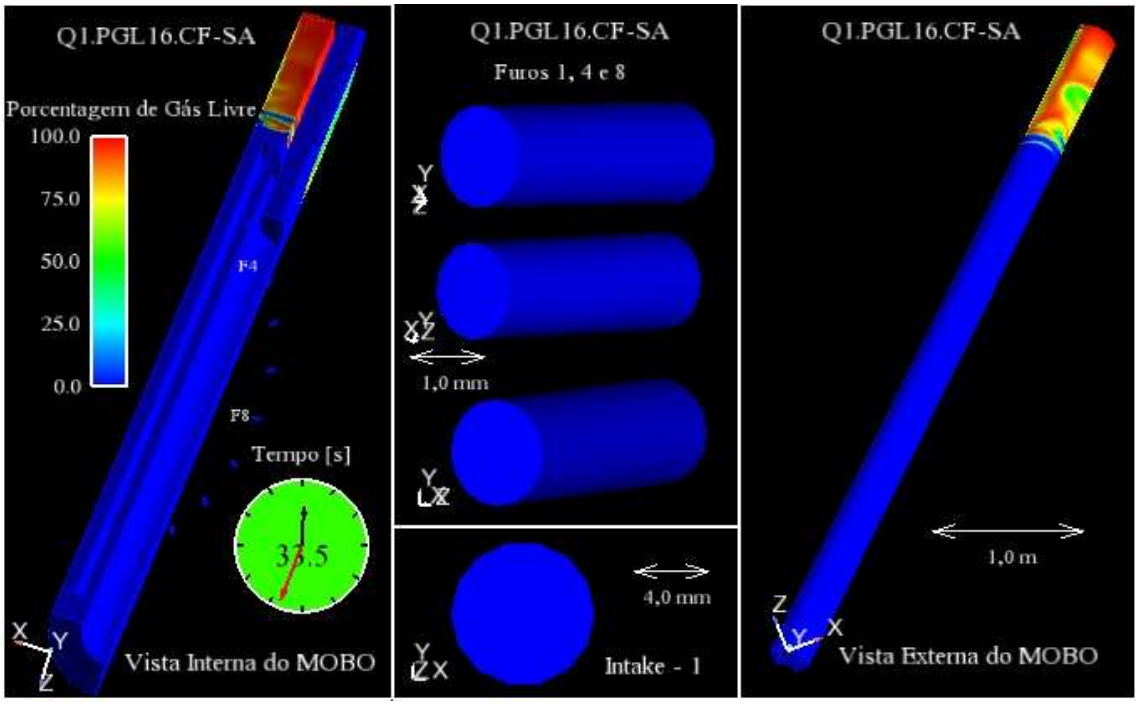


Figura 4.18 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q1.PGL16.CF-S.A)

b) Conforme a Figura 4.19, infere-se que:

- Diferentemente dos demais casos apresentados neste trabalho, os intakes apresentaram PGL média muito próxima uma da outra, no *Intake*-1 de 9,1% e no *Intake*-2 de 9,0% (após estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud*);

- Para as condições simuladas é obtida uma estabilização de 35,5% de porcentagem de gás livre dentro do MOBO.

- A média da pressão P_Entrada apontada pela simulação no período de estabilização foi de 33.000 Pa (0,3 kgf/cm^2), implicando num pequeno erro de predição (+3,0%) em relação ao medido experimentalmente (0,32 kgf/cm^2) .

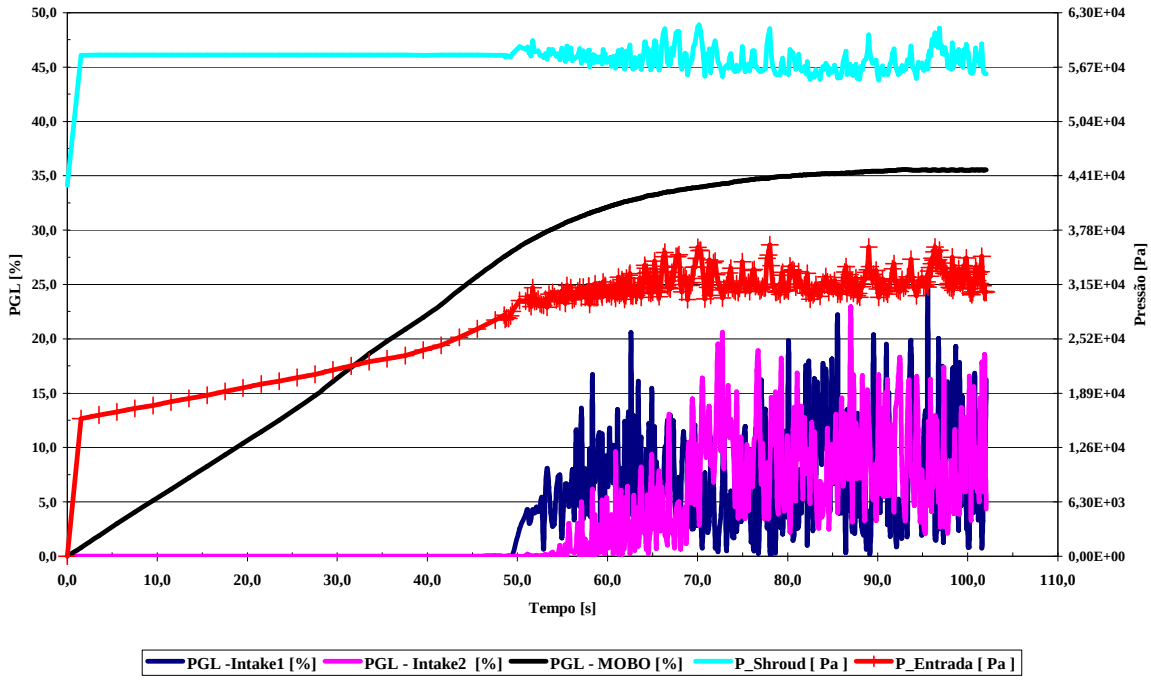


Figura 4.19 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q1.PGL16.CF-S.A)

c) Quando se faz uma análise conjunta da Figura 4.20 e Figura 4.21, que representam basicamente o monitoramento da PGL nos furos de 1 ao 10 do *shroud*, pode-se concluir que:

- Nos furos 1, 2, 3 e 4, ocorre predominantemente passagem de ar (Figura 4.20). No resultado experimental, o furo 1 ficou exposto ao ar e o furo 2 também, mas de forma intermitente.

- Observa-se na Figura 4.21 que o comportamento da PGL dos furos 6 ao 10 é completamente desprezível pois para nenhum desses furos apresentou valores de PGL acima de 0,5%;

- O comportamento do PGL nos furos 6 a 10 manifesta a qualidade da corrente bifásica que passa pelos furos, que por sua vez traduz também a qualidade da corrente bifásica que se encontra escoando no anular poço alojador / *shroud*. Ou seja, a corrente bifásica de fundo tem menos ar sendo arrastado que a corrente bifásica próxima à zona de interface líquido/gás;

- O nível dinâmico da corrente bifásica se estabelece entre os furos 4 e furo 5 (algo em torno de 1,9 m da entrada do modelo do MOBO). Este valor é 27% superior ao obtido experimentalmente (1,5 m).

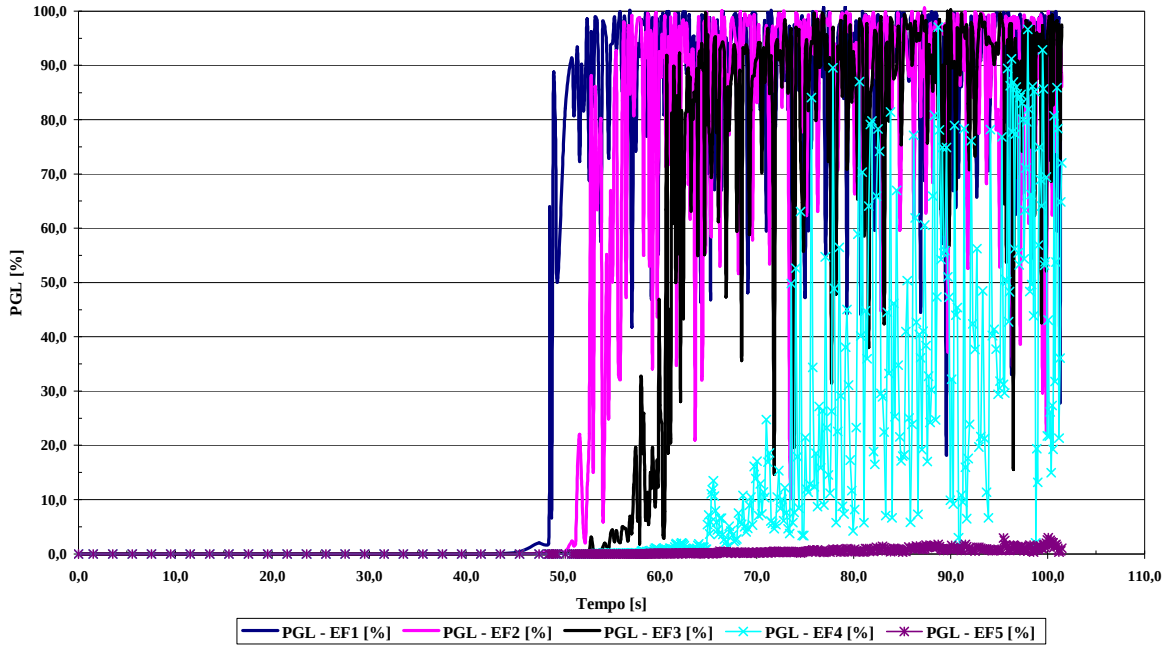


Figura 4.20 - Monitoramento da PGL nos Furos de 1 a 5 (Q1.PGL16.CF-S.A)

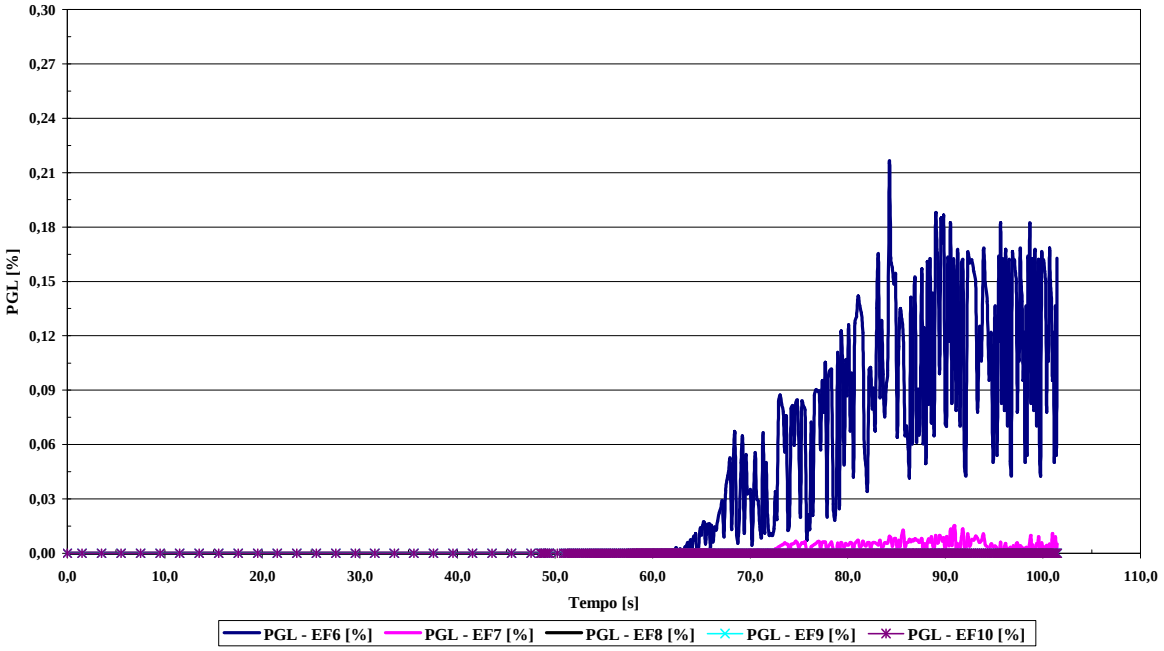


Figura 4.21 - Monitoramento da PGL nos Furos de 6 ao 10 (Q1.PGL16.CF-S.A)

c) Na Figura 4.22, que apresenta uma visualização da simulação Q1.PGL16.CF-S.A no período de estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud*, pode-se constatar que os furos 1 e 4 estão completamente tomados pelo ar enquanto que no furo 8 não há indícios de passagem de ar. Cabe ressaltar que, para as condições simuladas, Q1.PGL16.CF-S.A, o comportamento

dos *intakes* 1 e 2 não apresentou PGL acima que 26,0% (1 evento esporádico) e que a média da PGL no *Intake*-1 e *Intake*-2 foi de 9,1% e 9,0%, respectivamente (após estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud*);

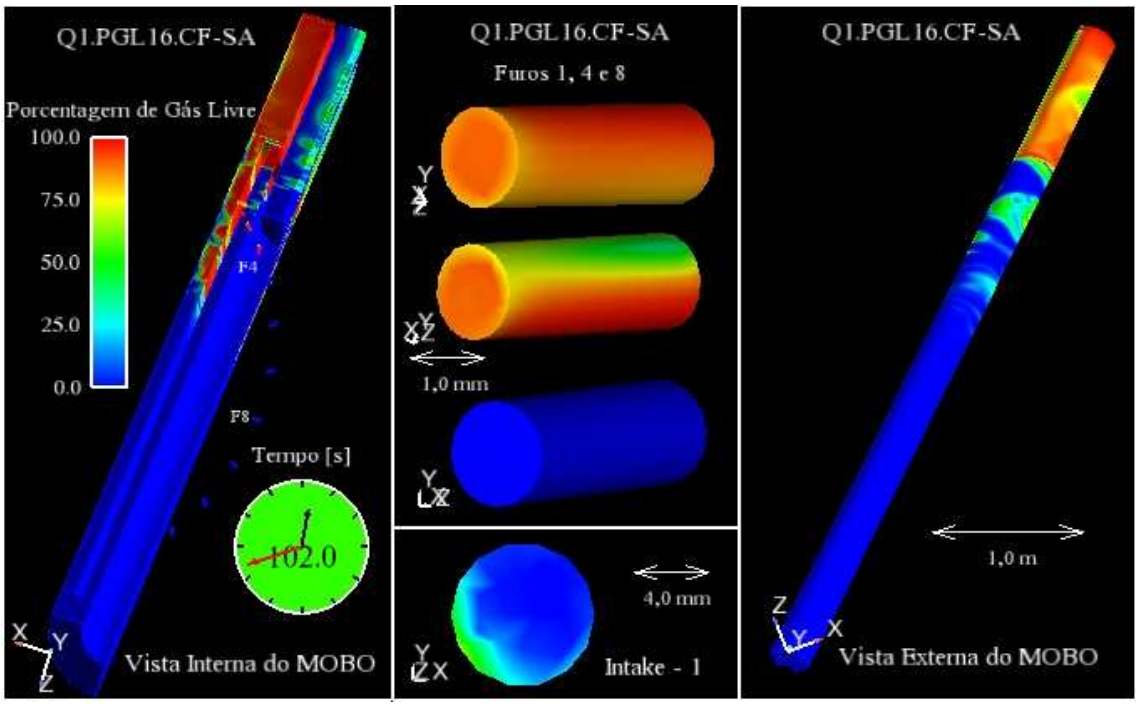


Figura 4.22 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud* (Q1.PGL16.CF-S.A)

4.3.4. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q2.PGL07.SCF-S.A

⇒ Observações Experimentais – Q2.PGL07.CF-S.A:

- Não foram observadas descargas do anular poço alojador / *shroud*;

- Não foi possível verificar uma situação em que o primeiro furo fosse descoberto pelo nível dinâmico, desta forma, em nenhum momento se notou uma corrente de gás estabilizadora passando por nenhum furo. Isto ocorre porque se estava trabalhando com uma vazão muito alta e baixa fração de gás, ou seja, a capacidade de arraste de gás pelo líquido seria suficiente para se garantir um perfil equilibrado de fração volumétrica de gás no equipamento. Entretanto apesar de não ocorrer a exposição dos furos ao ar, verificou-se que intermitentemente os furos ao longo do *shroud* permitem a passagem de gás durante o escoamento descendente da corrente de líquido que arrasta o gás.

⇒ Resultados da Modelagem Computacional – Q2.PGL07.CF-S.A:

Alguns resultados da simulação da mistura bifásica de água e ar, escoando numa geometria do MOBO com furos no *shroud*, são apresentados da Figura 4.23 a Figura 4.28. Neste caso (Q2.PGL07.CF-S.A), a vazão de líquido era de 13,5 litros/min e a porcentagem de gás livre, na forma de bolhas dispersas, era de 7,0% na entrada do MOBO. Assim, podem-se ressaltar desses resultados os seguintes pontos:

a) A Figura 4.23 comprova a ocorrência de segregação de fases, apontada no item 4.3.1.

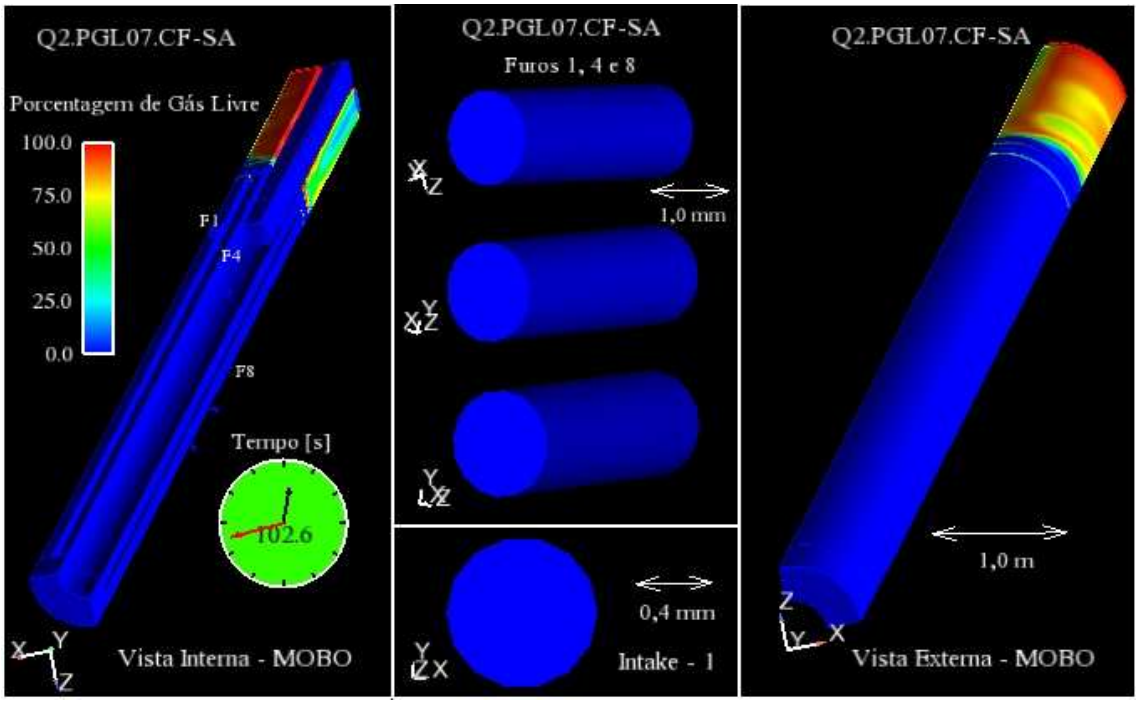


Figura 4.23 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q2.PGL07.CF-S.A)

b) Conforme a Figura 4.24, infere-se que:

- A corrente bifásica tem uma PGL média no *Intake*-1 de 6,3% e no *Intake*-2 de 1,1,0% (após estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud*). Nas análises realizadas, não se identificou uma possível causa para este fenômeno. Entretanto acredita-se que este comportamento possa está associado à própria dinâmica do escoamento na geometria modelada e as condições de contorno da simulação, pois comportamento com valores invertidos de PGL invertido foram encontrados em outras simulações;

- Para as condições simuladas é obtida uma estabilização de 32,5% de porcentagem de gás livre dentro do MOBO.

- A média da pressão na entrada do MOBO (P_Entrada) apontada pela simulação no período de estabilização foi de 30.000 Pa (0,30 kgf/cm^2), implicando num erro de predição de -36,0% em relação ao medido experimentalmente.

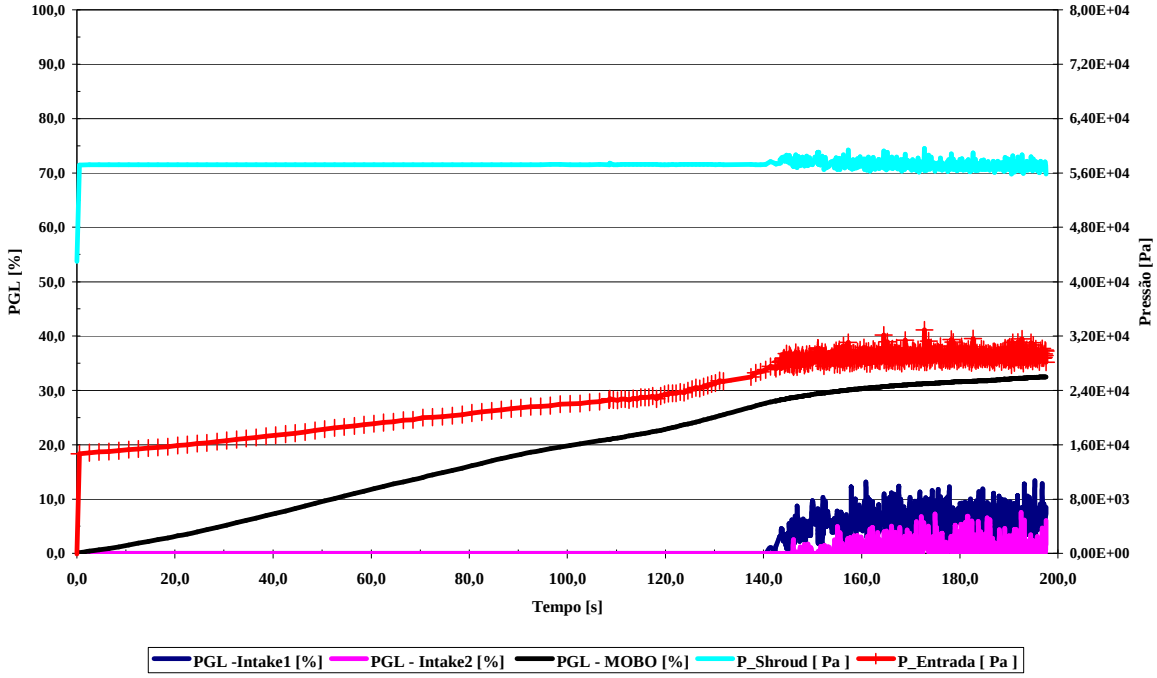


Figura 4.24 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q2.PGL07.CF-S.A)

c) Quando se faz uma análise conjunta da Figura 4.25 e Figura 4.26, que representam basicamente o monitoramento da PGL nos furos de 1 a 10 do *shroud*, pode-se concluir que:
- Nos furos 1 e 2 ocorre predominantemente a passagem de ar e o comportamento da PGL no furo 3 é mais atenuada, *vide* Figura 4.27;

- Observa-se na Figura 4.26 que o comportamento da PGL dos furos 6 a 10 é praticamente desprezível e para nenhum desses furos apresentou valores de PGL acima de 0,07%;

- O comportamento do PGL nos furos 6 a 10 manifesta a qualidade da corrente bifásica que passa pelo furo, que por sua vez traduz também a qualidade da corrente bifásica que se

encontra escoando no anular poço alojador / *shroud*. Ou seja, a corrente bifásica de fundo tem menos ar sendo arrastado que a corrente bifásica próxima à zona de interface líquido/gás.

- O nível dinâmico da corrente bifásica se estabelece entre os furos 2 e 3 (algo em torno de 1,5 metros da entrada do modelo do MOBO). Uma vez que para os demais furos abaixo a PGL monitorada não chega a 1,0%. Cabe ressaltar que o valor registrado experimentalmente do nível dinâmico foi de 1,5 metros, o que mostra que o valor obtido por simulação apresentou uma ótima concordância com o experimental.

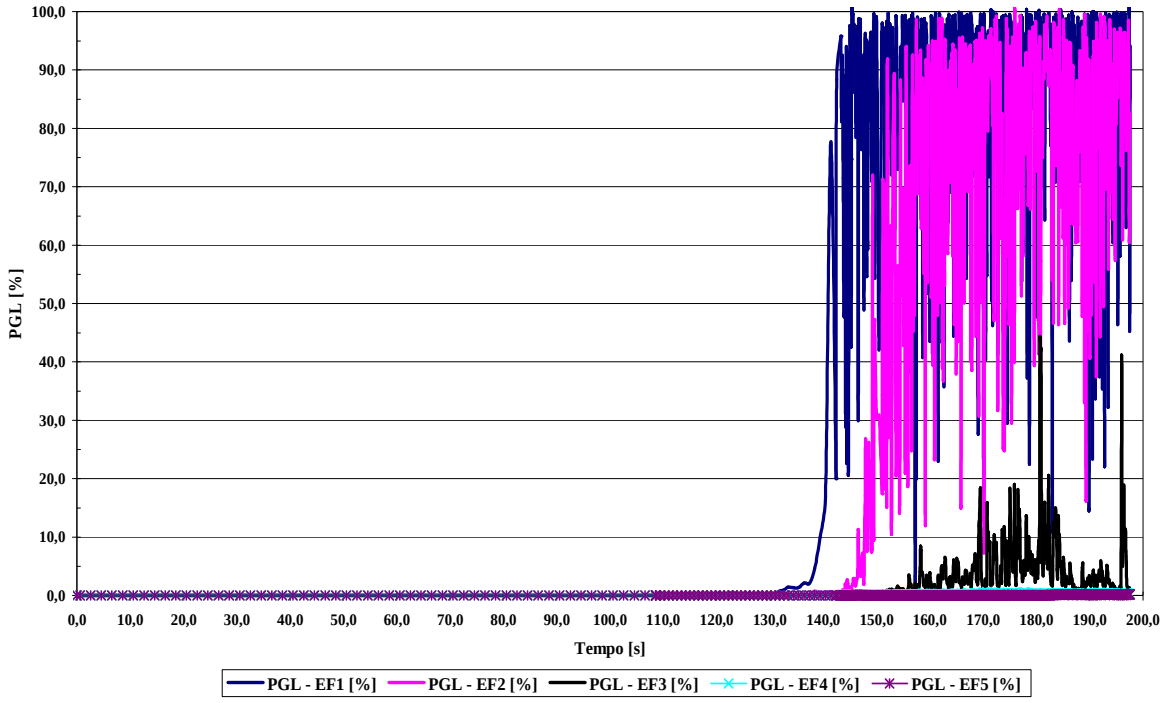


Figura 4.25 - Monitoramento da PGL nos Furos de 1 a 5 (Q2.PGL07.CF-S.A)

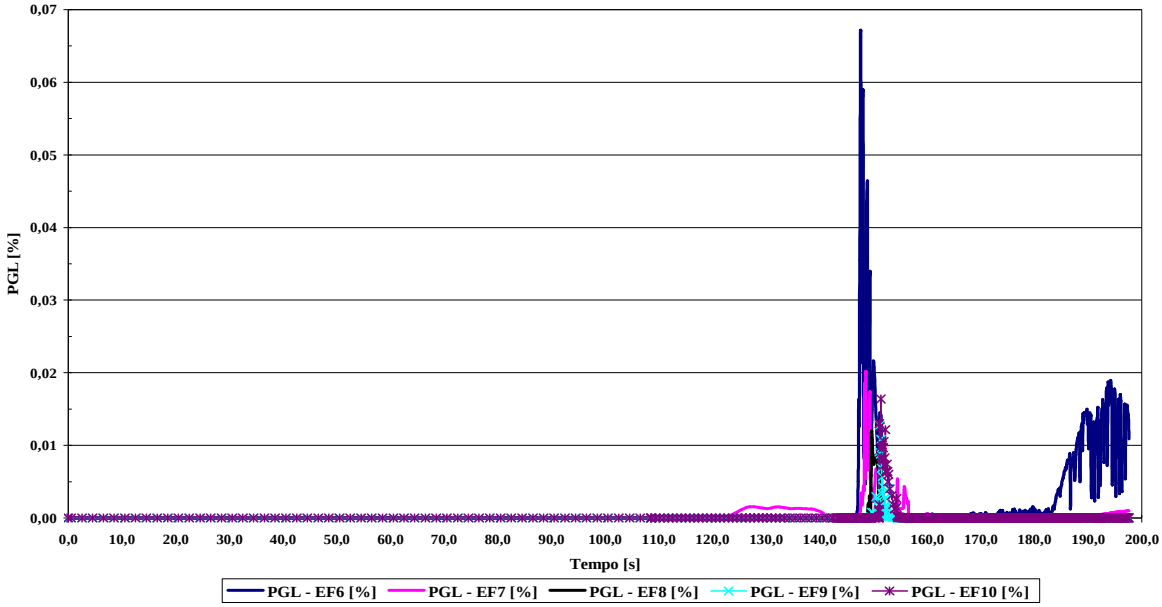


Figura 4.26 - Monitoramento da PGL nos Furos de 6 ao 10 (Q2.PGL07.CF-S.A)

c) Na Figura 4.27, que apresenta uma visualização da simulação Q2.PGL13.CF-S.A no período de estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud*, pode-se constatar que os furos 1 está completamente tomado pelo ar e que o furo 4 apresenta a passagem de um bolsão de ar. Cabe ressaltar que para as condições simuladas, Q2.PGL13.CF-S.A, o comportamento dos *intakes* 1 e 2 não apresentou PGL acima que 14,0%.

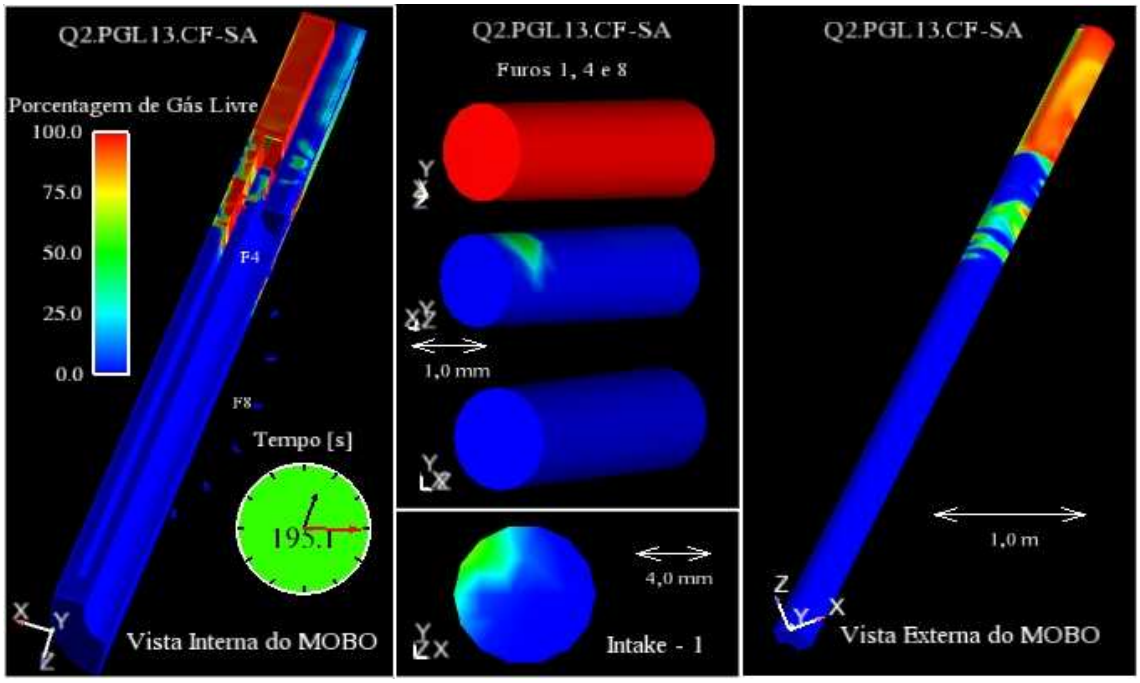


Figura 4.27 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud* (Q2.PGL07.CF-S.A)

4.3.5. Estudo Experimental contra Estudo Computacional - Q2.PGL13.CF-S.A

⇒ Observações Experimentais – Q2.PGL13.CF-S.A:

- Não foram observadas descargas do anular poço alojador / *shroud*;

- Nível dinâmico de líquido do anular poço alojador / *shroud* se estabeleceu a 1,3 metros da entrada do poço alojador. Primeiro furo intermitentemente exposto ao ar.

⇒ Resultados da Modelagem Computacional – Q2.PGL13.CF-S.A:

Alguns resultados da simulação da mistura bifásica de água e ar, escoando numa geometria do MOBO com furos no *shroud*, são apresentados da Figura 4.28 a Figura 4.33. Neste caso (Q2.PGL13.CF-S.A), a vazão de líquido era de 13,5 litros/min e a porcentagem de gás livre, na forma de bolhas dispersas, era de 13,0% na entrada do MOBO. Assim, podem-se ressaltar desses resultados os seguintes pontos:

a) A Figura 4.28 comprova a ocorrência de segregação de fases, apontada no item 4.3.1.

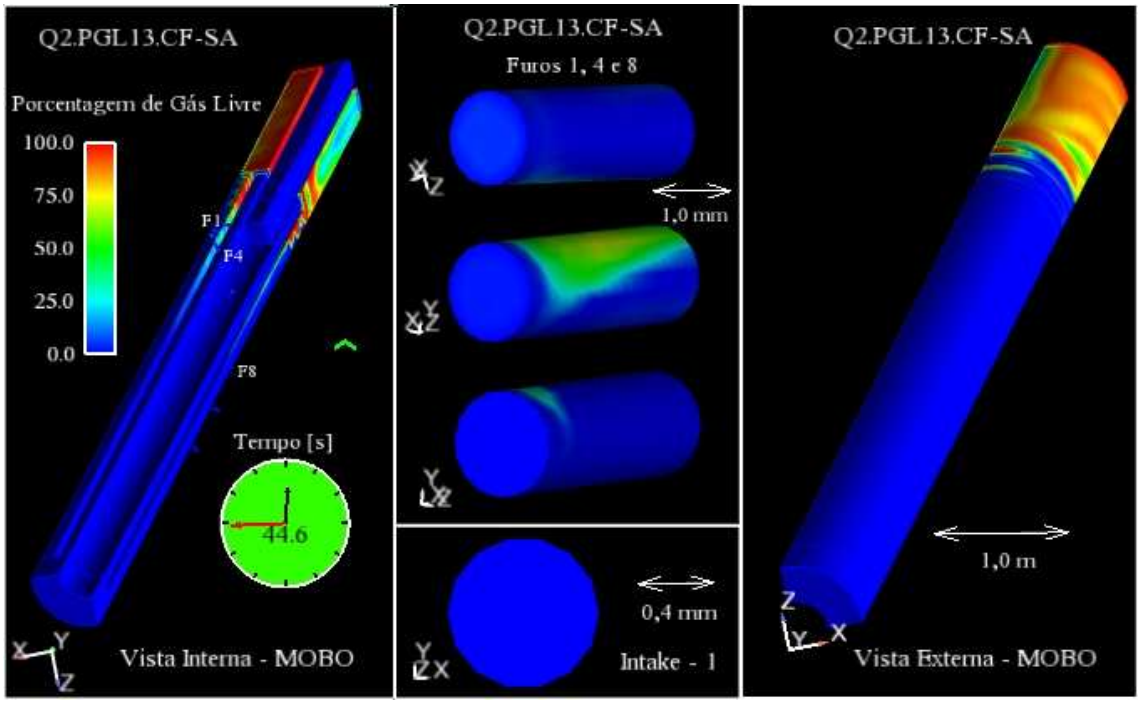


Figura 4.28 - Visualização da segregação das fases no MOBO (Q2.PGL13.CF-S.A)

b) Conforme a Figura 4.29, infere-se que:

- A corrente bifásica tem uma PGL média no *Intake*-1 de 3,4% e no *Intake*-2 de 11,0% (após estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud*). Nas análises realizadas, não se identificou uma possível causa para este fenômeno. Entretanto acredita-se que este comportamento possa está associado à própria dinâmica do escoamento na geometria modelada e as condições de contorno da simulação, pois comportamento com valores invertidos de PGL invertido foram encontrados em outras simulações;

- Para as condições simuladas é obtida uma estabilização de 32,0% de porcentagem de gás livre dentro do MOBO.

- A média da pressão P_Entrada apontada pela simulação no período de estabilização foi de 37.000 Pa (0,37 kgf/cm^2), implicando num erro de predição de -21,0% em relação ao medido experimentalmente.

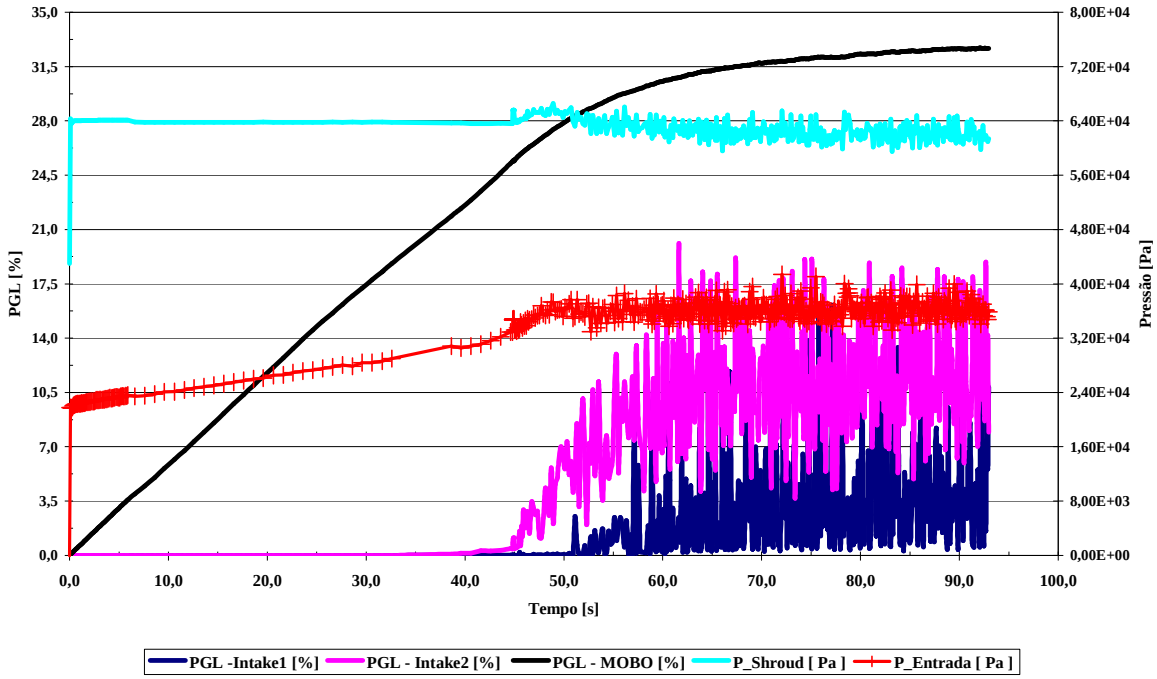


Figura 4.29 - Monitoramento da PGL e Pressão no MOBO (Q2.PGL13.CF-S.A)

c) Quando se faz uma análise conjunta da Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32, que representam basicamente o monitoramento da PGL nos furos de 1 ao 15 do *shroud*, pode-se concluir que:

- Nos furos 1, 2, 3 e 4, ocorre predominantemente a passagem de ar e o comportamento da PGL no furo 5 é mais atenuada, *vide* Figura 4.30;

- Observa-se na Figura 4.31 que o comportamento da PGL dos furos 6 ao 10 é mais uniforme e para nenhum desses furos apresentou valores de PGL acima de 17,0%;

- Conforme a Figura 4.32, constata-se também um comportamento uniforme da PGL dos furos 11 ao 15, entretanto destaca-se o comportamento anômalo da PGL dos furos 14 e 15 que apresentam valores atipicamente mais elevado em relação ao conjunto desses últimos 5 furos. No entanto, nenhum dos furos do 11 ao 15 apresentou valores de PGL acima de 9,0%;

- O comportamento do PGL no furo 15 manifesta a qualidade da corrente bifásica que passa pelo furo, que por sua vez traduz também a qualidade da corrente bifásica que se encontra escoando no anular poço alojador / *shroud*. Ou seja, a corrente bifásica de fundo tem menos ar sendo arrastado que a corrente bifásica próxima à zona de interface líquido/gás.

- O nível dinâmico da corrente bifásica se estabelece entre os furos 4 e furo 5 (algo em torno de 1,9 metros da entrada do modelo do MOBO), uma vez que para os demais furos abaixo a PGL monitorada não chega a 17,0%. Este valor é 46% superior ao obtido experimentalmente (1,3 m)

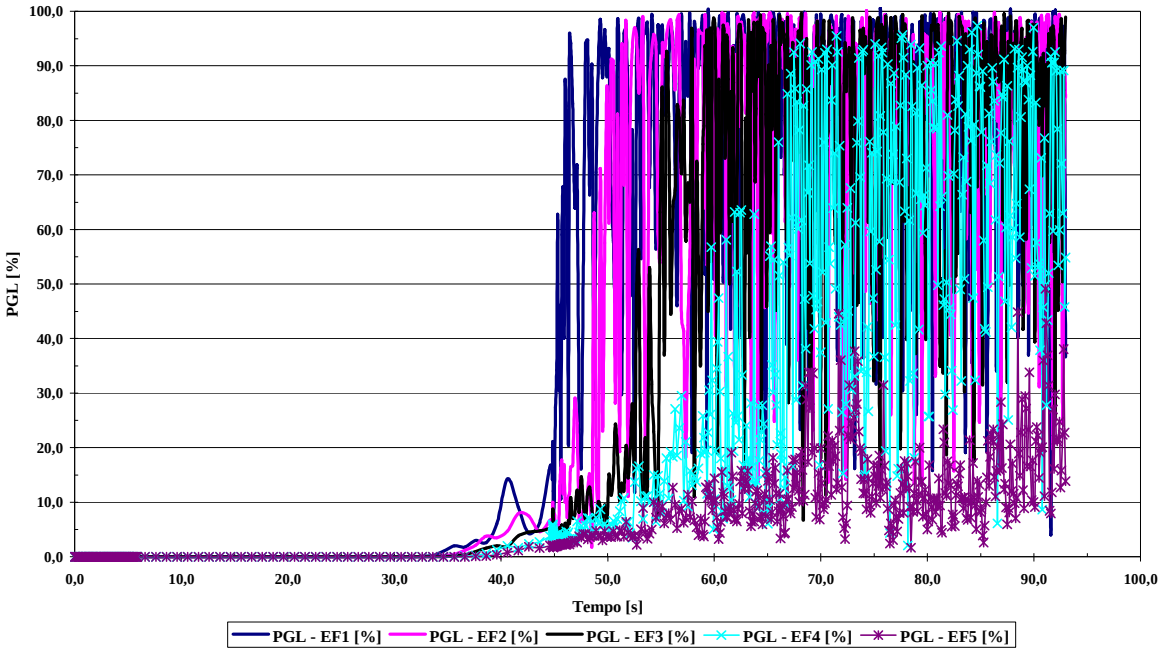


Figura 4.30 - Monitoramento da PGL nos Furos de 1 a 5 (Q2.PGL13.CF-S.A)

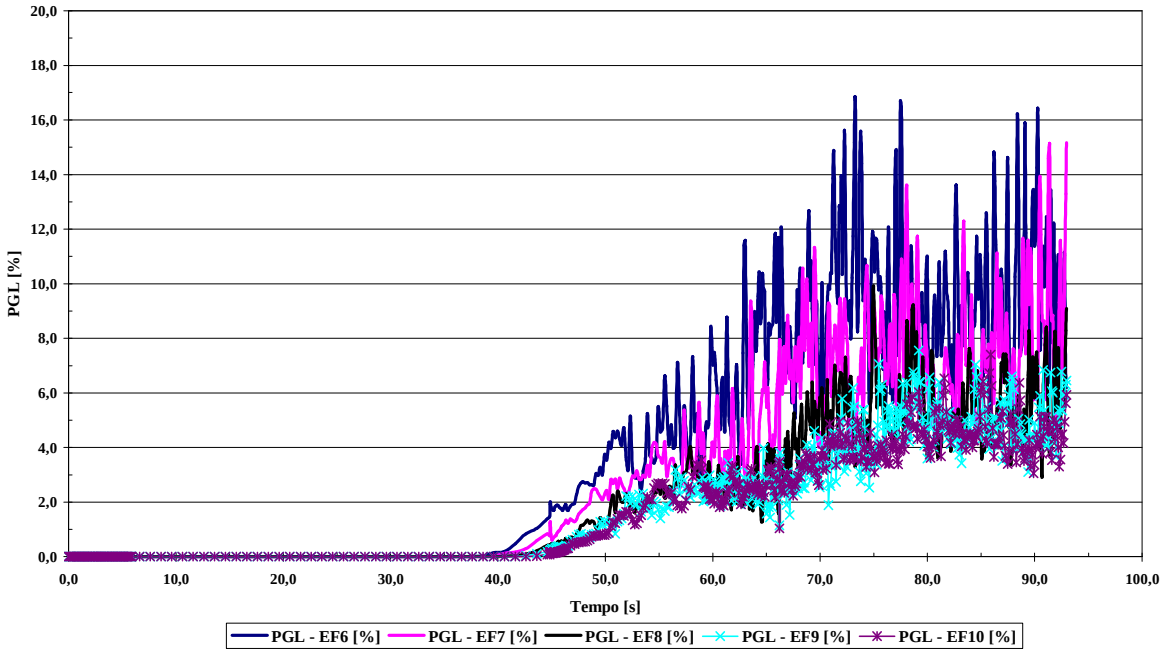


Figura 4.31 - Monitoramento da PGL nos Furos de 6 ao 10 (Q2.PGL13.CF-S.A)

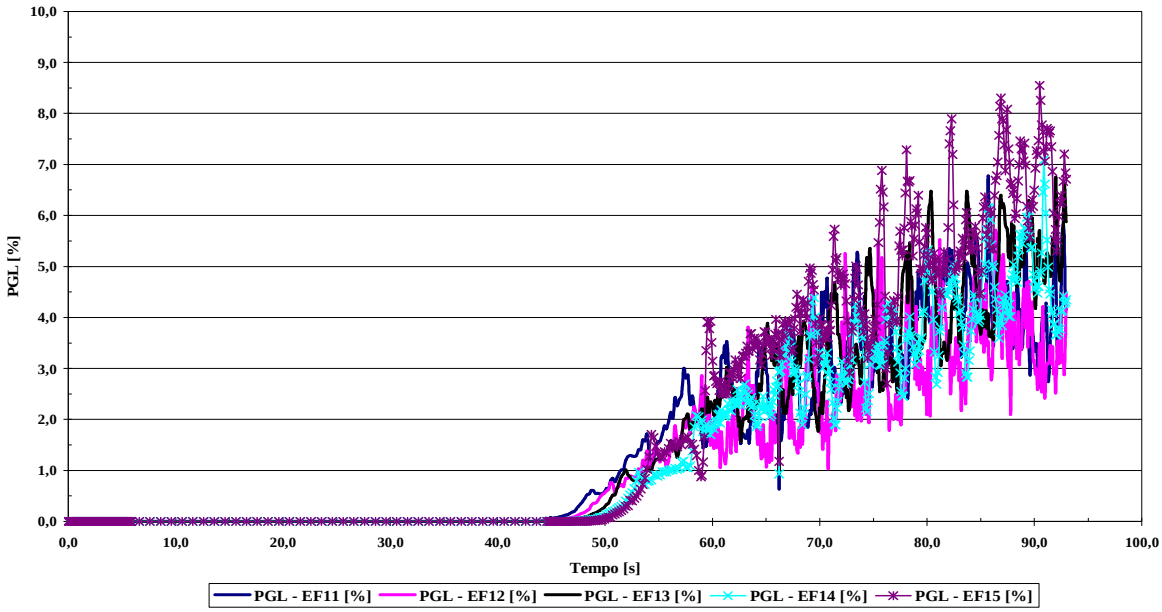


Figura 4.32 - Monitoramento da PGL nos Furos de 11 ao 15 (Q2.PGL13.CF-S.A)

c) Na Figura 4.33, que apresenta uma visualização da simulação Q2.PGL13.CF-S.A no período de estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud*, pode-se constatar que os furos 1 e 4 estão completamente tomados pelo ar e que o furo 8 apresenta a passagem de um bolsão de ar. Cabe ressaltar que para as condições simuladas, Q2.PGL13.CF-S.A, o comportamento dos *intakes* 1 e 2 não apresentou PGL acima que 20,0%.

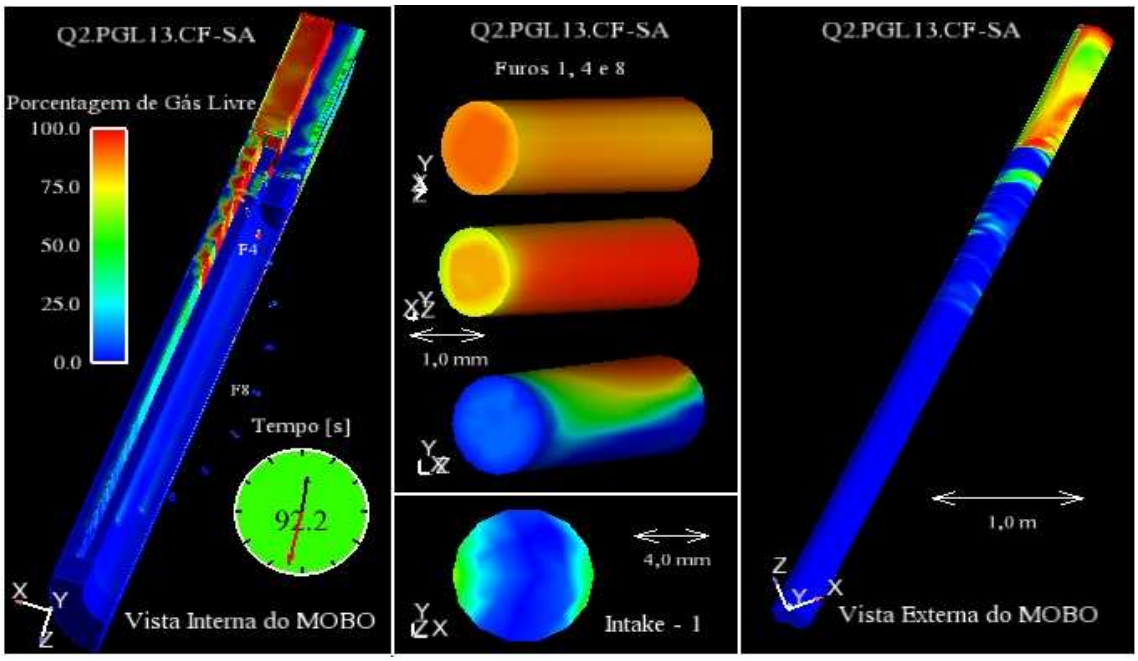


Figura 4.33 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões P_Entrada e P_*shroud* (Q2.PGL13.CF-S.A)

Analogamente às simulações com a *shroud* sem furos, com os resultados das simulações obtidos pode-se concluir que o modelo computacional implementado no CFX representou de forma satisfatória os experimentos realizados por Gaspari *et al* (2007).

O comportamento da dinâmica de escoamento no aparato experimental MOBO para cada caso estudado foi identificado de forma bastante satisfatória no modelo computacional. Entretanto para a predição da pressão de entrada do MOBO (P_Entrada), o modelo computacional não demonstrou uma boa acurácia para os casos Q2.PGL07.CF-S.A (erro de -36,0%) e Q2.PGL13.CF-S.A (erro de -21,0%). Contudo para os casos Q1.PGL08.CF-S.A e Q1.PGL16.CF-S.A, os erros foram -6,0% e +3,0%, respectivamente.

Mas cabe também ressaltar que as medições experimentais das pressões foram obtidas através de leituras de manômetros, devidamente calibrados e adequados para a faixa de medição, porém a leitura era visual e pontual, não sendo registradas as oscilações reinantes do processo dinâmico.

Outro ponto a se destacar é que experimentalmente não se mediu a pressão de saída do aparato MOBO. Adotou-se para as simulações uma pressão manométrica constante de 9.800 Pa (0,1 kgf/cm^2) na saída do modelo computacional de forma a garantir a existência de uma contra pressão no sistema.

4.4. Simulação com Óleo e Gás no Modelo MOBO – *shroud* com e sem furos

Visando estabelecer uma análise exploratória da dinâmica do escoamento de uma corrente bifásica de um fluido tipicamente viscoso com presença de gás livre na entrada, elaborou-se 2 conjuntos de simulação que adotava como dados de entrada expectativas de condições operacionais e propriedades dos fluidos oriundas do Campo de Jubarte (Bacia de Campos), expressas na Tabela 3.20.

Para a elaboração dos 2 conjuntos de simulação aplicou-se as expressões de similaridades (*vide* APÊNDICE A) desenvolvidas por Gaspari *et al* (2007) nas informações presentes da Tabela 3.20 e adotou-se como premissa que a vazão total obtida pela aplicação daquelas equações seria uma vazão total constante na entrada do modelo computacional do MOBO,

submetida a uma presença de 10% e 40 % de gás livre na forma de bolhas dispersas com diâmetro de 0,5 cm.

Seguem, na Tabela 4.5, as predefinições básicas para os 2 conjuntos de simulação com óleo e gás escoando no modelo computacional MOBO com furos e sem furos no *shroud*.

Tabela 4.5 - Predefinições da Modelagem Óleo e Gás no MOBO com e sem furos no Shroud

Definições da Modelagem	**Descrição**	
Dimensão Espacial	Tridimensional	
Coordenadas	Cartesianas	
Tipo de Escoamento	Bifásico	
Dependência com a Temperatura	Isotérmico (65 ^{o}C)	
Empuxo	Vetor Gravidade (0;-9,8;0) [m/s^2]	
Parâmetro Multifásico: Descrição das Fases	Fase Contínua	Fase Dispersa
	Óleo	Gás Natural (bolhas dispersas) com diâmetro de 0,5 cm.
Dependência em Relação ao Tempo	Simulação Transiente	
Condição de Contorno Básica	Preenchido com Óleo	
Propriedades Físicas Constantes (57,0 bar e 65 ^{o}C)	Massa Específica	Óleo: 1008,0
	Viscosidade Dinâmica (Pa.s)	Óleo: 1,146e-01 Gás Natural: 1,5e-05
Modelo de Turbulência	k - ε	
Predição do Coeficiente de Arraste	Correlação de Ishii-Zuber	

a) Simulação de Óleo e Gás com 10% de PGL na entrada do modelo computacional MOBO contendo a presença do *shroud* com e sem furos (Item 4.4.1.). Codificação:

OG.PGL10.SF – Simulação com óleo contendo 10% de PGL numa geometria do MOBO sem furos no *shroud*.

OG.PGL10.CF – Simulação com óleo contendo 10% de PGL numa geometria do MOBO com furos no *shroud*.

b) Simulação de Óleo e Gás com 40% de PGL na entrada do modelo computacional MOBO contendo a presença do *shroud* com e sem furos (Item 4.4.2). Codificação:

OG.PGL40.SF – Simulação com óleo contendo 40% de PGL numa geometria do MOBO sem furos no *shroud*.

OG.PGL40.CF – Simulação com óleo contendo 40% de PGL numa geometria do MOBO com furos no *shroud*.

4.4.1. Simulação com Óleo e Gás – 10% de PGL – Com e Sem Furos no *shroud*

Na Tabela 4.6 são apresentadas as condições de contorno aplicadas para as simulações de óleo e gás natural escoando no modelo computacional MOBO sujeito a uma condição de PGL de 10,0% e com uma geometria do *shroud* sem e com furos, correspondentes às simulações OG.PGL10.SF e OG.PGL10.CF, respectivamente. As predefinições do modelo computacional MOBO para estas duas simulações foram apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.6 - Condições de Contorno no MOBO - Óleo e Gás Natural, PGL 10,0%

Simulação	PGL (%)	$V_{média}$ na entrada do poço alojador (m/s)	Pressão na saída do poço alojador (kgf/cm^2)
OG.PGL10.SF	10,0	4,84	57,0
OG.PGL10.CF	10,0	4,84	57,0

⇒ Resultados das Simulações OG.PGL10.SF e OG.PGL10.CF

Nas simulações OG.PGL10.SF e OG.PGL10.CF a corrente bifásica de óleo e gás natural entra no modelo MOBO, para cada simulação, com uma vazão total de 22,8 L/min contendo um PGL de 10% dispersos em forma de bolhas com 0,5 cm de diâmetro cada. A diferença básica de cada simulação é a presença do *shroud* sem furo (OG.PGL10.SF) e com furos (OG.PGL10.CF).

Conforme pode-se observar na Figura 4.34 e Figura 4.35, diferentemente da dinâmica de segregação das fases de líquido/gás presentes nos resultados experimentais com água e ar, e, igualmente obtidos nas simulações realizadas dos casos estudados, não se constata nos resultados das simulações OG.PGL10.SF e OG.PGL10.CF a segregação da corrente bifásica

(óleo e gás natural) ao escoar na geometria do modelo computacional MOBO sem e com furos no *shroud*.

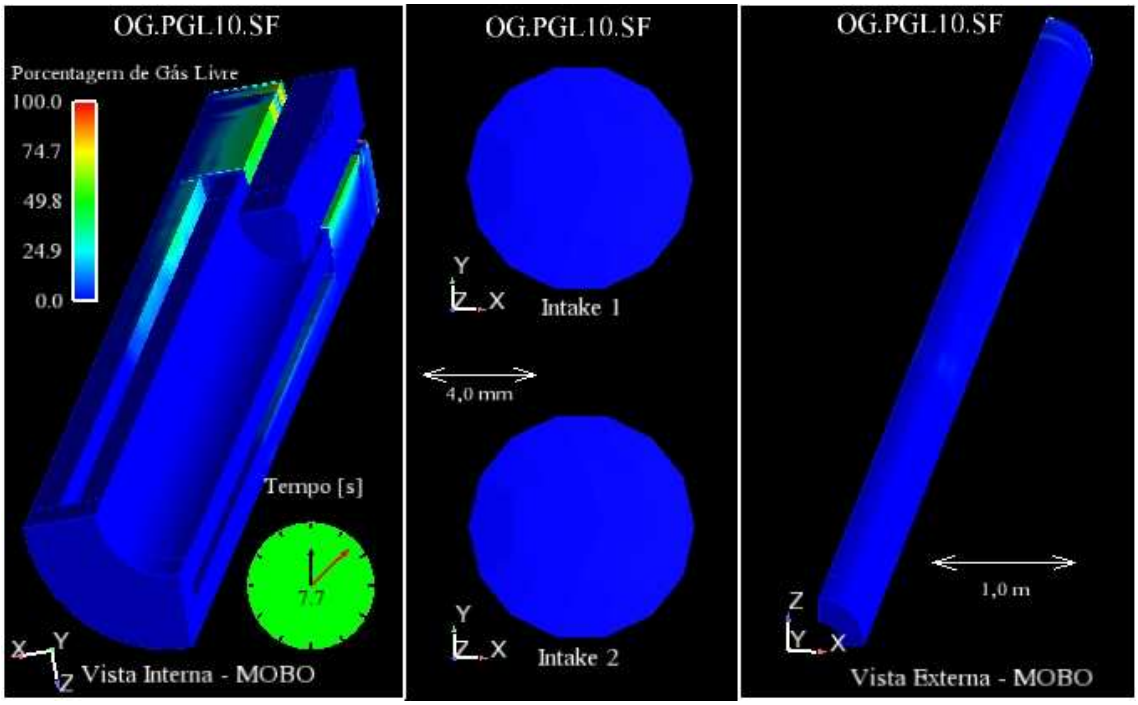


Figura 4.34 - Escoamento no MOBO com Óleo e Gás Natural - OG.PGL10.SF – *shroud* sem furos

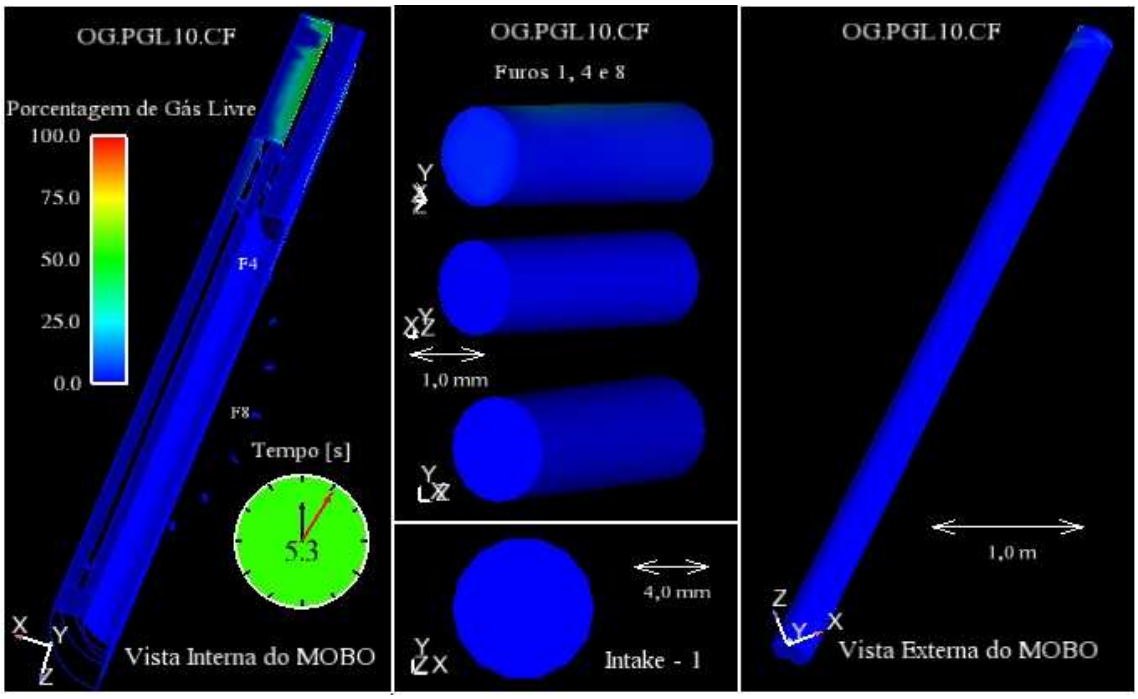


Figura 4.35 - Escoamento no MOBO com Óleo e Gás Natural - OG.PGL10.CF – *shroud* com furos

Podem ser apontados os seguintes fatores para a ausência da segregação das fases para os casos OG.PGL10.SF e OG.PGL10.CF:

a) A vazão aplicada como condição de contorno (22,4 L/min, 60% acima da maior vazão imposta na etapa de validação do modelo MOBO) determina um perfil de velocidade da fase líquida dentro do modelo MOBO que possibilita o arraste das bolhas de gás natural, desfavorecendo a coalescência e, por conseguinte, a segregação das fases óleo e gás;

b) A alta viscosidade da fase líquida associada às interações interfaciais do óleo e gás gera uma estabilização e dificulta a mobilidade das bolhas, implicando na redução de possíveis quebra e/ou coalescência das mesmas por choques;

Quando se analisa em conjunto o perfil de pressão e PGL das duas simulações (OG.PGL10.SF e OG.PGL10.CF), *vide* Figura 4.36 e Figura 4.37, observa-se que:

a) A pressão de entrada do MOBO (P_Entrada) e a pressão do *shroud* (P_*shroud*) apresentam um perfil bastante similar;

b) O perfil da curva PGL – MOBO para as 2 simulações também se apresenta bastante similar e assume praticamente um valor final em torno de 12,3 %, após a estabilização;

c) Das curvas monitoradas, o perfil de PGL do *Intake* 1 (PGL – *Intake* 1) é o que apresenta o maior desvio de comportamento. Para a simulação sem furos no *shroud* (OG.PGL10.SF) a média do PGL no *Intake* 1 é praticamente a média do PGL – MOBO, enquanto que o PGL no *Intake* 2 assume valores muito próximos aos encontrados na simulação com furos no *shroud* (OG.PGL10.CF);

d) Uma das possíveis conclusões que pode ser apontada quando se compara os perfis de PGL nos *Intakes* 1 e 2 para as simulações OG.PGL10.SF e OG.PGL10.CF é que a presença dos furos no *shroud* determina uma morfologia mais homogênea da corrente bifásica que chega à região que simula a sucção do BCSS.

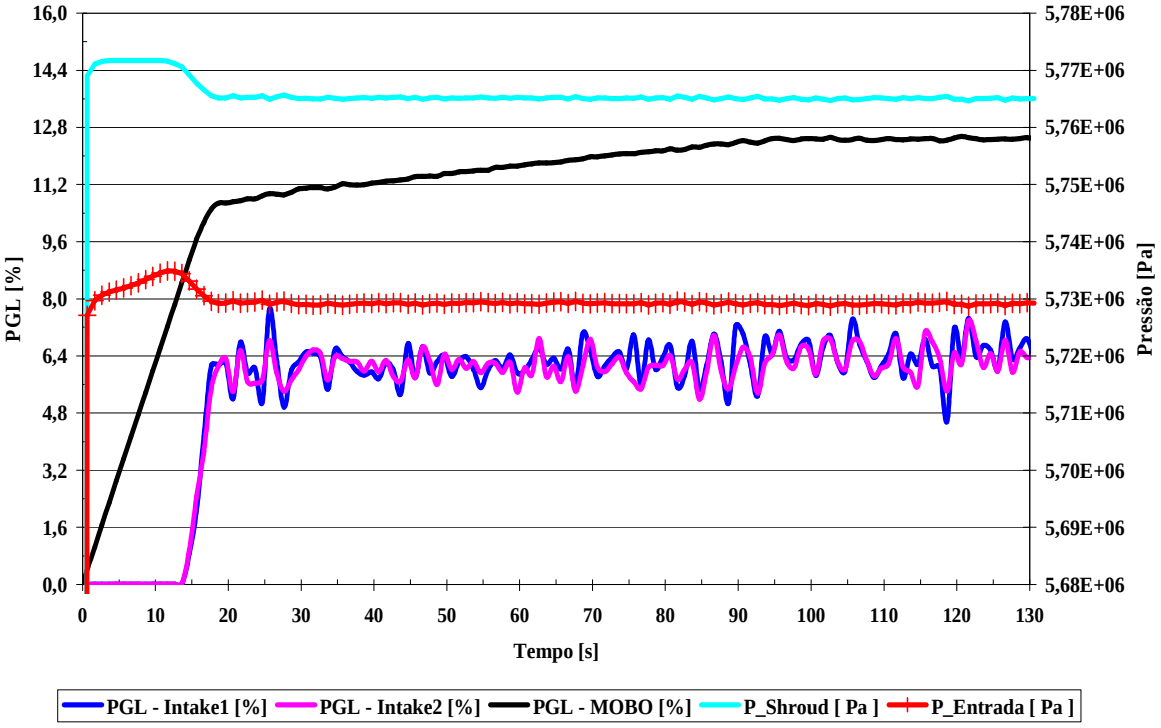


Figura 4.36 - Monitoramento da Pressão e PGL no MOBO - OG.PGL10.SF

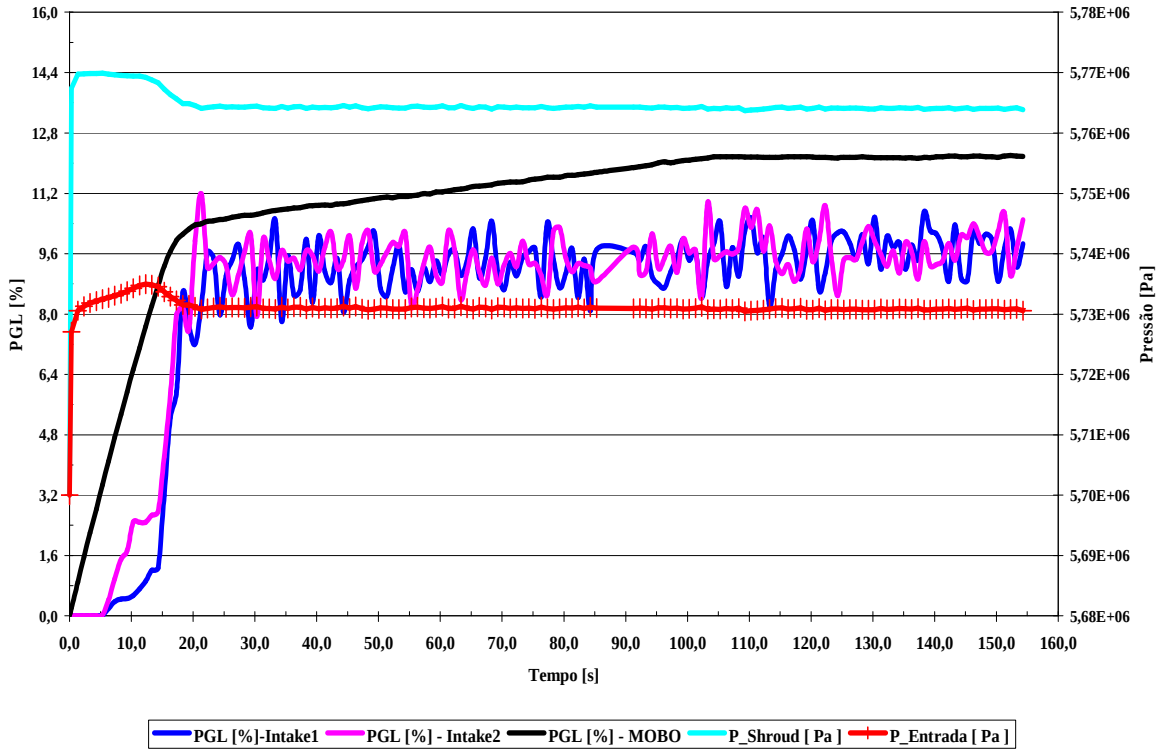


Figura 4.37 - Monitoramento da Pressão e PGL no MOBO - OG.PGL10.CF

Outros aspectos que podem ser inferidos quando se analisa a Figura 4.38 e a Figura 4.39, são:

a) Constata-se a existência de uma região um pouco acima dos *Intakes* com presença predominantemente de gás. Tal ocorrência foi também encontrada no trabalho experimental e nas simulações de validação do modelo computacional realizadas com água e ar.

b) Observa-se na Figura 4.39 que praticamente a qualidade e morfologia dos fluidos que atravessam os furos 1, 4 e 8 são bastante semelhantes. Corroborando a proposição de que, para as condições de contorno aplicadas na simulação e o aspecto da viscosidade do óleo, não se estabelece uma segregação de fases no anular poço alojador / *shroud*.

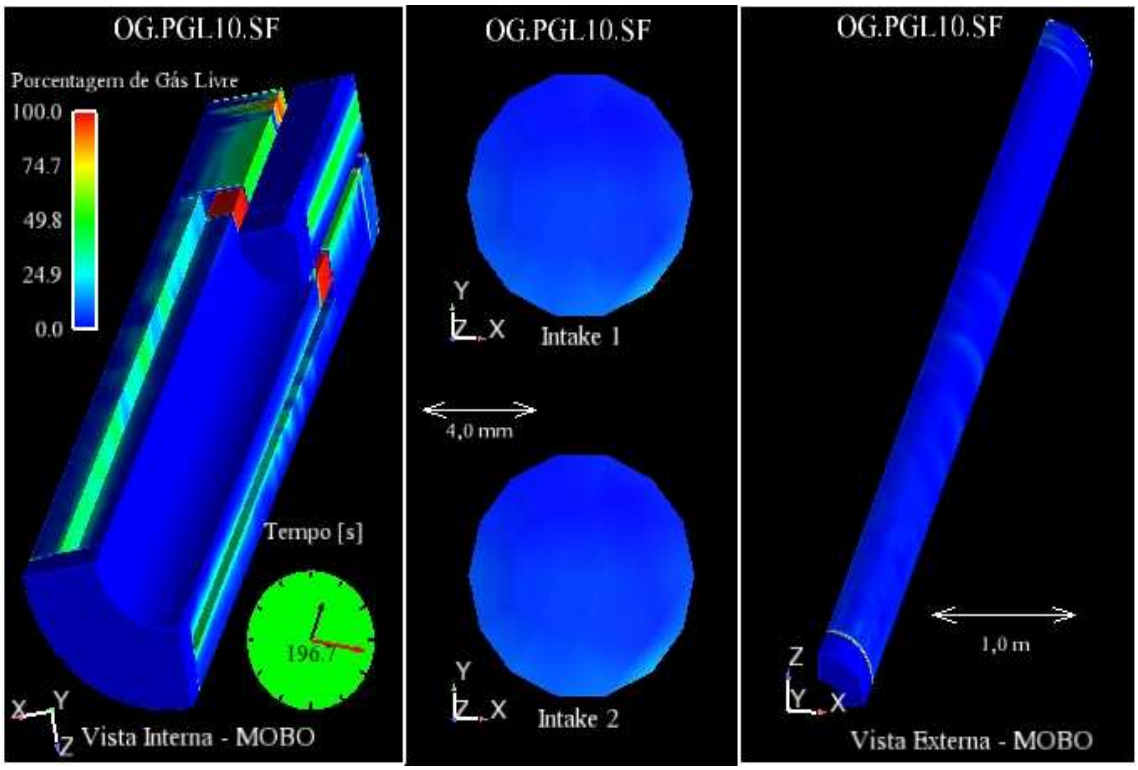


Figura 4.38 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões P_Entrada e P_Shroud (OG.PGL10.SF)

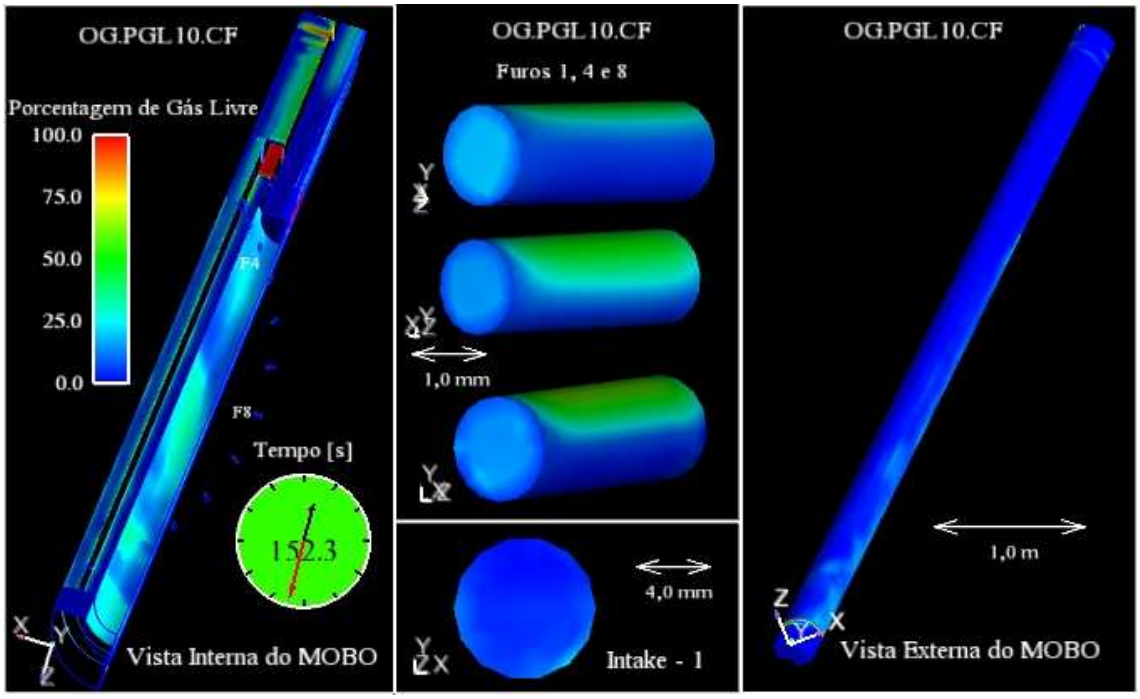


Figura 4.39 - Visualização do MOBO no período de estabilização das pressões P_Entrada e P_Shroud (OG.PGL10.CF)

4.4.2. Simulação com Óleo e Gás – 40% de PGL – Com e Sem Furos no *shroud*

⇒ Resultados das Simulações OG.PGL40.SF e OG.PGL40.CF

Nas simulações OG.PGL40.SF e OG.PGL40.CF (*vide* Tabela 4.7) a corrente bifásica de óleo e gás natural entra no modelo MOBO, para cada simulação, com uma vazão total de 22,8 L/min contendo um PGL de 40% dispersos em forma de bolhas com 0,5 cm de diâmetro cada. A diferença básica de cada simulação é a presença do *shroud* sem furo (OG.PGL40.SF) e com furos (OG.PGL40.CF).

Tabela 4.7 - Condições de Contorno no MOBO - Óleo e Gás Natural, PGL 40,0%

Simulação	PGL (%)	$V_{média}$ na entrada do poço alojador (m/s)	Pressão na saída do poço alojador (kgf/cm^2)
OG.PGL40.SF	40,0	4,84	57,0
OG.PGL40.CF	40,0	4,84	57,0

Conforme pode-se observar na Figura 4.40 e Figura 4.41, diferentemente da dinâmica de segregação das fases líquido/gás presentes nos resultados experimentais com água e ar, e, igualmente obtidos nas simulações realizadas dos casos estudados, não se constata também nos resultados das OG.PGL40.SF e OG.PGL40.CF a segregação da corrente bifásica (óleo e gás natural) ao escoar na geometria sem e com furos no *shroud*.

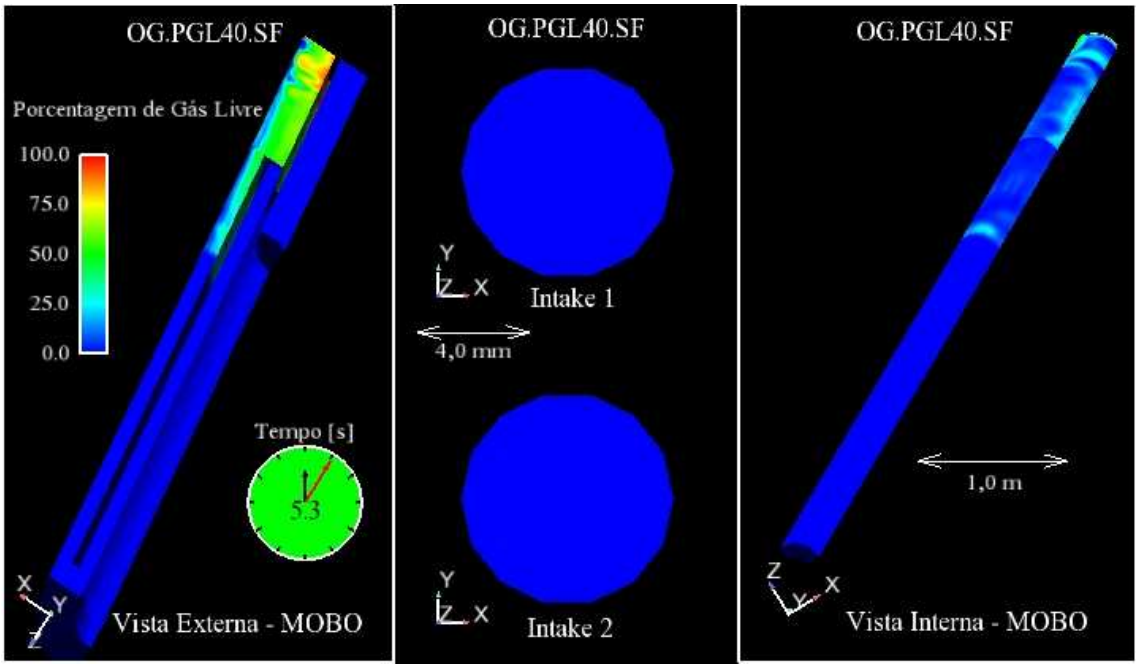


Figura 4.40 - Escoamento no MOBO com Óleo e Gás Natural - OG.PGL40.SF – *shroud* sem furos

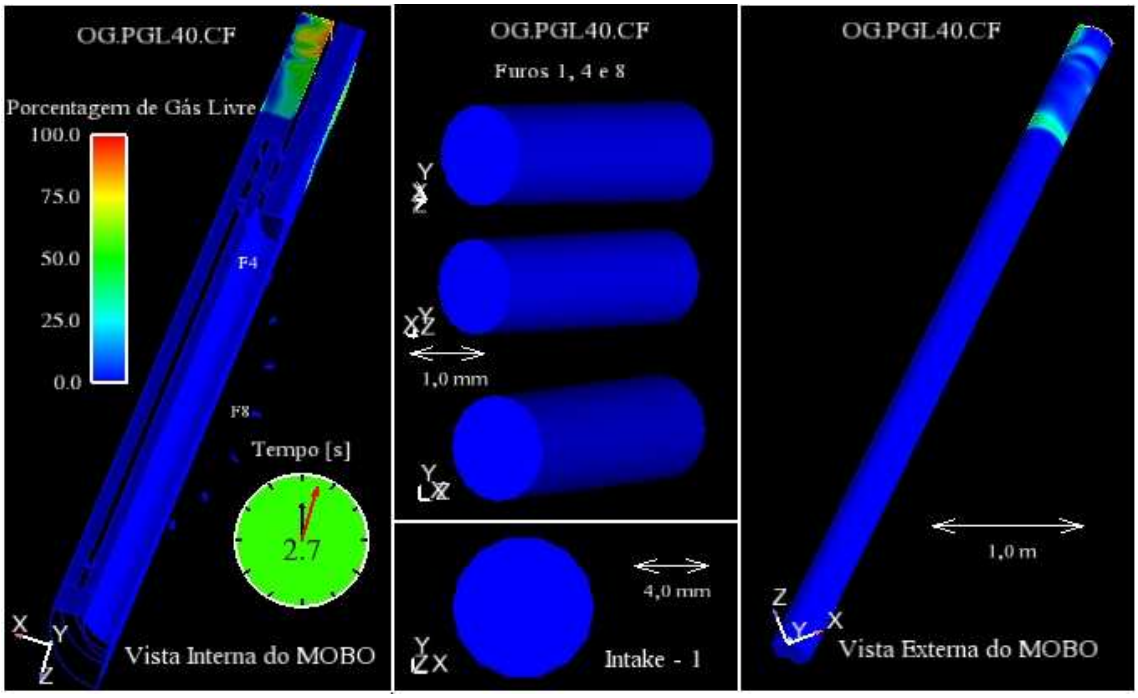


Figura 4.41 - Escoamento no MOBO com Óleo e Gás Natural - OG.PGL40.CF – *shroud* com furos

Como igualmente para os casos OG.PGL10.SF e OG.PGL10.CF, podem ser apontados os seguintes fatores para a ausência da segregação das fases para os casos OG.PGL40.SF e OG.PGL40.CF:

a) A vazão aplicada como condição de contorno (22,4 L/min, 60% acima da maior vazão imposta na etapa de validação do modelo MOBO) determina um perfil de velocidade da fase líquida dentro do modelo MOBO que possibilita, predominantemente, o arraste das bolhas de gás natural desfavorecendo a coalescência e diminuindo o tempo de residência e, por conseguinte a segregação das fases, óleo e gás;

b) A viscosidade da fase líquida associada às interações interfaciais do óleo e gás gera uma estabilização e dificulta a mobilidade das bolhas, implicando na redução de possíveis quebra e/ou coalescência das mesmas por choques;

Quando se analisa em conjunto o perfil de pressão e PGL das duas simulações (OG.PGL40.SF e OG.PGL40.CF), *vide* Figura 4.42 e Figura 4.43, observa-se que:

a) A pressão de entrada do MOBO (P_Entrada) e a pressão do *shroud* (P_*shroud*) apresentam um perfil de valores bastante similares para ambas as simulações em pauta;

b) O perfil da curva PGL – MOBO para as 2 simulações também se apresenta bastante similar e assume praticamente um valor final igual, em torno de 40,0 %, após a estabilização;

c) Das curvas monitoras e comparadas para as duas simulações em pauta aqui, o perfil de PGL do *Intake* 1 (PGL – *Intake* 1) é o que apresenta o maior desvio de comportamento. Para a simulação sem furos no *shroud* (OG.PGL40.SF) a média do PGL no *Intake* 1 fica mais próxima da média do PGL – MOBO, enquanto que o PGL no *Intake* 2 assume valores muito próximos aos encontrados na simulação com furos no *shroud* (OG.PGL40.CF);

d) Uma das possíveis conclusões que pode ser apontada quando se compara os perfis de PGL nos *Intakes* 1 e 2 para as simulações OG.PGL40.SF e OG.PGL40.CF é que a presença dos furos no *shroud* determina uma morfologia mais homogênea da corrente bifásica que chega à região que simula a sucção do BCSS;

e) Observa-se também que para a simulação OG.PGL40.CF, fica mais claro a chegada antecipada da corrente bifásica nos *Intakes* em relação à simulação OG.PGL40.SF.

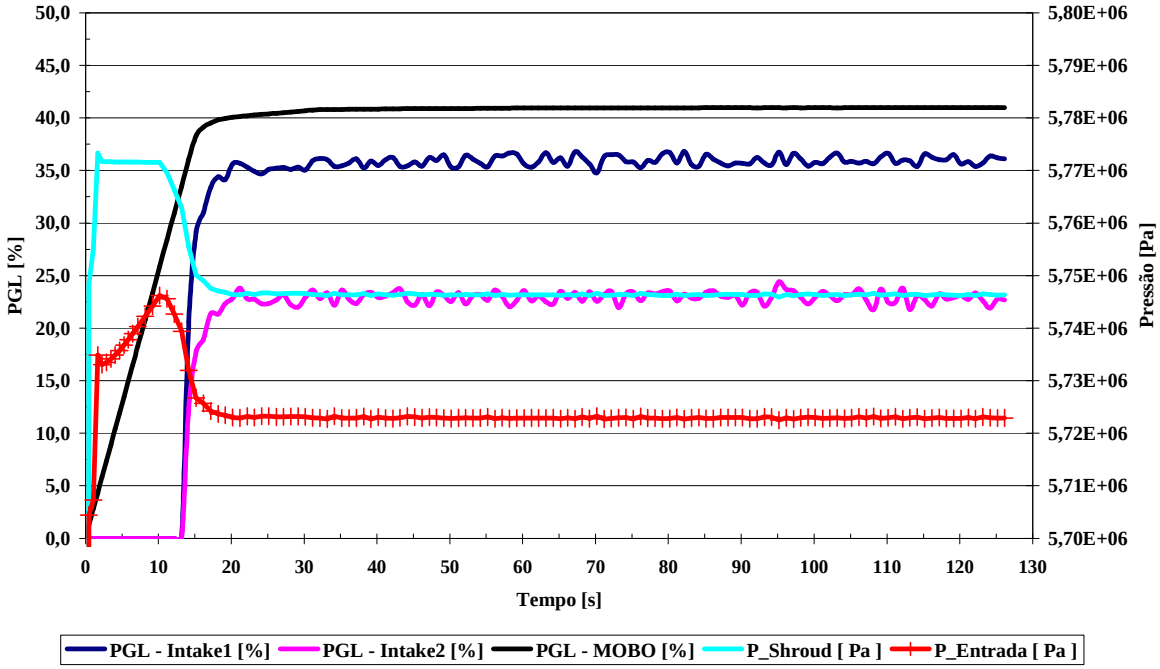


Figura 4.42 - Monitoramento da Pressão e PGL no MOBO - OG.PGL40.SF

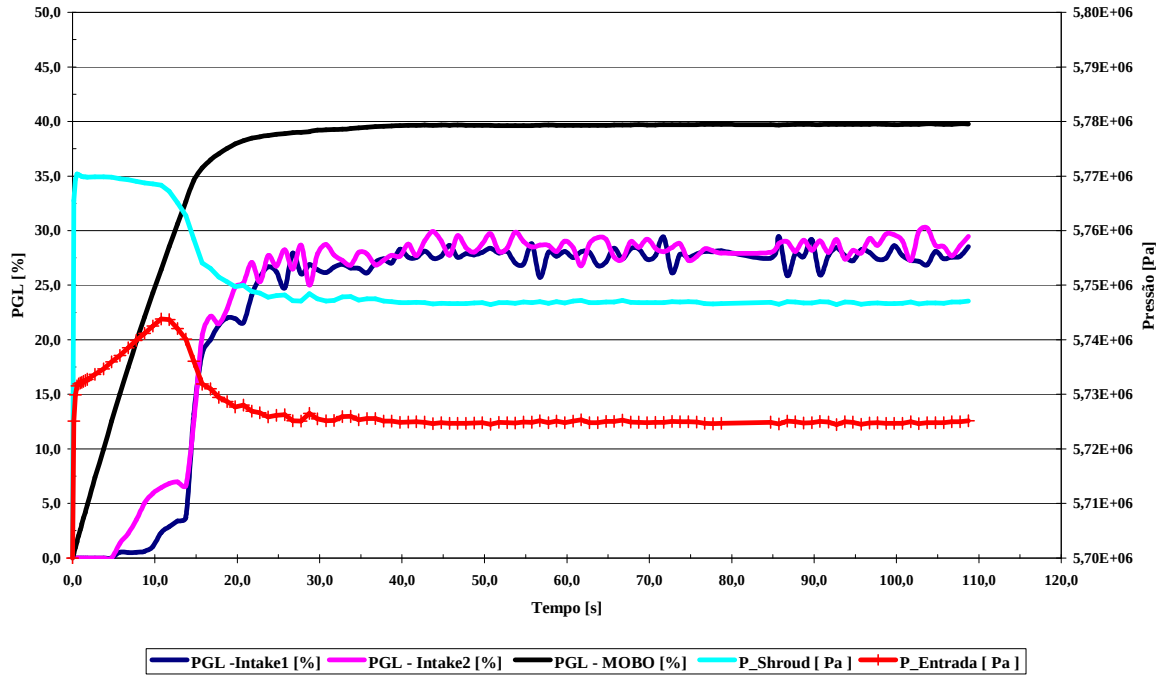


Figura 4.43 - Monitoramento da Pressão e PGL no MOBO - OG.PGL40.CF

Outro aspecto percebido quando se compara a Figura 4.44 e Figura 4.45 é que a PGL da corrente bifásica que passa pelos furos 11 ao 15 se apresenta com valores atipicamente maiores que nos furos 1 ao 5. Tal comportamento deve estar associado à ocorrência de coalescência das bolhas ao longo do escoamento no anular poço alojador / *shroud*.

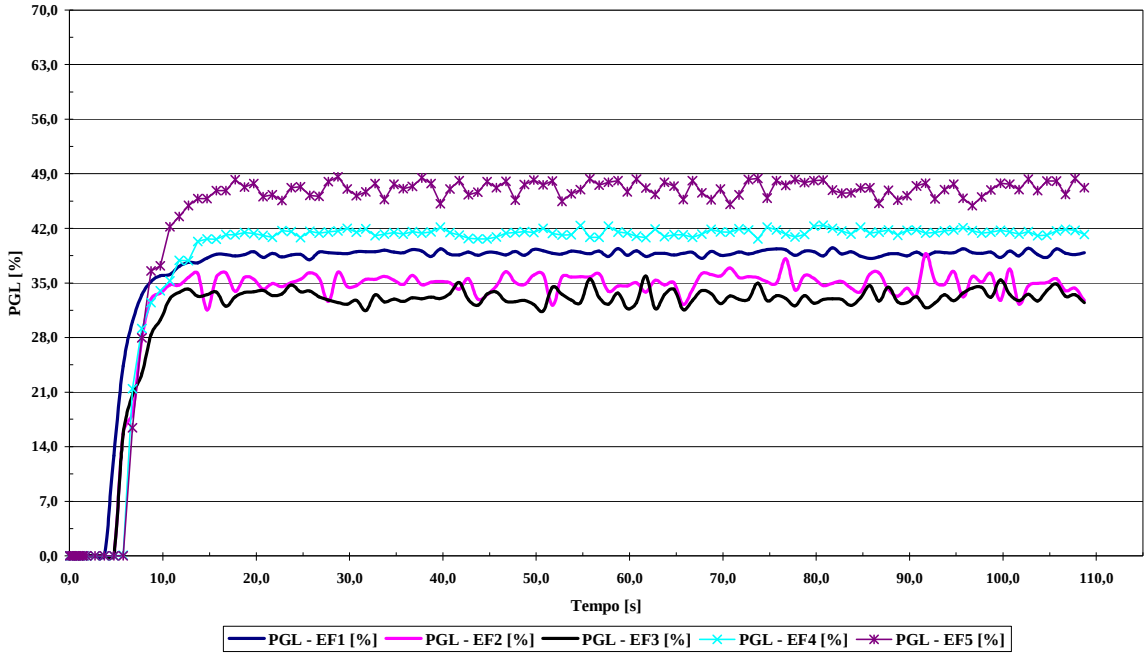


Figura 4.44 - Monitoramento da PGL nos furos 1 ao 5 - OG.PGL40.CF

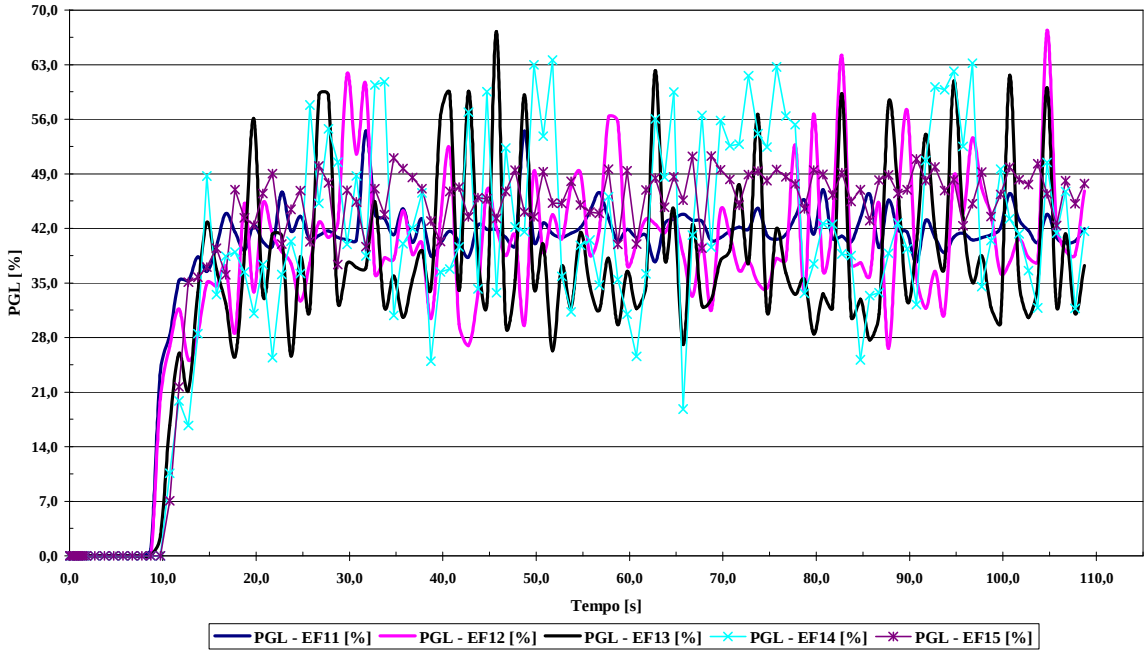


Figura 4.45 - Monitoramento da PGL nos furos 11 ao 15 - OG.PGL40.CF

A visualização do comportamento dinâmico do escoamento dentro do modelo MOBO das simulações OG.PGL40.SF e OG.PGL40.CF podem ser acompanhada e comparadas da Figura 4.46 à Figura 4.50. E dessas figuras pode-se inferir:

a) Na Figura 4.46, observa-se a frente da corrente bifásica óleo/gás deslocando o óleo que se encontrava inicialmente dentro do modelo computacional MOBO;

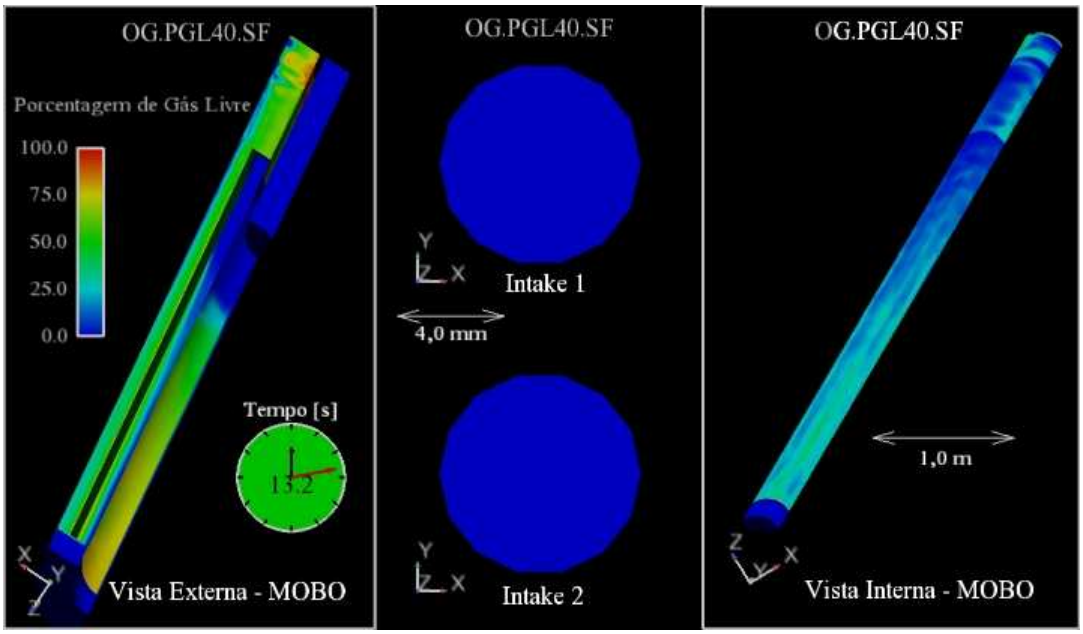


Figura 4.46 - Visualização 1 da PGL - OG.PGL40.SF

b) Na Figura 4.47, observa-se a segregação de fases na região acima dos *intakes* da bomba;

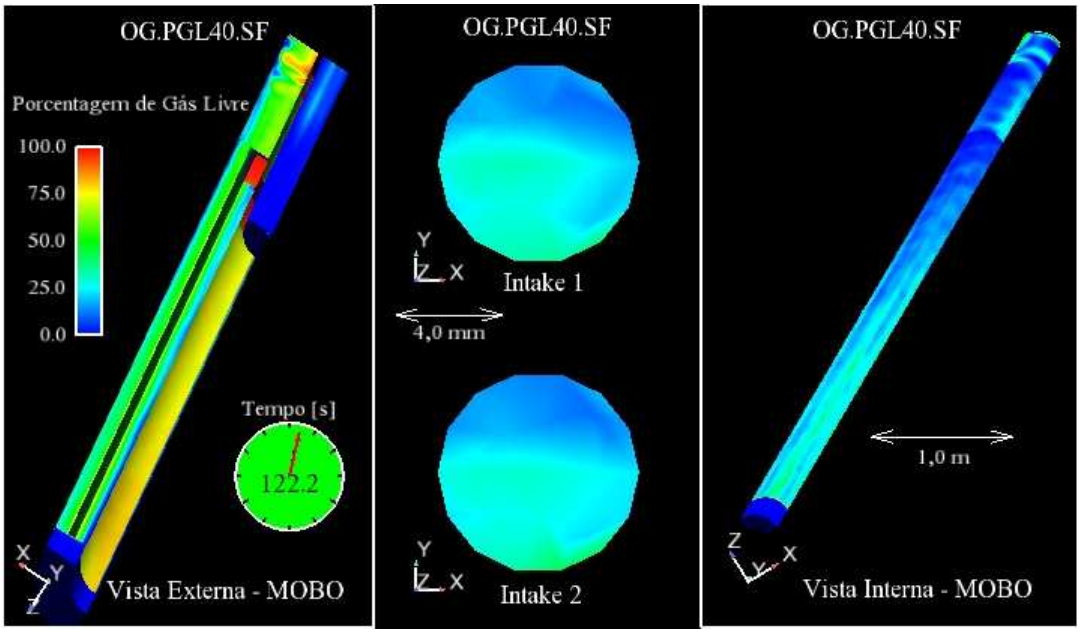


Figura 4.47 - Visualização 2 da PGL - OG.PGL40.SF

c) Na Figura 4.48 observa-se a passagem da corrente bifásica nos furos 12 e 13, alcançando o anular interno do *shroud*. Tal comportamento também é evidenciado em todos os demais furos do *shroud*;

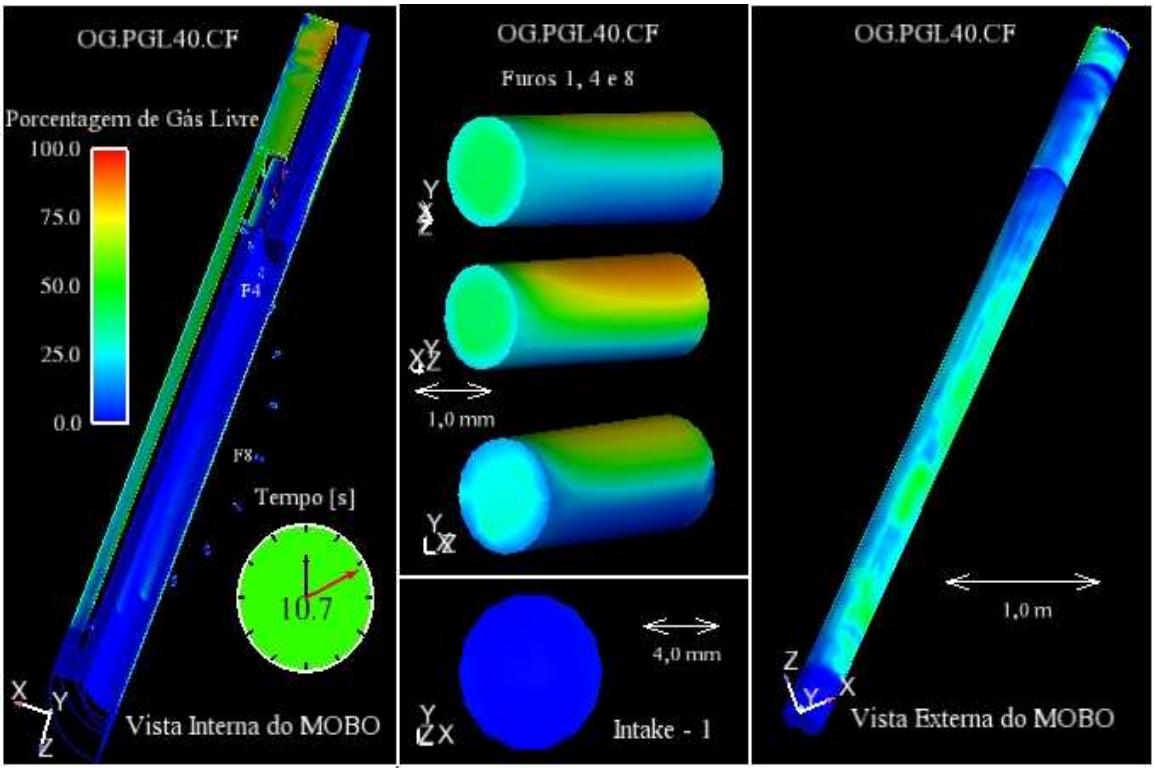


Figura 4.48 - Visualização 1 da PGL - OG.PGL40.CF

d) Na Figura 4.49 (simulação OG.PGL40.CF), tal como Na Figura 4.46 (simulação OG.PGL40.SF), observa-se a frente da corrente bifásica óleo/gás deslocando o óleo que se encontrava inicialmente dentro do modelo computacional MOBO;

e) Constata-se na Figura 4.47 e Figura 4.50 a existência de uma região um pouco acima dos *Intakes* com presença predominantemente de gás. Tal ocorrência foi igualmente evidenciada durante a etapa experimentalmente e nas simulações de validação do modelo computacional realizadas com água e ar.

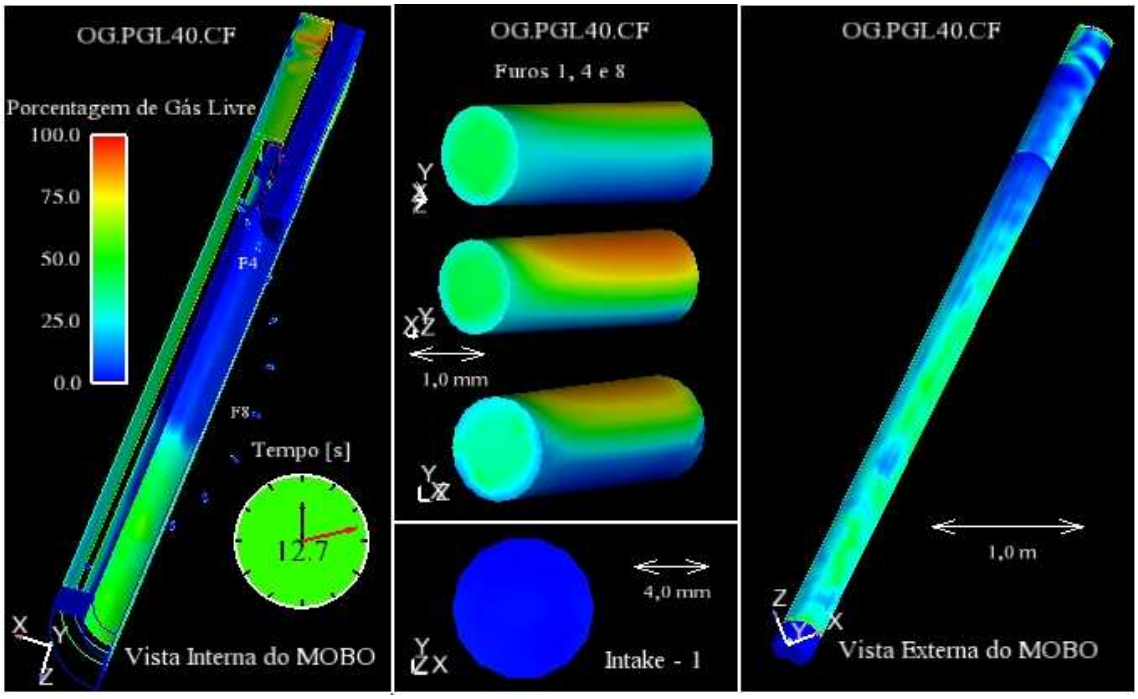


Figura 4.49 - Visualização 2 da PGL - OG.PGL40.CF

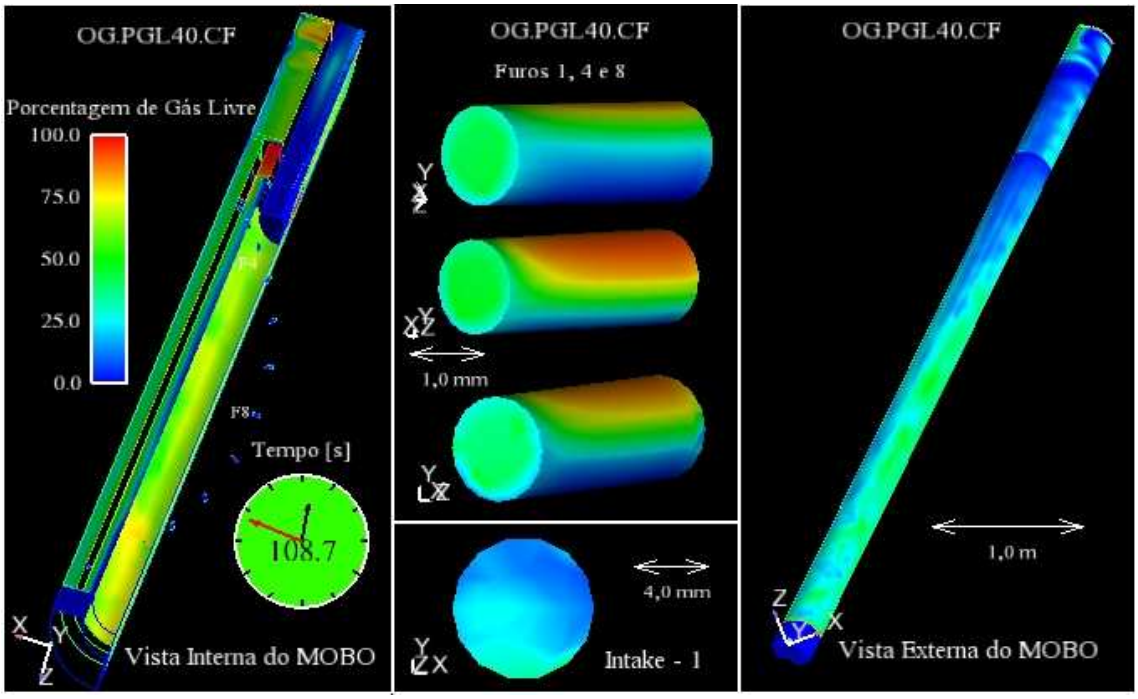


Figura 4.50 - Visualização 3 da PGL - OG.PGL40.CF

Com relação às simulações, vale dizer que, para a realização de estudos da natureza deste trabalho se faz necessário a disponibilidade de recursos computacionais de vanguarda para a geração de malhas, processamento das simulações e pós-processamento. Além do fator crítico

dos recursos computacionais, os tempos envolvidos para cada processamento das simulações foram da ordem de um mês. Além disso, o fato de se ter um maior número de máquinas para o mesmo serviço pode ocasionar uma extensão do tempo de simulação para comunicação entre elas e a geração de paradas das simulações por divergências devido a um maior número de partições. Ë necessário, portanto, escolher cuidadosamente o número de máquinas a ser empregado em simulações complexas como o presente trabalho.

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

A necessidade de se obter mais informações e aprendizado a respeito da dinâmica de escoamento de uma corrente bifásica (líquido/gás) dentro da geometria do MOBO foram motivações para o desenvolvimento deste trabalho.

A metodologia adotada para definição das malhas, de modo a garantir um menor uso de recursos computacionais, associada ao conhecimento prático dos experimentos que foram realizados com água e ar por Gaspari *et al* (2007), permitiram selecionar os casos representativos para estruturar uma Matriz de Validação do modelo computacional proposto para o Módulo de Bombeamento (MOBO).

Os resultados obtidos com água e ar, na etapa de validação do modelo computacional MOBO, mostraram uma boa concordância com os resultados experimentais. Alguns dos comportamentos apontados como resultado experimental pode ser perfeitamente visualizado e monitorado na dinâmica do escoamento dentro do modelo computacional MOBO. Esta concordância permitiu chancelar o modelo computacional do MOBO com e sem furos no *shroud* para a realização de uma análise do escoamento com óleo e gás, nas condições esperadas para o MOBO no Campo de Jubarte. Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

a) O modelo computacional do MOBO com e sem furos no *shroud* implementado no CFX representou de forma legítima os resultados experimentais, obtidos por Gaspari *et al* (2007), sobre a dinâmica de escoamento de uma corrente bifásica (água e ar) dentro do modelo experimental do MOBO de Jubarte, instalado no Centro de Pesquisa da PETROBRAS - CENPES;

b) O estudo de modelagem permitiu concluir que os aspectos geométricos característicos do equipamento e as condições impostas ao escoamento da corrente bifásica (líquido/gás) dentro do MOBO (escoamento descendente e ascendente) são fatores que contribuem para o estabelecimento da segregação das fases;

c) A funcionalidade dos furos no *shroud* é representada pela ausência da descarga do nível dinâmico bifásico do anular poço alojador / *shroud* e o comportamento homogêneo da porcentagem de gás livre (PGL) na região que representa a sucção da BCSS. Os furos atenuam de forma expressiva a descontinuidade de fases na região de sucção da BCSS;

d) O estudo exploratório com óleo e gás natural mostrou que os furos do *shroud* servem para atenuar a intrínseca característica à promoção da segregação das fases dentro do MOBO;

e) A existência de uma região com acúmulo de gás acima da região de sucção da BCSS pode implicar que instabilidades de escoamento no MOBO possam provocar uma abrupta invasão de frente de gás na BCSS;

5.2. Recomendações para a Continuidade do Trabalho

a) Estudo exploratório para identificar a contribuição e a influência do aumento do número de furos, distribuição geométrica e aumento da área de passagem dos mesmos na dinâmica do escoamento dentro do MOBO de uma corrente bifásica com caráter viscoso;

b) Estudo exploratório para investigar a influência da presença de golfadas na entrada do MOBO frente ao escoamento de uma corrente bifásica com baixa e alta viscosidade;

c) Verificar a dinâmica de escoamento dentro do MOBO frente a uma interrupção abrupta de vazão do sistema com fluido bifásico de baixa e alta viscosidade;

d) Verificar o efeito da viscosidade e diâmetro de bolhas na ação intrínseca à promoção da segregação das fases dentro do MOBO;

e) Investigar propostas na geometria do MOBO para minimizar a região de acúmulo de gás acima da região de sucção do BCSS.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA REGO, F. C. **Estudo do hidrociclone cilíndrico de uma unidade de flotação centrífuga com auxílio de fluidodinâmica computacional**, Rio de Janeiro: UFRJ / EQ / TPQB, 2008.

ALVAREZ, J., ALVAREZ, J., HERNANDEZ, M., **A population balance approach for the description of particle size distribution in suspension polymerization reactors**, Chemical Engineering Science, Vol. 49, pp 99-113, 1994.

ALVES DE OLIVEIRA, G. P. H.; MOISÉS, G. V. L. **Métodos de Elevação Artificial, Apostila Técnica da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, 2009.

AMARAL, GILMAR D. L. **Modelagem do Escoamento Monofásico em Bomba Centrífuga Submersa Operando com Fluidos Viscosos**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

BARUZZI, J.O.A.; CAETANO, E.F.; FAGUNDES NETTO, J.R. **Production Forecast for a Subsea Multiphase Pumping System in the Marlim Field**. In: Annual Technical Conference and Exhibition - Society of Petroleum Engineers - SPE, 2001, New Orleans.

BROWN, K.E.; **The Technology of Artificial Lift Methods V.2a**. Tulsa, OK, The Petroleum Publishing Co., 1980. 720p.

BURNS, A.D.B., FRANK, TH., HAMILL, I., AND SHI, J-M. **Drag Model for Turbulent Dispersion in Eulerian Multi-Phase Flows**, 5th International Conference on Multiphase Flow, ICMF-2004, Yokohama, Japan.

CAETANO, E.F.; KUJAWSKI, J.M. **Demonstration of a Subsea Multiphase Flow Pumping System**. In: European Conggress on Fluid Machnery for the Oil, Petrochemical and related Industries - ImechE, 7., 1999.

CARNEIRO, D.G.P.; **A Injeção de Esferas de Baixa Densidade na Base do Riser no Processo de Perfuração com Duplo Gradiente: um Estudo com Auxílio de Fluidodinâmica Computacional (CFD)**. UFRJ: Dissertação de Mestrado, 2006.

CFX-12.0, Manual, **ANSYS Technology**, 2009.

COUET, B., BROWN, P., HUNT, A., (1991), **Two-phase bubbly-droplet flow through a contraction: Experiments and a unified model**, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 17, pp 291-307.

DAMIAN, R. B. **Acoplamento de Balanço Populacional à Simulação Computacional de Escoamentos Multifásicos Polidispersos**, Rio de Janeiro, 2007 (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Química, 2007)

DREW, D. A., LAHEY, R. T. Jr., **The virtual mass and lift force on a sphere in rotating and straining inviscid flow**. Int. Journal of Multiphase Flow, v. 13, n 1, p. 113-121, Janeiro / Fevereiro, 1987.

ENSIGHT 9.0, User Manual, **CEI - Computational Engineering International**, 2009.

ESTEVAM, V. **Uma análise fenomenológica da operação de bomba centrífuga com escoamento bifásico**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002.

FLECK, A. B. **Dispersão de Gases Inflamáveis em Plataformas Offshore: Localização de Detectores**, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008.

FONTES, C.E.; SILVA, L.F.L.R.; LAGE, P.L.C.; RODRIGUES, R.C.; **Introdução à Fluidodinâmica Computacional**. Rio de Janeiro: Escola Piloto Virtual, UFRJ/COPPE/PEQ, 2005.

FRANK, TH., SHI, J. M. AND BURNS, A. D. **Validation of Eulerian Multiphase Flow Models for Nuclear Safety Applications,** 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa, Italy, 22-24, Sept. 2004.

FRANK, TH., ZWART, P. J., KREPPER, E., PRASSER, H. -M. AND LUCAS, **Validation of CFD models for mono- and polydisperse air-water two-phase flows in pipes**, J. Nuclear Engineering & Design, Vol. 238, pp. 647–659, March 2008.

GASPARI, E. F., ALVES DE OLIVEIRA, G. P. H., TOSTA DA SILVA, L. C. **Estudo Experimental Sobre a Dinâmica de escoamento no Módulo de Bombeio de Jubarte**, Comunicação Técnica TE 014/TE, Documento Interno do Centro de Pesquisa da PETROBRAS – CENPES, 2007.

HILL, D. P., WANG, D. M., GOSMAN, A.D. E ISSA, R. I..**Numerical prediction of two-phase bubbly flow in a pipe.** Proceedings of the 2nd International Conference on Multiphase Flow, Kyoto, Japan, p. MO3_1-MO3_6, Abril, 1995.

ISHHI, M. **Thermo-fluid Dynamics Theory of Two-phase Flow**. France:Eyrolles, 1975.

ISHII, M. e ZUBER, N., **Drag Coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows**. AIChE Journal v.25, n.5, p. 843-855, 1979.

ISHII, T., PEI, D. C. T., **Drag coefficient of relatively contamined gas bubbles**. The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 58, 1980.

KOWE, R., HUNT, J. C. R., HUNT, A., COUET, B., BRADBURY, L. J. S., (1988), **The effects of bubbles on the volume fluxes and the pressure gradients in unsteady and non-uniform flow of líquids**, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 14, pp 587-606.

KUO, J. T. e WALLIS, G. B., **Flow of bubbles through nozzles**. Int. Journal of Multiphase Flow, v. 14, n. 5, p. 547-564, Setembro / Outubro, 1988.

LAHEY, J., CHENG, L. Y., DREW, D. A., FLAHERTY, J. E., (1980), **The effect of virtual mass on the numerical stability of accelerating two-phase flows**, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 6, pp 281-294.

LAHEY, Jr., R. T., **The CFD analysis of multidimensional phenomena in multiphase flow**. Proceedings of the 2nd International Conference on Multiphase Flow, Kyoto, Japan, p. MO3_1-MO3_6, Abril, 1995.

LAHEY, R. T. Jr., **The analysis of phase separation and phase distribution phenomena using two-fluid models**, Nuclear Engineering & Design, v. 122, p. 17-40, 1990.

LO, S. **Applications of the MUSIG model to bubbly flows**. Technical Report AEAT-1096, AEA Technology, 1996.

LOPEZ DE BERTODANO, M.**Two Fluid Model for Two-Phase Turbulent Jet**, Nucl. Eng. Des. 179, 65-74, 1998.

LUO, S.M., AND SVENDSEN, H. **Theoretical Model for Drop and Bubble Breakup in Turbulent Dispersions**, AIChE Journal 42, 1225 -1233.

MATOS, A. **Distribuição de Fases de Escoamento a Bolhas em Duto de Secção Quadrada Através de Curva de 180º no plano Vertical**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

MATOS, A., ROSA, E. S., FRANÇA, F. A., MORANDIN, M. E MORALES, R., **Análise experimental e numérica de um escoamento vertical ascendente em bolhas em um canal de seção quadrada,** XV Cong. Brás. Eng. Mecânica, COBEM, Águas Lindóia-SP, in CD ROM, Nov. 1999.

MENDES SIMÕES, A. M. B. **Simulação Numérica da Fluidodinâmica de um Hidrociclone Aplicado na Separação Óleo/Água**, Campina Grande – PB, Setembro de 2005.

PALADINO, E. E. **Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial**, Florianópolis, UFSC, Abril de 2005.

R. CLIFT, J.R. GRACE AND M.E. WEBER, **Bubbles, Drops and Particles**, Academic Press, 1978.

RODRIGUES, R. et al. **A New Approach for Subsea Boosting - Pumping Module on the Seabed**. In: Offshore Technology Conference - OTC, 2005, Houston.

RODRIGUES, R. et al. **Módulo de bombeio no solo marinho em furo revestido. Seminário de Engenharia de Poço**, 6., 2005, Rio de Janeiro.

SATO, Y. AND SEKOGUCHI, K. **Liquid Velocity Distribution in Two-Phase Bubbly Flow**, Int. J. Multiphase Flow, 2, p.79, 1975.

SERIZAWA, A., KATAOKA, I. e MICHIYOSHI, I., **Turbulence structure of air-water bubbly flow – II. Local properties**. Int. J. Multiphase Flow v.2, p. 235-246, 1975.

SERIZAWA, A., KATAOKA, I. e MICHIYOSHI, I., **Turbulence structure of air-water bubbly flow – III. Transport properties**. Int. J. Multiphase Flow v.2, p. 247-259, 1975.

SILVA, M. K.; **Estudo de Modelagem Numérica Tridimensional de Ciclones do Tipo Lapple para Separação Gás-Sólido**. Florianópolis-SC, Fevereiro de 2006. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (Dissertação), 91p.

Site da **Empresa Applitech**: <http://www.applitech.com.br/>, acessado em 29/06/2009.

Site da **Empresa Computational Engineering International (CEI)**: <http://www.ensight.com/>, acessado em 16/12/2009.

Site da **Empresa Petróleo Brasileiro SA**: <http://www.petrobras.com.br>, acessado em 16/12/2009.

Site do **Instituto de Matemática da Universidade de Indiana (Pensilvânia-USA)**: <http://www.ma.iup.edu/projects/CalcDEMma/drag/drag6.html>, acessado em 27/01/2010.

SOUSA, E. P. S., HAYASHI, L. M. **Sistemas de Bombeamento Submarino: Situação Atual na Petrobras e Principais Desafios**. 2006. Monografia (Especialização em Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal da Bahia, Salvador.

THOMPSON, R. W. & STEVENS, J. D., **A population balance approach to modeling of continuous emulsion polymerization**, Chemical Engineering Science, Vol. 32, pp 311-322, 1977.

VERSTEEG, H. K, MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method**. Longman, 1995.

VIEIRA, R. A. M. **Elevação Artificial: Bombeio Centrífugo Submerso**. Apostila, Universidade PETROBRAS. 2006.

WALLIS, G. B., **One-dimensional two-phase flow**, McGraw-Hill, New York, 1969.

WANG, S. K., LEE, S. J., JONES, Jr., O. C., LAHEY, Jr., R. T., **3D turbulence structure and phase distribution measurements in bubbly two-phase flows.** Int. J. Multiphase Flow. V. 13, n. 3, p. 327-343, Maio / Junho, 1987.

WATANABE, T., HIRANO, M., TANABE, F., KAMO, H., **The effect of the virtual mass force term on the numerical stability and efficiency of system calculations**, Nuclear Engineering and Design, vol. 120, pp 181-192, 1990.

APÊNDICE A – ESTUDO DE SIMILARIDADE

- **O Estudo de Similaridade**

O fator de escala adotado (n=7,5) foi definido a partir das limitações de altura e perímetro do Laboratório de Mecânica dos Fluidos do CENPES. A partir deste número foram calculados os dimensionais dos dutos e do poço alojador (MOBO) do modelo experimental. Conforme a Tabela A.1, o aparato experimental montado atendeu de forma muito próximo ao indicado na Análise de Similaridade.

Tabela A.1 - Dimensional do Modelo Experimental, fator de escala n=7,5

	Dimensional do Protótipo de Jubarte	**Dimensional por Análise de Similaridade**	**Dimensional do Modelo Experimental**
Comprimento da *flowline* de 6" (m)	236,22	31,496	**29,200**
DI da *flowline* de 6" (m)	0,1524	1,392	**1,380**
DI poço alojador (m)	0,38	0,050	**0,050**
Comprimento do poço alojador (m)	34,00	4,533	**4,558**
DE do *Shroud* (m)	0,30	0,040	**0,040**
DI do *Shroud* (m)	0,28	0,037	**0,034**
Comprimento do *Shroud* (m)	26,00	3,467	**3,440**
DE da BCSS (m)	0,22	0,029	**0,025**

Conforme o estudo de similaridade desenvolvido por Gaspari *et al* (2007), chegou-se aos seguintes grupos adimensionais:

$$Re = \frac{Q_L * \rho_L}{Di * \mu_L} \tag{A-1}$$

Onde:

- Re - Número de Reynolds expresso em vazão
- Q_L - Vazão de líquido
- ρ_L - Massa específica do líquido
- Di - Diâmetro interno do tubo a montante do poço alojador
- μ_L - Viscosidade dinâmica do líquido

E

$$Fr = \frac{Q_L}{Di^2 * \sqrt{g * Di}} \tag{A-2}$$

Onde:

- Fr - Número de Froude expresso em vazão
- Q_L - Vazão de líquido
- Di - Diâmetro interno do tubo a montante do poço alojador
- g - Aceleração gravitacional

Assim, respeitando-se as relações de similaridade, obtêm-se as seguintes expressões:

$$\frac{Di_M}{Di_P} = \frac{1}{n} \tag{A-3}$$

$$Q_{L_M} = Q_{L_P} * \left(\frac{1}{n}\right)^{5/2} \tag{A-4}$$

$$\frac{\rho_{L_M}}{\mu_{L_M}} = n^{3/2} * \frac{\rho_{L_P}}{\mu_{L_P}} \tag{A-5}$$

Onde:

- Di_M - Diâmetro interno do tubo do modelo experimental, a montante do poço alojador
- Di_P - Diâmetro interno do tubo do protótipo, a montante do poço alojador
- n - Fator de escala
- Q_{L_M} - Vazão de líquido do modelo experimental
- Q_{L_P} - Vazão de líquido do protótipo
- ρ_{L_M} - Massa específica do líquido usado no modelo experimental
- ρ_{L_P} - Massa específica do líquido usado no protótipo
- μ_{L_M} - Viscosidade do líquido usado no modelo experimental
- μ_{L_P} - Viscosidade do líquido usado no protótipo

Para a realização dos testes experimentais foi definido o uso de água e ar de serviço. A Tabela A.2 apresenta os valores das propriedades dos fluidos considerados nos estudos de similaridade e os dados de entrada usados para os estudos de modelagem computacional do poço alojador (MOBO).

Tabela A.2 - Tabela das propriedades dos fluidos

Propriedades dos Fluidos	Escoamento no Protótipo Jubarte	Escoamento no Modelo Experimental @ 25°C
Massa Específica do Líquido (kg/m^3)	850,0	997,0
Massa Específica do Gás (kg/m^3)	30,0	1,185
Viscosidade do Líquido (cP)	20,0	1,0
Viscosidade do Gás (cP)	0,02	1,790E-05
ρ_{L_P} / μ_{L_P}	42,5	
ρ_{L_M} / μ_{L_M}		997

Verifica-se na Tabela A.3, que os valores correspondentes aos estudos de similaridade em relação às propriedades dos fluidos foram bastante próximos. Conferindo ao aparato experimental e aos testes realizados uma grande legitimidade.

Tabela A.3 - Propriedades dos Fluidos - Relação de Similaridade

Propriedades dos Fluidos - Relação de Similaridade	Escoamento no Protótipo Jubarte	Escoamento no Modelo Experimental @ 25°C
$\frac{\rho_{LM}}{\mu_{LM}} * \frac{\mu_{LM}}{\rho_{LM}} = n^{3/2}$		21
$\frac{\rho_{LM}}{\mu_{LM}} * \frac{\mu_{LM}}{\rho_{LM}} =$	23	

APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO ESTUDO DAS MALHAS

- **Resultados Experimentais do Estudo das Malhas**

Vazão de água medida (Q3) = 15,0 L/min;
Pressão medida na entrada do MOBO = 0,225 Pa.

- **Cálculos do Estudo das Malhas**

⇒ Cálculo da Velocidade Média no Anular Poço Alojador - *Shroud* (Ponto PM-1)

$$Vel_Anular\ Poço - Sh2 = \frac{Q3}{Área_Anular\ Poço - Sh2} \qquad \text{(B-1)}$$

Tabela B.1 - Cálculo da Velocidade do Anular do Poço Alojador - *Shroud* a 2,0 m da Entrada do Modelo MOBO

Variáveis	Descrição	Valores
$Vel_Anular\ Poço - Sh2$	Velocidade no anular poço alojador - *shroud* a 2,0 m da entrada do MOBO	0,35 m/s
$Q3$	Vazão de água medida na entrada do MOBO	0,00025 m^3/s
$Área_Anular\ Poço - Sh2$	Área no anular poço alojador - *shroud* a 2,0 m da entrada do MOBO	0,000707 m^2

⇒ Cálculo da Velocidade Média no Anular Coluna - *Shroud*

As áreas correspondentes aos anulares dos pontos PM-2, PM-3 e PM-4 são idênticas e como se tem uma vazão de água constante na entrada do MOBO, as velocidades nesses anulares serão iguais. Assim, representando a fórmula do cálculo da velocidade média para o anular do PM-2, temos então:

$$Vel_Anular\ Col - Sh3 = \frac{Q3}{Área_Anular\ Coluna - Sh3} \qquad \text{(B-2)}$$

Tabela B.2 - Cálculo da Velocidade do Anular Coluna de Produção - Shroud a 3,0 m da Entrada do Modelo MOBO

Variáveis	Descrição	Valores
$Vel_Anular\ Poço - Sh3$	Velocidade no anular coluna de produção - *shroud* a 3,0 m da entrada do MOBO	0,60 m/s
$Q3$	Vazão de água medida na entrada do MOBO	0,00025 m^3/s
$Área_Anular\ Poço - Sh3$	Área anular coluna de produção - *shroud* a 3,0 m da entrada do MOBO	0,000417 m^2

⇒ Cálculo da Velocidade Média no Intake (Área AM-1)

Como a geometria do MOBO é constituída de 2 furos frontais, com diâmetros idênticos, posicionados na mesma cota (*intakes* 1 e 2) que representam a região de sucção do BCSS, considerou-se que a vazão total de água (Q3) seria dividida de forma igualitária entre os 2 furos. Assim, tem-se:

$$Vel_Intake = \frac{\left(Q3/2\right)}{Área_AM-1} \tag{B-3}$$

Tabela B.3 - Cálculo da Velocidade dos intakes 1 e 2

Variáveis	Descrição	Valores
Vel_Intake	Velocidade nos *intake* 1 e 2	2,53 m/s
$Q3$	Vazão de água medida na entrada do MOBO	0,00025 m^3/s
$Área_AM-1$	Área de cada *intake*	0,0000495 m^2

⇒ Cálculo da Velocidade Média na Saída do MOBO (Área AM-2)

$$Vel_Saída\ MOBO = \frac{Q3}{Área_AM-2} \tag{B-4}$$

Tabela B.4 - Cálculo da Velocidade de Saída do MOBO

Variáveis	Descrição	Valores
$Vel_Saída\ MOBO$	Velocidade na saída do MOBO	2,53 m/s
$Q3$	Vazão de água medida na entrada do MOBO	0,00025 m^3/s
$Área_AM-2$	Área da saída do MOBO	0,0000495 m^2

⇒ Cálculo dos Erros Percentuais

As fórmulas para os cálculos dos erros percentuais das velocidades e pressão foram definidas conforme as equações (B-5) e (B-6), respectivamente e nas Tabela B.5 e Tabela B.6 encontram-se os valores preditos e seus respectivos erros percentuais calculados.

$$Erro\ Perc.\ da\ Velocidade = \frac{100 * (Velocidade\ \mathrm{Pr}edita - Velocidade\ Medida)}{Velocidade\ Medida} \quad \text{(B-7)}$$

Tabela B.5 - Valores das Velocidades de Saída do MOBO Preditas e Seus Respectivos Erros

Evento	Velocidade na Saída do MOBO (m/s)	Erro da Velocidade de Saída do MOBO (%)
Malha 1	0,8888	11,69
Malha 2	0,6085	-23,54
Malha 3	0,7929	-0,36
Malha 4	0,8547	7,40
Malha 5	0,8496	6,76
Malha 6	0,7611	-4,36
Experimental	0,7958	

$$Erro\ Percentual\ da\ \mathrm{Pr}essão = \frac{100 * (\mathrm{Pr}essão\ \mathrm{Pr}edita - \mathrm{Pr}essão\ Medida)}{\mathrm{Pr}essão\ Medida} \quad \text{(B-8)}$$

Tabela B.6 - Valores das Pressões na Entrada do MOBO Preditas e Seus Respectivos Erros

Malha	Pressão na entrada do MOBO (bar)	Erro da Pressão de Entrada do MOBO (%)
Malha 1	0,334	51,5
Malha 2	0,152	-31,1
Malha 3	0,205	-7,1
Malha 4	0,239	8,3
Malha 5	0,238	8,0
Malha 6	0,211	-4,4
Experimental	0,225	