



PROGRAMA EQ-ANP

**Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria
do Petróleo e Gás Natural**



**Análise com Fluidodinâmica Computacional
do Efeito do Movimento Angular Jogo na
Eficiência de Separadores Gravitacionais**

Celso Magarão Costa

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD

Prof. Tânia Suaiden Klein, PhD

Março de 2014

Análise com Fluidodinâmica Computacional dos efeitos do movimento angular Jogo na eficiência de separadores gravitacionais

Celso Magarão Costa

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente do Programa Escola de Química/Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria de Petróleo e Gás Natural, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Engenharia de Petróleo.

Aprovado por:

Carlos Eduardo Fontes, D. Sc.

Heloísa Lajas Sanches, PhD

Renata Dias Ambrosio, Eng.

Orientado por:

Ricardo de Andrade Medronho, PhD

Tânia Suaiden Klein, PhD

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Março de 2014

Costa, Celso Magarão

Análise com fluidodinâmica computacional dos efeitos do movimento angular joga na eficiência de separadores / Celso Magarão Costa Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2014

xiv, 88 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2014

Orientadores: Ricardo de Andrade Medronho e Tânia Suaiden Klein

1. Separador Gravitacional. 2. CFD. 3. Jogo. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ricardo de Andrade Medronho, PhD; Tânia Suaiden Klein, PhD

Pai, Mãe, Felipe e Rafa. Vocês todos fazem parte dessa conquista. Muito obrigado pela ajuda e compreensão. Gostaria de dedicar esse trabalho ao meu avô Celso, que formou mais um engenheiro químico na família, agora um neto. Muito Obrigado!

“Success is not final, failure is not fatal: it is the courage to continue that counts.”

Winston Churchill

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, antes de tudo, à minha família que sempre me apoiou em todos os momentos. Meus pais Rita e Celso que sempre foram os meus principais incentivadores, me dando todo o suporte e carinho necessário para correr atrás dos meus sonhos. Muito obrigado por tudo, esse título é de vocês também. Gostaria de agradecer ao meu irmão Felipe por toda força que sempre me deu na Faculdade, pelas eternas dúvidas nas matérias do curso que sempre me fizeram correr atrás de um livro pra responder. Gostaria de agradecer ao meu avô Celso que desde cedo foi um dos meus exemplos. Inspirou toda uma família a seguir a carreira técnica e nunca negou nada aos netos, dos brinquedos aos livros, sendo presente sempre na minha educação.

Gostaria de agradecer imensamente a minha namorada Rafaela, por toda a compreensão com as minhas ausências. Pelos domingos de sol que eu passei dentro do laboratório em vez de estar ao lado dela. Por todo o apoio após algumas provas ruins e por todos os sorrisos após uma nota boa.

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos do Colégio Santo Agostinho que estiveram junto comigo por toda a faculdade sempre me dando apoio. Gostaria de agradecer a todos os amigos que eu fiz no Fundão. João, Romano, Letícia, Cabeça e Yuri. Muito obrigado por tudo o que nós passamos na faculdade. Por todas as tardes estudando para Cálculo e OPII. Por todas as caronas. Muito obrigado por tudo.

Gostaria de agradecer imensamente a todos os amigos que eu fiz no LAB CFD: Eduardo, Rodrigo, Gabriel, Hermes, Felipe, Rafael e Gilson. Sem vocês esse trabalho não sairia! Muito obrigado pela força e ajuda de todos.

Gostaria de agradecer enormemente à minha orientadora Tânia Klein, por toda a paciência e apoio em relação ao Projeto Final. Muito Obrigado pelas conversas e conselhos! Gostaria de agradecer ao meu orientador Ricardo Medronho, pelo exemplo de profissionalismo e por todo o aprendizado durante o projeto.

Gostaria também de agradecer ao apoio financeiro da **Agência Nacional do Petróleo – ANP** – e da **Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP** – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao **PRH 13**, da Escola de Química - Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Engenharia de Petróleo.

Análise com Fluidodinâmica Computacional dos Efeitos do Movimento Angular Jogo na Eficiência de Separadores Gravitacionais

Celso Magarão Costa
Março, 2014

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD
Prof. Tânia Suaiden Klein, PhD

Os separadores gravitacionais são equipamentos hoje tratados como essenciais na separação trifásica água-óleo-gás, realizada após a extração de petróleo. É de fundamental importância reduzir os custos desta separação nas plataformas, além de atender às normas ambientais vigentes sobre o teor máximo de óleo na água descartada.

Por este motivo, os separadores gravitacionais estão sendo cada vez mais estudados, uma vez que, quanto maior o tempo de exploração de um poço, maior é a quantidade de água extraída junto com o óleo. Para melhorar a eficiência desse processo, é necessário levar em consideração, no projeto e na operação destes equipamentos, a turbulência criada pela movimentação relativa da plataforma que ajuda na formação de emulsões água-óleo e dificulta sua separação.

Neste trabalho, foi analisada a influência do movimento angular periódico de rotação sobre o eixo principal (jogo) na eficiência de separadores gravitacionais, através de simulações com fluidodinâmica computacional. Devido à complexidade do escoamento e ao tamanho do equipamento, uma malha com 2.604.813 elementos e 659.883 nós foi utilizada em simulações no CFX 15.1 da ANSYS.

A eficiência da separação óleo-água em quatro casos distintos de razão água/óleo na vazão de entrada foi analisada. Além disso, os efeitos de se considerar quebra-ondas porosos no equipamento também foram estudados. A influência do movimento jogo foi avaliada através do estudo dos perfis de fração volumétrica da água e de densidade gerados nas simulações. Os resultados obtidos mostram que, quando o quebra-ondas poroso é utilizado, a separação é mais comprometida e que, para esse movimento angular da plataforma, cargas com razões de água/óleo entre 60-80% têm sua eficiência de separação reduzida.

Estes resultados podem servir de base para o estudo de medidas, como mudanças no projeto e na operação, que mitiguem o efeito desses movimentos angulares periódicos e aumentem a eficiência da separação água-óleo nos separadores gravitacionais presentes em plataformas *offshore*.

Abstract of a Final Project presented to Escola de Química/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineer with emphasis on Petroleum and Natural Gas – Petroleum Engineer.

Analysis with CFD of the Effects of Roll Periodic Movement in the Efficiency of Oil-Water Gravity Separator

Celso Magarão Costa
March, 2014

Supervisors: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD
Prof. Tânia Suaiden Klein, PhD

Gravity separators play a key role in the separation process of reservoir fluids (water/oil/gas) when they are brought to surface. For this reason, research has been carried out as an attempt to improve these equipments' performance in order to reduce costs and meet the environmental standards.

It is well known that as oil fields age, water production increases in a way that it is expected that the volume of water produced by oil fields worldwide exceeds petroleum by a factor of three. In order to improve the efficiency of gravity separators, it is necessary to take into account the effects of turbulence generated by periodic motion of oil rig at their design and operation.

This work seeks to understand the influence of roll motion in the efficiency of gravity separators located in oil rigs using CFD (Computational fluid dynamics) simulations. The effect of roll motion was simulated, modeling the flow inside the equipment previously validated with available experimental data.

Due to the complexity of the flow and the size of the equipment a mesh with 2.604.813 elements and 659.883 nodes was used in the simulations, performed in CFX 15.1. A porous baffle was considered in order to understand the effect of the motion in the efficiency of the oil-water separation in four scenarios of input flow with different compositions of water and oil.

The influence of roll movement was evaluated by the study of water's volume fraction and density profiles generated in the simulations. The results show that input flows with water / oil ratio above 60% have their separation efficiency reduced by the Roll movement. The results also show that the use of porous baffles affects the separation.

The results can be further used to propose changes in design and operation of gravity separators in order to reduce the effect of roll motion and increase the efficiency of gravity separators located in FPSOs.

ÍNDICE

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 – Motivação	1
1.2 – Objetivo	2
Capítulo 2 – Processamento Primário dos Fluidos	3
2.1 – Processamento do Gás Natural	7
2.2 – Processamento do Óleo	7
2.3 – Processamento da Água Oleosa	12
Capítulo 3 – Separadores Gravitacionais	14
3.1 – Aplicação na Indústria do Petróleo	14
3.2 – Equipamento	16
3.2.1 – Dispositivos Internos	20
3.2.2 – Problemas Operacionais em Separadores	25
3.2.3 – Influência dos Movimentos da Plataforma no Desempenho dos Separadores	26
Capítulo 4 – Fluidodinâmica Computacional	31
4.1 – Introdução	31
4.2 – Etapas de uma Simulação Numérica	33
4.3 – Elaboração da Malha	34
4.3.1 – Tipos de Malha	36
4.3.2 – Modelagem de Sub-malhas	37
4.4 – Métodos Numéricos de Discretização	39
4.4.1 – Método por Diferenças Finitas (MDF)	40
4.4.2 – Método por Elementos Finitos (MEF)	40
4.4.3 – Método por Volumes Finitos (MVF)	41
4.5 – Modelagem Matemática	42
4.5.1 – Equações de Conservação	42
4.5.1.1 – Equação do Movimento (Conservação de Momento)	43
4.5.1.2 – Equação da Continuidade (Conservação de Massa)	43

4.5.2 – Modelagem de Escoamentos Multifásicos	44
4.5.2.1 – Abordagem Euleriana	44
4.5.2.2 – Abordagem Lagrangiana	45
4.5.3 – Modelos de Turbulência	46
4.5.3.1 – Modelo k- ϵ	49
Capítulo 5 – Metodologia	51
5.1 – Computador e Software Utilizado	51
5.2 – Geometria	52
5.3 - Malha	53
5.3.1 – Teste de Malha	54
5.4 - Simulações Numéricas	56
5.4.1 – Parâmetros de Simulação	56
5.4.2 – Modelagem do Movimento Relativo da Plataforma	57
5.4.3 – Condições Iniciais e de Contorno	60
Capítulo 6 – Resultados	64
6.1 – Teste de Malha	64
6.2 – Teste de Passo de Tempo	66
6.3 – Resultados Gerais	67
6.3.1 – Verificação do Movimento no Domínio	67
6.3.2 – Distribuição dos Fluidos no Domínio	70
6.3.3 – Efeito do Movimento angular na Eficiência do Equipamento	73
6.3.4 – Influência dos Quebra Ondas Porosos	79
6.3.5 – Efeito do Movimento Angular na Eficiência do Equipamento	82
Capítulo 7 – Conclusões	83
Capítulo 8 – Sugestões para Futuros Trabalhos	84
Capítulo 9 – Referências Bibliográficas	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Esquema representativo do processamento de óleo	3
Figura 2	Estrutura do Hidrato	8
Figura 3	Hidrato formado em linha de produção	8
Figura 4	Ação de agentes desemulsificantes	10
Figura 5	Formação do dipolo induzido	11
Figura 6	Separador de Água Livre	14
Figura 7	Tanque de Lavagem	15
Figura 8	Separador Trifásico Vertical	16
Figura 9	Separador Vertical	17
Figura 10	Fenômeno da coalescência	18
Figura 11	Distância percorrida pela gotícula de água até a completa separação do óleo	19
Figura 12	Seções de um separador de produção	21
Figura 13	Separador Gravitacional	21
Figura 14	Quebra Onda	23
Figura 15	Turbulência causada na superfície do líquido presente no interior de separadores gravitacionais devido aos movimentos das plataformas	24
Figura 16	Eliminador de Névoa	24
Figura 17	Sistema de Jateamento	25
Figura 18	FPSO Cidade de Angra	27
Figura 19	Movimentos da plataforma devido à incidência de ondas do mar	27
Figura 20	FPSO Cidade de São Vicente com um sistema de Turret	28
Figura 21	Ângulos de Trim - Titanic	29
Figura 22	Simulação CFD de um separador Gravitacional	30
Figura 23	Etapas para a solução numérica de um problema em CFD	34
Figura 24	Formas geométricas mais utilizadas na geração de malhas CFD	35
Figura 25	Malha estruturada da turbina de um avião	38
Figura 26	Malha não estruturada da cabine de um avião	38

Figura 27	Discretização do domínio pelo método numérico	39
Figura 28	Determinação do volume de controle	41
Figura 29	Aplicação do balanço de conservação em um volume de controle	42
Figura 30	Abordagem Euleriana	44
Figura 31	Abordagem Lagrangiana	46
Figura 32	Escoamento turbulento permanente	47
Figura 33	Geometria do Separador gravitacional	52
Figura 34	Malha 4 - 3.800.000 Elementos.	55
Figura 35	Inclinação do separador no sentido do escoamento devido ao ângulo de trim	58
Figura 36	Inclinação do separador no sentido devido ao movimento de Jogo (Roll)	59
Figura 37	Linha para avaliação do perfil de densidade - Z=3m - 2.8<y<2.8	64
Figura 38	Perfil de Densidade - Z=3m - 2.8<y<2.8 - t = 1.71s - Com Quebra Ondas Poroso	65
Figura 39	Perfil de Densidade - Z=9m - 2.8<y<2.8 - t = 1.71s - Sem Quebra Ondas Poroso	65
Figura 40	Linhas para avaliação do perfil de densidade - Z=9m & z=12 - 2.8<y<2.8	67
Figura 41	Perfil de Densidade – Z=9m - 2.8<y<2.8 - t = 1.72s - Cenário B - Sem Quebra Ondas Poroso	67
Figura 42	Perfil de Densidade - Z=12 m - 2.8<y<2.8 - t = 1.72s - Cenário B - Sem Quebra Ondas Poroso	67
Figura 43	Perfil de Densidade - Plano XY em z=14.9m - t = 4.104s - Cenário C - Com Quebra Ondas Poroso	68
Figura 44	Perfil de Densidade - Plano XY em z=14.9m - t = 11.286s - Cenário C - Com Quebra Ondas Poroso	68
Figura 45	Perfil de Densidade - Plano XY em z=14.925m - t = 4.104s (Esquerda) e t=11.286s (Direita) - Cenário C - Com Quebra Ondas Poroso	69
Figura 46	Perfil de Densidade - Plano XY em z=15 m - t = 4.104s (Esquerda) e t=11.286s (Direita) - Cenário C	69
Figura 47	Perfil de Fração Volumétrica - x=0 m - Cenário C - Antes do Vertedor	70
Figura 48	Perfil de Fração Volumétrica - x=0 m - Cenário C - Antes do Vertedor	70
Figura 49	Perfil de Densidade – Gás Natural - x=0 m - Antes do Vertedor	71

Figura 50	Esquema representativo do processamento de óleo	71
Figura 51	Perfil de Fração Volumétrica - Óleo - $x=0$ m - Pós Vertedor.	71
Figura 52	Perfil de Densidade - Plano YZ em $x=0$ m - Cenário A	72
Figura 53	Perfil de Densidade - Plano YZ em $x=0$ m - Cenário B	72
Figura 54	Perfil de Densidade - Plano YZ em $x=0$ m - Cenário C	73
Figura 55	Perfil de Densidade - Plano YZ em $x=0$ m - Cenário D	73
Figura 56	Linha (Polyline) - $Z=14,79$m - $2.8 < y < 2.8$.	74
Figura 57	Altura de líquido - $Z=14,79$m - $2.8 < y < 2.8$ - Cenário C - Com Quebra Ondas Porosos - Periodicidade	74
Figura 58	Tempo (s) x Y (m) - Cenário A - Com Quebra Ondas Porosos	75
Figura 59	Fração Volumétrica da água x Y(m) - Cenário A - Com Quebra Ondas Porosos	76
Figura 60	Tempo (s) x Y (m) - Cenário B - Com Quebra Ondas Porosos.	76
Figura 61	Fração Volumétrica da água x Y(m) - Cenário B - Com Quebra Ondas Porosos	77
Figura 62	Tempo (s) x Y (m) - Cenário C - Com Quebra Ondas Porosos	77
Figura 63	Fração Volumétrica da água x Y(m) - Cenário C - Com Quebra Ondas Porosos	78
Figura 64	Tempo (s) x Y (m) - Cenário D - Com Quebra Ondas Porosos	78
Figura 65	Fração Volumétrica da água x Y(m) - Cenário D - Com Quebra Ondas Porosos	79
Figura 66	Comparação - Tempo (s) x Y (m) - Cenário A - Com e sem a presença de Quebra Ondas Porosos	80
Figura 67	Comparação - Tempo (s) x Y (m) - Cenário B - Com e sem a presença de Quebra Ondas Porosos	80
Figura 68	Comparação – Tempo (s) x Y (m) - Cenário C - Com e sem a presença de Quebra Ondas Porosos	81
Figura 69	Comparação – Tempo (s) x Y (m) – Cenário D – Com e sem a presença de Quebra Ondas Porosos	81
Figura 70	Fração Volumétrica de água acima da saída de óleo x y (m) - Cenário A - Com Quebra Ondas Porosos	82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	Sistemas de Produção e os tipos de sistemas de separação instalados - Bacia do Espírito Santo e Bacia de Santos	5
Tabela 2	Sistemas de Produção e os tipos de sistemas de separação instalados - Bacia de Campos	6
Tabela 3	Principais Especificações dos fluidos após o Processamento primário	11
Tabela 4	Principais Dimensões do equipamento	53
Tabela 5	Parâmetros para uma malha de boa qualidade	53
Tabela 6	Propriedades das malhas utilizadas no teste de malha - Quebra Onda Não Poroso	54
Tabela 7	Propriedades das malhas utilizadas no teste de malha - Quebra Onda Poroso	55
Tabela 8	Parâmetros de simulação utilizados no teste de malha – Quebra Onda Não Poroso	56
Tabela 9	Parâmetros de simulação utilizados no teste de malha - Quebra Onda Poroso	56
Tabela 10	Parâmetros utilizados	57
Tabela 11	Dados de vazão e propriedades físicas dos fluidos	60
Tabela 12	Os quatro cenários de diferentes proporções água/óleo simulados.	61
Tabela 13	Frações Volumétricas de água e altura da interface água/óleo de acordo com os cenários analisados	61

1. Introdução

1.1 Motivação

Por ser a principal fonte de energia do planeta, o petróleo é um fator geopolítico cada vez mais importante em um mundo cada vez mais globalizado. Devido a sua importância, a exploração e produção de petróleo são cada vez mais estudadas.

A maior parte das reservas brasileiras está localizada em alto mar, sendo extremamente importante para o país, o desenvolvimento de tecnologia na exploração e produção de petróleo *offshore*. Após a extração do petróleo do poço, ele precisa passar por um pré-processamento antes de ser enviado para o continente, já que além da fase oleosa são extraídos gás e água.

Porém, a água é indesejada, sendo um dos principais contaminantes do petróleo. Sua concentração no petróleo extraído varia em função de alguns fatores como: características do reservatório, maturidade do poço produtor (em geral quanto maior o tempo de produção, maior o teor de água) e método de recuperação utilizado (injeção de água, vapor) (THOMAS et al, 2004).

A alta concentração de impurezas na água, como sais inorgânicos e microorganismos presentes (bactérias e algas que excretam substâncias corrosivas), apresentam riscos às tubulações empregadas na operação, como oleodutos, que podem sofrer corrosão com consequências graves, como vazamentos e perda de vidas humanas. A presença de água também apresenta riscos no transporte de gás, pois a sua presença em condições operacionais de gasodutos (baixas temperaturas e altas pressões) pode levar à formação de hidratos, provocando o entupimento de linhas.

A grande diferença de densidade entre as fases gasosa (gás natural) e líquida (água e óleo) facilita a separação do gás. Porém, a separação da água do petróleo é um pouco mais complexa, pois embora os fluidos sejam imiscíveis, estes ascendem à superfície sob a forma de emulsões. Essas emulsões, ao chegarem às unidades de pré-processamento, apresentam estabilidade variável, relacionada, principalmente, à concentração de agentes emulsificantes

como asfaltenos e componentes mais polares e pesados do petróleo, que atuam na interface água-óleo, reduzindo a tensão interfacial e promovendo a dispersão de uma fase na outra (HONSE, 2011).

Um dos principais equipamentos responsáveis por esse processamento é o separador gravitacional. Os separadores gravitacionais são equipamentos pressurizados que promovem a separação das fases misturadas (água, óleo e gás) além de absorver as flutuações da carga devido às características do escoamento multifásico proveniente do reservatório (FILGUEIRAS, 2005).

O separador gravitacional água-óleo normalmente é composto por uma estrutura cilíndrica horizontal com uma grande razão comprimento/diâmetro e utiliza a diferença de densidade entre a água e o óleo para efetuar a separação física entre as duas fases por decantação, sob a ação da gravidade.

Um dos principais problemas enfrentados na operação de separadores gravitacionais em plataformas *offshore* é o aumento da formação de emulsões água-óleo associado à intermitência na carga de entrada e ao movimento relativo da plataforma que diminui a eficiência de separação devido ao transbordo de água sobre o vertedor de óleo.

1.2 Objetivo

O presente trabalho busca estudar a influência de um dos movimentos relativos das plataformas de produção *offshore* no desempenho de separadores gravitacionais trifásicos por meio da técnica de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*). Assim, será estudada a influência do movimento do tipo Jogo (*Roll*) sobre a eficiência de separação do separador gravitacional.

2. Processamento Primário dos Fluidos

O principal objetivo da exploração é produzir e vender óleo cru. Além desse fluido, o poço também irá produzir outros compostos como gás natural, água, sedimentos em suspensão, principalmente areia, e elementos nocivos à saúde humana como o enxofre. Alguns desses compostos possuem valor e são utilizados como matérias-primas por outras indústrias. O asfalto, por exemplo, é utilizado na pavimentação de estradas e o gás natural pode ser também utilizado para geração de eletricidade (LANGSTON, 2011).

Como a água e as impurezas não são o objetivo de exploração, a instalação de uma unidade de processamento na boca do poço é necessária para separá-las, representada pelo esquema apresentado na Figura 1. Essas unidades são responsáveis pela retirada das impurezas em suspensão além da separação da água, do óleo e do gás. Após essa separação é possível tratar e condicionar os hidrocarbonetos para que possam ser transportados e posteriormente processados em refinarias e unidades de processamento. A água, subproduto da produção, é tratada para descarte ou posterior reinjeção.

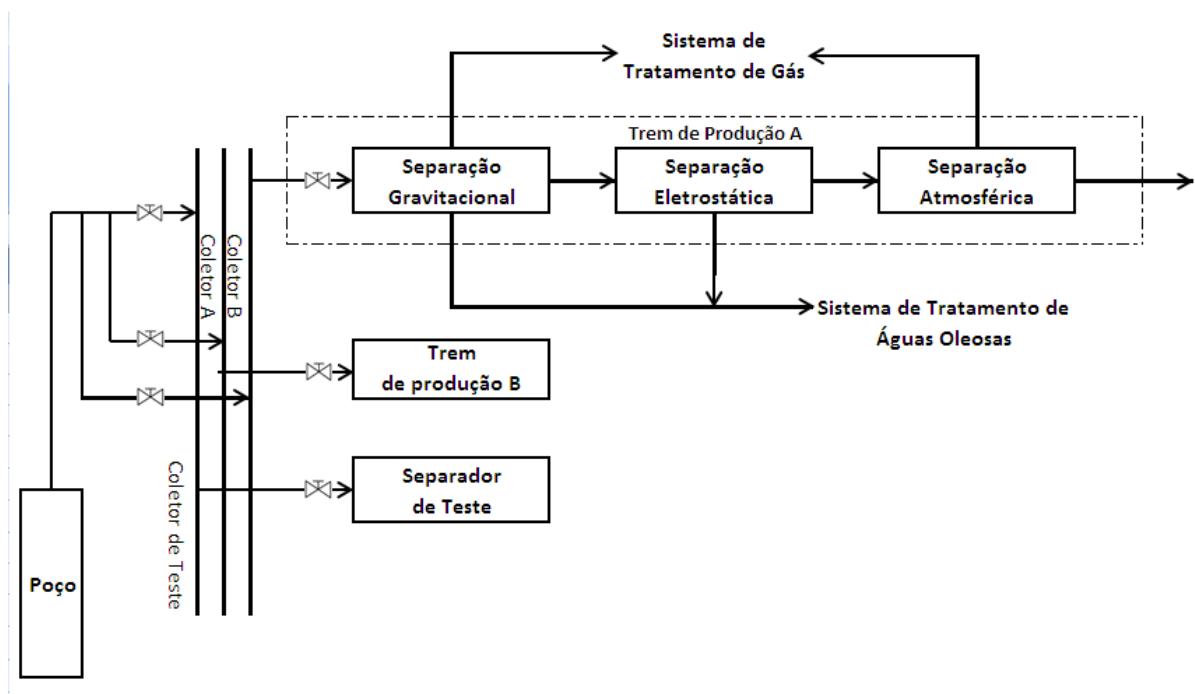


Figura 1. Esquema representativo do processamento de óleo.

A complexidade e a capacidade da planta de processamento dependem das características do fluido produzido e da bacia explorada. Considerando que todos esses elementos são produzidos em quantidades distintas em cada poço, vasos específicos dentro de baterias de tanques são projetados para efetuar o processamento. Condições especiais devem ser levadas em consideração como, por exemplo, a produção de altos níveis de gás sulfídrico (sulfeto de hidrogênio) (LANGSTON, 2011).

As plantas que efetuam apenas a separação gás-líquido são as mais simples enquanto que as mais complexas realizam também o tratamento e a estabilização do óleo além de condicionar e comprimir o gás para exportação. As plantas com separação gás-líquido apenas separam o gás, possuindo apenas coletores de produção, separadores bifásicos, tanques acumuladores e sistemas de transferência e medição. Nesse sistema, a água é exportada em conjunto com o óleo, sendo separada apenas numa unidade de processamento posterior não havendo então o descarte (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

As plantas mais complexas, que realizam a separação trifásica e a estabilização, possuem uma maior quantidade de equipamentos e operações. Além dos equipamentos indicados acima, ela contém permutadores de calor, separadores trifásicos, instalações para tratamento do gás e tratador eletrostático (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

A primeira unidade do sistema de processamento é a válvula para controle de vazão, localizada na cabeça do poço. Nessa válvula, projetada de acordo com os critérios estabelecidos pela engenharia de reservatórios, está o ponto onde ocorre a maior perda de carga localizada entre o reservatório explorado e o primeiro separador. Quando a unidade de processamento é ligada a dois ou mais poços produtores, a instalação de um *manifold* de produção se torna necessária para que haja o controle das vazões e pressões dos diversos poços na entrada da unidade de processamento primário (THOMAS et al, 2004).

As Bacias de Campos, Santos e Espírito Santo possuem vários sistemas de produção (Tabelas 1 e 2) operando em diversas áreas e distribuídos da seguinte forma: Tipo 1 (sem separação de fluidos); Tipo 2 (com separação bifásica); Tipo 3 (com separação trifásica); Tipo 4 (com separação trifásica e tratamento eletrostático) e Tipo 5 (somente com o tratamento eletrostático) (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007):

Tabela 1. Sistemas de produção e os tipos de sistemas de separação instalados – Bacia do Espírito Santo e Bacia de Santos (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

PLATAFORMA	CAMPO	CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO DE ÓLEO (bpd)	TIPO DE PLATAFORMA	TIPO DE SISTEMA
UN-RIO				
P40/P38	MARLIM-SUL-MÓD 1	156.000	SS/FSO	4
P43	BARRACUDA	150.000	FPSO	4
P48	CARATINGA	150.000	FPSO	4
P50	ALBACORA LESTE	180.000	FPSO	4
FPSO MLS	MARLIM-SUL-MÓD 1	100.000	FPSO	4
FPSO BRASIL	RONCADOR	90.000	FPSO	4
P51-2008	MARLIM-SUL-MÓD 2	180.000	SS	4
P52-2007	MARLIM-SUL-MÓD 2	180.000	SS	4
P53-2007	MARLIM LESTE	180.000	FPU	4
P54-2007	RONCADOR-MÓD 2	180.000	FPSO	4
P55-2010	RONCADOR-MÓD 3	180.000	SS	4
UN-ES				
FPSO CAPIXABA	GOLFINHO	100.000	FPSO	4
FPSO SEILLEAN	GOLFINHO	20.000	FPSO	2
P34-2006	JUBARTE	60.000	FPSO	4
FPSO CIDADE DE VITÓRIA-2007	GOLFINHO-MÓD 2	100.000	FPSO	4
P57-2010	JUBARTE-MÓD 2	180.000	FPSO	4
UN-BS				
SS-11/FSO AVARÉ	CORAL/ESTRELA DO MAR	20.000	SS/FSO	4

Tabela 2. Sistemas de produção e os tipos de sistemas de separação instalados – Bacia de Campos (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

PLATAFORMA	CAMPO	CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO DE ÓLEO (bpd)	TIPO DE PLATAFORMA	TIPO DE SISTEMA
PVM1	VERMELHO	13.000	FIXA	1
PVM2	VERMELHO	13.000	FIXA	1
PVM3	VERMELHO	13.000	FIXA	1
PCP1	CARAPEBA	15.000	FIXA	1
PCP2	CARAPEBA	15.000	FIXA	1
PCP3	CARAPEBA	20.000	FIXA	1
PPG1	PARGO	26.500	FIXA	4
PNA1	NAMORADO	40.000	FIXA	3
PNA2	NAMORADO	60.000	FIXA	3
PCH1	CHERNE/BAGRE	50.000	FIXA	3
PCH2	CHERNE	60.000	FIXA	3
PCE1	ENCHOVA/BONITO	86.000	FIXA	2
PPM1	PAMPO	85.000	FIXA	4
PGP1	GAROUPA/GAROUPINHA	200.000	FIXA	4
SS06	ÁREA SUL	170.000	SS	5
P07	BICUDO	50.000	SS	2
P08	MARIMBÁ	52.000	SS	3
P09	CORVINA/MALHADO/CO NGRO	40.000	SS	2
P12	LINGUADO	50.000	SS	2
P15	PIRAÚNA	45.000	SS	2
P18	MARLIM	110.000	SS	3
P19	MARLIM	100.000	SS	4
P20	MARLIM	65.000	SS	2
P25	ALBACORA	100.000	SS	2
P26	MARLIM	125.000	SS	4
P27	VOADOR	50.000	SS	4
P31	ALBACORA	100.000	FPSO	4
P32	MARLIM	120.000	FSO	5
P33	MARLIM	60.000	FPSO	4
P35	MARLIM	130.000	FPSO	4
P37	MARLIM	180.000	FPSO	4
P47	MARLIM	150.000	FPSO	5
ESPF	ESPADARTE	100.000	FPSO	4
FPSO CIDADE DO RIO DE JANEIRO (12/2006)	ESPADARTE	100.000	FPSO	4

2.1 Processamento do Gás Natural

O principal objetivo do processamento é a separação das três fases (água/gás/óleo). Para efetuar essa separação são utilizados equipamentos conhecidos como separadores. Esses separadores podem ser bifásicos ou trifásicos podendo atuar em série ou em paralelo. O separador bifásico efetua a separação gás/liquido enquanto que o separador trifásico efetua a separação gás/líquido e também a separação água/óleo. O número de estágios é determinado pela pressão do sistema e pelas características do fluido processado.

O processamento do gás é composto basicamente por três operações principais: compressão, remoção de contaminantes (CO_2 , H_2S e Mercúrio) e desidratação para a sua exportação para o continente através do gasoduto ou para sua utilização na própria plataforma.

Em terra o gás é processado em uma UPGN (Unidade de Processamento de Gás Natural). Nessa unidade é realizada mais uma desidratação do gás e o fracionamento dele, gerando gás natural combustível (GNC), gás liquefeito de petróleo (GLP) e uma fração conhecida como Gasolina Natural (THOMAS et al, 2004).

Na plataforma, o gás pode ser utilizado como combustível, podendo ser utilizado essencialmente no acionamento dos turbogeradores (utilizados na plataforma para gerar energia elétrica) e/ou turbocompressores. Também é usado na circulação do poço no método conhecido como *gas lift*, onde é injetado na base da coluna de produção para garantir o escoamento dos fluidos presentes no reservatório para a unidade de processamento.

Um dos maiores problemas na exportação do gás da plataforma para o continente é ocasionado pela presença de água. A presença da água associada às condições encontradas durante o escoamento, pressão alta e baixas temperaturas, propicia a formação de hidratos de metano. Esses hidratos (Figuras 2 e 3) têm o potencial para entupir as tubulações causando sérios danos à operação (THOMAS et al, 2004).

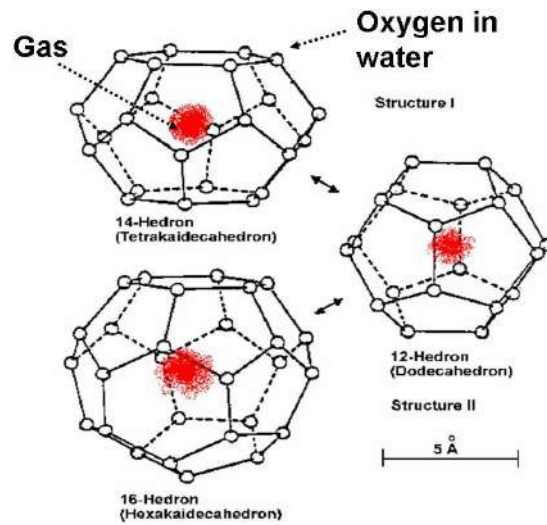


Figura 2. Estrutura do Hidrato (USCG, 2002).



Figura 3. Hidrato formado em linha de produção (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

Conforme as especificações para Gás Natural presentes na resolução N° 16/2008 da Agência Nacional de Petróleo (ANP), o máximo aceitável é de 3 a 5 libras por milhão de pé cúbico (lb/Mscf) sendo a especificação interna da Petrobras mais rígida (máximo 2 lb/Mscf) (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

2.2 Processamento do Óleo

Durante o processamento do petróleo, a separação da água e do óleo é essencial para a exportação do óleo. Embora água e óleo sejam imiscíveis, o percurso desses fluidos do reservatório até a superfície, o bombeamento, transporte e expansão dos fluidos produzidos fazem com que esses líquidos formem emulsões (THOMAS et al, 2004).

A água necessita ser retirada do óleo produzido, pois a sua presença aumenta a formação de emulsões com viscosidades superiores a do petróleo desidratado, além de possuir elevado teor de sal em sua composição. A remoção da água também evita o superdimensionamento dos sistemas de transferência e bombeio já que a presença de água no petróleo bombeado ocasiona um volume ocioso nos sistemas de transferência e na tancagem.

O sal presente na água gera problemas de incrustação no interior da tubulação, além de corrosão nas instalações de produção, transporte e refino. A composição e a concentração dos sais presentes na água de formação variam de acordo com as condições do reservatório. Sais de sódio, cálcio, magnésio, cloro, e, em menor extensão, de sulfatos são encontrados de forma mais frequente. Concentrações baixas, de 30 000 mg/l até 150 000 mg/l, são usualmente encontradas (COUTINHO, 2007).

Uma emulsão pode ser definida como uma mistura de dois líquidos imiscíveis, ou parcialmente miscíveis, que ao sofrer uma forte agitação são levados a um íntimo contato, ocorrendo então a dispersão de um dos líquidos no outro (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007). A estabilização ocorre graças à presença de agentes emulsificantes, formando gotículas de 0,1-10 µm de diâmetro (COUTINHO, 2007).

A água apresenta-se na fase óleo de acordo com a dimensão da sua gotícula dispersa (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007):

- livre, diâmetro de gota superior a 1.000 µm;
- dispersão grosseira, diâmetro de gota entre 100 e 1.000 µm;
- emulsão pouco resistente ao tratamento, diâmetro de gota entre 20 e 100 µm;
- emulsão resistente ao tratamento, diâmetro de gota entre 0,5 e 20 µm;
- dispersão coloidal, diâmetro de gota é inferior a 0,5 µm;

- água solúvel, quando a água se encontra solubilizada a nível molecular no óleo.

A desestabilização dessas emulsões é feita através da ação do calor, eletricidade e adição de agentes desemulsificantes (óxido de propileno e copolímeros de óxido de etileno) através do rompimento da película que circunda as gotículas de água, facilitando então a coalescência das gotas e a posterior sedimentação gravitacional (THOMAS et al, 2004).

A temperatura atua na desestabilização das emulsões já que o aquecimento (geralmente na faixa de 45° a 60°C) (GONGLUN, 2005) da emulsão leva a redução no valor da viscosidade do meio. E segundo a lei de Stokes, essa redução leva a um aumento na velocidade de sedimentação das gotas (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

A adição de desemulsificantes desloca os emulsificantes naturais localizados na superfície das gotas, permitindo a coalescência das mesmas. O procedimento é ilustrado na Figura 4. Primeiramente, o desemulsificante chega à interface e desloca os emulsificantes naturais, desestabilizando a emulsão. Após a desestabilização, ocorre a coalescência das gotas em gotas de maior tamanho e peso, o que favorece a sedimentação das mesmas (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

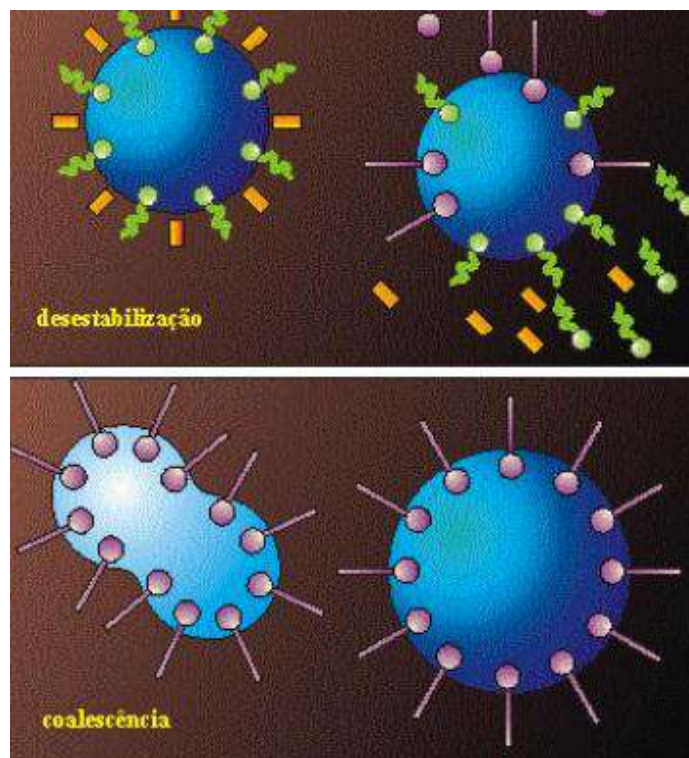


Figura 4. Ação de agentes desemulsificantes (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

A utilização de campos elétricos de alta voltagem (15.000 a 50.000V) é outra maneira amplamente utilizada para desestabilizar as emulsões, já que a presença deles faz com que as gotículas de água dispersas no óleo alinhem-se (Figura 5) então na mesma direção do campo com polos induzidos de sinais opostos, o que cria uma força de atração que provoca então a coalescência. Os tratadores eletroestáticos são encontrados com frequência em sistemas de produção *offshore* (THOMAS et al, 2004).

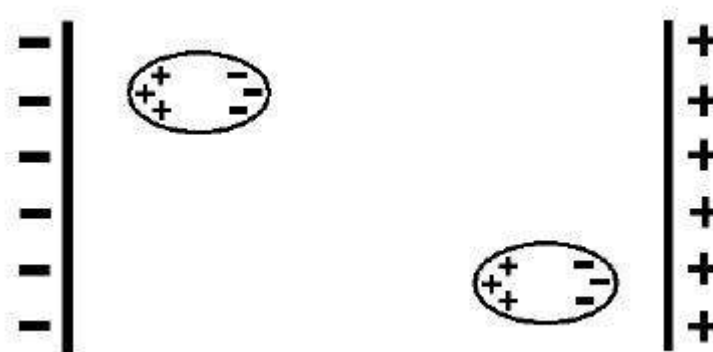


Figura 5. Formação do dipolo induzido (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

O óleo após passar por todos esses processos não pode ser enviado para a refinaria com mais de 1% de água e sedimentos (BS&W) e uma concentração de sais dissolvidos na água maior que 570 mg/L, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Principais Especificações dos fluidos após o Processamento Primário (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

CORRENTE	PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Gás	Teor de água	máx. 3 a 5 lb/Mscf (Petrobras: 2lb/Mscf)
	Teor de H ₂ S	máx. 10 a 15 ppm
	Teor de inertes, CO ₂	máx. 4% vol (Petrobras:2% vol)
Óleo	BS&W	Refino: máx 1%
		Exportação: máx 0,5%
Água Produzida	Teor de Sais	Refino: máx 570mg/L (em NaCl)
		Exportação: máx 285mg/L (em NaCl)
Água Produzida	TOG	máx.20 ppm
	Temperatura	40°C

2.3 Processamento da Água Oleosa

A corrente de água resultante do separador trifásico segue para uma unidade de tratamento que consiste de hidrociclones *de-oilers* e uma unidade de flotação, de modo que a concentração de óleo na água atenda à legislação ambiental (THOMAS et al, 2004).

O descarte da água deve atender às especificações regulamentadas pelo órgão de controle do meio-ambiente responsável que limita a quantidade de poluentes (graxa, H₂S, teor de óleo, etc.) nos efluentes líquidos. Alguns números dão a real dimensão do problema: dados de 2003 estimam a produção mundial de água de produção em torno de 77 bilhões de barris, sendo 1 bilhão apenas no Golfo do México (VEIL, 2008).

Conforme exigência da Resolução CONAMA 393/07, a água proveniente da unidade de tratamento deverá ser adequada ao teor máximo médio mensal de 29 ppm de óleo com valor máximo de 42 ppm. Nos Estados Unidos (Golfo do México) o teor máximo de óleo não deve exceder os mesmos 29 mg/L legislados no Brasil e no Mar do Norte a concentração média mensal foi reduzida para 30 mg/L após décadas de descarte com uma concentração de 40 mg/L (VEIL, 2008).

O descarte do efluente tem que ser feito com cuidado para não causar danos ao meio ambiente pelos seguintes motivos:

- composição: Presença de óleo, sais e outros compostos nocivos ao meio ambiente, temperatura elevada e ausência de oxigênio.

- volume: Quanto maior a idade do poço, maior é o volume de água produzida. Em geral, para cada barril de petróleo produzido são extraídos de três a quatro barris de água. Em certos campos esse número pode subir para um valor acima de sete. O volume de água produzida corresponde a 98% de todos os efluentes gerados nas atividades de exploração, perfuração e produção (THOMAS et al, 2004).

A água pode ser descartada após o seu tratamento, contanto que o sistema de descarte seja projetado e concebido para proporcionar uma grande diluição dos efluentes. Os poluentes são

então degradados pelas forças naturais existentes no mar, não causando danos ao meio marinho. A água oleosa também pode ser utilizada em métodos de recuperação adicional de óleo, contanto que os custos e as características do reservatório sejam favoráveis.

3.Separadores Gravitacionais

3.1 Aplicação na Indústria do Petróleo

Os separadores de óleo-água são usados em instalações de exploração *onshore* e *offshore*. As instalações de separação e tratamento em instalações de produção de petróleo normalmente incluem equipamentos cujo principal propósito é a separação dos fluidos produzidos no poço em frações comercializáveis e efluentes (THOMAS et al, 2004).

Uma grande variedade de equipamentos é utilizada para separar e tratar os fluidos produzidos. Alguns deles operam em condições de baixa pressão enquanto outros operam a altas pressões. O equipamento conhecido como separador de água livre (*free-water knockout*) (Figura 6) é geralmente utilizado para separar grande volume de água do óleo e do gás gerado nos poços. Um separador de 2 fases separa os fluidos produzidos em líquido (óleo, emulsão água/óleo, água) e gás. O líquido sai no fundo do separador e o gás sai pelo topo (EPA, 2013).

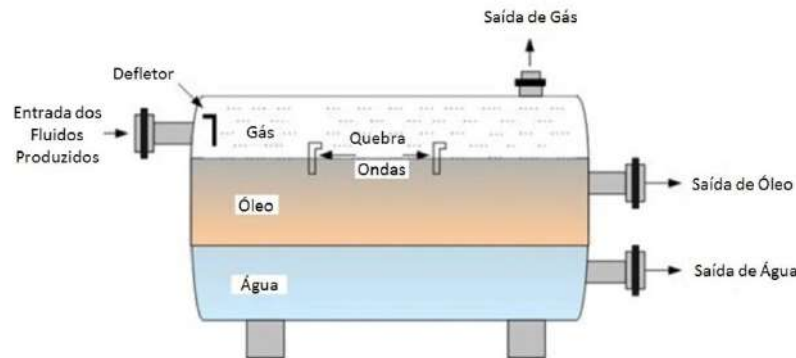


Figura 6. Separador de Água Livre (EPA, 2013).

Os tanques de lavagem, também conhecidos como *Gun Barrels* (Figura 7), são geralmente encontrados em campos antigos e marginais. São muito utilizados por permitir o tempo de residência suficiente para a água de produção sedimentar no fundo. Separadores trifásicos separam a água do líquido e o líquido em óleo e água. Como no separador bifásico, o gás sai pelo topo e o líquido pelo fundo, porém em duas saídas: uma no meio e outra no fundo no caso do separador vertical e duas no fundo no caso do separador horizontal.

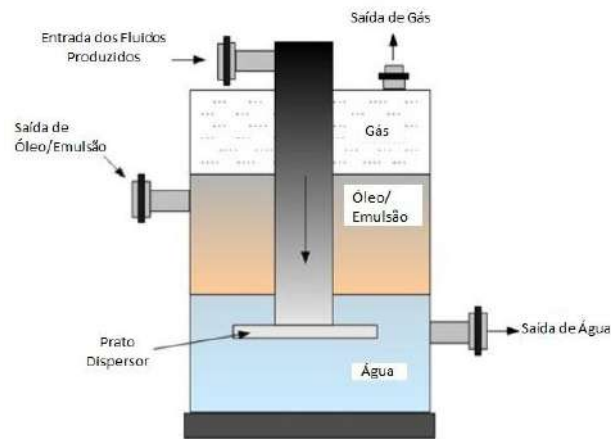


Figura 7. Tanque de Lavagem (EPA, 2013).

Separadores trifásicos são geralmente utilizados quando há água livre junto ao óleo extraído. Se há pouca ou quase nenhuma água livre, o separador bifásico pode então ser utilizado. Outro equipamento amplamente utilizado é o separador aquecido. Esse equipamento utiliza calor, eletricidade e produtos químicos para reduzir a viscosidade da emulsão e separar o óleo, a água e o gás (EPA, 2013).

Numa unidade de processo convencional o separador gravitacional trifásico é o primeiro equipamento do sistema de separação. Além de efetuar a separação da mistura em três correntes (água, óleo e gás), o separador trifásico também tem como função amortecer as perturbações de carga (conhecidas como *golfadas* ou *slugs*), características do escoamento multifásico que vem do reservatório. Ou seja, ele recebe uma vazão flutuante e fornece aos equipamentos a jusante uma vazão mais estável (DOMENICO, 2009).

Devido à sua importância, esses equipamentos têm sido alvo de diversos estudos que visam melhorias na sua eficiência com modificações de seus dispositivos internos e análise do tempo de residência ideal dos fluidos dentro do equipamento. Essas melhorias visam à redução nos custos através da redução do tamanho e peso dos equipamentos e através do aumento da eficiência operacional.

3.2 O Equipamento

Os separadores gravitacionais são vasos cilíndricos que podem estar dispostos na forma horizontal ou vertical (Figura 8), operar à alta ou baixa pressão, atuar em série ou em paralelo, e ser bifásico ou trifásico (SANTANNA, 2011).

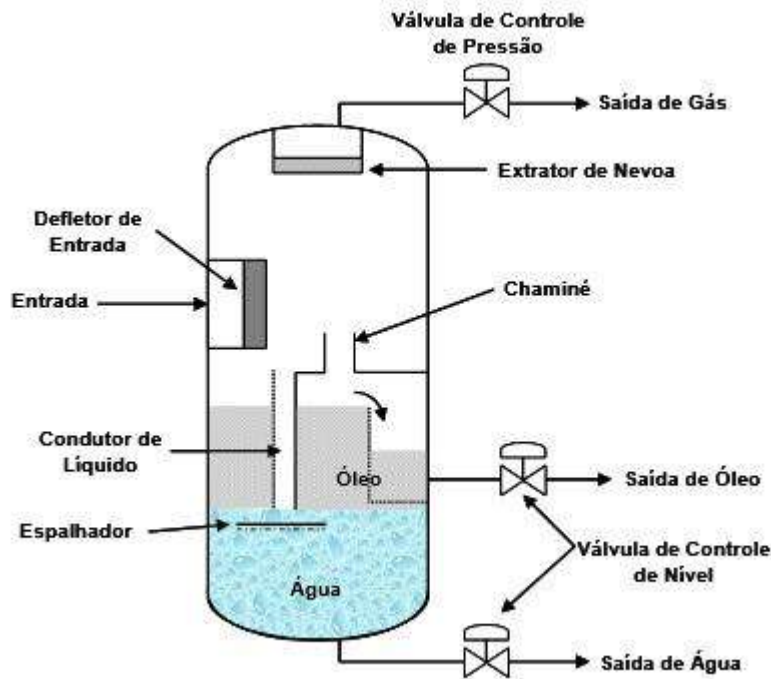


Figura 8. Separador Trifásico Vertical (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

Os separadores horizontais são mais utilizados, pois geralmente são os que apresentam maior eficiência para grandes volumes de produção de gás e óleo. A separação entre as fases líquido/gás (separador bifásico) e líquido/líquido (separador trifásico) é facilitada pelo maior número de estágios, maior tempo de retenção e maior área superficial de interface (SILVA, 2004).

Em compensação, os separadores verticais (Figura 9) ocupam um menor espaço na plataforma em relação aos horizontais, além de suportar melhor as grandes variações de fluxo (golfadas) e ter maior capacidade de manuseio dos sólidos produzidos, já que a sua geometria permite a deposição localizada no fundo do vaso, o que facilita a remoção dos sólidos (THOMAS et al, 2004).



Figura 9. Separador Vertical (LAKSEL, 2012).

Além da geometria, os equipamentos podem ser classificados em relação ao objetivo da sua separação. Quando o objetivo é estabilizar o óleo produzido, ou seja, retirar os compostos voláteis do petróleo que evaporam em condições de pressão atmosférica (“gás dissolvido”), o separador é classificado como separador atmosférico. Quando o objetivo é retirar o máximo de água livre em condições normais de temperatura e pressão, o separador é conhecido como separador de água livre. Se o objetivo do equipamento é separar a água com condições apropriadas para descarte, o equipamento é conhecido como separador de produção (AMBROSIO, 2007).

A separação das gotículas de água do óleo cru nesses equipamentos é promovida pela ação gravitacional sobre fluidos imiscíveis com diferentes densidades e pelas barreiras físicas instaladas em seu interior (STORMWATER, 2006). Esses fluidos imiscíveis se separam após um tempo de residência dentro do separador com os fluidos mais leves no topo e os fluidos mais pesados no fundo.

A separação pela ação gravitacional segue a lei de Stokes, como mostrado na equação (1). Desenvolvida pelo matemático inglês George Stokes em 1845, essa lei descrevia inicialmente a relação física que governa a sedimentação de partículas sólidas em líquidos em regimes laminares. A mesma relação é aplicável na descrição da movimentação de gotículas de um líquido com menor densidade em outro líquido de maior densidade.

$$V_t = \frac{g D_{\text{água}}^2 (\rho_{\text{água}} - \rho_{\text{óleo}})}{18 \mu_{\text{óleo}}} \quad (1)$$

Nessa equação, o V_t é a velocidade terminal das gotículas de água, $\mu_{\text{óleo}}$ é a viscosidade do óleo, $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água, $\rho_{\text{óleo}}$ é a densidade do óleo, $D_{\text{água}}$ é o diâmetro da partícula de água e g é a aceleração da gravidade.

A taxa de subida das gotículas de óleo também é governada pela lei de Stokes, sendo necessário apenas conhecer o tamanho das partículas, as densidades dos fluidos envolvidos e a viscosidade do meio. Dentre as considerações feitas por Stokes, estão:

1ª Fluxo laminar

2ª As partículas são esféricas

Levando em conta essas três considerações, o cálculo da velocidade pela lei de Stokes é uma simplificação das condições reais encontradas em campo já que nem todas as gotículas são esféricas ou do mesmo tamanho, pois elas tendem a coalescer e formar gotículas maiores (Figura 10).

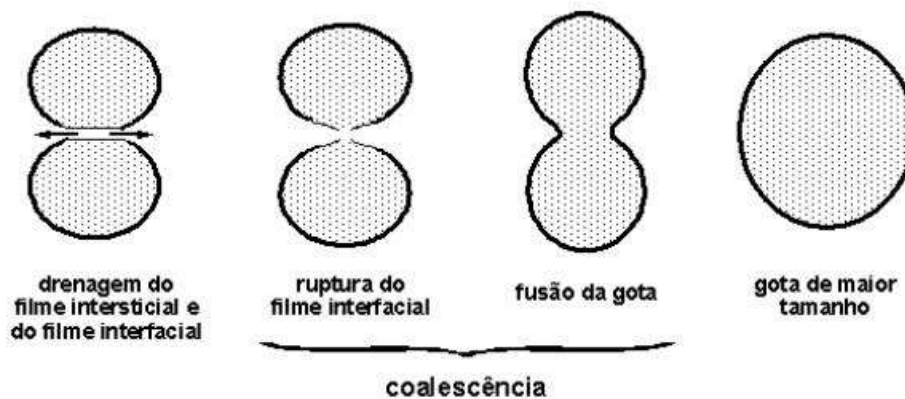


Figura 10. Fenômeno da coalescência (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007).

Partículas com diâmetros muito pequenos não seguem a lei de Stokes, pois o movimento aleatório das moléculas do meio é suficiente para anular a ação da gravidade, fazendo com que elas se movimentem em movimentos aleatórios. Esse movimento aleatório é conhecido como movimento browniano. Porém, como o volume dessas partículas é muito pequeno, as quantidades de óleo na fase aquosa e de água na fase oleosa são desprezíveis devido ao movimento aleatório dessas pequenas partículas.

Os mais eficientes separadores de água e óleo são projetados para explorar a lei de Stokes. Para a partícula sedimentar, o projeto do separador deve levar em conta os seguintes critérios: escoamento laminar contínuo ($Re_{part} < 500$) e a velocidade do fluxo horizontal não deve exceder em 15 vezes a velocidade de deposição (API, 1990).

A partir da velocidade terminal, o tempo de residência das gotículas de água é relacionado à distância percorrida por elas, até que se separem do óleo, que para fins de simplificações, pode ser aproximada pela distância entre o centro e o fundo do separador, isto é, seu raio, como mostrado na Figura 11.

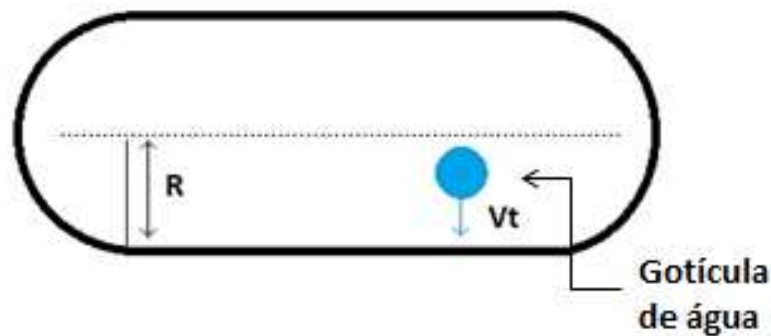


Figura 11. Distância percorrida pela gotícula de água até a completa separação do óleo.

O tempo de residência das gotículas de água é determinado então pela velocidade terminal das partículas e pela distância percorrida por elas.

Além da ação da gravidade e da diferença de densidade entre os fluidos, os separadores gravitacionais se baseiam também em outros mecanismos de separação:

- Força centrífuga: O efeito centrífugo age de forma diferente sobre as fases devido à diferença de densidade entre o líquido e o gás. A corrente de entrada tende a realizar um movimento circular pelo seu interior ao entrar no equipamento. Com isso, a fase de maior densidade é projetada contra as paredes, tendendo a descer, e a fase de menor densidade tende a subir.
- Separação inercial: Após a entrada dos fluidos no separador, há o choque dos fluidos com os dispositivos em seu interior, havendo então uma rápida redução de velocidade e uma mudança brusca na direção de fluxo, que provoca o desprendimento e a subida do gás além da queda do líquido.
- Aglutinação das partículas: As gotículas de fluido dispersas coalescem e se aglutinam com maior facilidade ao entrar em contato com uma superfície, levando à decantação das partículas (SANTANNA, 2011).

3.2.1 Dispositivos Internos

O separador de produção de uma plataforma de produção de petróleo do tipo FPSO simulado nesse trabalho tem com base o modelo usado nos trabalhos de AMBROSIO (2007) e SANTANNA (2011). Esse separador possui uma vazão de entrada e três vazões de saída (gás, água e óleo). Um separador de produção típico é composto por quatro seções (Figuras 12 e 13):

Na seção de separação primária localizada na entrada do vaso, o fluido (líquido e gás) ou se choca com os defletores, sofrendo uma mudança brusca de velocidade e direção do fluxo, ou sofre a ação de um difusor, que lhe impõe um movimento giratório fazendo com que as partículas se separem, deslocando o líquido para o fundo do separador por ação da gravidade. A turbulência é então diminuída, evitando assim o retorno do líquido para a fase gasosa (SANTANNA, 2011). É nessa seção que a maior parte da separação ocorre, já que as gotículas de maior diâmetro decantam.

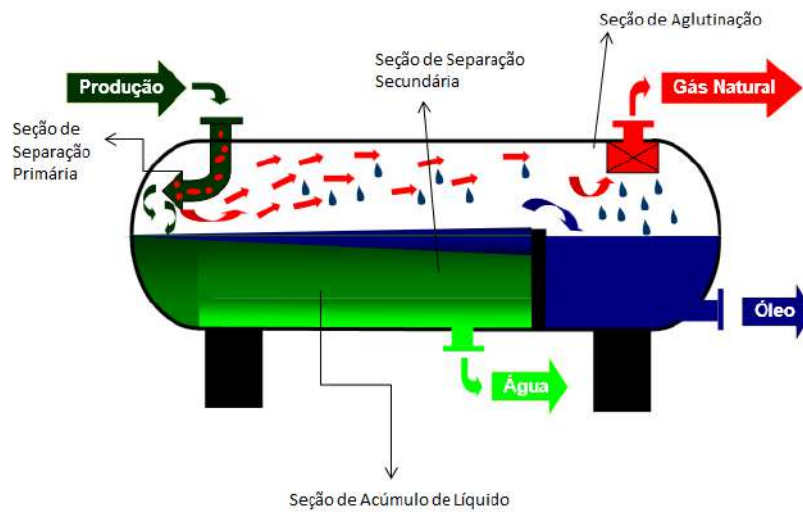


Figura 12. Seções de um separador de produção (adaptado de CUNHA, 2007).



Figura 13. Separador Gravitacional (LAKSEL, 2012).

O líquido então passa então para a segunda seção, a seção de acúmulo de líquido, localizada no fundo do vaso por um tempo de retenção de 3 a 4 minutos, suficiente para permitir a separação do resto do gás e de grande parte da água (separadores trifásicos) (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007). Além da separação bifásica (gás/líquido) esta seção deve permitir que o óleo e a emulsão formem uma camada, possibilitando também a separação de água (separadores trifásicos).

Na seção de separação secundária, as gotículas maiores de óleo, que estavam na fase gasosa, são decantadas. Algumas gotas tem diâmetro tão pequeno que não são removidas nesta fase de decantação (THOMAS et al, 2004). Como na primeira seção de separação, a turbulência é um fator essencial na eficiência da separação.

Na seção de aglutinação, localizada próxima à saída de gás, são removidas as gotículas de líquido arrastadas pela corrente gasosa. Essas gotículas são removidas do fluxo gasoso através de meios porosos com uma grande área de contato, o que facilita a coalescência e a decantação das gotículas (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007). Normalmente, essa seção é composta por aletas de metal, almofadas de tela de arame ou placas pouco espaçadas (THOMAS et al, 2004).

Os dispositivos internos presentes no interior do separador funcionam como barreiras que auxiliam na separação da mistura trifásica. Um dos mais importantes na separação é o dispositivo conhecido como vertedor. Essa chicana possui normalmente um formato de meia lua e impede a passagem da fase mais pesada (água) permitindo apenas a passagem da fase mais leve (óleo).

O vertedor é o que diferencia os separadores gravitacionais horizontais bifásicos dos trifásicos. O separador bifásico não possui essa chicana, logo a sua seção de acúmulo de líquido não é dividida, não havendo uma separação efetiva do líquido em duas correntes distintas.

Já o separador trifásico tem a seção de acúmulo de líquido dividida em duas partes: a câmara de água, onde se localiza a saída de água, e a câmara de óleo, onde se localiza a saída de óleo. Enquanto a água se deposita no fundo do separador na câmara de água, o transbordamento do óleo pelo vertedor efetua a separação entre as duas fases.

O controle do nível dos fluidos e a detecção da posição das interfaces nesses separadores são essenciais para a eficiência da operação. Por essa razão, é necessária a instalação de um indicador de nível, que informa a altura da interface água/óleo permitindo então que o sistema de controle, por meio de uma válvula controladora de nível de água, faça o controle da vazão de água que deixa o equipamento, permitindo então a manutenção da altura da interface na altura desejada (SANTANNA, 2011).

A altura da interface varia entre 50 e 70% do diâmetro do separador, sendo a configuração de 50% a mais comum. O nível de óleo na câmara de óleo e a pressão no interior do vaso também são medidos, permitindo o controle do fluxo de saída do gás na parte superior e da saída de óleo na parte inferior (na câmara de óleo) (THOMAS et al., 2004).

Outros dispositivos além do vertedor podem estar ou não presentes nos separadores, como:

- Quebra Ondas (Figura 14): Pedacos de disco estruturado localizados na parte superior do separador, parcialmente mergulhados no líquido e distribuídos a uma distância uniforme. Possuem como finalidade impedir a formação de espumas, favorecer a coalescência de gotículas de óleo e mitigar os efeitos da turbulência (Figura 15) gerada pelo fluxo multifásico e pela movimentação da plataforma (SANTANNA, 2011).



Figura 14. Quebra Onda (FMC, 2012).

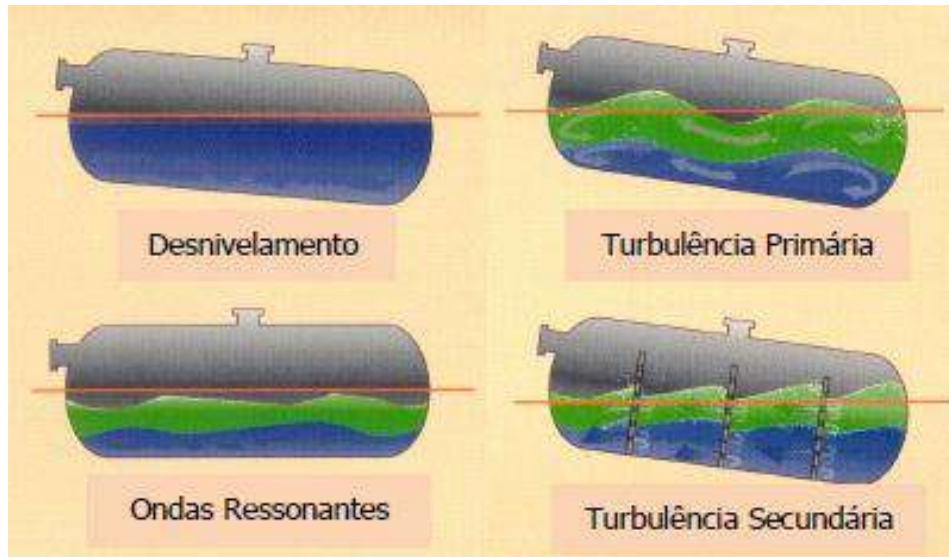


Figura 15. Turbulência causada na superfície do líquido presente no interior de separadores gravitacionais devido aos movimentos das plataformas (AMBROSIO, 2007).

- Eliminator de Névoa: Localizado após a seção de aglutinação, tem como função a separação de qualquer névoa, gotícula ou espuma que tenha sido carregada pelo fluxo de gás. Formado por um conjunto de placas (Figura 16) esse equipamento força a passagem do fluxo de gás por um caminho tortuoso, o que força o contato das gotículas às paredes provocando então a deposição das gotículas. Essa última etapa para a retirada dos traços de líquido da corrente de gás é essencial, já que alguns equipamentos que processam o gás, como por exemplos os compressores, são sensíveis à presença de líquidos (SANTANNA, 2011).

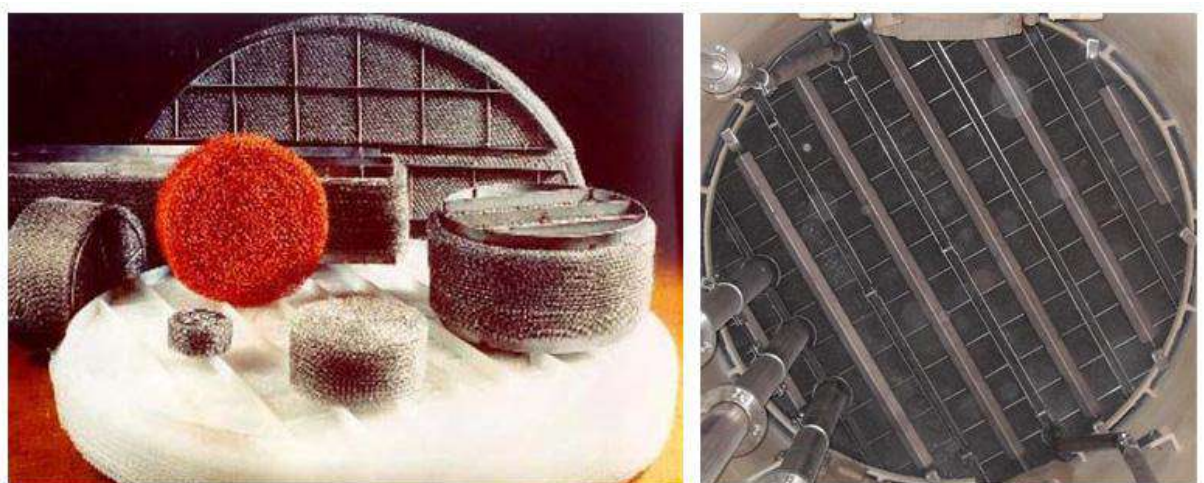


Figura 16. Eliminator de Névoa (LAKSEL, 2012).

- Dispositivos Ciclônicos: Situados na entrada do equipamento, esses dispositivos têm como função a separação do líquido presente no gás através da aceleração centrífuga, forçando o contato das gotículas com a parede.
- Sistema de Jateamento (Sand Jet System): Para evitar a acumulação de sólidos na parte inferior do vaso, um sistema de jato de areia é instalado tal como mostrado na Figura 17. O sistema de jateamento compreende tubos onde os bicos de jateamento e lavagem são instalados. Esse sistema facilita a retirada de areia e sólidos depositados no fundo do separador.

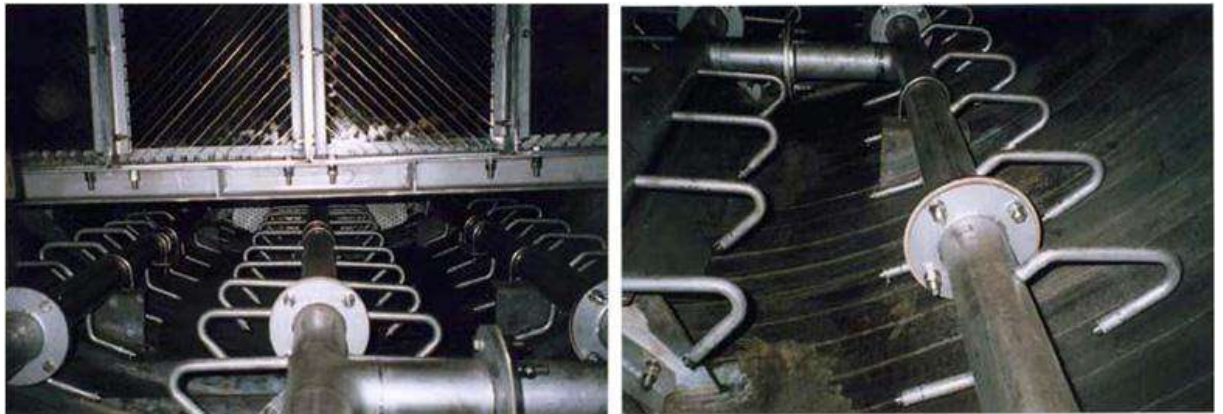


Figura 17. Sistema de Jateamento (LAKSEL, 2012).

- Defletor: Localizado na entrada do separador, tem como função diminuir a velocidade de escoamento do fluido após a entrada no equipamento além de distribuir o fluxo no equipamento.

3.2.2 Problemas Operacionais em Separadores

A operação do separador pode ser dificultada pelos seguintes problemas:

- Emulsões: a formação de emulsão na interface água/óleo pode causar sérios problemas ao operador, já que dificulta o controle de nível da interface. Além disso, há a redução do tempo de residência efetivo, diminuindo a eficiência da separação. A adição de produtos químicos como desemulsificantes e o calor minimizam a sua formação sendo os procedimentos mais adotados em caso de acúmulo de emulsões (THOMAS et al., 2004).

- Arraste: ocorre principalmente quando o nível de líquido está muito alto. Esse nível elevado pode ser fruto de uma operação superior à prevista em projeto ou então de algum dano existente em algum componente interno que resulte em formação de espuma e obstrução de líquido (THOMAS et al, 2004).
- Areia: eventualmente produzida em conjunto com o líquido e o gás, esse sedimento proveniente do reservatório causa erosão nas válvulas e obstrução de dispositivos internos. Removida por um sistema de jatos de areia e drenos como citado acima.
- Espuma: assim como as emulsões, dificulta enormemente o controle de nível da interface. O gás em geral tende a se separar com maior facilidade devido a sua menor densidade. Porém, a presença das impurezas presentes nos fluidos produzidos possibilita um maior arraste de gotas, gerando a formação da espuma. Além de ocupar um grande volume que poderia estar sendo preenchido pelo líquido, a espuma diminui drasticamente a área de escoamento do gás, aumentando o arraste de líquido pelo gás (LCO- Liquid Carry Over) (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007). Um dos procedimentos utilizados para combater a formação é o aquecimento dos fluidos e a utilização de antiespumantes, preferencialmente o silicone.
- Obstrução por parafinas: as parafinas são hidrocarbonetos saturados de elevado peso molecular que podem se separar do petróleo caso a temperatura de produção seja inferior à temperatura de formação de cristais (TIAC). Após a cristalização, elas são arrastadas pelo fluido até o separador gravitacional, onde com a redução de velocidade acabam se depositando e obstruindo linhas de transferência (UNIVERSIDADE PETROBRAS, 2007). As placas coalescedoras na seção líquida e os extratores de névoa na seção gasosa são mais suscetíveis a essas obstruções (THOMAS et al, 2004). A melhor forma de evitar a deposição é operar a temperaturas superiores a TIAC.

3.2.3 Influência dos Movimentos da Plataforma no Desempenho dos Separadores

A exploração de petróleo em alto-mar se desenvolve rapidamente rumo a novas fronteiras intransponíveis há poucas décadas atrás. O Brasil foi um dos pioneiros na exploração em águas profundas e impulsiona e investe em pesquisa neste sentido, pois a cada novo desafio,

novas ferramentas computacionais são requeridas de forma a prever o comportamento de unidades responsáveis por esta exploração (MARQUES, 2010).

Inicialmente, os navios eram usados somente nas operações de perfuração e completção de poços. Porém, com o passar do tempo, passaram a ser usados como unidades de produção e de armazenamento do petróleo produzido. Os FPSOs (*Floating, Production, Storage and Offloading*) são navios com capacidade para processar e armazenar o óleo produzido além de realizar a transferência do óleo e/ou gás natural (Figura 18) (MARQUES, 2010).



Figura 18. FPSO Cidade de Angra (Petrobras).

Porém, diferentemente das unidades produtoras *onshore*, essas unidades de produção estão sujeitas a ação de ondas, ventos e correntezas. A movimentação proveniente desses fenômenos naturais pode levar a perdas de eficiência da planta de processamento e até interromper a produção (MENEZES, 2011).

Levando em consideração os movimentos das ondas do mar, uma FPSO pode apresentar seis diferentes movimentos oscilatórios: três de rotação, que são movimentos angulares (*roll* ou jogo, *pitch* ou arfagem, *yaw* ou guinada) e três de translação, que são movimentos lineares (*heave* ou afundamento, *surge* ou avanço, *sway* ou deriva). Os movimentos que trazem mais problemas operacionais ocorrem no plano vertical (SANTANNA, 2011). A Figura 19 apresenta uma representação dos movimentos.



Figura 19. Movimentos da plataforma devido à incidência de ondas do mar(AMBROSIO, 2007).

Se o navio está ancorado, alguns movimentos podem ser negligenciados. Normalmente as FPSOs estão equipadas com um sistema de Turret (Figura 20) para estabilizar a unidade. Esse arranjo de ancoragem virtualmente elimina os movimentos de avanço (*surge*), deriva (*sway*) e guinada (*yaw*), sobrando então os movimentos de arfagem (*pitch*), jogo (*roll*) e afundamento (*heave*). Estruturas como as plataformas TLP (*Tension Leg Platform*) apresentam apenas os movimentos horizontais: de avanço (*surge*) e deriva (*sway*) (MUELLER, 1997).



Figura 20. FPSO Cidade de São Vicente com um sistema de *Turret* (BW OFFSHORE, 2013).

O movimento resultante no separador gravitacional não depende apenas dos movimentos do navio, mas também da posição do equipamento em relação ao centro de gravidade da embarcação. A influência da rotação é a mesma em qualquer ponto do navio, porém a influência dos movimentos verticais pode aumentar à medida que o equipamento se afasta do centro de gravidade. Logo, equipamentos sensíveis à influência do movimento da embarcação, como os separadores gravitacionais, devem estar localizados próximos ao centro de gravidade da embarcação (MUELLER, 1997).

Já os ângulos estáticos se referem às inclinações da plataforma devido ao peso das cargas presentes. São compensados pelo preenchimento dos tanques de lastro com água do mar. Para a operação do separador gravitacional os ângulos estáticos mais relevantes são os ângulos de trim (Figura 21) e de banda (SANTANNA, 2011).

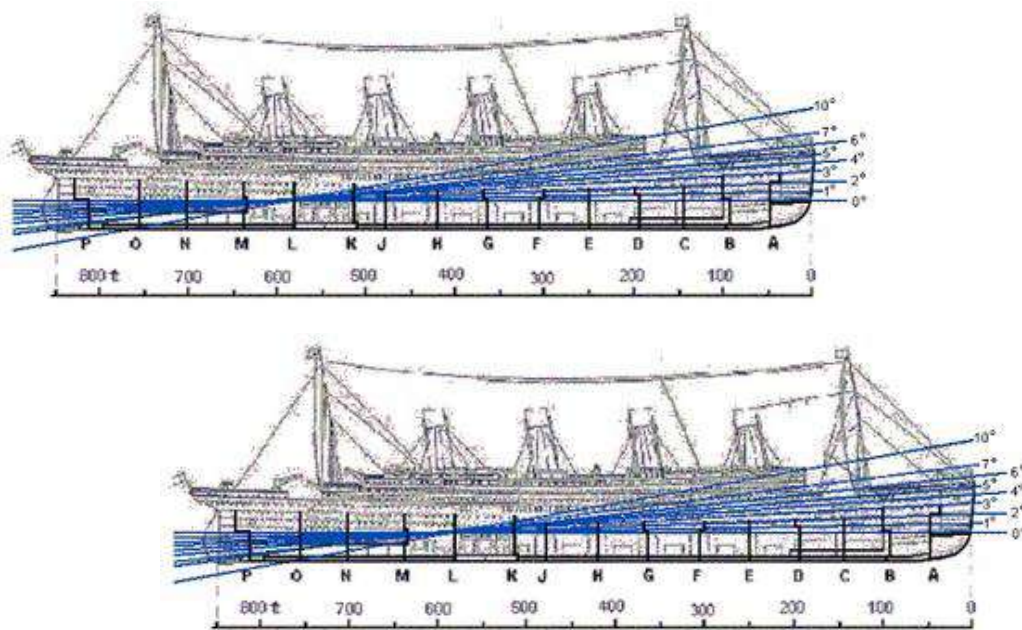


Figura 21. Ângulos de Trim - Titanic (TITANICOLOGY, 2014).

Portanto o controle do nível de fluidos no interior dos separadores é dificultado quando há a presença desses movimentos periódicos, pois leva a leituras erradas da posição das interfaces entre os fluidos, tanto na câmara de óleo quanto na câmara de separação (SANTANNA, 2011). Esses erros de leitura podem acionar alarmes de nível alto ou baixo, provocando o acionamento do desligamento automático (*shutdown*), interrompendo a operação do equipamento (CLARK, 1995).

A instalação de compartimentos como quebra ondas pode amortecer a amplitude do movimento dos fluidos gerados pelas ondas (DURHAM e SAMS, 2003) e minimizar os efeitos do movimento na eficiência do equipamento.

A presença de defletores perfurados foi estudada por FRANKIEWICZ e LEE (2002) (Figura 22), para mitigar os efeitos do movimento do líquido em vasos separadores devido à influência das ondas, considerando-se a localização desses equipamentos na plataforma. As simulações em CFD confirmaram uma diminuição no movimento do fluido no equipamento, porém as reduções obtidas foram menores que as requeridas em um separador trifásico. De acordo com SANTANNA (2011), na ausência das chicanas, o movimento do fluido no interior do separador possui grande amplitude, enquanto que na presença desses dispositivos, o movimento do fluido e a variação da interface são consideravelmente amortecidos.

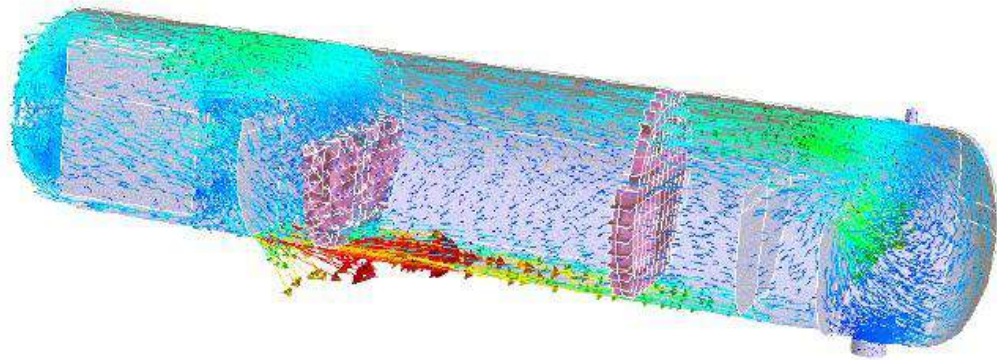


Figura 22. Simulação CFD de um separador Gravitacional (FRANKIEWICZ e LEE, 2002).

4.Fluidodinâmica Computacional

4.1 Introdução

CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*, ou fluidodinâmica computacional, é o estudo dos fenômenos de transporte que envolvem a transferência de calor, o transporte de massa, as reações químicas e o escoamento de fluidos utilizando métodos matemáticos, numéricos e computacionais (ALVES, 2012).

Um típico problema de engenharia pode ser solucionado por três formas distintas: através de experimentos em laboratório, por métodos analíticos e por métodos numéricos. Experimentos em laboratórios têm como principal empecilho o fato de muitas vezes serem caros e demorados, além da restrição por segurança em alguns experimentos, caso as condições sejam perigosas. Já os métodos analíticos aplicam-se apenas a casos muito simples, que normalmente não são representativos dos processos industriais de interesse.

Logo, o uso de métodos numéricos se apresenta como a melhor alternativa para resolver diversos problemas de engenharia. Podem ser utilizados na resolução de problemas complexos em geometrias igualmente complexas, tendo como grande trunfo, a obtenção de resultados com grande rapidez e uma redução significativa nos prazos e custos associados aos experimentos (SANTANNA, 2011).

A ferramenta passou a ser utilizada na década de 60 pela indústria aeroespacial no desenvolvimento de projetos de aeronaves e jatos. Logo após, indústrias de grandes máquinas passaram a aplicar estas técnicas para projetos de motores, turbinas e fornos. Além disso, os fabricantes automobilísticos passaram a utilizar a mesma ferramenta para estudo de escoamento em motores e partes internas dos automóveis (QUEIROZ, 2012).

Com o grande avanço na capacidade computacional obtido nos últimos anos, a utilização de CFD como uma ferramenta na resolução de problemas complexos vem crescendo, tanto no meio acadêmico como no meio industrial. A utilização de modelos mais custosos computacionalmente, tanto de natureza numérica quanto fenomenológica, vem aumentando

cada vez mais graças a este avanço. Sua utilização é justificada pelas seguintes razões (ALVES, 2012):

- Diminuição de custos em relação a experimentos convencionais, principalmente para aplicações acadêmicas onde os pacotes comerciais são mais baratos;
- As simulações numéricas oferecem mais detalhes que os experimentos físicos já que o número de pontos de medição das simulações numéricas está associado aos pontos da malha, enquanto que os pontos experimentais estão associados ao número de medidores;
- Avanço contínuo na capacidade de processamento computacional e na assimilação de novos métodos disponíveis na literatura;
- Os riscos que envolvem a realização experimental de alguns experimentos submetidos a altas temperaturas e pressões e/ou envolvendo materiais tóxicos.

Além disso, a sua utilização gera diversos benefícios como:

- Desenvolvimento do ensino de engenharia, ao permitir que diversos alunos tenham contato com experimentos computacionais que dificilmente seriam demonstrados durante as aulas;
- Melhora na produção de equipamentos e processos de separação, já que facilita o entendimento do fenômeno envolvido, pois o comportamento do fluido e dos processos envolvidos é compreendido mais facilmente;
- Facilidade no processo de otimização de equipamentos, já que algumas vezes a montagem e construção de equipamento é muito cara e de difícil viabilidade para estudos de variáveis geométricas ou condições de processo.

A utilização de uma solução CFD não acaba nem com a importância da análise teórica nem com a necessidade de realização de procedimentos experimentais. A análise teórica é essencial para validar os modelos que serão adotados assim como as hipóteses simplificadoras utilizadas na resolução dos problemas numéricos. Tanto que uma solução analítica pode ser utilizada como condição inicial para a resolução de problemas um pouco mais complexos.

Logo, as simulações numéricas, apesar de todo aperfeiçoamento obtido nos últimos anos, ainda não substituem completamente os estudos experimentais. Uma série de erros pode acontecer, afastando o resultado numérico do resultado exato, reduzindo então a representatividade da solução numérica quando comparada com a realidade física. Esses desvios podem estar associados a (SANTANNA, 2011):

- Erros de modelagem: provenientes de simplificações do modelo adotado, com fenômenos físicos mal representados ou condições de contorno aproximadas;
- Erros de discretização: malha computacional utilizada feita de forma inadequada;
- Erros de arredondamento: devido ao arredondamento, números reais com infinitas casas decimais ou dízimas periódicas em operações matemáticas;
- Erros de convergência: valores obtidos diferentes dos valores reais;

Além disso, os resultados experimentais servem como validação física dos modelos numéricos além de ajudar na elaboração de novos modelos. Vale lembrar que as simulações envolvendo CFD ainda possuem muitas limitações em algumas áreas como radiação, combustão turbulência, escoamentos multifásicos e os que envolvem mudanças de fase, dentre outros (QUEIROZ, 2012).

A indústria de óleo e gás, além de simulações em separadores gravitacionais localizados em unidades de processamento *offshore*, vem utilizando a ferramenta para simulações de vazamentos e dispersão de gases, escoamento de gases em velocidades sônicas e supersônicas em sistemas de alívio e tocha, em ciclones e hidrociclones avaliação de fadiga e esforços estruturais de *risers* e embarcações, entre outros (ALVES, 2012).

4.2 Etapas de uma Simulação Numérica

Antes de iniciar a simulação, o problema físico deve ser analisado (Figura 23) para que sejam determinadas quais são as variáveis relevantes no problema, grandezas físicas que atuam e influenciam no resultado do problema a ser analisado e quais são as variáveis que devem ser simplificadas ou descartadas (ALVES, 2012).

O problema deve ser modelado matematicamente, utilizando as leis de conservação de momento, massa e energia. A modelagem matemática irá descrever o sistema estudado, além de prever o seu comportamento em diferentes situações. Após a modelagem, a região de aplicação e a validade das equações devem ser definidas, estabelecendo-se então o domínio.

Como não é possível obter soluções numéricas sobre uma região contínua, devido aos infinitos pontos da mesma, o domínio é então discretizado, isto é, dividido em um número de pontos (nós) finitos onde as equações podem ser calculadas (QUEIROZ, 2012). A distribuição adequada desses pontos no domínio, dividindo-o em sub-regiões denominadas como elementos, é essencial para que se possa obter uma solução numérica representativa do problema. Essa discretização do domínio é chamada de malha.

Após a elaboração da malha ocorre então a especificação do problema para a resolução das equações, o que é feito com a introdução das condições de contorno, juntamente com as condições iniciais, propriedades físicas dos fluidos e demais parâmetros do problema. Obtém-se então um conjunto de equações algébricas, normalmente lineares, acopladas ou não. Essas equações são então resolvidas, fornecendo a solução numérica do problema estudado (SANTANNA, 2011).

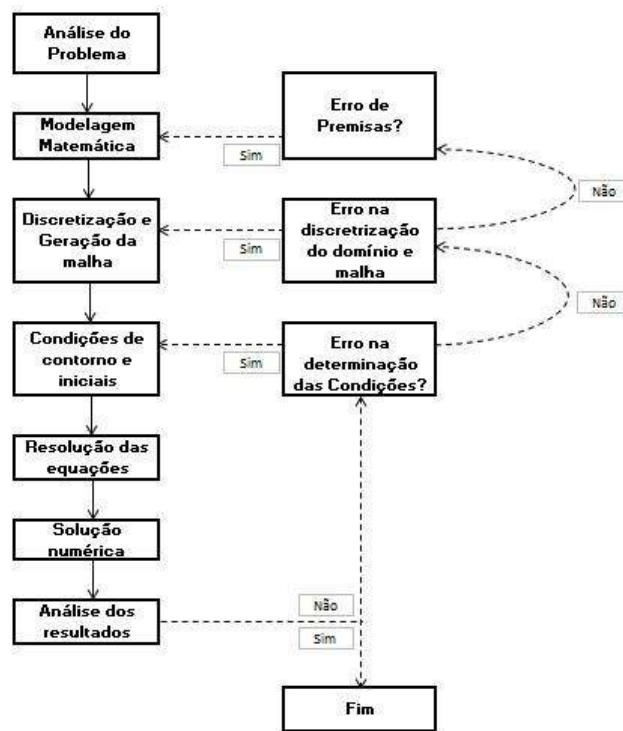


Figura 23. Etapas para a solução numérica de um problema em CFD (ALVES, 2012).

4.3 Elaboração da Malha

Como dito acima, a malha, ou *grid*, é a discretização do domínio geométrico do problema. Consiste no conjunto de pontos que formam os elementos (Figura 24) onde as equações são resolvidas. A resolução das equações em cada elemento gera variáveis com valores discretos, e a solução de um elemento é utilizada como condição de contorno para os elementos adjacentes (SANTANNA, 2011).

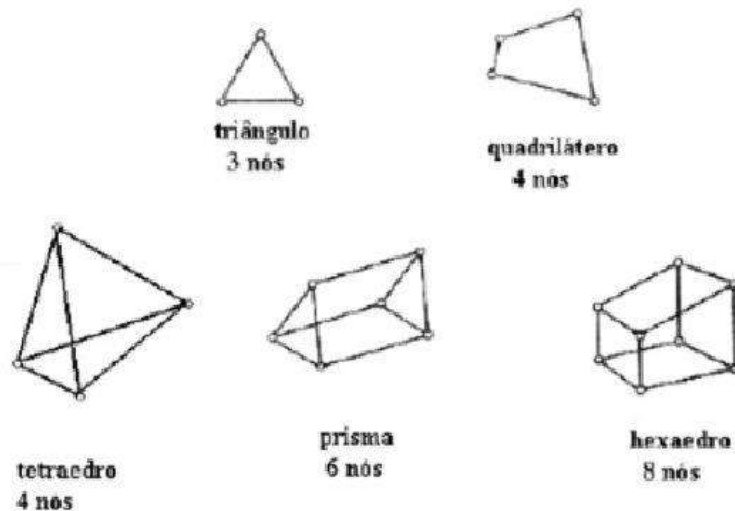


Figura 24. Formas geométricas mais utilizadas na geração de malhas CFD (SILVA, 2013).

Como as equações algébricas são resolvidas em cada nó do domínio e seus resultados são utilizados nos cálculos dos resultados dos elementos vizinhos, se houver uma grande variação da variável em uma determinada região, será necessário um maior refinamento nessa área para não prejudicar a solução numérica com a perda de informações (SILVA, 2013).

Quanto maior o número de pontos discretos da malha, maior é o refinamento da malha e, conseqüentemente, mais fiel ao modelo será o resultado numérico alcançado. Entretanto, quanto mais refinada é a malha, maior é o esforço computacional exigido nas suas simulações, o que as tornam mais demoradas. Existe um número mínimo de nós a partir do qual a malha passa a não ter mais influência nos resultados obtidos, ou seja, um número de nós a partir do qual os resultados numéricos não tem mais variação (SANTANNA, 2011).

É necessária, portanto, a realização de um teste de malha, que tem como objetivo a determinação de uma malha cujos resultados são independentes da mesma, ou seja, se malhas mais refinadas forem utilizadas, os resultados não serão significativamente diferentes. Essa determinação ocorre através do controle de variáveis relevantes ou, tomando-se como referência, algum resultado experimental (SANTANNA, 2011).

A melhor maneira de refinar uma malha é avaliando o fenômeno envolvido no problema. A malha deve ser refinada nos pontos onde o gradiente é mais elevado, assim como nas regiões mais próximas a parede para que seja levado em consideração na simulação o real efeito de camada limite de velocidade podendo-se então obter resultados mais precisos e representativos de maneira mais rápida (SILVA, 2013).

Outra maneira utilizada para o refinamento é a adaptação de malha. Nesse método, os pontos são movidos de acordo com as interações para aumentar a densidade de malha na região de interesse. O número de nós não é modificado, há apenas a mudança de posição e de tamanho nos volumes de controle (SILVA, 2013).

4.3.1 Tipos de Malha

O tipo de malha ideal depende da geometria do domínio e da complexidade do problema analisado. As malhas podem ser classificadas de 3 maneiras de acordo com as características de conectividade dos pontos: malhas estruturadas, malhas não estruturadas e malhas híbridas (BAKKER, 2006).

- Malha Estruturada:

Os pontos estão divididos de maneira regular no domínio (Figura 25). Quando esses pontos estão igualmente espaçados a malha é uniforme. Esse tipo de malha é muito utilizado em geometrias simples (SANTANNA, 2011). Já a malha não uniforme possui os pontos espalhados de acordo com a necessidade do domínio, ou seja, a densidade de pontos é maior em regiões onde os gradientes são maiores e menor onde a solução apresenta menores variações espaciais.

São compostas normalmente por elementos quadriláteros e/ou triangulares em geometrias 2D, e elementos tetraédricos, prismáticos e/ou hexaédricos em geometrias 3D. Em muitos

problemas simulados, há uma limitação ao uso das malhas quando se trata de uma geometria complexa (SILVA, 2013).

- Malha não estruturada:

Diferentemente das malhas estruturadas, as malhas não estruturadas (Figura 26) tem como característica a ausência de regularidade na distribuição espacial dos pontos. São não ortogonais e seus elementos não contêm o mesmo número de elementos vizinhos podendo assumir formatos diferentes, como prismas, triângulos, tetraedros, pirâmides, etc. Por essa razão, essas malhas conseguem representar mais facilmente as geometrias mais complexas (geometrias irregulares) devido à maior gama de formas que seus elementos podem assumir (SANTANNA, 2011).

- Malha híbrida:

As malhas híbridas, ou mistas, são aquelas que contêm os dois tipos de malha. É possível utilizar uma malha estruturada para refinar regiões importantes do escoamento (como nas regiões de entradas e saídas de fluidos e nas regiões próximas às paredes da geometria), com maior gradiente e uma malha não estruturada para o resto da geometria (SANTANNA, 2011).

4.3.2 Modelagem de Sub-malhas:

Regiões de tamanhos menores que o espaçamento da malha que devem ser avaliadas pelo usuário para que sejam determinadas quais destas terão seus efeitos levados em consideração e quais deverão ser ignoradas. As regiões que não são resolvidas pela malha podem ser modeladas utilizando algum modelo de aproximação de porosidade conhecidos como PDR (*Porosity/Distributed Resistance*).

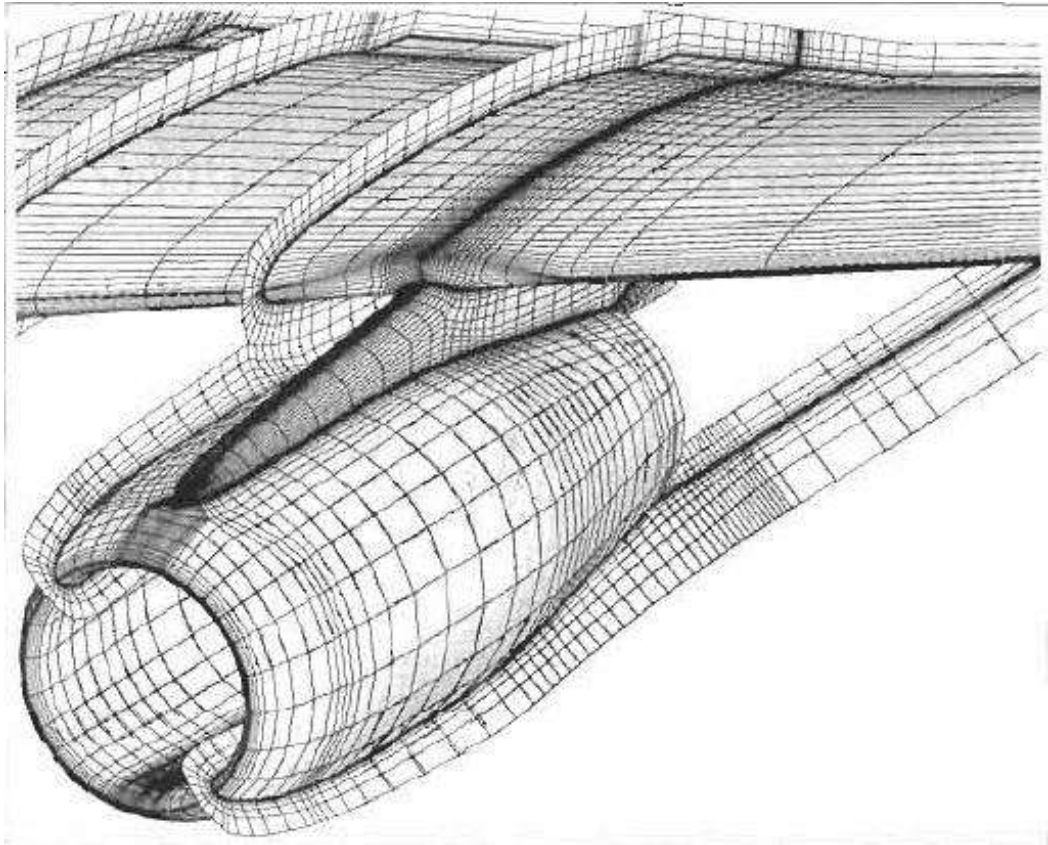


Figura 25. Malha estruturada da turbina de um avião (BLAZEK, 2001).

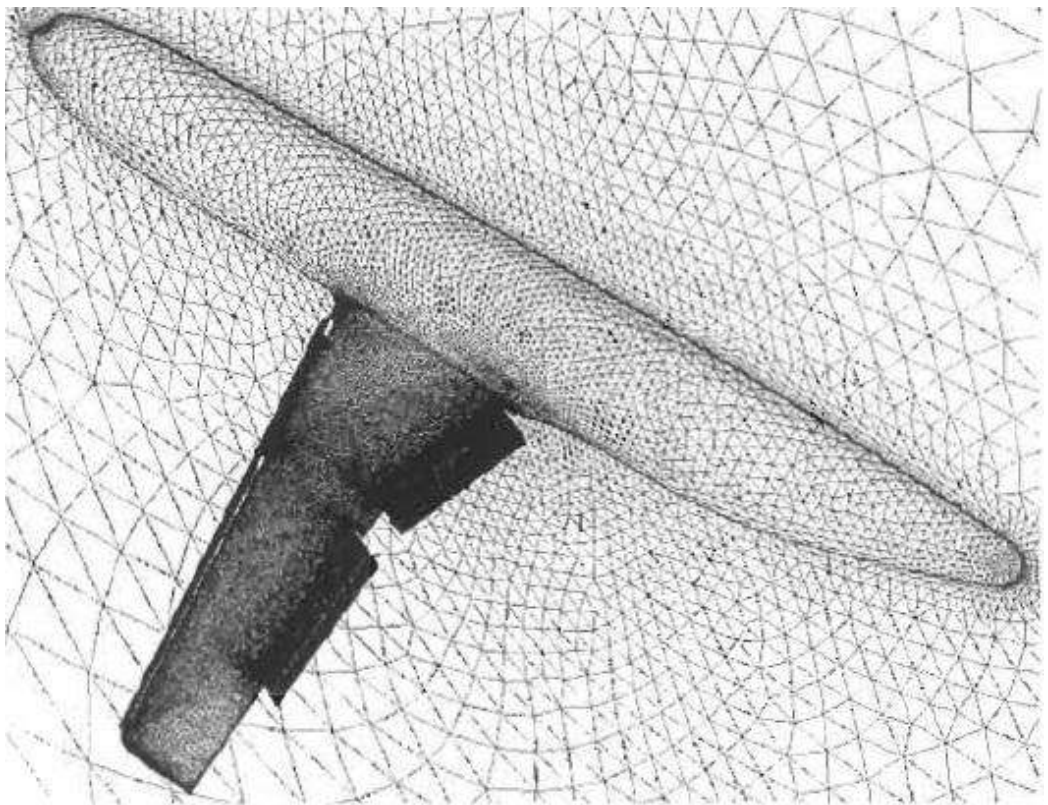


Figura 26. Malha não estruturada da cabine de um avião (BLAZEK, 2001).

4.4 Métodos Numéricos de Discretização

A discretização do domínio implica na substituição das derivadas das equações diferenciais parciais por expressões algébricas que envolvem a função incógnita (SILVA, 2013). Essa substituição transforma as equações diferenciais definidas para o domínio D contínuo em um sistema de equações algébricas, conforme mostra a Figura 27 (MALISKA, 2004).

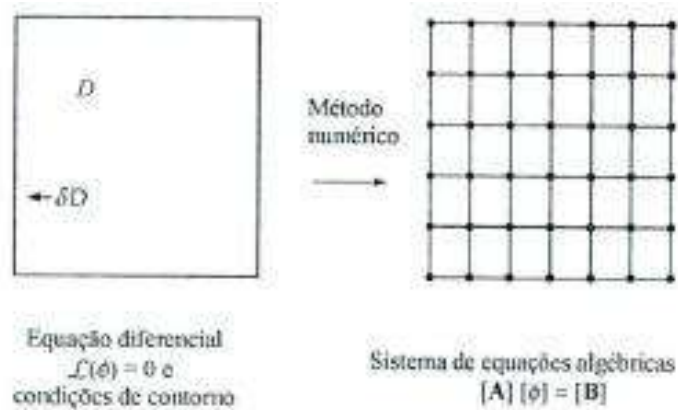


Figura 27. Discretização do domínio pelo método numérico (SANTANNA, 2011).

Enquanto os métodos numéricos resolvem as equações diferenciais de interesse para um número finito (discreto) de pontos que formam a malha, os métodos analíticos fornecem solução exata e fechada para essas equações em qualquer ponto do domínio. Quanto maior o número de pontos, mais próxima da solução exata será a solução numérica.

O tipo de método numérico se diferencia pela maneira através da qual ocorre a transformação das equações diferenciais em equações algébricas. A escolha do método utilizado interfere na precisão da solução e na velocidade em que ela é obtida. É necessário equilibrar a simplicidade e a facilidade de aplicação com a eficiência computacional e a precisão. Da mesma maneira que a precisão dos dados experimentais é função da qualidade das ferramentas utilizadas na sua determinação, a precisão das soluções numéricas está relacionada à qualidade das discretizações feitas (MALISKA, 2004).

Podem ser utilizadas três formas de resolução: diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos. A diferença entre os três métodos usualmente utilizados está na aproximação e no processo de discretização das equações (SILVA, 2013).

4.4.1 Método por Diferenças Finitas (MDF)

O método mais antigo, cujas técnicas foram publicadas em 1910, antes do desenvolvimento da computação, pelo matemático inglês Lewis Fry Richardson (BAKKER, 2006). É um método de fácil aplicação, podendo ser facilmente empregado. Contudo, tem a desvantagem de mostrar-se eficiente apenas quando aplicado a malhas estruturadas e geometrias simples já que não apresenta bons resultados ao tratar de geometrias complexas (SANTANNA, 2011).

No MDF, o domínio é discretizado em uma série de pontos (nós) onde as equações de conservação na forma diferencial são aproximadas por equações algébricas. Essas aproximações podem ser feitas por expansão em série de Taylor e solucionadas de forma simultânea ou iterativa (BAKKER, 2006). Podem ser feitas também aproximações por interpolação polinomial obtendo-se valores das variáveis em outros locais que não sejam apenas os nós das malhas (SANTANNA, 2011).

4.4.2 Método por Elementos Finitos (MEF)

É um método utilizado na análise de problemas físicos em meios contínuos. Foi utilizado pela primeira vez pelo matemático alemão Richard Courant em 1943 para resolver um problema de torção. A partir da década de 70 passou a ser utilizado na análise de escoamentos. Tem como vantagem o seu excelente desempenho na análise de escoamentos viscosos com difusão (BAKKER, 2006).

Nesse método, o domínio de integração é dividido em um número finito de pequenas regiões denominadas elementos finitos que geralmente são não estruturados. Uma função polinomial então aproxima a solução, garantindo a continuidade da solução através das condições de contorno em cada um deles. Um conjunto de equações algébricas não lineares é então obtido após a integração dessas funções polinomiais.

Esse método apresenta como sua principal vantagem a facilidade da discretização de geometrias mais complexas e arbitrárias, já que cada elemento é subdivisível, tornando mais fácil a análise matemática e o refino da malha (SANTANNA, 2011). Porém, apresenta alguns problemas na simulação de escoamentos turbulentos (BAKKER, 2006).

4.4.3 Método por Volumes Finitos (MVF)

O MVF é o método mais utilizado em simulações de transferência de calor e massa e de escoamento de fluidos, incluindo problemas de dispersão de poluentes (SILVA, 2013). Utilizado pela primeira vez em 1957 por Evans e Harlow, esse método é utilizado em praticamente todos os pacotes comerciais de CFD sendo o mais utilizado (80%) (BAKKER, 2006).

Sua utilização se deve a suas características conservativas que lhe conferem robustez. O MVF utiliza a forma integral das equações de conservação (massa, quantidade de movimento, energia) como ponto de partida para a obtenção de equações aproximadas. O domínio é então dividido em um número finito de volumes de controle contíguos, onde são aplicadas as equações de conservação. O valor das variáveis é calculado no centro de cada volume e nas fronteiras, conforme mostra a Figura 28 (SANTANNA, 2011).

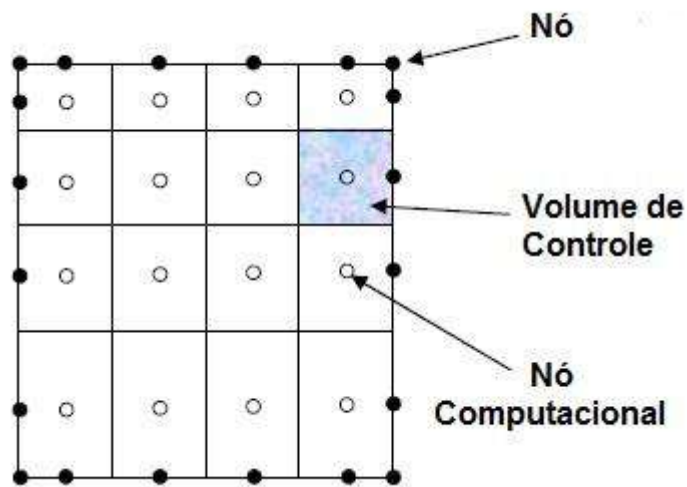


Figura 28 Determinação do volume de controle (BAKKER, 2006).

A utilização do MVF é facilitada pela sua simples interpretação física, já que todos os termos aproximados possuem significados físicos, uma vez que as equações aproximadas são obtidas através dos balanços de conservação das propriedades físicas, conforme mostra a Figura 29. Além disso, é um método flexível que pode ser aplicado em qualquer tipo de malha, sendo utilizado em geometrias complexas (SANTANNA, 2011).

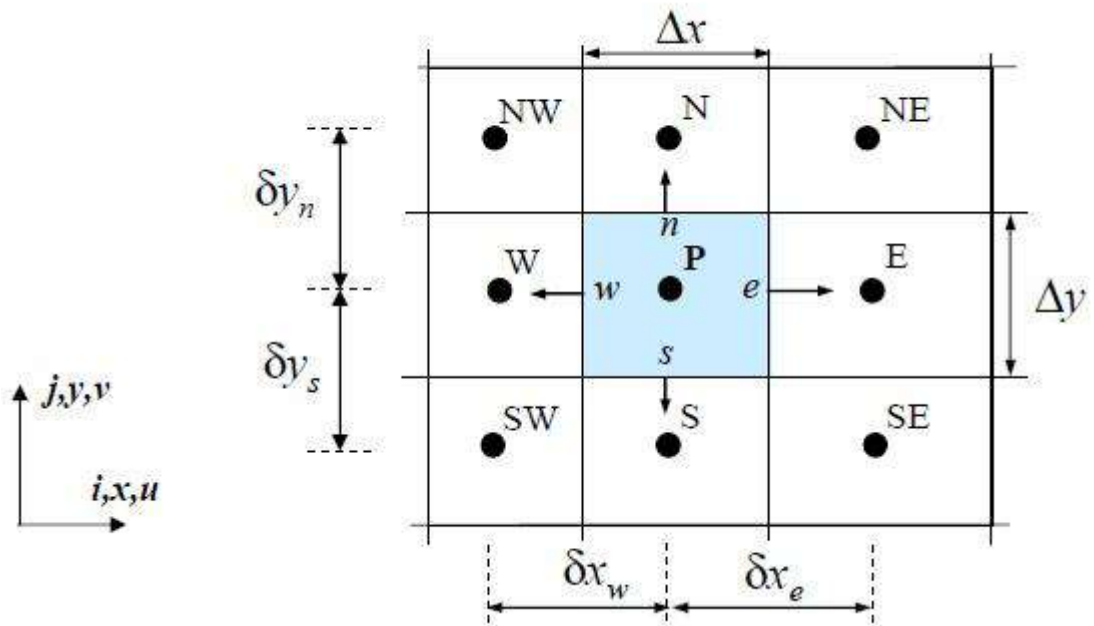


Figura 29. Aplicação do balanço de conservação em um volume de controle (BAKKER, 2006).

4.5 Modelagem Matemática

4.5.1 Equações de Conservação

É necessária a elaboração de um modelo matemático que descreva de maneira adequada o fenômeno para que a solução numérica de qualquer problema físico possa ser obtida. Os fenômenos relacionados ao escoamento de fluidos são descritos por equações diferenciais básicas que, por sua vez, são definidas pelas leis físicas de conservação de quantidade de movimento e de massa, equações essas que são calculadas independentemente do tipo de escoamento analisado (SANTANNA, 2011).

É considerada também a hipótese do contínuo, que pode ser aplicada a dado volume de uma substância se este volume é dividido em corpos/partículas pequenas o suficiente para que todas as propriedades tais como temperatura e densidade, possam ser consideradas uniformes ou que variem continuamente com o tempo ou com o volume (SANTANNA, 2011).

4.5.1.1 Equação do Movimento (Conservação do Momento)

A equação do movimento pode ser escrita da seguinte forma:

$$-(\nabla \cdot \rho_{uu}) - \nabla p - (\nabla \cdot \sigma) + \rho \cdot g = \frac{\partial \rho u}{\partial t} \quad (2)$$

Para fluidos incompressíveis:

$$-\nabla p - (\nabla \cdot \sigma) + \rho \cdot g = \rho \cdot \frac{Du}{Dt} \quad (3)$$

onde ρ_{uu} é o tensor do fluxo convectivo de movimento, ∇p representa as forças de pressão, $\nabla \cdot \sigma$ representa as forças viscosas e $\rho \cdot g$ representa as forças de campo.

A equação de Navier-Stokes para fluidos newtonianos incompressíveis e com viscosidade constante pode ser escrita da seguinte forma:

$$-\nabla p - \mu \cdot (\nabla^2 \cdot u) + \rho \cdot g = \rho \cdot \frac{Du}{Dt} \quad (4)$$

4.5.1.2 Equação da Continuidade (Conservação da Massa)

Segundo Bird et al. (2004), a equação da conservação de massa, desconsiderando reações nucleares, também conhecida como equação da continuidade, é desenvolvida fazendo-se um balanço de massa sobre um elemento fixo interno ao volume de controle diferencial por onde escoo o fluido.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de} \\ \text{acúmulo} \\ \text{de massa} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de entrada} \\ \text{de massa} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de} \\ \text{saída} \\ \text{de massa} \end{array} \right\} \quad (5)$$

Portanto, para um volume de controle fixo no espaço, a equação da conservação de massa, em coordenadas cartesianas, é dada pela seguinte equação:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho)}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

A equação da continuidade na forma vetorial pode ser escrita da seguinte maneira.

$$-(\nabla \cdot \rho u) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (7)$$

Para fluidos incompressíveis:

$$(\nabla \cdot u) = 0 \quad (8)$$

4.5.2 Modelagem de Escoamentos Multifásicos

Os escoamentos multifásicos são caracterizados pela presença de mais de um fluido. Em geral, os fluidos presentes são espécies químicas diferentes, mas esses fluidos também podem representar diferentes estados termodinâmicos de uma mesma espécie. As fases presentes em um escoamento multifásico podem possuir um conjunto de características próprias de escoamento e os componentes são misturados na escala macroscópica (diferente de uma mistura multicomponente, em que os componentes misturam-se em escala molecular). O escoamento de misturas de líquidos imiscíveis e suspensões sólido/líquido são exemplos de misturas multifásicas (ANSYS, CFX 12.1, 2009).

Podem ser utilizadas duas abordagens para representar o escoamento multifásico:

4.5.2.1 Abordagem Euleriana

A abordagem Euleriana-Euleriana, ou simplesmente Euleriana, considera todas as fases como fases contínuas, resolvendo-se as equações de conservação de massa, momento e energia para todas as fases (ALVES, 2012). As mudanças nas propriedades são calculadas de acordo com um elemento de fluido fixo no espaço e no tempo (x,y,z,t) , Figura 30, em vez de calcular em partículas de fluido individuais (BAKKER, 2006).

Em cada uma das fases as equações de conservação são escritas para a quantidade de energia, massa e movimento da nuvem de partículas como um contínuo, e integradas para prever as propriedades volumétricas médias do campo. As frações volumétricas de cada uma das fases são funções contínuas no espaço e no tempo já que o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado pelas outras (SANTANNA, 2011).

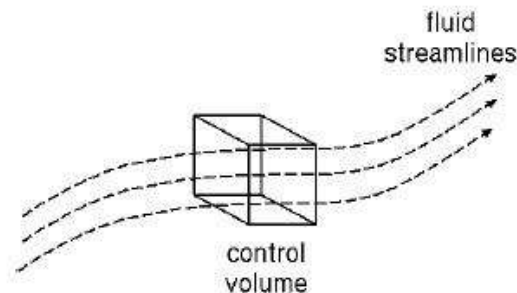


Figura 30. Abordagem Euleriana.

Essa forma é robusta, porém requer mais esforço computacional (ALVES, 2012). Outra desvantagem da abordagem ocorre quando o problema trata de uma faixa de tamanho de partículas. Como ele considera cada classe de tamanho de partícula como uma fase distinta, o esforço computacional acaba sendo muito maior (SANTANNA,2011).

4.5.2.2 Abordagem Lagrangiana

Cada partícula (ou grupo de partículas) é simulada individualmente com base na segunda lei de Newton para o movimento e no cálculo das forças atuantes sobre as mesmas, levando em consideração as interações com o fluido e com as outras partículas (colisões). O cálculo da trajetória da partícula é baseado no balanço de forças na partícula (Figura 31) e influenciado pelas características do escoamento da fase fluida, tais como a turbulência e o campo de escoamento. Para utilizar esta abordagem, é necessário que a fase particulada seja diluída. As equações (9) a (12) representam o balanço das forças que atuam sobre a partícula em notação vetorial (ALVES, 2012).

$$m_p \cdot \frac{dv_p}{dt} = F_P - F_E - F_D - F_O \quad (9)$$

$$F_P - F_E = V \cdot (\rho_p - \rho) \cdot b \quad (10)$$

$$F_D = \frac{A}{2} \cdot \rho \cdot \|v - v_p\| \cdot C_D \cdot (v - v_p) \quad (11)$$

$$C_D = C_D(Rep, \emptyset) \quad (12)$$

Onde:

\emptyset = Esfericidade da partícula

C_D = Coeficiente de arraste

m e V = massa e volume da partícula, respectivamente;

$F_P - F_E$ = peso menos empuxo;

F_D = força de arraste;

F_O = outras forças (sustentação, browniana, etc.);

Rep = número de Reynolds da partícula;

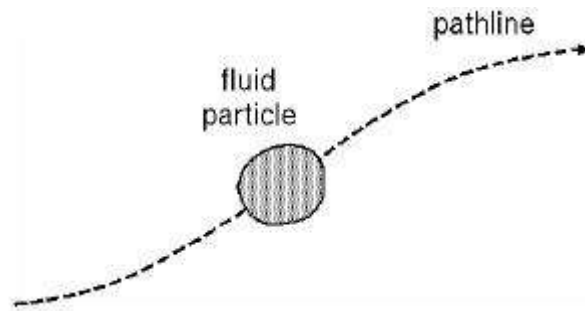


Figura 31. Abordagem Lagrangiana.

4.5.3 Modelos de Turbulência

Todos os fluxos se tornam instáveis a partir de um determinado número de Reynolds. O ponto de transição varia geralmente entre 2.000 e 1.000.000 (em tubos a transição ocorre a 2.100) de acordo com o fluxo (BAKKER, 2006). Os fluxos com baixos valores de Reynolds apresentam um comportamento laminar enquanto que os fluxos com altos valores de Reynolds apresentam um comportamento turbulento (SILVA, 2013).

O escoamento laminar é ordenado, determinístico e previsível enquanto que o escoamento turbulento é sempre tridimensional, randômico, caótico e não estacionário. As flutuações e turbilhões presentes no escoamento turbulento aumentam o transporte convectivo de momento, calor, e massa (SILVA, 2013). O fluxo laminar pode ser resolvido facilmente por meio das equações de conservação desenvolvidas enquanto que o escoamento turbulento requer um enorme esforço computacional para ser resolvido (BAKKER, 2006).

Na maioria dos problemas resolvidos não é necessário calcular todas as propriedades das flutuações turbulentas e apenas os efeitos da turbulência no escoamento são observados. Esses escoamentos com altos números de Reynolds são caracterizados por ter forças de inércia maiores que as forças viscosas e possuem um caráter dissipativo.

Para escoamentos turbulentos, onde a velocidade (e qualquer outra variável) flutua de forma caótica com o tempo, conforme observado na Figura 32, a velocidade real de um fluido incompressível ($U_i(t)$) pode ser considerada como a soma de uma velocidade média temporal $\overline{U_i}$ com uma flutuação $u_i(t)$ conforme a equação 13 (SILVA, 2013).

A utilização da média temporal funciona como um filtro que remove as flutuações. Esta consideração permite o uso de malhas bem menos refinadas e, com isso, um menor esforço computacional (ALVES, 2012).

$$U_i(t) = \bar{U}_i + u'_i(t) \quad (13)$$

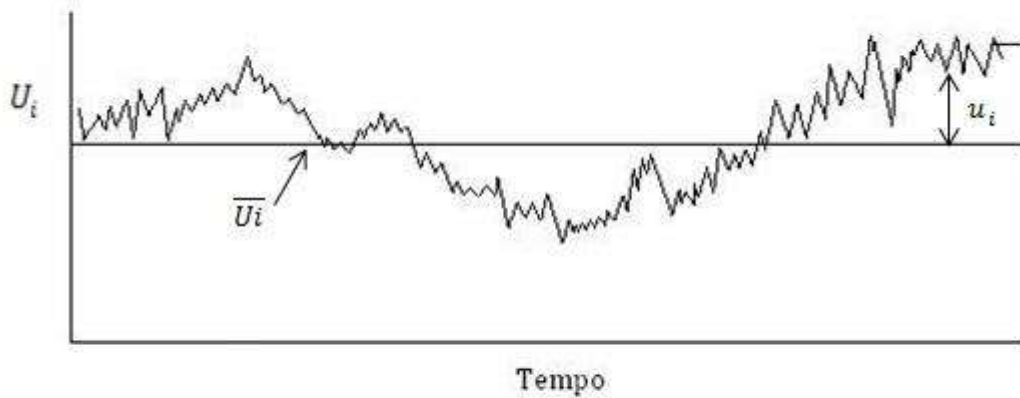


Figura 32. Escoamento turbulento permanente (adaptado de BAKKER, 2006).

Levando em consideração a decomposição da velocidade, necessita-se então reescrever a equação de Navier Stokes. Substituindo cada variável pela sua componente média temporal \bar{U}_i somada à sua componente de flutuação turbulenta $u'_i(t)$ e aplicando a equação da média temporal chega-se à seguinte equação:

$$\rho \cdot \frac{D\bar{U}}{Dt} = -\nabla P + \mu \cdot \nabla^2 \bar{U} + \rho \bar{g} - \rho(\overline{\mathbf{u}' \cdot \nabla \mathbf{u}'}) \quad (14)$$

Essa equação é conhecida como RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) uma vez que é obtida aplicando-se a média temporal proposta por Reynolds na equação de Navier-Stokes.

Essa equação seria igual à equação 4 se não fosse o termo $\rho(\overline{\mathbf{u}' \cdot \nabla \mathbf{u}'})$. Esse termo é a representação da força turbulenta por unidade de volume. Essa força extra de inércia é causada pelas tensões geradas pelos componentes flutuantes do escoamento e também pode ser expressa em função do tensor de Reynolds: $\overline{\tau_{ij}^t} = \rho \overline{u'_i u'_j}$.

$$F_t = -\rho \cdot (\overline{\mathbf{u}' \cdot \nabla \mathbf{u}'}) = -\nabla \cdot \overline{\boldsymbol{\tau}^t} \quad (15)$$

Os componentes do tensor de Reynolds são formados pela média temporal do produto das velocidades flutuantes. Como o produto de escalares é uma operação comutativa, o tensor de Reynolds é simétrico e, portanto, introduz seis variáveis novas ao sistema original que tinha quatro equações (Continuidade e RANS). Como essas variáveis são desconhecidas, necessita-se modelá-las para fechar o sistema de equações. Assim, surgem os modelos de turbulência para calcular o tensor de Reynolds.

Os componentes do tensor de Reynolds são modelados através de expressões algébricas ou equações de transporte. No primeiro caso, utiliza-se normalmente a hipótese de Boussinesq, em que o tensor de Reynolds é modelado em analogia à lei da viscosidade de Newton:

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - 2\mu^t D_{ij} \quad (16)$$

Nessa equação, k é a energia cinética turbulenta por unidade de massa, δ_{ij} é a matriz identidade, μ^t é a viscosidade turbulenta e $D_{ij} = 1/2(\nabla U + \nabla U^T)$ é a parte simétrica do gradiente de velocidade. A modelagem por essa rota reduz-se a modelar μ^t que é então uma propriedade do escoamento e não do fluido.

- Modelos algébricos:

Esses modelos também são conhecidos como modelos de zero equações, pois utilizam apenas equações algébricas na determinação do valor da viscosidade turbulenta, não apresentando nenhuma equação de transporte adicional.

- Modelos a uma equação:

Em geral, uma equação diferencial de transporte é resolvida para uma determinada propriedade turbulenta, geralmente a energia cinética turbulenta k , e uma segunda propriedade turbulenta, em geral um comprimento de escala turbulento, expresso por uma equação algébrica (KLEIN, 2007).

- Modelos a duas equações

Esses modelos resolvem uma equação de transporte para cada uma das duas propriedades turbulentas utilizadas para calcular a viscosidade turbulenta. Normalmente, essas propriedades turbulentas são a energia cinética turbulenta (k) e sua taxa de dissipação viscosa (ε) ou sua

taxa de dissipação viscosa específica (ω). Alguns exemplos de modelos de duas equações são os modelos $k-\varepsilon$ (ver item 4.5.3.1), o modelo RNG $k-\varepsilon$, o modelo $k-\omega$ e o modelo SST.

A outra alternativa é calcular os componentes do tensor de Reynolds, resolvendo uma equação de transporte para cada um. Esses modelos são mais custosos computacionalmente, pois acabam por resolver sete equações de transporte extras, além da continuidade e RANS.

4.5.3.1 Modelo $k-\varepsilon$

O modelo utilizado nas simulações deste trabalho foi o modelo de turbulência k -epsilon ($k-\varepsilon$) já que esse modelo é o mais representativo da classe de modelos de turbulência a duas equações e pode ser considerado o modelo mais utilizado e validado (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995).

É reconhecido como o modelo padrão da indústria, sendo utilizado na maior parte dos códigos de CFD na resolução de diversos problemas de engenharia, possuindo boa estabilidade e oferecendo boa concordância em termos de robustez e exatidão.

Porém, o seu desempenho, é prejudicado em algumas simulações, especialmente em escoamentos complexos. Em escoamentos não confinados, como por exemplo: escoamentos sobre superfícies curvas, escoamentos com alterações repentinas na taxa de cisalhamento, escoamentos rotacionais e escoamentos plenamente desenvolvidos em dutos não circulares, o modelo apresenta um pior desempenho.

O $k-\varepsilon$ utiliza duas equações: uma para o cálculo da dissipação da energia cinética turbulenta (ε) e outra para o cálculo da própria energia cinética turbulenta (k). Os termos k e ε são usados para definir a escala de velocidade ϑ e a escala de comprimento l que representam as principais escalas de turbulência da seguinte maneira (SILVA, 2013):

$$\vartheta = k^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$l = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (18)$$

A viscosidade turbulenta pode ser descrita como:

$$\mu_t = \rho C_\mu \vartheta l \quad (19)$$

Onde C_μ é uma constante adimensional do modelo de turbulência k - ε . Substituindo então as equações 17 e 18 em 19, obtemos:

$$\mu_t = C_\mu \cdot \rho \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (20)$$

A equação da taxa de dissipação da energia cinética é dada por:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{s1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{-\tau_{ij}}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - C_{s2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_s} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (21)$$

E a equação da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta é dada por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{-\tau_{ij}}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (22)$$

As equações 21 e 22 contêm cinco constantes ajustáveis e o modelo k - ε padrão emprega os seguintes valores para essas constantes: (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995):

$$C_\mu = 0,09; C_{s1} = 1,44; C_{s2} = 1,92; \sigma_k = 1,0; \sigma_s = 1,3 \quad (23)$$

5. Metodologia

5.1 Computador e Software Utilizado

Foram utilizados cinco computadores com processadores Intel Core i7 860 com 2.8GHz, 8GB de memória RAM e 1 TB de memória física. Foram conduzidas simulações em paralelo local.

Para efetuar a simulação numérica foi utilizado o programa comercial CFX, da ANSYS, versões 13.0 e 15.0. Esse software é composto por um pacote de programas. Para construção da geometria, foi empregado o programa DesignModeler. Para elaboração da malha, foi utilizado o programa Meshing. O CFX-PRE foi utilizado na configuração das condições de simulação, o CFX-SOLVER na resolução numérica e o CFD-POST na análise e visualização dos resultados obtidos.

5.2 Geometria

Nesse trabalho, o mesmo separador de produção utilizado por AMBROSIO (2007) e SANTANNA (2011) foi utilizado. A geometria do equipamento foi simplificada em relação a um equipamento real cuja parte cilíndrica apresenta 16,8 m de comprimento e 5,6 m de diâmetro. Internamente, as únicas partes simuladas foram os seis quebra ondas e o vertedor, dispositivo indispensável em um separador gravitacional trifásico, responsável por conter a água enquanto o óleo é vertido para a câmara de óleo.

Normalmente, na entrada do equipamento encontra-se uma bateria de ciclones que não foi simulada. Como esses equipamentos são os maiores responsáveis pela separação do gás da fase líquida (composta por água e óleo) e o objetivo do estudo é a influência do movimento periódico da plataforma na separação água-óleo, foi considerado que o gás já se encontra dentro do separador, não havendo nem entrada nem saída desse fluido.

A entrada de água e óleo no equipamento também foi simplificada. Foram feitas duas entradas: uma para o óleo e outra para a água. As entradas foram projetadas de tal forma que ficassem posicionadas dentro das faixas de alturas normais de líquido, definidas pelas vazões de fluidos em diferentes cenários. O cálculo das alturas será mostrado no item 5.4.3.

Os quebra ondas possuem um diâmetro horizontal igual ao separador e ocupam uma distância vertical de 3,6960 m a partir da parte superior do equipamento, o equivalente a 66% do diâmetro vertical, como pode ser visualizado na Figura 33. Foram realizadas duas classes de simulações, considerando os dispositivos como porosos e não porosos. Os não porosos foram representados por barreiras sólidas mergulhadas no líquido, permitindo então a passagem do gás em sua parte superior. Dessa forma, todo o equipamento foi especificado em um único domínio.

Os quebra ondas porosos possuem um domínio poroso para esses dispositivos e um segundo domínio para o restante do separador.

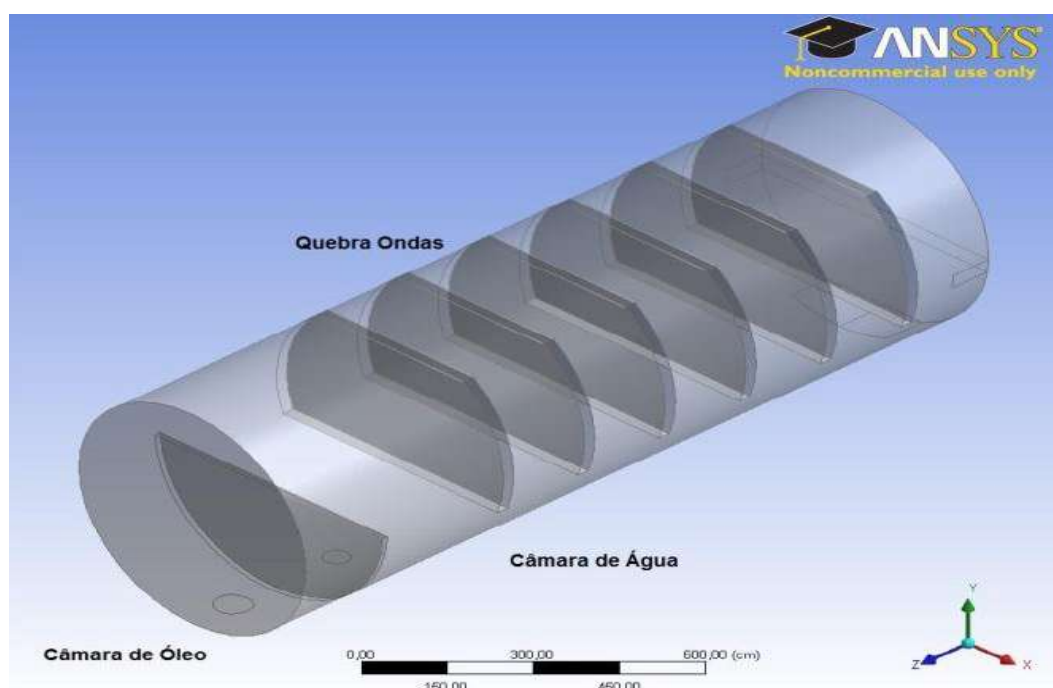


Figura 33. Geometria do Separador gravitacional.

As dimensões e seus dispositivos internos dos separadores podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4. Principais dimensões do equipamento.

Geometria	Dimensão (cm)
Comprimento da Parte Cilíndrica	1.680
Diâmetro da Parte Cilíndrica	560
Espessura do Quebra Ondas	25
Distância entre os Quebra Ondas	174
Altura do Vertedor	272
Diâmetro da saída de água	50,8
Diâmetro da saída de óleo	71,12

5.3 Malha

Após a conclusão da construção da geometria, foi iniciada a etapa de elaboração da malha tetraédrica no Meshing. Nesta etapa, uma série de recomendações contidas no manual do ANSYS 12.1 (2009) foi levada em consideração para que as malhas tivessem boa qualidade. Estes critérios estão na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros para uma malha de boa qualidade (ANSYS, 2009).

Parâmetro	Valores Ideais
Ângulo de Face Mínimo	>10°
Ângulo de Face Máximo	<170°
Razão entre os volumes de elemento	<30
Número de conectividade	<50
Razão do comprimento da aresta	<100

Os parâmetros ângulo de face máximo (*Maximum Face Angle*) e ângulo de face mínimo (*Minimum Face Angle*) são o maior e o menor valor de ângulo formado pelo encontro entre duas faces que tocam um nó respectivamente. A razão entre os volumes de elemento (*Element Volume Ratio*) é a razão entre o maior volume de elemento e o menor volume de elemento que toca um nó. Essa razão é muito importante para o controle do Fator de expansão (*Expansion Factor*) e é utilizada para determinar a taxa de engrossamento da malha, ou seja, a taxa de crescimento dos volumes dos elementos, que controla a diferença de tamanho entre os elementos da malha.

Já o valor do número de conectividade (*Connectivity Number*) é o número máximo de elementos que se encontram em um nó. O parâmetro razão do comprimento da aresta (*Edge Lengh Ratio*) diz respeito à razão entre o comprimento da maior e da menor aresta da face de um elemento (ANSYS, 2009).

As regiões de entrada e saída de fluido são críticas já que são regiões onde ocorre uma variação da área de escoamento após a passagem do fluido por elas e por isso foram refinadas. Outra área crítica é a região do separador, próxima à parede, já que nessa região também ocorrem grandes gradientes de velocidade.

Para refinar corretamente essas regiões críticas, foi utilizado um recurso chamado *inflation*. Por meio desse recurso, é possível a criação de camadas de elementos prismáticos na parede da geometria. Nessa simulação foram criadas cinco camadas de elementos prismáticos.

5.3.1 Teste de Malha

O teste de malha é uma etapa importante em um estudo de fluidodinâmica computacional. Esta análise busca determinar o ponto ótimo entre a confiabilidade e qualidade gráfica dos resultados aliados ao mínimo esforço computacional. Foi realizado um teste de malha partindo de uma malha grosseira até uma malha mais refinada, para a definição de uma malha com o número ideal de elementos.

Foram elaboradas oito malhas de elementos tetraédricos (Figura 34), quatro para cada cenário (com quebra ondas poroso e sem quebra ondas poroso), com diferentes graus de refinamento. A construção das malhas seguiu os mesmos critérios descritos no item 5.3. O número de elementos e de nós estão listados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Propriedades das malhas utilizadas no teste de malha – Quebra Ondas Não Poroso.

	Malha I	Malha II	Malha III	Malha IV
Nós	141.803	425.523	652.975	1.006.864
Elementos	510.131	1.505.015	2.581.863	3.890.931
Tetraedros	369.759	1.066.683	2.029.193	2.988.253
Prismas	135.927	433.308	547.311	898.071

Tabela 7. Propriedades das malhas utilizadas no teste de malha – Quebra Onda Poroso.

	Malha V	Malha VI	Malha VII	Malha VIII
Nós	148.711	432.431	659.883	1.013.772
Elementos	533.081	1.527.965	2.604.813	3.913.881
Tetraedros	391.137	1.088.061	2.050.571	3.009.631
Prismas	137.127	434.508	548.511	899.271

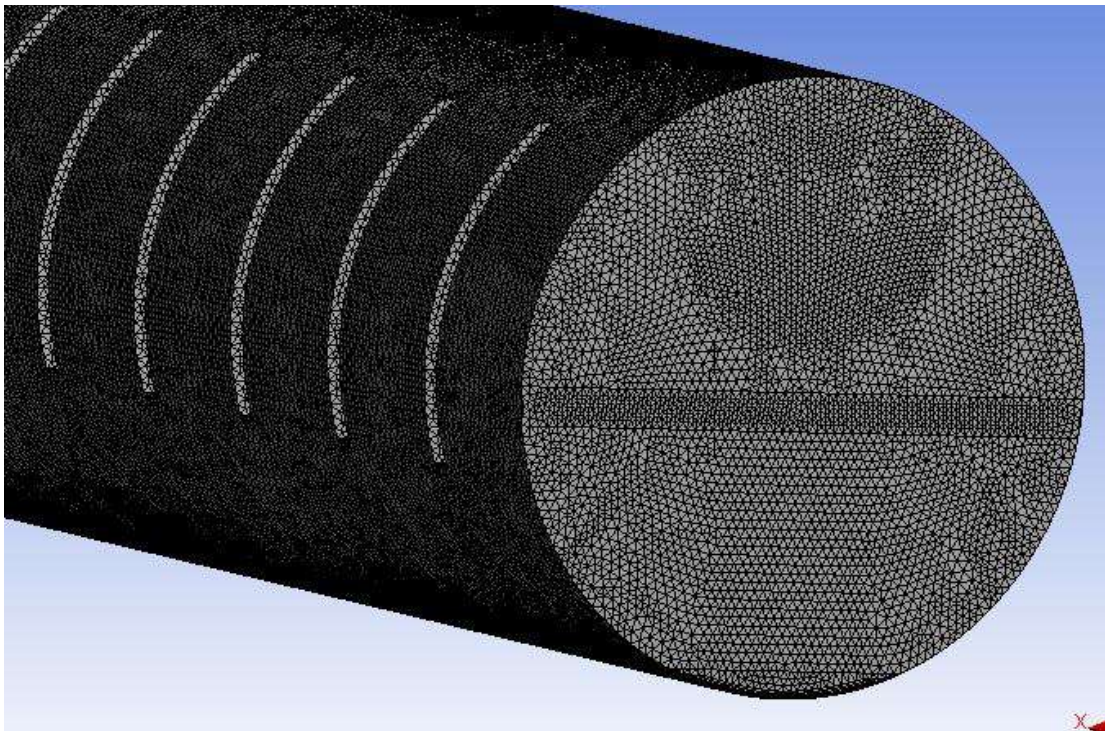


Figura 34. Malha IV – 3.800.000 Elementos.

No teste de malha, as simulações foram trifásicas (água/óleo/gás) e realizadas com regime transiente, considerando no domínio o movimento relativo da plataforma de produção. As vazões mássicas de água e óleo e a quantidade de gás presente no interior do separador foram 60% em massa de óleo e 40% em massa de água para o domínio com meio poroso e 20% em massa de óleo e 80% em massa de água para o domínio sem quebra-onda poroso (ver o item 5.4.3). Alguns parâmetros da simulação estão disponíveis nas Tabelas 8 e 9 enquanto os demais parâmetros estão disponíveis no item 5.4.1.

Tabela 8 - Parâmetros de simulação utilizados no teste de malha – Quebra Onda Não Poroso

Parâmetro	Valor
Passo de tempo (s)	0,0314
Vazão mássica de água (kg/s)	112,3
Vazão mássica de óleo (kg/s)	28,1
Altura da interface água/óleo (cm)	233,1

Tabela 9 - Parâmetros de simulação utilizados no teste de malha – Quebra Onda Poroso

Parâmetro	Valor
Passo de tempo (s)	0,0314
Vazão mássica de água (kg/s)	56,1
Vazão mássica de óleo (kg/s)	84,2
Altura da interface água/óleo (cm)	135.4

5.4 Simulações Numéricas

Essa seção apresenta todos os parâmetros das simulações realizadas como os modelos matemáticos utilizados, as condições iniciais e de contorno e os parâmetros de convergência.

5.4.1 Parâmetros de Simulação

O programa CFX-Pre foi a ferramenta utilizada no *set up* das simulações. O modelo de turbulência adotado foi o modelo k- ϵ , também utilizado por SANTANNA (2011). Para representar o escoamento multifásico foi escolhido o modelo de escoamento homogêneo com abordagem euleriana. Esse modelo foi escolhido, pois nesse caso as fases compartilham um mesmo campo de velocidade e temperatura.

Como duas das fases estudadas na simulação (água e óleo) são imiscíveis, ou seja, possuem uma interface bem definida, foi utilizado, junto com o modelo homogêneo, o modelo *Volume of fluid (VoF)*. A distribuição das frações volumétricas ao longo do domínio foi então especificada. Para a sua utilização, é necessária a aplicação da opção *Free Surface Model*.

Essa opção modela a interface entre as duas fases (água e óleo e óleo e Gás). Além disso, é necessária a determinação da localização das interfaces dos fluidos ao longo do domínio, como está expresso no item 5.4.3.

A porosidade do quebra onda poroso foi considerada como 0,5 pois há uma ampla gama de quebra ondas utilizados pela indústria com diferentes porosidades. Foi então utilizado esse valor por ser um valor intermediário entre os diversos meios porosos disponíveis (MOFRAD, 2013).

Assim como em SANTANNA (2011), os valores da temperatura e da pressão de referência do domínio foram definidas de acordo com os valores de operação do equipamento.

Tabela 10 Parâmetros utilizados

Parâmetro	Valor
Modelo de Turbulência	k-ε
Modelagem Matemática Multifásica	Euleriana
Modelagem de escoamento	Homogêneo
Modelagem da interface entre os fluidos	VoF
Temperatura dos Fluidos	120°C
Pressão de referência	591,3 kPa abs
Tempo Total de Simulação	28s
Passo de tempo	3,4x10 ⁻² s
Porosidade (Quebra Onda)	0,5
Esquema de Controle Numérico	<i>High Resolution</i>
Critério de Convergência	<i>RMS (Raiz do Desvio Quadrático Médio)</i>
Critério de Convergência	10 ⁻⁸

5.4.2 Modelagem do Movimento Relativo da Plataforma

Nas simulações, o domínio foi definido como não estacionário (transiente) e o movimento das unidades de produção flutuantes conhecido como *Roll* (ou Jogo) foi considerado. O movimento de Jogo é o movimento de rotação em torno do eixo z, eixo na direção axial, conforme ilustrado nas Figuras 19 e 33. As características do movimento de *Roll* simulado, como a amplitude e o período do movimento, correspondem à limitação do movimento para o bom funcionamento do equipamento e foram determinados de acordo com procedimentos operacionais vigentes.

Na modelagem, o movimento foi caracterizado como ondas regulares de pequenas amplitudes, periódicas e uniformes. O movimento foi simulado através de funções senoidais, possuindo período de 14s, fazendo, neste período, inclinação máxima de $2,5^\circ$ para direita e $2,5^\circ$ para esquerda em relação ao eixo z.

Foram consideradas ainda duas inclinações: a inclinação de $0,5^\circ$ para os ângulos estáticos de banda (rotação de $0,5^\circ$ para cima em torno do eixo x) e trim (rotação de $0,5^\circ$ para cima em torno do eixo z). Os ângulos estáticos se referem às inclinações da plataforma devido ao peso das cargas presentes, e tendem a ser compensados pelo preenchimento de tanques com água do mar (tanques de lastro).

A inclinação referente ao ângulo de trim foi considerada no sentido do escoamento. Este seria um cenário crítico para a separação dos líquidos, uma vez que essa inclinação é a mais favorável para que a água presente na câmara de separação passe para a câmara de óleo (SANTANNA, 2011).

A Figura 35 representa a inclinação de uma maneira exagerada, para facilitar a visualização. Já as setas representam as entradas e saídas de água e óleo.

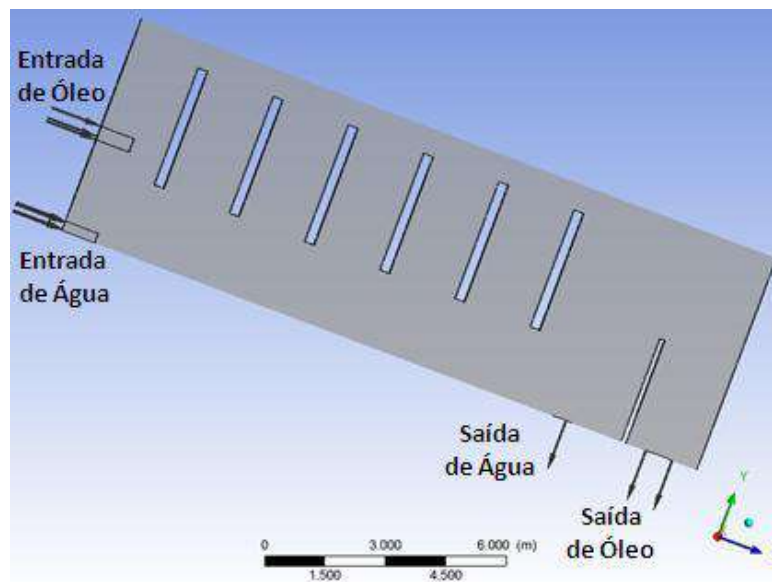


Figura 35. Inclinação do separador no sentido do escoamento devido ao ângulo de trim.

O movimento de Jogo (*Roll*) analisado é formado por ondas uniformes, regulares e periódicas com uma pequena amplitude. A variação angular desse movimento simulada através de funções senoidais é dada pela equação 24.

$$\theta = A \cdot \text{sen}(w \cdot t) \quad (24)$$

Onde t é o tempo e A é a amplitude, representando o ângulo máximo que o separador pode atingir sem considerar o ângulo de *Trim*, e é igual a $2,5^\circ$. A velocidade angular w é dada pela equação 25, sendo T o período:

$$w = \frac{2\pi}{T} \quad (25)$$

Para simular o movimento no software CFX-Pre é necessário definir a velocidade angular em que o domínio se movimenta. A partir da equação de variação de posição do separador com o tempo é possível determinar a variação angular em função do tempo como está descrita na equação 26.

$$V_\theta = \frac{d\theta}{dt} = A \cdot w \cdot \cos(w \cdot t) \quad (26)$$

O maior valor, em módulo, da inclinação ocorre em dois momentos do período: $t=4s$ e $t=11s$. A figura 36 mostra a inclinação do separador devido ao movimento estudado.

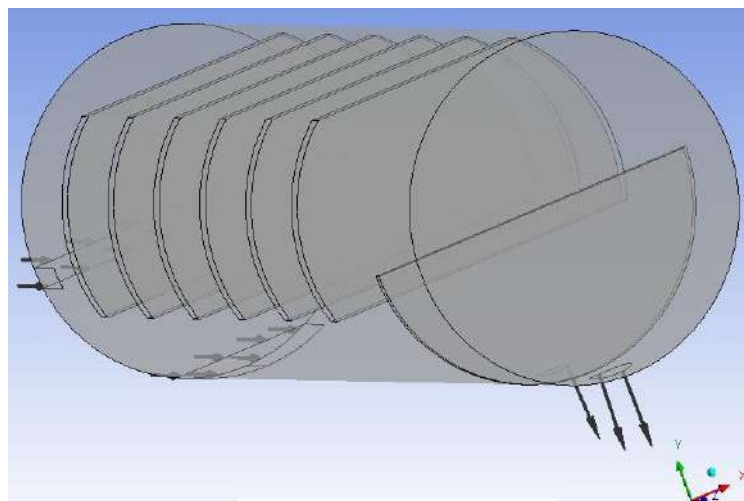


Figura 36. Inclinação do separador no sentido devido ao movimento de Jogo (*Roll*).

O tempo total de simulação foi de 28s (dois períodos) para todas as simulações, com quebra onda poroso e não poroso.

5.4.3 Condições Iniciais e Condições de Contorno

Foram realizadas oito simulações, com condições de contorno diferentes. Foram consideradas quatro vazões diferentes de água e óleo (Tabela 12) e os dois tipos de quebra-onda (poroso e não poroso). A vazão de líquido analisada é fixa com diferentes razões entre a vazão de água e a vazão de óleo, aumentando-se sempre a vazão mássica de água em relação à vazão total para determinar a partir de qual proporção a influência do movimento da plataforma afeta a separação água-óleo.

A vazão mássica de gás não foi considerada, já que não há entrada e saída de gás no separador. Porém o valor encontrado nos dados de produção (Tabela 11) foi utilizado na determinação da quantidade de gás presente no domínio.

Os quatro cenários analisados (A, B, C e D) tiveram as suas vazões mássicas de fluidos e suas respectivas propriedades físicas baseadas nos dados referentes ao ano de 2015 da curva de produção da plataforma apresentada por AMBROSIO (2007) e SANTANNA (2011).

Tabela 11. Dados de vazão e propriedades físicas dos fluidos (AMBROSIO, 2007).

Variável	Óleo	Água	Gás
Vazão mássica (kg/h)	393.548	111.740	2.172,8
Densidade (kg/m ³)	903,7	1078,1	3,9
Viscosidade (cP)	55,7	0,23	0,0128
Fração volumétrica	0,3972	0,0946	0,5082

Como condição inicial e de entrada foi especificada a condição normal de operação em estado estacionário do equipamento, ou seja, foram definidas as alturas de líquido quando não há oscilação da plataforma, calculadas a partir das vazões mássicas de entrada dos fluidos. Nas regiões de saída de água e óleo, as mesmas vazões mássicas de entrada desses fluidos foram especificadas.

As alturas dos fluidos, determinadas a partir do fundo do equipamento, definem as alturas das interfaces água-óleo e óleo-gás antes do vertedor. Esses valores são necessários para possibilitar a modelagem do escoamento utilizando o modelo VoF, descrito no item 5.4.1.

Tabela 12. Os quatro cenários de diferentes proporções água/óleo simulados.

Cenário	Proporção de água em relação à vazão mássica total de líquido	Vazão Mássica de água (kg/s)	Vazão Mássica de óleo (kg/s)
A	80%	112.3	28.1
B	60%	84.2	56.1
C	50%	70.2	70.2
D	40%	56.1	84.2

As alturas dos líquidos foram obtidas a partir da equação 27, que fornece a altura de líquido em um recipiente cilíndrico deitado, dado o volume de líquido (SANTANNA, 2011). Nessa equação L é o comprimento do separador, $V_{\text{água}}$ é o volume de água presente na câmara de separação, r é o raio do equipamento, $h_{\text{água}}$ é a altura da água, ou seja, a altura da interface água e óleo. O valor de $V_{\text{água}}$ foi calculado a partir do volume útil do equipamento ($391,7\text{m}^3$, desconsiderando os volumes ocupados pelos quebra-ondas e pelo vertedor) e das frações volumétricas de fluido. Os valores das frações volumétricas se encontram na Tabela 13. Com isso é possível calcular a altura de água antes do vertedor, no estado estacionário, em cada caso simulado:

$$\frac{V_{\text{água}}}{L} = \frac{\pi}{2} \cdot r^2 - r^2 \cdot \arcsen\left(\frac{r-h_{\text{água}}}{r}\right) + (h_{\text{água}} - r) \cdot \sqrt{r^2 - (h_{\text{água}} - r)^2} \quad (27)$$

Tabela 13. Frações volumétricas de água e altura da interface água/óleo de acordo com os cenários analisados.

Cenário	Fração Volumétrica Água	Altura da Interface Água/Óleo (mm)
A	0,3592	2.331
B	0,2648	1.833
C	0,2188	1.597
D	0,1736	1.354

Na câmara de água, a altura da camada de óleo não passa da altura do vertedor já que, ao atingir esse nível, o óleo passa para a câmara de óleo. A altura da interface gás/óleo nessa região, portanto tem o mesmo valor da altura do vertedor, 272 cm a partir do fundo do equipamento.

Após o vertedor, a altura do óleo foi especificada de tal forma que quando o equipamento atingisse a sua máxima inclinação não houvesse retorno do óleo presente na câmara de óleo para a câmara de separação, como calculado por SANTANNA (2011). A altura do óleo na câmara de óleo, portanto tem o valor de 101,1 cm a partir do fundo do equipamento.

É possível determinar a distribuição dos fluidos, ou seja, as frações volumétricas dos fluidos ao longo do domínio, através das alturas das interfaces. As expressões que definem as frações volumétricas das três fases são condições iniciais do problema e são definidas de acordo com as equações 28, 29 e 30.

$$f_{v\u00e1gua} = \begin{cases} f_{v\u00e1gua1}, & \text{se } z < z_{vertedor} \\ f_{v\u00e1gua2}, & \text{se } z > z_{vertedor} \end{cases} \quad (28)$$

$$f_{v\u00f3leo} = \begin{cases} f_{v\u00f3leo1}, & \text{se } z < z_{vertedor} \\ f_{v\u00f3leo2}, & \text{se } z > z_{vertedor} \end{cases} \quad (29)$$

$$f_{vg\u00e1s} = \begin{cases} f_{vg\u00e1s1}, & \text{se } z < z_{vertedor} \\ f_{vg\u00e1s2}, & \text{se } z > z_{vertedor} \end{cases} \quad (30)$$

Onde $f_{v\u00e1gua}$, $f_{v\u00f3leo}$ e $f_{vg\u00e1s}$ s\u00e3o as fra\u00e7\u00f5es volum\u00e9tricas de \u00e1gua, \u00f3leo e g\u00e1s no dom\u00ednio, respectivamente; $f_{v\u00e1gua1}$ (Equa\u00e7\u00e3o 31), $f_{v\u00f3leo1}$ (Equa\u00e7\u00e3o 35) e $f_{vg\u00e1s1}$ (Equa\u00e7\u00e3o 33) as fra\u00e7\u00f5es volum\u00e9tricas de \u00e1gua, \u00f3leo e g\u00e1s na câmara de separa\u00e7\u00e3o, $f_{v\u00e1gua2}$ (Equa\u00e7\u00e3o 32), $f_{v\u00f3leo2}$ (Equa\u00e7\u00e3o 36) e $f_{vg\u00e1s2}$ (Equa\u00e7\u00e3o 34) as fra\u00e7\u00f5es volum\u00e9tricas de \u00e1gua, \u00f3leo e g\u00e1s na câmara de \u00f3leo e $z_{vertedor}$ \u00e9 a posi\u00e7\u00e3o do vertedor no separador.

$$f_{v\u00e1gua1} = \text{degrau} \left(\frac{h_{\u00e1gua} - y}{1m} \right) \quad (31)$$

$$f_{v\u00e1gua2} = 0 \quad (32)$$

$$f_{vg\u00e1s1} = \text{degrau} \left(\frac{y - h_{vertedor}}{1m} \right) \quad (33)$$

$$f_{vg\u00e1s2} = \text{degrau} \left(\frac{y - h_{\u00f3leo2}}{1m} \right) \quad (34)$$

$$f_{v\acute{o}leo1} = 1 - f_{vg\acute{a}s1} - f_{v\acute{a}gua1} \quad (35)$$

$$f_{v\acute{o}leo2} = \text{degrau}\left(\frac{h_{\acute{o}leo2} - y}{1m}\right) \quad (36)$$

6 Resultados

6.1 Teste de Malha

Para determinar as malhas a serem utilizadas, foram realizados simultaneamente dois testes de malha para que fossem selecionadas as duas malhas ideais para serem utilizadas nas simulações: com o meio poroso e sem o meio poroso.

Foram plotados dois gráficos com a variação da densidade com a altura y , ao longo dos diâmetros do separador, em $Z=3\text{m}$ (Figura 37) para o tempo de $1,71\text{s}$. Os perfis de densidade estão representados pelas Figuras 38 e 39.

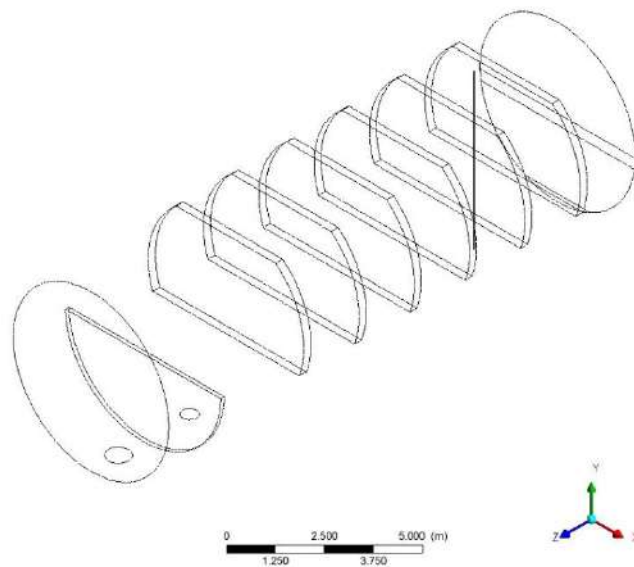


Figura 37. Linha para avaliação do perfil de densidade – $Z=3\text{m}$ - $2.8 < y < 2.8$.

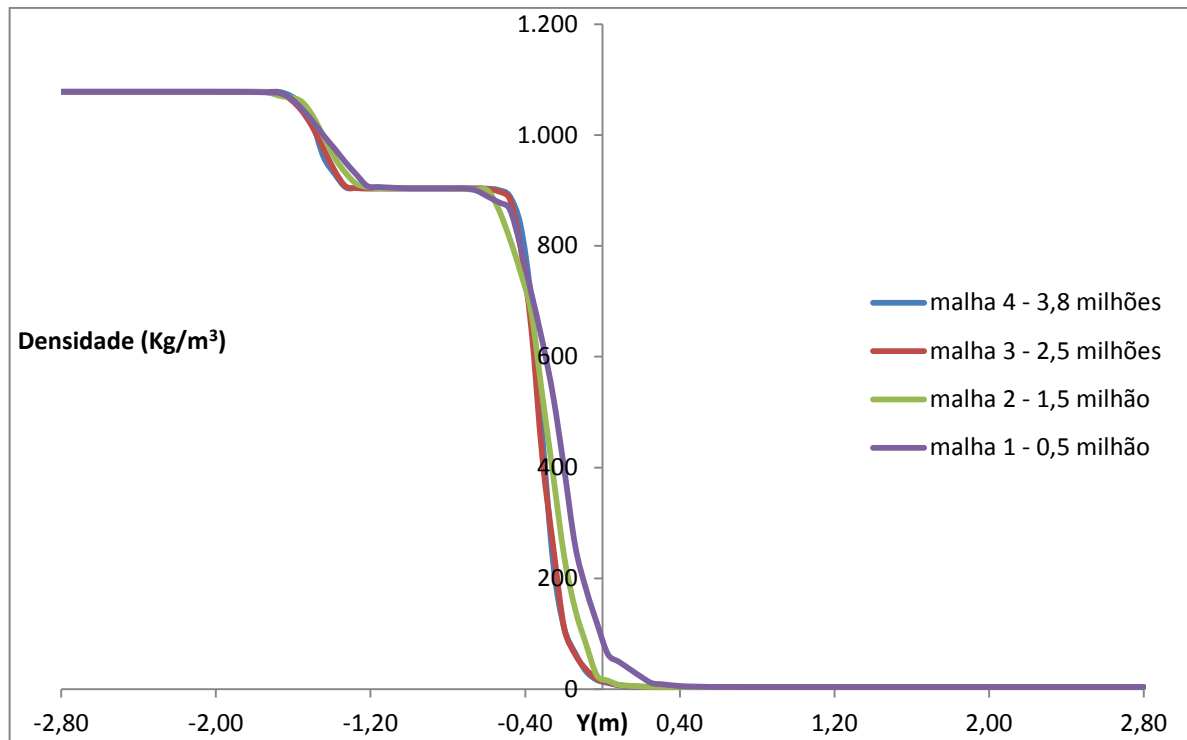


Figura 38. Perfil de Densidade – $Z=3\text{m}$ - $-2.8 < y < 2.8$ - $t = 1.71\text{s}$ – Com Quebra Ondas Poroso.

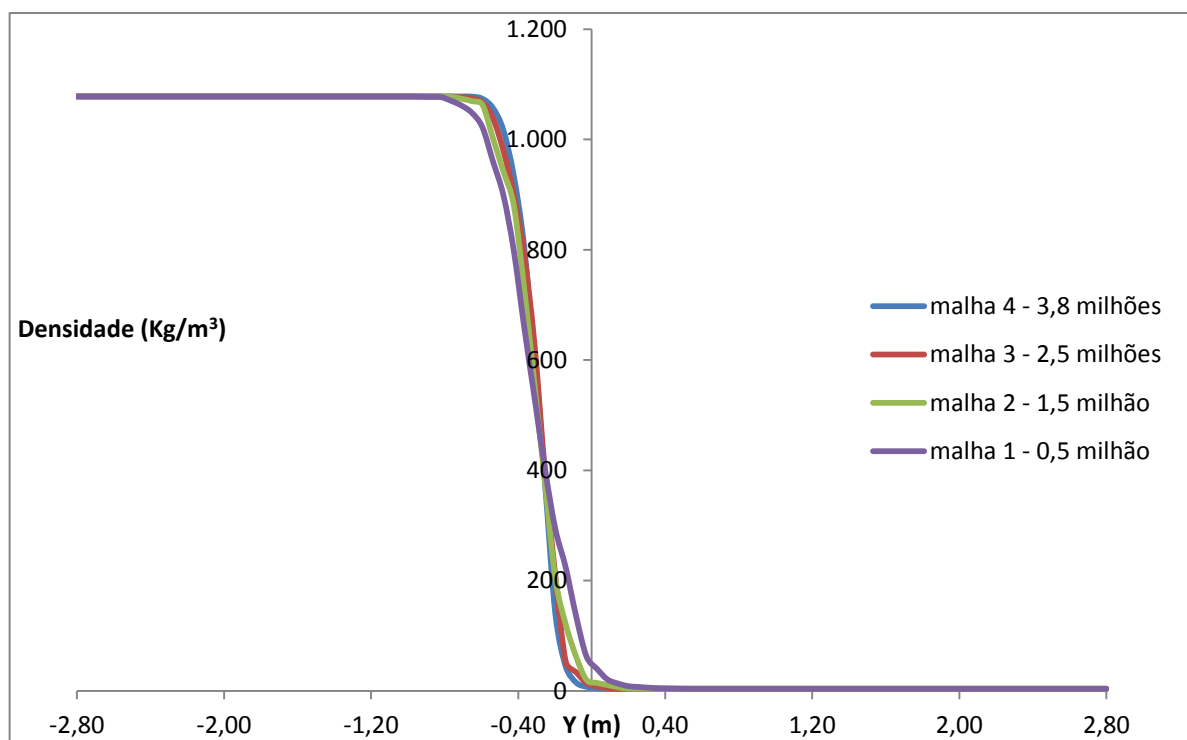


Figura 39. Perfil de Densidade – $Z=9\text{m}$ - $-2.8 < y < 2.8$ - $t = 1.71\text{s}$ – Sem Quebra Ondas Poroso.

Como é possível observar na Figura 38 (Cenário D – Maior concentração de óleo), a curva de distribuição de densidades apresenta três níveis bem definidos separados pelas interfaces entre

os fluidos (água, óleo e gás) enquanto que o perfil de densidade apresentado na Figura 39 (Cenário A – Menor concentração de óleo) não apresenta as 3 fases bem definidas pela menor quantidade de óleo presente, o que facilita a formação de emulsões água-óleo e óleo-gás.

O primeiro nível é a camada de água que se deposita no fundo do equipamento, devido ao efeito gravitacional atuante e por ser o mais pesado entre os três fluidos presentes. O segundo nível é a camada de óleo e o terceiro, a camada de gás, o menos denso entre os três fluidos em escoamento. Podemos observar que os valores de densidade observados nestas figuras estão de acordo com a Tabela 11.

Os níveis representam camadas de fluidos estratificadas, logo as curvas obtidas para as diferentes malhas para esses valores constantes de densidade não apresentam diferença entre si. As malhas com distintos graus de refinamento diferem nas regiões das curvas onde existe a interface entre os fluidos.

A Figura 38 indica que a malha 3 da simulação com quebra onda poroso, com 2,5 milhões de elementos, é independente. Para a simulação com quebra onda não poroso foi escolhida a malha 4, com 3,8 milhões de elementos, pois nas regiões críticas (interfaces) havia uma pequena diferença entre as malhas 3 e 4 sendo a malha 4 a mais adequada para a simulação.

6.2 Teste de Passo de Tempo

O passo de tempo utilizado, $3,4 \times 10^{-2} s$, foi o mesmo do trabalho de SANTANNA (2011). Porém, antes de ser utilizado, foi efetuado um teste para analisar a independência dos resultados em relação a esse passo de tempo. Já utilizando as malhas escolhidas pelos testes de malha, foram realizadas simulações para analisar se um passo de tempo dez vezes menor não alteraria os resultados das simulações com o domínio em movimento.

As Figuras 41 e 42 mostram duas curvas de distribuição de densidade, dentro do primeiro período do movimento, para os 2 passos de tempo, em 2 pontos diferentes como mostra a Figura 40. Podemos observar que as curvas para o maior e o menor passo de tempo coincidem, confirmando a independência do passo de tempo de $3,4 \times 10^{-2} s$, que foi então utilizado para o prosseguimento das simulações.

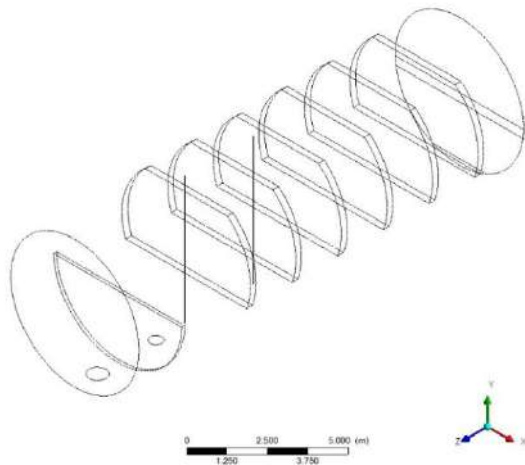


Figura 40. Linhas para avaliação do perfil de densidade – Z=9m & z=12 - 2.8<y<2.8.

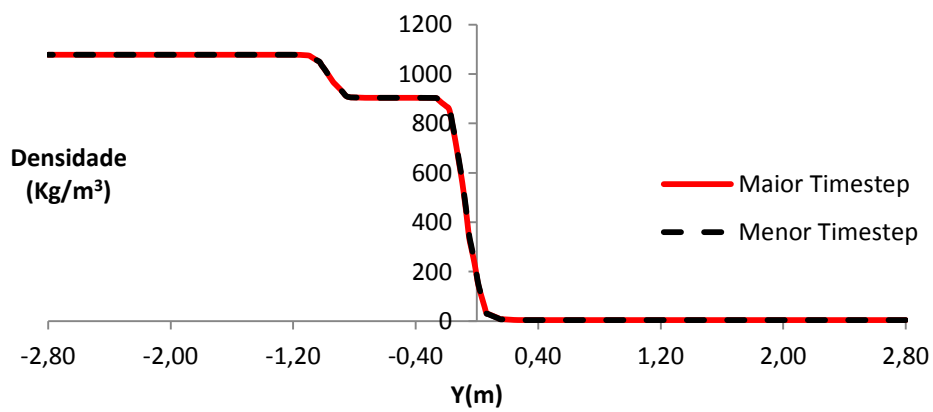


Figura 41. Perfil de Densidade – Z=9m - 2.8<y<2.8 – t = 1.72s – Cenário B – Sem Quebra Ondas Poroso.

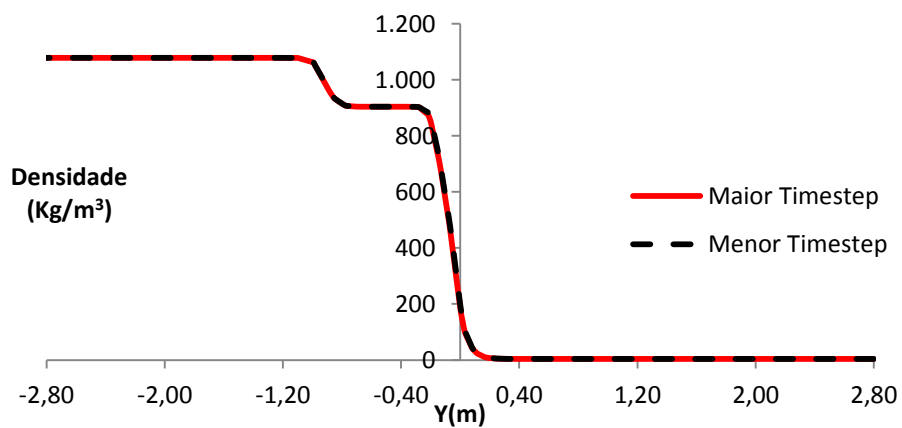


Figura 42. Perfil de Densidade – Z=12 m - 2.8<y<2.8 – t = 1.72s – Cenário B – Sem Quebra Ondas Poroso.

6.3 Resultados Gerais

6.3.1 Verificação do Movimento no Domínio

É possível observar visualmente o movimento do separador por meio de perfis de densidade em planos XY em $z=14.9\text{m}$, região acima do vertedor, entre a câmara de separação e a câmara de óleo, como as Figuras 43 e 44.

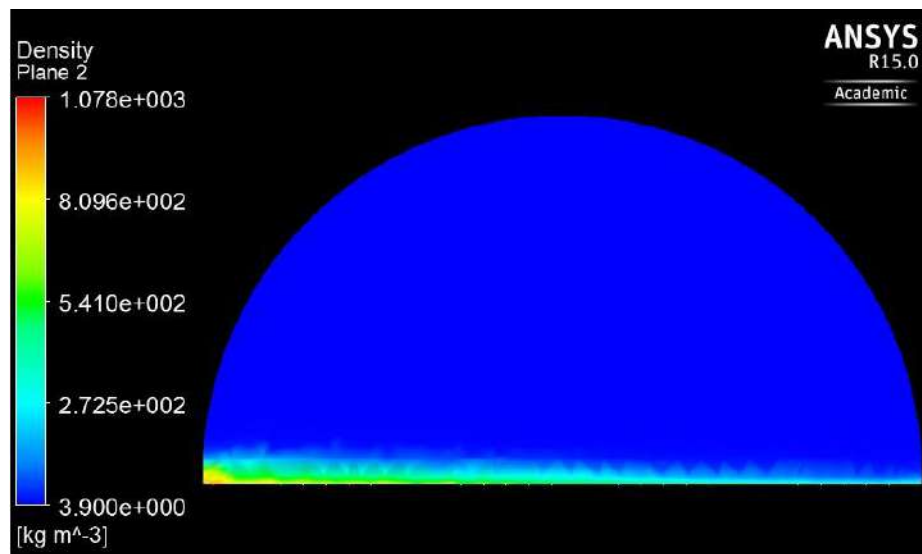


Figura 43. Perfil de Densidade – Plano XY em $z=14.9\text{m}$ – $t = 4.104\text{s}$ – Cenário C – Com Quebra Ondas Poroso.

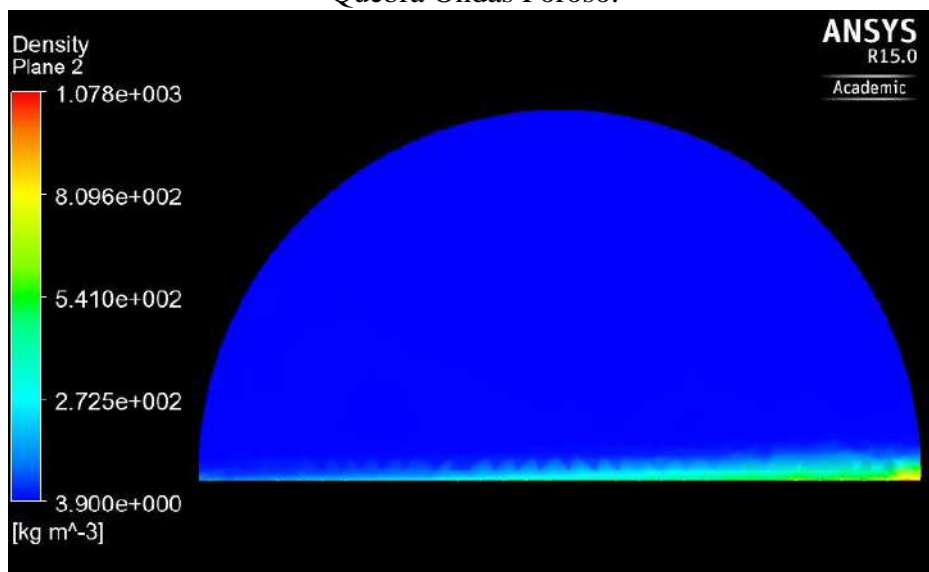


Figura 44. Perfil de Densidade – Plano XY em $z=14.9\text{m}$ – $t = 11.286\text{s}$ – Cenário C – Com Quebra Ondas Poroso.

Os perfis de densidade em planos XY em $z=14.925$ m, região logo após o vertedor, onde escorre o óleo para a câmara de óleo, podem ser observados nas Figuras 45 e 46. É possível observar que o movimento aumenta o fluxo de fluidos em uma região do vertedor, no caso da Figura 48, na esquerda do primeiro plano e na direita do segundo plano. Já na extremidade oposta, direita no primeiro plano e esquerda no segundo plano, é possível observar a diminuição da passagem de óleo pela diminuição da densidade já que há uma redução no nível antes do vertedor devido ao movimento angular. A passagem de óleo por apenas um dos lados é observada também na Figura 46.

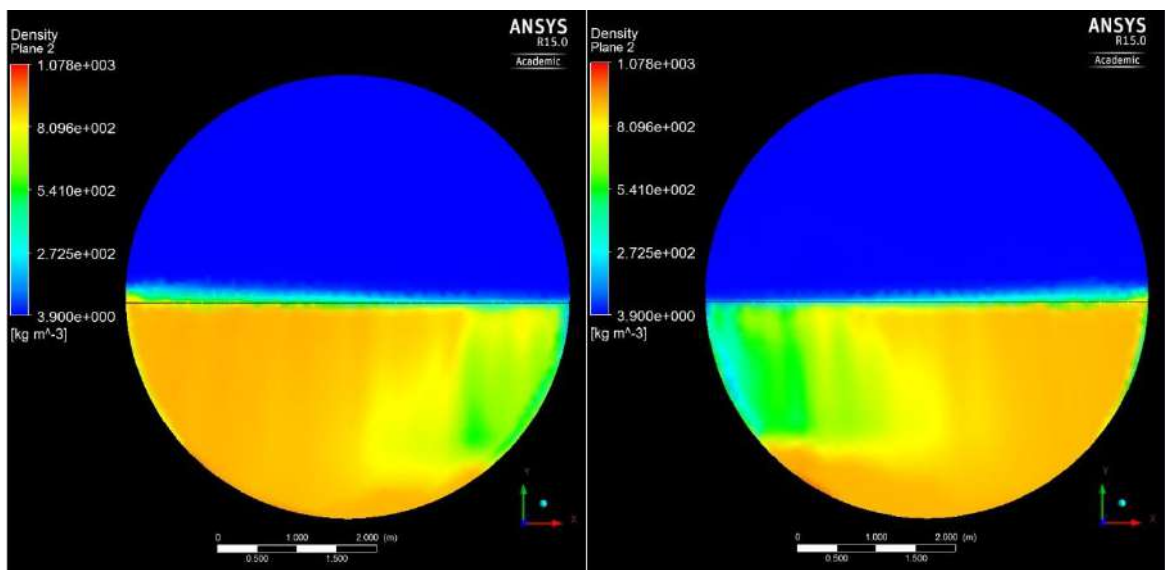


Figura 45. Perfil de Densidade – Plano XY em $z=14.925$ m – $t = 4.104$ s (Esquerda) e $t=11.286$ s (Direita) – Cenário C – Com Quebra Ondas Poroso.

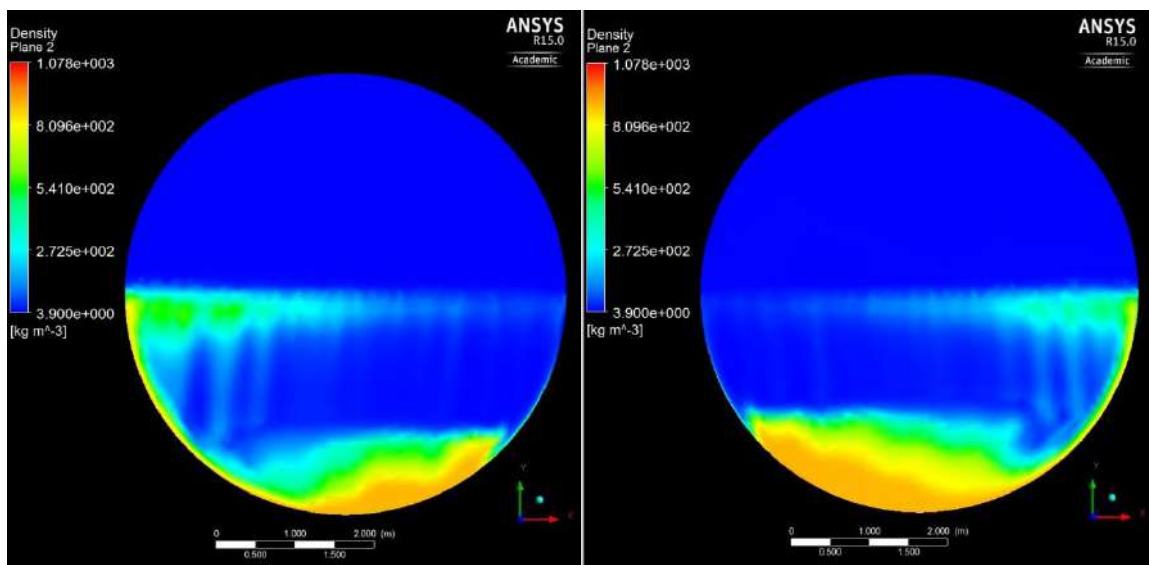


Figura 46. Perfil de Densidade – Plano XY em $z=15$ m – $t = 4.104$ s (Esquerda) e $t=11.286$ s (Direita)– Cenário C.

6.3.2 Distribuição dos Fluidos no Domínio

Essa distribuição pode ser observada através dos gráficos das frações volumétricas dos fluidos na câmara de separação (Figuras 47,48 e 49) e na câmara de óleo (Figura 50 e 51).

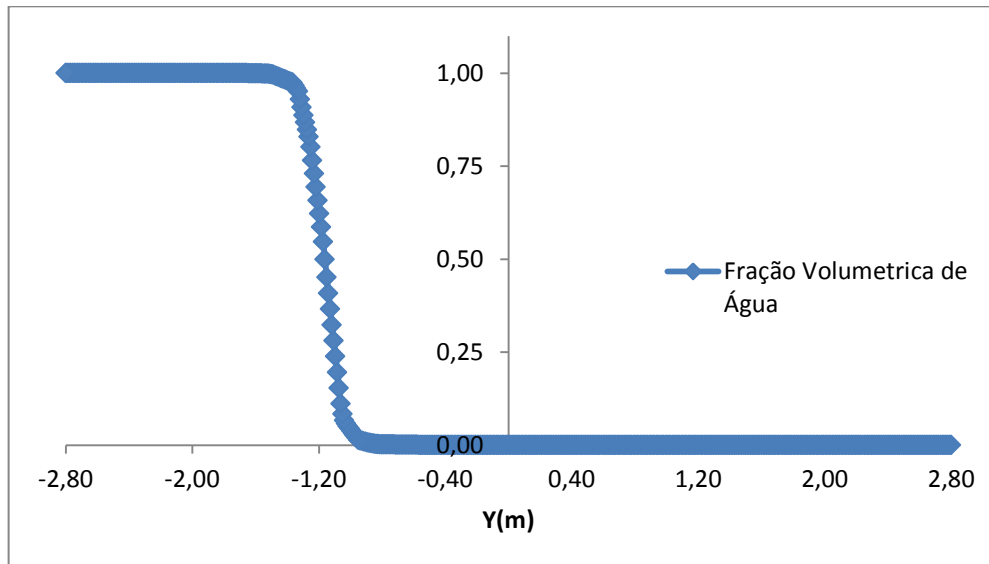


Figura 47. Perfil de fração volumétrica de água– $x=0$ m - Cenário C - Antes do Vertedor.

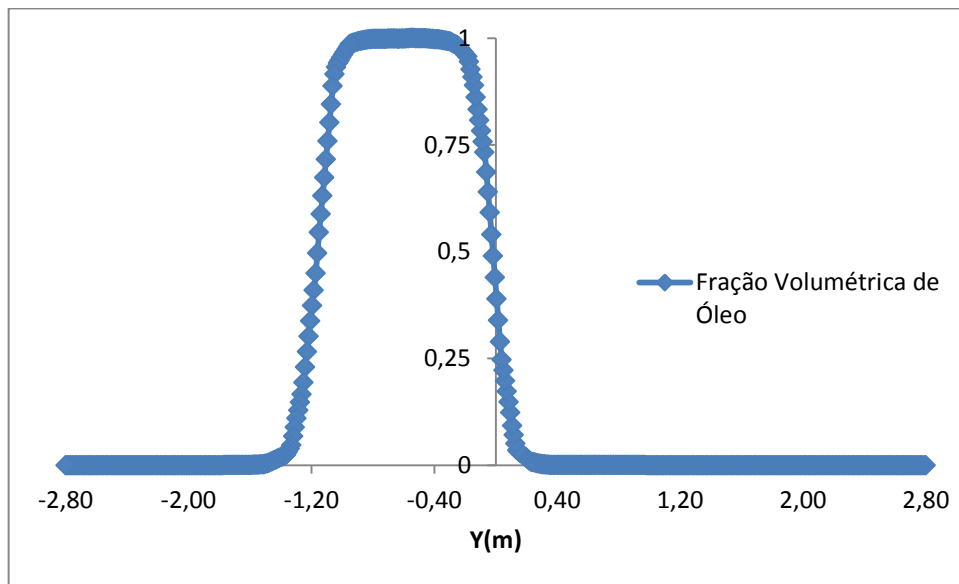


Figura 48. Perfil de fração volumétrica de óleo– $x=0$ m – Cenário C - Antes do Vertedor.

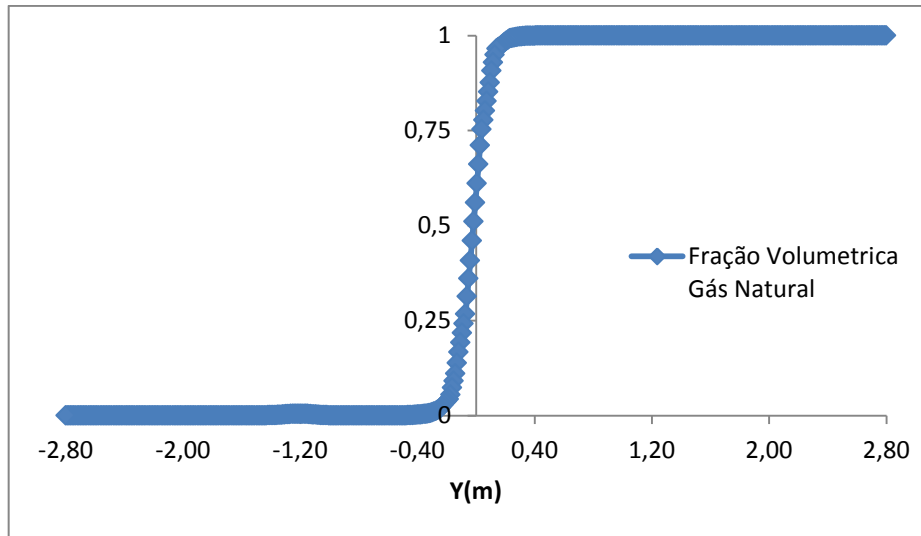


Figura 49. Perfil de fração volumétrica de gás – $x=0$ m – Antes do Vertedor.

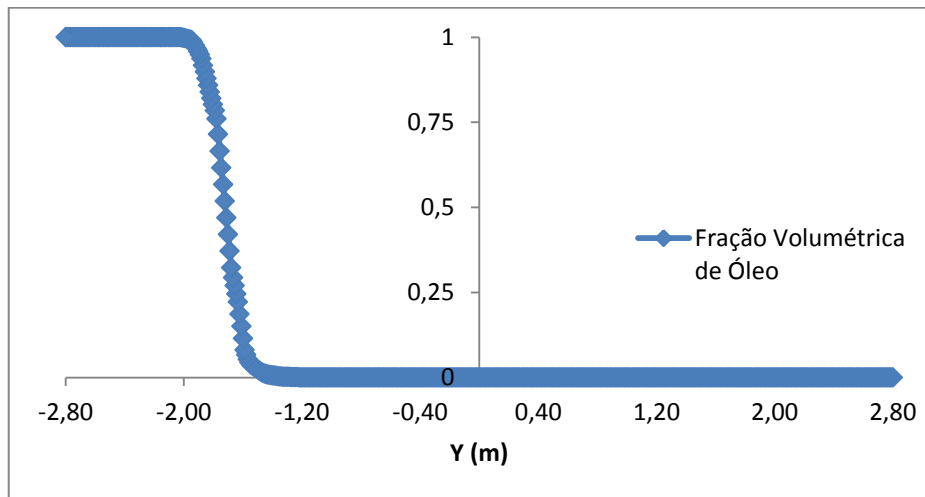


Figura 50. Perfil de fração volumétrica de óleo – $x=0$ m – Pós Vertedor.

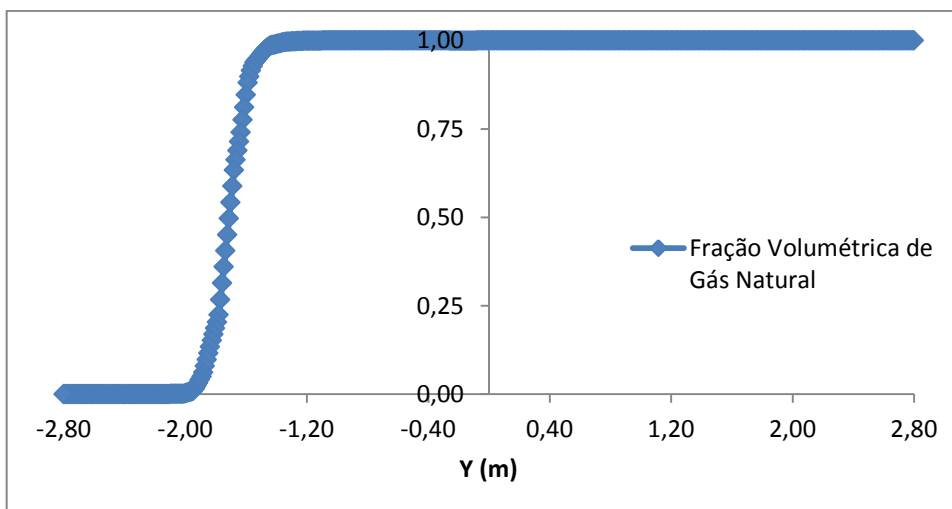


Figura 51. Perfil de fração volumétrica de gás – $x=0$ m – Pós Vertedor.

Os perfis de densidade apresentados nas Figuras 52, 53, 54 e 55 em $X=0$ mostram a distribuição dos fluidos ao longo do trajeto do escoamento do fluido desde a entrada na câmara de separação (direita) até a saída da câmara de óleo (esquerda). As três fases estudadas estão bem detalhadas (vermelho – água, amarelo – óleo, azul – gás natural).

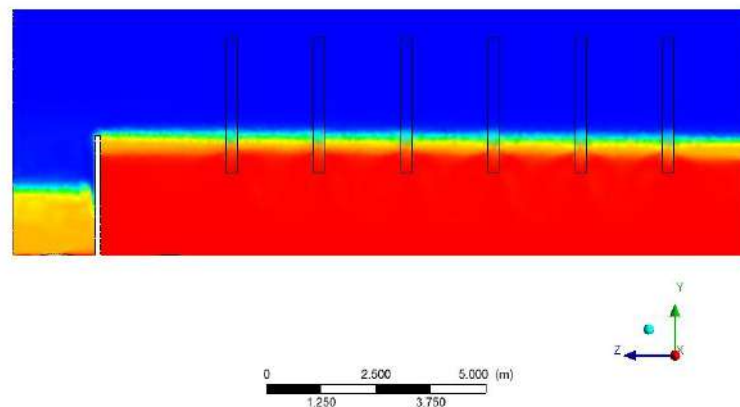


Figura 52. Perfil de Densidade – Plano YZ em $x=0$ m – Cenário A.

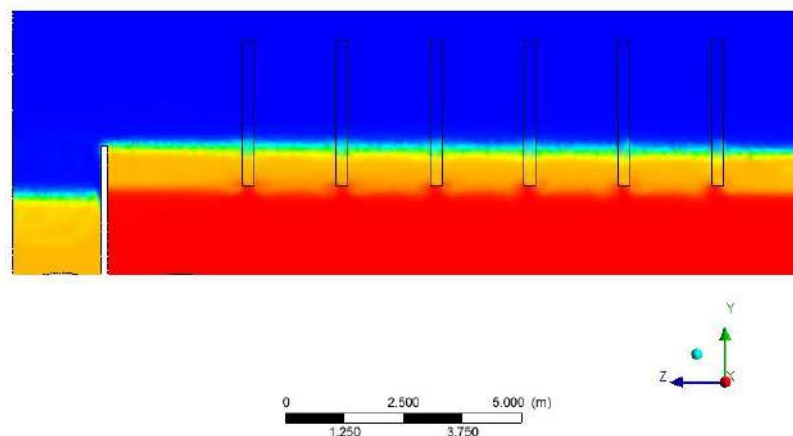


Figura 53. Perfil de Densidade – Plano YZ em $x=0$ m – Cenário B.

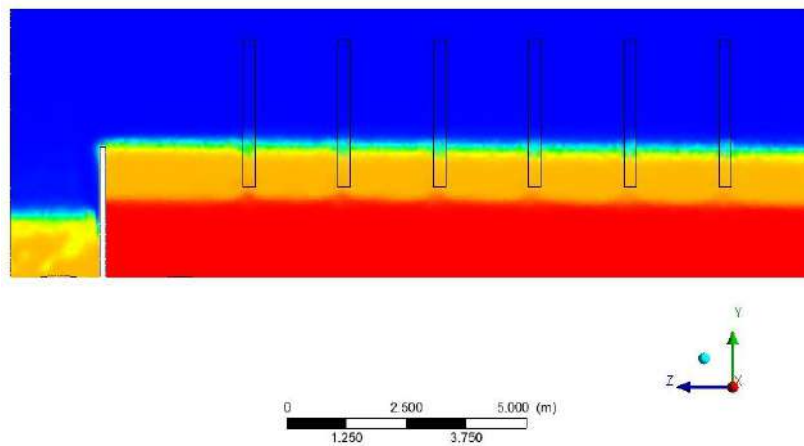


Figura 54. Perfil de Densidade – Plano YZ em $x=0$ m – Cenário C.

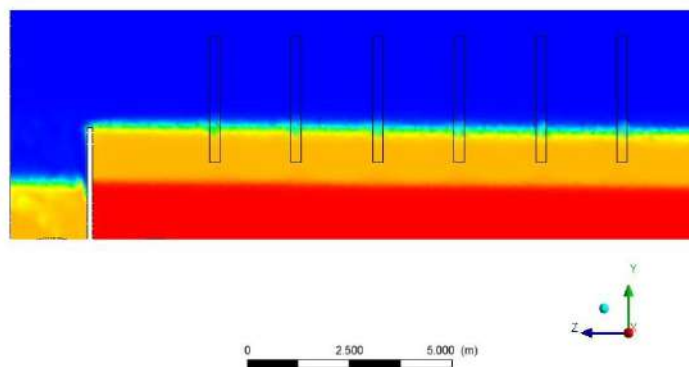


Figura 55. Perfil de Densidade – Plano YZ em $x=0$ m – Cenário D.

6.3.3 Influência do Movimento Relativo das Plataformas de Produção

Utilizando o CFD-Post foi traçada uma linha (*polyline*) ao longo da circunferência do separador gravitacional (Figura 56) para a obtenção de um perfil de fração volumétrica nos pontos mais próximos à parede. Esse perfil indica os níveis máximos alcançados pelas interfaces água/óleo e óleo/gás. Por ele estar bem próximo do vertedor, ele expressa com fidelidade o comportamento do fluido na passagem da câmara de separação para a câmara de óleo.

O primeiro perfil de fração volumétrica obtido foi o da Figura 57, para a verificação da periodicidade do movimento. Por meio desse gráfico é possível observar o comportamento periódico que a altura de líquido faz ao longo da simulação nos dois períodos estudados. As

linhas tracejadas representam os pontos mais importantes no período, ou seja, pontos onde obtemos as alturas máximas, mínimas e onde ela retorna ao ponto inicial (meio do período).

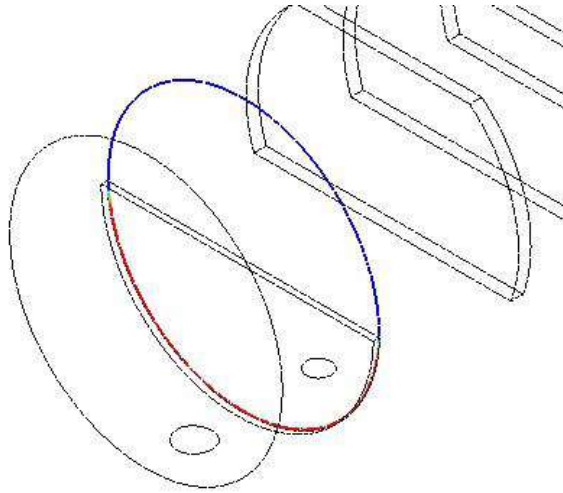


Figura 56. Linha (*Polyline*) para avaliação da altura máxima de líquido – $Z=14,79\text{m}$ - $2.8 < y < 2.8$.

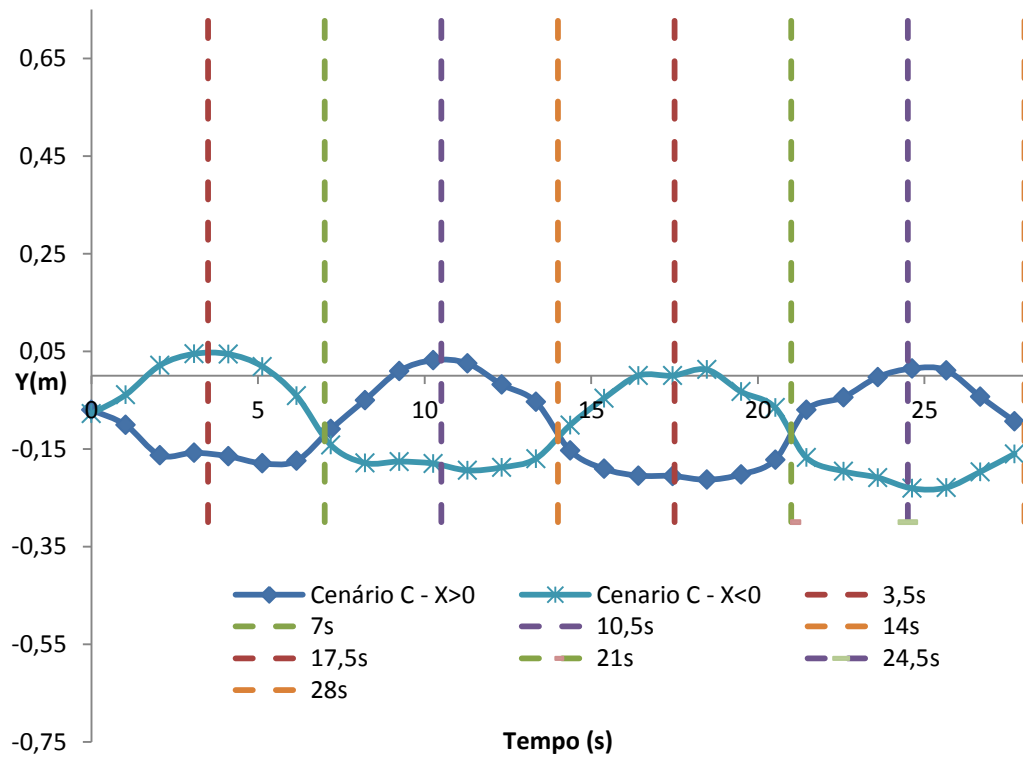


Figura 57. Altura de líquido – $Z=14,79\text{m}$ - $2.8 < y < 2.8$ - Cenário C – Com Quebra Ondas Porosos – Periodicidade.

Foram determinados então dois gráficos para cada cenário estudado:

- Um para determinar a influência do movimento na alteração do nível de líquido (água e óleo) dentro do equipamento ao longo de um período completo, como pode ser observado nas Figuras 58, 60, 62 e 64. Como o nível máximo e mínimo ocorrem próximos à parede, a linha traçada apresenta os perfis de fração volumétrica ideais para o estudo do movimento na eficiência do equipamento.
- E outro para determinar a fração volumétrica de água próxima à parede em relação à altura. A partir desse dado, é possível determinar o efeito do movimento do equipamento na separação já que valores de fração volumétrica de água próximos à parede, acima da altura do vertedor indicam a passagem de água da câmara de separação para a câmara de óleo, efeito indesejado. Esses perfis podem ser observados nas Figuras 59, 61, 63 e 65.

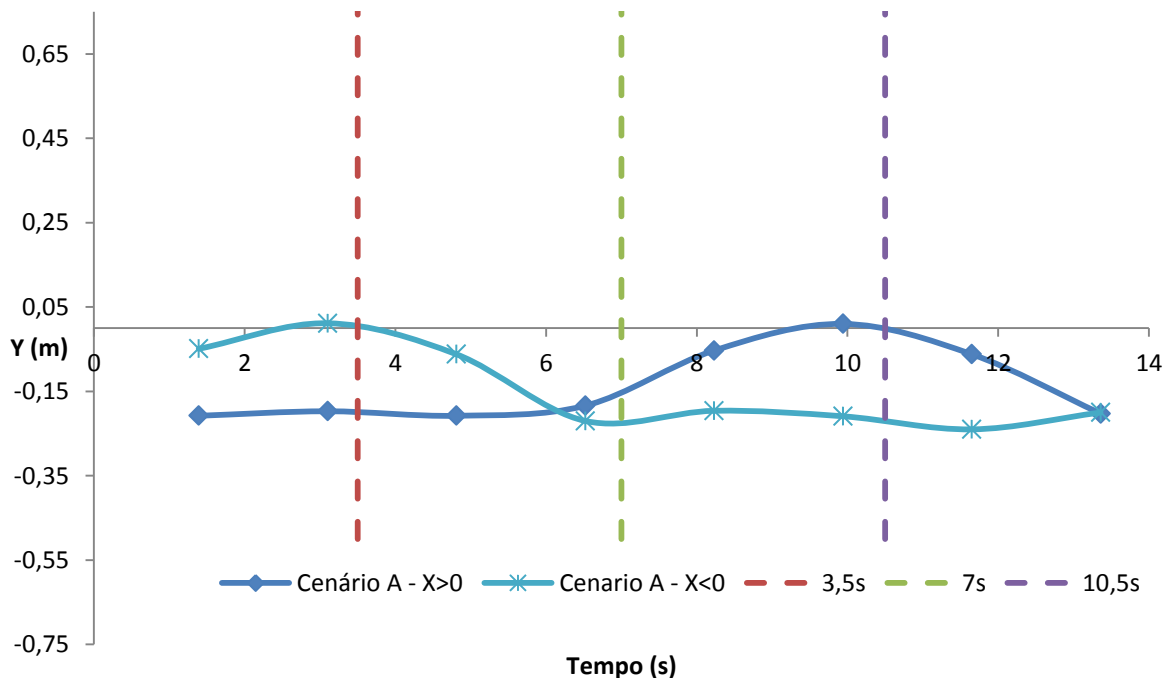


Figura 58. Y (m) x Tempo (s)– Cenário A – Com Quebra Ondas Porosos.

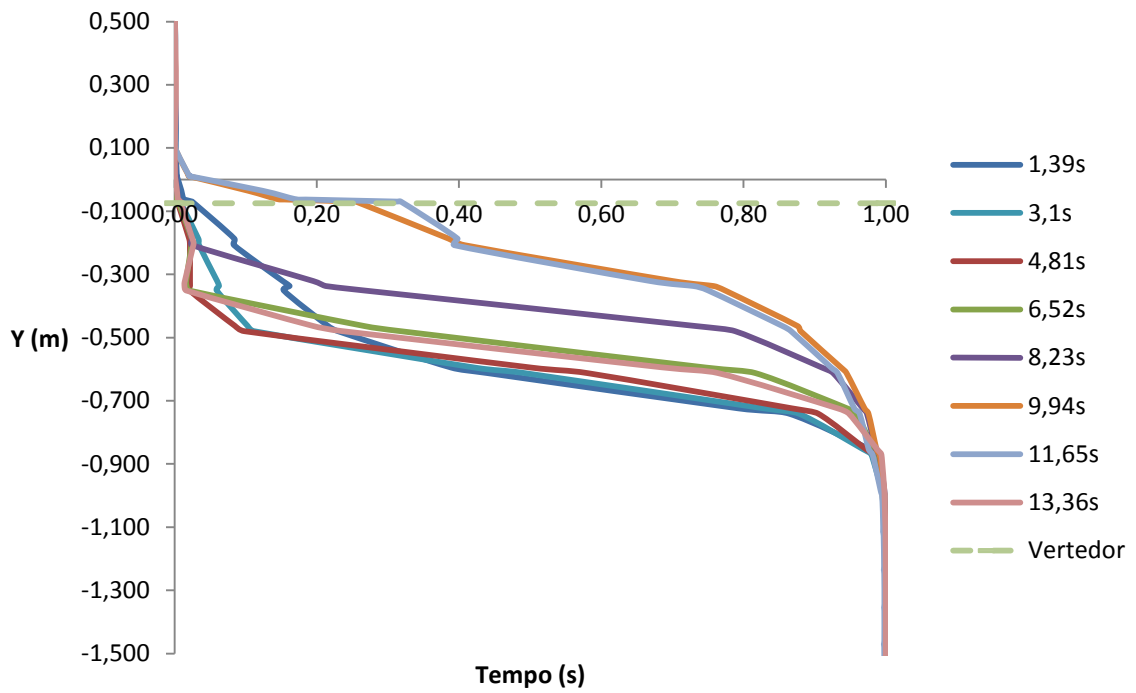


Figura 59. Fração volumétrica da água *versus* Y(m) – Cenário A – Com Quebra Ondas Poroso.

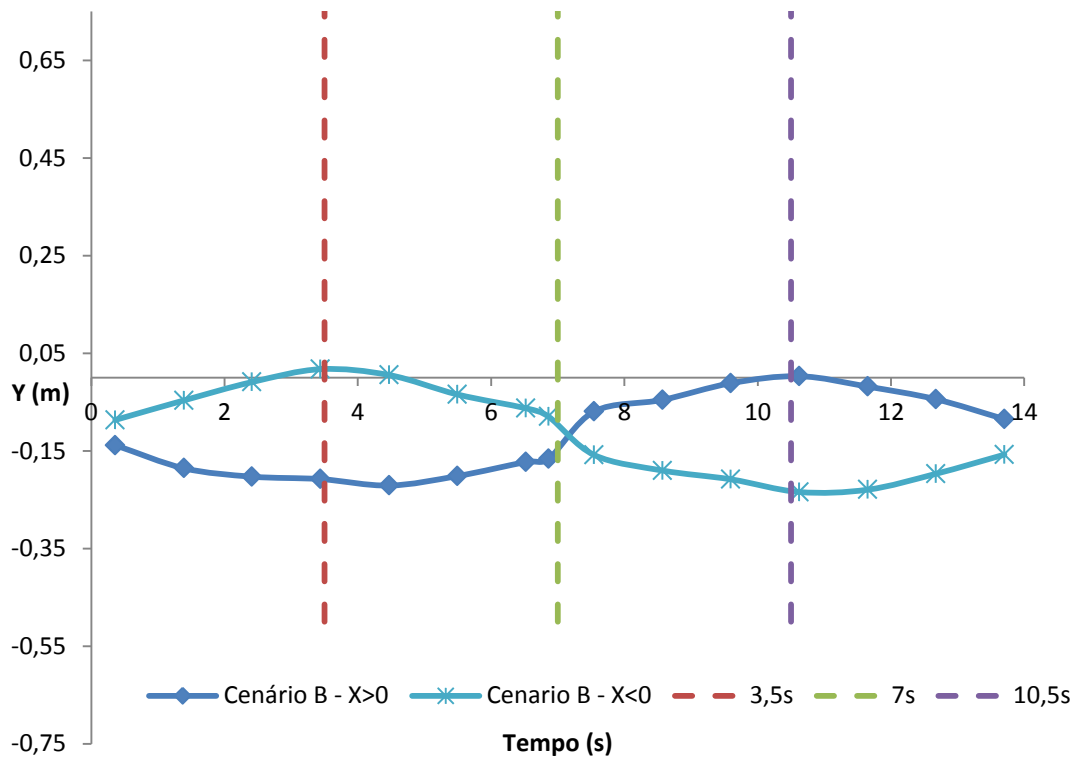


Figura 60. Y (m) x Tempo (s)– Cenário B – Com Quebra Ondas Poroso.

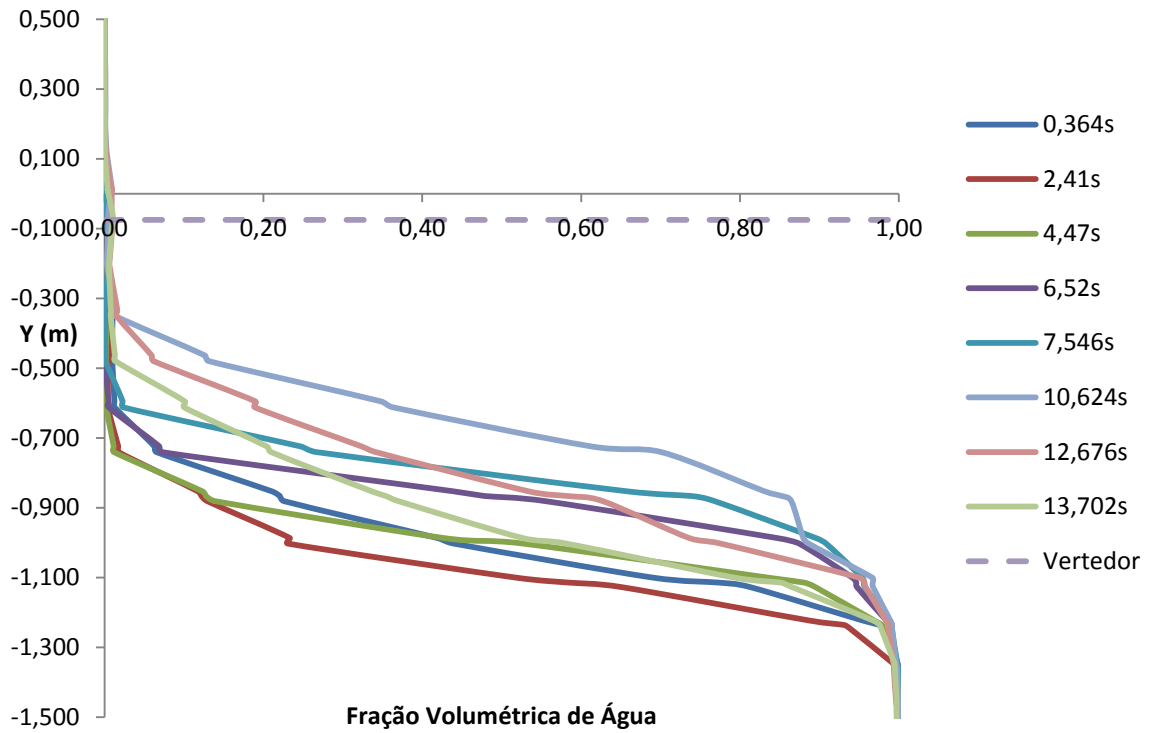


Figura 61. Fração volumétrica da água *versus* Y(m) – Cenário B – Com Quebra Ondas Poroso.

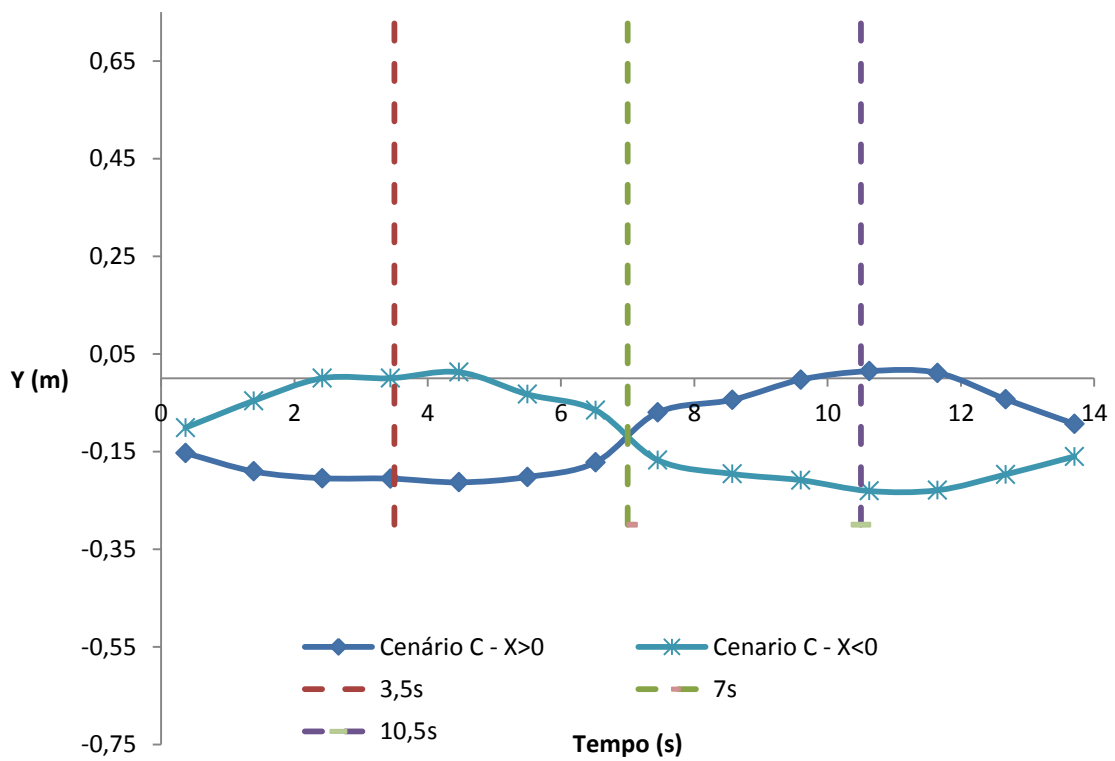


Figura 62. Y (m) x Tempo (s)– Cenário C – Com Quebra Ondas Poroso.

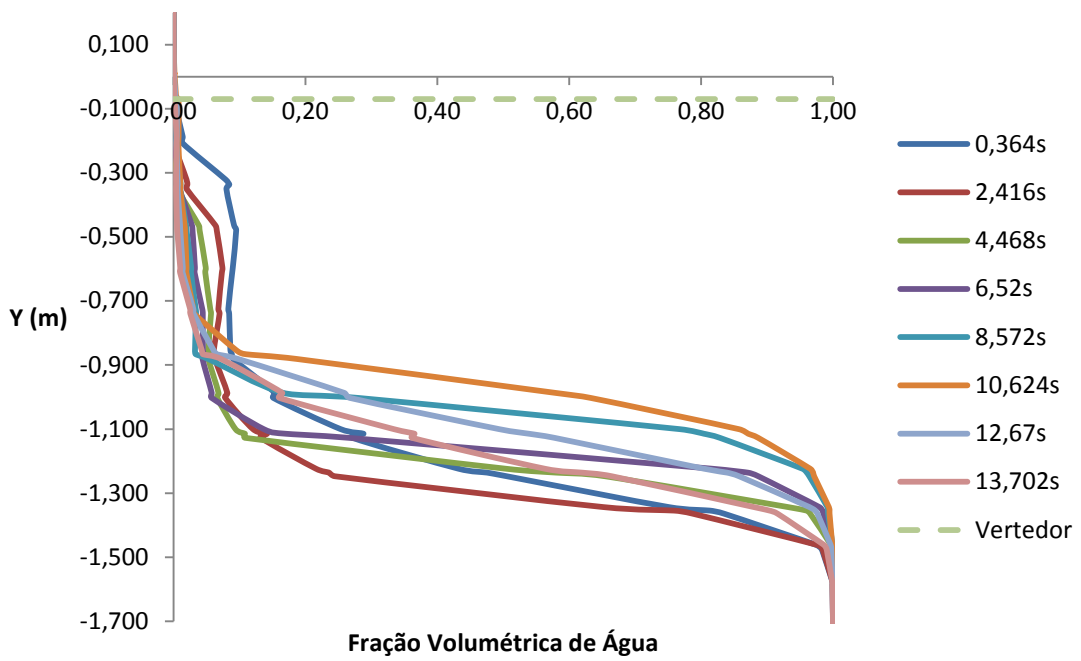


Figura 63. Fração volumétrica da água *versus* Y(m) – Cenário C – Com Quebra Ondas Poroso.

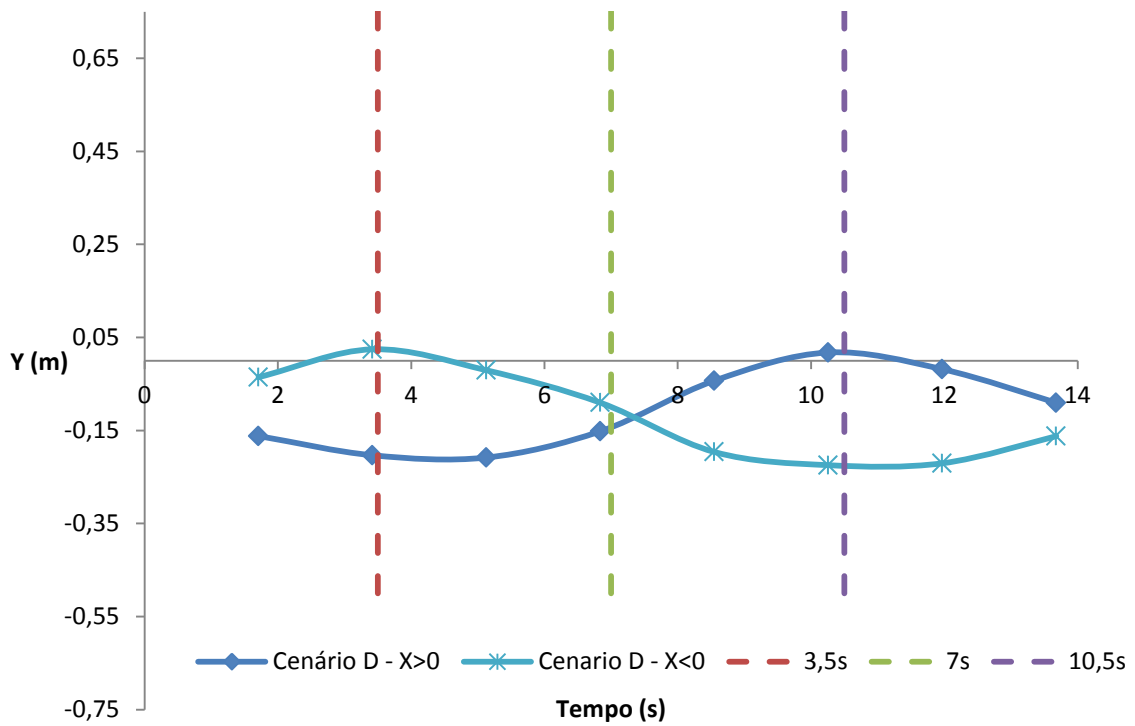


Figura 64. Y (m) x Tempo (s)– Cenário D – Com Quebra Ondas Poroso.

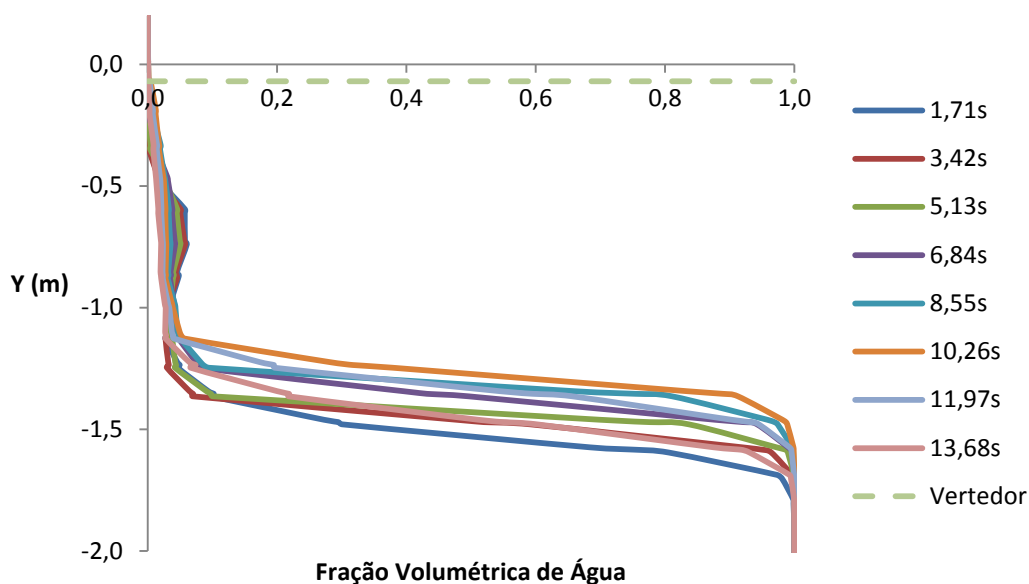


Figura 65. Fração volumétrica da água *versus* Y(m) – Cenário D – Com Quebra Ondas Poroso.

6.3.4 Influência dos Quebra Ondas Porosos

Para avaliar a influência da porosidade dos quebra ondas, as Figuras 66 a 69 mostram a diferença de nível de líquido na parede do separador, logo antes do vertedor, ao longo do ciclo de oscilação, para as simulações com quebra ondas poroso (CQOP) e sem quebra ondas poroso (SQOP), isto é, com quebra ondas sólido.

A altura máxima obtida nas simulações com quebra ondas poroso é maior que a altura máxima obtida com quebra ondas sólido, indicando que essa aproximação não é conservativa e não deve ser utilizada.

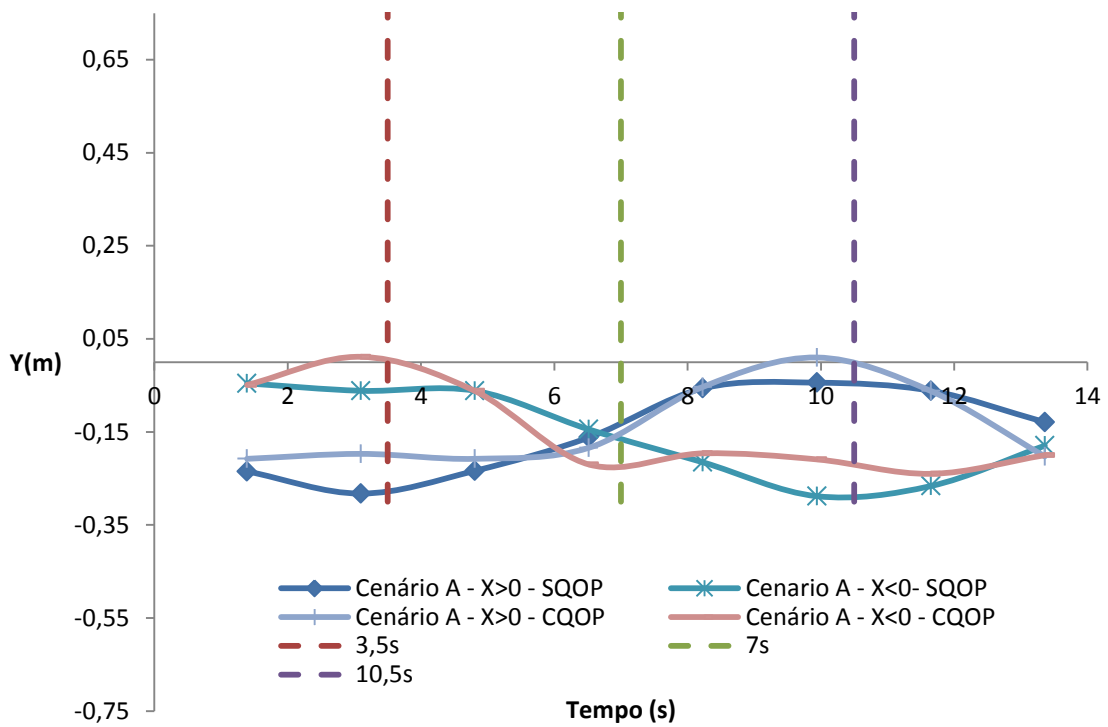


Figura 66. Comparação – Tempo (s) x Y (m) – Cenário A – com quebra ondas poroso (CQOP) e com quebra ondas sólido (SQOP).

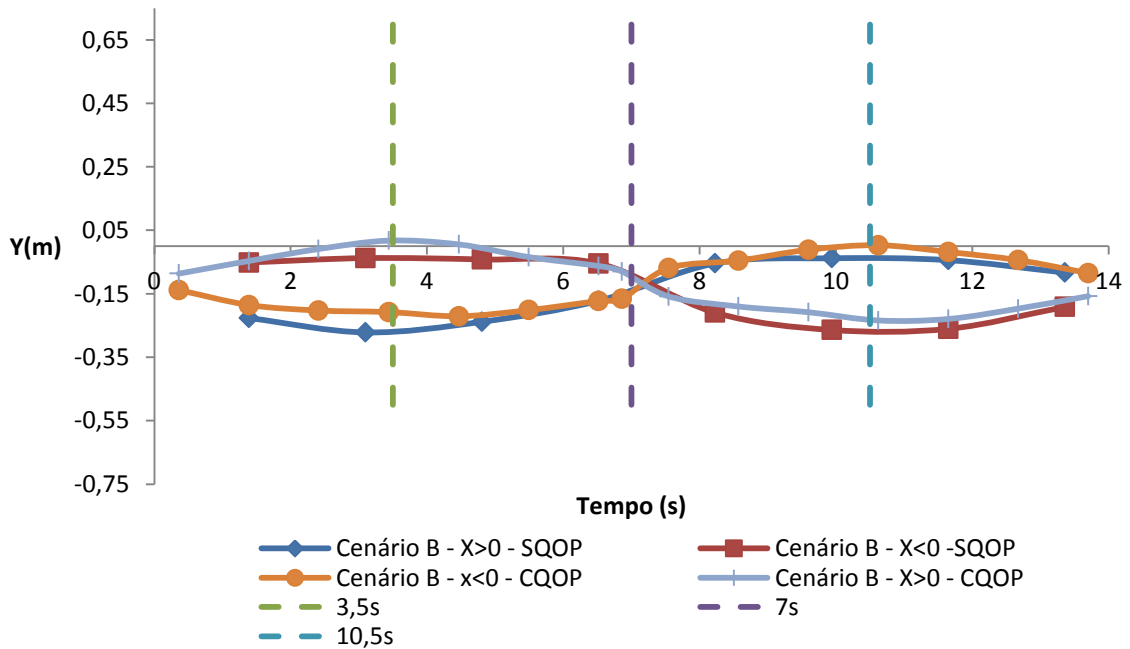


Figura 67. Comparação – Tempo (s) x Y (m) – Cenário B – com quebra ondas poroso (CQOP) e com quebra ondas sólido (SQOP).

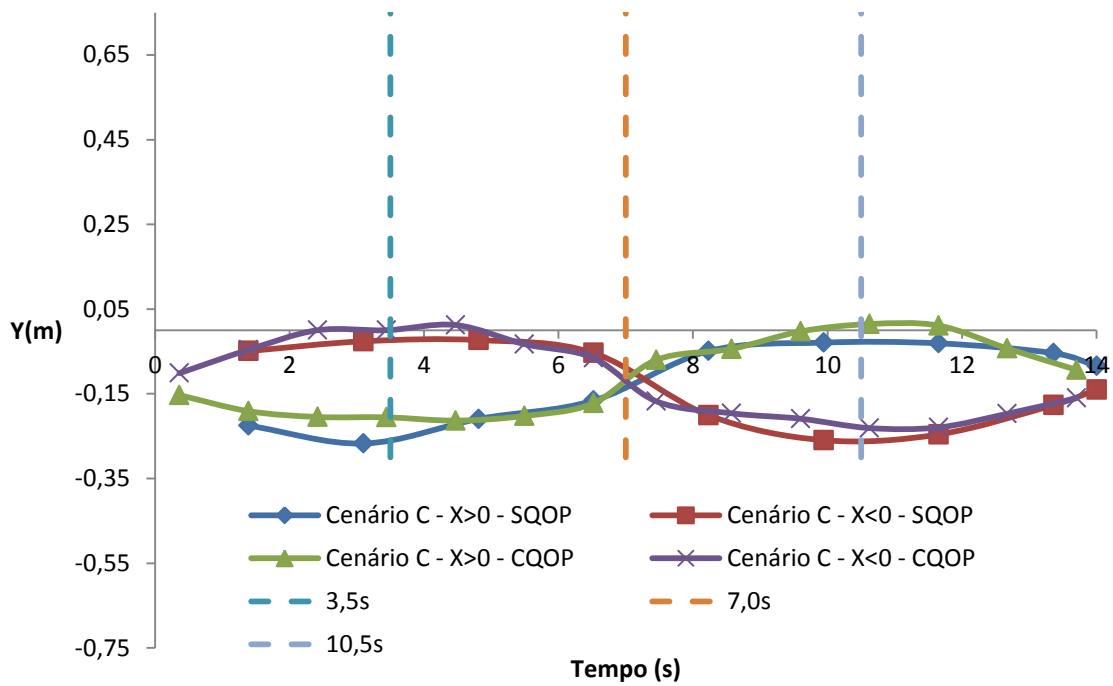


Figura 68. Comparação – Tempo (s) x Y (m) – Cenário C – com quebra ondas poroso (CQOP) e com quebra ondas sólido (SQOP).

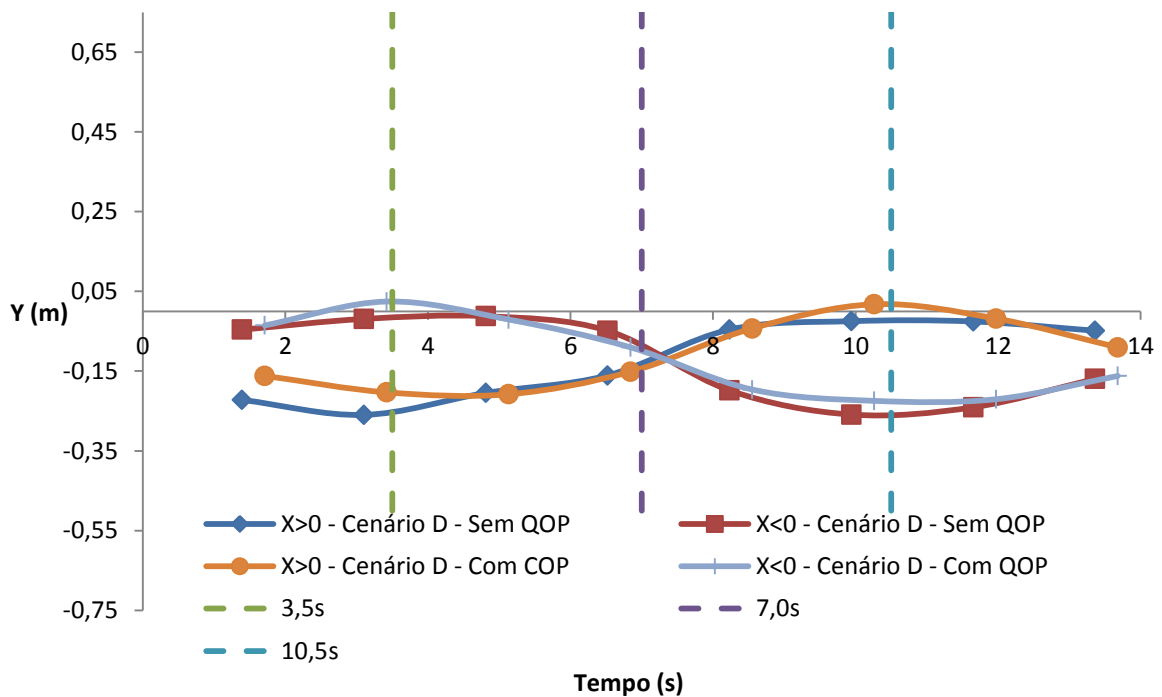


Figura 69. Comparação – Tempo (s) x Y (m) – Cenário D – com quebra ondas poroso (CQOP) e com quebra ondas sólido (SQOP).

6.3.5 Efeito do Movimento Angular na Eficiência do Equipamento

Como pode ser observado na Figura 59, no cenário A, ocorre a passagem de água da câmara de separação para a câmara de óleo. De acordo com a Figura 70, que mostra a fração volumétrica de água em relação à altura Y (m), essa passagem interfere na qualidade do óleo exportado, já que o nível de água presente no óleo em alguns momentos excede o nível máximo da água permitido no petróleo.

Esse perfil de fração volumétrica da água mostrado na Figura 70 foi obtido em $x=0$ e a linha $-2.8 < y < 2.8$ está localizada acima da saída de óleo. Em alguns momentos da simulação, é possível observar uma alta presença de água na saída de óleo, concentração essa que excede o nível máximo da água permitido no petróleo, o que compromete a qualidade do óleo que é enviado para terra.

Essa água exportada em excesso, juntamente com o petróleo, gera custos extras na separação e riscos operacionais como possíveis acidentes em refinarias e/ou oleodutos devido à formação de hidratos nas linhas.

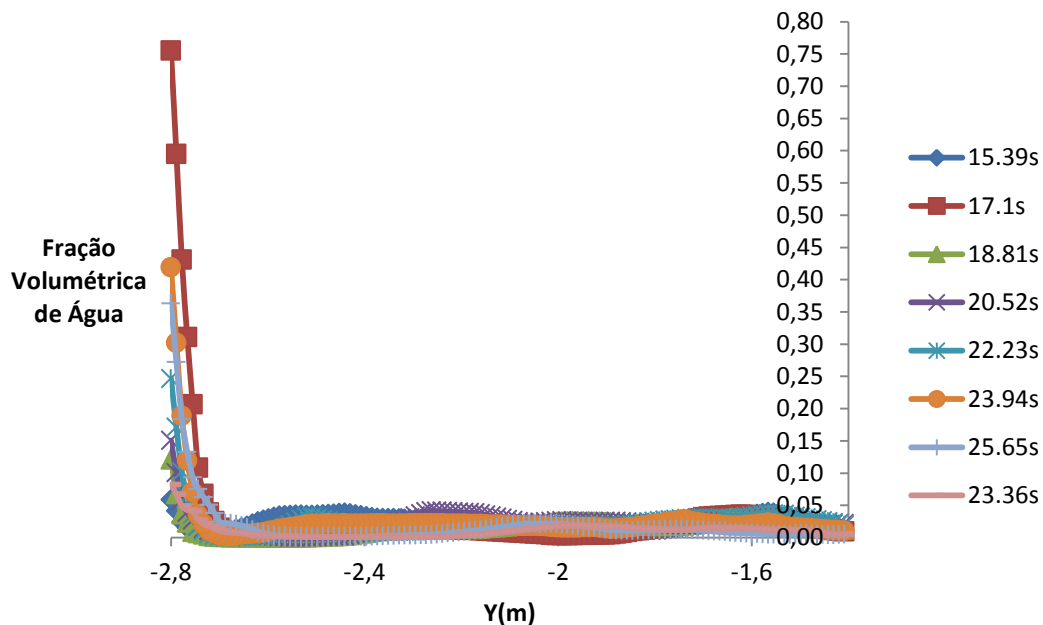


Figura 70. Fração Volumétrica de água acima da saída de óleo versus Y (m) - Cenário A – Com Quebra Ondas Poroso.

7. Conclusões

Com os resultados obtidos no trabalho, é possível concluir que:

- O movimento de jogo simulado modifica a altura da interface água-óleo para todos os cenários simulados. Como pudemos observar, quanto maior a proporção de água, maior é a influência do movimento na eficiência do equipamento.
- O movimento de jogo simulado, apesar de modificar a altura da interface água-óleo para todos os cenários de proporção entre as vazões mássicas de água e óleo analisados, não interfere na eficiência da separação destes líquidos até a proporção estudada de 60% (Casos B, C e D), em massa, para cada líquido. Até este ponto, a água não escoava para a câmara de óleo em concentrações relevantes quando o separador atinge a maior inclinação possível.
- Para o caso de 80% em massa de água (Caso A), a simulação mostra que, a água passa para a câmara de óleo, escoando pela saída de óleo junto com o óleo, como pode ser observado na Figura 62, prejudicando a separação. Logo, é possível concluir que a proporção limite de água na qual não ocorre a passagem desta da câmara de separação para a região após o vertedor está situada entre 60 e 80%, em massa, de água;
- A movimentação da plataforma dificulta o controle de nível no interior do separador gravitacional. Para que não haja o retorno de óleo para a câmara de separação deve ser instalado um sistema de controle de nível de óleo eficiente na região após o vertedor.
- Podemos concluir também que na operação de poços maduros, ou seja, com altas razões água/óleo, uma alteração na geometria do separador (altura do vertedor) pode ser considerada para aumentar a eficiência da operação de separação.

8. Sugestões para Futuros Trabalhos

- Analisar a influência de outros movimentos angulares sobre o desempenho dos separadores gravitacionais, como, por exemplo, o movimento de *Heave* acoplado ao movimento de arfagem;
- Analisar qual seria o número ótimo de quebra ondas poroso no interior do separador;
- Analisar qual é a porosidade ideal dos quebra ondas poroso;
- Considerar nas simulações o controle de nível na câmara de óleo que aumenta a vazão de saída de óleo à medida que o nível de óleo aumenta na região após o vertedor. Da mesma maneira, deve ser considerado o controle da altura da interface água/óleo na câmara de separação antes do vertedor;

9. Referências Bibliográficas

ALVES, João Victor Barbosa. **Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias**. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

AMBROSIO, Renata Dias. **Simulação Numérica de um Separador Gravitacional para a Segregação Óleo-Gás em Plataformas de Produção de Petróleo**. 2007. 79 f. Monografia (Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Design and Operation of Oil-Water Separators 421**, Washington, D.C, 1990

ANSYS Inc., Manual do CFX 12.1, 2009.

BAKKER, André. Notas de aula da disciplina ENGS 150 Computational Fluid Dynamics Dartmouth, 2006 Disponível em: < <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>>. Acesso em: 6 de Fevereiro de 2014.

BLAZEK, J. **Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications**. 1ª Edição, Oxford: Elsevier, 2001.

BW Offshore – **Our Presence and Units**., Disponível em: < <http://www.bwoffshore.com/Our-business/Our-presence-and-units/Units/BW-Vicente>>. Acesso em: 17 de Janeiro de 2014.

CASACCIA, Juliana Vaz. **Síntese de Controle e Análise de Cenários em Plantas Offshore de Óleo e Gás**. 2009. 167 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009

COUTINHO, R.C.C. **Estudo da Estabilidade das Emulsões de Água em Petróleo**. 2005. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CUNHA, Roberto Eugênio Pontes. **Modelagem Matemática da Separação Gravitacional de Emulsões de Petróleo**. 2007. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju, 2007.

DURHAM, K.D.; SAMS, G.W. Optimizing a Large Vessel Separator Design for FPSO Operation in Bohai Bay. Offshore Technology Conference. Texas: [s.n.]. 2003.

EPA. **SPCC Guidance for regional inspectors**, 2013 - Disponível em <http://www.epa.gov/oem/docs/oil/spcc/guidance/5_OWSeparators.pdf. > -Acesso em: 27 de Janeiro de 2014.

FMC. **Separation Systems – Gravity Separation** , 2014 - Disponível em <<http://www.fmctechnologies.com/en/SeparationSystems/Technologies/HighPerformanceInternals/GravitySeparation.aspx>> -Acesso em: 18 de Janeiro de 2014.

FILGUEIRAS, Natalia Gonçalves Tannus. **Modelagem, Análise e Controle de um Processo de Separação Óleo/Água**. 2005. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FRANKIEWICZ, T.; LEE; C. M. **Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation to model Fluid Motion in Process Vessels on Fixed and Floating Platforms**. Annual Production Separation Systems Conference 9th: IBC. 2002.

GONGLUN, Daniel Tao Chen; **An experimental study of oil-water emulsion**. Fuel Processing Technology 86, Pages 499-508. 2005

HONSE, Siller de Oliveira. **Influência de subfrações asfálticas sobre a estabilização de emulsões de petróleo**. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

KLEIN, Tânia Suaiden. **Estudo de um novo modelo de turbulência**. 2007. 204f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007

LANGSTON, Leslie V. **Manual do Operador de Produção de Petróleo e Gás**. 1ª Edição, Campinas: Komedi, 2011

LAKSEL - **Introduction - Oil & Gas Separation System**., Disponível em: <http://www.laksel.com.sg/Oil_Gas_Separation_System.html>. Acesso em: 17 de Janeiro de 2014.

MALISKA, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MARQUES, R.O. **Análise acoplada dos movimentos de uma FPSO e da Dinâmica dos sistemas de Ancoragem e Risers** . 2010. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MOFRAD, Saeid R. **Three Phase Separators – Liquid Internals**., Disponível em: <<http://www.chemwork.org/PDF/board/Three%20Phase%20Separator%20-%20Liquid%20Internals.pdf>>. Acesso em: 25 de novembro de 2013.

MUELLER,W. How FPSO motion affects separator performance, controls, 1 June 1997.

PINTO, Diego Di Domenico. **Estratégias de Controle Contra Intermitência Severa na Alimentação de Separadores Offshore**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

QUEIROZ, Fábio Vieira de. **Simulação Numérica de Hidrociclones Para a Separação de Misturas de Alto Teor de Água em Óleo como Fase Contínua**. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

ROSA, Eugenio Spano. Notas de aula da disciplina IM-450 Modelagem em escoamentos turbulentos. FEM/UNICAMP, 2013 Disponível em: < <http://www.fem.unicamp.br/~im450/>>. Acesso em: 18 de Fevereiro de 2014.

SANT'ANNA, Natalia dos Santos. **Influência do Movimento Relativo de Plataformas de Produção de Petróleo Sobre o Desempenho de Separadores Gravitacionais**. 2011. 67 f. Monografia (Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SILVA, Vanessa Panasco da. **Avaliação da dispersão de gases de combustão emitidos por sistemas de tocha de refinarias de petróleo**. 2013. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

TITANICOLOGY - Disponível em:< <http://www.titanicology.com/MyOtherPublications.>> - Acesso em: 17 de Janeiro de 2014.

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2ª Edição, Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

UNIVERSIDADE PETROBRAS, Apostila de Processamento Primário de Petróleo, Escola de Ciências e Tecnologia E&P, Rio de Janeiro, 2007.

VEIL, John A. **Comparison of Two Internacional Approaches to Controlling Risk from Produced Water Discharges**, NEL Produced Water Workshop, Aberdeen, 2008

USCG - Disponível em: <<http://science.howstuffworks.com/environmental/green-tech/energy-production/frozen-fuel2.html>> -Acesso em: 11 de Janeiro de 2014.

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