



Simulação Numérica de Separadores
Gravitacionais sob Movimentação Marítima:
Influência da Modelagem Fluidodinâmica e
Impacto da Posição de Quebra-Ondas

João Vitor Gomes de Assunção

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Tânia Suaiden Klein, Ph.D.

Pablo de Almeida Silva, MSc.

Outubro, 2021

Simulação Numérica de Separadores Gravitacionais sob Movimentação Marítima: Influência da Modelagem Fluidodinâmica e Impacto da Posição de Quebra-Ondas

João Vitor Gomes de Assunção

Projeto de Final de Curso submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

Antonio de Oliveira Samel Moraes, D.Sc.

Orientado por:

Tânia Suaiden Klein, Ph.D.

Pablo de Almeida Silva, MSc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Outubro, 2021

A851s João Vítor Gomes de Assunção.
Simulação com CFD de Separadores Gravitacionais sob
Movimentação Marítima: Influência de Parâmetros
Numéricos e Impacto da Posição de Quebra-Ondas / João
Vítor Gomes de Assunção. – 2021.
127 f.: il.
Orientador: Tânia Suaiden Klein.
Coorientadora: Pablo de Almeida Silva.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) –
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química,
Bacharel em Engenharia Química, Rio de Janeiro, 2021.
1. Separador Gravitacional Trifásico. 2. Quebra-ondas.
3. CFD. I. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por me proporcionar a saúde, força e resiliência necessária ao longo da vida e do curso.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Luciano Assunção e Fátima Manhães, que sacrificaram diversos desejos pessoais e sempre fizeram enorme esforço para me permitir ter acesso aos estudos, bem como poder me dedicar intensamente ao curso e a este trabalho.

Agradeço ao meu primo, vítima da pandemia, Diego Lichiardi (*in memoriam*) por todas as conversas, churrascos e jogatinas – dedico este trabalho também a você. Tenho certeza que estará feliz com essa conquista e que espero que saiba que esta singela dedicatória me motivou muito a concluir este trabalho.

Agradeço imensamente à minha namorada, Karine Marques, que esteve ao meu lado ao longo de todo o curso e me deu forças para concluir este trabalho. Sua paciência em me ouvir e admiração mútua foi fundamental para mim.

Agradeço a todos os familiares da família Manhães e Assunção, bem como meus amigos que estiveram comigo nessa jornada. Sem vocês seria extremamente mais difícil.

Gostaria também de agradecer a todos os colegas e professores do LabCFD/EQ-UFRJ, em especial ao meu amigo João Victor Alves, que teve papel fundamental ao longo do trabalho, me ajudando aos finais de semana e em horários nada convenientes. E também ao colega João Pedro, que me auxiliou de modo a conseguir trabalhar de forma 100% remota em todo o período do trabalho.

Finalmente, agradeço aos meus orientadores prof. Tânia Klein e Pablo Silva, pela dedicação exemplar, por todas as reuniões, discussões e aprendizados ao longo de cerca de um ano. Sou muito grato pela disponibilidade, sobretudo nos horários alternativos que costumava solicitar ajuda a vocês. Saibam que foram fundamentais para minha formação.

RESUMO

Simulação Numérica de Separadores Gravitacionais sob Movimentação Marítima: Influência da Modelagem Fluidodinâmica e Impacto da Posição de Quebra-Ondas

João Vitor Gomes de Assunção

Os separadores gravitacionais trifásicos desempenham papel fundamental na separação do petróleo, permitindo a separação inicial das fases aquosa, oleosa e gasosa. Esses equipamentos possuem dispositivos internos que visam contornar problemas operacionais e melhorar a eficiência da separação. Dentre esses, destaca-se o uso de quebra-ondas (ou *anti-sloshing baffles*), responsáveis por atenuar a flutuação do nível de líquido e minimizar os efeitos turbulentos provocados pela movimentação das estruturas flutuantes em plataformas *offshore*. Neste trabalho, 12 diferentes configurações de quebra-ondas foram avaliadas, considerando o movimento de arfagem. Adicionalmente, testes de sensibilidade para parâmetros das simulações foram realizados, dentre eles: a definição das condições de contorno para a região de saída de água, o emprego de modelos de tensão superficial e valores de porosidade e permeabilidade para caracterizar o meio poroso representativo do escoamento no quebra-ondas. Para tanto, foram realizadas simulações em CFD com o *software* ANSYS CFX 20R1, considerando como referência uma geometria tridimensional e um modelo simplificado bidimensional, no qual todos os testes citados foram avaliados. Uma condição crítica com 80% em volume de água foi assumida, de modo a representar o comportamento considerando um poço maduro. Os resultados obtidos mostraram que as condições de contorno da saída de água afetam a região equivalente a saída de óleo, assim como se observou a formação de um fluxo reverso na saída de água ao se utilizar a pressão hidrostática inicial como condição de contorno, indicando a necessidade de implementar controles proporcionais de pressão para obter resultados mais assertivos. Analisando globalmente todos os ciclos simulados, verificou-se que, independentemente da posição, a presença do quebra-ondas diminuiu a eficiência de separação. Das configurações testadas, o separador com quebra-ondas na posição mais próxima à região de entrada foi a que menos comprometeu essa eficiência. Concluiu-se também que as posições dos quebra-ondas afetam relativamente pouco a sua capacidade de atenuar as flutuações do nível de líquido. Por outro lado, foi observado que um meio poroso que gera maior resistência à passagem dos fluidos reduziu em consideravelmente a amplitude das oscilações na altura da posição da interface líquido-gás.

Palavras-chave: Separador Gravitacional Trifásico. Quebra-ondas. CFD.

Outubro, 2021

Orientadores: Tânia Suaiden Klein
Pablo de Almeida Silva

ABSTRACT

Numerical Simulation of Gravity Separators Under Influence of Marine Motion: Modelling Parameters and Anti-Sloshing Baffle Position Influences

João Vitor Gomes de Assunção

Three-phase gravitational separators play a fundamental role in petroleum separation on production platforms, allowing the initial separation of the aqueous, oily and gaseous phases. This equipment has several internal devices that aim to prevent operational problems and enhance separation efficiency. One important internal device is the wave-breaker (or anti-sloshing baffle), responsible for attenuating the fluctuation of the liquid level and minimizing turbulent effects due to the movement of floating structures on offshore platforms. In this work, 12 distinct wave-breakers configurations were assessed, considering the isolated pitch movement. Additionally, sensitivity tests for modeling parameters were performed, including: different boundary conditions at the water outlet, the usage of surface tension models, and porosity and permeability values to characterize the representative porous medium of the flow in the wave-breaker. CFD simulations were carried out with ANSYS CFX 20R1, considering as reference a three-dimensional geometry and a simplified two-dimensional model, in which all the mentioned tests were evaluated. A critical condition with 80% water in volume was assumed in order to represent conditions from a mature field. The results obtained showed that the water outlet boundary conditions affect the oil outlet above the weir region as well as it was observed a backflow formation at the water outlet when the initial hydrostatic pressure was applied as a boundary condition, suggesting the need to implement proportional pressure controls to obtain more assertive results. Analyzing all simulated cycles, it was verified that the presence of the wave-breaker, regardless of its positions, decreased the separation efficiency. Among the tested configurations, the separator containing a wave-breaker in a position closest to the inlet region was the one that least compromised this efficiency. It was concluded that the positions of the wave-breakers do not significantly affect their capacity to dampen fluctuations in the liquid level. On the other hand, a porous medium that generates greater resistance to the passage of fluids considerably reduces the amplitude of oscillations at the height of the liquid-gas interface.

Keywords: Gravity three-phase separators. Anti-Sloshing Baffle. CFD

October 2021

Orientadores: Tânia Suaiden Klein
Pablo de Almeida Silva

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivo	3
2. Fundamentação Teórica.....	5
2.1. Processamento Primário de Fluidos.....	5
2.2. Separadores gravitacionais	10
2.2.1. Descrição Geral	10
2.2.2. Dispositivos Internos	13
2.2.3. Problemas Operacionais	20
2.3. Influência da Movimentação Marítima em Plataformas <i>Offshore</i>	23
2.4. Fluidodinâmica Computacional	26
2.4.1. Modelagem Matemática – Equações de Conservação	28
2.4.2. Métodos Numéricos – Volumes Finitos	29
2.4.3. Abordagem Multifásica	30
2.4.4. Modelagem de Tensão Superficial	35
2.4.5. Modelos de Turbulência	36
2.4.6. Número de <i>Courant</i>	39
2.4.7. Escoamento em Meios Porosos	40
2.4.8. Discretização e Malha Computacional	41
2.5. Trabalhos Publicados	46
3. Metodologia.....	51
3.1. Recursos Computacionais e Softwares	51
3.2. Descrição Geral.....	51
3.2.1. Etapa 1 – Estudo de Configurações para Resolução Numérica.....	51
3.2.2. Etapa 2 – Avaliação da Influência da Posição do Quebra-ondas	54
3.3. Etapa 1 – Estudo de Configurações para Resolução Numérica.....	55
3.3.1. Geometria e Domínio Computacional.....	55
3.3.2. Teste de Malha.....	59
3.3.3. Teste de Passo de Tempo.....	63
3.3.4. Teste de Tensão Superficial.....	64
3.3.5. Teste de Condições de Contorno	64
3.3.6. Teste de Meio Poroso	65

3.4.	Etapa 2 – Avaliação da Influência da Posição do Quebra-ondas	67
3.5.	Configurações Gerais das Simulações	70
3.5.1.	Fluidos Envolvidos	70
3.5.2.	Condições de Contorno e de Inicialização	70
3.5.3.	Modelagem da Movimentação Relativa	75
3.5.1.	Aspectos Gerais	77
3.6.	Variáveis de Interesse e Critérios de avaliação.....	79
4.	Resultados.....	83
4.1.	Etapa 1 - Configurações para a Resolução Numérica.....	83
4.1.1.	Geometria e Domínio Computacional.....	83
4.1.2.	Teste de Malha.....	84
4.1.3.	Teste de Passo de Tempo.....	89
4.1.4.	Teste de Tensão Superficial.....	92
4.1.5.	Teste de Condições de Contorno	95
4.1.6.	Teste de Meio Poroso	99
4.2.	Etapa 2 - Avaliação da Influência da Posição do Quebra-ondas	106
4.2.1.	Análise de Eficiência de Separação.....	106
4.2.2.	Análise de Suavização da Movimentação da Interface Líquido-Gás	117
5.	Conclusões.....	120
5.1.	Conclusões do Estudo.....	120
5.2.	Sugestões para Trabalhos Futuros	122
6.	Referências Bibliográficas.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-Matriz energética mundial. Baseado em EPE (2020).	1
Figura 2 -Esquema simplificado do processamento primário de fluidos. Baseado em SILVA (2018).	6
Figura 3 – Esquema simplificado de separação comumente empregado em plataformas <i>offshore</i> . Baseado em SILVA (2018).	8
Figura 4 – Vasos separadores gravitacionais na configuração horizontal (esquerda) e vertical (direita) com diferentes seções de remoção de líquido (horizontal) e entrada de fluido (vertical). Fonte: KIMRAY. (2020).	11
Figura 5 – Representação didática de seções de separação em um separador bifásico. Fonte: KUNERT, (2007).	12
Figura 6 – Representação didática de seções de separação em um separador trifásico. Fonte: SOUZA (2004).	13
Figura 7 – Exemplo de placa defletora (dispositivo de entrada) para separadores horizontais e verticais . Fonte: KEN e MAURICE (2008)	14
Figura 8 –Esquemático representando o funcionamento de um ciclone (dispositivo de entrada). Fonte: NOGUEIRA, 2013.	15
Figura 9 –Representação da atuação do distribuidor de fluxo (<i>calmingbaffle</i>). Fonte: AFP TECH (2021)	15
Figura 10 –Placas antiespumantes após dispositivo distribuidor de fluxo. Fonte: SECPO(2020)	16
Figura 11 –Placa coalescedora. Fonte: SULZER (2021).	17
Figura 12 –Quebra-ondas alocado na parte superior de um separador trifásico. Fonte: SILVA, 2018.	18
Figura 13 – Quebra-ondas alocado na parte inferior de um separador trifásico. Baseado em STEWART e ARNOLD, 2008.	18
Figura 14 –Chicana quebra-ondas com configuração similar a dos distribuidores de fluxo (<i>calmingbaffle</i>). Fonte: SECPO (2020).	18
Figura 15 –Eliminador de névoas composto por tela metálica. Fonte: RVT (2021).....	19
Figura 16 –Vaso vertical sem o uso de quebra vórtices (esquerda) com ingresso de gás na saída de líquido e esquemático das placas planas presentes no quebra-vórtice (direita). Baseado em STEWART e ARNOLD, 2008.	20
Figura 17 – Diferentes tipos de plataformas produtoras. Baseado em PETROBRAS (2014).	23
Figura 18 – Exemplificação de movimentos relativos de plataformas flutuantes tipo FPSO. Baseado em SILVA (2018).	24
Figura 19 – Diferenças da modelagem de escoamentos multifásicos: disperso e segregado. Baseado em COMSOL (2020)	31
Figura 20 – A abordagem Euleriana e seus modelos derivados. Baseado em PACHPUTE (2020).	33
Figura 21 – Perfil da velocidade em experimentos de escoamentos turbulentos. Fonte: VERSTEEG e MALALASEKERA (2007).....	37
Figura 22 – À esquerda: malha estruturada uniforme; à direita: malha estruturada não-uniforme. Fonte: SANT’ANNA (2011).	42

Figura 23 – Malha não-estruturada para um aerofólio. Fonte: VERSTEEG e MALALASEKERA, (2007).	43
Figura 24 – Malha híbrida. Fonte: VERSTEEG e MALALASEKERA, (2007).	44
Figura 25 – Separador gravitacional bidimensional modelado no estudo de Hussein <i>et al.</i> com geometria sem a seção de acúmulo e saída de óleo. Fonte: HUSSEIN <i>et al.</i> (2013).	47
Figura 26 – Esquemático com dimensões e dispositivos internos do separador trifásico utilizado como referência. Fonte: SILVA (2018).	56
Figura 27 – Representação da geometria e domínio simulado para o separador tridimensional – Quebra-ondas superior na 6ª posição.	57
Figura 28 – Representação da geometria e domínio simulado para o separador bidimensional.	59
Figura 29 – Aspecto geral da malha do Caso Base – Separador tridimensional. Fonte: SILVA (2018)	60
Figura 30 – Aspecto geral de uma das malhas testadas (Malha 5) para os casos de estudo – Separador bidimensional.	62
Figura 31 – Refino na posição da interface água-óleo de uma das malhas testadas (Malha 5) para os casos de estudo – Separador bidimensional.	62
Figura 32 – Posições testadas individualmente para o quebra-ondas posicionado na parte do superior do equipamento	69
Figura 33 – Posições testadas individualmente para o quebra-ondas posicionado na parte do inferior do equipamento.	69
Figura 34 – Valores de densidade sobre o plano central na inicialização da simulação - Separador tridimensional.	72
Figura 35 – Valores de densidade sobre o plano central na inicialização da simulação - Separador bidimensional.	72
Figura 36 – Pressão Hidrostática referente à coluna de líquido na inicialização das simulações	73
Figura 37 – Campo de Pressão devido à pressão hidrostática na inicialização para o Caso Base – Separador tridimensional.	73
Figura 38 – Perfil de densidade e distribuição dos fluidos no plano central do equipamento. (a) Geometria Tridimensional $t = 14$ s; (b) Geometria Bidimensional $t = 14$ s; (c) Geometria Tridimensional $t = 140$ s; (d) Geometria Bidimensional $t = 140$ s.	84
Figura 39 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor – Teste de Malha	86
Figura 40 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor – Teste de Malha	87
Figura 41 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor para – Três malhas mais refinadas - Teste de Malha	88
Figura 42 – Eficiência de separação por ciclo (fração mássica de óleo por ciclo) – Teste de Malha	89
Figura 43 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor – Teste de Passo de Tempo	90
Figura 44 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor – Teste de Passo de Tempo	91
Figura 45 – Eficiência de separação por ciclo– Teste de Passo de Tempo	92
Figura 46 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor – Teste de Tensão Superficial	93
Figura 47 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor – Teste de Tensão Superficial	93
Figura 48 – Eficiência de separação por ciclo – Teste de Tensão Superficial	94

Figura 49 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor – Teste de Condição de Contorno	96
Figura 50 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor – Teste de Condição de Contorno	97
Figura 51 – Vazão mássica de óleo que passa pela saída de água – Teste de Condições de Contorno	98
Figura 52 – Vazão mássica de óleo que passa pela saída de água – Teste de Condições de Contorno	99
Figura 53 – Perfil de densidade e distribuição dos fluidos no plano central do equipamento. (a) Meio poroso baseado na configuração recomendada por Silva(2018) $t = 340,2$ s; (b) Meio poroso baseado na configuração recomendada por Kun(2017) $t = 340,2$ s.	101
Figura 54 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor– Teste de Meio Poroso	102
Figura 55 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor– Teste de Meio Poroso.....	102
Figura 56 – Eficiência de separação por ciclo – Teste de Meio Poroso	103
Figura 57 – Posição da Interface Líquido-Gás – Teste de Meio Poroso	104
Figura 58 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor– Posições Superiores – Quebra-ondas	107
Figura 59 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor– Posições Superiores – Quebra-ondas	108
Figura 60 – Eficiência de separação por ciclo – Quebra-ondas nas posições superiores	109
Figura 61 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor– Posições Inferiores – Quebra-ondas	111
Figura 62 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor– Posições Inferiores – Quebra-ondas	112
Figura 63 – Eficiência de separação por ciclo – Quebra-ondas nas posições inferiores	113
Figura 64 – Eficiência de separação por ciclo – Quebra-ondas nas posições mais próximas do vertedor	115
Figura 65 – Eficiência de separação por ciclo – Quebra-ondas nas posições mais próximas da região de entrada e na ausência de quebra-ondas	116
Figura 66 – Perfil de densidade e distribuição dos fluidos no plano central do equipamento. 1ª Posição (superior) $t = 350$ s; (b) 1ª Posição (inferior) $t = 350$ s;	117
Figura 67 – Variação da posição da interface líquido-gás.....	118

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade de malha	45
Tabela 2 – Parâmetros da malha tridimensional.....	60
Tabela 3 – Parâmetros das malhas testadas para os casos de estudo (separador bidimensional)	61
Tabela 4 – Simulações com diferentes passos de tempo realizadas para os Casos de Estudo (separador bidimensional)	63
Tabela 5 – Tensões Superficiais para os pares de fluidos envolvidos (SOLOVIEV <i>et al</i> , 2016)	64
Tabela 6 – Condições de entrada para os Casos de Estudo (separador bidimensional)	65
Tabela 7 – Modelagem envolvida no Teste de Meio Poroso para quebra-ondas no separador bidimensional (Casos de Estudo)	66
Tabela 8 – Simulações consideradas para avaliação da influência da posição do quebra ondas – Separador bidimensional (Casos de Estudo)	68
Tabela 9 – Propriedades dos fluidos envolvidos	70
Tabela 10 – Condições de entrada para o caso do separador tridimensional (Caso Base).....	71
Tabela 11 – Condições de entrada para os Casos de Estudo (separador bidimensional)	75
Tabela 12 – Aspectos gerais das simulações	78
Tabela 13 – Eficiências de Separação – Teste de Meio Poroso	103
Tabela 14 – Desvio padrão da altura da interface líquido-gás – Teste de Meio Poroso	105
Tabela 15 – Eficiências de Separação – Quebra-ondas nas posições superiores	110
Tabela 16 – Eficiências de Separação – Quebra-ondas nas posições inferiores	114
Tabela 17 – Eficiências de Separação – Quebra-ondas nas posições inferiores	117
Tabela 18 – Resultados da Análise de Suavização da Movimentação da Interface Líquido-Gás	119

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Atualmente, o petróleo, o gás natural e seus derivados são as maiores fontes primárias de energia da humanidade (BRITISH PETROLEUM, 2020). Estima-se que, em 2018, a matriz energética global era composta por 31,5% de petróleo e derivados e 22,8% de gás natural (EPE, 2020), conforme mostrado na Figura 1. Além de sua importância energética, o petróleo, o gás natural e seus derivados são empregados direta ou indiretamente em diversos processos industriais, gerando bens de consumo de grande relevância no mundo moderno. Dentre esses produtos, pode-se citar a produção de fármacos, plásticos, solventes e corantes.

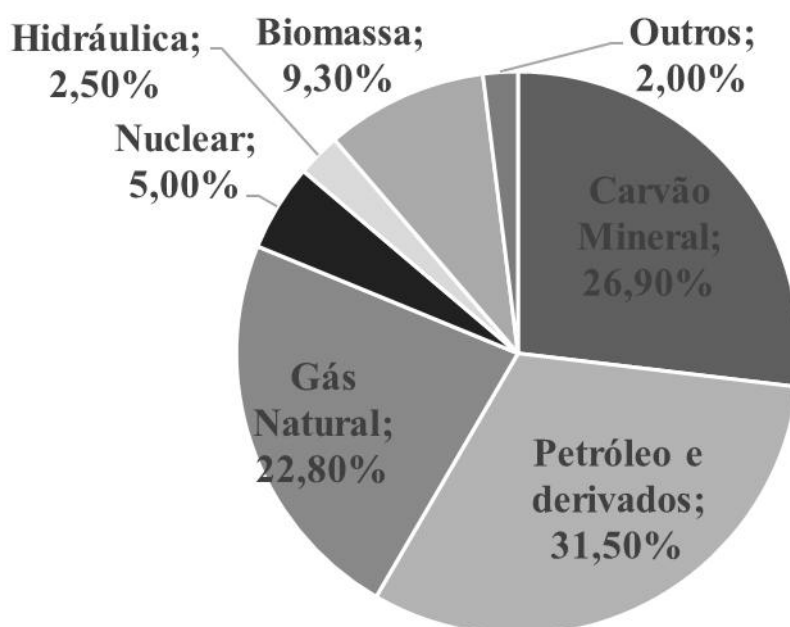


Figura 1-Matriz energética mundial. Baseado em EPE (2020).

O registro inicial do uso do petróleo remete às antigas civilizações, milhares de anos antes de Cristo. Ao longo dos séculos, há relatos de que o petróleo era empregado no aquecimento de casas, além do assentamento de tijolos com asfalto e calafetação de navios utilizando betume. Entretanto, o processo de busca intensiva e robusta produção do petróleo na sociedade moderna só teve começo em 1859, quando se iniciou a exploração comercial nos Estados Unidos. Nessa época, um poço de apenas 21 metros de profundidade em Tittusville, Pensilvânia, foi explorado através de um processo de percussão a vapor, garantindo uma vazão de 2 metros cúbicos de óleo por dia. Descobriu-se que a destilação do produto fornecia derivados que substituíam com grande

margem de lucro o querosene obtido do carvão e o óleo de baleia e, dessa forma, a crescente demanda por petróleo teve seu nascimento (THOMAS, 2004).

Em 2020, o mundo presenciou pela primeira vez na história uma subdemanda de petróleo, fruto da crise econômica provocada pela pandemia do Covid-19. A doença e suas consequentes medidas de prevenção adotadas por governos ao redor do mundo são caracterizadas hoje como o evento que causou maior disrupção ao setor energético na história. Apesar de, atualmente, a pandemia ainda não ter tido um fim, a demanda e oferta desses hidrocarbonetos já atingiram patamares anteriores a crise. (IEA, 2020)

Devido a crescente exigência de políticas ambientais para favorecer o uso de fontes energéticas sustentáveis, poderia se imaginar que o petróleo e gás natural entrariam em queda de consumo e oferta ao longo dos próximos anos. No entanto, observa-se que, apesar das recentes crises e da emergência e aprimoramento de novas tecnologias mais limpas, a demanda e produção de óleo e gás deve se manter em patamar elevado nesta década, começando a apresentar declínio sustentado apenas a partir de 2030 (DNV, 2020). Nesse sentido, é possível destacar que essa fonte primária de energia ainda se manterá fundamental para a sociedade moderna por muitos anos.

No contexto brasileiro, sabe-se que o crescimento significativo da produção ocorreu a partir da década de 1980, com a descoberta e avanço de tecnologias que possibilitaram maior recuperação e produção de campos marítimos. Com isso, houve uma aceleração do caráter de protagonismo do país na exploração *offshore* desses fluidos. De fato, em 2020, 96,8% de todo óleo produzido no Brasil estava localizado em campos marítimos, além de 85,8% de todo gás natural também ser proveniente de campos *offshore* (ANP, 2020).

A relevância da produção em plataformas flutuantes no Brasil, sobretudo em navios-plataforma, comumente denominados de FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), implica necessidade de se avaliar e contornar problemas operacionais causados pela influência das condições oceânicas. Além de dificuldades logísticas e de corrosão, a movimentação marítima potencialmente impacta os processos primários de separação dos fluidos, sendo os separadores gravitacionais trifásicos um dos equipamentos mais sensíveis a tais influências.

Os separadores gravitacionais trifásicos são equipamentos responsáveis pela separação do fluido multifásico emergente do poço em fundamentalmente três fases distintas: água, óleo e gás. É essencial destacar que essa separação é apenas uma das primeiras etapas de uma série de processamentos para purificar essas três fases, sendo o separador gravitacional responsável pela segregação inicial grosseira. Apesar da imiscibilidade desses componentes, a movimentação marítima dificulta a estabilização e separação das fases, por conta da turbulência promovida. Isso resulta numa maior prevalência de emulsões e regiões sem uma interface bem definida entre, sobretudo, a água e o óleo. Nesse sentido, é importante que sejam feitos estudos para analisar o quanto alto pode ser o impacto dessas movimentações oceânicas dentro do equipamento, a fim de descobrir condições críticas ou desfavoráveis à operação, assim como sugerir mudanças operacionais ou no design do equipamento em si.

Nesse contexto, é válido aplicar o uso de simulações envolvendo Fluidodinâmica Computacional (CFD), a qual é uma ferramenta de simulação que fornece informações detalhadas a respeito de um certo escoamento. As equações de conservação de massa, momento linear e energia e espécie são resolvidas numericamente e, a partir disso, pode-se obter características valiosas sobre um problema estudado. Campos de temperatura, pressão, velocidades, e frações volumétricas são possíveis repostas fornecidas pelas simulações, possibilitando a análise de zonas de recirculação e taxas de transferência de calor ou massa, por exemplo. Devido suas vantagens, a Fluidodinâmica Computacional vem sendo crescentemente empregada ao longo dos anos em diversas áreas de pesquisa (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

1.2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo investigar a influência de configurações numéricas e diferentes posições de dispositivos internos, os quebra-ondas ou *anti-sloshing baffles*, no escoamento multifásico em um separador gravitacional trifásico sujeito às movimentações marítimas. Com esse propósito, diferentes testes foram realizados a fim de identificar a sensibilidade das variáveis de interesse modificando: modelo geométrico (tridimensional e bidimensional); condições de contorno; efeitos de tensão superficial; meio poroso utilizado para modelar os quebra-ondas; e a posição dos quebra-ondas. As variáveis de interesse são as eficiências de separação de óleo e a capacidade de suavização da posição da interface líquido-gás (performance de *anti-*

sloshing). Essas análises foram realizadas empregando fluidodinâmica computacional, com o pacote comercial ANSYS CFX 20R1.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE FLUIDOS

A origem do petróleo, segundo a teoria orgânica, é dada pela decomposição de matéria vegetal e animal que, ao longo de milhões de anos sob influência de alta pressão e temperaturas, transformou-se em compostos hidrocarbonetos majoritariamente líquidos e gasosos. Essa transformação ocorre através do processo de catagênese, no qual há o craqueamento de moléculas orgânicas maiores em menores. A formação se deu em rochas sedimentares e foi também auxiliada por bactérias anaeróbias (LYONS, 1996), que decompueram parcialmente a matéria orgânica e reduziram nitratos e sulfatos a nitrogênio molecular e sulfeto de hidrogênio, respectivamente.

A produção e purificação de petróleo, dada sua origem, é um grande desafio tecnológico. O poço contém diversos componentes além dos hidrocarbonetos, tais como as moléculas inorgânicas de enxofre e nitrogênio citadas anteriormente. O óleo cru dos poços de produção é, na verdade, uma mistura multifásica complexa que consiste majoritariamente em óleo, gás, água e sólidos (SIMMONS et al., 2002). A separação dessa mistura, preferencialmente de forma completa, é fundamental para que esses produtos, nomeadamente, o óleo e o gás, possam ser distribuídos e vendidos dentro de suas especificações, de modo que possam atender as demandas de refinarias ou Unidades de Tratamento de Gás Natural (UPGNs). Os sólidos, a água e os subprodutos, tais como CO₂ e H₂S, precisam ser devidamente tratados para serem descartados ou, alternativamente, no caso de água e dióxido de carbono, serem reinjetados nos poços.

Por conta da configuração dos fluidos no reservatório e da composição complexa da mistura óleo, água e gás, sabe-se que, por via de regra, nenhuma dessas fases é produzida isoladamente. O gás é produzido em quantidade e composição variada e encontra-se também na forma de bolhas arrastadas pelo óleo. De modo similar, gotículas de óleo também são arrastadas como névoa no gás produzido. A água também pode ser levada pelo gás na forma de vapor, no entanto, quando está no estado líquido, pode ser produzida como água livre, dissolvida ou emulsionada como gotículas misturadas ao óleo. Mesmo após a remoção primária do óleo, a água ainda contém sais, sedimentos, gases dissolvidos e uma pequena fração de óleo arrastado. (KUNERT, 2007).

A separação inicial dessas fases e sua purificação é comumente denominada de processamento primário. Essa é uma etapa do tratamento do petróleo que ocorre ainda na plataforma, sendo considerada parte da produção. Um esquema simplificado do processamento primário em plataformas *offshore* é ilustrado na Figura 2, o qual tem como objetivos (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2014):

- Promover a separação das fases oleosa, aquosa e gasosa;
- Tratar a fase oleosa para redução do teor de água emulsionada e dos sais nela dissolvidos;
- Tratar a fase gasosa para redução do teor de água e outros contaminantes, se necessário;
- Tratar a água separada do petróleo para descarte e/ou reinjeção em poços produtores.

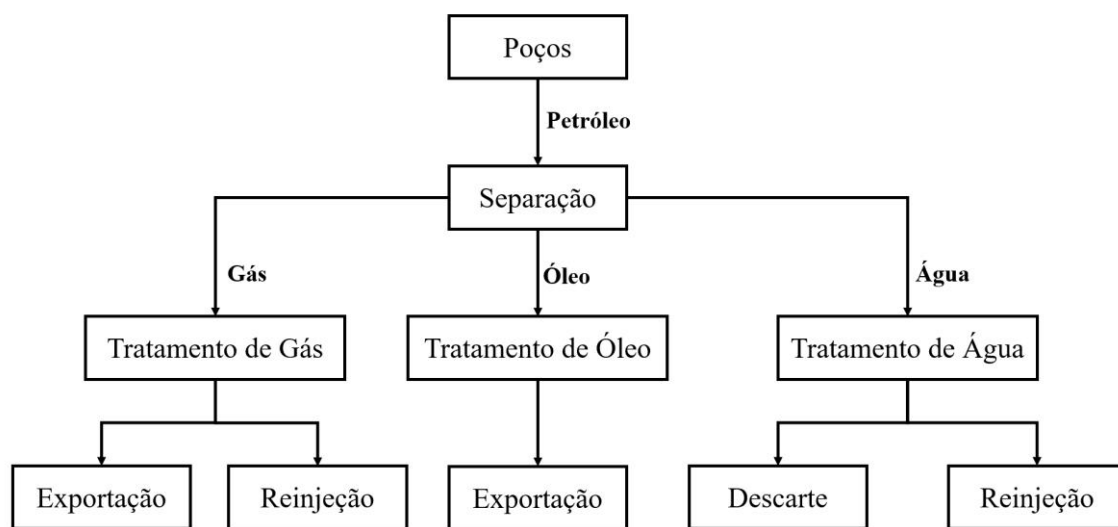


Figura 2 -Esquema simplificado do processamento primário de fluidos. Baseado em SILVA (2018).

A principal etapa para separação desses fluidos e sólidos ocorre nos separadores gravitacionais, que em geral são grandes vasos horizontais projetados para diminuir a velocidade da mistura e permitir um tempo de residência suficiente para que a separação causada pela força gravitacional e diferença de solubilidade possa ocorrer (SIMMONS et al., 2002.).

O sistema de separação inicial é composto normalmente por separadores gravitacionais (trifásicos ou, em alguns casos, bifásicos) em configuração em série,

sendo o número de vasos requeridos dependente da qualidade da separação desejada, assim como das características do petróleo alimentado. Petróleos pesados tipicamente são separados em um ou dois vasos com níveis de pressão distintos; já para petróleos leves, normalmente três níveis de pressão, isto é, três vasos separadores, são necessários para maximizar a produção de óleo. Para petróleos muito leves, normalmente também não há justificativa econômica para se utilizar mais de três estágios de separação (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2014).

A separação, no entanto, apresenta alguns desafios. Dentre os contaminantes do óleo, pode-se afirmar que a água é o que causa maiores dificuldades para ser removida, sobretudo pela sua forma emulsionada e, a depender do poço, pela sua quantidade em si. No início de produção de um reservatório, o teor de água produzida se aproxima de zero. Todavia, ao passar do tempo, esse teor normalmente aumenta, sendo comum ultrapassar 50%. À medida em que o poço se aproxima do fim da sua vida produtiva, o percentual de água pode chegar próximo de 100%. Classifica-se o poço como maduro nesses casos em que grandes quantidades de água são produzidas (KUNERT, 2007). Nesse sentido, sabe-se que o projeto de separadores gravitacionais deve levar em conta cenários mais críticos de produção, nos quais haverá maiores proporções de água em detrimento do óleo, de modo que o sistema seja robusto o suficiente para não precisar ser trocado, mas sim apenas ajustado por meio de válvulas e outros elementos de controle.

O petróleo trazido por *risers*, que são grandes tubulações especialmente projetadas para suportar as pressões da coluna d'água e elevar o petróleo do poço à plataforma, passa pelo *manifold* de produção, que por sua vez é um conjunto de válvulas e instrumentos que permitem flexibilidade na operação. Em seguida, o processamento primário de fato se inicia, tendo comumente a passagem do petróleo por trocadores de calor que visam aquecer a mistura e reduzir a viscosidade dos fluidos, auxiliando a separação que ocorre nos separadores gravitacionais.

Após a passagem pelos trocadores de calor, usualmente são adicionados agentes químicos, de modo a também favorecer a separação das três principais fases. Entre eles destacam-se os antiespumantes, que visam facilitar a separação gás-óleo, e também os desemulsificantes, que auxiliam a quebra da dispersão coloidal água-óleo (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2014). A configuração mais comum dos separadores

gravitacionais é mostrada na Figura 3. Nesse esquema é empregada uma separação trifásica em dois estágios de pressão, havendo ainda uma etapa de desidratação do óleo e ajuste da pressão de vapor, com remoção de hidrocarbonetos leves.



Figura 3 – Esquema simplificado de separação comumente empregado em plataformas *offshore*. Baseado em SILVA (2018).

A corrente gasosa proveniente dos separadores ainda contém gotículas de óleo, frações mais pesadas de hidrocarbonetos e também é úmida, isto é, contém vapor d'água. Essa corrente passa por uma série de tratamentos e pode ter diversos fins. O gás produzido pode ser utilizado para gerar energia para a própria unidade nos turbo-geradores; pode ser reinjetado no poço, no processo conhecido como *gás lift* (COSTA, 2014); e por fim, pode ser exportado.

Para que possa ser devidamente utilizado, os tratamentos do gás produzido comumente envolvem seções de depuração, onde são removidos líquidos e frações de hidrocarbonetos mais pesados; compressão, onde por meio de compressores, resfriadores e vasos *flash*, o gás é comprimido e os condensados removidos; dessulfurização, na qual o sulfeto de hidrogênio e gases ácidos podem ser removido através do contato com torres absorvedoras contendo aminas, como por exemplo, monoetanolamina (MEA), ou, alternativamente, a remoção pode ser feita por meio de absorção em leitos sólidos ou utilização peneiras moleculares ou membranas (KRUNERT, 2007); desidratação, onde o vapor d'água é removido através do contato de uma solução de trietilenoglicol ou por peneiras moleculares; e por fim, a depender dos sistemas, composição e tratamentos anteriores, pode ser necessário uma seção de remoção de CO₂, a fim de retirar esse contaminante e enquadrar o gás para seus usos (PETROBRAS, 2014).

A água a jusante dos separadores gravitacionais é chamada de água oleosa. Diversos tratamentos são necessários para o enquadramento dessa corrente, que pode também ser reinjetada nos poços, utilizada para geração de vapor ou então descartada. Os tratamentos envolvem hidrociclones e flotadores e se baseiam na Lei de Stokes, isto é, se encarregam basicamente de sistemas particulados que, no caso, são gotículas de óleo e sólidos em suspensão. Agentes químicos também são utilizados para evitar formação de subprodutos indesejados pela ação de bactérias anaeróbicas (KUNERT, 2007).

O óleo coletado na saída dos separadores trifásicos também possui uma parcela significativa de água dispersa em gotículas de diâmetros muito pequenos, constituindo uma emulsão. Essa água precisa ser removida pois acarreta uma série de problemas para os processos de transporte e refino, tais como a corrosão de tubulações, assim como superdimensionamento de vasos e demais equipamentos (SILVA, 2018). Tratamentos utilizando campos elétricos que promovem a coalescência das gotículas de água e enfraquecimento da emulsão água-óleo são aplicados. Por fim, o óleo é encaminhado à separadores atmosféricos nos quais frações gasosas são removidas do óleo, garantindo maior estabilidade e segurança para seu armazenamento.

2.2. SEPARADORES GRAVITACIONAIS

2.2.1. Descrição Geral

Conforme citado anteriormente, os separadores gravitacionais, sejam bifásicos ou trifásicos, são fundamentais para a separação da carga inicial que chega dos poços produtores. A concepção e dimensionamento desses equipamentos tem como base a operação unitária de sedimentação através da Lei de Stokes, conforme a formulação matemática mostrada na equação 1 (BRIGDES e ROBINSON, 2020). Esse equacionamento permite determinar a velocidade de sedimentação (v_s) de gotículas quando estas estão dispersas num líquido imiscível de posse da diferença de densidade dos dois fluidos ($\rho_a - \rho_o$), da viscosidade da fase contínua (μ_o) e do diâmetro das gotas (d_a) com ação da gravidade (g). A separação também se baseia em princípios da termodinâmica, sobretudo para o cálculo do equilíbrio líquido-vapor, dependente da temperatura, pressão e composição da mistura.

$$v_s = \frac{|\rho_a - \rho_o| d_a^2 g}{18\mu_o} \quad (1)$$

Com relação a sua nomenclatura, os separadores gravitacionais podem ter denominações diferentes a depender do objetivo. Quando o intuito é separar o máximo possível de água livre na temperatura e pressão de chegada do poço sem se ater tanto a separação líquido-gás, o separador é chamado de separador de água livre (*free-water knockout* ou FKWO) (STEWART e ARNOLD, 2008); quando a segregação dos fluidos é especificada de modo a preparar o óleo para o tratamento eletrostático, o separador é chamado de separador de produção; já quando objetivo é simplesmente remover componentes leves que volatilizam nas condições atmosféricas, o equipamento é denominado como separador atmosférico que, neste caso, é um separador bifásico (AMBROSIO, 2007).

Os separadores gravitacionais são projetados nas formas vertical e horizontal. Normalmente, por possuírem maior área superficial na interface dos fluidos e facilitar a separação líquido-gás e óleo-água, os vasos horizontais são mais eficientes. Esses modelos são aplicados em sistemas que apresentem espumas e altas razões gás/óleo. No entanto, as desvantagens da configuração horizontal estão relacionadas ao manuseio de sólidos produzidos, uma vez que nos vasos verticais, pela sua geometria, a deposição localizada no fundo é de mais fácil remoção. Na orientação vertical também há maior capacidade de absorver grandes variações de fluxo (golfadas) (THOMAS, 2004). Na

Figura 4 são mostradas as duas orientações possíveis desses equipamentos, onde diferentes entradas e saídas são exemplificadas dependendo da orientação utilizada.

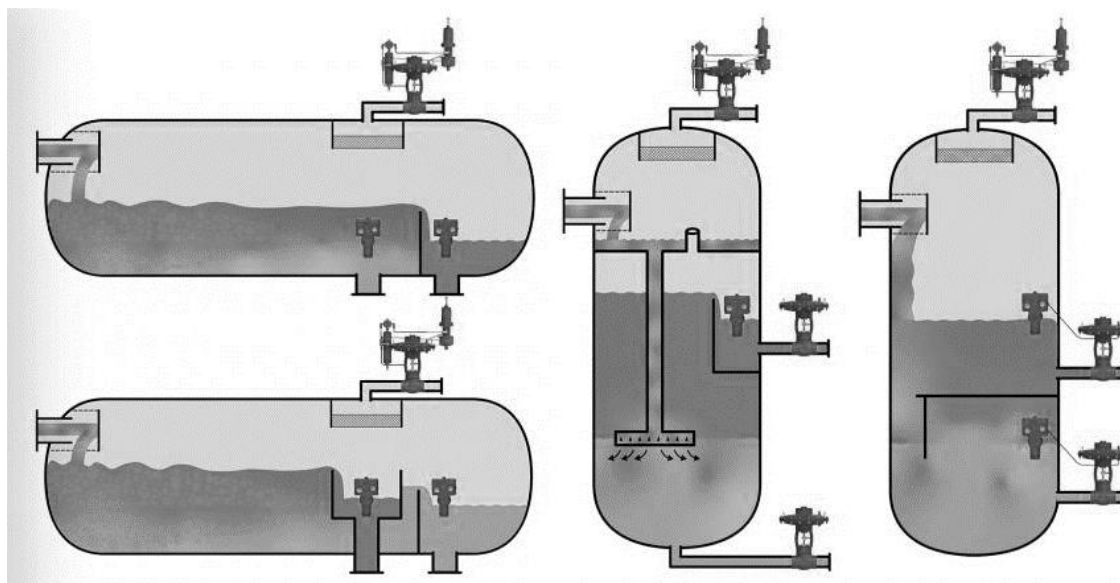


Figura 4 – Vasos separadores gravitacionais na configuração horizontal (esquerda) e vertical (direita) com diferentes seções de remoção de líquido (horizontal) e entrada de fluido (vertical). Fonte: KIMRAY. (2020).

Os vasos separadores baseiam-se nos seguintes mecanismos para promover a separação de água, óleo e gás:

- Imiscibilidade e quebra de emulsão: os fluidos não podem ser solúveis entre si e, no caso do petróleo, a emulsão deve ser desestabilizada para que as gotas de água e de óleo deixem de formar micelas (dispersões coloidais) e passem a ter preferencialmente interações água-água e óleo-óleo predominantes; promovendo assim a coalescência e aglutinação.
- Ação da gravidade e diferença de densidades: que possibilitam a sedimentação dos fluidos mais densos;
- Separação inercial: que ocorre quando há uma mudança abrupta na velocidade e direção do fluido que entra no separador, favorecendo então o desprendimento do gás da mistura multifásica devido à inércia que essa fase possui;
- Aglutinação das partículas: que é promovida pelo contato das gotículas de óleo dispersas sobre uma superfície, o que facilita a coalescência, aglutinação e decantação.

Em termos didáticos, pode-se segregar o equipamento em quatro principais seções, conforme ilustrado na Figura 5 e na Figura 6 (KUNERT, 2007):

- Na seção primária ocorre uma mudança drástica na velocidade e direção do fluxo mediante o choque da mistura com um defletor; ou então a mistura passa por um difusor que impõe um movimento rotacional que faz com que o líquido seja encaminhado para o fundo do vaso por ação da gravidade e se separe do gás;
- Posteriormente à separação inicial gás-líquido, esse último se deposita no fundo do vaso, na seção de acumulação de líquido. Nela, fica por um tempo de retenção de três a quatro minutos, suficiente para permitir a separação do gás remanescente do óleo e, em separadores trifásicos, também da água e óleo;
- Na seção secundária as gotículas maiores de óleo, inicialmente arrastadas pelo gás, tendem a decantar e se depositar na fase líquida;
- Na seção de aglutinação, gotículas de líquido que ainda não foram separadas e foram carregadas pelo gás, passam por um removedor de névoa, isto é, um meio poroso que, por ter elevada área de contato, facilita a coalescência e detenção dessas gotas.

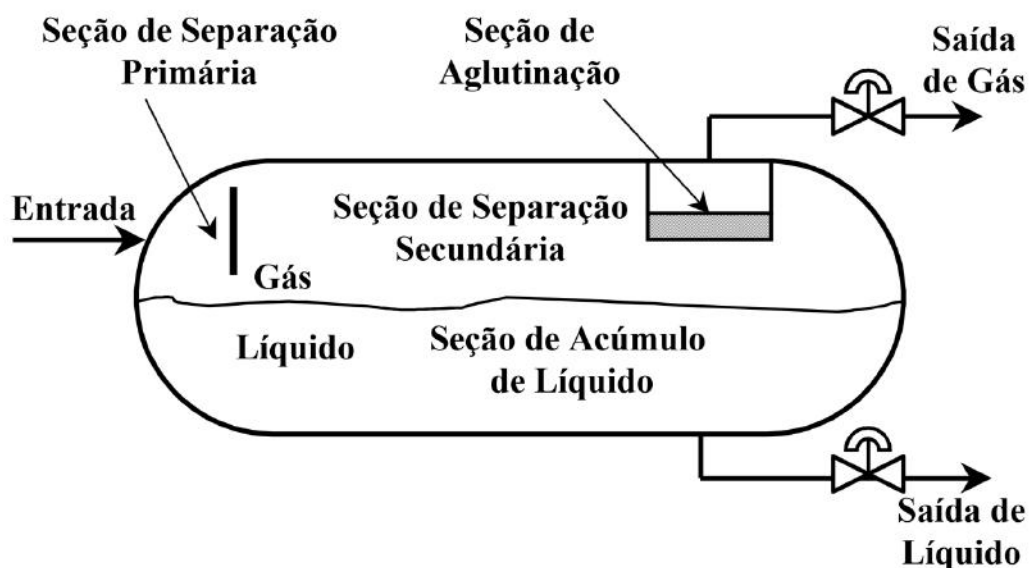


Figura 5 – Representação didática de seções de separação em um separador bifásico. Fonte: KUNERT, (2007).

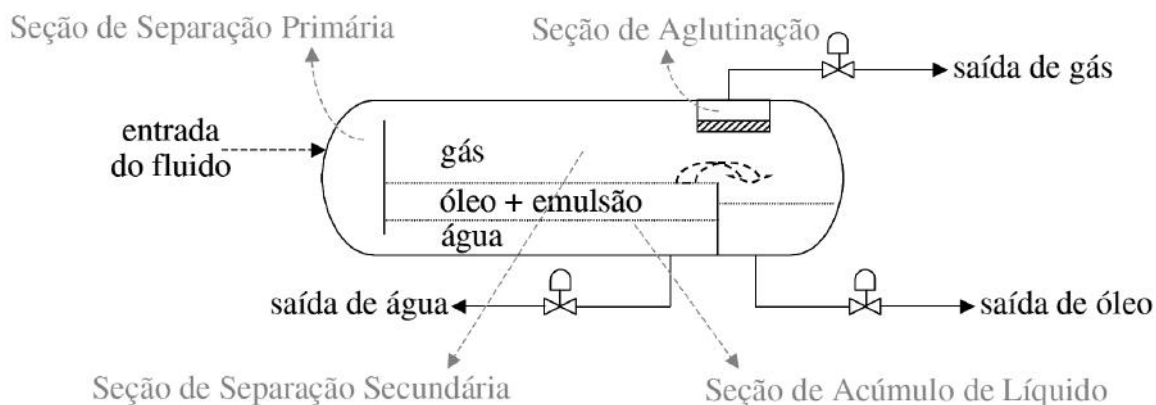


Figura 6 – Representação didática de seções de separação em um separador trifásico. Fonte: SOUZA (2004).

2.2.2. Dispositivos Internos

Os separadores gravitacionais, conforme discutido, apresentam mecanismo de separação baseados nas teorias de sedimentação e em princípios de termodinâmica, no contexto do equilíbrio líquido-vapor. Todavia, para melhorar a eficiência da separação, esses vasos, a depender das necessidades operacionais, são equipados com uma série de dispositivos internos. Esses dispositivos são essencialmente pensados para aprimorar a coalescência das gotas e também são úteis para contornar problemas operacionais. Em geral, separadores líquido-gás sem esses dispositivos de aprimoramento são capazes de remover apenas líquidos com gotas de tamanho de até 100 μm . Quando esses internos são aplicados, a separação pode conseguir isolar gotas de até 5 a 10 μm , caracterizando um ganho considerável de eficiência (LU e GREENE, 2009).

Os dispositivos são de diversos tipos e cada um apresenta seus objetivos específicos, embora todos sejam voltados para o melhoramento da separação e prevenção de problemas como, por exemplo, acúmulo de sólidos que possam estar presentes na corrente de entrada. Dentre esses dispositivos, podem-se citar:

2.2.2.1. Dispositivo de entrada

Uma das principais funções desses dispositivos é a promoção da separação primária da fase líquida da fase gasosa. Quanto mais eficiente for essa segregação inicial, menos o equipamento será sensível a mudanças na corrente de entrada. Eles também reduzem o momento linear do fluido e são capazes de promover a distribuição do líquido na seção inicial separador de modo a garantir que o tempo de residência seja uniforme e que, com isso, a separação se dê de maneira adequada. Uma má distribuição do gás que entra pode localmente sobrecarregar outros dispositivos internos (*demisters*)

utilizados para remover gotículas de líquido dispersas na fase gasosa, prejudicando a separação como um todo.

Diversos dispositivos de entrada podem ser empregados, dentre eles, destacam-se:

- Placas defletoras: são placas sólidas que tem por objetivo induzir a rápida mudança de velocidade e direção do fluxo de entrada, causando a separação da fase líquida e gasosa. Já que o líquido possui maior densidade e conseqüentemente mais energia do que gás quando ambos estão na mesma velocidade, este último não tem sua direção alterada tão facilmente. O gás flui ao redor da placa enquanto o líquido desce em direção ao fundo do vaso. O design dessas placas é relativamente simples, uma vez que basta que sejam capazes de suportar a força que age sobre elas. A Figura 7 exemplifica o funcionamento das placas defletoras em separadores horizontais e verticais.
- Ciclone de entrada: é um dispositivo de maior complexidade utilizado quando há necessidade de alta dissipação do momento linear, redução de formação de espuma e altas vazões. Funcionam através da ação de forças centrífugas que atuam nas partículas líquidas e no gás, de modo que o líquido é acelerado no sentido radial no corpo do ciclone, aderindo à parede do equipamento e sendo direcionado para a seção inferior. Já o gás, muito menos denso, tendem a se concentrar no centro de rotação devido à formação de uma zona de baixa pressão, onde são capturadas por um duto central e removidas em direção a parte superior. Por fim, ao contrário de outros dispositivos de entrada que ficam alocados na seção de gás, o ciclone no separador gravitacional é encontrado parcialmente submerso no líquido (AKPAN, 2013 e NOGUEIRA, 2013). A Figura 8 ilustra o funcionamento de um ciclone.

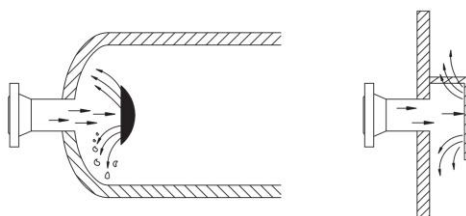


Figura 7 – Exemplo de placa defletora (dispositivo de entrada) para separadores horizontais e verticais .

Fonte: KEN e MAURICE (2008)

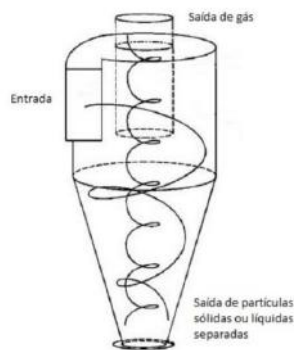


Figura 8 –Esquemático representando o funcionamento de um ciclone (dispositivo de entrada). Fonte: NOGUEIRA, 2013.

2.2.2.2. Distribuidor de fluxo (*calmingbaffle*)

Esse dispositivo é utilizado logo após ao de entrada e consiste em uma placa perfurada, a qual fica submersa na região onde há líquido. Além de suavizar a perturbação causada pelo despejo de líquido, é útil para reduzir as turbulências do fluido e induzir um comportamento laminar. Sem esse dispositivo a distribuição dos líquidos pode ficar altamente caótica e a performance do separador é comprometida (SILVA, 2018 e AFP TECH, 2021). A Figura 9 ilustra o funcionamento desse dispositivo.

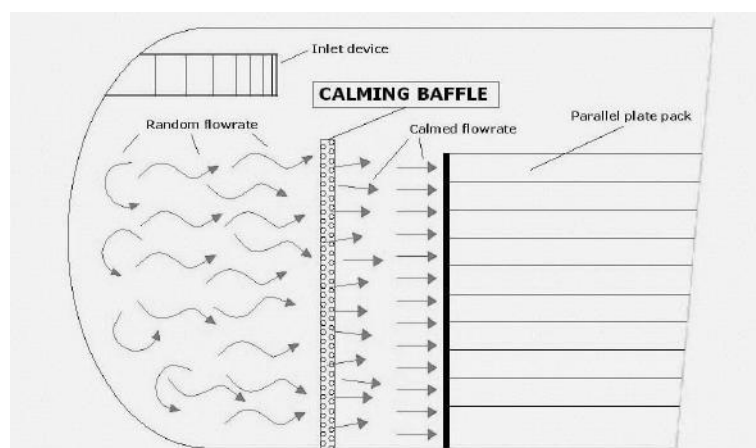


Figura 9 –Representação da atuação do distribuidor de fluxo (*calmingbaffle*). Fonte: AFP TECH (2021)

2.2.2.3. Placas Antiespumantes

O fluido que chega ao separador ainda não possui as fases bem definidas e, com a interação do gás com o líquido, pode haver a formação de espuma. Essa, por sua vez, é potencializada ao se utilizar um dispositivo de entrada como a placa defletora, enquanto quando ciclones são utilizados essa tendência de formação de espuma é reduzida (SPE, 2021). As placas antiespumantes são uma alternativa empregada para minimizar esse efeito e podem ou não estar associadas à adição de agentes químicos antiespumantes.

Esse dispositivo normalmente consiste num conjunto de placas paralelas que são alocadas próximas umas às outras, provendo elevada área superficial, a qual favorece a quebra da dispersão coloidal gás-líquido (espuma) (STEWART e ARNOLD, 2008). A Figura 10 mostra um exemplo de placa antiespumante existente em um separador gravitacional.

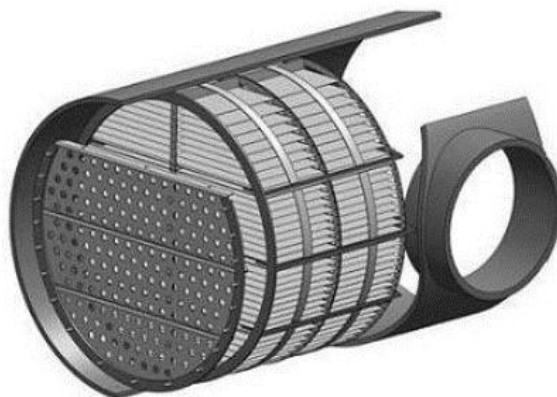


Figura 10 –Placas antiespumantes após dispositivo distribuidor de fluxo. Fonte: SECPO(2020)

2.2.2.4.Placas Coalescedoras

Esses dispositivos consistem em meios estruturados que ficam imersos na fração líquida ao longo da seção de separação secundária. Apresentam como finalidade a promoção da coalescência das gotículas de óleo e água dispersas nos seus respectivos meios contínuos (SILVA, 2018). O uso desses dispositivos, por facilitar a coalescência, resulta normalmente em separadores de menor tamanho. No entanto, dado o potencial de entupimento com areia, parafina ou produtos de corrosão, seu uso deve ser avaliado para determinar se o ganho com menos peso e tamanho supera possíveis problemas operacionais (STEWART e ARNOLD, 2008).

É importante ressaltar que as placas antiespumantes também são classificadas como placas coalescedoras, embora comumente descritas à parte. A localização desses dispositivos em relação as interfaces água-óleo e óleo-gás é o que caracteriza suas respectivas denominações. Portanto, em algumas configurações, há apenas uma placa coalescedora que também tem como objetivo minimizar a formação de espuma. A Figura 11 mostra uma placa coalescedora utilizada comercialmente.

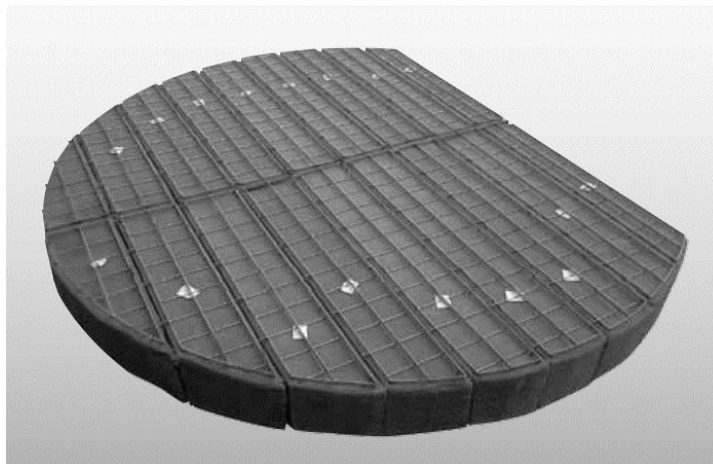


Figura 11 –Placa coalescedora. Fonte: SULZER (2021).

2.2.2.5. Quebra-ondas

Usualmente utilizados em plataformas *offshore*, esses dispositivos consistem em placas sólidas ou placas perfuradas que são alocadas perpendicularmente ao fluxo, normalmente próximo a seção de coleta de líquido. Essas placas amortecem as perturbações causadas pelos fluidos de entrada e pelo movimento relativo das estruturas quando se trata de uma produção *offshore* (STEWART e ARNOLD, 2008). Podem também ser feitas de meios porosos ou meios estruturados, abrangendo a região gasosa e parcialmente imersos no líquido (SILVA, 2018).

Quanto a sua instalação, podem ser alocados no topo do equipamento, sem chegar até o fundo do vaso (Figura 12), embora também possam ser instalados da maneira inversa, deixando o topo livre para o escoamento do gás (Figura 13). Em outra configuração, esses dispositivos se assemelham aos distribuidores de fluxo, conforme pode ser visto na Figura 14. O uso desses dispositivos é necessário especialmente para longos separadores horizontais e/ou onde há alta velocidade de gás, de modo que seu uso previne a propagação dessas ondas (FINEPAC, 2021).

Quanto a sua denominação, também são conhecidos por *wavebreakers* ou *anti-sloshing baffles*. Os quebra-ondas são úteis para suavizar os efeitos turbulentos causados pelas ondulações superficiais (SILVA, 2018), minimizando o impacto de reingresso de gás no seio de líquido e mistura entre as três fases. Em sua concepção, entretanto, seu objetivo principal é amenizar as flutuações de nível da interface gás-líquido, de modo a garantir que os instrumentos de medição e o controle de nível não sejam comprometidos pelas flutuações geradas pela movimentação marítima.

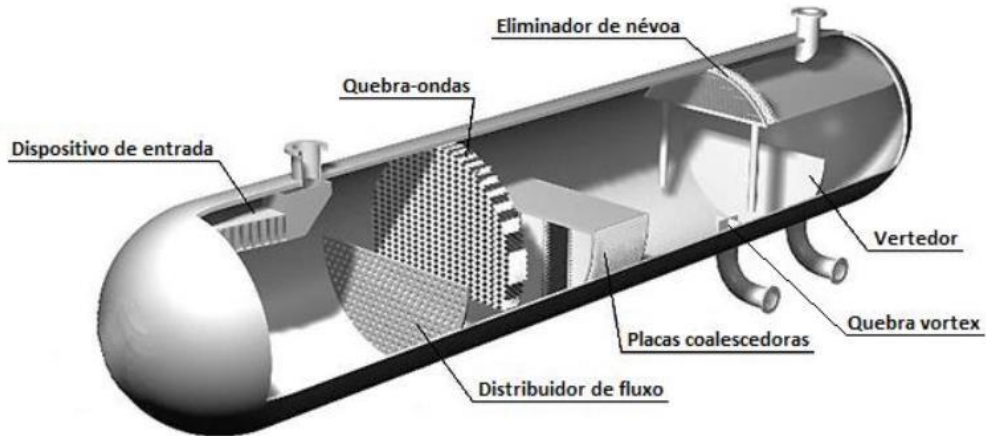


Figura 12 –Quebra-ondas alocado na parte superior de um separador trifásico. Fonte: SILVA, 2018.

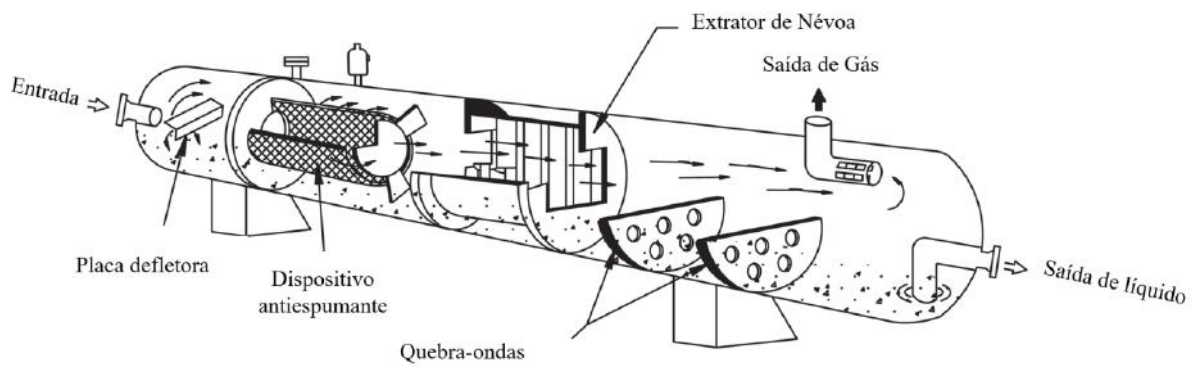


Figura 13 – Quebra-ondas alocado na parte inferior de um separador trifásico. Baseado em STEWART e ARNOLD, 2008.

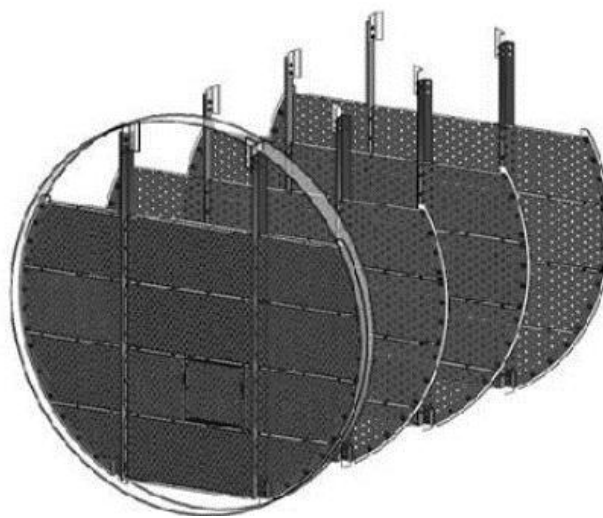


Figura 14 –Chicana quebra-ondas com configuração similar a dos distribuidores de fluxo (*calming baffle*).
Fonte: SECPO (2020).

2.2.2.6. Vertedor

O vertedor é um dispositivo interno mandatório para separadores trifásicos. Ele consiste em uma chicana sólida instalada ao final do separador, antes da seção de remoção de óleo. Esse dispositivo divide o equipamento em duas seções, na qual na primeira há o acúmulo de água e, na segunda, o óleo é concentrado.

2.2.2.7. Eliminador de Névoas (*demister*)

Antes da saída do gás pelo topo do equipamento, esse passa pelo eliminador de névoas (também conhecido como *mist extractor*, *mist eliminator* ou *demister*). Esse dispositivo usa elementos de coalescência que fornecem uma alta área superficial, favorecendo a coalescência e remoção de pequenas gotas de líquido que foram carregadas. O gás que passa pelo dispositivo é obrigado a ter inúmeras mudanças de direção, pela configuração do material, caracterizando um caminho tortuoso para sua passagem. Nesse caminho, o líquido, muito mais denso, não consegue acompanhar as rápidas mudanças de direção e acaba ficando retido na superfície do material do eliminador de névoas. Com o tempo, essas gotas se acumulam e caem para a seção inferior de líquido do separador (MAURICE e KEN, 2008).

Quanto a sua construção, esses dispositivos podem também ser de diferentes tipos, sendo os mais comuns compostos por aletas, malhas de tela, meios porosos ou recheios estruturados. Seja em separadores bifásicos ou trifásicos, o eliminador de névoa é de extrema importância, uma vez que promove a melhor separação de gotículas carregadas pelo gás e protege equipamentos a jusante do separador que sejam sensíveis a esses líquidos, como por exemplo os compressores (SILVA, 2018). A Figura 15 apresenta um eliminador de névoas composto por tela metálica, o que fornece uma elevada área superficial.

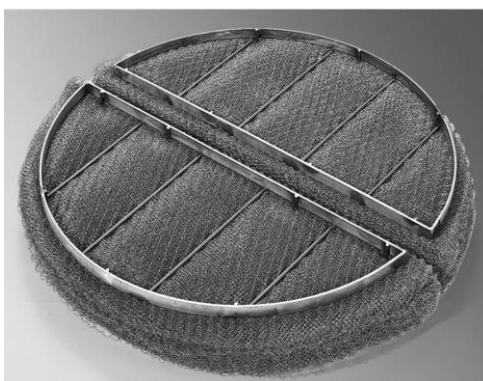


Figura 15 –Eliminador de névoas composto por tela metálica. Fonte: RVT (2021).

2.2.2.8. Quebra-vórtice

Nas saídas de líquido do separador podem se formar vórtices ou redemoinhos que são capazes de puxar o gás para baixo. Por esse motivo, é comum que os separadores horizontais sejam equipados de dispositivos chamados de quebra-vórtice (*vortexbreaker*), que previnem a formação desses vórtices quando a válvula de controle de líquido está aberta. Normalmente o dispositivo consiste em placas planas que impedem o movimento circular característico da formação desses vórtices. Na Figura 16, à esquerda, há um exemplo de vaso líquido-gás no qual não é empregado o dispositivo e, à direita, um exemplo de quebra vórtice (STEWART e ARNOLD, 2008).



Figura 16 –Vaso vertical sem o uso de quebra vórtices (esquerda) com ingresso de gás na saída de líquido e esquemático das placas planas presentes no quebra-vórtice (direita). Baseado em STEWART e ARNOLD, 2008.

2.2.2.9. Sistema de Jateamento

Com a chegada dos fluidos no separador gravitacional, também pode haver carregamento de sólidos particulados, como areia e produtos de corrosão, por exemplo. Esses se depositam no fundo do vaso, mas precisam ser removidos de modo a não acumularem e prejudicarem a performance do equipamento. Para remoção, normalmente instala-se um sistema de jateamento, o qual fica alocado no fundo do vaso que permite a remoção desses sólidos sem necessariamente implicar parada de produção.

2.2.3. Problemas Operacionais

Os separadores gravitacionais estão sujeitos a uma série de possíveis problemas operacionais, nos quais o emprego dos dispositivos internos é ferramenta fundamental para a prevenção e remediação. Dentre os principais problemas operacionais, os que se

destacam são descritos nos próximos tópicos (THOMAS, 2004; BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2014).

2.2.3.1. Formação de Espuma

Devido a presença de impurezas, características físico-químicas do petróleo e à queda de pressão imposta à mistura gás-líquido ao longo do escoamento dos fluidos até a chegada no separador, há tendência de formação de espumas sobre a interface gás-óleo. A espuma presente compromete o controle de nível e prejudica a eficiência da separação, uma vez que ocupa um volume que poderia estar disponível para a coleta de líquido ou separação.

Quando a presença de espuma for esperada, o separador deve ser projetado com dispositivos internos que sejam capazes de minimizar sua formação ou removê-la, utilizando altas superfícies de contato que favorecem a coalescência de gotículas e quebra da espuma. Alternativamente ou concomitantemente, agentes químicos antiespumantes podem ser utilizados, embora seu uso não seja favorável devido ao seu elevado custo.

2.2.3.2. Obstrução por Parafinas

As parafinas, hidrocarbonetos de alta massa molecular presentes no petróleo, podem se depositar em dispositivos internos compostos por meios estruturados, recheados ou placas metálicas alternadas – dispositivos com alta área superficial que visam aumentar a coalescência. Com isso, há o entupimento desses dispositivos e a performance do separador fica comprometida.

Para contornar tal problema, é necessário prover bocais de admissão de solvente de limpeza para promover a solubilização dessas parafinas. Alternativamente, pode-se aplicar vapor d'água, que fundirá esses compostos e os removerá.

2.2.3.3. Areia e Sedimentos

Areias e sedimentos podem eventualmente chegar junto com o fluido produzido e gerar erosão de válvulas e obstrução dos dispositivos internos. Esses sólidos se depositam no fundo do separador, onde tem de ser removidos pelo sistema de jateamento ou, quando esse não foi projetado, a produção é interrompida para que a retirada seja realizada.

2.2.3.4.Emulsões

As emulsões, dispersões coloidais entre dois líquidos, são um grande desafio no contexto dos separadores trifásicos. O controle de nível pode ficar comprometido e o acúmulo de emulsão reduz o tempo de retenção efetivo, resultando numa queda de eficiência da separação. O aquecimento dos fluidos ou o uso de químicos desemulsificantes podem ser implementados para minimizar esse problema.

2.2.3.5.Arraste de Líquido

O arraste de líquido pela fração gasosa é um típico problema operacional. Essa situação pode ocorrer quando o nível de líquido está muito elevado, quando existe algum comprometimento nos dispositivos internos extratores de névoa, quando há formação de espuma, saída de líquido obstruída, projeto impróprio ou até mesmo pela vazão de operação ser maior do que a especificada por projeto.

2.3. INFLUÊNCIA DA MOVIMENTAÇÃO MARÍTIMA EM PLATAFORMAS OFFSHORE

No contexto de plataformas produtoras *offshore*, é notável que a ação de ondas, correntes marítimas e ventos pode afetar equipamentos da planta de processo de unidades flutuantes de produção. Essas podem ser visualizadas na Figura 17, que apresenta um comparativo entre diferentes tipos de plataformas. As FPSOs (*Floating, Production, Storage and Offloading*) têm ganhado destaque no mercado brasileiro, já que o pré-sal tem representado maiores parcelas do total produzido nos últimos anos (ANP, 2020) e este normalmente fica distante da costa. Assim, é mais favorável projetar uma unidade que tenha capacidade de armazenar o óleo produzido, uma vez que o transporte por dutos, nesse caso, tem sua viabilidade reduzida (WOLLNER, 2016).

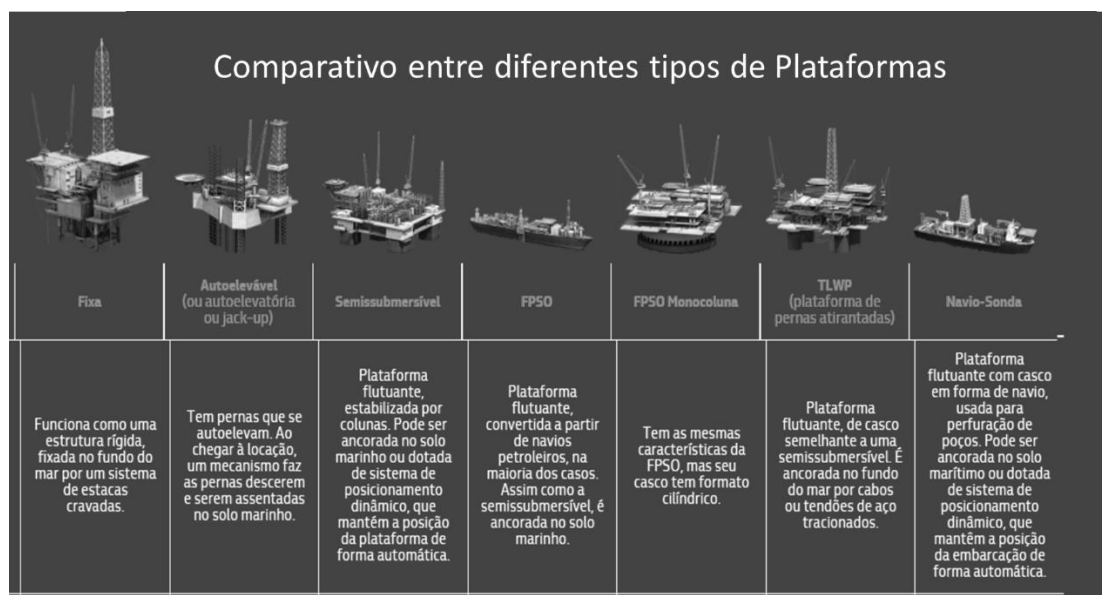


Figura 17 – Diferentes tipos de plataformas produtoras. Baseado em PETROBRAS (2014).

As influências marítimas nas unidades flutuantes podem ser divididas em seis principais movimentos, sendo três de rotação (movimentação angular) e três de translação (movimentação linear). Tomando como referência um sistema de coordenadas cartesianas XYZ, os movimentos de rotação são: jogo (*roll*), com rotação em torno do eixo X; arfagem (*pitch*), com rotação em torno do eixo Y; e guinada (*yaw*), com rotação em torno do eixo Z. Já os movimentos de translação são: avanço (*surge*), correspondente à translação na direção do eixo X; deriva (*sway*), equivalente à translação na direção do eixo Y; e afundamento (*heave*), correspondente à translação na direção do eixo Z (SILVA, 2018).

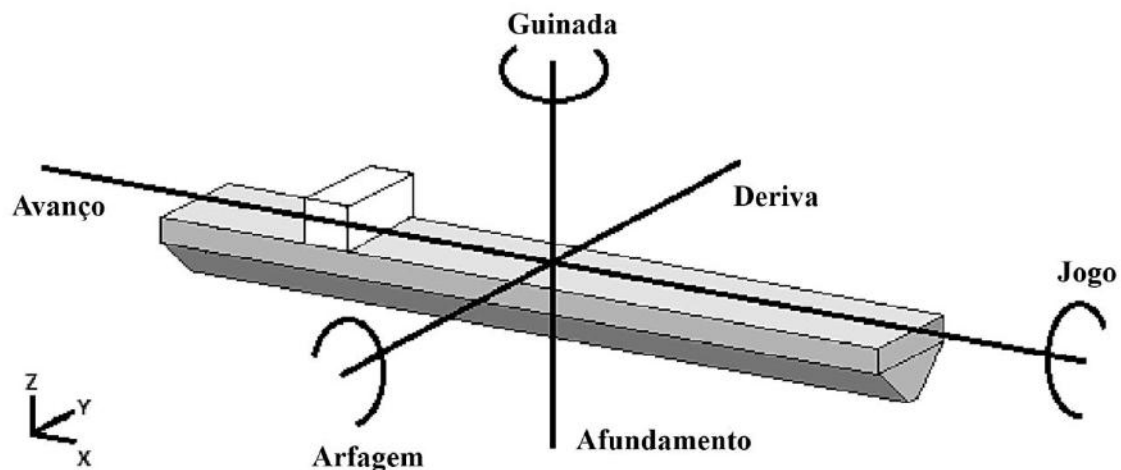


Figura 18 – Exemplificação de movimentos relativos de plataformas flutuantes tipo FPSO. Baseado em SILVA (2018).

A localização e orientação dos separadores gravitacionais deve levar em consideração os impactos dessas movimentações relativas na performance do equipamento. O desempenho dos separadores pode ficar comprometido a depender dessa escolha, sendo os movimentos de jogo, arfagem e, em um menor nível, o afundamento, importantes nesse sentido. As acelerações induzem fluxos secundários no líquido, que cria ondas nas interfaces e dispersões das fases do líquido na interface óleo/água. De forma geral, é recomendado que esses equipamentos estejam alinhados paralelamente ao eixo longitudinal, no caso de um FPSO, e estejam localizados aproximadamente a meia nau, onde as acelerações devido à arfagem (*pitch*) e afundamento (*heave*) são menos significativas (WOLLNER, 2016).

Particularmente, o movimento de arfagem pode promover alteração da área da seção transversal acima do nível líquido. Essa variação altera a velocidade do gás, reduzindo a capacidade do separador em separar os fluidos, uma vez que o gás em alta velocidade pode resultar na geração de espuma. Adicionalmente, o movimento de arfagem pode gerar turbulência no interior do vaso separador, fazendo com que a tensão interfacial entre água e óleo seja quebrada, resultando na mistura das fases. Por fim, o controle de nível para equipamentos sob influência de tal movimento relativo fica comprometido, já a altura da interface irá se mover de forma correspondente. Em último caso, esses problemas na medição e controle de nível podem gerar falsos alarmes e inclusive acarretar o acionamento do desligamento automático da operação do separador (CLARK, 1995; MUELLER, 1997 e SANT'ANNA, 2011).

A modelagem matemática dos movimentos relativos, no entanto, é um processo extremamente complexo. Diversos fatores influenciam na modelagem desses movimentos, tais como: as dimensões físicas, formato do casco, massa da estrutura, distribuição de cargas e espectro de ondas local do mar. Ainda há também que se considerar os dispositivos utilizados para minimizar tais movimentações, como por exemplo o emprego de ancoragem e outros sistemas anti-movimentação (SILVA, 2018). Os cálculos envolvidos para descrever essas movimentações relativas, de forma geral, se baseiam no emprego de uma função de transferência denominada de Operador de Resposta de Amplitude – do inglês, *Responde Amplitude Operator* (RAO). Essa função é utilizada para descrever o comportamento da embarcação para diversas frequências de ondas regulares, sendo normalmente adimensionalizado com a altura das ondas (BHATTACHARYYA, 1978 e SILVA, 2018). Dada a complexidade envolvida, que requer maior nível de detalhe em uma série de informações indisponíveis e pressupõe o uso de softwares navais dedicados, no presente trabalho foi adotada uma abordagem simplificada para considerar os efeitos do movimento de arfagem, a qual será descrita no capítulo 3.

2.4. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A fluidodinâmica computacional – do inglês, *Computational Fluid Dynamics* (CFD) – é uma ferramenta de análise de escoamentos de fluidos, transferência de calor, massa e fenômenos associados, como por exemplo, reações químicas. Essas análises se dão por meio de simulações numéricas computacionais, se caracterizando como uma poderosa técnica empregada para estudar uma série de aplicações e problemas correlatos, sejam esses na indústria ou academia. Entre as áreas de aplicação, pode-se citar (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

- Aerodinâmica de aviões e automóveis;
- Hidrodinâmica de embarcações;
- Geração de Energia: combustão, turbinas de gás e parques eólicos;
- Engenharia Elétrica e Eletrônica: resfriamento de sistemas e circuitos;
- Engenharia de Processos Químicos: separação, mistura de componentes e projeto de equipamentos;
- Arquitetura e Urbanismo: ventilação, trocas de ar, trocas de calor em construções e regiões urbanas ou rurais;
- Engenharia Ambiental: distribuição de poluentes efluentes;
- Engenharia Biomédica: escoamentos em veias e artérias;
- Engenharia de Segurança de Processos: dispersão de gases tóxicos, incêndios e explosões;

A resolução de problemas de escoamento e fenômenos relacionados pode ser abordada de três formas distintas: analiticamente, utilizando as equações fenomenológicas para achar as respostas desejadas; experimentalmente, preparando cuidadosamente experimentos que emulem o problema real; e numericamente, utilizando técnicas computacionais. A fluidodinâmica computacional, apesar de por sua definição precisar empregar métodos numéricos para chegar a uma solução aproximada, apresenta como vantagem em relação aos métodos analíticos e experimentais o fato de, por muitas vezes, ser mais acurada, mais flexível, significativamente menos custosa e, em certas situações, ser a única alternativa possível (ZIKANOV, 2010).

Os fenômenos estudados por essa técnica computacional se baseiam em equações diferenciais parciais. Essas, por sua vez, não podem ser resolvidas analiticamente, com exceção de casos especiais. Portanto, a fim de obter uma solução aproximada, é preciso utilizar métodos de discretização que tem por objetivo transformar as equações diferenciais em um sistema de equações algébricas que pode ser resolvido por um computador. As aproximações são aplicadas em pequenos domínios no espaço e/ou tempo de forma que a solução numérica gere resultados em regiões discretas, sendo a qualidade dos resultados dependente da qualidade da discretização implementada (FERZIGER e PERIC, 2002).

Os estudos de CFD, independentemente de sua área de aplicação, consistem normalmente em seis etapas principais, sendo elas:

- Análise do problema físico: nessa etapa levantam-se as informações acerca do fenômeno a ser estudado, tais como as principais variáveis que influenciam na análise. Avalia-se também a possibilidade de se realizar simplificações.
- Construção do domínio computacional: nessa etapa a geometria do problema é modelada, já delimitando regiões que farão parte da análise ou não, seja por interesse ou pela necessidade de adotar simplificações;
- Geração de malha: essa etapa consiste na discretização do domínio computacional em pequenos volumes de controle. Em geral, quando mais refino for empregado nessa discretização, mais acurados serão os resultados;
- Configuração da simulação: nessa etapa são definidos os parâmetros físicos, químicos, matemáticos e numéricos do problema, assim como condições de contorno e dados para a inicialização;
- Resolução numérica: consiste na resolução das equações envolvidas através do computador, sendo essa etapa por si só independente da ação do projetista ou pesquisador;
- Pós-processamento: visualização e análise dos resultados, podendo ser através de gráficos, ilustrações, contornos, isovolumes, isosuperfícies, linhas de corrente ou simplesmente através dos valores numéricos das variáveis de interesse.

2.4.1. Modelagem Matemática – Equações de Conservação

A modelagem matemática dos problemas envolvendo transporte de propriedades resolvidos numericamente por fluidodinâmica computacional se baseia em três principais princípios: de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Para um fluido contínuo, em escala macroscópica - desconsiderando efeitos a nível molecular – é feita a modelagem matemática para um volume de controle infinitesimal, conforme equações descritas a seguir. Suas propriedades macroscópicas, como velocidade, pressão, densidade, temperatura, localização no espaço e no tempo são as propriedades de interesse para descrever os problemas a serem estudados. Coordenadas cartesianas XYZ são consideradas nas formulações a seguir, para um fenômeno transiente, tridimensional em um fluido compressível.

O princípio de conservação de massa, ou equação da continuidade da mecânica dos fluidos, pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

em que ρ é a densidade do fluido, t é o tempo, x , y e z são as direções no plano cartesiano e u , v e w são as respectivas velocidades relativas a cada eixo XYZ.

O princípio de conservação do momento linear, baseada na segunda lei de Newton, diz que a taxa de aumento de momento linear de uma partícula fluida tem que ser igual à soma de todas as forças sobre a partícula. Essas forças podem ser separadas em dois grupos: forças de superfície e as forças de campo, representadas usualmente como termos fonte. Em termos de equacionamento, tem-se (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007):

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (3)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (4)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + S_{Mz} \quad (5)$$

em que τ_{ij} é o tensor de tensão viscosa com componente de tensão agindo na direção j sobre uma superfície normal a direção i . A pressão, tensão normal, é denotada por p enquanto os termos S_{Mx} , S_{My} e S_{Mz} são os termos fonte, onde por exemplo, a força gravitacional seria considerada ($S_{Mz} = -\rho g$).

Conforme discutido anteriormente, essas equações fundamentais não possuem soluções analíticas, com exceção de casos com muitas simplificações. Portanto, faz-se necessário empregar métodos numéricos que obtenham soluções aproximadas. Como métodos para resolução de problemas envolvendo equações diferenciais parciais, pode-se citar como principais o Método de Elementos Finitos (MEF), o Método de Diferenças Finitas (MDF) e o Método de Volumes Finitos (MVF), o qual é largamente aplicado para problemas de fluidodinâmica computacional.

2.4.2. Métodos Numéricos – Volumes Finitos

Nos problemas de dinâmica dos fluidos computacional, métodos numéricos tem de ser aplicados para a resolução das equações diferenciais obtidas pelos princípios de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Os métodos buscam transformar as equações diferenciais em expressões algébricas que envolvem a função incógnita, de modo que a abordagem empregada consiste na discretização do domínio em estudo, na forma de uma malha de pontos discretos (MALISKA, 2004).

O método mais utilizado no contexto de CFD é o Método dos Volumes Finitos (MVF). Nele, podem-se obter as equações aproximadas através dos balanços da propriedade em relação a volumes elementares, isto é, volumes finitos, ou partindo-se da equação diferencial na forma conservativa e a integrando sobre o volume elementar no espaço e no tempo; entretanto, as duas formas são procedimentos equivalentes (MALISKA, 2004).

O MVF é um método considerado de simples compreensão e interpretação física, uma vez que todos os termos que precisam ser aproximados têm significados físicos, já que o equacionamento parte da obtenção dos balanços baseados nos princípios de conservação das propriedades físicas. Também pela sua robustez, é considerado o mais empregado atualmente na área de fluidodinâmica computacional (MALISKA, 2004 e SANT'ANNA, 2011)

Em relação aos métodos alternativos, o Método de Elementos Finitos (MEF) é historicamente mais empregado em problemas de análise estrutural, enquanto o Método de Diferenças Finitas (MDF) também era mais utilizado para problemas de escoamento de fluidos. Os problemas, do ponto de vista físico, são amplamente distintos: os escoamentos são altamente não-lineares, vide equação de conservação de quantidade de movimento, enquanto os problemas estruturais ou de elasticidade já não possuem

termos convectivos, se assemelhando a problemas puramente difusivos de transferência de calor. Historicamente o MDF não lidava bem com geometrias complexas, enquanto o MEF permitia trabalhar com estas. Com o aprimoramento do MVF, esse atualmente é capaz de trabalhar com geometrias complexas, malhas não-estruturadas e, por sua versatilidade, é amplamente empregado nos pacotes comerciais de CFD. (MALISKA, 2004)

2.4.3. Abordagem Multifásica

Os escoamentos multifásicos estão presentes em virtualmente todos processos de interesse industrial, como ocorre no caso de separadores gravitacionais. Para esse tipo de escoamento, ainda existem outras diferentes combinações possíveis de serem encontradas, como por exemplo, escoamentos gás/sólido, no caso de carreamento de materiais particulados em um ciclone que remove cinzas do ar ou líquido/sólido, em tanques de decantação de resíduos sólidos em água. Cavitação em bombas, aerossóis, leitos fluidizados, hidrociclones, torres de resfriamento, neve, chuva e fumaça também são caracterizados por escoamentos multifásicos. De fato, uma lista de exemplos dificilmente pode ilustrar adequadamente a diversidade e quantidade de escoamentos multifásicos encontrados na natureza e de interesse econômico (BRENNEN, 2005).

Para apropriadamente caracterizar fenômenos desse tipo, é necessário identificar fases dispersas e fases contínuas, de modo a modelar o escoamento em escoamento disperso ou escoamento segregado. As fases contínuas são aquelas que normalmente estão presentes em maior proporção em uma mistura heterogênea e se caracterizam pelo fato de, independente de qual porção de uma amostra seja retirada, suas características e propriedades permanecem iguais, além de estarem continuamente conectadas umas as outras. Por outro lado, fases dispersas são aquelas que estão dispersas em um meio contínuo, usualmente e analogamente, em menor proporção mássica ou volumétrica, na forma de partículas, bolhas ou gotas, tipicamente de tamanhos da ordem de micrômetros à milímetros. Para o caso de gotículas de óleo dispersas em um gás, por exemplo, essas gotículas podem apresentar diferentes tamanhos e formas, além de não estarem conectadas continuamente umas às outras e, portanto, seriam classificadas como a fase dispersa, enquanto o gás seria a fase contínua.

Um escoamento modelado como multifásico disperso é caracterizado por um finito número de pequenas partículas, gotas, gotículas ou bolhas dispersas num meio

contínuo, como no exemplo citado de gotículas de óleo dispersas um gás, como ocorre de fato no separador trifásico e justifica o uso de extratores de névoa. Já o escoamento modelado como segregado é definido pela presença de mais de um fluido como fase contínua, sendo estes imiscíveis e com uma interface bem definida, podendo nesse sentido ser citada uma mistura de água/ar em que é possível identificar a interface entre os fluidos a nível macroscópico.

Em especial, em termos de modelagem matemática, os separadores trifásicos podem ser estudados considerando uma das fases líquidas dispersas na outra, como óleo disperso em água, sendo o líquido e o gás tratados como meios contínuos ou, alternativamente, as três fases são consideradas como contínuas. A avaliação de movimentação da interface líquido-gás ou *sloshing* em separadores gravitacionais *offshore* é citada como um caso típico de escoamentos segregados ou de superfície-livre (ANSYS, 2009).

A Figura 19 ilustra as diferenças das abordagens entre tratar o escoamento multifásico como disperso ou segregado. A variável fração volumétrica (ϕ) é calculada como uma média local da fração volumétrica de gás (fase dispersa) no líquido. No caso do escoamento disperso, é observada uma transição suave de aumento ou redução dessa fração volumétrica. Já para o caso da modelagem como escoamento segregado, as diferentes fases são exclusivas, de modo que ϕ varia de forma abrupta, já que há uma interface bem definida entre as fases. Sumarizando, no escoamento disperso pode haver tanto gás quanto líquido em determinada região do domínio e determinado tempo, enquanto na modelagem segregada, só pode haver um deles (COMSOL, 2020).

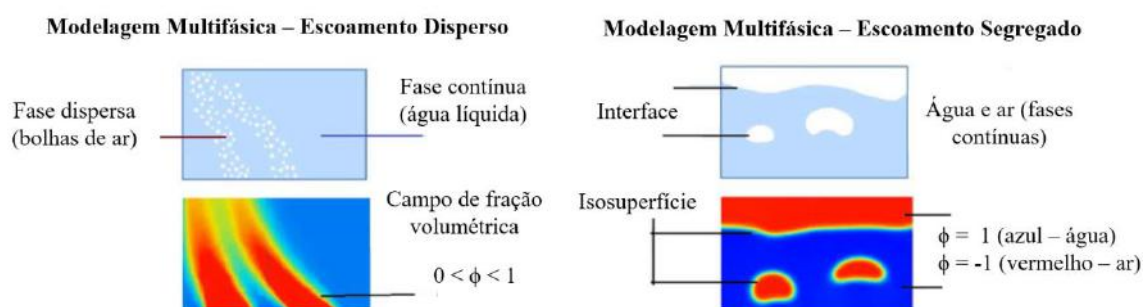


Figura 19 – Diferenças da modelagem de escoamentos multifásicos: disperso e segregado. Baseado em COMSOL (2020)

Na fluidodinâmica computacional, existem duas principais abordagens para a predição de escoamentos multifásicos: a Euleriana e a Lagrangiana. Na abordagem Euleriana, as fases são tratadas como contínuas e interpenetrantes, coexistindo no domínio computacional. As equações de conservação de massa, *momentum* e energia são resolvidas para cada fase e o preenchimento do domínio com determinada fase se dá pela fração volumétrica da mesma, sendo que cada fase também possui sua própria velocidade, temperatura e propriedades físicas. Interações entre fases são consideradas através de termos de transferência interfase nas equações de transporte. A abordagem Euleriana, portanto, é capaz de simular uma diferente gama de problemas multifásicos, sejam eles de escoamentos dispersos (bolhas, gotas, partículas) ou segregados (escoamento de superfície-livre). Já na abordagem Lagrangiana, que tem uso principal voltado à sistemas particulados, apenas a fase fluida é tratada como contínua, enquanto o movimento da fase dispersa (discreta) é avaliado através da integração da equação do movimento das partículas individuais, ao longo das suas trajetórias (SADREHAGHIGHI, 2021 e ANSYS, 2020).

A abordagem Euleriana apresenta como vantagem, em relação a Lagrangiana, o fato de ser capaz de lidar com situações onde a fase está altamente dispersa ou quando a mesma está em proporção volumétrica grande. Porém, para sistemas com baixa concentração da fase dispersa, sua acurácia pode ser inferior à Lagrangiana. Adicionalmente, em outras aplicações, seu custo computacional costuma ser elevado e, nesse contexto, é possível aplicar modelos que são modificações ou simplificações da abordagem completamente Euleriana – também chamada de Euleriana-Euleriana. Dentre esses modelos derivados, destacam-se os Modelo de Mistura (*MixtureModel*), Modelo de Balanço Populacional (*Population Balance Model*) e Modelo de Volume de Fluido, mais conhecido por *Volume of Fluid* (VOF).

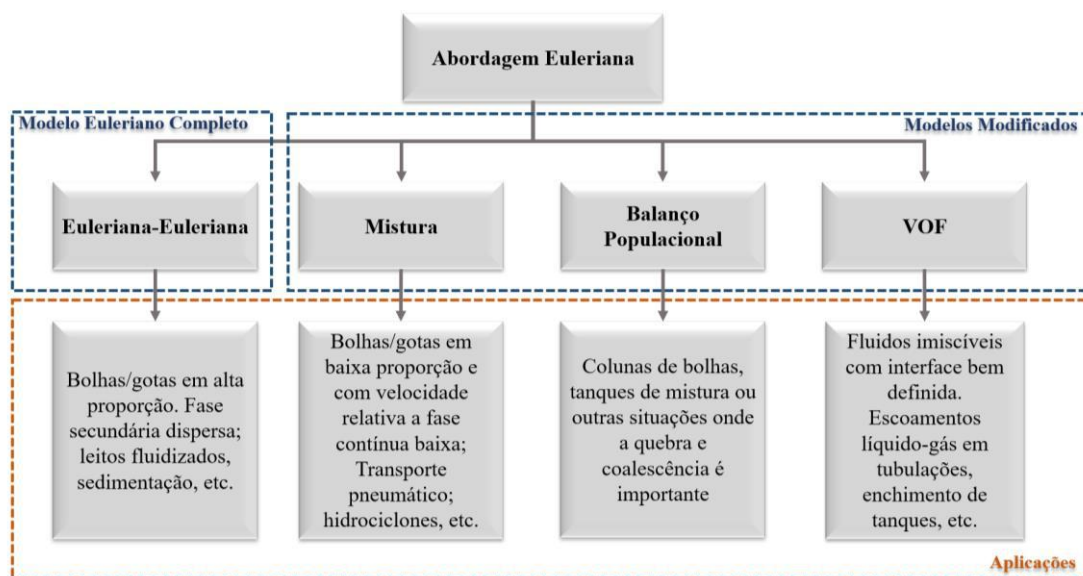


Figura 20 – A abordagem Euleriana e seus modelos derivados. Baseado em PACHPUTE (2020).

A modelagem completamente Euleriana é o modelo sem simplificações, nas quais cada fase apresenta suas próprias equações envolvidas, isto é, cada fase Euleriana é tratada individualmente; por isso, o modelo também é chamado de Euleriano-Euleriano. Esse tipo de metodologia também é chamado de abordagem não-homogênea, pelo fato dos campos de pressão e velocidade, por exemplo, não serem compartilhados entre as fases. Conseqüentemente, o tempo computacional requerido é maior do que em casos em que apenas um campo é resolvido, isto é, em uma abordagem homogênea. As aplicações do modelo completamente Euleriano são extensas, podendo-se citar a simulação de leitos fluidizados ou escoamentos em que há mais que 10% em volume da fase dispersa (gotas, bolhas, etc.).

O modelo de mistura é uma simplificação do modelo completamente Euleriano. Ele pode ser utilizado para modelar escoamentos que se movem com diferentes velocidades, mas assumindo equilíbrio local em curtas distâncias percorridas. Esse modelo resolve n fases, sejam fluidas ou particuladas, através da resolução das equações de continuidade, *momentum* e energia para a mistura, enquanto as frações volumétricas são resolvidas para as fases secundárias e as velocidades relativas são obtidas por expressões algébricas. Por trabalhar com um menor número de variáveis, o modelo de mistura é um bom substituto do modelo completamente Euleriano em vários casos como, por exemplo, quando há uma grande distribuição dos particulados ou quando os termos de transferência interfase são desconhecidos ou de acurácia questionável.

Hidrociclones, colunas de bolhas e outras aplicações onde a proporção da fase dispersa não é alta são exemplos típicos. Vale destacar que, entretanto, esse modelo é, em geral, menos acurado que o completamente Euleriano (ANSYS, 2020).

O modelo de Balanço Populacional pode ser acoplado à abordagem Euleriana tradicional, e é caracterizado como uma extensão desse modelo capaz de avaliar outros fenômenos relativos à fase dispersa. Esse modelo é implementado em situações em que o tamanho e distribuição das partículas, gotículas ou bolhas se alteram ao longo do escoamento. Fenômenos de nucleação, crescimento, dissolução, agregação, coalescência e quebra são modelados. Exemplos que podem ser simulados através do método de Balanço Populacional incluem: cristalização, reações com formação de precipitado, granulação, emulsões líquido-líquido e aerossóis (ANSYS, 2020). Portanto, esse é um modelo mais complexo e mais computacionalmente custoso em relação aos demais já descritos.

O modelo *Volume of Fluid* (VOF) é uma simplificação do modelo completamente Euleriano. Esse modelo lida com dois ou mais fluidos imiscíveis, com interface bem definida a nível macroscópico através da resolução de apenas um conjunto de equações de quantidade de movimento, rastreando a fração volumétrica dos fluidos ao longo do domínio. Por isso, é computacionalmente menos custoso do que os modelos já apresentados. Suas aplicações estão relacionadas, por exemplo, ao estudo de movimentação de grandes bolhas em um líquido, à quebra de contenção de líquidos (*dam break*), simulações de superfície-livre e outros problemas que foquem na busca da interface líquido-gás ou líquido-líquido (ANSYS, 2020). É importante ressaltar que nesse modelo, assim como nos outros apresentados, as definições aqui discutidas foram baseadas no pacote de softwares da ANSYS. Porém, a nomenclatura e certas definições nos modelos específicos variam de acordo com o código CFD utilizado.

Para o estudo da movimentação da interface entre água, óleo e gás – objetivo do presente trabalho –, o modelo VOF é aplicável e foi o escolhido para a configuração das simulações fluidodinâmicas. Assim, considera-se a premissa de imiscibilidade de água, óleo e gás e são ignorados fenômenos a nível microscópico, isto é, quebra e coalescência de gotículas, por exemplo. Essa escolha está em linha com as recomendações do *software* ANSYS Fluent e ANSYS CFX, além de ser também amplamente citada na literatura para este tipo de análise, conforme descrito na subseção

2.5. Particularmente, no ANSYS CFX, pacote comercial empregado neste trabalho, o modelo VOF é adotado através da seleção do modelo *Free Surface Model* (modelo de superfície-livre) e considerando um equacionamento multifásico homogêneo, ou seja, apenas um conjunto de equações de pressão e velocidade é resolvido.

2.4.4. Modelagem de Tensão Superficial

A tensão superficial é uma força que existe em uma interface que age de modo a minimizar a área da própria interface, causada pela minimização de sua energia de Gibbs, maximizando assim sua estabilidade termodinâmica. Essa força resultante gera uma descontinuidade de pressão na interface e também efeito de capilaridade em paredes adesivas (ANSYS, 2020 e CARDOSO, 2021).

Na literatura, diferentes trabalhos que estudaram escoamentos de superfície-livre adotaram modelos para computar as tensões superficiais, embora em outros casos, os efeitos relacionados a essas forças na superfície sejam desprezados por certos autores, dada sua baixa influência em determinadas aplicações. Laleh *et al.* (2010) calcularam através do *software* HYSYS coeficientes de tensão superficial para os pares água/gás, óleo/gás e utilizaram dados do trabalho de Kim e Burgess (2001) para considerar o parâmetro em questão para água/óleo. A partir disso, realizaram estudos incluindo o efeito da tensão superficial para um trabalho envolvendo separadores trifásicos de petróleo. Por outro lado, Vanden Broeck e Keller (1986) conduziram simulações de superfície-livre negligenciando efeitos de tensões superficiais e, segundo Katopodes (2019), nem todos escoamentos modelados por VOF precisam incluir os efeitos da tensão superficial.

No pacote comercial de CFD utilizado no presente trabalho, as forças de tensão superficial são incluídas pelo modelo de Força Superficial Contínua (BRACKBILL e KOTHE, 1992) – do inglês, *Continuum Surface Force* (CSF). Nesse modelo, para cálculos com a abordagem multifásica VOF, a força superficial adicional é incluída como um termo fonte na equação de conservação de quantidade de movimento. Esta força (\vec{F}_{vol}) tem a seguinte forma:

$$\vec{F}_{vol} = \sum_{\text{pares } ij; i < j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i k_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (6)$$

em que σ_{ij} é o coeficiente de tensão superficial de i em relação a j ; α_i e α_j são as frações volumétricas dos fluidos i e j ; ρ_i e ρ_j são as densidades dos fluidos i e j ; e k_i e k_j são parâmetros da curvatura da interface, definidos como o divergente do vetor normal.

É esperado que nem todos os escoamentos multifásicos precisem envolver os cálculos de tensões superficiais e, neste sentido, três números adimensionais são por vezes utilizados para nortear a importância dos efeitos de interface no escoamento em si. Esses números são: o número de Reynolds (Re), razão entre forças de inércia e forças viscosas; o número Capilar (Ca), que representa a relação entre as forças viscosas de arrasto e os efeitos da tensão interfacial; e, por fim, o número de Weber (We), que pode ser escrito como a razão das forças de arrasto e as forças coesivas. É considerado que a tensão superficial é importante quando, para escoamentos com número de Reynolds (Re) menor que 1, o número Capilar (Ca) também é menor que 1; ou, quando Re é maior do que 1, o número de Weber (We) é menor que 1. Quando essas condições não sejam satisfeitas, portanto, a tensão superficial pode ser negligenciada (ANSYS, 2020). É importante destacar que a tensão superficial é relevante quando efeitos de curvatura são relevantes. No presente caso, em que não se está avaliando gotas isoladamente, mas as fases como um todo, a determinação do comprimento característico se torna imprecisa e eventualmente nem apropriada. Para efeitos de cálculo, considerou-se o diâmetro hidráulico do separador.

$$Re = \frac{\rho LU}{\mu} \quad (7)$$

$$Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \quad (8)$$

$$We = \frac{\rho LU^2}{\sigma} \quad (9)$$

em que U é a velocidade do fluido e μ é a viscosidade dinâmica.

2.4.5. Modelos de Turbulência

Os escoamentos são muitas vezes caracterizados por seu perfil turbulento ou laminar, sendo o primeiro caso um desafio a parte em termos de modelagem em fluidodinâmica computacional. Essa classificação se dá por meio da verificação do número de Reynolds que, conforme citado anteriormente, representa a importância relativa entre as forças de inércia (associada com efeitos convectivos) e as forças viscosas. Para valores abaixo de um Re crítico, observa-se que o fluido escoar de forma

organizada, com camadas adjacentes bem definidas, caracterizando o escoamento laminar. Enquanto que, quando trabalha-se acima desse Re crítico, uma série de efeitos complexos começam a ocorrer, levando em uma mudança no caráter do escoamento, associada à um comportamento caótico e randômico, naturalmente não-estacionário. Essa descrição é associada a escoamentos turbulentos (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

Um exemplo típico de medição experimental da velocidade de um fluido em regime turbulento é mostrado na Figura 21. Em vez da velocidade u assumir um valor constante, esta fica randomicamente flutuando ao redor de uma velocidade média U . Matematicamente, esse comportamento é tratado pela chamada decomposição de Reynolds:

$$u(t) = U + u'(t) \quad (10)$$

Essa equação ilustra o caso de uma única direção, porém, para as velocidades relativas a outros eixos cartesianos, pressão e outras variáveis, também é comum caracterizar de forma análoga, com um termo médio somado a um termo relativo a flutuação. É importante destacar que a turbulência também pode ser vista pela formação de vórtices, com uma grande variedade de escala de comprimento (*length scale*). Esses promovem um elevado grau de mistura entre as partículas do fluido, elevando a intensidade das transferências de massa, *momentum* e calor.

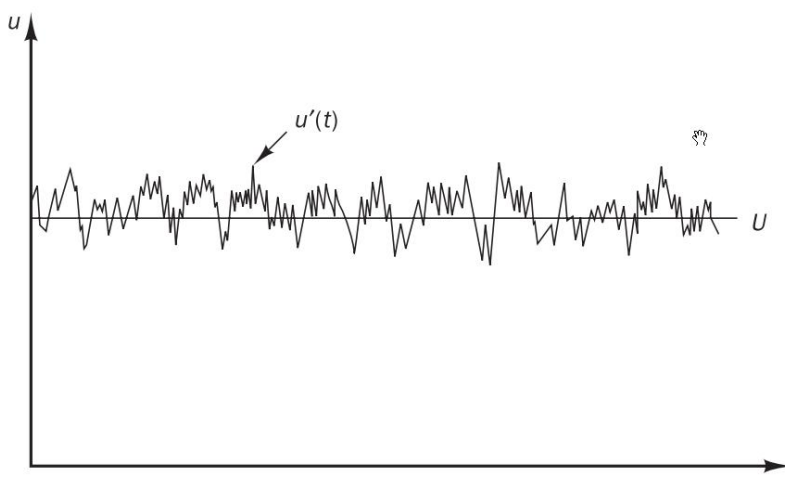


Figura 21 – Perfil da velocidade em experimentos de escoamentos turbulentos. Fonte: VERSTEEG e MALALASEKERA (2007)

Uma imensa gama de escoamentos de interesse industrial são de fato turbulentos, sendo imperativo modelar adequadamente os fenômenos associados à turbulência. Uma série de modelos de turbulência foram desenvolvidos, sendo os modelos clássicos podendo ser divididos em quatro grupos distintos (KLEIN, 2007 e SANT'ANNA, 2011):

- Modelos algébricos: modelam o tensor de Reynolds em analogia à lei da viscosidade de Newton e empregam uma equação algébrica, comumente empírica, para calcular o valor da viscosidade turbulenta. Pelo fato de não apresentar nenhuma outra equação de transporte adicional, ou seja, apenas as equações algébricas, esse modelo é chamado de modelo de zero equações;
- Modelos de uma equação: também modelam o tensor de Reynolds em analogia à lei da viscosidade de Newton, mas resolvem uma equação de transporte extra para calcular a viscosidade turbulenta;
- Modelos de duas equações: resolvem duas equações diferenciais de transporte extra para calcular a viscosidade turbulenta, também empregada para modelar o tensor de Reynolds em analogia à lei da viscosidade de Newton;
- Modelos das tensões de Reynolds: esses modelos apresentam equações diferenciais de transporte para cada um dos componentes do tensor de Reynolds e por isso apresentam bons resultados para escoamentos complexos.

No contexto de simulações numéricas envolvendo separadores gravitacionais, a escolha mais comum é pelo modelo k - ϵ padrão (*standard k-epsilon model*), modelo de duas equações, conforme descrito na subseção 2.5. Esse modelo é o mais amplamente utilizado dentre as opções disponíveis, sendo capaz de modelar adequadamente situações nas quais as tensões de cisalhamento de Reynolds são importantes, o que inclui uma vasta gama de aplicações de engenharia, explicando assim sua popularidade. (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

2.4.6. Número de *Courant*

Para simulações de fluidodinâmica computacional transientes, o número adimensional de *Courant* (Co) tem fundamental importância durante a resolução numérica do escoamento. Analisando apenas um escoamento unidimensional ao longo do eixo X, esse número pode ser definido como:

$$Co = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (11)$$

Esse parâmetro pode ser interpretado como o tempo de propagação da informação ao longo das células do domínio. Quando seu valor é menor que 1, o fluido passa por um elemento de malha por pelo menos um passo de tempo, enquanto quando o *Courant* é maior do que a unidade, pode-se dizer que o fluido percorreu mais de um elemento de malha no passo de tempo avaliado.

Para códigos de solução que utilizem esquemas transientes explícitos, isto é, nos quais a informação do passo de tempo seguinte é calculada de posse da informação conhecida no passo de tempo anterior, o número de *Courant* tem papel crítico na convergência do algoritmo. Para o método de Euler explícito, o critério de estabilidade, desprezando termos difusivos, se reduz à (FERZIGER e PERIC, 2002):

$$Co < 1 \text{ ou } \Delta t < \frac{u}{\Delta x} \quad (12)$$

Para métodos implícitos, a solução se dá pela avaliação dos fluxos e termos fonte no próprio passo de tempo atual, criando um sistema de equações acopladas, que deve ser resolvida de forma iterativa a cada passo de tempo, de modo a chegar na solução (FLOW 3D, 2021). Nessa metodologia, não há critério de estabilidade numérica que restrinja o *Courant* para que o mesmo tenha que ser menor do que a unidade. Por sua estabilidade, robustez e versatilidade, esquemas implícitos são em geral mais indicados para a solução de problemas transientes (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

O *software* ANSYS CFX 20R1, utilizado no presente estudo, utiliza uma abordagem implícita para a resolução numérica. Portanto, em termos de estabilidade numérica, não há obrigatoriedade em se aplicar restrição quanto ao Co . Entretanto, para resolver escoamentos transientes é possível que seja necessário reduzir o número de *Courant* para valores próximos ou abaixo da unidade com propósito de obter resultados com maior acurácia. Adicionalmente, alguns modelos implementados no *software*

como, por exemplo, de tensão superficial, são equivalentes a uma abordagem explícita e, conseqüentemente, reduzir o Co pode ter efeito significativo nos resultados.

2.4.7. Escoamento em Meios Porosos

Certos escoamentos de interesse econômico envolvem a passagem de fluidos por pequenos orifícios ou caminhos tortuosos de pequena dimensão. Em plataformas *offshore*, por exemplo, há um alto grau de congestionamento causado pela presença de equipamentos, estruturas e tubulações instaladas em um local de espaço limitado. Em termos de segurança de processos, pisos gradeados são utilizados em diferentes *decks* de modo que, em caso de um vazamento de gás inflamável, esse poderá mais facilmente se diluir graças a maior capacidade da ventilação natural chegar a região que originou o incidente enquanto que, caso pisos sólidos fossem empregados, o gás poderia se acumular em determinada região e sua ignição levaria a ondas de sobrepressão mais potentes. Modelar através de CFD o escoamento de ar através de pequenos orifícios de um piso gradeado exigiria, idealmente, possuir elementos de malha no mínimo do tamanho desses sítios livres. Porém, esse requisito geralmente torna inviável proceder as análises, devido ao elevado número de células que seriam necessárias para discretizar adequadamente o problema. Nesse sentido, uma alternativa é tratar o escoamento nesses locais como um escoamento em um meio poroso.

No contexto dos separadores gravitacionais, dispositivos internos como quebra-ondas, podendo ser constituídos de placas perfuradas ou meios estruturados, também podem ser modelados como meios porosos. Assim, elimina-se a necessidade de possuir uma alta densidade de elementos de malha concentrada numa região, podendo-se trabalhar com malhas mais grosseiras sem perder a qualidade e precisão necessária.

Nos códigos de fluidodinâmica computacional, os meios porosos são contabilizados como termos fonte nas equações de Navier-Stokes de conservação de quantidade de movimento. É possível especificar meios porosos que permitem a passagem de fluido em apenas uma direção, assim como meios em que o fluido pode se movimentar em todas as direções espaciais. No *software* empregado neste trabalho, ANSYS CFX 20R1, há o modelo isotrópico, correspondente ao caso em que a movimentação do fluido é livre e também está disponível um modelo de perda direcional, o qual é possível especificar os parâmetros do meio poroso de modo a permitir o fluxo em determinadas direções específicas (ANSYS, 2020).

No caso de chicanas quebra-ondas dentro do separador trifásico, entende-se que o fluido pode tanto seguir seu caminho em direção à saída após o vertedor do equipamento, vindo do dispositivo de entrada, mas também, no caso de impacto das movimentações oceânicas, pode seguir o caminho inverso. O modelo de perda isotrópica no ANSYS CFX 20R1 é modelado por (ANSYS, 2020):

$$S_{M,x} = -\frac{\mu}{K_{perm}} U_x - K_{loss} \frac{\rho}{2} |U| U_x \quad (13)$$

$$S_{M,y} = -\frac{\mu}{K_{perm}} U_y - K_{loss} \frac{\rho}{2} |U| U_y \quad (14)$$

$$S_{M,z} = -\frac{\mu}{K_{perm}} U_z - K_{loss} \frac{\rho}{2} |U| U_z \quad (15)$$

sendo o sufixo x, y e z equivalentes ao eixo analisado, S_M o termo fonte inserido na equação de conservação de *momentum*, U a velocidade do fluido, K_{perm} a permeabilidade e K_{loss} o coeficiente de perda quadrático. A permeabilidade representa a componente linear e as perdas viscosas, enquanto o termo quadrático representa as perdas inerciais.

2.4.8. Discretização e Malha Computacional

A malha, também denominada de *grid* ou *mesh*, é a representação da discretização do domínio do problema. A região de interesse é dividida em uma série de pequenos volumes de controle onde serão resolvidas as equações de transporte e de outros fenômenos associados. Esses volumes são chamados de células ou elementos e a exatidão da solução é governada por quão bem discretizado foi o domínio computacional. Como o poder computacional é finito, é necessário considerar que existe um grau de refino de malha ideal para proceder as simulações. Apesar de quanto menor o tamanho das células, maior é a acurácia, malhas muito refinadas são computacionalmente custosas, implicando elevados tempos de simulação, o que pode inviabilizar certas análises. Normalmente, uma malha ótima é aquela que tem elementos suficientemente pequenos em regiões onde grandes variações nas variáveis calculadas ocorrem, enquanto que, em regiões com pequenos gradientes, os elementos são maiores (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

Para avaliar se a malha está adequada para a realização dos estudos, portanto, é necessário realizar um teste de independência de malha. Nessa análise, geram-se malhas com diferentes graus de refinamento, partindo de uma discretização mais grosseira, isto é, com menos volumes de controle, e chegando a uma com maior número de elementos.

Para cada caso, são avaliados os resultados de variáveis-chave do problema, de modo que, a partir de determinado grau de refinamento, os resultados não se alterem mais a depender da malha utilizada. Com isso, a malha que apresenta menor custo computacional e que apresenta resultados consistentes com malhas mais refinadas deve ser usada. Essa etapa de procura da malha independente é fundamental para todos os estudos de CFD de alta qualidade (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

Independentemente do número de elementos utilizado, as malhas devem ser elaboradas tendo em mente alguns critérios que contribuem para sua qualidade e a consequente obtenção de resultados estáveis. Em boa parte dos casos, há regiões de elevada densidade de elementos e há outras com gradientes menores, que não precisam ser tão bem discretizadas. Nesse sentido, células vizinhas, por exemplo, não devem possuir tamanho muito discrepante, sendo ideal que a razão de crescimento não seja alta; caso contrário, instabilidades numéricas podem ocorrer. As malhas, além de parâmetros de qualidade a serem discutidos na sequência, também são classificadas em três principais tipos: as estruturadas, não-estruturadas e híbridas.

As malhas estruturadas são aquelas nas quais os elementos são localmente ortogonais, sendo cada célula rodeada sempre por um mesmo número de elementos vizinhos, com exceção dos volumes de controle que pertencem a algum contorno. Essas malhas podem ainda ser classificadas como uniformes ou não-uniformes, conforme mostrado na Figura 22. As uniformes são caracterizadas pelo igual espaçamento entre os volumes de controle e normalmente seu uso é limitado para casos em que a geometria é simples. Já as não-uniformes comumente apresentam maior aglutinação de elementos em regiões de interesse e maior espaçamento em regiões onde são esperados menores gradientes, sendo seu uso mais versátil. (OLIVEIRA, 2004 e SANT'ANNA, 2011)

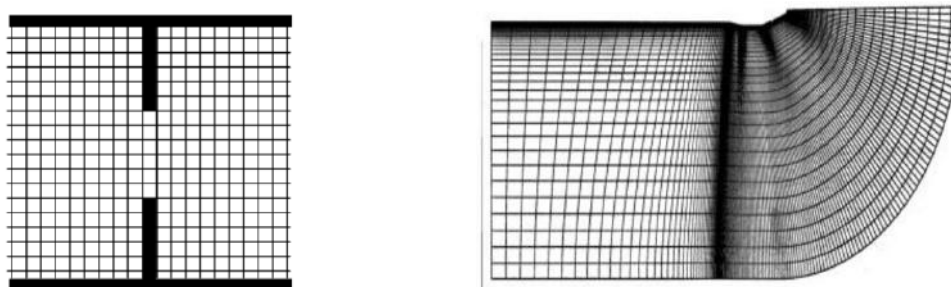


Figura 22 – À esquerda: malha estruturada uniforme; à direita: malha estruturada não-uniforme. Fonte: SANT'ANNA (2011).

Nas malhas estruturadas, os índices dos nós podem ser alocados de forma sequencial na matriz de resolução numérica, de modo que cada índice represente a localização do nó ao longo da coordenada correspondente (ZIKANOV, 2010). Isso facilita a solução computacional, sendo uma vantagem então de se utilizar esse tipo de malha. Além disso, malhas estruturadas requerem, em geral, menor número de nós quando comparadas as não-estruturadas, representando então um menor custo computacional. Por fim, malhas estruturadas usualmente são elaboradas paralelas ou alinhadas ao escoamento, o que diminui erros de interpolação.

A grande desvantagem de malhas estruturadas é que sua aplicação em geometrias complexas é restrita. Nesses casos, é mais viável utilizar uma malha não-estruturada, que se caracteriza pela ausência de regularidade na distribuição espacial dos seus elementos, sendo estes não-ortogonais. As células, no caso da malha não-estruturada, não possuem o mesmo número de elementos vizinhos e podem assumir diferentes formatos, podendo ser triangulares (casos bidimensionais), tetraédricos, prismáticos e piramidais, por exemplo. Devido à essa maior versatilidade e flexibilidade, geometrias complexas são mais facilmente discretizadas por esse tipo de malha (MALISKA, 2004 e SANT'ANNA, 2011). Em contrapartida, as malhas não-estruturadas usualmente requerem maior esforço computacional como consequência de possuírem maior número de nós. A Figura 23 mostra um exemplo de malha não-estruturada construída para simular o escoamento ao redor de um aerofólio.

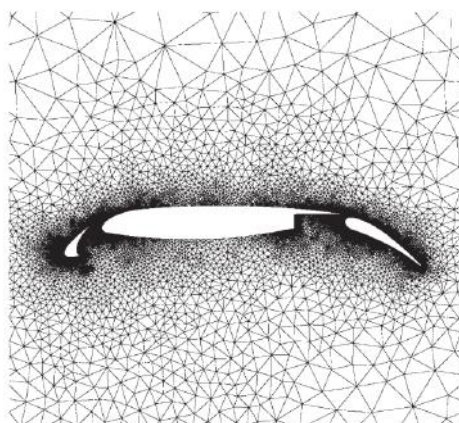


Figura 23 – Malha não-estruturada para um aerofólio. Fonte: VERSTEEG e MALALASEKERA, (2007).

Uma alternativa entre utilizar malhas não-estruturadas e estruturadas, de modo a minimizar as desvantagens de cada uma delas, é a implementação de malhas híbridas,

conforme apresentada na Figura 24. Nesse tipo de malha, normalmente a parte mais relevante do domínio, em termos de variação das variáveis estudadas, é coberta por elementos estruturados, enquanto a parte restante é sujeita a alocação de elementos não-estruturados. O aspecto atrativo em escolher esse tipo de malha é que ela permite o cálculo de escoamentos sobre geometrias complexas com um desempenho numérico e computacional superior a uma malha puramente não-estruturada. Além disso, sua geração dispense muito menos tempo do que a tentativa de geração de uma malha estruturada, no caso de uma geometria não trivial.

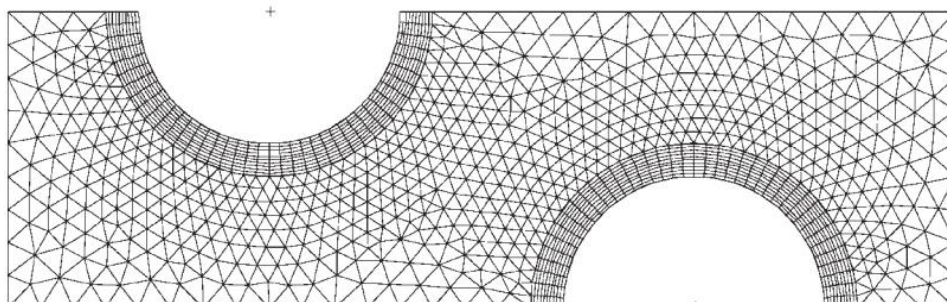


Figura 24 – Malha híbrida. Fonte: VERSTEEG e MALALASEKERA, (2007).

Independentemente de seu tipo, a malha utilizada para discretizar o domínio computacional deve respeitar alguns parâmetros de qualidade. Na Tabela 1 são mostrados alguns dos parâmetros de qualidade recomendados para simulações de fluidodinâmica computacional (ANSYS, 2019). *Element Quality* é o volume do elemento de célula dividido pelo somatório do quadrado dos comprimentos das arestas, de modo que, para um cubo perfeito, o valor é 1 e, para elementos mais deformados, esse valor se aproxima de zero. *Aspect Ratio* é a razão entre o maior comprimento de aresta de célula pelo menor, sendo que, quanto mais próxima de 1 for essa razão, melhor estão definidos os elementos; embora, por outro lado, para refinar áreas específicas, inevitavelmente esse valor irá ficar mais elevado, sendo o valor máximo recomendado de 100. *Skewness* é um dos principais parâmetros de qualidade, que mede o quão próximo do ideal (equilateralmente ou equiangularmente) uma face ou célula está. Por fim, *Orthogonal Quality* é um parâmetro calculado por vetores na face das células que avalia a diferença dos cossenos desses ângulos, de modo que, quanto mais uniforme esses valores, melhores estarão descritos os elementos.

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade de malha

Parâmetro	Faixa	Valores Aceitáveis
<i>ElementQuality</i>	0 a 1	>0,3
<i>AspectRatio</i>	1 a ∞	< 100
<i>Skewness</i>	0 a 1	< 0,5
<i>OrthogonalQuality</i>	0 a 1	> 0,2

Fonte: Baseado em ANSYS (2020)

2.5. TRABALHOS PUBLICADOS

Dada a importância do setor de óleo e gás na sociedade moderna, sendo esses e seus derivados considerados como a principal fonte de energia primária do mundo (BRITISH PETROLEUM, 2020), é imperativo que se estude formas de otimizar os processos de exploração, produção e refino. No contexto da produção, sabe-se que os separadores gravitacionais são os equipamentos responsáveis pela principal separação inicial da mistura, contendo água, óleo, gás e sólidos. Portanto, observa-se que esses equipamentos vêm sendo alvo de diversos estudos científicos para avaliar diferentes variáveis de interesse, a fim de aprimorar seja o projeto do equipamento em si ou sua operação. Neste capítulo são expostos trabalhos públicos que tiveram como alvo a avaliação dos dispositivos internos dos separadores gravitacionais.

Wilkinson *et al.* (2000) utilizaram o software de CFD PHOENICS V1.5 para avaliar a uniformidade do fluxo de água devido à presença de placas perfuradas, também descritas no presente trabalho como distribuidores de fluxo. O modelo de turbulência aplicado foi o $k-\epsilon$ e a geometria do separador foi considerada como bidimensional e comparou-se seus resultados com dados experimentais para um separador contendo apenas água. Nos cenários simulados, diferentes áreas livres nas placas perfuradas foram analisadas, tendo obtido como resultado que menores áreas livres diminuem o desvio padrão do campo de velocidades, estabilizando o fluxo. Por outro lado, o estudo identificou que as placas perfuradas com áreas livres menores tendem a favorecer as quebras das gotas de óleo ou das gotas de água – quando o óleo está em alta proporção -, pela turbulência e outros efeitos gerados pela velocidade mais elevada dos fluidos ao passarem pelos orifícios. Logo, uma conclusão apontada foi que a área livre destas placas pode ser alvo de estudos futuros de otimização.

Frankiewicz e Lee (2002) desenvolveram simulações utilizando fluidodinâmica computacional para avaliar o comportamento dos fluidos em um separador trifásico tridimensional considerando o efeito de dispositivos internos e a movimentação oceânica. Os dispositivos internos estudados foram os distribuidores de fluxo, conhecidos também como placas perfuradas ou *perforated plates*, dispositivos utilizados com função semelhante à das chicanas quebra-ondas, denominadas como *anti-sloshing baffles*. As placas perfuradas, segundo o estudo, estabeleceram um fluxo uniforme dos fluidos, além de, pelo seu papel de dispositivo quebra-ondas, permitiram controlar as flutuações de nível de líquido dentro do equipamento. O *software*

empregado foi o FLUENT 6.0, com modelagem k- ϵ para a turbulência e abordagem multifásica *Volume of Fluid* (VOF).

Sant'Anna (2011) avaliou a influência de um ciclo de movimentação do tipo *pitch* (arfagem) sobre a eficiência de separadores trifásicos horizontais com diferentes proporções de água e óleo. As simulações numéricas foram conduzidas no *software* CFX 12.1 e empregaram a modelagem multifásica *Volume of Fluid* (VOF), assim como o modelo k- ϵ para turbulência. A geometria utilizada incluía seis dispositivos quebra-ondas, que foram considerados como inteiramente sólidos, sem meios porosos ou furos. O estudo concluiu que proporções de água, em massa, superiores à 60% em relação a massa de líquido comprometem a separação, já que nestes cenários houve passagem de água para a seção de retirada e acúmulo de óleo.

Hussein *et al.* (2013) realizaram um estudo para identificar o padrão do fluxo para um separador gravitacional água-óleo considerando diferentes posições de uma chicana sólida, com atuação equivalente ao dispositivo chamado de quebra-ondas. A chicana foi posicionada na parte superior do separador, sem chegar até o fundo do mesmo, de modo a permitir a passagem dos fluidos. As simulações CFD, feitas no *software* FLOW 3D ver. 10, empregaram a modelagem multifásica VOF e modelo RNG k- ϵ para a turbulência. A geometria utilizada foi bidimensional, conforme mostrado na Figura 25, terminando na seção onde estaria o vertedor caso fosse representado o vaso separador completo, isto é, com uma seção para o acúmulo e saída de óleo. Quatro posições para esta chicana foram testadas, sendo concluído pelo estudo que o dispositivo localizado em cerca de 75% a 80% do comprimento longitudinal do separador gerou menores zonas de recirculação, sendo o mais indicado para o projeto de equipamentos desse tipo.

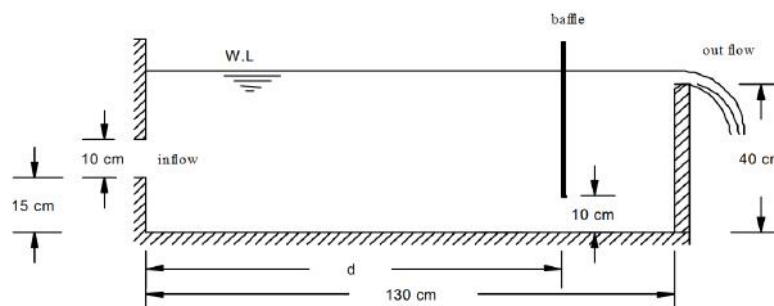


Figura 25 – Separador gravitacional bidimensional modelado no estudo de Hussein *et al.* com geometria sem a seção de acúmulo e saída de óleo. Fonte: HUSSEIN *et al.* (2013).

Kharoua et al. (2013) investigaram a performance de separadores trifásicos considerando diversos dispositivos internos. Em uma primeira abordagem, utilizou-se a modelagem multifásica completamente Euleriana (Euleriana-Euleriana), implementada no *software* ANSYS FLUENT, desprezando efeitos de quebra e coalescência. Em seguida, implementou-se o Modelo de Balanço Populacional (PBM) para levar em consideração a distribuição de tamanho das partículas de óleo e água, bem como a quebra e coalescência das gotículas, fenômeno que não era modelado na abordagem anterior. As simulações foram comparadas com testes em escala laboratorial, em escala piloto e com dados semi-empíricos da literatura. O modelo de turbulência empregado foi o $k-\varepsilon$. Dentre os dispositivos internos considerados, o estudo concluiu que o dispositivo de entrada tem papel fundamental na qualidade da separação e que modelar a coalescência é crucial para uma predição mais assertiva da eficiência de separação.

Costa (2014) empregou o *software* CFX 15.1 para investigar a influência do movimento isolado de *roll* (jogo) sobre a eficiência da separação em vasos separadores horizontais trifásicos. O separador, semelhantemente ao trabalho de Sant'Anna (2011), possuía seis quebra-ondas, cobrindo parcialmente a fase líquida e a gasosa. Foi estudado também tanto quebra-ondas sólidos quanto estes dispositivos representados com meios porosos, com porosidade igual à 0,5. Os resultados foram avaliados para dois ciclos de movimentação marítima. A abordagem multifásica foi a VOF e o modelo de turbulência utilizado foi o $k-\varepsilon$. Foi observado que o movimento de jogo, apesar de alterar a altura da interface, não alterou a eficiência da separação para proporções mássicas de água de até 60%.

Kun (2017) utilizou o *software* ANSYS FLUENT para avaliar diferentes configurações de chicanas quebra-ondas em um separador trifásico horizontal, em termos da eficiência de separação e da suavização do *sloshing*, isto é, da movimentação brusca da interface líquido-gás. O modelo de turbulência empregado foi o $k-\varepsilon$, sendo a modelagem multifásica do tipo VOF. Diferentes tipos de quebra-ondas foram testados, sendo o de meio poroso com 0,4 de fração vazia e diâmetro médio de partícula de 0,02 m o que apresentou melhores resultados no contexto das variáveis analisadas. O estudo concluiu que a configuração recomendada inclui dois quebra-ondas porosos com a configuração anteriormente descrita, sendo assim a suavização da agitação do fluido mais eficiente, assim como a velocidade de mistura dos fluidos foi reduzida, melhorando a separação.

Silva (2018) investigou, através de simulações numéricas no *software* ANSYS CFX 18.0, a influência da quantidade, posição e permeabilidade das chicanas quebra-ondas em um separador trifásico sob influência dos movimentos relativos de *roll* e *pitch* (jogo e arfagem). Os dispositivos quebra-ondas foram representados com base na folha de dados de um separador em operação, e esses eram montados do topo do equipamento até uma altura para cobrir parcialmente o nível de líquido, cobrindo 35% do diâmetro do equipamento. O modelo multifásico foi o *Volume of Fluid* (VOF) e turbulência foi computada por meio do modelo $k-\varepsilon$. O estudo avaliou 8 ciclos de movimentação e comparou a vazão mássica que passa pelo vertedor no instante final simulado para avaliar a eficiência da separação das fases. Foi concluído que o movimento de *pitch* é o mais crítico para a separação e que uma configuração com apenas um quebra-ondas posicionado próximo ao vertedor e modelado com permeabilidade de 10^{-10} m^2 se mostrou mais eficaz para redução da passagem de água pelo vertedor.

Le *et al.* (2019) analisaram separadores trifásicos sob influência simultânea dos três principais movimentos relativos: *roll*, *yaw* e *pitch* (jogo, guinada e arfagem). O *software* ANSYS Fluent 18.1 foi utilizado para as simulações numéricas, que aplicou: abordagem Euleriana-Euleriana para descrever o escoamento multifásico; modelo de turbulência $k-\varepsilon$; malha dinâmica para capturar as alterações na pureza do óleo ao longo do domínio; e considerou as tensões superficiais entre água-ar e óleo-ar. A geometria simulada continha como dispositivos internos uma placa perfurada, uma placa coalescedora e um eliminador de névoas, sendo esses tratados como meios porosos. Os resultados obtidos através do modelo CFD foram validados com dados experimentais para o movimento de *pitching* em um sistema bifásico líquido-gás. Nas condições de contorno de saída, foram comparadas simulações sem controle de pressão e com controle proporcional de pressão (*PP-Control*). Foi observado que, para o caso com a pressão fixa, a vazão mássica da saída de óleo oscilou entre valores negativos e positivos, caracterizando um *backflow*, comportamento irrealista em que a água é sugada para dentro do domínio. Com o controle de pressão, esse problema foi corrigido. Os passos de tempo utilizados variaram de 1 a 5 ms e as frações volumétricas de óleo e água oscilantes foram avaliadas por 67 minutos, sendo o estado estacionário periódico para essas variáveis observado após 20 minutos do início da aplicação dos movimentos relativos.

Carvalho *et al.* (2020) estudaram a eficiência da separação de fases nos vasos separadores trifásicos horizontais e a influência do dispositivo de entrada do tipo placa defletora. O pacote comercial CFD utilizado foi o ANSYS CFX 18.2, o modelo de turbulência empregado foi o k- ϵ a modelagem multifásica foi a Euleriana-Euleriana. A Tensão superficial entre água-gás e óleo-gás foi modelada. Nas condições de contorno, a saída de gás foi configurada como *opening*, com pressão relativa padrão e nas saídas de líquido, uma velocidade constante foi especificada. O estudo concluiu que os modelos utilizados se mostraram capazes de reproduzir satisfatoriamente a física envolvida e também foi determinado que altas velocidades de entrada impactam na eficiência da separação, em termos de fração volumétrica de óleo na saída de óleo.

Cen *et al.* (2020) investigaram, através a fluidodinâmica computacional, a atenuação do *sloshing*, movimento da superfície de um líquido em contato com uma fase gasosa, no contexto de separadores trifásicos sob influência da movimentação de unidades flutuantes de produção de petróleo. O estudo se baseou na modelagem multifásica VOF, utilizou o modelo padrão k- ϵ para turbulência, empregando o pacote comercial FLUENT. Foram avaliados os efeitos de placas perfuradas, modeladas como meios porosos, na atenuação da alteração do nível de líquidos; sendo a configuração de menor porosidade testada (20%) mais eficaz neste sentido; entretanto, placas modeladas com maior porosidade (80%), apesar de apresentarem menor capacidade de suprimir estas flutuações de nível, apresentaram menores problemas de reentrada e mistura de gotas de água e óleo ao passar pelo dispositivo. Adicionalmente, foram analisados diferentes espaçamentos para duas placas perfuradas e foi concluído que, para um menor espaçamento, o efeito de deslocamento da interface dos líquidos foi mais significativamente atenuado. Por fim, foi concluído que para separadores gravitacionais que operam em plataformas flutuantes, o equipamento deve ser posicionado o mais próximo possível do centro de rotação da unidade, de modo a minimizar os efeitos da movimentação marítima na performance de separação.

3. METODOLOGIA

3.1. RECURSOS COMPUTACIONAS E SOFTWARES

Para a realização deste trabalho foram utilizados os *softwares* do pacote ANSYS 20R1, dentre eles: DesignModeler, AnsysMeshing, CFX-Pre e CFD-Post. Para rodar as simulações, as instalações do LabCFD/EQ-UFRJ dispunham de um cluster com as seguintes configurações: 25 nós computacionais com 28 cores Intel Xeon CPU E5-2640 v4 @ 2.40GHz (700 cores no total), com 64GB RAM em cada nó, sendo o sistema o CentOS Linux release 7.7.1908 (Core) - Release 7.7.1908. É importante ressaltar, entretanto, que as simulações aqui realizadas utilizaram o processamento paralelo por até 16 processadores provenientes de um único nó computacional, por conta de outras limitações.

3.2. DESCRIÇÃO GERAL

A avaliação por fluidodinâmica computacional dos separadores trifásicos foi dividida em duas grandes etapas. Na etapa 1, realizou-se uma avaliação de configurações relevantes da simulação numérica, dentre elas a verificação da relevância da modelagem de tensão superficial e análise de impacto das condições de contorno a serem escolhidas. Na etapa 2, partindo-se da configuração selecionada na etapa anterior, realizaram-se alterações na posição do dispositivo interno avaliado, de modo a permitir a comparação dos resultados em termos de eficiência de separação das fases água e óleo, assim como na suavização da altura da interface, impactando o controle do nível do equipamento.

Partiu-se de uma configuração baseada no caso previamente simulado por Silva (2018), sendo a geometria e demais configurações utilizadas como referência inicial para este estudo. Na descrição da metodologia, esse caso é denominado de Caso Base, que corresponde ao separador tridimensional. Ao longo do trabalho, mudanças foram estudadas e implementadas de forma sequencial, sendo a configuração completa de uma simulação analisada dependente dos resultados obtidos nos testes anteriores. Essas simulações com modificações implementadas foram denominadas de Casos de Estudo. O detalhamento dessas etapas é descrito nos itens a seguir.

3.2.1. Etapa 1 – Estudo de Configurações para Resolução Numérica

I. Geometria

Nesta etapa modelou-se a geometria do separador trifásico estudado. A folha dedados de um separador gravitacional real utilizado no campo de Jubarte, na bacia de

Campos, no Brasil, foi utilizado como referência no estudo. Simplificações foram feitas para modelar o equipamento e, ao longo do estudo, elaborou-se uma geometria bidimensional com intuito de representar o plano central do equipamento, uma vez que esse plano é comumente utilizado como referência nas etapas de pós-processamento, conforme trabalhos de Sant'anna (2011), Costa (2014), Silva (2018) e Le *et al.* (2019). O detalhamento da geometria utilizada é feito na subseção 3.3.1.

II. Teste de Malha

Após a definição da geometria e comparação qualitativa dos resultados considerando o separador trifásico tridimensional e bidimensional, procedeu-se o teste de malha. O intuito desse teste é obter uma discretização do domínio suficiente para produzir resultados independentes do grau de refino da malha e no menor tempo computacional possível. Essa etapa é detalhada na subseção 3.3.2.

III. Teste de Passo de Tempo

As simulações realizadas visam estudar o comportamento dos fluidos de acordo com a variação temporal da inclinação do equipamento, promovida pela movimentação oceânica. Logo, realizaram-se simulações transientes e, com o objetivo de obter resultados independentes do passo de tempo escolhido, elaborou-se um teste de passo de tempo. Assim como todas as avaliações na Etapa 1, os resultados anteriores forneceram a malha e geometria adequadas para o prosseguimento das análises. Detalhes sobre este teste são fornecidos na subseção 3.3.3.

IV. Teste de Tensão Superficial

De posse dos resultados anteriores, realizaram-se testes envolvendo a modelagem da tensão superficial, com intuito de avaliar o impacto desse fenômeno na simulação estudada. Conforme discutido na subseção 2.4.4, há diferentes trabalhos na literatura que adotam abordagens nas quais a tensão superficial é negligenciada e, em contraste, há outros que adicionam esse modelo à resolução numérica. Uma vez definida a relevância dessa modelagem para o sistema analisado, pode-se nos testes seguintes ativar tal modelo, caso seja relevante para a física do problema ou, desativá-lo, diminuindo o número de equações a serem resolvidas pelo pacote comercial de CFD, reduzindo o esforço computacional. O aprofundamento dessa avaliação é feito na subseção 3.3.4.

V. Teste de Condições de Contorno

Na sequência, foram avaliadas diferentes condições de contorno para a região de saída de água, com o intuito de melhor representar a física do problema. Esses testes são devidamente descritos na subseção 3.3.5.

VI. Teste de Meio Poroso

De acordo com a revisão da literatura discutida na subseção 2.2.2.5, as chicanas quebra-ondas, ou *anti-sloshing baffles*, podem apresentar sítios vazios nos quais os fluidos podem se deslocar, como no caso de placas perfuradas ou em meios estruturados. Diversos autores representam esses dispositivos internos por meio de meios porosos, como é visto nos trabalhos de Costa (2014), Le *et al.* (2019) Cen *et al.* (2020), por exemplo.

Por serem dispositivos comerciais que têm características específicas a depender do fabricante e modelo -que normalmente são confidenciais -, notou-se carência de dados na literatura que reportasse valores de porosidade, permeabilidade e coeficientes de perda de forma acurada, isto é, com base em experimentos específicos. Além disso, no caso estudado, não havia dados referentes a geometria da placa ou material estruturado que compunha o quebra-ondas em questão. Sendo assim, a modelagem do quebra-ondas poroso traz consigo certo grau de incerteza nos valores desses parâmetros. Para o presente trabalho, buscou-se referências de estudos anteriores para obtenção dos parâmetros que caracterizam os meios porosos. A partir disso, admitiu-se que, para as análises comparativas realizadas na Etapa 2, não haveria prejuízo quando se trata da avaliação do impacto das variáveis de interesse no contexto do estudo de diferentes posições das chicanas quebra-ondas dentro do separador trifásico.

Além dos já citados, estudos adicionais avaliaram diferentes valores de porosidade e permeabilidade para caracterizar o escoamento dentro de chicanas quebra-ondas, sendo disponibilizados nesses trabalhos diferentes valores ideais para suavizar efeitos de mistura das fases água/óleo, melhorando a separação; e/ou para amortecer as flutuações do nível de líquido, reduzindo problemas operacionais relativos ao controle do equipamento. Como base, partiu-se dos valores ideais encontrados por Silva (2018) e

Kun (2017) para modelar o meio poroso no presente trabalho. Essa avaliação é descrita de forma completa na subseção 3.3.6.

3.2.2. Etapa 2 – Avaliação da Influência da Posição do Quebra-ondas

Na Etapa 2, utilizou-se a configuração obtida após o último teste da Etapa 1 para o prosseguimento das análises. Nessa etapa, foi avaliada a influência da posição do quebra-ondas para melhorar a separação e manter estável o nível de líquido. Foram testadas posições desse interno de acordo com o desenho da geometria do separador real utilizado como referência, o qual possui seis quebra-ondas alocados ao longo do eixo longitudinal do equipamento. Logo, essas seis posições foram testadas individualmente, isto é, considerando que o equipamento possui apenas um quebra-ondas. Essa configuração foi adotada uma vez que, segundo os achados de Silva (2018), o separador que possuía apenas um quebra-ondas obteve melhores resultados por reduzir a passagem de água pelo vertedor.

Adicionalmente, testaram-se mais seis posições para as chicanas, sendo nesse caso pressuposto que sua construção seria presa ao fundo do equipamento, com a região de passagem de gás livre – contrária à encontrada na folha de dados do equipamento real. É importante ressaltar que, conforme discutido na subseção 2.2.2.5 e ilustrado na Figura 13, esse tipo de montagem é reportado na literatura e aplicado também em separadores em operação.

Por fim, testou-se um design omitindo a existência do quebra-ondas, a fim de comparar os resultados com as demais configurações previamente simuladas. Detalhes acerca das posições, configurações e simulações são fornecidos na subseção 3.4

3.3. ETAPA 1 – ESTUDO DE CONFIGURAÇÕES PARA RESOLUÇÃO NUMÉRICA

Nesta seção são descritas todas as configurações principais que envolvem a resolução numérica do escoamento do separador gravitacional e que foram objeto de estudo deste trabalho. Para os tópicos iniciais (Teste de Malha e Teste de Passo de Tempo), é feita a distinção do Caso Base, com configuração baseada nas simulações desenvolvidas por Silva (2018), e dos Casos de Estudo (separador bidimensional), representando as simulações com configurações modificadas e que serviram como referência para o estudo da influência dos quebra-ondas na separação e manutenção do nível dentro do equipamento, avaliada na Etapa 2. Ao longo dos demais testes do estudo de configurações para resolução numérica, apenas os Casos de Estudo foram simulados, uma vez que o comportamento observado entre eles em relação ao Caso Base, isto é, do separador tridimensional em relação ao modelo bidimensional, foi qualitativamente similar e, considerando às condições reproduzidas nos Casos de Estudo, esses testes demandariam um tempo computacional impeditivo.

3.3.1. Geometria e Domínio Computacional

3.3.1.1.Caso Base

A modelagem da geometria foi feita com base na folha de dados do separador trifásico em operação previamente citado. O equipamento possui 16,8 m de comprimento e 5,6 m de diâmetro e ainda conta com uma série de dispositivos internos, tais como: ciclone de entrada, eliminador de névoa, quebra-vórtice, distribuidor de fluxo, sistema de jateamento, vertedor e chicanas quebra-ondas. O esquemático dos dispositivos internos e principais dimensões é mostrado na Figura 26.

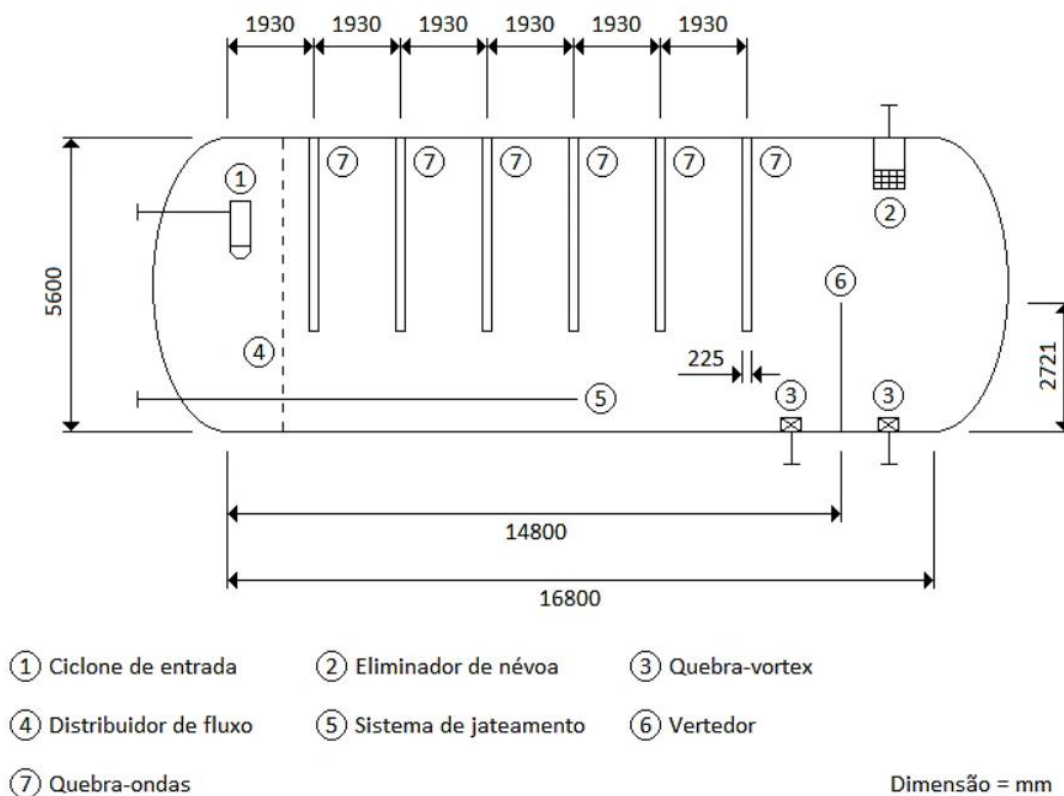


Figura 26 – Esquemático com dimensões e dispositivos internos do separador trifásico utilizado como referência. Fonte: SILVA (2018)

A geometria construída no Caso Base foi tridimensional, sendo similar à aplicada no trabalho de Silva (2018). Apesar dos diversos dispositivos internos, apenas o quebra-ondas foi representado, uma vez que, assim como no estudo do autor citado, o objetivo deste trabalho é também avaliar a influência isolada dos quebra-ondas no escoamento e separação dos fluidos. A configuração recomendada por Silva (2018) consistia em apenas um quebra-ondas poroso próximo ao vertedor (na 6ª posição) e ocupando 65% do diâmetro do vaso, sendo então esse *design* assumido como referência para este estudo.

A visualização do modelo tridimensional elaborado pode ser feita na Figura 27. É importante destacar que apenas metade do equipamento foi modelado uma vez que o mesmo é simétrico em relação ao movimento de arfagem, sendo o domínio computacional restrito a esse volume. Um plano de simetria pode ser feito para a visualização do equipamento completo e demais pós-processamentos.

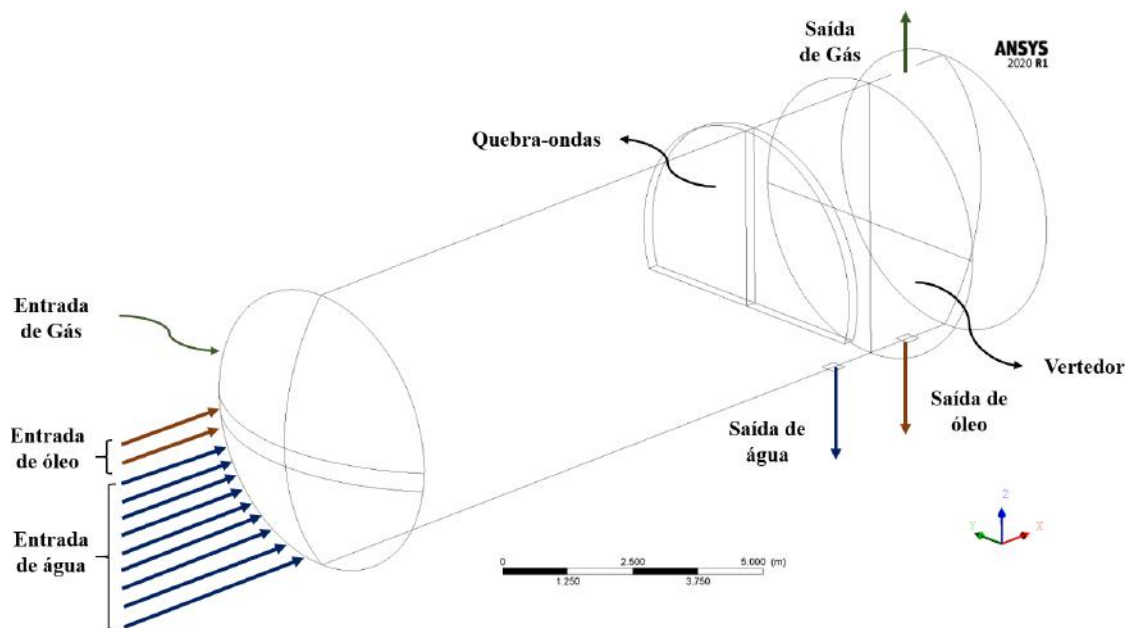


Figura 27 – Representação da geometria e domínio simulado para o separador tridimensional – Quebra-ondas superior na 6ª posição.

3.3.1.2. Casos de Estudo

Nos casos de estudo, optou-se por modelar o plano central do separador trifásico em questão, uma vez que, qualitativamente, para as simulações consideradas, não havia diferença significativa ao se observar resultados de distribuição espacial dos fluidos ao longo do equipamento. Resultados que ratificam essa afirmação são apresentados na subseção 4.1.1.

Além disso, observou-se que a quantidade e proporções de água/óleo que saem pela saída de óleo após o vertedor está, obviamente, relacionada com essas mesmas quantidades que passam pelo vertedor. Dado que outros trabalhos na literatura, como o de Hussein *et al.* (2013), modelaram separadores gravitacionais somente até a região do vertedor, optou-se, no presente trabalho, a avaliar o escoamento somente nesta região, isto é, excluindo a porção do domínio que existira para calcular o comportamento dos fluidos após o vertedor. A principal motivação para esta simplificação foi evitar a especificação da condição de contorno para a saída de óleo, caso a região pós vertedor fosse mantida. Essa condição de contorno é delicada pelo fato de, quando água verte, esta tende a ficar por baixo por conta de sua maior densidade e, mesmo com pouca água vertendo, acaba-se tendo água saindo pela saída de óleo.

Na geometria construída por Silva (2018), utilizada como referência para o Caso Base, não há região especificada para entrada ou saída de gás, sendo apenas existentes

entradas e saídas de óleo e água. No presente trabalho, incluiu-se uma entrada de gás na direção normal à face correspondente. Com a geometria parcial parando no vertedor, a face imediatamente acima do vertedor foi atribuída como a saída de todos os fluidos, ou seja, o gás nas simulações pode sair do domínio. O intuito dessa mudança foi corrigir problemas no cálculo de pressão na região gasosa, os quais apresentavam valores incoerentes em determinadas áreas do domínio, quando não havia entrada e saída de gás. A geometria bidimensional é ilustrada na Figura 28, sendo relevante destacar que o comprimento do separador completo de 16,8 m foi reduzido para 14,8 m com a nova geometria, contando da região de entrada até o limite do vertedor.

No trabalho que originou o Caso Base, levou-se em consideração o fato que o dispositivo de entrada é um separador ciclônico e que diversos outros dispositivos internos que auxiliam a segregação dos fluidos não foram modelados. Então, dado o comprimento do separador, é esperado que em boa parte do domínio, sobretudo na região próxima à saída, as fases estejam bem separadas. Portanto, assumiu-se simplificada que as fases entram de maneira estratificada. Isso resulta então em uma entrada específica para o óleo e outra somente para água, condizentes com a condição de inicialização dos fluidos no domínio. Essa premissa foi adotada também no presente estudo – com inclusão da região de entrada de gás também estratificada -, uma vez que simular o comportamento da mistura água, óleo e gás no conjunto de ciclones de entrada ou a inclusão dos demais dispositivos de entrada, configurariam um trabalho a parte. Entende-se também que como as simulações serão comparativas e com intuito principal de testar diferentes posições dos quebra-ondas, essa simplificação não inviabiliza as conclusões do estudo.

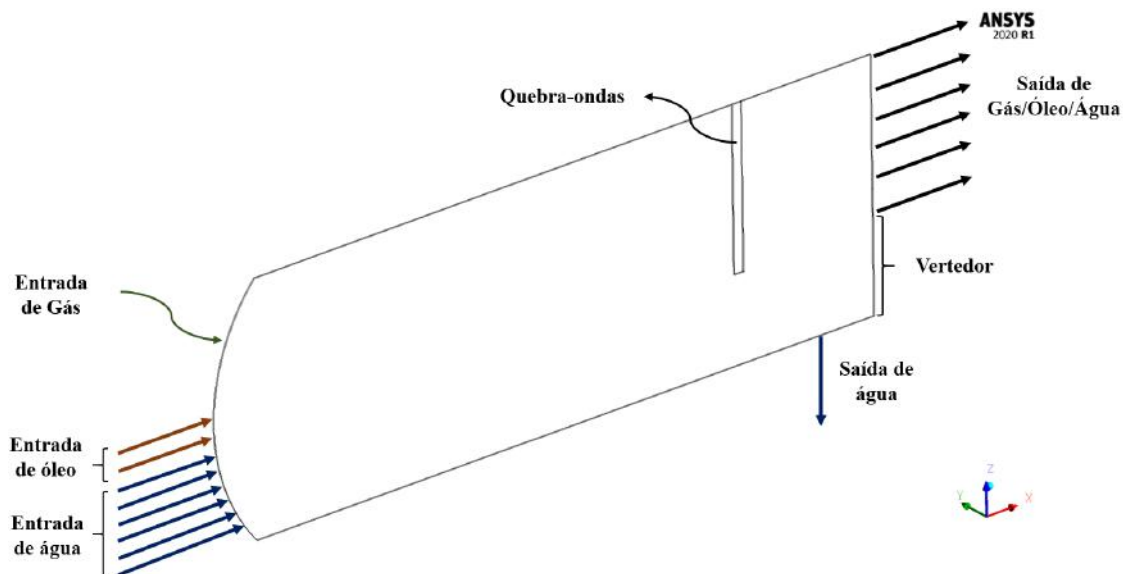


Figura 28 – Representação da geometria e domínio simulado para o separador bidimensional.

3.3.2. Teste de Malha

3.3.2.1. Caso Base

A malha utilizada pelo Caso Base foi a mesma proposta por Silva (2018), que se mostrou independente no contexto das variáveis analisadas pelo autor. Cabe ressaltar que a malha aqui descrita corresponde ao caso tridimensional, que naturalmente exige um número significativamente maior de elementos. Por outro lado, uma malha equivalente aplicada ao cenário 2D não foi suficiente para produzir resultados independentes – isso se deu pela natureza das variáveis de interesse terem sido diferentes, assim como modificações no *setup* implementadas ao longo do atual estudo. Idealmente, seria necessário realizar um novo teste de malha, desta vez com configuração similar ao caso bidimensional estudado e também analisando as mesmas variáveis de interesse.

Contudo, pela estimativa de número de elementos de malha e tempo de computação para o caso 2D (3,5 dias) – considerando as condições descritas na subseção 3.1 -, verificou-se que para simular o caso tridimensional nas mesmas condições (passo de tempo, número de ciclos a serem avaliados, etc.), incluindo a malha, seriam necessários tempos superiores à meses com os recursos disponíveis. Logo, essa análise não foi feita devido à restrição de tempo. Em resumo, assumiu-se que a malha do caso base era suficiente para uma avaliação comparativa qualitativa do perfil dos fluidos dentro do separador tridimensional e bidimensional.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros da malha tridimensional elaborada no Caso Base e a Figura 29 fornece o aspecto geral da mesma, que é estruturada e composta por elementos hexaédricos.

Tabela 2 – Parâmetros da malha tridimensional

Parâmetro	Valor	Valores Aceitáveis (ANSYS, 2020)
Tamanho dos Elementos	80 mm	-
Número de elementos	1.387.645	-
<i>ElementQuality</i>	0,8022	>0,3
<i>Max. AspectRatio</i>	2,41	< 100
<i>Skewness</i>	0,1045	< 0,5
<i>OrthogonalQuality</i>	0,9756	> 0,2

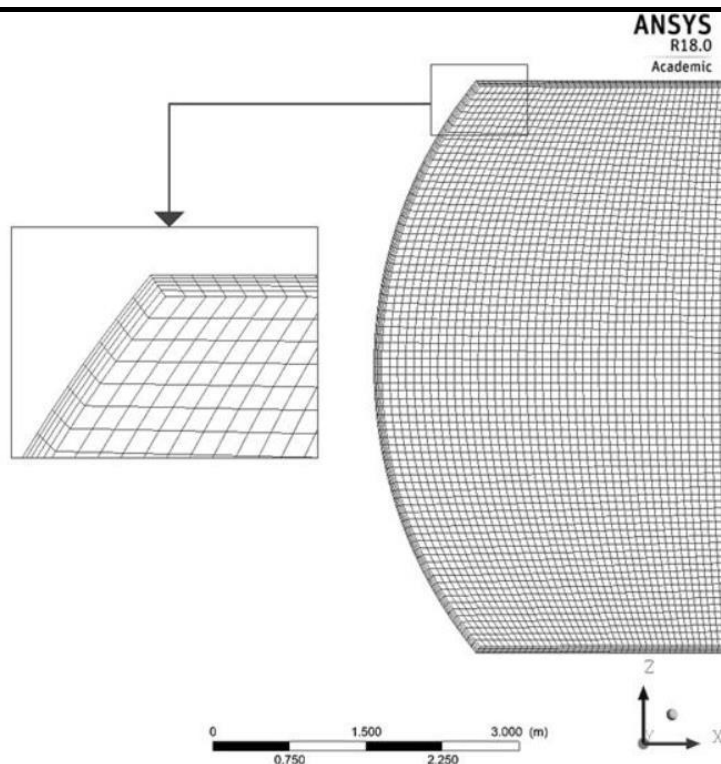


Figura 29 – Aspecto geral da malha do Caso Base – Separador tridimensional. Fonte: SILVA (2018)

3.3.2.2. Casos de Estudo

Para os casos de estudo, que utilizaram a geometria bidimensional, realizou-se o teste de malha com propósito de se obter a malha que se mostrasse independente para as variáveis de interesse avaliadas ao longo das análises. As malhas elaboradas foram híbridas, possuindo elementos quadriláteros e triangulares. Todas foram elaboradas no software ANSYS-Meshing. A região próxima a interface óleo-água e óleo-gás foi

refinada através do objeto *Sizing*, e nas regiões próximas à parede, utilizou-se o método *Inflation*. A razão de crescimento das células, tanto na região próxima da interface quanto no refino atribuído à região próxima a parede, foi mantida baixa. O resumo dos parâmetros de qualidade de malha é apresentado na Tabela 3 e o aspecto geral da Malha 5 é mostrado na Figura 30, sendo o refino na região da interface ilustrado na Figura 31.

Tabela 3 – Parâmetros das malhas testadas para os casos de estudo (separador bidimensional)

Parâmetro	Elementos	Nós	<i>Element Quality</i>	<i>Max. Aspect Ratio</i>	<i>Skewness</i>	<i>Orthogonal Quality</i>
Malha 1	8.327	17.024	0,3360	22,5	8,15E-02	0,9846
Malha 2	13.186	26.964	0,3704	11,25	7,22E-02	0,9874
Malha 3	27.091	52.854	0,6136	11,25	6,92E-02	0,9897
Malha 4	67.588	136.012	0,8774	11,25	6,57E-02	0,9906
Malha 5	135.690	272.586	0,8810	7,15	6,12E-02	0,9916
Malha 6	235.592	475.994	0,7281	16,16	6,98E-02	0,9903
Malha 7	328.532	657.926	0,6684	18,813	7,82E-02	0,9899
Valores Aceitáveis (ANSYS, 2020)	-	-	>0,3	< 100	< 0,5	> 0,2

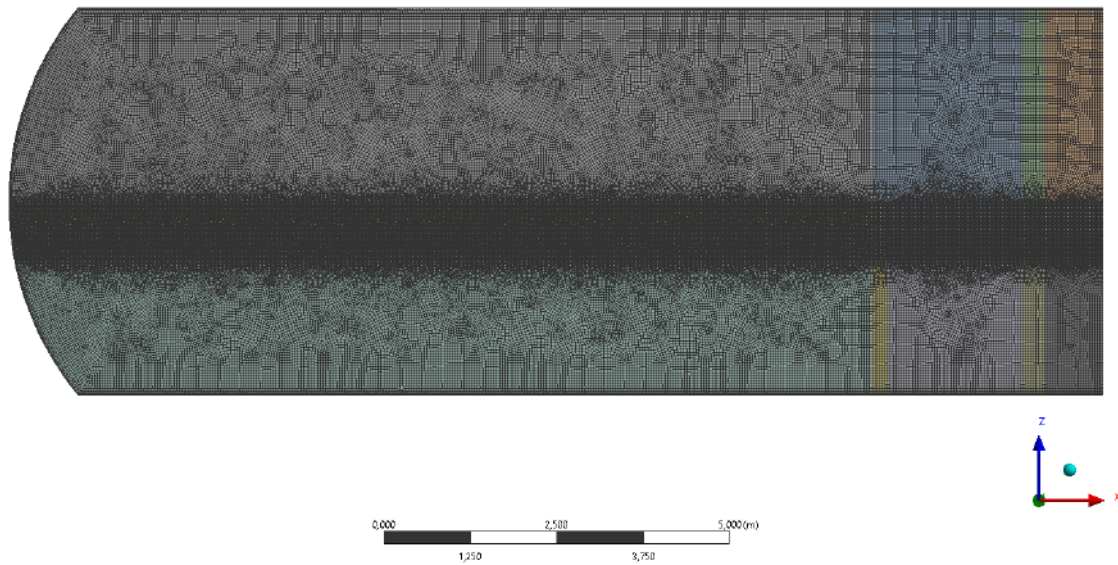


Figura 30 – Aspecto geral de uma das malhas testadas (Malha 5) para os casos de estudo – Separador bidimensional.

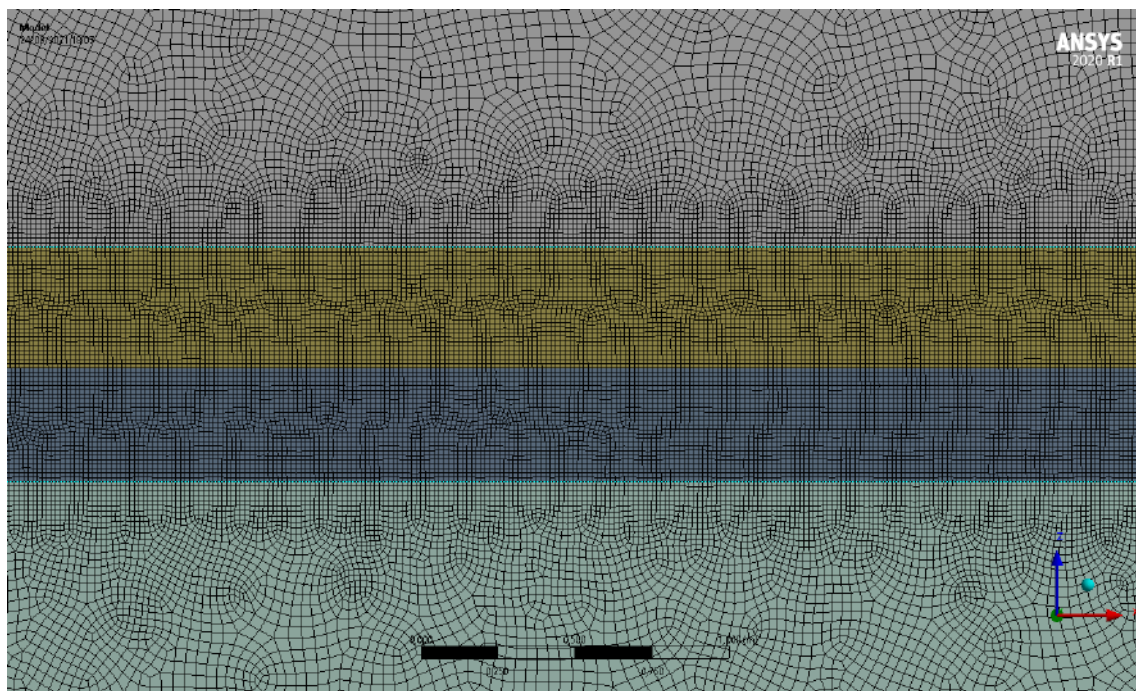


Figura 31 – Refino na posição da interface água-óleo de uma das malhas testadas (Malha 5) para os casos de estudo – Separador bidimensional.

3.3.3. Teste de Passo de Tempo

3.3.3.1. Caso Base

Para o caso base, assumiu-se que o valor de passo de tempo obtido por Silva (2018), de 0,125 s, seria adequado para as simulações do presente estudo.

3.3.3.2. Casos de Estudo

Com os resultados da malha obtida após o teste de malha, testaram-se diferentes passos de tempo a fim de obter o valor que tornaria as variáveis de interesse independentes do mesmo. De acordo com o que foi previamente discutido na subseção 2.4.6, que tratada influência do número de *Courant* nas simulações transientes, sabe-se que os *solvers* implícitos não apresentam critérios de estabilidade que restrinjam o *Co*. Todavia, nota-se que, a depender do escoamento estudado, é possível que seja necessário reduzir tal número de modo que este fique igual ou inferior a uma unidade com propósito de se obter resultados mais fidedignos. Por outro lado, restringir o *Courant* a esses valores pode acarretar longos tempos de simulação, o que, a depender do caso, inviabiliza certos estudos. Logo, o teste de passo de tempo foi considerado necessário e foi realizado com os valores mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Simulações com diferentes passos de tempo realizadas para os Casos de Estudo (separador bidimensional)

Caso	Tipo de Passo de Tempo	Valor do Passo de Tempo (s)	Critério
1	Fixo	0,50	-
2	Fixo	0,10	-
3	Fixo	0,050	-
4	Fixo	0,010	-
5	Adaptativo	-	<i>Co</i> (máx.) = 1

Esses valores foram inicialmente adotados por apresentarem ordem de grandeza condizentes com os implementados em estudos similares, como de Sant'anna (2011) e de Silva (2018). Para os passos de tempo fixos maiores ou iguais a 0,050 s, utilizou-se uma inicialização variável do passo de tempo, de modo que o valor do passo na primeira iteração fosse de 0,001 s e paulatinamente crescesse, chegando ao seu valor máximo e fixo na 25ª iteração, permanecendo inalterado ao longo de todo restante da simulação.

Essa abordagem foi necessária para contornar problemas de convergência nas primeiras iterações que ocorriam ao utilizar esses passos de tempos relativamente grandes.

3.3.4. Teste de Tensão Superficial

3.3.4.1. Casos de Estudo

A modelagem da tensão superficial para problemas envolvendo o método VOF é utilizada por certos autores e negligenciada por outros, conforme discutido na subseção 2.4.4. O intuito do Teste de Tensão Superficial, portanto, é verificar se a modelagem desse fenômeno interfere nos resultados obtidos. Apesar de sua implementação e cálculo não exigir grande esforço computacional à luz do método *Volume of Fluid* (KATOPODES, 2019), é interessante considerar que, caso essas forças de interface possam ser desprezadas sem prejuízo nos resultados, o equacionamento a ser resolvido numericamente fica mais simples. Isso, em princípio, pode reduzir, ainda que limitadamente, o tempo de simulação.

Para o caso em que a tensão superficial foi modelada, utilizou-se o modelo *Continuum Surface Force* (CSF) e, para isto, foi necessário também obter valores de coeficiente de tensão superficial para os pares de fluidos envolvidos. A Tabela 5 apresenta esses valores, sendo importante ressaltar que no presente estudo assumiu-se que os coeficientes relacionados aos pares água-ar e óleo-ar seriam bem representados para o caso real contendo água-gás e óleo-gás.

Tabela 5 – Tensões Superficiais para os pares de fluidos envolvidos (SOLOVIEV *et al*, 2016)

Coeficiente de Tensão Superficial σ (N m ⁻¹)		
Água-ar	Óleo-ar	Óleo-água
0,072	0,028	0,019

3.3.5. Teste de Condições de Contorno

3.3.5.1. Casos de Estudo

Após a definição da importância da modelagem dos efeitos de tensão superficial, procedeu-se o estudo da influência das condições de contorno para o escoamento do separador trifásico bidimensional. Diferentemente do Caso Base (separador tridimensional), os casos aqui analisados não possuem a geometria que abrange a seção de saída de óleo, sendo a condição de contorno de saída associada à face imediatamente

acima do vertedor. Nessa região, entende-se que a condição de *opening* é adequada. Por outro lado, para o bocal de saída de água, diferentes opções são reportadas na literatura. Silva (2018) e Carvalho *et al.* (2020), por exemplo, adotaram uma vazão constante especificada para essa região, enquanto outros autores, como no caso de Le *et al.* (2019), utilizaram condições de contorno de pressão. Nesse último caso, foram testadas uma pressão constante e também uma pressão variável, ajustada por controle proporcional, denominado como *PP-Control*, sendo este o que produziu resultados mais compatíveis com o esperado e foi capaz de manter o nível de líquido no separador sob influência de movimentação marítima (LE *et al.*, 2019).

Considerando o conjunto de possibilidades reportadas para a condição de contorno de saída de água, procedeu-se um teste para avaliar quais apresentariam resultados mais condizentes com o esperado na prática. Entretanto, o desenvolvimento de uma função de usuário para contabilizar o controle de pressão proporcional (*PP-Control*), como feito por LE *et al.* (2019), não foi modelado. Isto porque, conforme reportado pelo autor, a obtenção da constante de proporcionalidade para esse controle exigiu um procedimento de tentativa e erro envolvendo um grande número de simulações CFD adicionais. Por simplicidade, portanto, as condições de contorno testadas foram as mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 – Condições de entrada para os Casos de Estudo (separador bidimensional)

Região	Condição de Contorno	Unidade	Valor	Observação
Saída de Água	Velocidade Especificada	kg s ⁻¹	0,08036	Tal qual a vazão mássica de líquido nesta saída seja igual à vazão mássica de água na entrada
Saída de Água	Outlet-Pressão	kPa	28,11	Equivalente à coluna de líquido na inicialização
Saída de Água	Opening - Pressão	kPa	28,11	Equivalente à coluna de líquido na inicialização

3.3.6. Teste de Meio Poroso

3.3.6.1. Casos de Estudo

Conforme discutido na subseção 3.2.1 na seção relativa ao Teste de Meio Poroso, há uma significativa incerteza na modelagem das chicanas quebra-ondas por meios porosos com relação aos parâmetros de porosidade e permeabilidade, principalmente. De fato, os trabalhos de Silva (2018) e Kun (2017) avaliaram diferentes porosidades e/ou permeabilidades de modo a obter os valores que aprimoram a performance de

separação do equipamento. No presente estudo, considerou-se as melhores configurações encontradas e propostas pelos dois autores e fez-se o Teste de Meio Poroso com intuito de entender qual dessas melhor poderia representar a física envolvida do escoamento ao longo dos *anti-sloshing baffles*. Vale lembrar que as configurações dessas chicanas são variáveis, podendo ser meios porosos tradicionais, placas perfuradas ou compostas por estruturas semelhantes a meios estruturados, conforme a fundamentação teórica descrita na subseção 2.2.2.5. Os parâmetros do meio poroso para os dois casos testados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Modelagem envolvida no Teste de Meio Poroso para quebra-ondas no separador bidimensional (Casos de Estudo)

Configuração recomendada por	Porosidade e	Permeabilidade K_{perm} (m²)
KUN (2017)	0,40	5,0E-07
SILVA (2018)	0,25	1,0E-10

3.4. ETAPA 2 – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO QUEBRA-ONDAS

Após o final dos testes da Etapa 1, determinou-se a configuração para seguir o trabalho. Assim, realizaram-se testes de diferentes posições para as chicanas quebra-ondas a fim de entender a influência dessa localização em termos de eficiência de separação água-óleo e também da manutenção do nível da interface líquido-gás. Para isso, tomou-se como referência a folha de dados do separador que serviu de referência neste trabalho. Esse separador real possuía seis dispositivos quebra-ondas ao longo de seu eixo longitudinal e essas seis posições foram testadas individualmente, isto é, as simulações consideraram apenas um único quebra-ondas existente no equipamento. Essa premissa de um único quebra-ondas foi assumida com base nos resultados obtidos por Silva (2018), nos quais pode-se observar que apenas um dispositivo seria suficiente para diminuir a quantidade de água que passa pelo vertedor – mantendo sua performance de separação.

Além das seis posições baseadas na folha de dados do equipamento real, foram testadas mais seis posições análogas, porém com as chicanas alocadas na parte inferior do equipamento, que também é uma configuração possível para esses dispositivos (vide Figura 13). Por fim, comparou-se esses casos com uma simulação adicional sem a presença de quebra-ondas, com o propósito de comparar e investigar a importância desse dispositivo à luz das variáveis de interesse.

A Tabela 8 traz a listagem de casos simulados e a identificação dos mesmos de acordo com a disposição do quebra-ondas, isto é, se é alocado na parte superior ou inferior, qual sua posição (ordenamento), sua coordenada em X no domínio computacional e seu percentual em relação ao comprimento do equipamento considerando a região de entrada até o vertedor. O esquemático ilustrando as posições consideradas pode ser visto na Figura 32 para as posições superiores e na Figura 33 para as inferiores.

Tabela 8 – Simulações consideradas para avaliação da influência da posição do quebra ondas – Separador bidimensional (Casos de Estudo)

Contagem de Casos	Posição de Montagem	Posição (X)	X1 (m)	X%
1	Superior	6 ^a	3.0675	77.48%
2	Superior	5 ^a	1.1375	64.44%
3	Superior	4 ^a	-0.7925	51.40%
4	Superior	3 ^a	-2.7225	38.36%
5	Superior	2 ^a	-4.6525	25.32%
6	Superior	1 ^a	-6.5825	12.28%
7	Inferior	6 ^a	3.0675	77.48%
8	Inferior	5 ^a	1.1375	64.44%
9	Inferior	4 ^a	-0.7925	51.40%
10	Inferior	3 ^a	-2.7225	38.36%
11	Inferior	2 ^a	-4.6525	25.32%
12	Inferior	1 ^a	-6.5825	12.28%
13	Sem Quebra-ondas	-	-	-

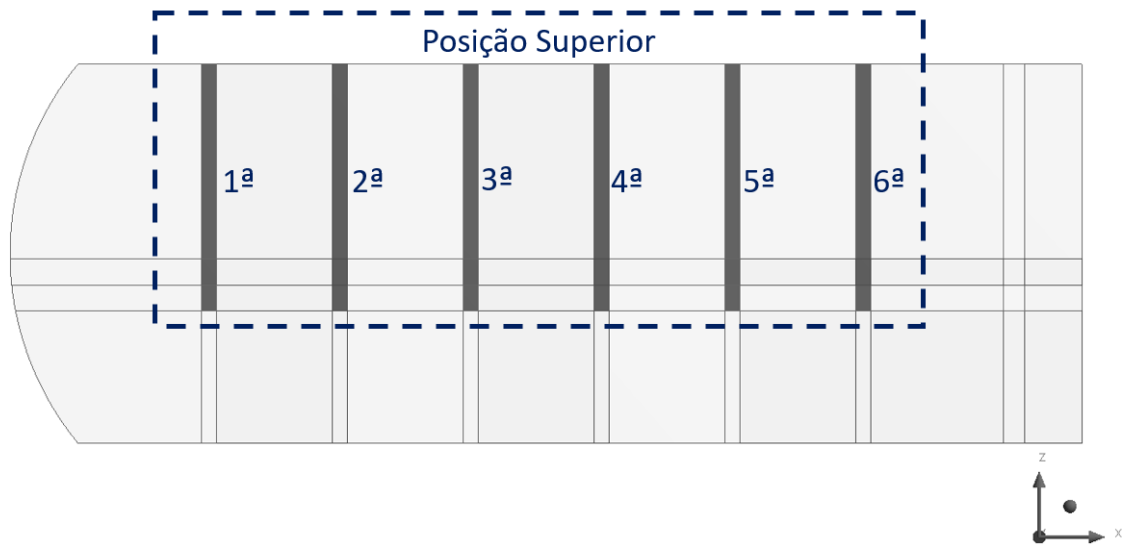


Figura 32 – Posições testadas individualmente para o quebra-ondas posicionado na parte do superior do equipamento

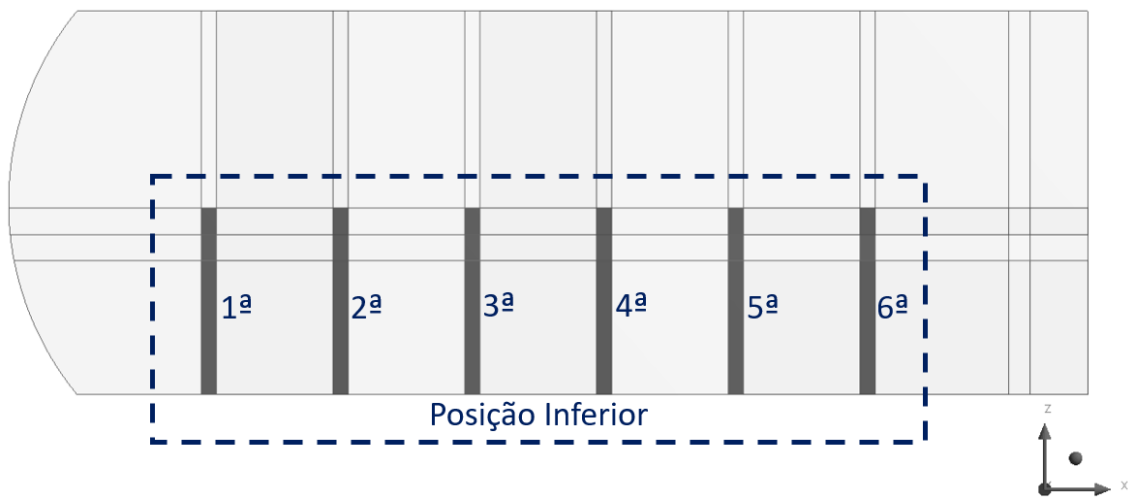


Figura 33 – Posições testadas individualmente para o quebra-ondas posicionado na parte do inferior do equipamento

3.5. CONFIGURAÇÕES GERAIS DAS SIMULAÇÕES

3.5.1. Fluidos Envolvidos

Na configuração das simulações, foi necessário incluir dentro do *software* as propriedades físicas dos fluidos envolvidos. Essas propriedades são função da temperatura e pressão de operação do separador gravitacional, sendo esses dois parâmetros mantidos constantes ao longo da simulação. O separador trifásico estudado opera com pressão de 591,3 kPa e temperatura de 120°C, sendo essas condições reproduzidas para a solução numérica. Dessa forma, as propriedades dos fluidos envolvidos foram as mostradas na Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades dos fluidos envolvidos

Propriedade	Unidade	Fluido		
		Gás	Óleo	Água
Densidade	kg m ⁻³	3,9	903,7	1078,1
Viscosidade Dinâmica	mPa s	0,0128	55,7	0,23

3.5.2. Condições de Contorno e de Inicialização

As vazões de projeto, disponíveis na folha de dados de referência, foram selecionadas para as simulações fluidodinâmicas. Contudo, é importante ressaltar que o diâmetro do bocal de entrada não estava disponível, sendo assim, a velocidade de entrada dos fluidos teve de ser estimada.

Para o caso do separador tridimensional, a vazão mássica total foi atribuída de modo fidedigno às vazões do projeto, porém, alterando-se a proporção de água e óleo. Com isso, dada a área de entrada selecionada como condição de contorno, obtém-se a velocidade do ingresso dos fluidos. Essa velocidade, então, para o caso bidimensional, foi utilizada como condição de contorno, com intuito de representar as mesmas condições de escoamento do plano central do separador tridimensional.

A proporção de água e óleo foi assumida como 80% de água e 20% de óleo, sendo essas frações dadas em base volumétrica e considerando apenas as fases líquidas. Essa condição foi adotada por representar a produção de um campo maduro, isto é, próximo ao final de sua vida útil, no qual as proporções de água tendem a ser significativamente maiores que as de óleo. Estudos similares indicaram que proporções maiores de óleo não impactam a eficiência de separação, como reportado por Sant'anna (2011),

considerando as simplificações inerentes desses trabalhos que, assim como este, ignoraram a formação de emulsão e misturas a nível microscópico. Assim, as vazões mássicas foram calculadas de modo a representar tais proporções críticas, conforme mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Condições de entrada para o caso do separador tridimensional (Caso Base)

Propriedade	Unidade	Fluido		
		Gás	Óleo	Água
Vazão Mássica	kg s ⁻¹	0,6036	13,53	64,58
Vazão Volumétrica	kg m ⁻³	0,1548	0,01498	0,05990
Fração Volumétrica (total)	-	0,6739	0,06522	0,26086
Fração Volumétrica (fase líquida)	-	-	0,2000	0,8000

As condições de contorno de entrada foram definidas então como: vazão mássica especificada para o Caso Base (separador tridimensional) e velocidade especificada para os Casos de Estudo (separador bidimensional). Conforme discutido anteriormente, foram implementadas entradas estratificadas, sendo uma para cada fluido— ver Figura 27 para o caso tridimensional e Figura 28 para o bidimensional.

A condição de inicialização das simulações também partiu da premissa de que apenas 20% da fração volumétrica de líquido dentro do separador seria de óleo. Sabe-se que, apesar da corrente de alimentação eventualmente na prática possuir tais valores, é possível, com instrumentação e controle, manter uma proporção diferente dentro equipamento. Uma vez que a interface óleo-água fica mais elevada (maior proporção de água), há maior tendência de a água passar pelo vertedor, comprometendo a eficiência da separação. Caso os instrumentos de controle detectem tal desvio, é possível, com certas restrições, buscar diminuir a elevação da interface óleo-água, através do aumento da vazão na saída de água. No presente trabalho, negligenciou-se possíveis ações da lógica de controle, devido à complexidade envolvida e, por uma condição sem tal controle ainda ser válida considerando os objetivos comparativos do estudo.

A inicialização foi feita no *software* por meio de funções degrau, definidas pelas *expressions*, que funcionam como funções definidas pelo usuário. Para determinada altura, essas funções assumem valor zero, indicando que a fração volumétrica de óleo,

por exemplo, será nula. A partir de uma outra elevação, na interface óleo-gás, a fração volumétrica de óleo já é definida como 1. Acima dessas duas, a fração volumétrica de gás é igual a unidade. Essas alturas foram calculadas tendo como base o volume necessário para que o separador horizontal mantivesse a proporção de 20% em volume de óleo na fase líquida. Assim, utilizou-se a modelagem para cálculo de volume para um cilindro horizontal parcialmente preenchido por líquido, assumindo que a geometria do separador é um cilindro perfeito. O plano central das densidades para o instante inicial da simulação é apresentado na Figura 34 para o Caso Base (separador tridimensional) e na Figura 35 para os Casos de Estudo (separador bidimensional com geometria até o vertedor)

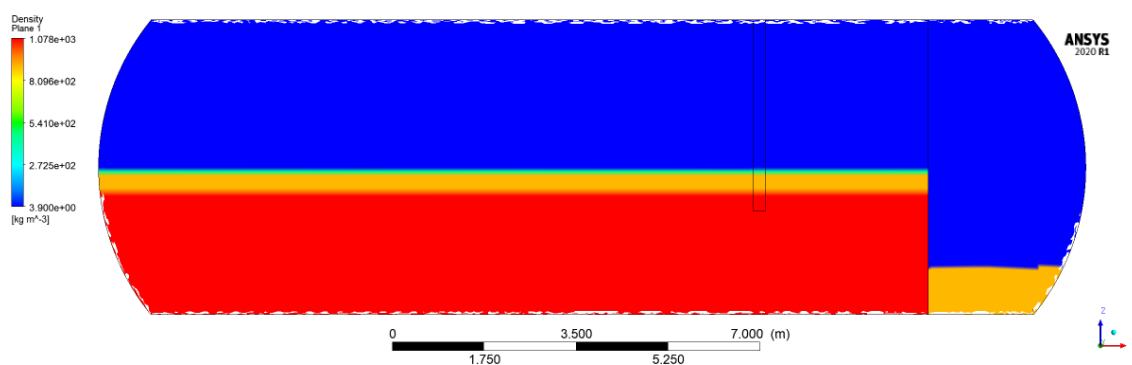


Figura 34 – Valores de densidade sobre o plano central na inicialização da simulação - Separador tridimensional.

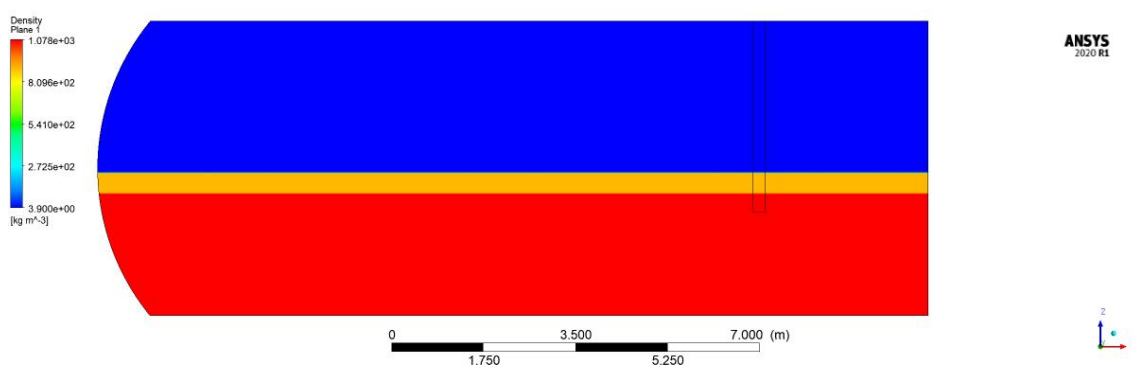


Figura 35 – Valores de densidade sobre o plano central na inicialização da simulação - Separador bidimensional.

Além da configuração dos fluidos para o instante inicial da simulação, realizou-se o cálculo da pressão hidrostática equivalente para esse mesmo instante. Para isso, foram utilizadas funções *if* nas *expressions* no ANSYS CFX 20R1, de modo que, a depender a

coordenada Z do domínio (elevação), haverá ou água ou óleo e a pressão hidrostática é calculada considerando a coluna de líquidos acima desse ponto. Na região inferior do separador, por exemplo, há a contribuição da coluna de água e da coluna de óleo, sendo essas parcelas de pressão hidrostática somadas. Para o caso com geometria completa (separador tridimensional), há ainda a região que possui somente óleo no instante inicial, sendo isso levado em consideração para o cálculo da pressão hidrostática relativa a essa região. A Figura 36 ilustra a pressão hidrostática relativa em relação à altura (coordenada Z) dentro do separador. Vale destacar que, para o caso bidimensional, não há o componente da região após o vertedor. Na Figura 37 o campo de pressão é mostrado para o caso tridimensional sobre o plano central analisado – para o caso bidimensional, os valores são os mesmos. A coordenada X na figura em questão é a altura em relação ao domínio computacional, sendo o limite superior do vertedor posicionado em 0,078m e o limite inferior (fundo do equipamento) em -2,8 m.

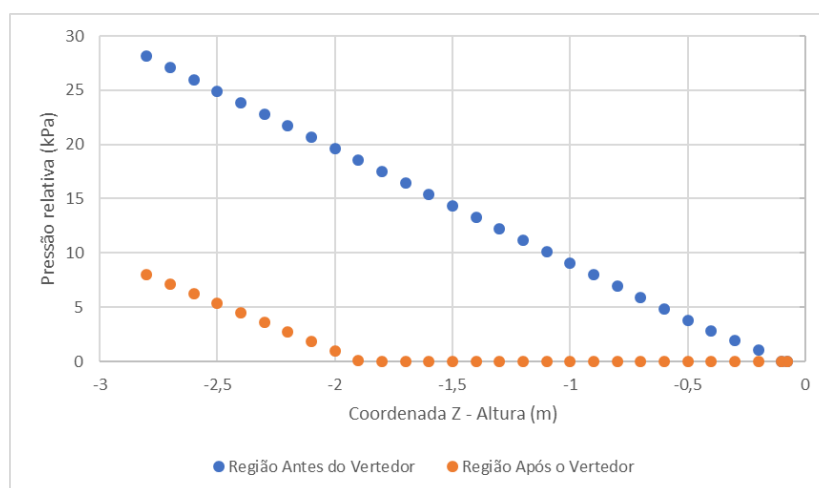


Figura 36 – Pressão Hidrostática referente à coluna de líquido na inicialização das simulações

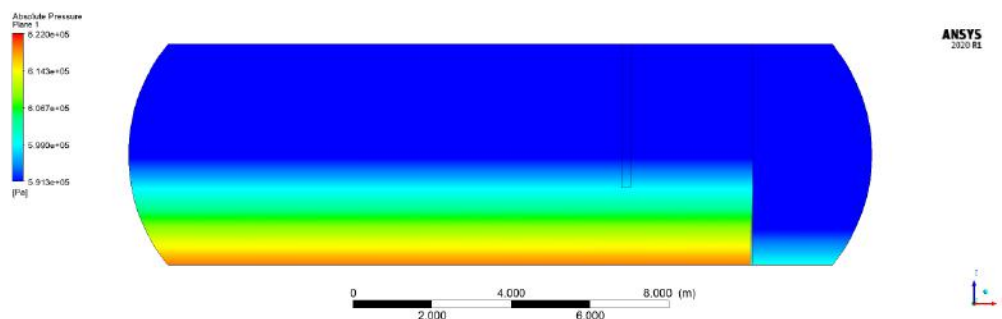


Figura 37 – Campo de Pressão devido à pressão hidrostática na inicialização para o Caso Base – Separador tridimensional.

As condições de contorno de saída foram objeto de estudo do trabalho, sendo consideradas uma análise a parte, conforme citado na descrição da Etapa 1. Dentre as condições testadas, tem-se:

- Para a saída de água:
 1. Vazão mássica fixa especificada que se iguala a vazão mássica de entrada de água no separador;
 2. Condição de *outlet*: sendo o valor da pressão especificado como o valor da pressão hidrostática do instante inicial, de modo a manter o nível de líquido;
 3. Condição de *opening*: sendo o valor da pressão especificado como o valor da pressão hidrostática do instante inicial, de modo a manter o nível de líquido;

No Caso Base, que contempla a região após o vertedor, as condições de contorno foram as mesmas utilizadas por Silva (2018), sendo a região de saída de óleo definida como uma vazão mássica especificada tal qual esta fosse igual à vazão mássica de líquido que passava pela região do vertedor. Na saída de água, a opção de vazão mássica especificada também foi adotada. Para a região de saída de gás, considerou-se a condição de *opening* com pressão estática igual 0 kPa (relativa).

Nos Casos de Estudo, que possuem a geometria limitada até o vertedor, não há uma região específica para a saída de óleo nem para a saída de gás. Nesses casos, a região de interesse é a face acima do vertedor– por onde saem os fluidos –, sendo a condição de contorno de saída considerada como *opening*, com pressão estática igual a 0 kPa (relativa). É importante ressaltar que para todas as condições de entrada foram assumidas intensidades turbulentas de 5%.

Conforme discutido na seção de Resultados, ao fim da Etapa 1, seguiu-se apenas com uma opção de condições de contorno para os Casos de Estudo, sendo estas mostradas na Tabela 11.

Tabela 11 – Condições de entrada para os Casos de Estudo (separador bidimensional)

Região	Condição de Contorno	Unidade	Valor	Observação
Entrada de Gás	Velocidade Especificada	kg s ⁻¹	0,09309	Equivalente à de entrada no caso base e folha de dados
Entrada de Óleo	Velocidade Especificada	kg s ⁻¹	0,01265	Equivalente à de entrada no caso base e folha de dados
Entrada de Água	Velocidade Especificada	kg s ⁻¹	0,01085	Equivalente à de entrada no caso base e folha de dados
Saída de Água	Velocidade Especificada	kg s ⁻¹	0,08036	Tal qual a vazão mássica de líquido nesta saída seja igual à vazão mássica de água na entrada
Saída acima do Vertedor	<i>Opening</i>	kPa	0	Pressão relativa

3.5.3. Modelagem da Movimentação Relativa

A modelagem precisa da movimentação relativa de um FPSO envolve uma série de complexidades que vão além do escopo do presente trabalho, conforme discutido na subseção 2.3. Por este motivo, adotou-se uma abordagem simplificada para viabilizar o estudo da influência das chicanas quebra-ondas no separador trifásico sob movimentação relativa marítima.

A movimentação relativa estudada não depende apenas da movimentação da embarcação, mas também é função da posição e orientação do vaso separador instalado na unidade. Sabe-se que, quanto mais próximos das extremidades do FPSO, ou seja, próximos à popa ou proa, maior será a variação angular do nível de líquido. Por isso, é recomendado que esses equipamentos sejam alocados a meia-nau, próximos ao centro de gravidade da unidade e estejam orientados de forma longitudinal em relação ao navio (WOLLNER, 2016). Essas observações foram consideradas como válidas para a modelagem da movimentação relativa utilizada no presente estudo.

Os três movimentos característicos principais, isto é, jogo, arfagem e guinada, podem estar presentes simultaneamente em diferentes magnitudes ao longo da operação. Entretanto, segundo Silva (2018), o mais crítico em termos de eficiência de separação das fases é o movimento de arfagem (*pitch*), paralelo a direção do escoamento. Portanto, neste trabalho, apenas esse tipo de movimentação relativa foi analisada.

Os ângulos de *trim* e de banda, referentes à inclinação estática nos sentidos longitudinal e transversal, respectivamente, foram avaliados para configurar as simulações. Adotaram-se valores iguais aos utilizados por Silva (2018), com um ângulo de *trim* de -0.5° , caracterizando uma angulação no sentido de imersão da proa. Essa direção foi adotada por favorecer a passagem de água sobre o vertedor, em direção à seção de coleta de óleo, sendo interpretada como uma condição mais crítica para o estudo de comprometimento da separação das fases líquidas. Com relação à ângulos de banda, foi assumido uma angulação de 0° , ou seja, o separador não possui inclinação no eixo transversal.

Para inserir a influência do ângulo de *trim* nas simulações, realizou-se a decomposição da aceleração gravitacional em relação ao domínio computacional. Essa abordagem tem como objetivo facilitar a modelagem matemática envolvida na configuração do movimento de arfagem que, desse modo, pode ser avaliado separadamente. Assim, obteve-se o valor de $0,0856 \text{ m/s}^2$ em relação ao eixo horizontal e $-9,8063 \text{ m/s}^2$ em relação ao eixo vertical para a aceleração gravitacional, assim como realizado por Silva (2018).

A movimentação relativa de arfagem foi modelada através de uma expressão que considera movimentos harmônicos simples. A equação (16) foi inserida no software para modelar tais movimentos, sendo V_θ a velocidade angular, A a amplitude e T o período.

$$V_\theta = A \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (16)$$

Nessa expressão, a amplitude representa o ângulo máximo que o separador pode atingir, desconsiderando o ângulo de *trim* de $-0,5^\circ$. Segundo Menezes (2011) e Sant'anna (2011), os ângulos de arfagem não podem ultrapassar $2,5^\circ$ e os períodos ficam em torno de 14 s a 20 s. No presente trabalho, utilizou-se um período de 14 s e o ângulo de amplitude foi de $2,5^\circ$. A combinação dos ângulos de amplitude com o *trim*, gera como resultante, para um ciclo com o período mencionado, uma inclinação de $-0,5^\circ$ no instante inicial, chegando a 2° , com fluido se inclinando na direção da região de entrada, posteriormente indo até -3° , com fluido indo na direção do vertedor, e por fim, voltando à angulação inicial de $-0,5^\circ$. Os valores adotados são compatíveis com os trabalhos anteriores de Sant'anna (2011), Costa (2014) e Silva (2018). No software

ANSYS CFX 20R1, essa modelagem foi feita adotando um domínio móvel, sendo a velocidade angular definida por meio de *expressions*.

3.5.1. Aspectos Gerais

Conforme discutido na subseção 2.4.3, diversas abordagens e modelos multifásicos são possíveis de serem implementados em pacotes de fluidodinâmica computacional. Para o estudo da movimentação da interface entre água, óleo e gás, o modelo VOF é aplicável e foi o escolhido para a configuração das simulações fluidodinâmicas. Fenômenos a nível microscópico, isto é, quebra e coalescência de gotículas, são negligenciados e o escoamento é assumido como estratificado. Essa escolha está em linha com as recomendações do software ANSYS CFX 20R1, além de ser também amplamente citada na literatura para esse tipo de análise, sendo utilizada por Frankiewicz e Lee (2002), Hussein *et al.* (2013), Kun (2017), Silva (2018) e Cen *et al.* (2020), por exemplo. Particularmente, no ANSYS CFX, o pacote comercial empregado neste trabalho, o modelo VOF é adotado através da seleção do modelo *Free Surface Model* (modelo de superfície-livre) e considerando um equacionamento multifásico homogêneo, ou seja, apenas um conjunto de equações de pressão e velocidade é resolvido.

Para o modelo de turbulência, o mesmo padrão se observa, sendo o método $k-\varepsilon$ amplamente utilizado para problemas similares ao do presente estudo. Além do histórico de trabalhos anteriores adotar em tal modelo, esse também tem sua aplicação, tanto por sua definição teórica quanto pelas recomendações do desenvolvedor do *software* aqui utilizado, adequada para o estudo da movimentação e rastreamento das interfaces de água, óleo e gás. Portanto, o modelo $k-\varepsilon$ foi utilizado em todas as simulações do presente estudo.

Tabela 12 – Aspectos gerais das simulações

Parâmetro	Caso Base	Casos de Estudo (após Etapa 1)
Geometria	Tridimensional Completa	Bidimensional Parcial
Malha	Estruturada hexaédrica	Híbrida (elementos <i>quad</i> e <i>tri</i>)
Passo de Tempo (s)	0,125	Adaptativo – Courant (máx.) = 1
Amplitude da Movimentação (°)	2,5	2,5
Período da Movimentação (s)	14	14
Número de Ciclos de Movimentação Avaliados	25	25
Tempo Total de Simulação (s)	350	350
Modelo de Tensão Superficial	Desativado	Desativado
Porosidade do Quebra-ondas	0,25	0,40
Permeabilidade do Quebra-ondas (m ²)	1,0E-10	5,0E-07
Pressão de Referência (kPa)	591,3	591,3
Temperatura (°C) – Meio Isotérmico	120	120
Regime de Escoamento	Transiente	Transiente
Morfologia dos Fluidos	Contínuos	Contínuos
Abordagem Multifásica	Euleriana	Euleriana
Modelagem Multifásica	<i>Free Surface Model</i>	<i>Free Surface Model</i>
Equacionamento Multifásico	Homogêneo (VOF)	Homogêneo (VOF)
Acoplamento de Frações Volumétricas (<i>advanced multiphase control</i>)	Desativado (Segregado)	Desativado (Segregado)
Esquema de Advecção	<i>High Resolution</i>	<i>High Resolution</i>
Esquema de Resolução Transiente	<i>SecondOrderBackward Euler</i>	<i>SecondOrderBackward Euler</i>
Modelo de Turbulência	k-ε	k-ε
Resolução de Turbulência	<i>High Resolution</i>	<i>High Resolution</i>
<i>Max. Coeff. Loops</i>	3	3
Critério de Convergência (RMS)	1,0E-4	1,0E-4

3.6. VARIÁVEIS DE INTERESSE E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

O objetivo deste trabalho, além de obter as configurações numéricas descritas na Etapa 1, é avaliar dois aspectos relacionados à influência do uso de chicanas quebravondas, ou *anti-sloshing baffles*, no contexto de separadores gravitacionais trifásicos. São estes: a eficiência de separação e a capacidade de suavização das flutuações na posição da interface líquido-gás.

A eficiência de separação é o quanto o equipamento é capaz de concentrar ou purificar as fases da mistura de entrada para que, na saída correspondente à saída de óleo, ou na região acima do vertedor, a passagem de água seja minimizada, por exemplo. Já a suavização das flutuações da posição da interface líquido-gás é de extrema importância para o controle e operação do equipamento, uma vez que a movimentação marítima pode gerar grandes variações no nível medido dentro do equipamento, podendo isso inclusive, em situações drásticas, gerar alarmes de nível alto ou baixo, acarretando em paradas ou perdas de produtividade da operação.

Para analisar a performance da separação da mistura água-óleo, pode-se avaliar as vazões mássicas desses fluidos na região acima do vertedor (saída do separador bidimensional modelado). Contudo, esses valores flutuam de forma significativa no modelo oscilatório implementado, sendo então outra abordagem adotada para mensurar a eficiência da separação dos fluidos. Essa nova variável, aqui denominada como eficiência por ciclo (η), é obtida através do cálculo da fração mássica de óleo produzido para um determinado ciclo de movimentação, sendo equivalente a razão entre a massa de óleo e a massa de água que passa pela saída do equipamento (região acima do vertedor). Essas massas de óleo e água produzidas por ciclo são obtidas através da integração da vazão mássica de cada fluido no tempo de cada ciclo, sendo suas definições mostradas nas equações (17) e (18).

$$M_a^n = \int_{n_i}^{n_{i+1}} \dot{m}_a dt \quad (17)$$

$$M_o^n = \int_{(n-1)T}^{nT} \dot{m}_o dt \quad (18)$$

Onde o subscrito a e o são relativos à água e óleo respectivamente. n é o número do ciclode movimentação (1, 2, 3, ..., 25); T é o período, mantido neste estudo fixo

como 14 s; \dot{m} é a vazão mássica, dado de saída das simulações. Então, M^n é a massa total de fluido produzido no intervalo de tempo do ciclo n e o imediatamente anterior.

Dada as condições impostas (80% em volume de água) no separador, entende-se como variável crítica do equipamento a fração mássica de óleo que é de fato produzido. Sendo assim, admite-se que essa fração representa a eficiência da separação no presente trabalho, fornecendo a resposta de quanto puro é o óleo produzido. Dessa forma, a eficiência é definida como:

$$\eta^n = \frac{M_o^n}{M_o^n + M_a^n} \quad (19)$$

Sendo η^n a eficiência avaliada do ciclo n até o imediatamente anterior. Portanto, do instante 0 s até 14 s, quando se encerra o primeiro ciclo de movimentação, por exemplo, os sobrescritos n assume valor de 1, denotando todo o intervalo entre o instante inicial até o fim completo do primeiro ciclo.

Além da avaliação da eficiência por ciclo, analisou-se a eficiência global, considerando os 25 ciclos de movimentação simulados. Para isso, basta somar as parcelas das massas de óleo (M_o^n) e água (M_a^n) produzidas do primeiro até o vigésimo quinto ciclo, fazendo novamente a razão entre a massa total de óleo produzida pela massa total de líquido produzido, similarmente à equação (19). Essa variável de eficiência global foi denotada então como η^{global} .

Para o monitoramento da flutuação da elevação da interface líquido-gás, além da visualização por meios de gráficos que correlacionam essa altura com o tempo de simulação, adotou-se uma nova variável de interesse. Sabe-se que a interface líquido-gás, sujeita à movimentação marítima oscilatória de período e amplitude constantes, deverá variar ao redor de um valor central. Quanto maior for essa flutuação, menos eficiente é o quebra-ondas para a manutenção de um nível estabilizado dentro do equipamento. Com isso, para mensurar numericamente essa variação ao redor do ponto central, criou-se a variável de interesse mostrada na equação (20):

$$h_{sd} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (h_j - \bar{h})^2}{N - 1}} \quad (20)$$

em que h_{sd} é o desvio padrão (*standard deviation*) da altura da interface líquido-gás (flutuação da posição da interface) considerando as elevações obtidas em todos os passos de tempo simulados. N é o número de passos de tempo simulados; h_j indica o valor da altura no passo de tempo j ; \bar{h} é a altura média da interface, considerando todos os valores calculados.

Quanto aos critérios para avaliação, o problema da influência da movimentação marítima no escoamento dentro dos separadores gravitacionais trifásicos pode ser entendido de duas formas:

- Avaliação do último ciclo simulado: neste caso, assume-se que o último ciclo simulado é representativo para a compreensão das variáveis no novo estado estacionário, que na verdade, seria um estado transiente periódico, com amplitude e período constantes. Entretanto, esse estado cíclico uniforme não foi atingido para todas as simulações performadas e, por esse motivo, adotou-se o critério abaixo para complementar a análise;
- Avaliação de todos os 25 ciclos simulados: esse cenário parte do princípio de que o separador operava, no instante inicial, sem a influência das oscilações. Portanto, o movimento oscilatório é inserido como uma perturbação no sistema, retirando-o do estado estacionário, no qual a eficiência de separação não era comprometida. Desse modo, o interesse está em entender como o separador responde a tal perturbação até o fim do 25º ciclo.

É importante ressaltar que a dificuldade em se atingir o estado periódico uniforme se deu pelo relativo pequeno tempo de simulação, uma vez que trabalhos similares, como o de Le *et al.* (2019), reportaram que foi preciso aproximadamente 20 minutos de tempo de simulação para atingir tal estado – muito maior do que os 350 s (25 ciclos) aqui simulados. Reproduzir tempos similares ao do autor citado implicaria ter simulações com tempos superiores a 10 dias, nas condições consideradas, o que não foi possível de ser realizado.

É válido também destacar que o termo “estado estacionário” foi utilizado para representar um estado no qual o valor das variáveis se estabiliza considerando os ciclos de movimentação seguintes. Esse termo também foi utilizado por Le *et al.* (2019) para

indicar o momento no qual as amplitudes das vazões de saída de água e óleo permaneciam constantes ao longo dos diferentes ciclos.

4. RESULTADOS

Os resultados, assim como descrito na metodologia, são divididos entre a Etapa 1, a qual focou na determinação da configuração das simulações numéricas, e a Etapa 2, que avaliou diferentes posições dos dispositivos quebra-ondas. Ambos os resultados são descritos nas próximas seções, sendo relevante destacar que a ordem sequencial apresentada das simulações tem papel importante, isto é, os resultados de simulações anteriores e a discussão desses gerou um entendimento de qual configuração ou opção deveria ser implementada para os casos seguintes.

4.1. ETAPA 1 - CONFIGURAÇÕES PARA A RESOLUÇÃO NUMÉRICA

4.1.1. Geometria e Domínio Computacional

A modelagem do separador gravitacional trifásico se iniciou avaliando se seria possível estudar o escoamento supondo uma geometria bidimensional, que implica negligenciar o formato cilíndrico do equipamento. No Caso Base, utilizou-se a geometria tridimensional, com configurações numéricas baseadas no trabalho de Silva (2018). Simulações com as mesmas configurações, porém com geometria e domínio bidimensionais foram feitas, sendo observado que, qualitativamente, não houve diferença significativa para o perfil de distribuição dos fluidos ao longo do equipamento para ambos os casos.

Nesse comparativo, os Casos de Estudo foram modelados inicialmente como bidimensionais e com a geometria completa, isto é, englobando o compartimento de saída de óleo. Os resultados para o final do primeiro ciclo (14 s) e o final do décimo ciclo de movimentação (140 s) são mostrados na Figura 38. Contudo, para o prosseguimento das análises, considerou-se que, como as vazões e proporções de água/óleo que saem pela saída de óleo após o vertedor necessariamente estão relacionadas às quantidades desses fluidos que passam pelo vertedor, optou-se por modelar apenas até a região deste último. Esse tipo de abordagem é reportado na literatura, podendo-se citar o trabalho conduzido por Hussein *et al.* (2013), no qual os autores modelaram separadores gravitacionais somente até a região do vertedor. Portanto, para os Casos de Estudo, optou-se, no presente trabalho, de avaliar o escoamento somente nessa região, isto é, excluindo a porção do domínio que existia para calcular o comportamento dos fluidos após o vertedor. Além de reduzir o esforço computacional pelo menor número de elementos, essa simplificação contornou problemas na definição da condição de contorno que seria relativa ao bocal de saída de

óleo na geometria completa, conforme discutido anteriormente. A geometria utilizada para as etapas seguintes pode ser vista na Figura 34 anteriormente mostrada na subseção 3.5.2.

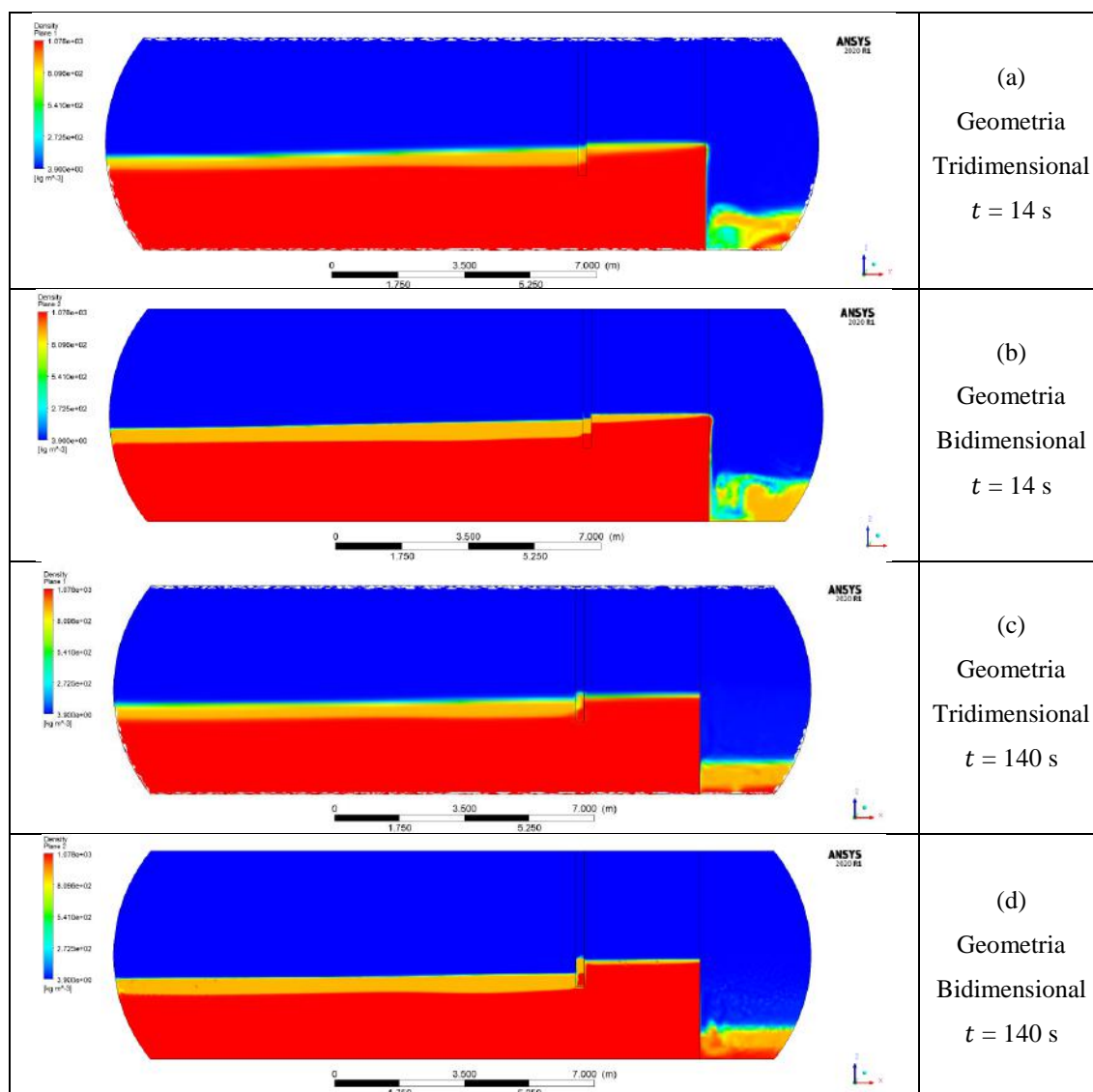


Figura 38 – Perfil de densidade e distribuição dos fluidos no plano central do equipamento. (a) Geometria Tridimensional $t = 14$ s; (b) Geometria Bidimensional $t = 14$ s; (c) Geometria Tridimensional $t = 140$ s; (d) Geometria Bidimensional $t = 140$ s

4.1.2. Teste de Malha

Com o propósito de obter a malha que apresente resultados independentes de seu grau de refino, realizou-se o Teste de Malha para os Casos de Estudo (geometria bidimensional). Para o Caso Base, conforme discutido anteriormente, assumiu-se que a malha elaborada por Silva (2018), que se mostrou independente para as variáveis analisadas por esse autor, seria válida para comparar qualitativamente os resultados do

perfil de distribuição dos fluidos no domínio, conforme realizado na etapa anterior. Desse modo, as discussões e testes a seguir estarão restritas aos Casos de Estudo.

A principal variável de interesse para avaliação da independência das malhas foi a eficiência de separação por ciclo (η). Contudo, foram consideradas também outras variáveis que contribuem diretamente para essa eficiência, como a vazão mássica de água e de óleo que passam pelo vertedor.

A variável que mensura o desvio padrão da flutuação da interface líquido-gás, h_{sd} , não foi avaliada comparativamente para os Teste de Malha, Teste de Passo de Tempo, Teste de Tensão Superficial e Teste de Condições de Contorno. Isso se deu por conta dessa variável não se mostrar sensível aos testes considerados, sendo relevante reportar seus resultados apenas para o Teste de Meio Poroso e para a avaliações da influência da posição do quebra-ondas realizadas na Etapa 2.

A Figura 39 mostra as vazões mássicas de água para a região acima do vertedor (saída do domínio computacional). Nota-se que para os ciclos iniciais, a diferença do valor dessa variável para as distintas malhas testadas é pequena. No entanto, a partir do 10º ciclo (140 s), aproximadamente, há um maior descolamento das curvas para as malhas menos refinadas, isto é, da Malha 1 até a Malha 4. As outras três mais refinadas são praticamente indistinguíveis visualmente ao analisar as curvas.

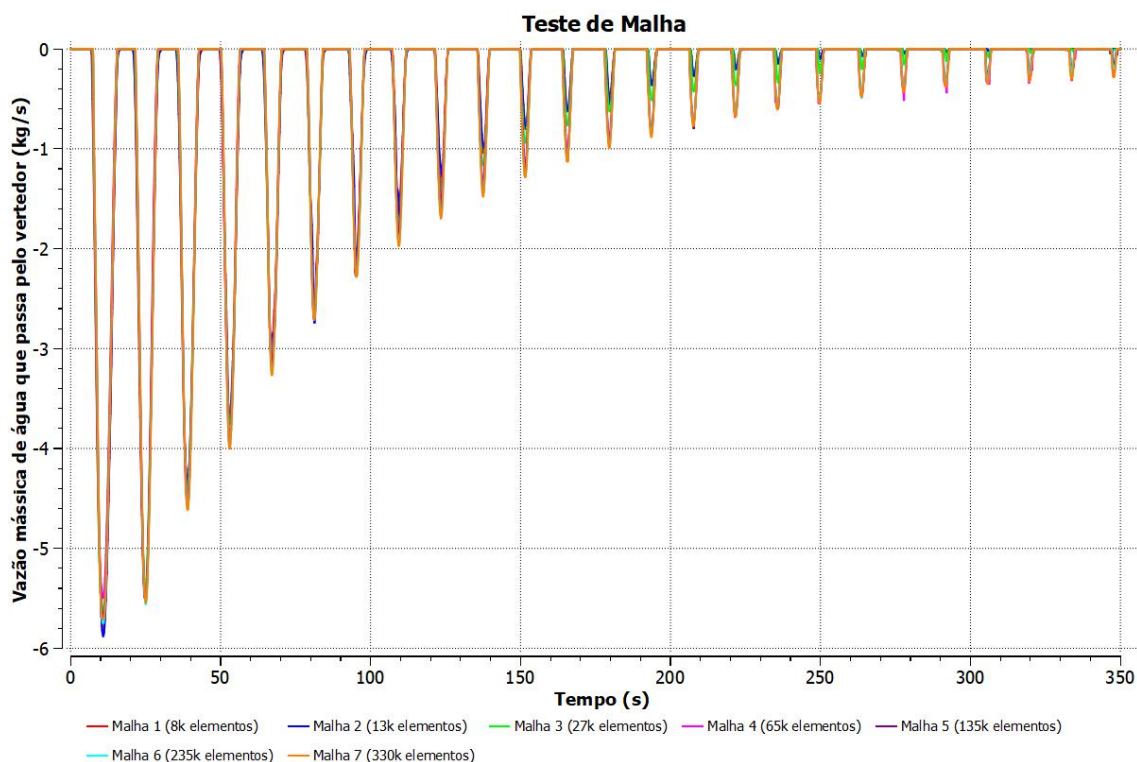


Figura 39 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor – Teste de Malha

A Figura 40 apresenta as vazões mássicas de óleo para a mesma região acima do vertedor. Nesse caso, constata-se que o grau de discretização das malhas é mais relevante para os resultados dessa variável, uma vez que há uma grande discrepância para as vazões analisadas considerando as diferentes malhas testadas. Novamente, percebe-se que a partir da Malha 5, há maior concordância entre os resultados obtidos.

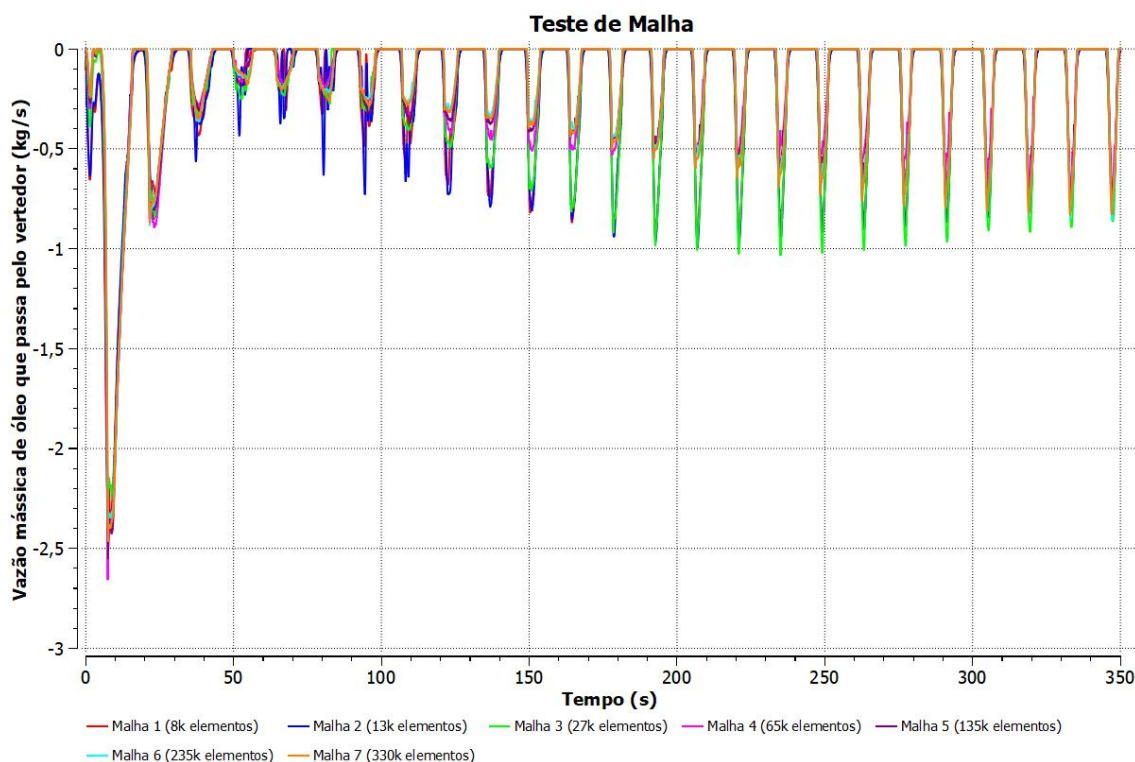


Figura 40 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor – Teste de Malha

A distinção dos resultados entre as três melhores malhas é de difícil visualização na Figura 40 e, portanto, a Figura 41 traz a comparação dos mesmos dados excetuando-se as malhas já claramente não-independentes. Identifica-se, então, uma excelente concordância entre as duas malhas mais refinadas (Malha 6 e Malha 7), apesar da Malha 5 também apresentar boa concordância entre os valores obtidos para praticamente todos os ciclos de movimentação, com exceção do oitavo ciclo. Esses resultados indicam que, a depender do esforço computacional, a Malha 5 pode vir a ser uma opção suficiente para este estudo.

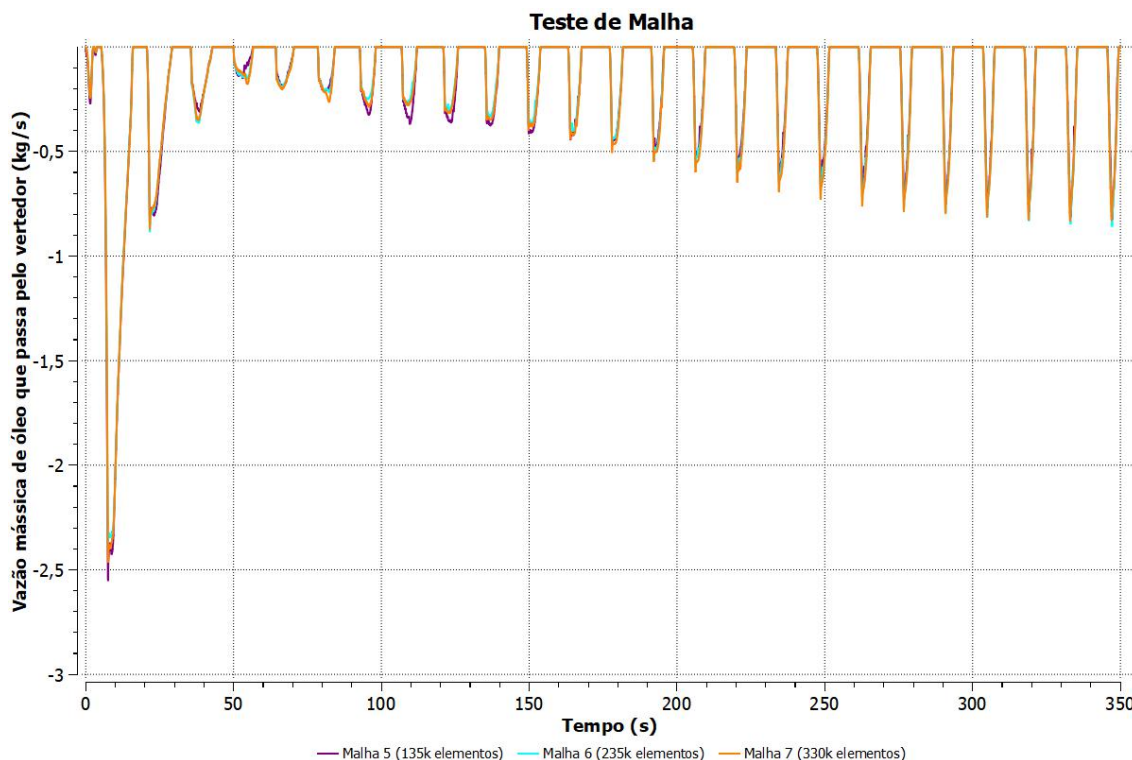


Figura 41 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor para – Três malhas mais refinadas - Teste de Malha

Apesar de serem duas variáveis importantes, a principal variável de interesse no presente estudo, em termos da avaliação da performance de separação do equipamento, é a eficiência por ciclo (η) definida na subseção 3.6. Avaliando-se os dados obtidos, obtém-se um gráfico conforme é mostrado na Figura 42. Pode-se verificar que, para as malhas mais grosseiras, houve uma boa concordância entre essas; contudo, ao aumentar o grau de refino, os resultados de eficiência mudam drasticamente. Isso se deu pela melhor resolução para malhas refinadas, que permitiu a modelagem assertiva de gotas de água e óleo que eventualmente foram observadas ao longo do domínio. Da Malha 4 até a Malha 7, há um perfil semelhante entre as curvas, havendo basicamente flutuação nos valores obtidos para cada ciclo. A Malha 6 e Malha 7, ou seja, as mais computacionalmente custosas, se mostraram significativamente independentes, refletindo resultados similares aos que foram sugeridos ao se analisar somente as vazões mássicas de óleo e água que passam pelo vertedor. Por outro lado, a Malha 5 também surge como opção alternativa, apesar de um menor grau de concordância perante as duas últimas.

Para a escolha final da malha, avaliou-se o esforço computacional necessário e o benefício de um menor desvio no valor numérico das variáveis de interesse. Verificou-

se que utilizar a Malha 6 exigiria um tempo computacional significativamente maior do que a Malha 5. Apesar da Malha 6 ter pouco menos que o dobro do número de elementos que a Malha 5, ela apresentou um tempo de simulação de aproximadamente 7 dias, enquanto a Malha 5 necessitou de um período de cerca de 3 dias. Levou-se em consideração que a malha mais refinada exigiu um menor passo de tempo (a ser discutido na subseção 4.1.3 a seguir), aumentando ainda mais seu custo computacional. Conseqüentemente, tendo em conta que o objetivo do presente estudo é avaliar as configurações numéricas (Etapa 1) e a influência da posição dos quebra-ondas nos separadores gravitacionais (Etapa 2), isto é, avaliações com foco comparativo e sem tanta rigidez quanto a acurácia dos valores numéricos obtidos, assumiu-se que a Malha 5 seria suficientemente independente para o prosseguimento do estudo.

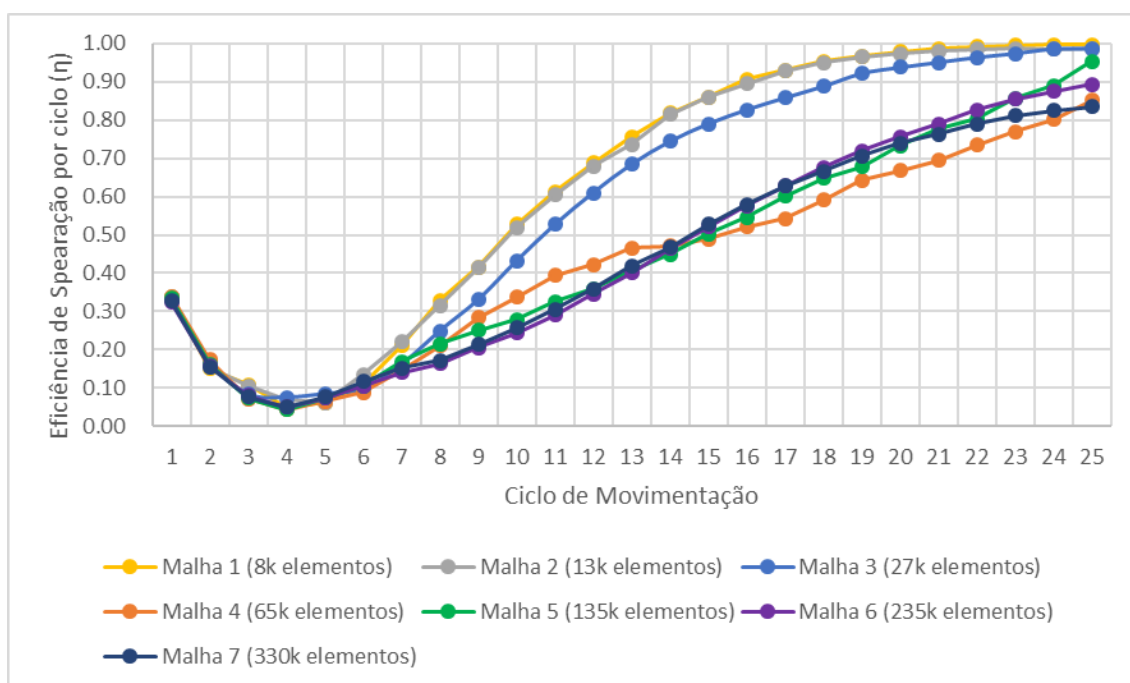


Figura 42 – Eficiência de separação por ciclo (fração mássica de óleo por ciclo) – Teste de Malha

4.1.3. Teste de Passo de Tempo

Após a obtenção da malha suficientemente independente para o prosseguimento das análises, realizou-se o Teste de Passo de Tempo. O propósito desse teste é identificar se há valores para os quais as variáveis estudadas são suficientemente independentes do passo de tempo escolhido, assim como identificar se é necessário ou não aplicar critérios de restrição do número de *Courant* de modo mais rigoroso. Nesse sentido, além dos passos de tempo fixos, avaliou-se uma abordagem implementando passos de tempo adaptativos com controle do *Co* máximo igual à unidade, o que em geral garante maior

acuraria nos valores obtidos para as variáveis de interesse do que para os casos com passo de tempo fixo e com Co máximo superior à unidade.

É importante destacar que o Teste de Passo de Tempo foi conduzido apenas para os Casos de Estudo; para o Caso Base (separador tridimensional), assumiu-se que o passo de tempo obtido por Silva (2018) era suficiente para os propósitos comparativos deste estudo. Além disso, os demais testes a seguir são todos realizados apenas para o caso do separador bidimensional, uma vez que não foi possível realizar todas avaliações com o separador tridimensional, por limitações relacionadas ao longo tempo de simulação considerando as malhas e passo de tempo obtidos para o caso em duas dimensões.

A Figura 43 mostra as vazões mássicas de água para a região acima do vertedor (saída do domínio computacional). Percebe-se que para os ciclos iniciais há uma maior discrepância entre os valores para os passos de tempo maiores (0,1 s e 0,05 s) enquanto no último ciclo nota-se uma pequena diferença entre o resultado com passo de tempo adaptativo e o 0,01 s. No geral, no entanto, a diferença observada pode ser considerada como pequena para essa variável.

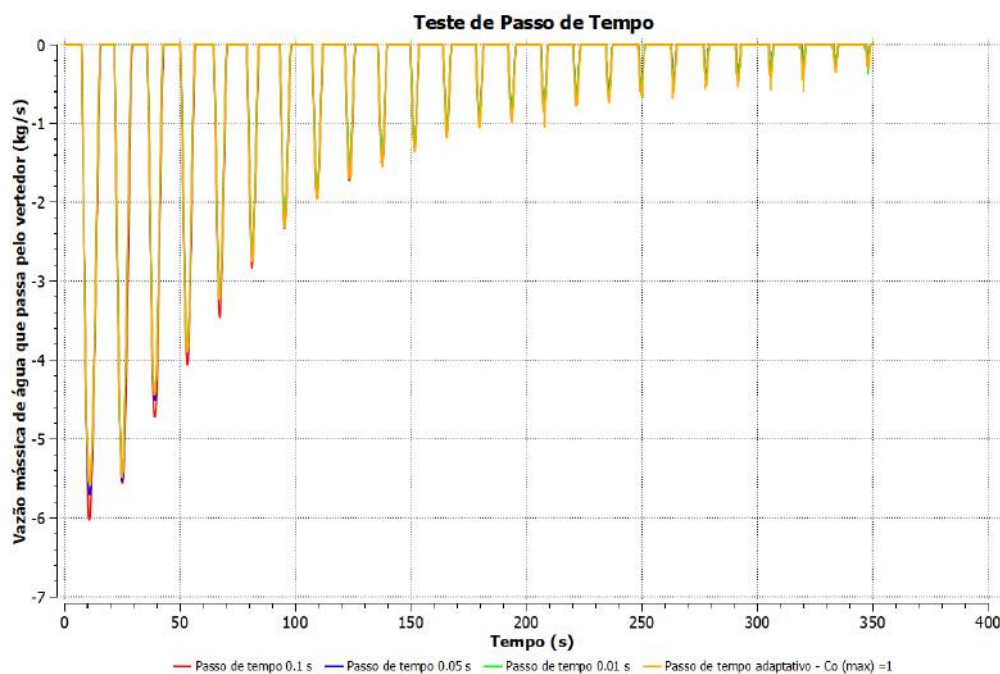


Figura 43 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor – Teste de Passo de Tempo

A Figura 44 apresenta as vazões mássicas de óleo para a mesma região acima do vertedor. Neste caso, identifica-se que o passo de tempo de 0,1s é o único com

significativa diferença, sendo essa diferença praticamente restrita aos ciclos de número 6,7 e 8.

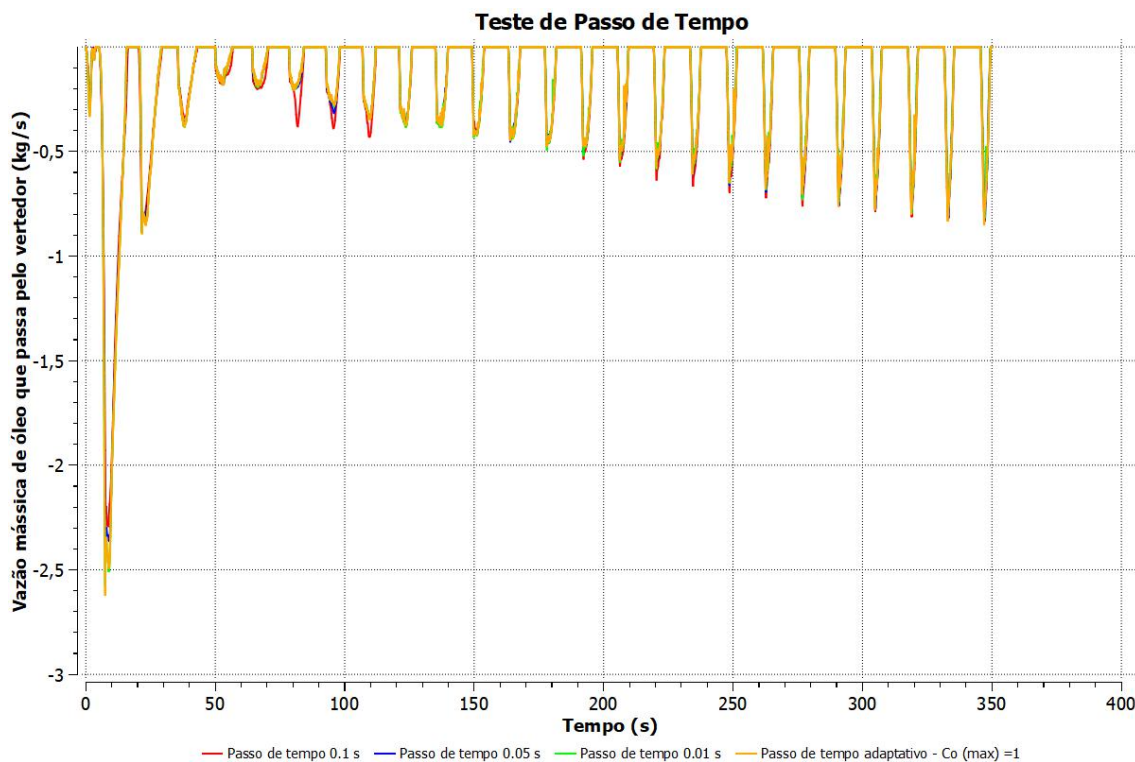


Figura 44 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor – Teste de Passo de Tempo

Por fim, avaliou-se a principal variável de interesse no presente estudo, em termos da avaliação da performance de separação do equipamento, que é a eficiência por ciclo (η) definida na subseção 3.6. Os resultados para essa variável são apresentados na Figura 45. Observa-se que, quanto mais próximo dos últimos ciclos de movimentação, maior é a dependência do passo de tempo escolhido, indicando que, a princípio, é necessário restringir esse parâmetro de acordo com o *Courant*. Os tempos de simulação variaram de 18h, para o passo de tempo mais grosseiro, até cerca de 80h, para o passo de tempo adaptativo. Esse último, apesar do maior tempo de rodada, apresentou maior convergência dos resíduos numéricos, sendo na maioria dos passos de tempo necessárias apenas duas iterações para a convergência. Como as configurações numéricas ainda estavam sujeitas a mudanças que viriam a ser implementadas após os testes seguintes, concluiu-se que a melhor abordagem seria restringir o passo de tempo com o critério baseado no *Courant* máximo (passo de tempo adaptativo), a fim de evitar problemas de convergência nas etapas seguintes. Essa opção gerou, especificamente, valores de passo de tempo da ordem de 0,004 s à 0,007 s ao longo das simulações.

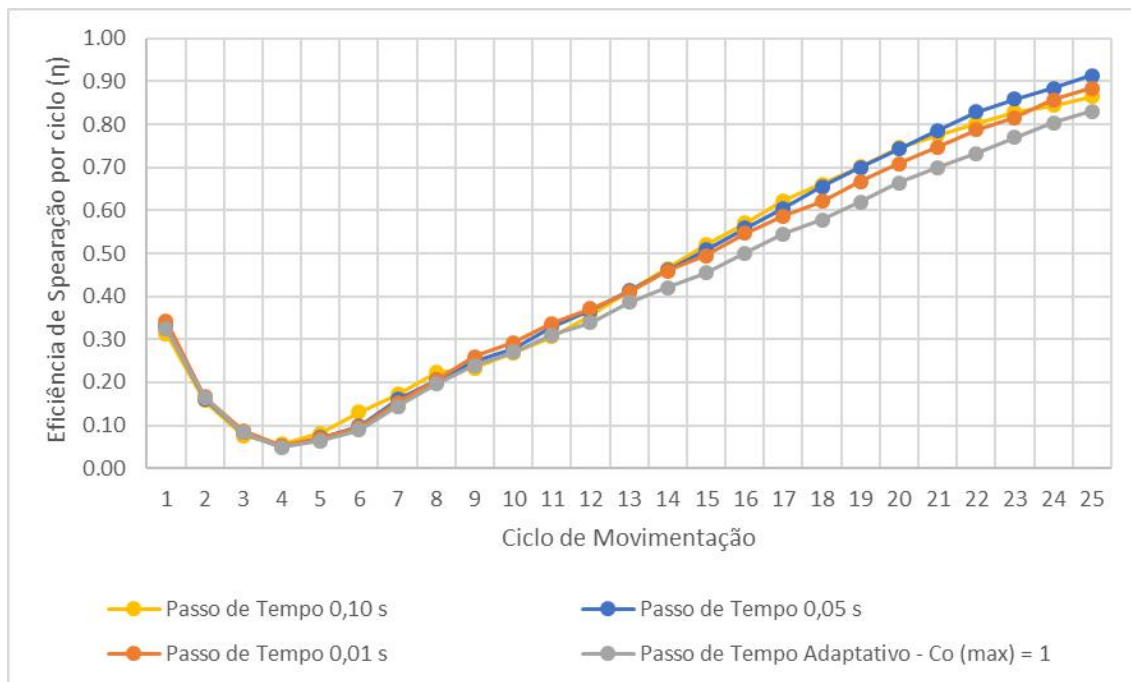


Figura 45 – Eficiência de separação por ciclo– Teste de Passo de Tempo

4.1.4. Teste de Tensão Superficial

Com a obtenção da malha independente e passo de tempo adequado, realizaram-se as simulações para avaliar a influência da modelagem da tensão superficial no problema em questão. A Figura 46 mostra a vazão de água na região de saída acima do vertedor e a Figura 47 apresenta a vazão de óleo para a mesma região. Observa-se que os valores calculados são praticamente iguais, havendo apenas diferença perceptível ao se analisar os 15°, 22° e 23° ciclos de movimentação para a vazão de água.

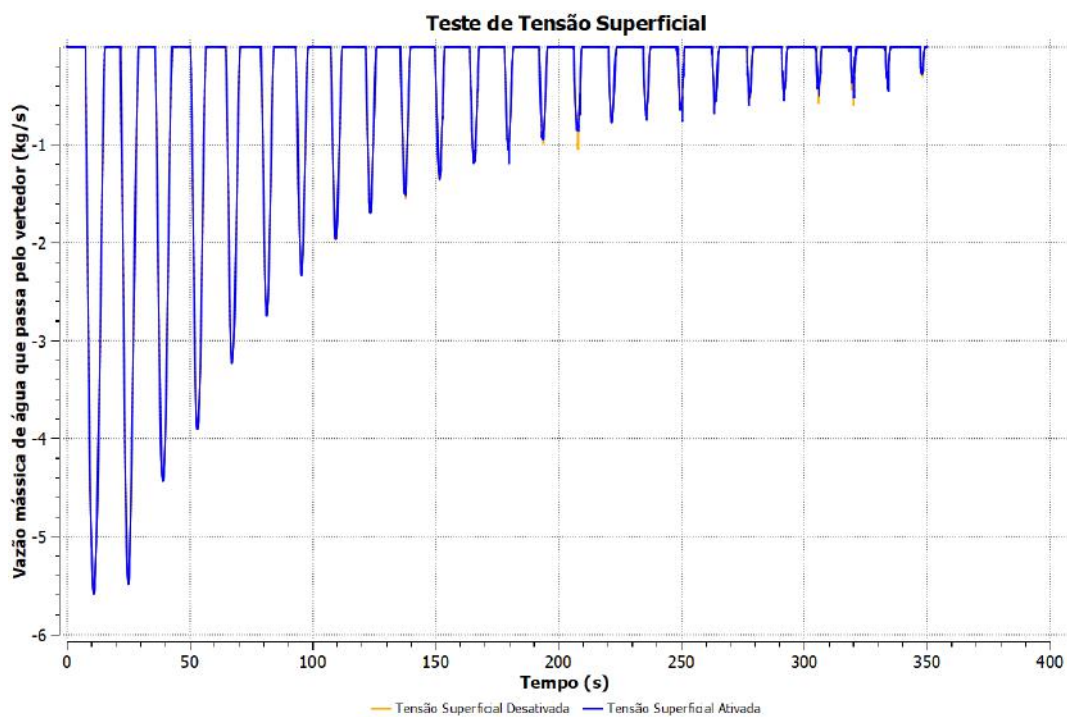


Figura 46 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor – Teste de Tensão Superficial

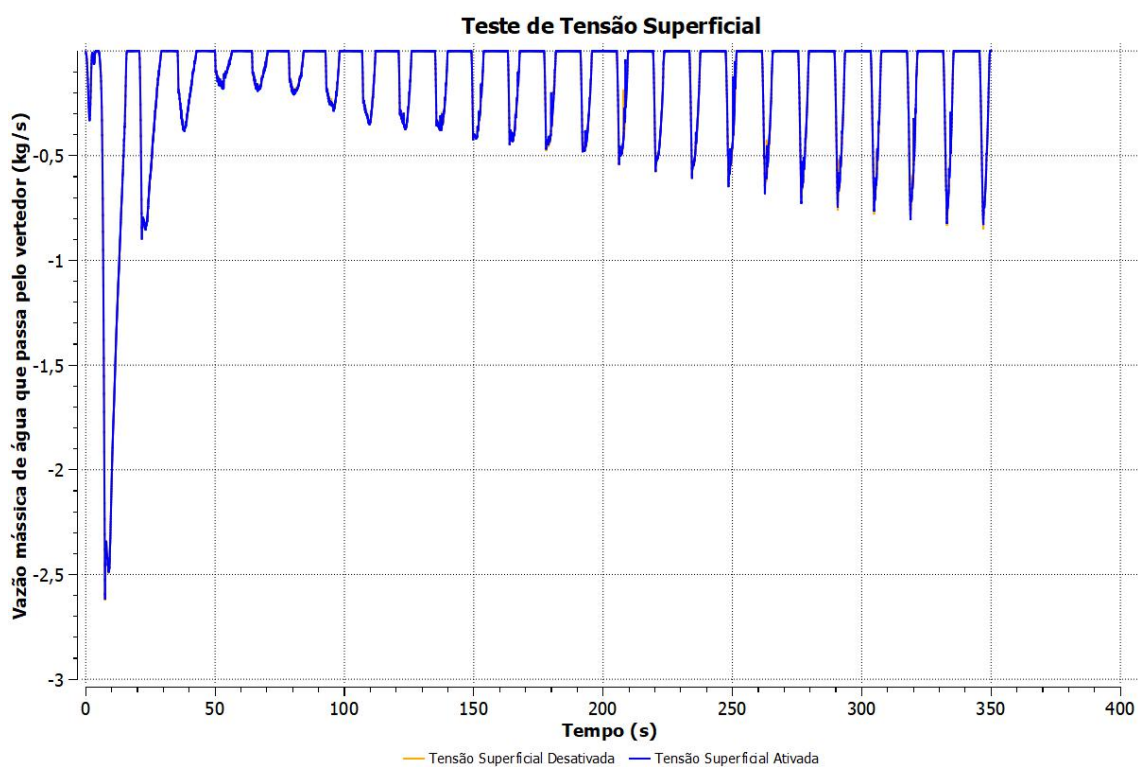


Figura 47 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor – Teste de Tensão Superficial

A combinação dessas duas vazões, conforme discutido dos testes anteriores, deriva na variável de interesse – eficiência de separação por ciclo (η). Como esperado, para

essavariável também pode-se concluir que não há diferença significativa ao se comparar os casos em que a tensão superficial foi modelada e o caso em que a mesma foi negligenciada. A Figura 48 ilustra os valores dessavariável por ciclo de movimentação.

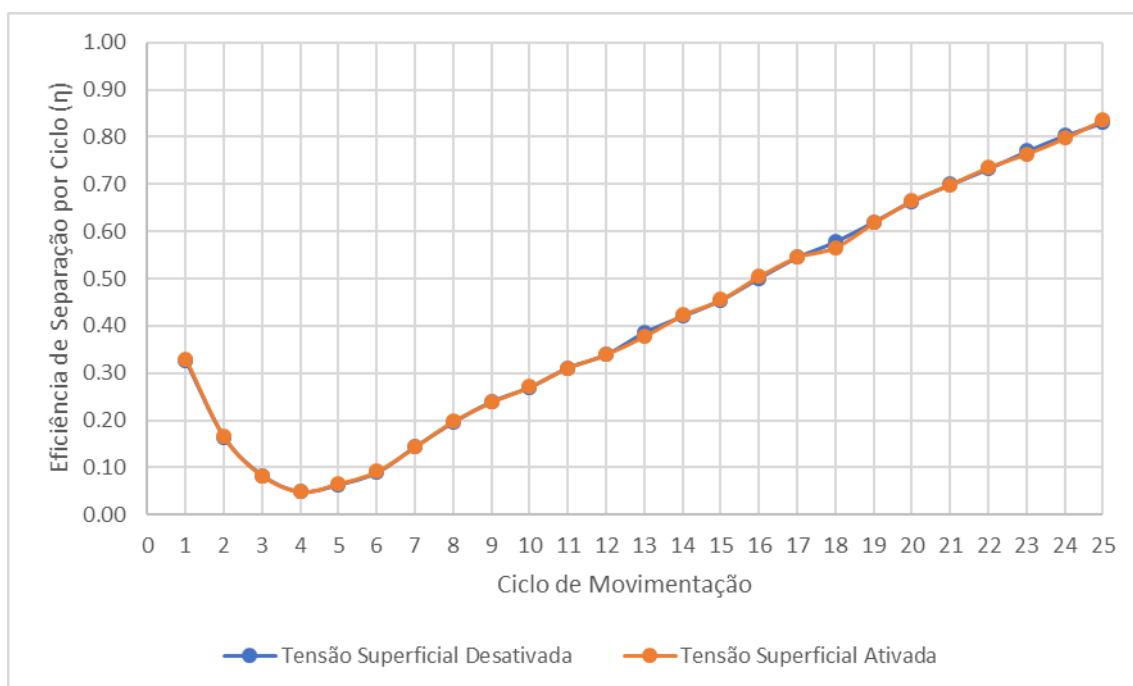


Figura 48 – Eficiência de separação por ciclo – Teste de Tensão Superficial

Adicionalmente, foram realizados cálculos dos números de Re e We , utilizando como comprimento característico o diâmetro hidráulico relativos às faces de entrada de cada fase, a fim de avaliar se os critérios estavam condizentes com o resultado esperado. Com isso, verificou-se que o número de Weber calculado estava superior a 1 considerando todas as três fases presentes no equipamento. Esse resultado, conforme discutido na subseção 2.4.4, é um indicativo de que a tensão superficial não precisa ser modelada (ANSYS, 2020) e, portanto, corroborou com o resultado aqui obtido. É importante ressaltar que esses cálculos não foram tomados como único critério para desprezar a tensão superficial uma vez que, a realização desses envolveu um acúmulo de incertezas. Essas, por sua vez, estão relacionadas à obtenção do diâmetro molhado, que varia ao longo da simulação e de acordo com o fluido em questão, sendo esse parâmetro um dado de entrada importante para a obtenção do Re e We finais. Ainda assim, cabe ressaltar que o diâmetro hidráulico foi utilizado a título de realização dos cálculos, uma vez que não se está modelando as gotas de fluido, e, portanto, não se tem um comprimento característico relevante associado à curvatura da interface entre os fluidos.

Em conclusão, o tempo computacional dos casos foi muito similar, porém, ao modelar a tensão superficial, o equacionamento se torna mais complexo e, de fato, verificou-se um maior tempo de rodada. O caso com tensão superficial desativada foi concluído em 79 horas, enquanto o com tensão superficial ativada teve fim em 89 horas, resultando em cerca de 10% a mais no tempo total. Sendo assim, é válido ressaltar que, a depender do problema estudado, pode ser útil modelar ou não este fenômeno. Porém, quando não se há tempo para realizar testes de sensibilidade como os que foram elaborados no presente estudo e também há incerteza quanto aos números de Re , We ou Ca (discutidos na subseção 2.4.4), recomenda-se que esses efeitos sejam modelados, uma vez que podem impactar nos resultados obtidos e o acréscimo do esforço computacional não é tão significativo. Isso só é aplicável quando a malha utilizada associada ao VOF tem resolução suficiente para capturar bolhas ou gotas associadas – caso não seja o caso, não há necessidade de modelar a tensão superficial.

4.1.5. Teste de Condições de Contorno

Após a definição do prosseguimento das simulações sem a necessidade de modelar as tensões superficiais, realizaram-se testes com diferentes condições de contorno. De acordo com o que foi discutido na subseção 3.3.5, há diferentes abordagens utilizadas por outros autores para atribuir condições de contorno na região de saída do separador. Como no presente trabalho a área correspondente à saída de óleo é, na verdade, a região acima do vertedor, a essa foi simplesmente atribuída a condição de *opening* com pressão relativa 0 kPa. No Teste de Condições de Contorno, portanto, avaliaram-se diferentes condições de contorno exclusivamente para a região de saída de água e foi analisado se essas escolhas impactavam na região de saída acima do vertedor. Também foi verificado se o nível do equipamento se matinha estável, isto é, sem o separador esvaziar.

A Figura 49 mostra a vazão de água na região de saída acima do vertedor. Observa-se que, para as três diferentes opções de condições de contorno utilizadas, há significativa diferença no comportamento das curvas obtidas. Isso indica que, apesar de se tratar de uma condição de contorno da saída de água, essa impacta diretamente e de forma significativa a segunda saída.

Para o caso com vazão mássica de fluido especificada, nota-se o comportamento descendente das curvas. Nos instantes iniciais há maior passagem de água para a região

que seria o compartimento de saída de óleo, porém, na medida em que essa maior quantidade é removida do domínio, a camada líquida de água resultante fica menor, resultando em menores vazões nos instantes seguintes. Para o caso de *opening* com pressão hidrostática inicial, há menor quantidade de água que passa pelo vertedor nos primeiros ciclos. Entretanto, essa quantidade logo se estabiliza, levando a um comportamento periódico com amplitude e período constantes. Por último, no caso de *outlet* com pressão hidrostática inicial, a vazão de água que verte é rapidamente reduzida e se torna praticamente nula após o 10º ciclo.

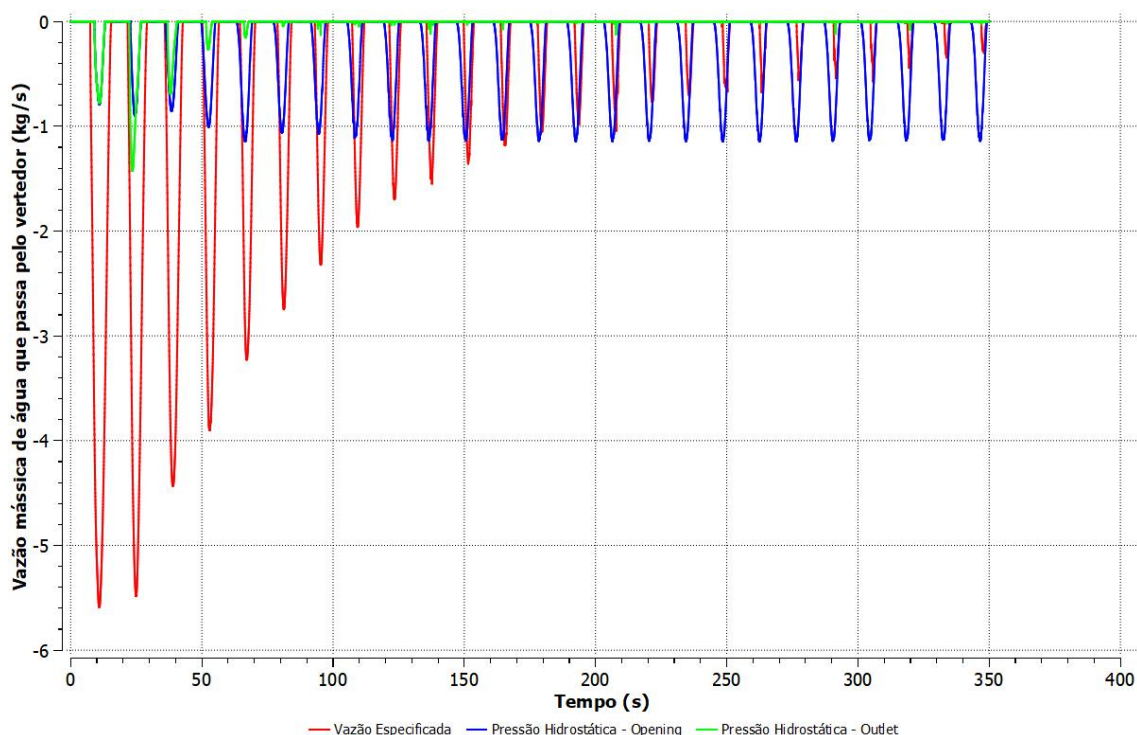


Figura 49 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor – Teste de Condição de Contorno

Analisando a vazão de óleo que passa pelo vertedor na Figura 50, identifica-se que há grande dependência novamente das condições de contorno escolhidas com os resultados obtidos. É importante notar que os casos de vazão de fluido especificado foram os implementados em todos os testes realizados anteriormente, assim como nos trabalhos anteriores de Sant'anna (2011) e Silva (2018).

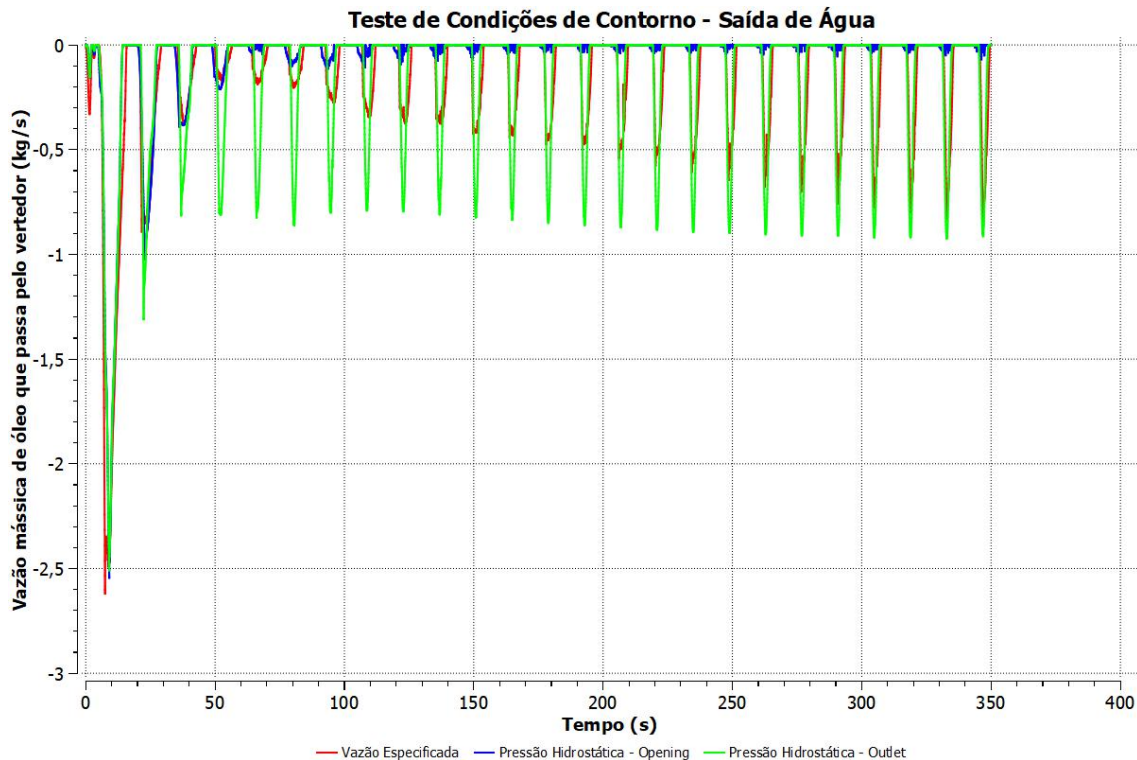


Figura 50 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor – Teste de Condição de Contorno

A Figura 51 apresenta os resultados para a região da condição de contorno de saída de água, sendo mostrado especificamente a vazão de óleo nessa região. Como esperado, não houve saída significativa de óleo na região de saída de água para todas as três simulações realizadas. Para os casos com *outlet* e *opening* observou-se uma pequena vazão em determinados instantes de tempo. Porém, entende-se que o valor numérico dessas é muito próximo dos critérios para os resíduos numéricos, podendo assim ser apenas um indicativo de instabilidade numérica, considerando a ordem de grandeza desses valores.

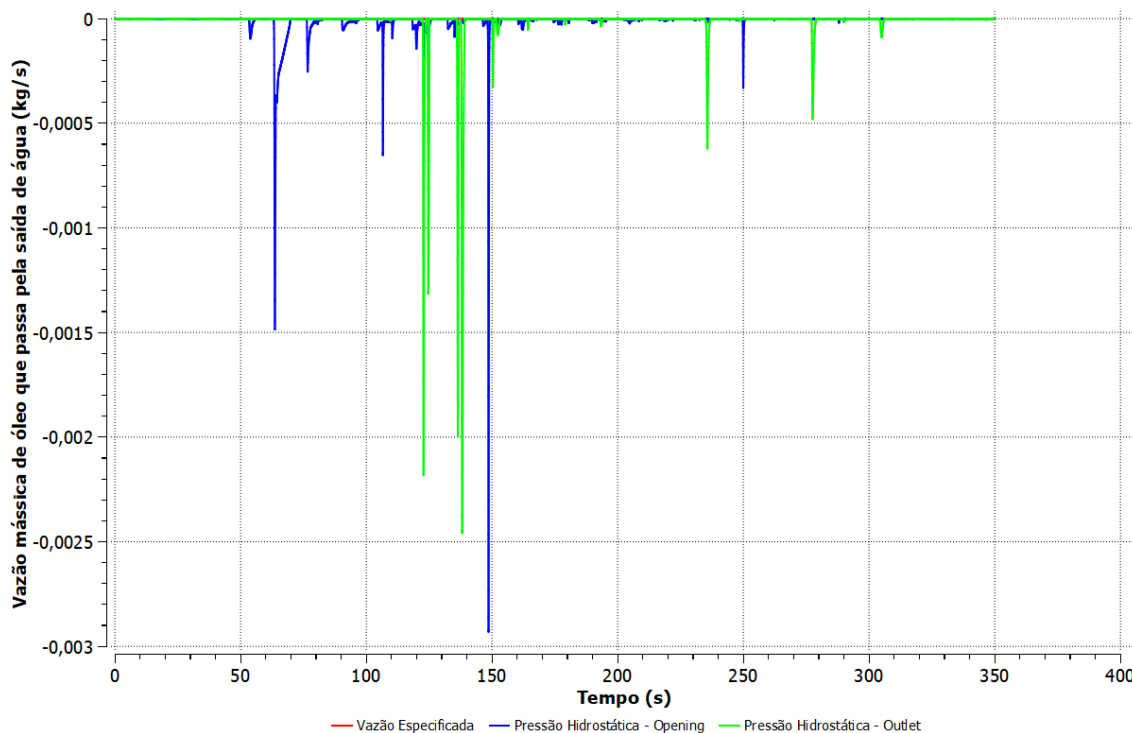


Figura 51 – Vazão mássica de óleo que passa pela saída de água – Teste de Condições de Contorno

Com relação à vazão mássica de água na saída de água, apresentada na Figura 52, também houve diferença significativa a depender da condição de contorno selecionada. O caso com *opening* e pressão hidrostática inicial apresentou resultados semelhantes aos reportados por Le *et al.* (2019) quando não há implementação de controle de pressão (*PP-Control*) para esta condição, ou seja, foi verificado que há o surgimento de um fluxo reverso (*backflow*), com água entrando no domínio, o que é irrealista. Por outro lado, na condição de outlet com pressão hidrostática inicial, esse *backflow* não poderia ocorrer e não se fez presente. Contudo, o *software* reportou que foi necessário, em determinados passos de tempo, associar uma parede à essa região, impedindo o ingresso de fluido no domínio. Esse resultado indica que a pressão na condição de contorno era maior do que a pressão na região de fluido imediatamente acima da mesma, e concluiu-se que isso ocorre pela movimentação do líquido dentro do separador. Essa movimentação faz com que a altura da camada de líquido varie ao longo do equipamento, provendo diferentes pressões hidrostáticas a depender do ponto analisado.

Considerando os problemas atrelados à definição de condições de contorno em função da pressão hidrostática, sejam estas de *opening* ou de *outlet*, optou-se por selecionar a opção contendo a vazão mássica de fluido especificada. Essa se mostrou mais condizente com o que seria esperado em uma planta real, uma vez que essas

vazões de saída normalmente são controladas por válvulas e transportadas por bombas, precisando ser razoavelmente estáveis para evitar outros diversos problemas operacionais.

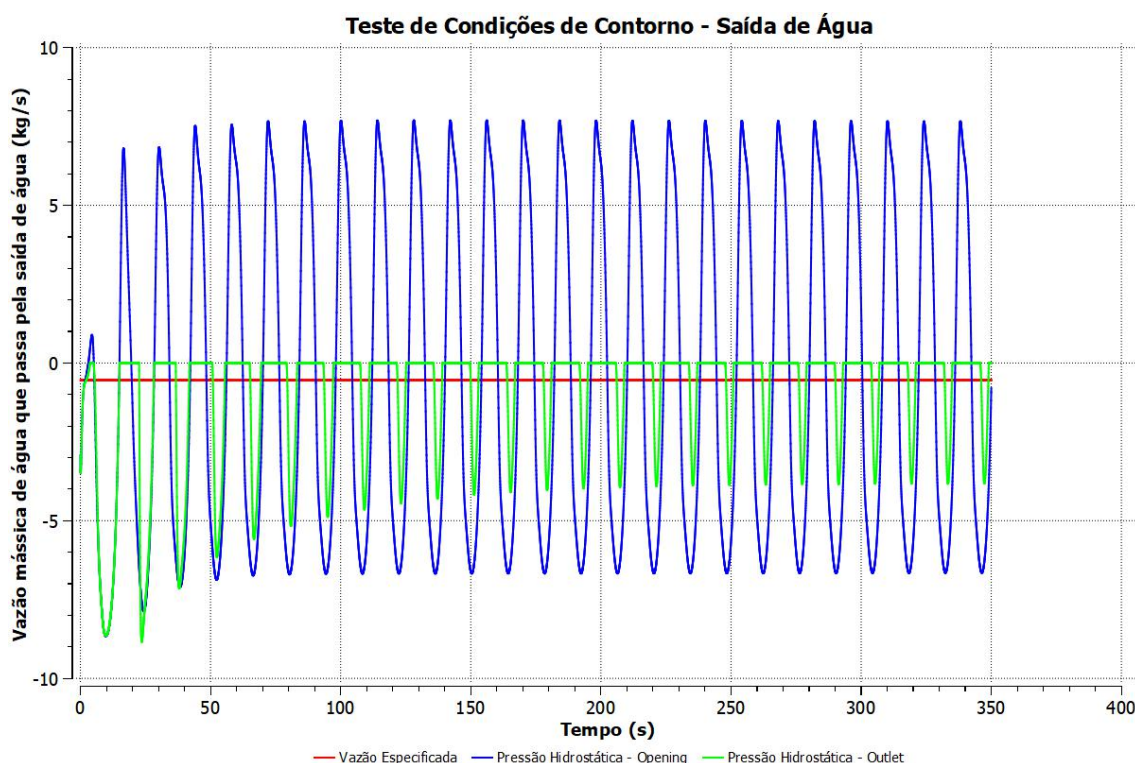


Figura 52 – Vazão mássica de óleo que passa pela saída de água – Teste de Condições de Contorno

4.1.6. Teste de Meio Poroso

Com base nos resultados oriundos dos testes anteriores, realizou-se o Teste de Meio Poroso com o intuito de selecionar os parâmetros de porosidade e permeabilidade mais adequados para representar a física envolvida do escoamento dentro do quebra-ondas - dado à carência de dados relativos à construção e geometria dos quebra-ondas do separador da folha de dados. Nesse teste, verificou-se que a variação do nível da interface líquido-gás entre os dois casos simulados foi significativa e, por isso, resultados para essa variável são apresentados e discutidos.

A Figura 53 mostra o perfil de densidade e distribuição dos fluidos no plano central do equipamento num instante próximo ao fim do 25º ciclo. Percebe-se que o meio poroso recomendado por Silva (2018) impõe uma restrição à passagem dos fluidos significativamente maior do que o do utilizado por Kun (2019). A região após o quebra-ondas, no caso simulado com base na configuração de Silva (2018), apresenta uma interface líquido-gás em uma elevação maior e substancialmente distinta da região

anterior à essa chicana. Com isso, qualitativamente, verifica-se que esse meio poroso (porosidade 0,25 e permeabilidade $1,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2$) impõe uma certa estabilidade nessa elevação da interface. O meio baseado na configuração de Kun (2017), com porosidade de 0,4 e permeabilidade de $5,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, restringe menos a passagem dos fluidos, diminuindo o efeito do quebra-ondas em si.

Por outro lado, a motivação desse teste é a escassez de dados precisos que forneçam parâmetros adequados para dispositivos quebra-ondas reais e, portanto, levou-se em consideração também o comportamento físico observado nesses casos. O meio baseado nos parâmetros de Silva (2018) apresentou um comportamento fisicamente questionável, uma vez que a água e óleo praticamente não se deslocavam para o *bulk* de líquido, indicando que o quebra-ondas teria que ser extremamente impermeável ou resistente à passagem desses fluidos. Isso não é esperado com base na construção desses dispositivos, sobretudo os compostos por placas perfuradas ou meios estruturados, como mostrado na Figura 12. Porém, para representação de quebra-ondas completamente sólidos, essa configuração se aproximaria mais do esperado; mas para isso seria menos computacionalmente custoso e mais acurado simplesmente modelar esse dispositivo como sólido. Nesse contexto, optou-se por seguir para a próxima etapa com as configurações de meio poroso recomendadas por Kun (2017).

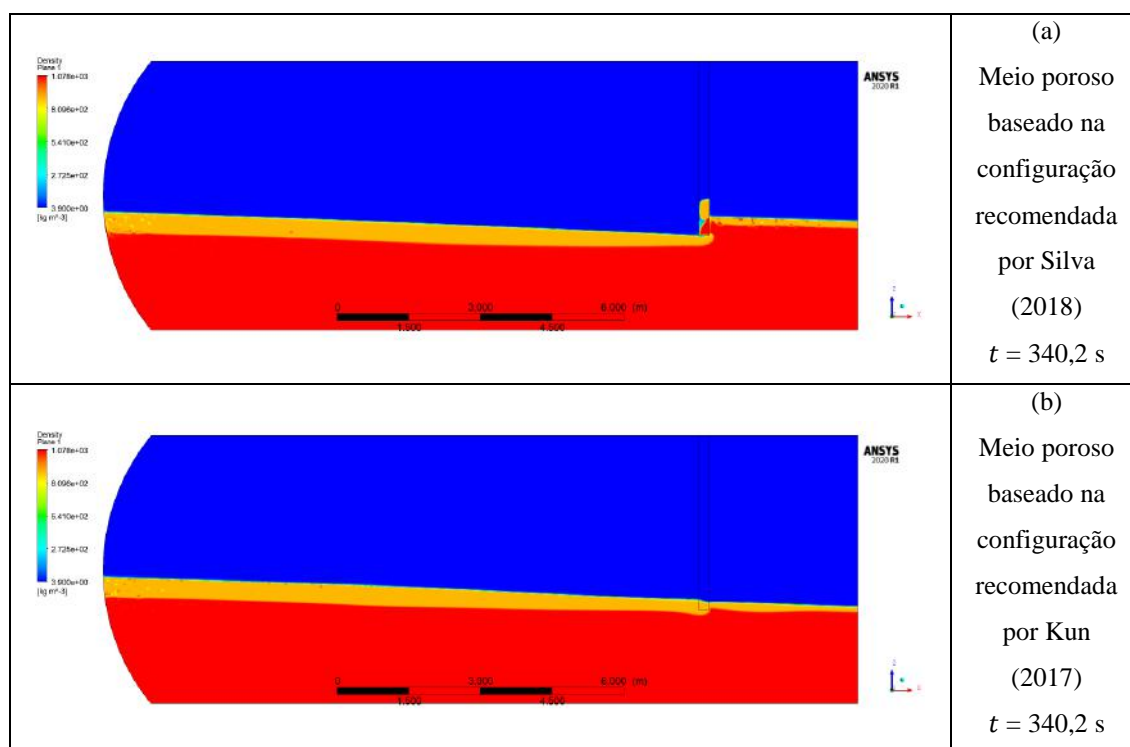


Figura 53 – Perfil de densidade e distribuição dos fluidos no plano central do equipamento. (a) Meio poroso baseado na configuração recomendada por Silva (2018) $t = 340,2 \text{ s}$; (b) Meio poroso baseado na configuração recomendada por Kun (2017) $t = 340,2 \text{ s}$.

Apesar do comportamento físico ser utilizado como critério principal para definição dos parâmetros do meio poroso a serem implementados nas simulações seguintes, analisou-se também os aspectos relativos ao objetivo do trabalho: a eficiência de separação e a capacidade de suavização das flutuações na posição da interface líquido-gás.

No primeiro aspecto, o entendimento pode ser elaborado com base nos dados de vazão mássica de água, óleo e da eficiência de separação η – vide Figura 54, Figura 55 e Figura 56. Nota-se que o meio de maior porosidade apresenta maiores vazões de óleo e menores vazões de água nos ciclos iniciais, garantindo maior eficiência. A partir do 8º ciclo o comportamento de ambos fica similar, havendo uma inversão na eficiência dos dois no 19º ciclo, ou seja, o meio poroso de menor permeabilidade passa a produzir proporcionalmente mais óleo. Como limitação do estudo, não é possível prever precisamente se essa tendência se manterá, embora analisando as inclinações das curvas nos últimos ciclos seja razoável admitir tal comportamento.

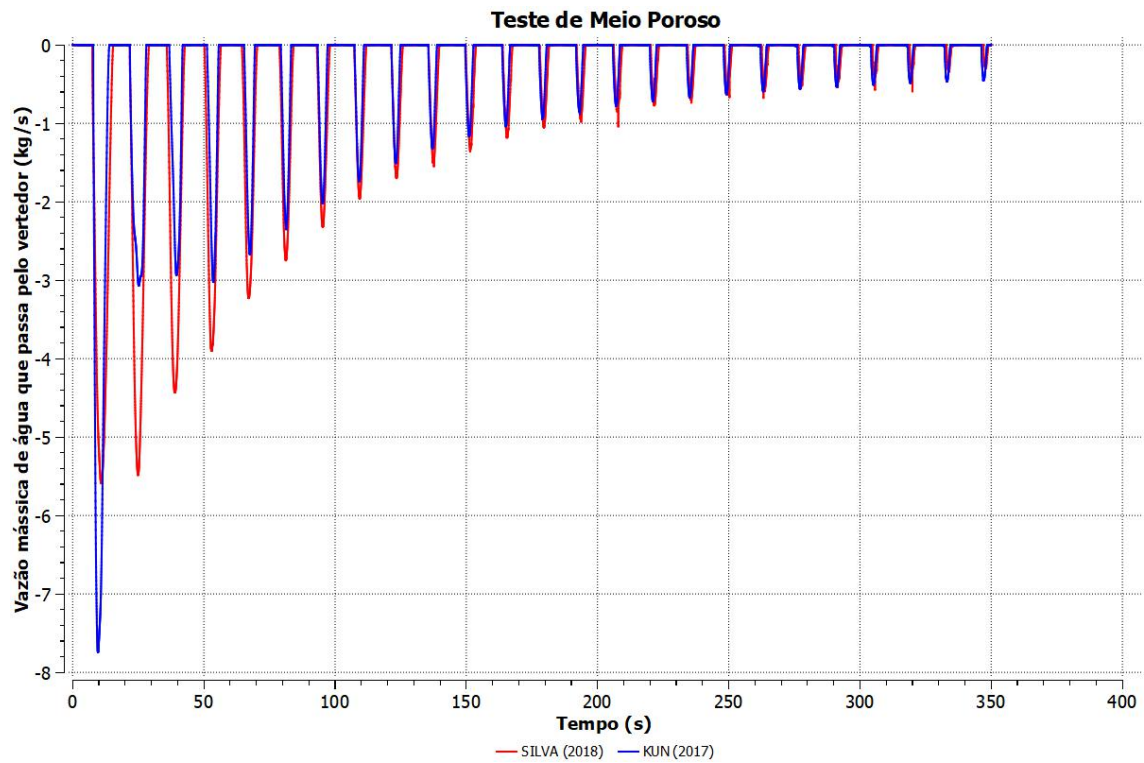


Figura 54 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor– Teste de Meio Poroso

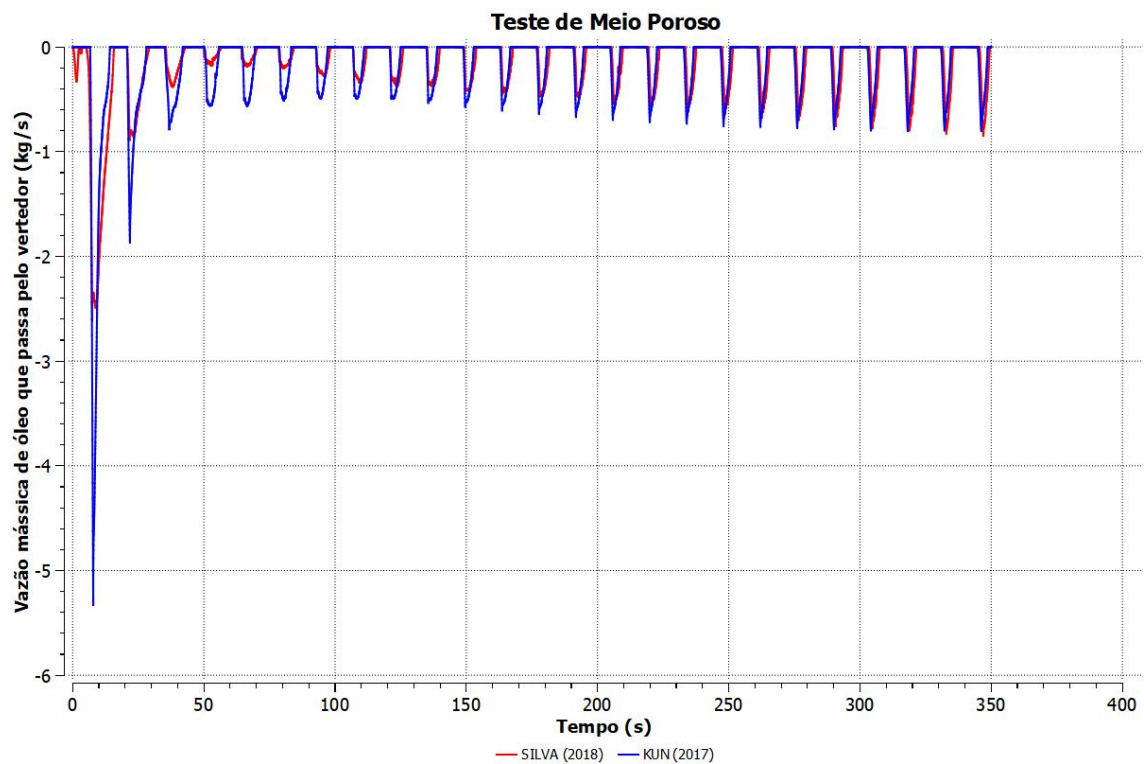


Figura 55 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor– Teste de Meio Poroso

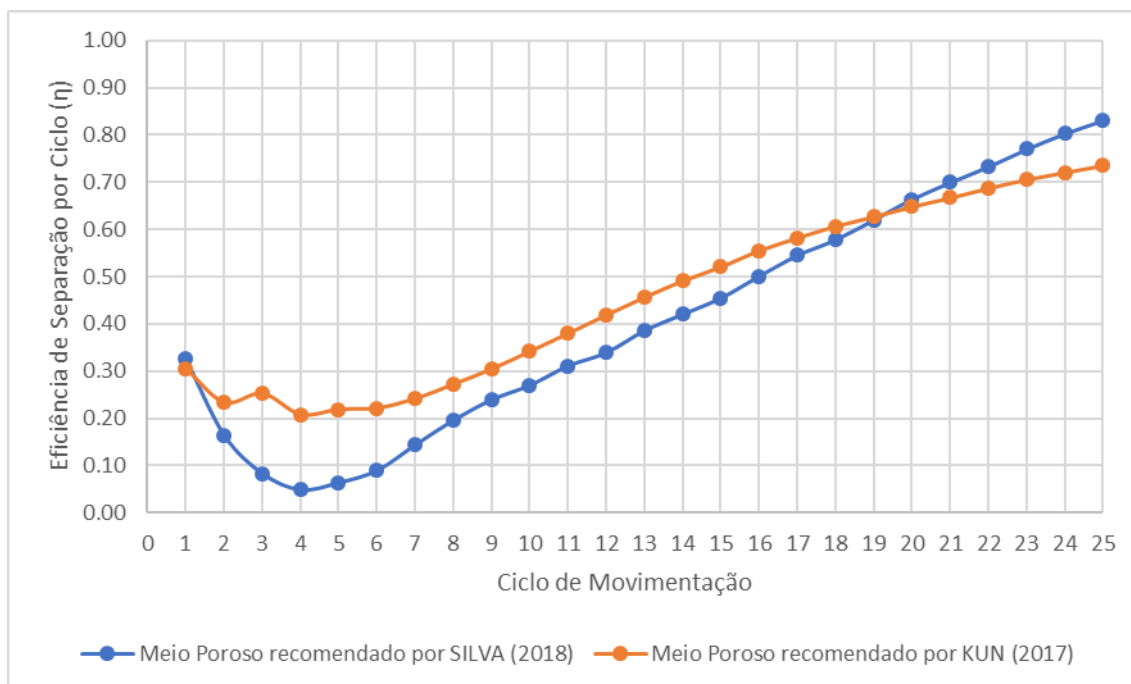


Figura 56 – Eficiência de separação por ciclo – Teste de Meio Poroso

Analisando essa eficiência para os 25 ciclos e para o ciclo final, com a premissa de que este representa o estado periódico uniforme a ser atingido, percebe-se que: o meio de menor permeabilidade de Silva (2018) apresenta menor eficiência global. Porém, no último ciclo, essa fração mássica de óleo produzido chega à 0,8309, isto é, um valor relativamente grande quando comparado aos ciclos anteriores e ainda maior do que o obtido pela simulação baseada nas configurações de Kun (2017), a qual resultou em 0,7360 de eficiência nesse último ciclo. Esses resultados são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Eficiências de Separação – Teste de Meio Poroso

Caso	Eficiência de Separação Global (η^{global})	Eficiência de Separação no Último Ciclo (η^{25})
Recomendado por Silva (2018)	0,2604	0,8309
Recomendado por Kun (2017)	0,3368	0,7360

Já quando se trata do segundo aspecto de interesse, a capacidade de suavização das flutuações na posição da interface líquido-gás, obteve-se o resultado mostrado na Figura 57. Identifica-se que, claramente, o meio poroso de menor permeabilidade foi mais eficiente na manutenção e estabilidade da posição da interface líquido-gás. Isso se configura um caráter interessante e extremamente favorável para implementação de

chicanas quebra-ondas desse tipo, uma vez que, sem esse controle adequado do nível da interface, podem ocorrer problemas operacionais relativos a, por exemplo, o acionamento de alarmes de nível baixo e alto; podendo ainda resultar, em casos extremos, na parada de operação, caso esse nível atinja algum nível crítico.

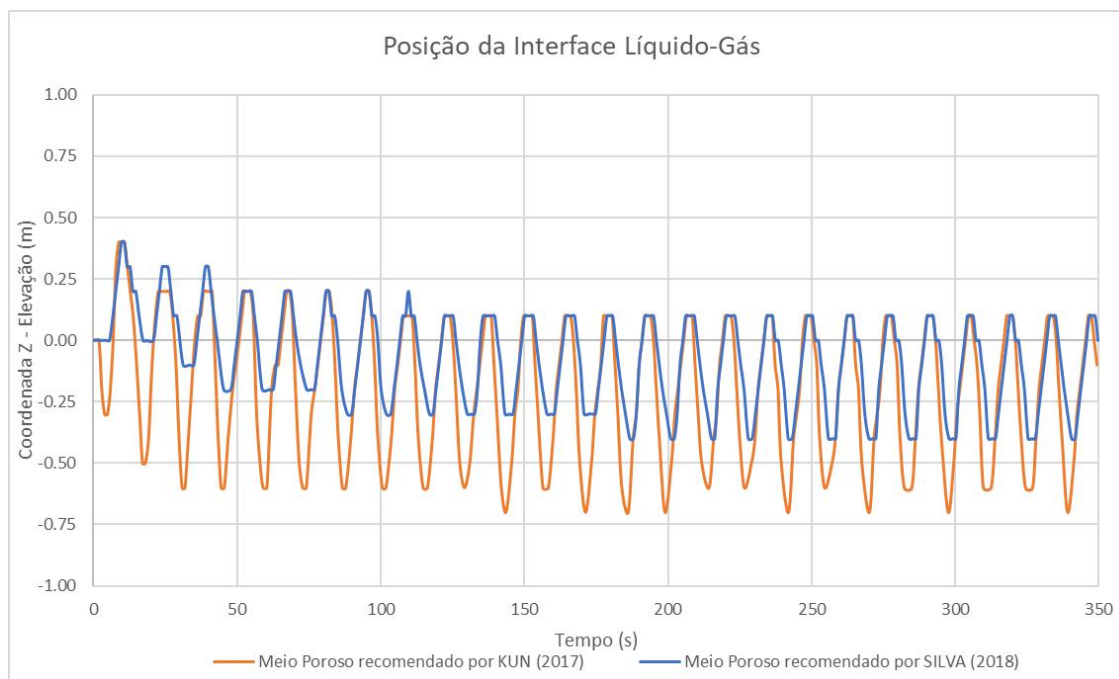


Figura 57 – Posição da Interface Líquido-Gás – Teste de Meio Poroso

A quantificação dessa capacidade de atenuação da posição da interface líquido-gás é feita pela variável h_{sd} , o desvio padrão da altura. A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos para essa variável. Destaca-se que, analisando-se tanto os 25 ciclos completos quanto o ciclo final, o desvio padrão da altura foi similar entre essas duas abordagens. Para o meio de maior permeabilidade, a flutuação da posição da altura foi significativamente maior, apresentando diferença relativa de cerca de 30%. Esse dado corrobora para o entendimento de que, quanto mais poroso ou de maior permeabilidade o meio, menor será a capacidade do quebra-ondas de suavizar as flutuações da posição dessa interface.

Tabela 14 – Desvio padrão da altura da interface líquido-gás – Teste de Meio Poroso

Caso	Flutuação da Posição da Interface (h_{sd}^{global})	Flutuação da Posição da Interface (h_{sd}^{25})
Recomendado por Silva (2018)	0,1900 m	0,1819 m
Recomendado por Kun (2017)	0,2679 m	0,2534 m
Diferença Percentual Relativa	-29,66%	-27,56%

4.2. ETAPA 2 - AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO QUEBRA-ONDAS

Nesta etapa são apresentados os resultados para os testes e simulações considerando diferentes configurações de um único quebra-ondas no separador trifásico. As configurações e modelos implementados nessas simulações foram obtidas após a conclusão de todos os testes realizados e discutidos na Etapa 1 – o detalhamento das configurações também é mostrado na Tabela 12. É importante destacar que o *setup* que vinha sendo utilizado como referência para os Casos de Estudo (separador bidimensional) empregava apenas um quebra-ondas na 6ª posição superior. Além da influência da posição longitudinal, analisou-se também o efeito de empregar os *anti-sloshing baffles* montados na parte inferior e na parte superior, para uma mesma coordenada longitudinal.

4.2.1. Análise de Eficiência de Separação

Nesta seção serão sumarizados os resultados relativos à eficiência de separação, medida pela fração mássica de óleo que passa pelo vertedor.

4.2.1.1. Quebra-ondas nas Posições Superiores

A Figura 58 mostra as vazões mássicas de água para a região acima do vertedor (saída do domínio computacional). Percebe-se que a simulação com o quebra-ondas na 6ª posição (superior) destoou significativamente das demais quando se trata dessa variável, podendo-se observar essa grande distinção dos valores obtidos do primeiro até o oitavo ciclo. Além disso, quanto mais afastado do vertedor, em geral, menor é a vazão de água na saída.

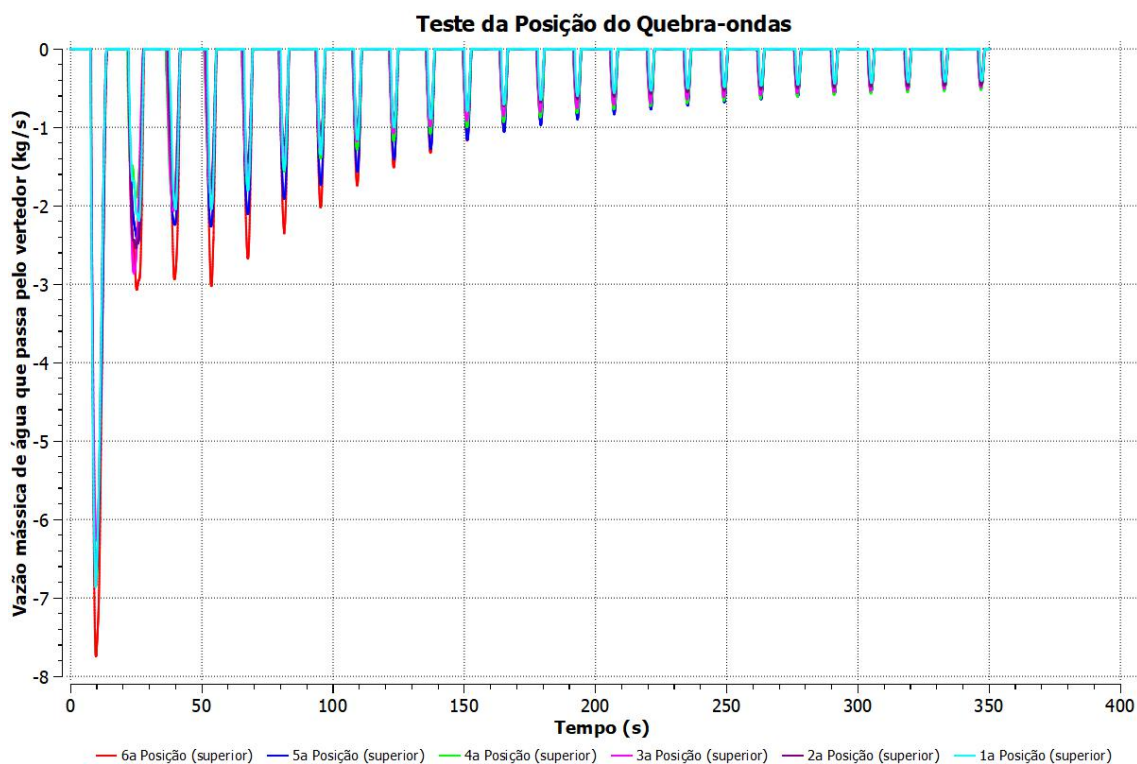


Figura 58 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor– Posições Superiores – Quebra-ondas

As vazões mássicas de óleo podem ser visualizadas na Figura 59. Nota-se que, para os ciclos iniciais, há uma maior discrepância entre os valores de vazão de água considerando as diferentes posições testadas. Já nos últimos ciclos, os dados mostram que há uma tendência de estabilização, sendo possível admitir que foi atingido um estado periódico com amplitude e períodos constantes para as diferentes posições testadas. Nesses ciclos finais, praticamente não há diferença entre as quantidades de água que passam pelo vertedor, indicando que essa variável não é tão sensível a essa mudança de posição longitudinal do quebra-ondas nesses períodos.

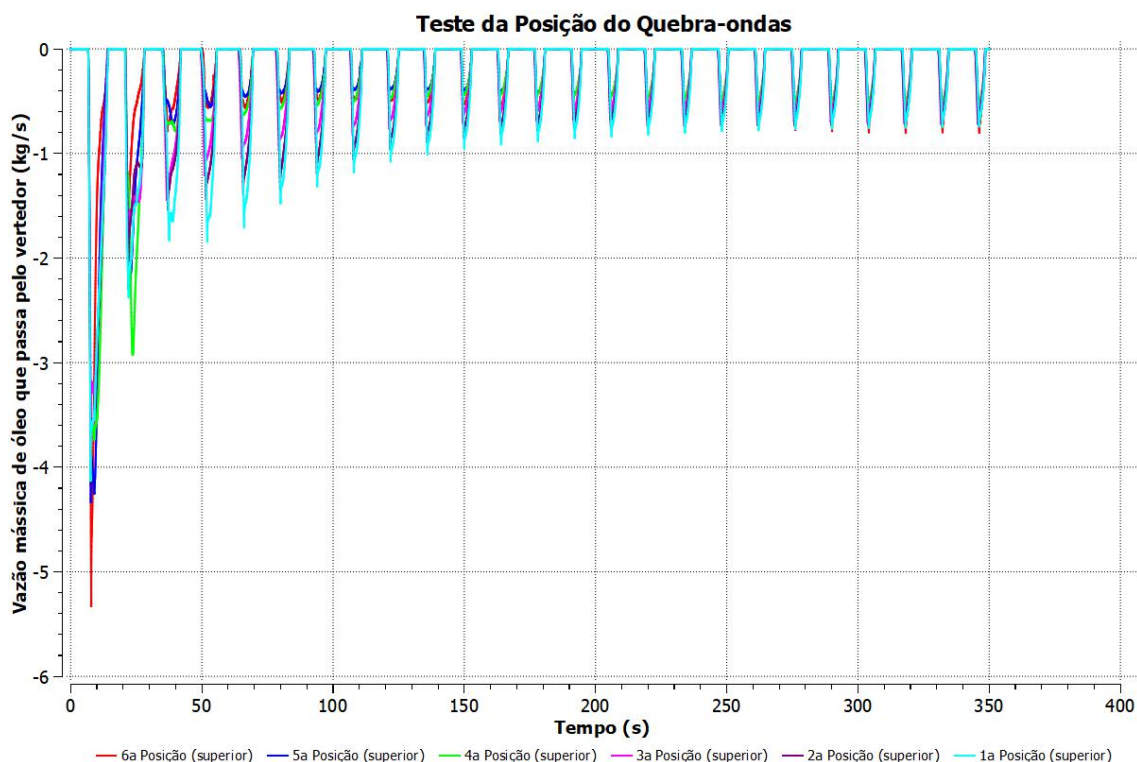


Figura 59 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor– Posições Superiores – Quebra-ondas

As eficiências de separação por ciclo (η) são mostradas na Figura 60. É possível identificar que a 1ª posição superior foi a que apresentou uma maior eficiência para praticamente todos os ciclos avaliados. Nota-se também que, do primeiro ao quarto ciclo, há uma grande variação nas respostas encontradas para a eficiência, sendo depois desses ciclos um perfil mais uniforme crescente observado. Essa variação brusca se deu pela maior quantidade de óleo que estava disponível na região após o quebra-ondas nos instantes iniciais pela inicialização implementada. Em outras palavras, uma camada espessa de líquido verte rapidamente nos momentos iniciais e, a depender da posição do quebra-ondas, a altura da interface água-óleo pode estar mais ou menos elevada. Após o 5º ciclo, aproximadamente, observa uma maior estabilização da espessura da camada de óleo na região após o quebra-ondas, o que resulta em um perfil com variações menos drásticas em η .

Ainda analisando a Figura 60, percebe-se que para a 1ª posição (superior) é possível admitir que o estado periódico com amplitude e período constantes foi atingido, dada a pequena taxa de variação na variável η com o passar dos ciclos. Para outras posições, entretanto, seria necessário realizar as simulações por maiores tempos a fim de atingir esse estado e poder-se então concluir de maneira mais assertiva acerca dessa eficiência.

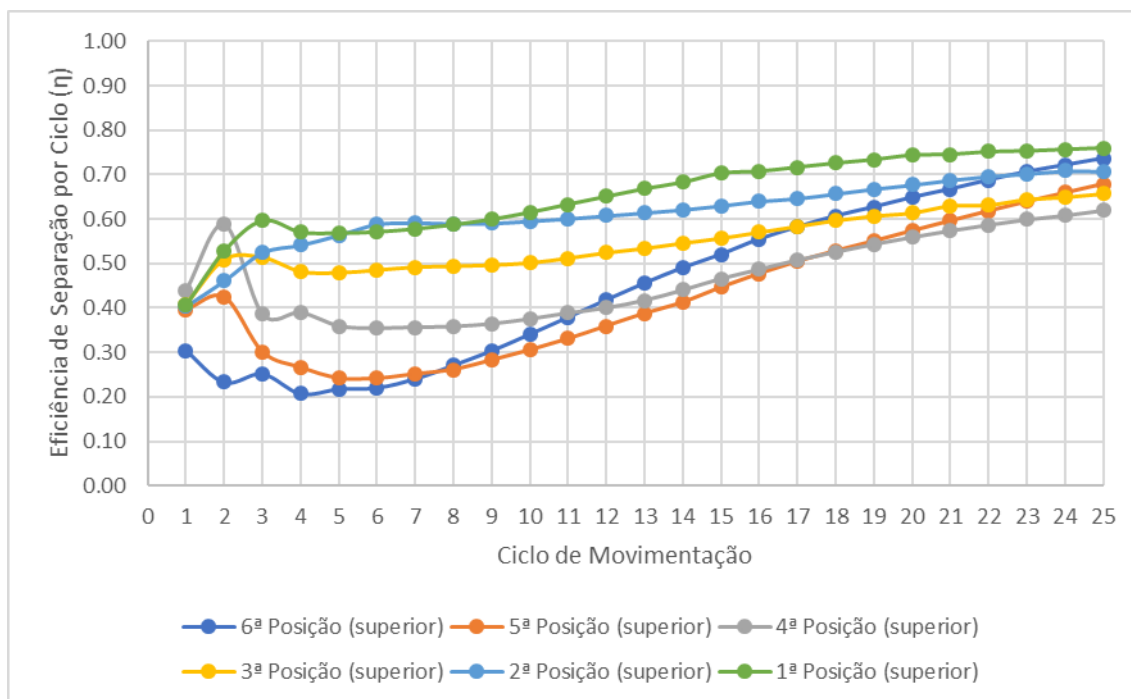


Figura 60 – Eficiência de separação por ciclo – Quebra-ondas nas posições superiores

Os valores numéricos para as eficiências de separação são apresentados na Tabela 15. Analisando globalmente todos ciclos simulados, nota-se que a configuração na posição mais próxima da região de entrada, na 1ª posição superior, foi a que se mostrou mais adequada para garantir uma maior separação da fase oleosa. Para o último ciclo essa posição também foi a mais eficiente, no entanto, percebe-se que a 6ª posição (superior), já se mostra como a segunda mais recomendada nesse caso. Como discutido anteriormente, não é possível tirar conclusões no que seria o estado estacionário, uma vez que dos intervalos dos 23º ao 24º ciclo e do 24º ao 25º ciclo, por exemplo, houve variação significativa da eficiência por ciclo para o caso com quebra-ondas na 6ª posição (superior). Possivelmente, essa configuração com o dispositivo mais próximo do vertedor poderia se mostrar mais eficiente para períodos mais longos, contudo, com os dados obtidos não é possível concluir a respeito.

Tabela 15 – Eficiências de Separação – Quebra-ondas nas posições superiores

Caso	Posição (X% vertedor)	Eficiência de Separação Global (η^{global})	Eficiência de Separação no Último Ciclo (η^{25})
6ª Posição (superior)	77,48%	0,3368	0,7360
5ª Posição (superior)	64,44%	0,3797	0,6795
4ª Posição (superior)	51,40%	0,4499	0,6197
3ª Posição (superior)	38,36%	0,4967	0,6576
2ª Posição (superior)	25,32%	0,5261	0,7073
1ª Posição (superior)	12,28%	0,5567	0,7599

4.2.1.2. Quebra-ondas nas Posições Inferiores

As vazões mássicas de água para a região acima do vertedor são mostradas na Figura 61, para as configurações com o quebra-ondas alocado na região inferior do equipamento. Percebe-se que, similarmente aos casos anteriores, conforme o dispositivo é alocado na região mais longe do vertedor, ou seja, nas primeiras posições, menor é a vazão mássica de água que sai do separador. Para a 1ª posição inferior, os ciclos finais são representativos de um estado periódico de amplitude e período constante; já para a 4ª posição inferior, por exemplo, o mesmo já não ocorre.

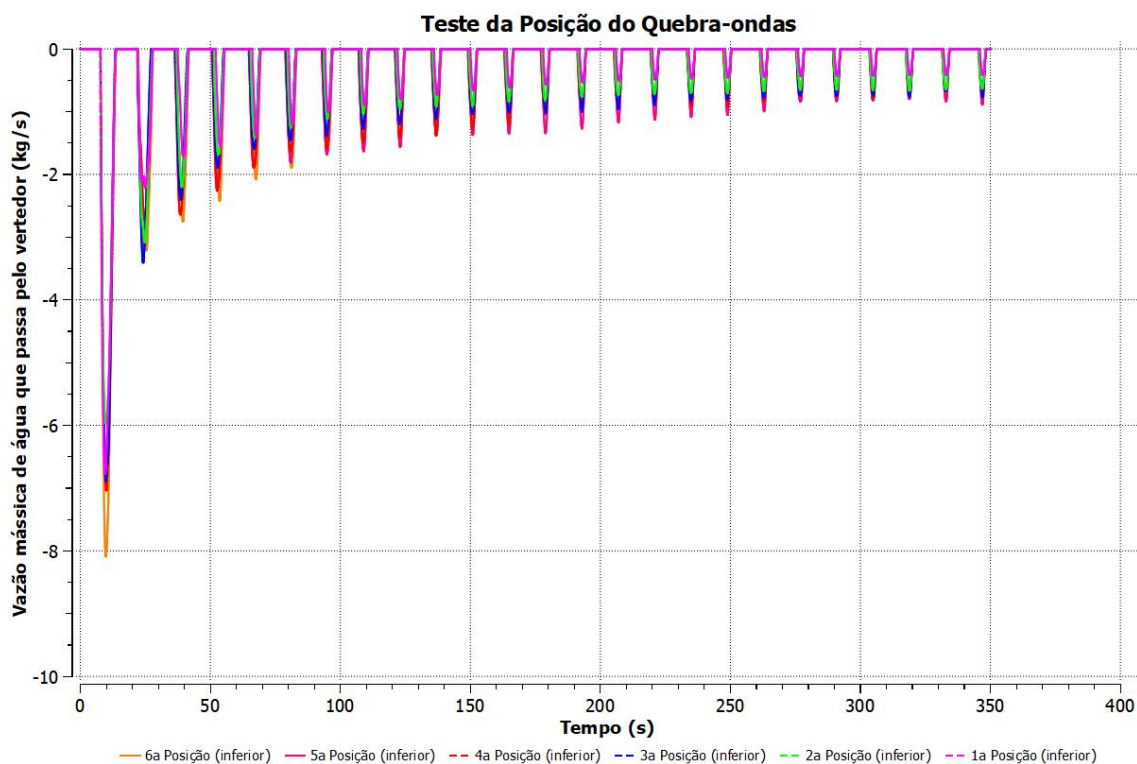


Figura 61 – Vazão mássica de água que passa pelo vertedor– Posições Inferiores – Quebra-ondas

Já para as vazões mássicas de óleo, disponíveis na Figura 62, observa-se uma maior estabilização da amplitude das curvas dessa variável ao longo dos ciclos finais. Também verifica-se que a posição do quebra-ondas impacta de fato na eficiência de separação do equipamento, havendo uma significativa variação das quantidades de óleo que passam pelo vertedor para as diferentes configurações testadas.

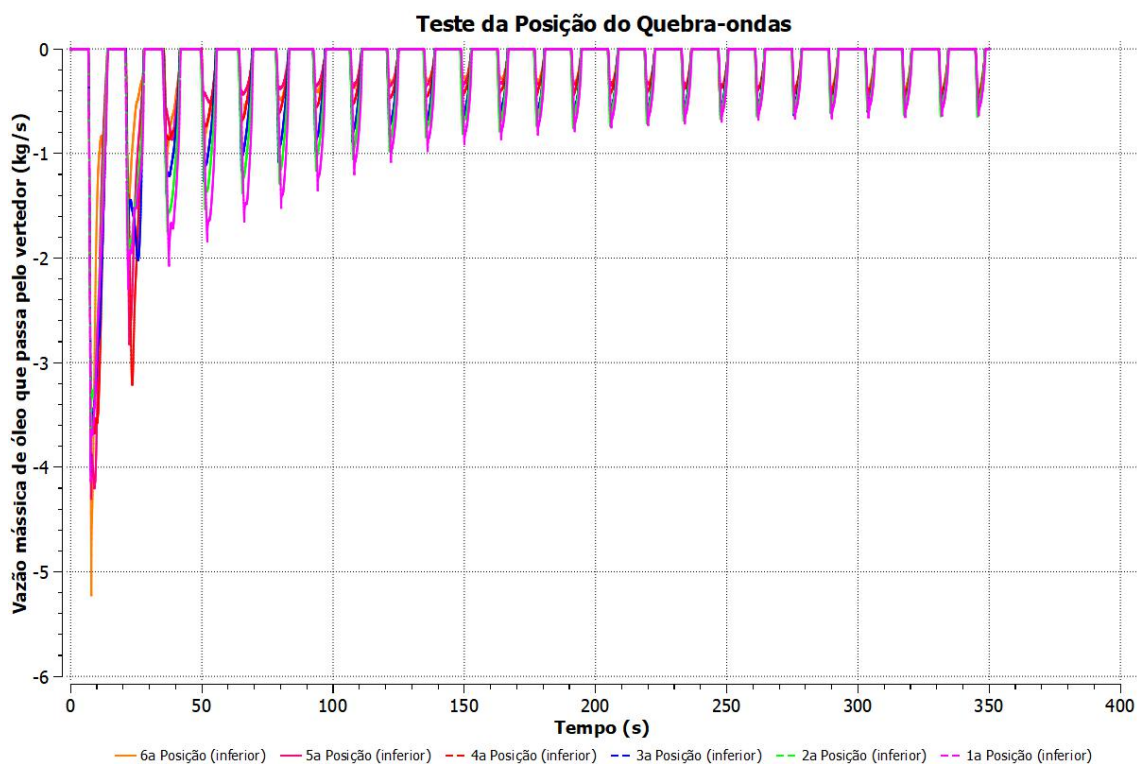


Figura 62 – Vazão mássica de óleo que passa pelo vertedor– Posições Inferiores – Quebra-ondas

As eficiências de separação por ciclo (η) são mostradas na Figura 63. Destaca-se que a configuração com o quebra-ondas na 1ª posição inferior foi a que obteve melhor performance de separação, sendo essa praticamente constante em torno dos 70%. Percebe-se que, assim como em casos anteriores, não há um comportamento claramente linear de acordo com a posição longitudinal dos *anti-sloshing baffles* com a pureza do fluido que passa pelo vertedor. Isto é, apesar de globalmente a última posição ter se mostrado a pior e a primeira posição ter sido a melhor, não necessariamente quanto mais afastado do vertedor maior é a produção de óleo. Isso pode ser visto ao se analisar o último ciclo, no qual a 6ª posição (inferior) se mostrou mais eficiente do que a 5ª posição (inferior).

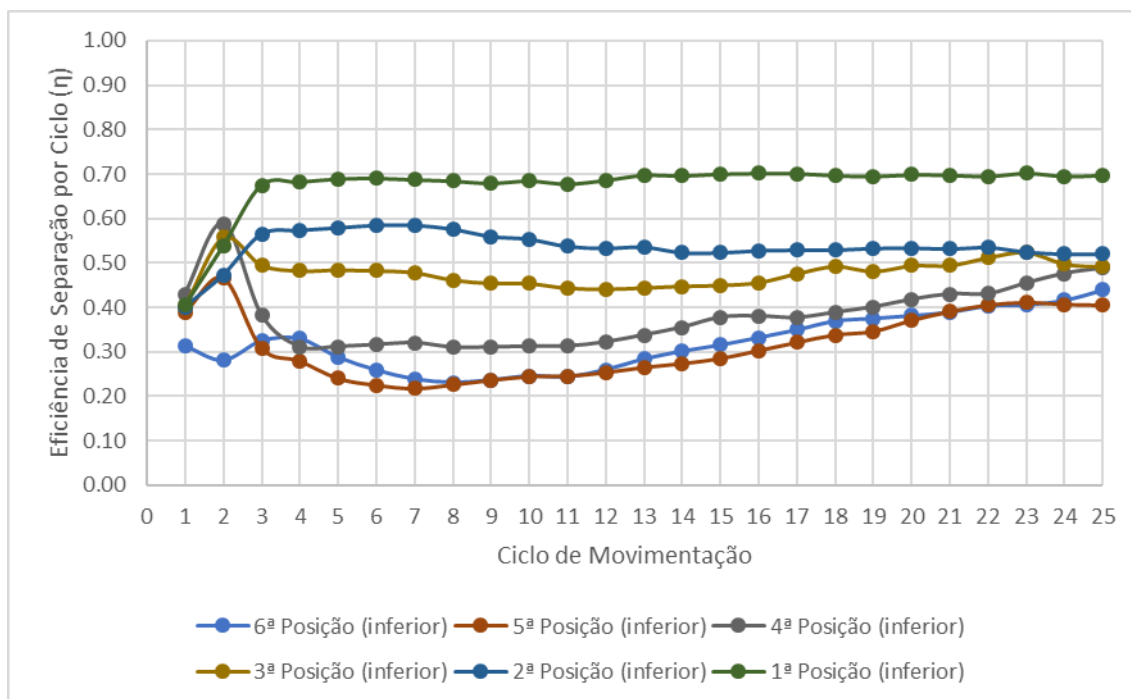


Figura 63 – Eficiência de separação por ciclo – Quebra-ondas nas posições inferiores

As eficiências de separação e seus valores numéricos são apresentados na Tabela 16. Avaliando os 25 ciclos simulados, percebe-se que de fato a primeira posição é a que possui melhor eficiência de separação. Analogamente ao caso em que se testou as posições superiores, a primeira posição foi a que se mostrou mais estabilizada ao final das simulações, sendo possível para esse caso assumir que um novo estado estacionário para essa variável foi obtido. Analisando-se o último ciclo, a mesma configuração se mostra a mais indicada, sendo possível observar uma diferença significativa entre esta e as demais posições, que no máximo atingem 52%, em comparação com cerca de 70% de eficiência de separação para a primeira posição do quebra-ondas. Novamente, não é possível assertivamente tirar conclusões sobre o estado futuro de operação do separador, uma vez que as variáveis não se estabilizaram suficientemente para todos os casos simulados.

Tabela 16 – Eficiências de Separação – Quebra-ondas nas posições inferiores

Caso	Posição (X% vertedor)	Eficiência de Separação Global (η^{global})	Eficiência de Separação no Último Ciclo (η^{25})
6ª Posição (inferior)	77,48%	0,3068	0,4398
5ª Posição (inferior)	64,44%	0,3359	0,4046
4ª Posição (inferior)	51,40%	0,4020	0,4882
3ª Posição (inferior)	38,36%	0,4648	0,4913
2ª Posição (inferior)	25,32%	0,5038	0,5201
1ª Posição (inferior)	12,28%	0,5839	0,6973

4.2.1.3. Comparativo - Quebra-ondas nas Posições Superiores, Inferiores e Ausência de Quebra-ondas

Para a configuração recomendada por Silva (2018), utilizada como referência na elaboração do Caso Base (separador tridimensional), dos Casos de Estudo (separador bidimensional) e demais testes da Etapa 1, avaliou-se comparativamente o efeito da posição superior em relação à inferior do quebra-ondas. Notou-se, observando a Figura 64, que o quebra-ondas na posição superior foi mais eficiente na promoção da separação do óleo produzido. Nesse caso, no entanto, não foi encontrada uma estabilização das curvas que permitisse tirar conclusões acuradas a respeito do estado estacionário dessa variável, o que limita a análise.

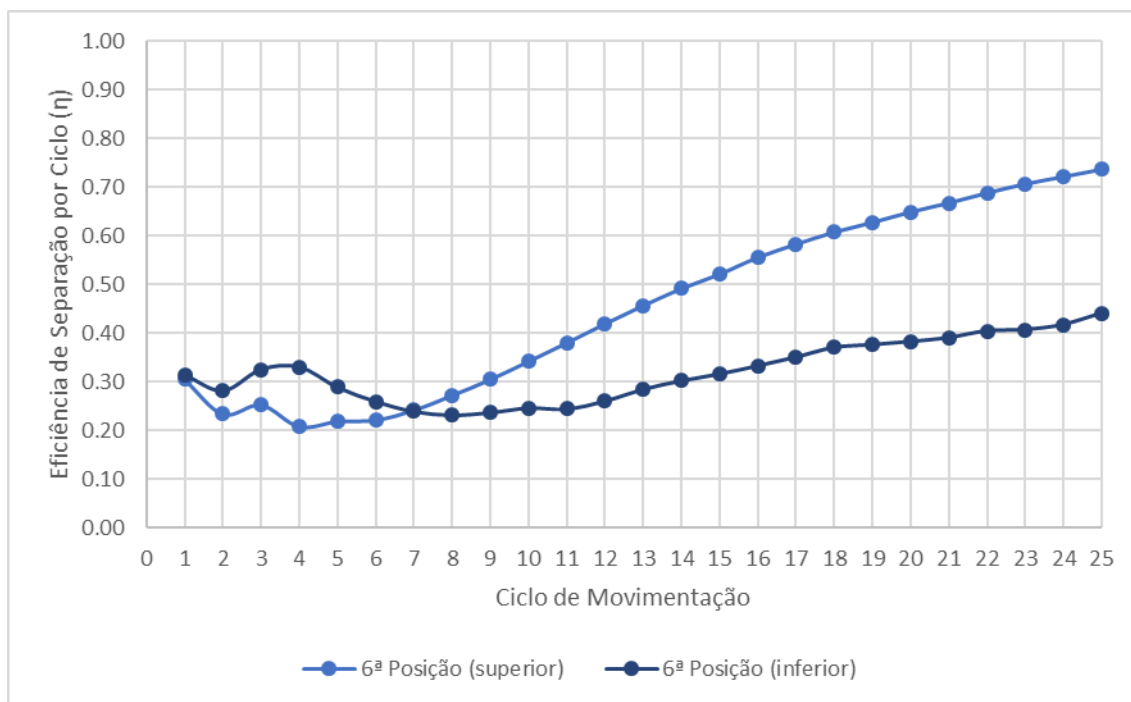


Figura 64 – Eficiência de separação por ciclo – Quebra-ondas nas posições mais próximas do vertedor

Adicionalmente, avaliaram-se as eficiências de separação para as melhores configurações obtidas – analisando o problema considerando a movimentação marítima como uma perturbação ao sistema, isto é, focando nos 25 ciclos inteiros – em comparação com uma configuração sem quebra-ondas. O comportamento obtido ao analisar essas eficiências por ciclo pode ser visto na Figura 65. Nota-se que, a depender do instante analisado, a configuração sem quebra-ondas é a que possui a melhor performance e, além disso, há uma inversão das curvas dos três casos ao longo do tempo total simulado. No geral, no entanto, a configuração com o quebra-ondas na posição superior se mostrou menos eficiente.

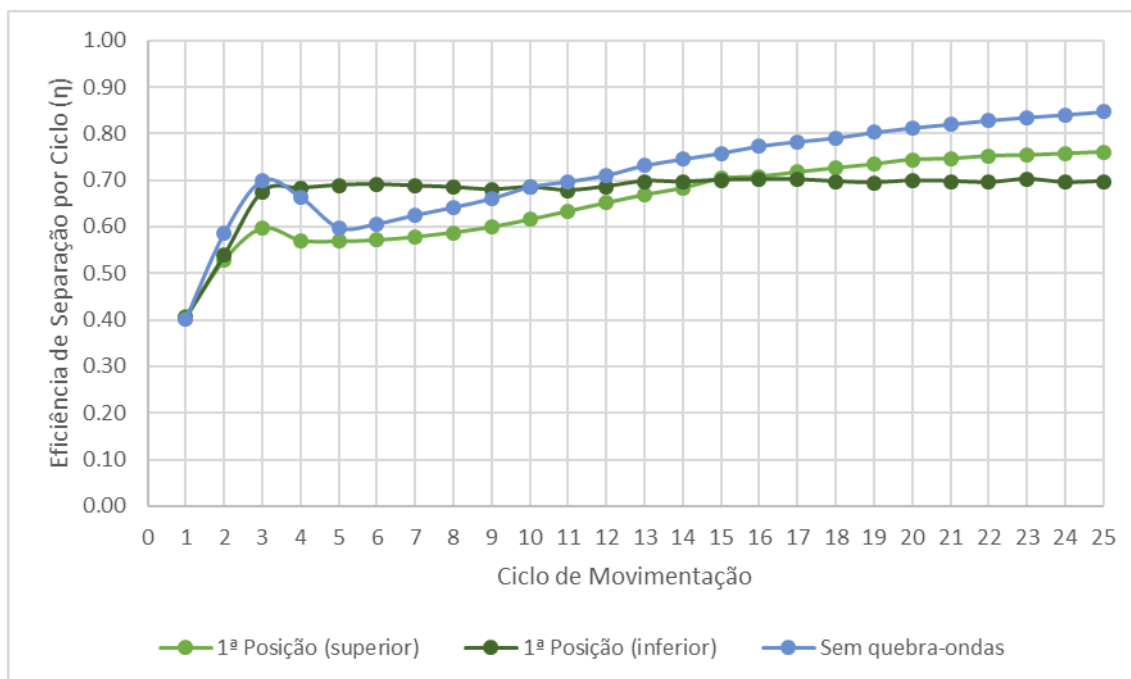


Figura 65 – Eficiência de separação por ciclo – Quebra-ondas nas posições mais próximas da região de entrada e na ausência de quebra-ondas

Os valores numéricos da eficiência de separação são disponibilizados na Tabela 17. Para a eficiência global, a configuração sem quebra-ondas foi a mais eficiente. Isso se explica por conta de, para a proporção crítica de água e óleo considerada (80% de água, em volume), a camada de óleo é relativamente fina. Ao passar pelo quebra-ondas superior, este oferece resistência ao escoamento do fluido que passa por ele e, nesse caso, boa parte desse fluido é o próprio óleo. Assim, a água tem passagem mais facilitada e pode mais facilmente ser vertida para a câmara de óleo. Analisando o caso oposto, isto é, com o quebra-ondas na posição inferior, nota-se que, apesar da água e óleo estarem completamente sujeitos a passagem pelo meio poroso, esse meio retém mais a passagem do óleo. Isso se dá pelo fato de o óleo ser significativamente mais viscoso, sendo assim, as forças inerciais apresentam papel mais relevante no escoamento desse fluido quando em comparação com a água. Esse efeito pode ser observado ao se analisar a menor espessura da camada de óleo na região após o quebra-ondas para ambos os casos em que ele é empregado, na Figura 66.

Nesse contexto, foi observado que o quebra-ondas comprometeu a eficiência do equipamento, para as condições estudadas. Porém, é importante ressaltar que esses dispositivos têm outras funções que não foram capturadas devido à modelagem multifásica utilizada. No modelo implementado, não há a consideração dos fenômenos

de quebra, coalescência e emulsão, bem como a formação de espuma. Essa última tem sua remoção facilitada quando se emprega quebra-ondas alocados na parte superior, sendo então uma função alternativa para esse dispositivo interno reportada por fabricantes – como no caso do dispositivo comercial *Mellaplate M* (SULZER, 2021), mostrado na Figura 12. Nesse caso o quebra-ondas, composto por um meio estruturado metálico corrugado, atua na quebra da película da espuma, reduzindo-a e, conseqüentemente, aumentando a interface líquido-gás, melhorando a separação dessas fases.

Tabela 17 – Eficiências de Separação – Quebra-ondas nas posições inferiores

Caso	Posição (X% vertedor)	Eficiência de Separação Global (η^{global})	Eficiência de Separação no Último Ciclo (η^{25})
1ª Posição (superior)	12,28%	0,5567	0,7599
1ª Posição (inferior)	12,28%	0,5839	0,6973
Sem quebra-ondas	-	0,6011	0,8467

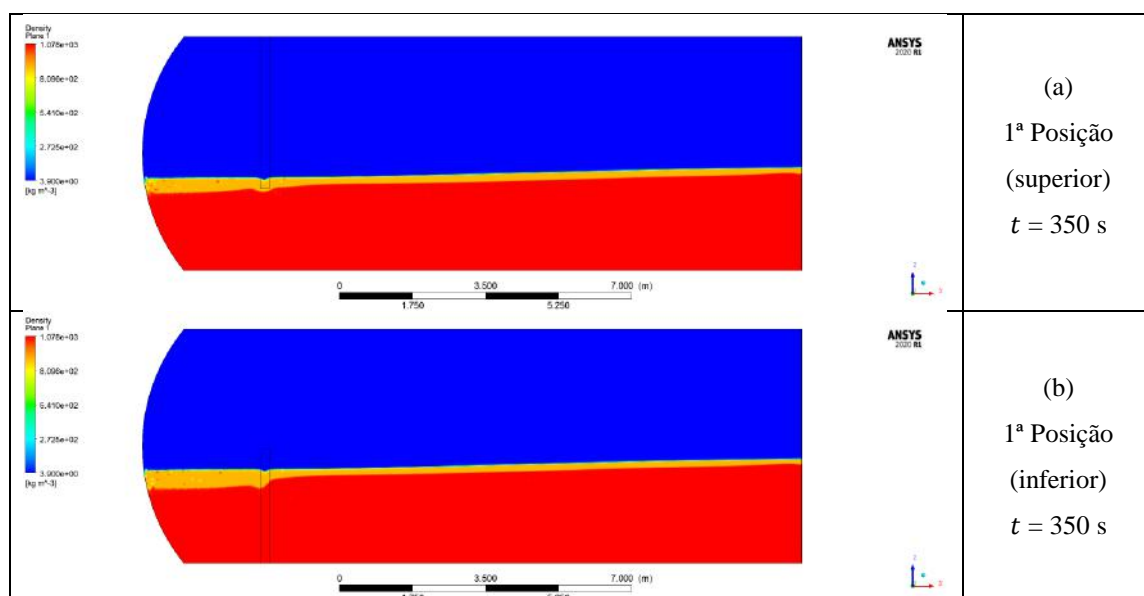


Figura 66 – Perfil de densidade e distribuição dos fluidos no plano central do equipamento. 1ª Posição (superior) $t = 350$ s; (b) 1ª Posição (inferior) $t = 350$ s;

4.2.2. Análise de Suavização da Movimentação da Interface Líquido-Gás

Considerando as 12 configurações de um único quebra-ondas no separador gravitacional trifásico e uma de referência sem a presença desse dispositivo, realizou-se a avaliação da posição da interface ao longo dos ciclos de movimentação. A variação

dessa posição ao longo do tempo pode ser vista na Figura 67. Verifica-se que praticamente todos os resultados são similares para essa variável.

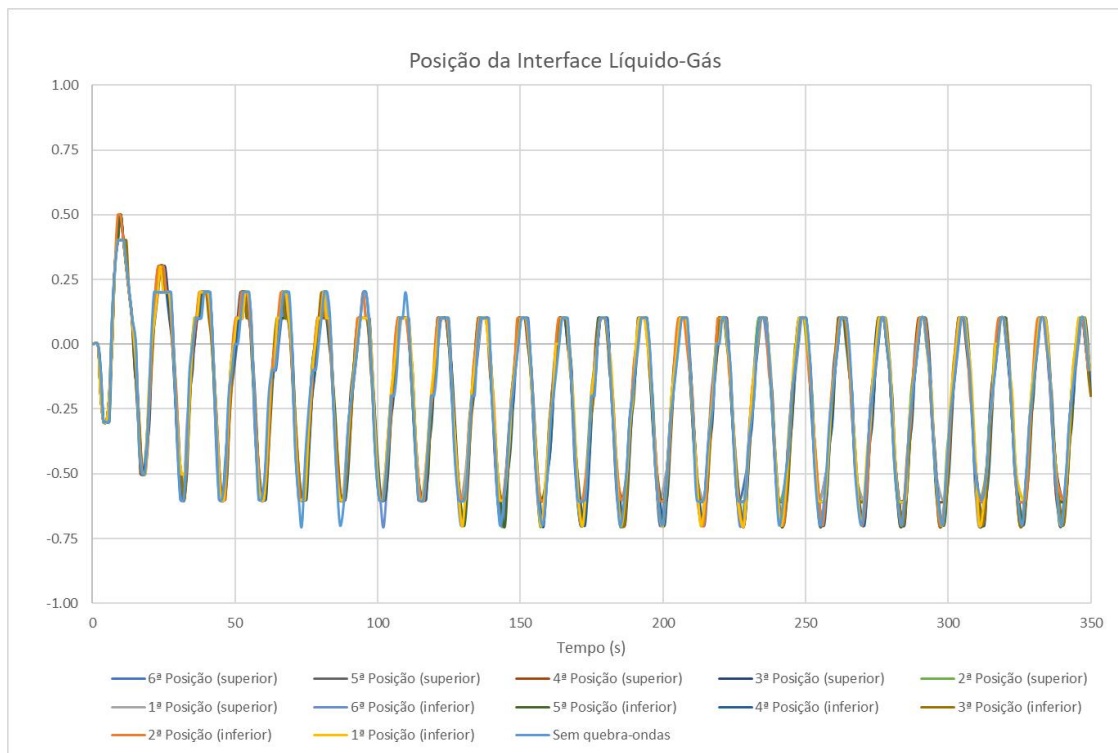


Figura 67 – Variação da posição da interface líquido-gás

Além disso, os resultados acima também contemplam a configuração sem quebra-ondas e, adicionalmente, avaliou-se os resultados de modo a se obter uma diferença percentual relativa do desvio padrão da posição da altura da interface líquido gás (h_{sd}) – ver Tabela 18. Nessa, nota-se que a variação das posições do quebra-ondas, sejam elas longitudinalmente ou verticalmente (posições superiores e inferiores), não impactam tanto na capacidade de suavizar a variação da posição da interface em um separador sujeito à movimentação marítima. Tanto analisando-se globalmente os 25 ciclos quando ao se avaliar o último, as diferenças relativas são pequenas. É válido destacar que, para essa variável, a premissa de obtenção de um estado periódico de amplitude e período constante pode ser adotada sem comprometer as análises.

Tabela 18 – Resultados da Análise de Suavização da Movimentação da Interface Líquido-Gás

Caso	Posição (X% vertedor)	Flutuação da Posição da Interface (h_{sd}^{global}) (m)	Diferença Percentual Relativa – 25 Ciclos	Flutuação da Posição da Interface (h_{sd}^{25}) (m)	Diferença Percentual Relativa – Último Ciclo
6ª Posição (superior)	77,48%	0,2679	-0,83%	0,2534	0,91%
5ª Posição (superior)	64,44%	0,2753	1,91%	0,2593	3,24%
4ª Posição (superior)	51,40%	0,2703	0,04%	0,2480	-1,25%
3ª Posição (superior)	38,36%	0,2710	0,31%	0,2500	-0,43%
2ª Posição (superior)	25,32%	0,2649	-1,93%	0,2443	-2,70%
1ª Posição (superior)	12,28%	0,2638	-2,33%	0,2508	-0,12%
6ª Posição (inferior)	77,48%	0,2695	-0,22%	0,2506	-0,22%
5ª Posição (inferior)	64,44%	0,2728	0,99%	0,2629	4,70%
4ª Posição (inferior)	51,40%	0,2789	3,26%	0,2725	8,50%
3ª Posição (inferior)	38,36%	0,2699	-0,11%	0,2597	3,40%
2ª Posição (inferior)	25,32%	0,2686	-0,55%	0,2486	-1,01%
1ª Posição (inferior)	12,28%	0,2663	-1,42%	0,2410	-4,02%
Sem quebra-ondas	-	0,2701	0,00%	0,2511	0,00%

A posição que mais se mostrou eficaz para suavizar a flutuação da interface líquido-gás foi a 1ª posição (inferior), com quebra-ondas na posição em cerca de 12% do comprimento medido entre a entrada e o vertedor. Porém, mesmo para esse caso, a diferença relativa encontra foi relativamente pequena, de apenas 4%.

Os resultados obtidos no Teste de Meio Poroso, por outro lado, mostraram que, utilizar um quebra-ondas na 6ª posição (superior), porém com um meio poroso de menor porosidade e menor permeabilidade, resulta em uma atenuação de h_{sd} de cerca de 30%, em termos de diferença percentual relativa. Portanto, o emprego de quebra-ondas menos porosos ou com maior grau de empacotamento é mais significativo para essa função do que alterar sua posição longitudinalmente.

5. CONCLUSÕES

5.1. CONCLUSÕES DO ESTUDO

O presente trabalho realizou uma avaliação da influência das configurações numéricas e posições de quebra-ondas (ou *anti-sloshing baffles*) em um separador gravitacional trifásico sujeito à movimentação marítima arfagem (*pitch*). Analisaram-se aspectos numéricos, tais como: condições de contorno, influência da modelagem da tensão superficial, dois diferentes meios porosos e 12 posições distintas para o dispositivo interno citado. Foram definidas variáveis de interesse de modo a permitir compreender o escoamento multifásico e a influência dos quebra-ondas em termos de dois principais aspectos: a eficiência de separação de óleo por ciclo de movimentação e a flutuação da posição da interface líquido-gás. Para tanto, foram realizadas simulações CFD no *software* ANSYS CFX 20R1.

Com os resultados obtidos, pode-se notar que os quebra-ondas impactam na capacidade de separação da mistura água-óleo. Para os casos testados, simulando uma condição crítica que representa o separador com 80% em volume de água, os quebra-ondas se mostraram prejudiciais para a separação, por reduzir a espessura de óleo na região próxima ao vertedor, favorecendo uma maior passagem de água. Ao se analisar todas as posições dos quebra-ondas englobando todos ciclos simulados, as mais próximas à região de entrada foram as que menos comprometeram a eficiência de separação do equipamento, onde esse teria atuação similar à placas distribuidoras de fluxo, no caso do emprego de quebra-ondas não-sólido de placas perfuradas.

Comparando quebra-ondas alocados na mesma posição longitudinal, porém montados na parte superior e na parte inferior do equipamento, observou-se que, para os 25 ciclos simulados, o dispositivo alocado na parte inferior se mostrou mais eficiente na separação líquido-líquido. Entretanto, nos ciclos finais, o quebra-ondas na posição superior foi mais capaz de promover a separação do óleo, indicando uma tendência do que seria o comportamento esperado ao se atingir um novo estado estacionário para essa variável.

O escoamento pela chicana quebra-ondas foi modelado com dois diferentes parâmetros de permeabilidade e porosidade para o meio poroso, recomendados por autores distintos. Um comparativo foi realizado e, concluiu-se que o quebra-ondas com 0,25 de porosidade e $1,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ de permeabilidade apresentou cerca de 30% de

diferença relativa com relação à sua capacidade de amenizar as flutuações do nível da interface líquido-gás, quando em comparação com o outro meio poroso simulado. Adicionalmente, essa capacidade também foi avaliada para as 12 posições de quebra-ondas, empregando outros parâmetros de porosidade e, concluiu-se que a posição não é um fator tão sensível para estabilizar a posição da interface e garantir um controle de nível de líquido adequado do equipamento. Caso esse seja o objetivo principal do emprego do quebra-ondas, é recomendável, com base nos dados obtidos, utilizar um *anti-sloshing baffle* sólido ou com menor porosidade e permeabilidade.

Para as simulações realizadas, verificou-se que a tensão superficial não é relevante para a eficiência de separação das fases aquosa e oleosa. Adicionalmente, concluiu-se também que o emprego de condições de contorno que envolvam a pressão hidrostática relativa à coluna de líquido exigem a implementação de um controle proporcional de pressão (*PP-Control*), a fim de evitar um fluxo reverso irrealista.

De maneira geral, observou-se que os quebra-ondas desempenharam negativamente na eficiência de separação do óleo em relação à água. Por outro lado, são fundamentais para atenuar as flutuações da interface líquido-gás quando o equipamento está sujeito à movimentação marítima. Nesse sentido, o emprego desses dispositivos se mostra de grande importância para garantir uma operação mais segura, evitando problemas operacionais por alarmes de nível baixo ou nível alto de líquido nessas situações.

O trabalho considerou uma condição crítica, com alta proporção de água no equipamento. É necessário ressaltar que os problemas relacionados a passagem de água pelo vertedor podem, com certas limitações, serem contornados pelo aumento da vazão na saída de água, diminuindo a posição da interface água-óleo. Além disso, é importante destacar que efeitos de quebra, coalescência das gotículas e de remoção de espuma não foram avaliados pela modelagem multifásica utilizada, sendo necessário uma investigação mais detalhada desse tipo escoamento e sua interação com essas chicanas para se obter conclusões mais assertivas acerca de sua empregabilidade.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõem-se:

- Realizar simulações por tempo suficiente para se poder tirar conclusões assertivas acerca do estado periódico de amplitude e período constantes – ou estado estacionário, a depender da variável analisada. Como referência, indica-se o trabalho de Le *et al.* (2019);
- Avaliar a utilização de mais de um quebra-onda com a porosidade de 0,40 e permeabilidade de $5,0E-07 \text{ m}^2$;
- Implementar condições de contorno que funcionem como controles proporcionais de pressão, de modo a emular o comportamento da lógica de controle de nível do equipamento em plantas reais;
- Avaliar outras variáveis de interesse, como, por exemplo, o volume de zonas de recirculação como indicativo da eficiência de separação, como reportado por Hussein *et al.* (2013), que testou diferentes posições de quebra-ondas. De maneira complementar, analisar as velocidades de sedimentação – reportada por Le *et al.* (2019) -, isto é, as velocidades na componente alinhada à força gravitacional para diferentes posições de chicanas quebra-ondas.
- Realizar experimentos em escala laboratorial ou piloto a fim de validar os resultados obtidos por simulações de fluidodinâmica computacional.
- Detalhar o escoamento sobre o dispositivo de entrada, seja esse do tipo ciclônico, placa defletora ou outro, de modo a produzir resultados mais fidedignos do comportamento real dos fluidos dentro do separador gravitacional
- Empregar mais dispositivos internos, tais como distribuidores de fluxo, placas perfuradas, placas coalescedoras, quebra-vórtices e extratores de névoa, a fim de tirar conclusões mais assertivas sobre o problema em questão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFP TECH. **Calming Baffles**, 2021. Disponível em: <<https://www.afptech.eu/en/products/tower-internals/calming-baffles>> Acesso em: 25 jul. 2021.

AKPAN, D.G. **Performance of Internals in Three-phase Separators**. Dissertation (Petroleum Engineering). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2013.

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

ANP. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**, 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/publicacoes/boletins-anp/producao/2020-06-boletim.pdf>>. Acesso em: 16 de set. de 2021.

ANSYS. **Ansys CFX-Pre User's Guide2020R1**: [s.n.], 2020.

ANSYS. **Ansys CFX Reference Guide2020R1**: [s.n.], 2020.

ANSYS. **Ansys CFX-Solver Manager User's Guide2020R1**: [s.n.], 2020.

ANSYS. **Ansys CFX-Solver Modeling Guide2020R1**: [s.n.], 2020.

ANSYS. **Ansys CFX-Solver Theory Guide2020R1**: [s.n.], 2020.

ANSYS. **Ansys Fluent Theory Guide 2020R1**: [s.n.], 2020.

ANSYS. **Ansys Meshing User's Guide2020R1**: [s.n.], 2020.

ANSYS. **Examples of Multiphase Systems**, 2009. Disponível em: <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node291.htm>> Acesso em: 12ago. 2021.

BHATTACHARYYA, R. **Dynamics of Marine Vehicles**. 1^a. ed. New York: John Wiley & Sons, 1978.

BRASIL, N. I. D.; ARAÚJO, M. A. S.; SOUSA, E. C. M. D. **Processamento de Petróleo e Gás**. 2^a.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BRENNEN, C. E. **Fundamentals of Multiphase Flows**. 1^a. ed. New York: Cambridge University Press, 2005.

BRACKBILL, J.U.; KOTHE, D.B. **A Continuum Method for Modeling Surface Tension**. July 1992. Journal of Computational Physics 100(2).

BRIDGES, S.; ROBINSON, L. **A Practical Handbook for Drilling Fluids Processing**. Houston, Texas. Gulf Professional Publishing, 2020.

BRITISH PETROLEUM. **Energy Outlook**, 2020. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>>. Acesso em: 5 de jun. de 2021.

BRITISH PETROLEUM. **Oil**, 2020. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/oil.html>>. Acesso em: 5 de jun. de 2021.

CARDOSO, R. P. **Termodinâmica de Materiais Sólidos / Termodinâmica dos Sólidos: Termodinâmica de Interfaces**, 2020. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TEM701/14_Termodin%20mica%20de%20interfases.pdf> Acesso em: 28ago. 2021.

CARVALHO, A. J. *et al.* **Modeling and Simulation of a Horizontal Three-Phase Separator: Influence of Inlet Flow**. Brazilian Journal of Petroleum and Gas: v. 14. p. 137-155. 2020.

CEN. K. *et al.* **Liquid Sloshing Suppression for Three-Phase Separators Installed on Floating Production Unit**. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering: v. 140 p. 041403-1 041403-15. 2018.

CLARK, M. E. Wave motion turbulence control in floating production systems. **Offshore**, June 1995.

COMSOL. **Modeling and Simulation of Multiphase Flow in COMSOL®: Part 1**, 2020. Disponível em: <<https://br.comsol.com/blogs/modeling-and-simulation-of-multiphase-flow-in-comsol-part-1/>> Acesso em: 28 jul. 2021.

COSTA, C. M. **Análise com Fluidodinâmica Computacional do Efeito do Movimento Angular Jogo na Eficiência de Separadores Gravitacionais**. Monografia (Engenharia Química) –Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014

DNV. **Energy Transition Outlook 2020 Oil and Gas – A global and regional forecast to 2050**, 2020. Disponível em: < <https://eto.dnv.com/2020>>. Acesso em: 3 de jun. de 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 5 de jun. de 2021.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3ª. ed. Berlin: Springer, 2002.

FINEPAC. **Oil & Gas Separator Internals**, 2021. Disponível em: <<http://finepacindia.in/pdf/OilGasInternals.pdf>> Acesso em: 28 jul. 2021.

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

HUSSEIN, A. H. **Numerical Model of Baffle Location Effect on Flow Pattern in Oil and Water Gravity Separator Tanks**. World Applied Sciences Journal 26 (10): 1351-1356, 2013.p.1351-1356. 2013.

IEA. **Global Energy Review 2020**, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>>. Acesso em: 5 de jun. de 2021.

KATOPODES, N. D. **Free-Surface Flow Computational Methods**. [s.n.] Elsevier Inc. Kidlington, Oxford.

KHAROUA, N. KHEZZAR, L. SAADAWI, H. **CFD Modelling of a Horizontal Three-Phase Separator: A Population Balance Approach**. American Journal of Fluid Dynamics 2013, 3(4): p. 101-118. 2013.

KLEIN, T. S. **Estudo de um Novo Modelo de Turbulência**. 2007. 204 f. Dissertação (Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

KIM, H; BURGESS, D.J. **Prediction of Interfacial Tension between Oil Mixtures and Water**. J. Colloid Interface Sci. 241 (2): p. 509–513. 2001.

KIMRAY. **4 Types of Three-phase Separator Vessel Design**, 2020. Disponível em: <<https://kimray.com/training/4-types-three-phase-separator-vessel-design>> Acesso em: 4 jul. 2021.

KUNERT, R. **Processamento Primário de Petróleo**. Rio de Janeiro: Universidade Petrobras, 2007.

KUN, L.S. **Anti-Sloshing Baffle Performance in Horizontal Cylindrical Separator Tank**. Dissertation (Mechanical Engineering). Universiti Sains Malaysia, Malaysia. 2017.

LALEH, A. P; SVCEK, W.Y; MONNERY, W.D. **Computational Fluid Dynamics-Based Study of an Oilfield Separator-Part I: A Realistic Simulation**. Society of Petroleum Engineers. Oil and Gas Facilities. p.57-68. December 2012.

LE, T.T. *et al.* **Effect of simultaneous three-angular motion on the performance of an air–water–oil separator under offshore operation**. Elsevier. Ocean Engineering 171 (2019): p.469-484. 2019.

LU, Y.; GREENE, J. **CFD Characterization of Liquid Carryover in Gas/Liquid Separator with Droplet Coalescence due to Vessel Internals**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 2009.

LYONS, W.C. **Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering**. Houston, Texas. Gulf Publishing Company, 1996.

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

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

NOGUEIRA, C. **Análise Experimental de um Separador Gás-Líquido Ciclônico**. Dissertação (Engenharia Mecânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013.

OLIVEIRA, D. S. T. **Otimização de um Hidrociclone para Separação de Esferas Ocas na Perfuração com Duplo Gradiente** 2004. 63 f. Monografia (Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

PACHPUTE, S. N. **Basics of Multi-Phase Flow and its CFD Modeling**, 2020. Disponível em: <<https://cfdflowengineering.com/basics-of-multi-phase-flow-and-its-cfd-modeling/>> Acesso em: 12ago. 2021.

PETROBRAS. **FPSO Cidade de Ilhabela**. Youtube, 21 nov. 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=ctNCF6gzCpc>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

PETROBRAS. **Tipos de Plataformas**, 2014. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html>> Acesso em: 8ago. 2021.

RVT. **Mist Eliminator**, 2020. Disponível em: <<https://rvtpe.net/mist-eliminator/>> Acesso em: 30 jul. 2021.

SADREHAGHIGHI, I. **Multiphase Flow**. CFD Open Series, Revision 1.85.1. 2021.

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

SECPO. **Separation Internals**, 2020. Disponível em: <<https://www.sepcoprocess.com/mist-eliminators-mesh-pad/>> Acesso em: 25 jul. 2021.

SILVA, P. A. **Análise com Fluidodinâmica Computacional da Influência de Quebra-ondas e Movimentações Marítimas na Eficiência de Separadores Gravitacionais Trifásicos em Plataformas Offshore**. Dissertação (Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

SIMMONS, M. J. H.; WILSON, J. A.; AZZOPARDI, B. J. **Interpretation of the flow characteristics of a primary oil-water separator from the residence time distribution**, 2002.

SOUZA, J. E. **Processamento Primário de Fluidos: Separação e Tratamento**. Programa Trainees Petrobrás. Curso de Engenharia de Petróleo Salvador: Universidade Cooperativa Petrobrás, 2004.

SPE-PETROWIKI. **Inlet**, 2021. Disponível em: <<https://petrowiki.spe.org/Inlet>> Acesso em: 25 jul. 2021.

STEWART, M.; ARNOLD, K. **Gas-Liquid and Liquid-Liquid Separators**. Burlington, Massachusetts. Gulf Professional Publishing, 2008.

SULZER. **Liquid-Liquid Separation Technology**, 2021. Disponível em: <<https://www.sultrade.cz/wp-content/uploads/2019/02/liquid-liquid-separation-technology.pdf>> Acesso em: 15 jun. 2021.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

VANDEN-BROCK, J.M.; KELLER, J.B. **Pouring flows**. Phys. Fluids 29. 1986.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. 2ª.ed. Harlow: Prentice Hall, 2007.

WILKINSON, D. et al. **Baffle Plate Configurations to Enhance Separation in Horizontal Primary Separators**. Chemical Engineering Journal, v. 77, p. 221 – 226, 2000.

WOLLNER, G.C. **Arranjos de Convés de FPSOs para Operação no pré-sal**. Monografia (Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2016

ZIKANOV, O. **Essential Computational Fluid Dynamics**. John Wiley & Sons, Inc., Canada, 2010.