



Simulação Numérica de um Separador
Gravitacional para a Segregação Óleo-Gás
em Plataformas de Produção de Petróleo

Renata Dias Ambrosio

Monografia em Engenharia Química

Orientador

Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Março de 2007

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM SEPARADOR GRAVITACIONAL PARA A SEGREGAÇÃO ÓLEO-GÁS EM PLATAFORMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Renata Dias Ambrosio

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Prof. Ricardo Pires Peçanha, Ph.D.

Dr. Raphael Moura Lopes Coelho, D.Sc.

Eng. Mauro de Moura Leite, M.Sc.

Orientador por:

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Rio de Janeiro – RJ, Brasil

Março de 2007

Ambrosio, Renata Dias.

Simulação numérica de um separador gravitacional para a segregação óleo-gás em plataformas de produção de petróleo / Renata Dias Ambrosio. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2007.

x, 69 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2007.

Orientador: Ricardo de Andrade Medronho.

1. Separação trifásica. 2. Petróleo. 3. Fluidodinâmica Computacional. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ricardo de Andrade Medronho I. Título.

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus pais, que mais do que meus melhores amigos, são os alicerces da minha vida.

Agradecimentos

Aos meus pais, que me aturaram muito nas horas de maior estresse, que brigaram muito comigo nas horas em que foi necessário, mas principalmente pelo apoio em todas as horas, sejam elas boas ou ruins, pelo amor incondicional, pela educação e pela oportunidade de crescer, chegar no lugar onde estou hoje e pela força para sempre seguir em frente.

Ao meu avô Moacyr, pelo grande carinho e amor dispensados a mim ao longo da minha caminhada.

A minha madrinha Rosa, pela grande amiga em que se tornou pra mim, pelo apoio e pelo carinho desde a minha mais tenra infância.

A meus amigos, principalmente Maíra, Patrícia, Tatiana, Michelle, Bruno, Gustavo, Aline Maria e Aline Cury, que me escutaram nas horas em que precisei, que me deram carinho e dividiram comigo muitos momentos de decepção e outros tantos momentos maravilhosos, de diversão ou apenas aqueles bons momentos de uma boa conversa jogada fora.

A meu professor, amigo e orientador Ricardo Medronho, pela oportunidade da realização deste trabalho e pela paciência em lidar comigo em todas as horas.

À todos os professores, funcionários da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, e à própria instituição, pela oportunidade única de estudo e crescimento pessoal e profissional.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM SEPARADOR GRAVITACIONAL PARA A SEGREGAÇÃO ÓLEO-GÁS EM PLATAFORMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Renata Dias Ambrosio

Março de 2007

Orientador: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D

Nas plataformas de produção de petróleo, o óleo tem de ser separado da água, areia e gás para ser armazenado e posteriormente enviado para o processamento em refinarias. A mistura proveniente do poço contendo óleo/água/gás (e eventualmente algum sólido como areia) é separada em separadores gravitacionais, que constituem o primeiro estágio de separação, e consistem em grandes vasos pressurizados que recebem a mistura. Normalmente, a emulsão é aquecida para diminuir sua viscosidade e melhorar a segregação das fases. A separação do gás é relativamente simples e, como o óleo é menos denso que a água, forma-se uma camada deste sobre a superfície daquela, ocorrendo, então, a separação das duas fases líquidas em câmaras distintas do vaso, delimitadas por um vertedor de óleo. Vários fatores podem influenciar na separação das fases e conseqüentemente na qualidade do óleo produzido, tais como turbulência, tendência de formação de espuma, temperatura e tempo de residência.

A técnica de fluidodinâmica computacional (CFD) é muito útil para o entendimento do funcionamento de um equipamento como esse, já que permite a simulação dos perfis de velocidade e de fração volumétrica de cada componente no interior do separador. No presente trabalho, o funcionamento do Separador de Produção da plataforma de petróleo Petrobrás-57 (P-57), ainda em fase de projeto, foi simulado com o pacote computacional CFX 10.0, sendo que, para a confecção da geometria e da malha, o Design Modeler e o CFX-Mesh foram empregados, respectivamente. O estudo visou simular o desempenho do separador para alguns anos da curva de produção dos poços, com o objetivo de analisar o funcionamento do equipamento em diversas condições de sua vida útil.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. SEPARADORES GRAVITACIONAIS	6
2.1. <i>O Projeto do Separador Gravitacional Trifásico</i>	11
2.1.1. <i>O Separador Propriamente Dito – Câmaras de Separação e de Óleo</i>	11
2.1.2. <i>Dispositivos Internos</i>	15
2.1.2.1. <i>Dispositivos ciclônicos de separação primária</i>	16
2.1.2.2. <i>Placa Defletora ou Placa Perfurada</i>	17
2.1.2.3. <i>Quebra-Ondas</i>	17
2.1.2.4. <i>Quebra-vórtice</i>	19
2.1.2.5. <i>Demisters ou eliminadores de névoa</i>	20
2.1.2.6. <i>Chicana de separação ou vertedor</i>	22
3. SIMULAÇÕES	24
3.1. Introdução	24
3.2. Geometria	27
3.3. Malha	32
3.4. Modelagem	36
3.5. Condições de contorno	38
3.6. Critérios de convergência, esquemas de solução e condições de inicialização	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1. Escoamento bifásico, geometria simples, ano 2011	44
4.2. Escoamento bifásico, geometria simples com o vertedor, utilizando-se como resultado inicial o escoamento bifásico com geometria simples, ano 2011	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do sistema de coleta, separação e bombeamento de óleo	3
Figura 2 - Microscopia de emulsão água-óleo.....	8
Figura 3 - Distância percorrida pela gotícula de água até a completa separação do óleo	11
Figura 4 - Separador de Produção em operação	15
Figura 5 - Dispositivos internos mais utilizados	16
Figura 6 - Exemplo de disco de recheio estruturado	18
Figura 7 - Movimentos da plataforma no mar	18
Figura 8 - Turbulência causada na superfície do líquido no separador, com e sem a presença de quebra-ondas	19
Figura 9 - Quebra-vórtex	20
Figura 10 - Eliminador de névoa do tipo <i>TP-Vane</i>	21
Figura 11 - Eliminador de névoa do tipo <i>Wire Mesh</i>	22
Figura 12 - Chicana de separação ou vertedor	23
Figura 13 - Níveis de interface e de óleo.....	24
Figura 14 - Medidas e distâncias entre os dispositivos internos do separador.....	25
Figura 15 - Geometria - Separador Simples	32
Figura 16 - Geometria - Separador com vertedor	32
Figura 17 - Malha da geometria simples	35
Figura 18 - Malha da geometria com o vertedor	35
Figura 19 - Perfil de pressão no caso bifásico estacionário, geometria simples (sem internos).....	45
Figura 20 - Fração volumétrica de óleo no caso estacionário bifásico, geometria simples	46
Figura 21 - Linhas de corrente do gás no caso estacionário bifásico, geometria simples	47
Figura 22 - Fração volumétrica de óleo na seção inicial do separador.....	48
Figura 23 - Fração volumétrica de óleo na seção média do separador.....	48
Figura 24 - Linhas de corrente de óleo no caso estacionário bifásico, geometria simples	49
Figura 25 - Linhas de corrente de óleo no caso estacionário bifásico, geometria simples	50
Figura 26 - Perfil de pressão no caso estacionário bifásico, geometria com vertedor ...	52
Figura 27 - Linhas de corrente do óleo, caso estacionário bifásico com vertedor	53
Figura 28 - Linhas de corrente de gás, caso estacionário bifásico na geometria com vertedor.....	53
Figura 29 - Fração volumétrica de óleo no caso bifásico estacionário, na geometria com vertedor.....	55
Figura 30 - Gráfico da fração volumétrica de óleo na seção inicial do separador	56
Figura 31 - Gráfico da fração volumétrica de óleo na seção média do separador.....	56
Figura 32 - Perfil de pressão no caso estacionário bifásico, geometria com vertedor...	58
Figura 33 - Pressão ao longo de uma linha vertical situada na região central do separador.....	58
Figura 34 - Linhas de corrente de óleo no caso bifásico transiente, geometria com vertedor.....	59
Figura 35 - Linhas de corrente de óleo no caso transiente bifásico, geometria com vertedor (vista lateral).....	60

Figura 36 - Plano central vertical do separador, com perfil de velocidade em forma de vetores.....	61
Figura 37 - Velocidade do óleo em função da altura, seção média do separador, caso bifásico transiente	62
Figura 38 - Fração volumétrica de óleo, para o caso bifásico transiente, na seção média do separador.....	63
Figura 39 - Fração volumétrica, para o caso bifásico transiente, seção inicial do separador.....	64
Figura 40 - Nível de óleo no separador, caso bifásico transiente	65
Figura 41 - Linhas de corrente de gás, caso bifásico transiente, geometria com vertedor	66

1. INTRODUÇÃO

Nas plataformas de produção de petróleo e gás natural, ambos os produtos passam por separações físicas para que possam ser processados em unidades terrestres, como refinarias e pólos petroquímicos. Tanto o petróleo como o gás natural têm de ser fornecidos para estas unidades dentro de uma especificação de concentração máxima de água e sais. Para isto, ambas as correntes passam por diversos sistemas, como o de separação gravitacional/eletrostática, bombeamento e armazenamento, no caso do óleo; e compressão, desidratação em colunas absorvedoras e envio para a terra através de gasodutos, no caso do gás natural.

O sistema principal de uma plataforma é o sistema de recebimento, separação e bombeamento de óleo. É através deste sistema que o óleo é separado do gás e da água produzida, e eventualmente separado também de alguma areia vinda do poço. Este sistema é composto de separadores gravitacionais trifásicos, pré-aquecedores e aquecedores; tratadores eletrostáticos e bombas de transferência de óleo para os tanques de carga do navio-plataforma, no caso de utilização de uma estrutura do tipo FPSO (*Floating, Production, Storage & Offloading*).

O óleo, ou melhor, a mistura água-óleo-gás e alguma areia são retirados dos poços e elevados, usualmente, com a ajuda de sistemas de injeção de água, de gás, *gas-lift* ou a utilização de bombas verticais de cavidade progressiva. As injeções de água e de gás feitas nos reservatórios de petróleo aumentam a pressão do reservatório, auxiliando na subida do óleo pelos *risers*. Já o sistema de *gas-lift* consiste em misturar gás ao petróleo na cabeça dos poços para que a densidade do óleo seja reduzida, facilitando também a subida

do fluido pelos *risers*. Cada opção de elevação do fluido dos poços deve ser analisada de acordo com a disponibilidade dos fluidos de elevação e também de acordo com o custo de cada alternativa para a construção da plataforma e o custo no produto final, neste caso, o petróleo. Dos poços, o fluido pode ser enviado a um separador de água livre, onde, como o nome já diz, é separada a água livre ou não-emulsionada e todo o gás livre, ou pode ser enviado diretamente aos pré-aquecedores, geralmente trocadores a placas que aproveitam o calor das correntes de óleo e de água produzida vindas do tratador eletrostático. Logo após, a emulsão passa pelo aquecedor de produção, de onde sai a cerca de 120°C, pronto para entrar no separador de produção, onde acontece a separação de parte da água emulsionada e de parte do gás dissolvido. Após o separador de produção, a emulsão restante é aquecida mais uma vez, no aquecedor de óleo, e então enviada, numa temperatura em torno de 140°C ao vaso de flash do tratador eletrostático, um separador bifásico que promove a separação entre a emulsão restante e o gás despreendido durante o aquecimento. Daí a emulsão flui para o tratador eletrostático, equipamento que finaliza a separação óleo-água, liberando uma corrente de água com um teor médio de 1000 ppm de óleo para tratamento em baterias de hidrociclones e posterior descarte ou reinjeção nos poços, e outra corrente de óleo que deve conter, no máximo, 1 % v/v de água em óleo, e que deve ser enviada para os tanques de carga da plataforma para posterior envio para as refinarias (Silva, 2004). Este processo está representado na Figura 1.

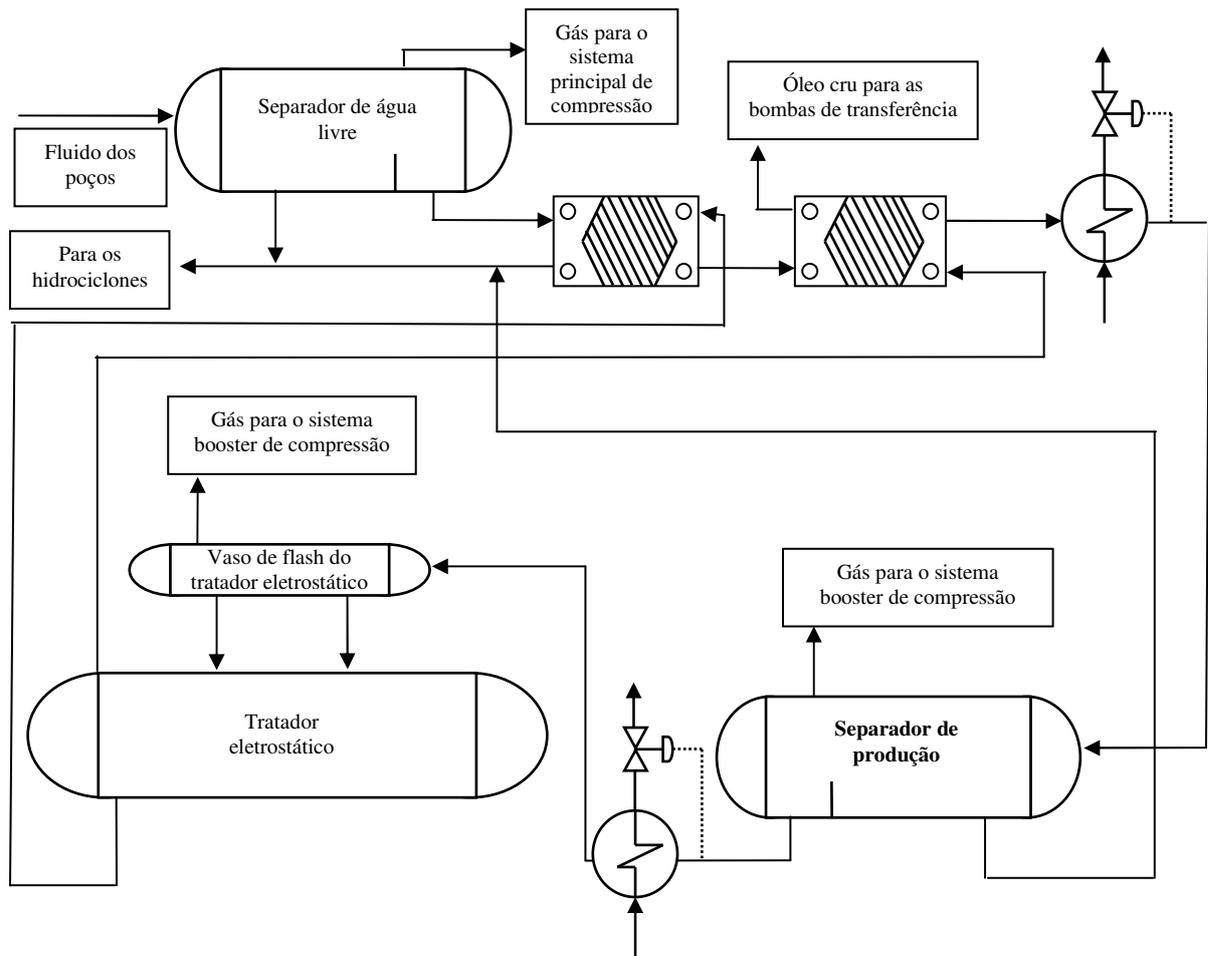


Figura 1 - Esquema do sistema de coleta, separação e bombeamento de óleo

Todo este trajeto de aquecimento e separação é necessário porque o óleo brasileiro de águas profundas é do tipo pesado, com graus API menores do que 20º, e também porque a porcentagem volumétrica de água e sais dissolvidos, ou BSW (*Bottom Sediments Water*), aumenta drasticamente ao longo da curva de produção dos poços.

Os separadores gravitacionais podem ter denominações diferentes, dependendo do objetivo da separação: se o objetivo for separar o máximo de água livre possível na temperatura e pressão de chegada do poço, o separador é chamado de separador de água livre; se o objetivo for a separação de água até um limite ideal para a separação eletrostática, o separador é denominado separador de produção; mas se o objetivo for estabilizar (“matar”) o óleo, ou

seja, separar o máximo de componentes leves do petróleo que evaporam na condição de pressão atmosférica (o que, na Engenharia de Petróleo, é considerado como “gás dissolvido”), usa-se então a denominação de separador atmosférico, que neste caso funciona como bifásico. Geralmente é usado mais de um tipo de separador, para combinar os efeitos de máxima separação de água e máxima separação de gás, antes da chegada no tratador eletrostático.

Os pré-aquecedores e aquecedores de produção são utilizados com o objetivo de diminuir a viscosidade dos fluidos do sistema, facilitando assim a separação de água e gás do óleo. A água vem, na sua maior parte, em emulsão com o óleo, portanto esta parcela é de difícil separação. O aumento de temperatura diminui a viscosidade desta emulsão, facilitando a sua quebra no separador gravitacional, que é posicionado a jusante de algum aquecedor. Outra função dos aquecedores é aumentar a liberação dos componentes leves do óleo através também do aumento de temperatura, com o objetivo de estabilizar o óleo. Os pré-aquecedores têm a função de economia de energia, pois fazem o reaproveitamento do calor das correntes de saída do tratador eletrostático, normalmente as correntes de processo mais aquecidas da plataforma.

Neste trabalho foi investigada a operação de um separador de produção através da técnica de simulação fluidodinâmica computacional. A motivação da escolha deste equipamento é o papel crucial do mesmo na plataforma: é ele que separa boa parte da água emulsionada no óleo e grande parte também do “gás dissolvido”, deixando assim a emulsão restante no ponto ideal para a separação eletrostática. Na separação eletrostática não pode haver uma grande quantidade de água, pois este equipamento pode entrar em curto se o

dispositivo elétrico do mesmo entrar em contato com a água. Então a performance do separador de produção tem de ser bem estudada, a fim de se comprovar a sua eficiência perante o serviço exigido. A técnica de CFD possibilita o estudo do escoamento dos fluidos em diversas condições de pressão e temperatura, e através deste estudo há a possibilidade de desenvolvimento de novos dispositivos internos que acelerem a separação óleo-água-gás. Há inclusive a possibilidade de otimização das dimensões do equipamento, já que este está entre os maiores da plataforma e um dos que mais demanda recursos para construção, manutenção e operação.

2. SEPARADORES GRAVITACIONAIS

No início da vida de um reservatório, há apenas a produção de óleo e gás, pois estas frações são as frações menos densas existentes no mesmo e são retiradas primeiro. Esta mistura, mesmo que o óleo seja pesado, dispensa a utilização de separadores trifásicos ou aquecimento da mistura a altas temperaturas, visto que só existiria a necessidade de retirada do gás. Porém, ao longo da vida útil de um poço, há também o início da produção da água junto com o óleo e o gás, e conforme se passam os anos da curva de produção de um campo, a água produzida sempre aumenta. Isto ocorre até se chegar ao limite máximo da exploração de um campo, determinado pela viabilidade econômica de produção do mesmo no fim da sua vida útil (grande custo de manuseio da água separada para a produção de quantidades ínfimas de óleo).

Quando um poço começa a produzir água juntamente com o óleo e o gás, há a necessidade de vários estágios de separação, bifásicos ou trifásicos, aquecidos ou não, dependendo da quantidade de água e gás agregados ao óleo e da viscosidade do fluido.

O gás pode vir associado ao óleo de duas formas: na forma livre, onde o fluxo é bifásico, no caso de mistura de óleo e gás, ou trifásico, no caso de óleo, gás e água; e na forma “dissolvida” (que, na realidade, não é gás dissolvido, e sim parte dos componentes mais leves do óleo que se desprendem em determinadas condições), onde a mistura não atingiu as condições de pressão e temperatura necessárias para a liberação de uma quantidade significativa de gás. Neste caso o fluxo é monofásico, no caso da fração mais leve do óleo não desprendida, e bifásico, no caso dos componentes leves não desprendidos do óleo e do gás dissolvido em água. O gás é de liberação relativamente fácil,

(considerando-se a liberação de gás de um óleo não muito viscoso), pois é muito menos denso do que o líquido. Somente com um aumento de temperatura ou diminuição de pressão, grande parte do gás já é liberada.

Já a água pode vir associada ao óleo de três formas distintas: na forma livre, na forma de emulsão e na forma solúvel. A forma livre é a de mais fácil separação, e pode ocorrer em duas situações: quando a quantidade de água misturada com o óleo é tão grande que parte dessa água não tem tempo e não passa por turbulência suficientes para formar uma emulsão, por exemplo, a mistura de fluidos na subida do poço, quando do final da curva de produção do mesmo, onde a quantidade de água produzida é aumentada; ou então quando uma emulsão de água e óleo é mantida completamente em repouso durante um tempo suficientemente longo para que haja separação das fases, mesmo que parcial. No caso de um sistema de separação em plataformas, pode existir, logo no início do processo, um **separador de água livre**, que é responsável pela separação dessa parte da água que não teve tempo suficiente para ter um contato mais íntimo com o óleo no reservatório para formar uma emulsão mais severa.

A forma solúvel é a forma de mais difícil separação, pois esta só é possível por meio de destilações. Porém, é a forma mais rara de apresentação da água associada ao óleo, pois a solubilidade da água em óleo é extremamente pequena, sendo considerada quase sempre como desprezível.

A formação de emulsões água-óleo em reservatórios de petróleo, tubulações e equipamentos que operam em uma plataforma é uma das coisas mais comuns, pelo excesso de contato entre água e óleo e turbulência envolvidos nessas operações. A dificuldade de separação das emulsões de

água e óleo pode ser variada, dependendo do tipo de emulsão formada, que por sua vez depende da densidade do óleo envolvido, da quantidade de água emulsionada e da quantidade de gás dissolvido. Quando há a mistura de óleo pesado, água dispersa em gotículas de tamanho reduzido e gás dissolvido, ocorre a formação do que se chama comumente de óleo “vivo”, que possui um valor de viscosidade acima do esperado para o tipo de óleo envolvido. Uma foto da microscopia de uma emulsão é apresentada na Figura 2.

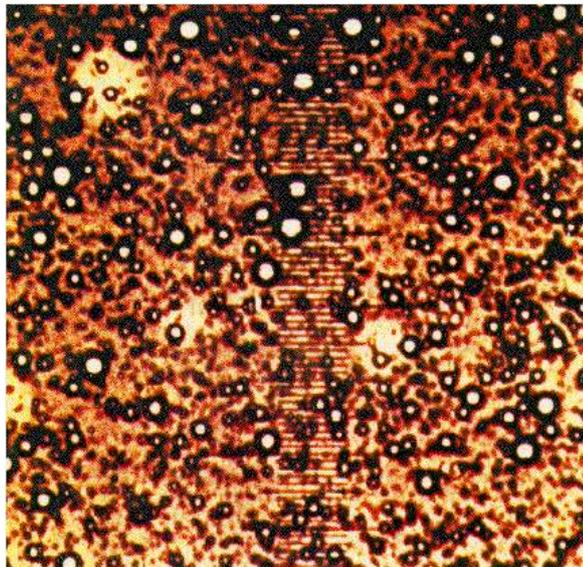


Figura 2 - Microscopia de emulsão água-óleo

Este tipo de emulsão requer uma separação muito mais difícil, que envolve, além da separação trifásica com um tempo de residência alongado, um pré-aquecimento para que haja quebra da emulsão (pela diminuição da viscosidade do fluido e pela liberação de parte do gás dissolvido) e até uma etapa posterior de **tratamento eletrostático**. Nesta última, ocorre a separação quase que total da água restante no óleo, que seria responsável pela parte mais severa da emulsão. É nessa etapa que são necessárias as temperaturas mais altas (em torno de 140 °C) e a utilização de grande quantidade de energia

elétrica, para a formação do campo eletrostático que será responsável pela atração e conseqüente coalescência das gotículas de água dispersas em óleo. Mais um fator que pode facilitar a separação óleo-água é a adição de desemulsificante na mistura, um aditivo químico que atua de modo a reduzir a tensão interfacial água-óleo, a ponto de permitir a coalescência das gotas de água emulsionadas (Lopes et al).

Seria mais simples se toda a água emulsionada pudesse ser separada por meio do tratamento eletrostático, porém seria necessário um equipamento e uma quantidade de energia elétrica muito maiores, o que levaria a excessivos custos de construção, manutenção e operação, inviabilizando qualquer tipo de projeto. Assim, antes da etapa de tratamento eletrostático, é adotada uma etapa intermediária após a separação da água livre, que é representada por uma segunda separação gravitacional trifásica com o auxílio do aumento de temperatura e da diminuição da pressão, facilitando a separação de mais uma parte da água e do gás, e preparando o fluido para o tratamento eletrostático. É neste ponto que chega-se **ao separador de produção**, que tem a função de separar, com o auxílio de um pré-aquecimento e da diminuição da pressão pela perda de carga do fluido nas tubulações e equipamentos a montante do separador de água livre, grande parte da água emulsionada de forma leve e moderada, especificando assim o fluido para a operação do tratador eletrostático. Como já citado anteriormente, o separador de água livre não é capaz de separar a água emulsionada, ou seja, é capaz de separar apenas a água que não teve um contato íntimo com o óleo para que houvesse a formação de emulsão. Por sua vez, o tratador eletrostático não é capaz de separar toda a água emulsionada, pois seria necessário um

equipamento de dimensões muito maiores do que as mesmas já são, e uma enorme quantidade de energia elétrica, inviabilizando qualquer sistema de separação de óleo. Desta maneira, o separador de produção torna-se crucial para a operação de um sistema de separação. Este equipamento cumpre a função que nenhum dos outros é capaz de cumprir, que é a separação de uma grande quantidade de água, emulsionada de forma leve e moderada, em condições moderadas de pressão e temperatura e sem o auxílio de energia elétrica, além da separação do gás.

Esta necessidade de separação da emulsão água-óleo existe por diversos motivos. O principal motivo é o enquadramento do óleo em quantidades aceitáveis de água e sais dissolvidos para posterior processamento nas refinarias. Existem outras razões também, como dificuldades na operação e manutenção de bombas e trocadores. Como a viscosidade se torna muito alta, aumenta-se a quantidade de energia necessária para o bombeamento desses fluidos pelo aumento excessivo da perda de carga em tubulações; nos trocadores, além do problema da alta perda de carga, há também a perda de eficiência de troca térmica, devido à diminuição da turbulência, levando a projetos de trocadores com áreas maiores que o necessário para o serviço exigido. Além disso há o significativo problema da corrosão e incrustação em dutos e equipamentos. É na água que os principais agentes corrosivos, como cloretos e sulfetos, e agentes incrustantes, como sulfatos e carbonatos, estão solubilizados, causando danos às vezes irreparáveis nas tubulações de óleo. Assim, quanto menos água em contato com o óleo, menor o risco de corrosão e incrustação nas tubulações destinadas exclusivamente ao escoamento deste último.

2.1. O Projeto do Separador Gravitacional Trifásico

Os separadores gravitacionais trifásicos têm como objetivo separar do óleo cru as gotículas de água pela ação do campo gravitacional, dentro de um determinado tempo de residência da emulsão no interior do equipamento. Estes equipamentos são compostos de câmara de separação água / óleo / gás e câmara de óleo, separadas por um vertedor, além de outros dispositivos internos que têm a função de facilitar a separação água-óleo e / ou coalescer gotículas ou névoas de líquido do gás a ser enviado para o sistema de compressão.

2.1.1. O Separador Propriamente Dito – Câmaras de Separação e de Óleo

A separação pela ação gravitacional segue a Lei de Stokes, que relaciona a velocidade terminal de uma partícula, no caso gotículas de água, com o campo gravitacional, o diâmetro da partícula e propriedades físicas da partícula e do meio em que a mesma está inserida, para escoamento do tipo laminar. A Lei de Stokes é apresentada na Equação (1):

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

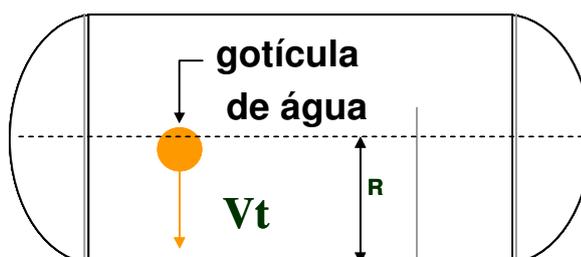


Figura 3 - Distância percorrida pela gotícula de água até a completa separação do óleo

Onde V_t é a velocidade terminal das gotículas, g é a aceleração gravitacional, $\rho_{\text{água}}$ é a densidade das partículas de água, $\rho_{\text{óleo}}$ é a densidade do óleo que emulsifica as partículas de água e μ é a viscosidade do mesmo.

Através de microscopia da emulsão, representada na Figura 2, com o óleo do campo a ser explorado recém-tirado dos poços, é possível determinar uma distribuição de tamanhos das gotículas de água emulsionadas, e assim determinar um diâmetro médio que será usado para o projeto do separador. Através de testes experimentais é possível a obtenção das propriedades dos fluidos, ou seja, suas densidades e viscosidades, e assim têm-se todos os parâmetros necessários para a descoberta da velocidade terminal das partículas de água imersas em óleo.

A velocidade terminal relaciona o tempo de residência das gotículas de água com a distância percorrida pelas mesmas até a completa separação do óleo, que, para fins de simplificação do projeto, é considerada como sendo a distância entre o centro do separador até o fundo do mesmo, ou seja, o raio do separador, como mostrado na Figura 3. Este tempo de residência pode ser determinado em testes experimentais simples para a medição do tempo médio em que a máxima quantidade de água pode ser separada do óleo do campo em exploração. É importante observar que estes testes têm de ser repetidos para cada campo explorado, pois as propriedades e a composição do óleo de diferentes campos é também diferenciada. Para os óleos brasileiros, com API < 19º, o tempo médio de residência encontrado nos testes varia entre 10 e 12 minutos, dependendo da severidade da emulsão, e das condições de operação do separador.

Obtendo-se o tempo de residência, pode-se obter o diâmetro do separador levando-se em conta a expressão mostrada na Equação (2):

$$D = 2 \cdot V_t \cdot TR \quad (2)$$

Onde D é o diâmetro do separador, V_t é a velocidade terminal das partículas de água e TR é o tempo de residência médio para a máxima separação das gotículas de água do óleo.

O comprimento do separador é determinado através da relação LTT/D, que é a relação entre o comprimento entre as tangentes do vaso (sem os tampos) e o diâmetro, e usualmente é considerada como sendo em torno de 3 – 3,5. Na Figura 4 é mostrada uma foto de um separador gravitacional real.

O pré-aquecimento do fluido de entrada do separador se torna evidentemente importante através da própria equação de dimensionamento do separador (Equações 1 e 2), pois quando há o aumento de temperatura, a diferença de densidade dos líquidos tende a diminuir, porém a viscosidade diminui numa taxa maior que a da diminuição da densidade. Assim, a separação é melhorada, pois a velocidade terminal das gotículas de água dispersas aumenta. Este é um dos meios de otimização das dimensões de um separador, pois se não houvesse o pré-aquecimento as dimensões necessárias para um mesmo nível de separação, em valores menores de temperatura, seriam muito maiores.

Outra maneira de dimensionar um separador gravitacional, mais simples, pois não há a necessidade do conhecimento do diâmetro das partículas de

água, é através do conhecimento das vazões de gás e de líquido (óleo + água), de acordo com a expressão mostrada na Equação (3):

$$\frac{K1 * \frac{K2}{100} * \pi * (\frac{D}{1000})^3}{4} - \frac{K2 * \pi * (\frac{D}{1000})^2 * LCAM}{4000} - \frac{QLIQMAX * TRL}{1440} = 0 \quad (3)$$

Onde:

- QLIQMAX é a vazão volumétrica máxima de líquido (óleo + água), em m³/d;
- TRL é o tempo de residência do líquido, em min;
- K1 é a razão LTT/D;
- K2 é a área ocupada pelo líquido, em %. Geralmente é escolhido o valor de 50%, para que o nível normal de líquido operacional seja em torno do centro do separador;
- D é o diâmetro do separador a ser calculado, em mm;
- LCAM é o comprimento da câmara de óleo, variável definida pelo projetista, em mm;

A câmara de separação é dimensionada de acordo com o comprimento da câmara de óleo (LCAM) e o comprimento do vaso entre tangentes (LTT), de acordo com a Equação (4)::

$$LSEP = LTT - LCAM \quad (4)$$



Figura 4 - Separador de Produção em operação

2.1.2. Dispositivos Internos

Como dito anteriormente, os dispositivos internos adotados para um separador gravitacional atuam de forma a facilitar a separação água-óleo e / ou a extração de gotículas de líquido presentes no gás a ser enviado ao sistema de compressão. Os dispositivos internos comumente usados são os ciclones internos, as placas perfuradas, os quebra-ondas, os quebra-vórtice, os *demisters* ou eliminadores de névoa e de gotículas e os sistemas de fluidização de areia, caso haja produção de areia no vaso separador. Estes são dispositivos facultativos, podem estar presentes ou não. O único dispositivo obrigatório para um separador trifásico é a chicana de separação ou vertedor, que é responsável pela contenção da água separada, enquanto o óleo é vertido por sobre a chicana, sendo recolhido na câmara de óleo. Os dispositivos internos mais usados de um separador gravitacional trifásico estão representados na Figura 5. A seguir, uma breve descrição destes dispositivos internos relacionados.

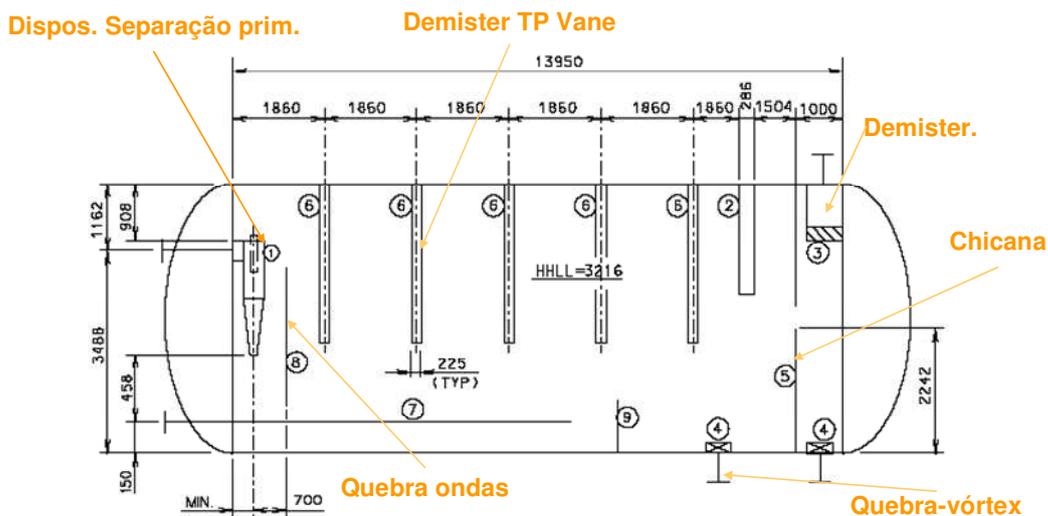


Figura 5 - Dispositivos internos mais utilizados

2.1.2.1. Dispositivos ciclônicos de separação primária

Este dispositivo é composto de um conjunto de ciclones largos, ou seja, com uma relação largura / altura maior do que o normal. Este dispositivo tem o mesmo funcionamento e finalidade de uma bateria de ciclones comum, que é a separação sólido-líquido, sólido-gás ou líquido-gás, em que a fase contínua é o líquido e o gás nas duas últimas separações, respectivamente. No caso do separador gravitacional, a fase contínua geralmente é o gás, que usualmente se apresenta em vazões volumétricas maiores que as da fase líquida, denominada então de fase dispersa. Através da aceleração centrífuga do fluido dentro dos ciclones e da interceptação das gotículas pelas paredes, grande parte do líquido já é separada do gás livre neste dispositivo. Outro benefício é também a quebra de espuma eventualmente formada a montante do equipamento, o que facilita a operação e o projeto do mesmo. Os efeitos nocivos de altos valores de viscosidade já foram discutidos anteriormente e a espuma que eventualmente é formada nas tubulações de óleo tem efeitos parecidos, contribui para a má-separação água-óleo e ainda pode ser um

facilitador da ressuspensão de minúsculas partículas de líquido no gás, formando névoas de difícil remoção.

2.1.2.2. Placa Defletora ou Placa Perfurada

A placa perfurada tem a finalidade de diminuir a turbulência do líquido na entrada do separador, logo após a saída de líquido do dispositivo ciclônico de separação primária, distribuindo o fluxo radialmente no equipamento e evitando a formação de caminhos preferenciais. Como o líquido sai da bateria de ciclones em forma de jato, a tendência de aumento de turbulência na superfície do líquido escoando na câmara de separação é grande. Dificulta-se assim a separação água-óleo, uma vez que o aumento de turbulência aumenta o contato entre a fase oleosa e a aquosa, aumentando ainda mais a severidade da emulsão ao invés de diminuí-la. A placa perfurada funciona como uma barreira ao escoamento do fluido, diminuindo a sua velocidade e por conseqüência diminuindo sua turbulência, contribuindo para a melhoria da separação da emulsão.

2.1.2.3. Quebra-Ondas

Os quebra-ondas são pedaços de discos feitos de recheio estruturado, afixados na parte superior do separador e distribuídos em distâncias uniformes no interior do equipamento ao longo do comprimento do mesmo. Ficam parcialmente mergulhados no líquido e têm também a finalidade de acalmar o fluxo, diminuindo a turbulência e facilitando a separação da emulsão, como mostrado na Figura 8. Neste caso a turbulência é gerada pelos movimentos da plataforma no mar, ilustrados na Figura 7, que também são um fator nocivo à

operação de todos os equipamentos da planta de processo na plataforma, porém impossíveis de serem controlados ou eliminados. Os quebra-ondas funcionam também como barreiras, quebrando as ondas que se formam na superfície do líquido devido ao movimento do equipamento. Na Figura 6 tem-se um exemplo de disco de recheio estruturado.



Figura 6 - Exemplo de disco de recheio estruturado

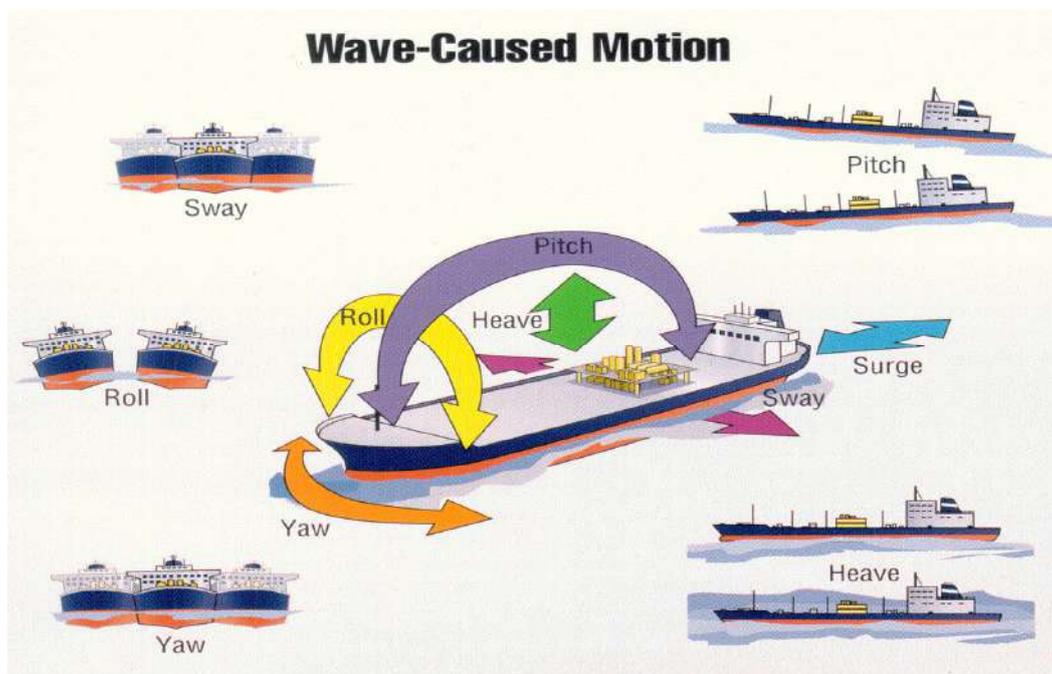


Figura 7 - Movimentos da plataforma no mar

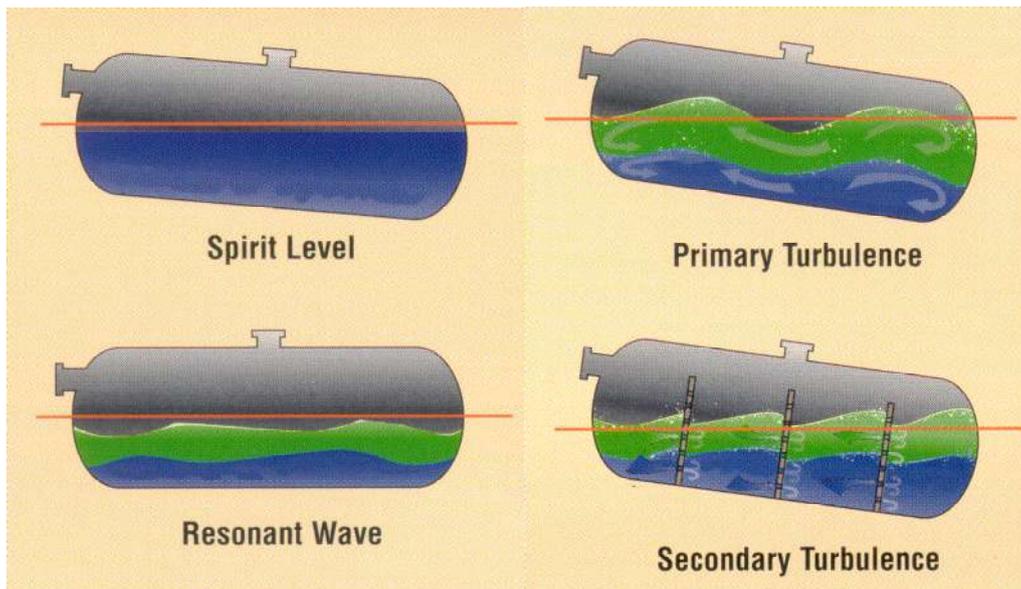


Figura 8 - Turbulência causada na superfície do líquido no separador, com e sem a presença de quebra-ondas

2.1.2.4. Quebra-vórtice

O quebra-vórtice é um dispositivo que funciona como uma barreira ao fluxo de saída de água e de óleo, instalado em cada um dos bocais de saída de líquido, para que não seja formado o vórtice central no bocal. Este fenômeno de formação de vórtice pode levar ao *gas blowby*, que é a saída de gás pelo bocal de líquido. Isto pode ocorrer principalmente quando o nível de líquido está abaixo do normal no separador, e pode levar a sérios danos em equipamentos rotativos, como por exemplo, bombas centrífugas que estejam localizadas na tubulação de saída de água do separador. Como mostrado na Figura 9, este dispositivo possui “hélices”, que desviam o fluxo de líquido em várias direções, quebrando o vórtice que é formado nos bocais de saída de líquido.

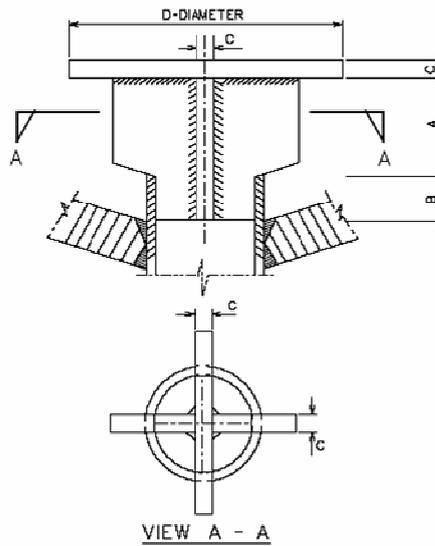


Figura 9 - Quebra-vórtex

2.1.2.5. Demisters ou eliminadores de névoa

Os eliminadores de névoa são dispositivos que têm a finalidade de proporcionar trajetos tortuosos ao gás, para que qualquer névoa, gotícula ou espuma eventualmente carregada pelo gás seja separada do mesmo. Separar a maior quantidade possível de gotículas de líquido ou espuma do gás é de extrema importância, pois, apesar da separação gás-líquido ser mais fácil, os equipamentos que processam as correntes de gás, principalmente compressores, são muito sensíveis a exposição de líquidos, mesmo em pequenas quantidades. Os eliminadores de névoa podem ser de tipos variáveis, e os tipos mais comuns são o *TP-Vane* e o *Wire Mesh Demister*, e devem ser instalados no separador de modo que todo o gás passe através deste dispositivo.

O *TP-Vane* é um eliminador de névoa composto por placas paralelas onduladas. O gás passa por entre as placas, e conforme vai sendo desviado, é interceptado pelas paredes onduladas. O gás continua seu trajeto, mas as gotículas de líquido são interceptadas pelas paredes. Um esquema mostrando

o funcionamento deste eliminador de névoa é apresentado na Figura 10. Geralmente é instalado após todos os quebra-ondas e antes do eliminador de névoa do tipo *Wire Mesh*, para eliminar a maior quantidade de líquido possível, correspondente às gotículas grandes, antes da última barreira ao gás, no bocal de saída do mesmo.

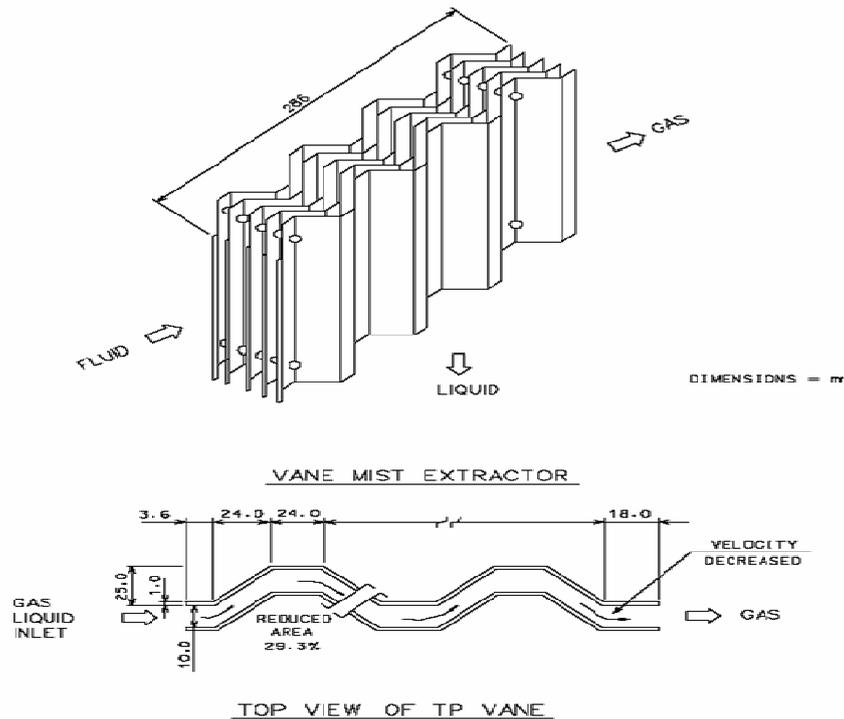


Figura 10 - Eliminador de névoa do tipo *TP-Vane*

O eliminador de névoa do tipo *Wire Mesh* é composto apenas de um conjunto de telas sobrepostas, cada qual com aberturas reduzidas, e pode ser quadrado ou circular, neste último caso deverá ser de diâmetro igual ao diâmetro de saída de gás. Tem o mesmo princípio de funcionamento do *TP-Vane*, mas aqui as barreiras são os fios de metal que compõe as telas. Frequentemente é instalado junto ao bocal de saída de gás do separador e retira as gotículas de líquido muito pequenas que não foram interceptadas pelo

TP-Vane. Um esquema deste eliminador de névoa e de sua instalação é mostrado na Figura 11.

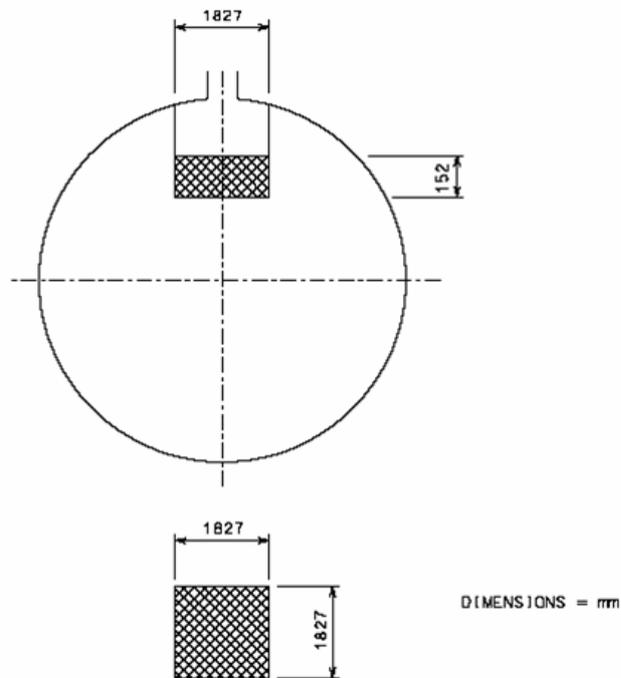


Figura 11 - Eliminador de névoa do tipo *Wire Mesh*

2.1.2.6. Chicana de separação ou vertedor

A chicana de separação ou vertedor é o dispositivo interno responsável pelo recolhimento da lâmina de óleo formada sobre a água na câmara de separação. Porém, como dito anteriormente, é o único dispositivo interno obrigatório no caso de separadores trifásicos. Se este interno não existisse, o separador seria apenas um separador bifásico líquido-gás, não haveria separação efetiva (em duas correntes diferentes) de água e óleo. A Figura 12 ilustra o dispositivo citado.

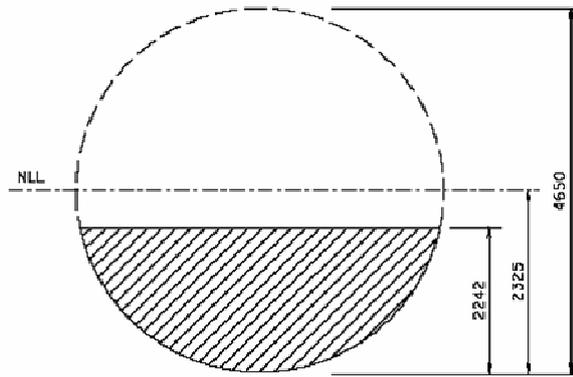


Figura 12 - Chicana de separação ou vertedor

3. SIMULAÇÕES

3.1. Introdução

Neste trabalho, o separador gravitacional estudado é o Separador de Produção da plataforma de produção de petróleo Petrobras-57 (P-57) ainda na fase de licitação para detalhamento e construção. Este navio-plataforma é do tipo FPSO (*Floating Production, Storage & Offloading*), e estará localizado na Bacia Capixaba, no Campo de Jubarte, sendo responsável pela produção de 180.000 barris de óleo por dia e 3.000.000 m³/d de gás natural.

O separador de produção estudado tem, originalmente, 5,6 m de diâmetro e 16,8 m de comprimento entre tangentes, operando a uma temperatura de 120 ° C e uma pressão de 591 kPa abs. O bocal de entrada de fluido tem 16" de diâmetro e os de saída de óleo, água e gás têm, respectivamente, 14", 10" e 4". As Figuras 13 e 14, e a Tabela 1, apresentam em detalhes algumas medidas, dados de vazão e propriedades físicas dos fluidos nos anos da curva de produção de P-57 estudados.

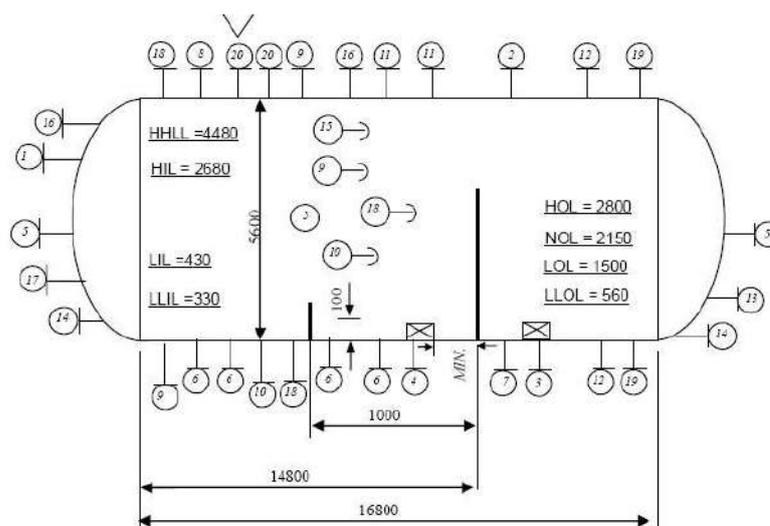
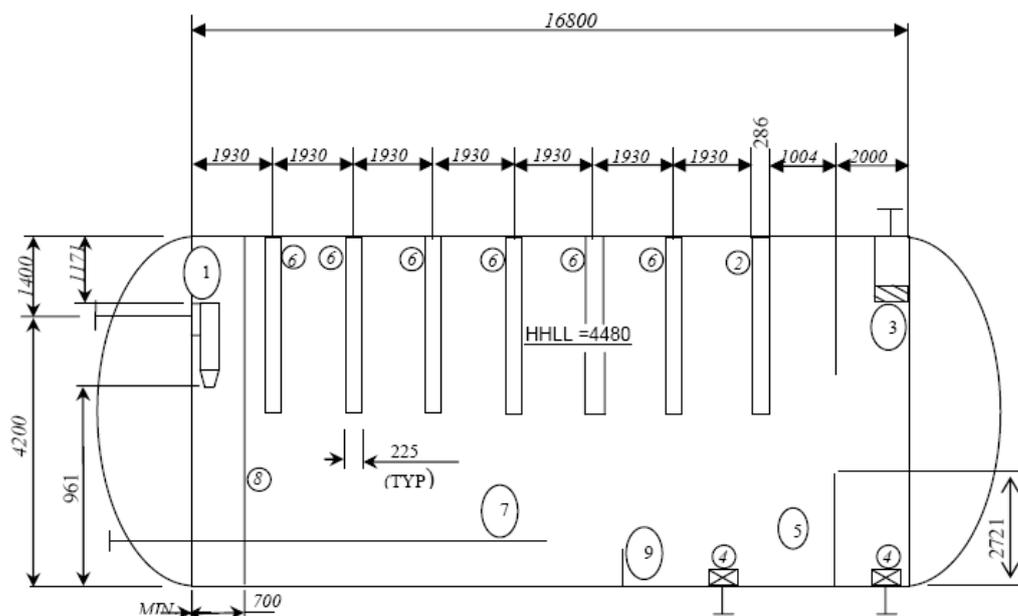


Figura 13 - Níveis de interface e de óleo



DIMENSIONS = mm

1	PRIMARY SEPARATION SECTION (FOAM CYCLONE TYPE)
2	VANE TYPE MIST EXTRACTOR
3	WIRE MESH MIST EXTRACTOR
4	VORTEX BREAKER
5	WEIR
6	WAVE BREAKER
7	JET SAND SYSTEM
8	STILL BAFFLE
9	BAFFLE

Figura 14 - Medidas e distâncias entre os dispositivos internos do separador

Tabela 1 - Dados de vazão e propriedades físicas de fluidos para alguns anos da curva de produção

	CASO DE PROJETO	ANO 2011	ANO 2015	ANO 2028
ÓLEO	VAZÃO, kg/h	732717	393548	144207
	DENSIDADE, kg/m ³	898.5	903,7	903,81
	VISCOSIDADE, cP	40,7	55,7	55,81
ÁGUA PRODUZIDA	VAZÃO, kg/h	0	111740	41148
	DENSIDADE, kg/m ³		1078,1	1078,1
	VISCOSIDADE, cP		0,23	0,23

A vazão de gás foi considerada constante e igual à maior vazão de gás liberado neste vaso em todos os anos da curva de produção. Esta vazão tem o

valor de 2172,8 kg/h, sendo que o gás tem viscosidade de 0,0128 cP e densidade de 3,9 kg/m³.

As simulações foram realizadas utilizando-se o pacote computacional CFX 10.0. Para a confecção das geometrias e malhas foram usados o Design Modeler e o CFX Mesh, do pacote computacional Workbench, respectivamente.

O objetivo central deste trabalho é a investigação da melhor modelagem para a reprodução do escoamento esperado no separador. Iniciou-se o estudo do caso mais simples, que seria o escoamento bifásico estacionário no interior do separador simples, sem nenhum dispositivo interno, chegando-se até as simulações referentes à situação no ano de 2011 (vide Tabela 1). Este seria o escoamento bifásico (óleo-gás), com o separador com todos os seus internos. Na realidade, o objetivo maior deste trabalho seria a construção de uma simulação da separação trifásica, porém este último objetivo não pôde ser alcançado devido à limitação de tempo para a realização da mesma. Nesta monografia, as seguintes etapas foram realizadas:

- Escoamento bifásico, geometria simples, sem a inclusão dos internos;
- Escoamento bifásico, geometria simples com o vertedor, utilizando-se como resultado inicial o escoamento bifásico com geometria simples;

Assumiu-se primeiramente que o sistema teria um comportamento estacionário, assim, os primeiros testes feitos levaram em conta esta condição. Testes transientes também foram realizados, para a verificação se o sistema teria características inerentemente transientes, ou se apenas a mudança do tipo de simulação (estacionária ou transiente) levaria a resultados diferentes.

3.2. Geometria

Para fins de simplificação, diminuição do tempo de simulação, e diminuição do número de elementos de cálculo necessários para uma boa qualidade de resultados, optou-se por uma diminuição da escala do equipamento. Um estudo de similaridade geométrica e dinâmica para a obtenção da melhor escala de diminuição foi realizado, preservando os mesmos perfis dinâmicos e as mesmas razões entre as medidas do separador. A escala de diminuição empregada encontrada neste estudo foi a de 20:1, ou seja, as dimensões do equipamento diminuído foram 20 vezes menores que as dimensões originais.

O estudo dinâmico de similaridade foi baseado em dois importantes grupos adimensionais, desenvolvidos a partir do teorema π de Buckingham (Fox & Macdonald, 1988), envolvendo as dimensões do equipamento e as velocidades e propriedades dos fluidos envolvidos, os números de Froude e Reynolds, representados nas Equações (5) e (6), respectivamente:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot R}} \quad (5)$$

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (6)$$

Onde v é a velocidade do fluido, g é a aceleração da gravidade, R é o raio do separador, D é o diâmetro do separador, ρ é a densidade do fluido e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

O número de Froude representa uma razão entre as forças inerciais e gravitacionais em um escoamento e é muito utilizado em projetos de mudança

de escala envolvendo equipamentos com escoamento de fluido completamente estratificado, ou seja, escoamento de superfície livre. Este é o caso do escoamento em estudo, pois não há bolhas e sim camadas de fluido bem definidas. Mais esclarecimentos sobre o modelo de *volume fluid* serão apresentados mais adiante, no item 3.4 – Modelagem. O número de Reynolds representa a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas em um fluido, e através dessa relação o escoamento de um fluido pode ser classificado em laminar ou turbulento, passando por um intervalo de transição.

Analisando primeiramente a similaridade dinâmica do ponto de vista do número de Froude, tem-se que:

$$\boxed{Fr_{original} = Fr_{piloto}} \quad (7)$$

Como apresentado anteriormente na Equação (5):

$$Fr_{original} = \frac{v_{original}}{\sqrt{g \cdot R_{original}}} \quad (8)$$

$$Fr_{piloto} = \frac{v_{piloto}}{\sqrt{g \cdot R_{piloto}}} \quad (9)$$

Sendo que:

$$R_{piloto} = \frac{R_{original}}{20} \quad (10)$$

Assim, substituindo-se as Equações (8), (9) e (10) na Equação (7), tem-se que:

$$\frac{v_{original}}{\sqrt{g \cdot R_{original}}} = \frac{v_{piloto}}{\sqrt{g \cdot \frac{R_{original}}{20}}} \quad (11)$$

$$\frac{v_{original}}{\sqrt{g \cdot R_{original}}} = \frac{v_{piloto}}{\sqrt{g \cdot R_{original}}} \cdot 4,472 \quad (12)$$

$$\boxed{v_{piloto} = \frac{v_{original}}{4,472}} \quad (13)$$

Como visto na Equação (13), pelo número de Froude, se a escala geométrica fosse reduzida de 20 vezes, a velocidade do escoamento deveria ser reduzida de 4,472 vezes.

Agora, a análise dinâmica é feita de acordo do número de Reynolds:

$$Re_{original} = Re_{piloto} \quad (14)$$

Como apresentado anteriormente na Equação 6:

$$Re_{original} = \frac{D_{original} \cdot v_{original} \cdot \rho}{\mu_{original}} \quad (15)$$

$$Re_{piloto} = \frac{D_{piloto} \cdot v_{piloto} \cdot \rho}{\mu_{piloto}} \quad (16)$$

Sendo que:

$$D_{piloto} = \frac{D_{original}}{20} \quad (17)$$

Substituindo as Equações (15), (16) e (17) na Equação (14), obtém-se o seguinte resultado:

$$\frac{\cancel{D_{original}} \cdot v_{original} \cdot \cancel{\rho}}{\cancel{\mu_{original}}} = \frac{\cancel{D_{original}}}{20} \cdot v_{piloto} \cdot \cancel{\rho}}{\cancel{\mu_{piloto}}} \quad (18)$$

Como resultado desta análise, tem-se que:

$$v_{piloto} = 20 \cdot v_{original} \quad (19)$$

Porém, este resultado é conflitante com o resultado obtido através da análise dimensional pelo número de Froude, que é o critério mais relevante no tocante à separação da emulsão, já que diz respeito à força gravitacional, princípio de separação dos separadores gravitacionais trifásicos. Assim, para satisfazer também a condição ditada pelo número de Reynolds, se faz necessária a mudança também do valor de alguma propriedade física dos fluidos. É importante observar que esta mudança pode ser feita, mas os novos valores obtidos para as propriedades físicas têm de ser verossímeis, para que possam ser comparados à valores de fluidos reais e para que as simulações possam ter validade.

A densidade de fluidos incompressíveis é uma propriedade que não encontra uma grande variação nem de acordo com a temperatura, nem de acordo com a pressão. Portanto não poderia ser escolhida como propriedade a ser mudada. Mas a viscosidade sim, pois dependendo do fluido estudado, a viscosidade varia em uma ampla faixa, principalmente de acordo com a temperatura. A viscosidade dos fluidos incompressíveis incluídos nas simulações são passíveis de grandes variações de acordo com a temperatura, portanto, esta propriedade foi a escolhida para a mudança.

Assim, depois de várias tentativas para encontrar um fator de redimensionamento que atendesse aos requisitos necessários, foi encontrado o valor de 20, ou seja, todas as dimensões devem ser divididas por 20.

Continuando a análise e substituindo as Equações (13), (15), (16) e (17) na Equação (14), tem-se que:

$$\frac{\cancel{D_{original}} \cdot \cancel{v_{original}} \cdot \cancel{\rho}}{\mu_{original}} = \frac{\cancel{D_{original}} \cdot \cancel{v_{original}} \cdot \cancel{\rho}}{89.443 \cdot \mu_{pilot}} \quad (20)$$

$$\mu_{piloto} = \frac{\mu_{original}}{89.443} \quad (21)$$

Tomando-se, por exemplo, a viscosidade do óleo no ano de 2011 da curva de produção, que tem um valor de 40,7 cP de acordo com a Tabela 1, e aplicando-se o resultado acima, temos uma nova viscosidade de 0,455 cP, valor razoável fisicamente.

Por fim, as dimensões do equipamento após o dimensionamento ficam sendo de 0,28 m de diâmetro e 0,84 m de comprimento.

Algumas simplificações também foram feitas no modelo original, a fim de se diminuir o tempo computacional utilizado para a realização das simulações. Foi simulado apenas a parte cilíndrica do separador, sem os tampos torisféricos, e o dispositivo ciclônico da entrada do separador também foi retirado, pois este equipamento sozinho já requer um plano de simulações separado e seria demandado um poder computacional acima do disponível para a simulação do dispositivo no interior do separador. Assim, como o dispositivo ciclônico separa a maior parte do gás do líquido logo na entrada do separador, ao invés de ser considerada apenas uma entrada, foram consideradas duas, uma para o gás e outra para o líquido, cada uma com o mesmo diâmetro da única entrada, também redimensionado. Os quebra-vórtex também foram retirados do modelo original pela complexidade do desenho. O vertedor foi considerado uma parede e os outros dispositivos internos (placa perfurada, quebra-ondas e *demisters*) não foram incluídos nas simulações. Como este foi um trabalho de investigação inicial, o modelo geométrico foi deixado o mais simples possível. Algumas ilustrações dos modelos utilizados são apresentadas logo a seguir, nas Figuras (15) e (16):

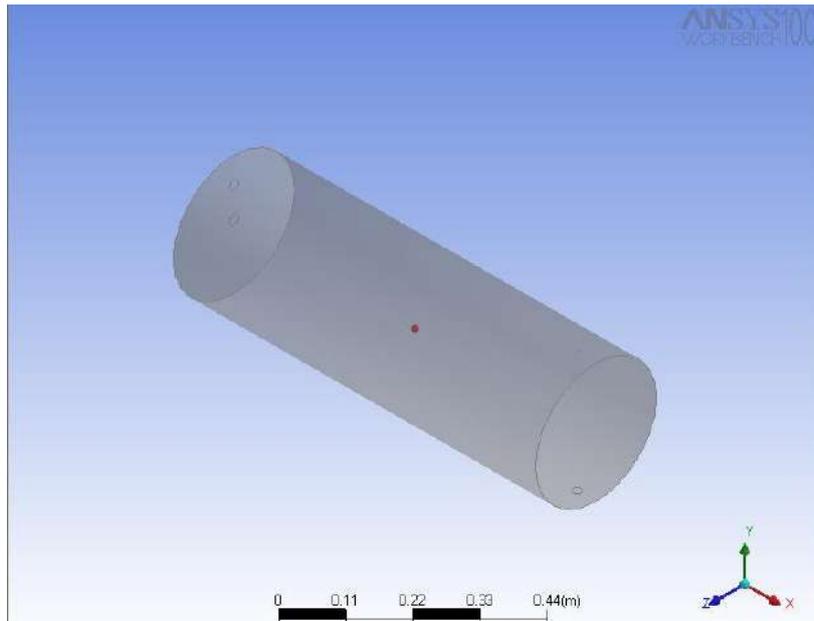


Figura 15 – Geometria - Separador Simples

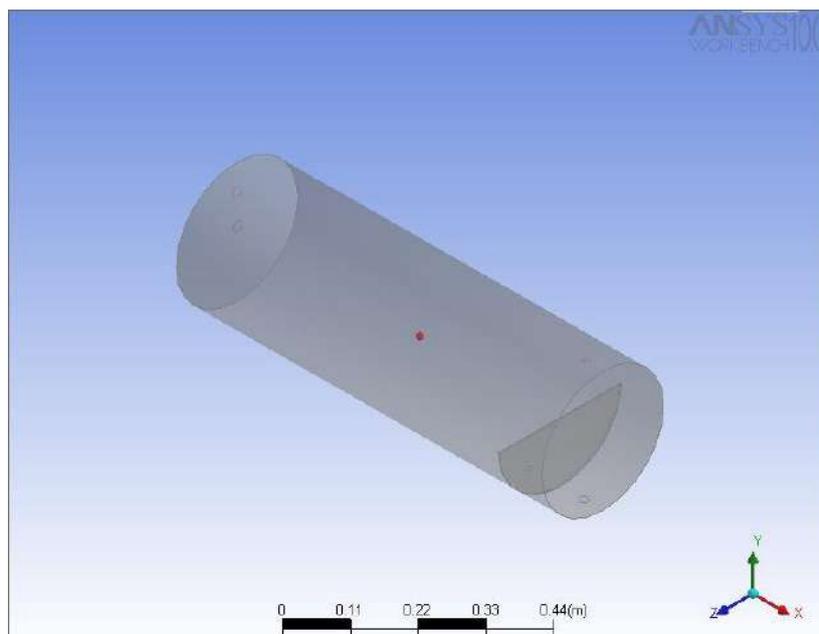


Figura 16 – Geometria - Separador com vertedor

3.3. Malha

Neste item serão abordados os parâmetros de construção das malhas de cálculo para cada modelo utilizado nas simulações.

Primeiramente foram determinadas as regiões dos modelos em que há entrada e saída de fluidos, que são as seguintes: EntradaGas, EntradaLiquido, SaidaGas, SaidaOleo e SaidaAgua. A seguir, os parâmetros para a construção da malha foram escolhidos com base nas dimensões do separador, procurando-se ter sempre bom senso para a escolha, pois neste caso há muita diferença entre a maior e a menor medida nas geometrias utilizadas. Se apenas a menor medida fosse utilizada como parâmetro, a malha de cada modelo seria constituída de elementos em excesso, ou seja, a malha seria refinada demais, podendo levar a demora demasiada da simulação. Testes de malha, de uma mais grosseira até uma mais refinada, foram feitos de modo a determinar o comprimento ideal de elemento, ou seja, de modo que a solução não variasse com a malha. Foram introduzidos pontos de refinamento junto às regiões de entrada e saída de fluidos, pois estas regiões são críticas devido ao aumento ou diminuição abruptos de área de escoamento, respectivamente. Outro dado importante é a introdução de uma camada de maior refinamento da malha junto às paredes do modelo utilizado (*inflation*). Isto se faz necessário devido à fricção entre a parede, que contém rugosidades, e o fluido em escoamento, criando um grande gradiente de velocidades próximo a parede, na região do escoamento chamada de cama limite.

A seguir são apresentadas tabelas com os resultados da construção de cada malha, que são os tipos e quantidades de elementos e nós (Tabelas 2 e 3) e figuras representativas do resultado da construção de cada malha (Figuras 17 e 18).

Tabela 2 - Resultados da construção da malha para o modelo simples

Nº de nós	183.444
Nº de elementos	800.954
Tetraedros	679.538
“Cunhas”	120.726
Pirâmides	690
Hexaedros	0

Tabela 3 - Resultados da construção da malha para o modelo com vertedor

Nº de nós	187.292
Nº de elementos	823.259
Tetraedros	704.075
“Cunhas”	118.314
Pirâmides	870
Hexaedros	0

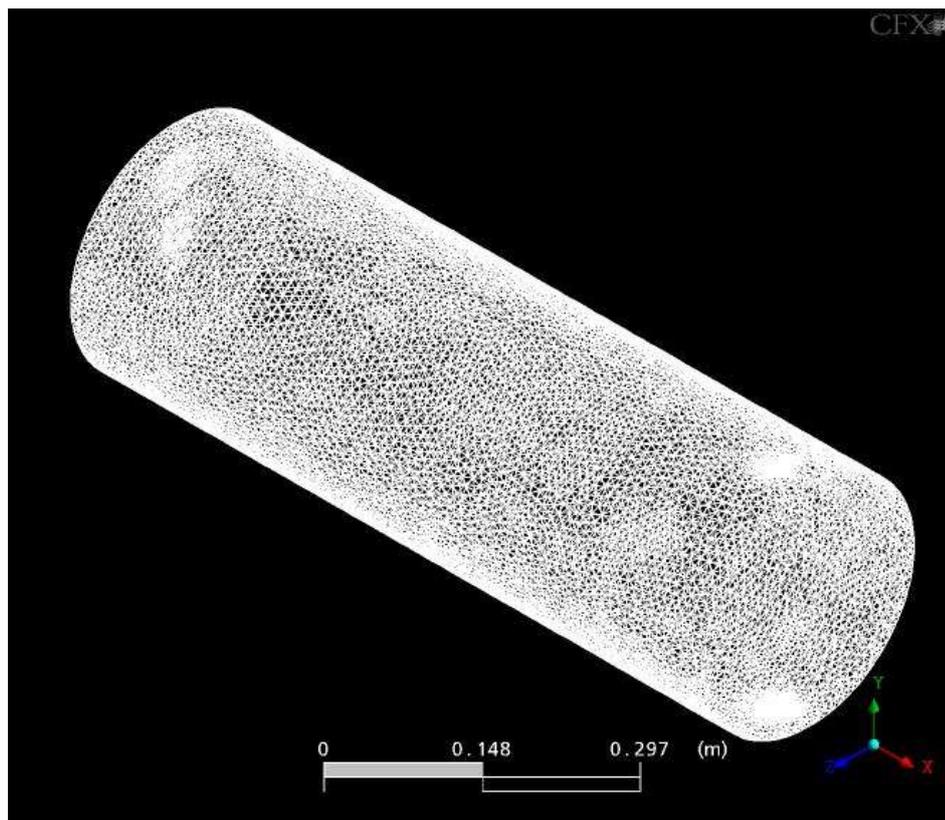


Figura 17 - Malha da geometria simples

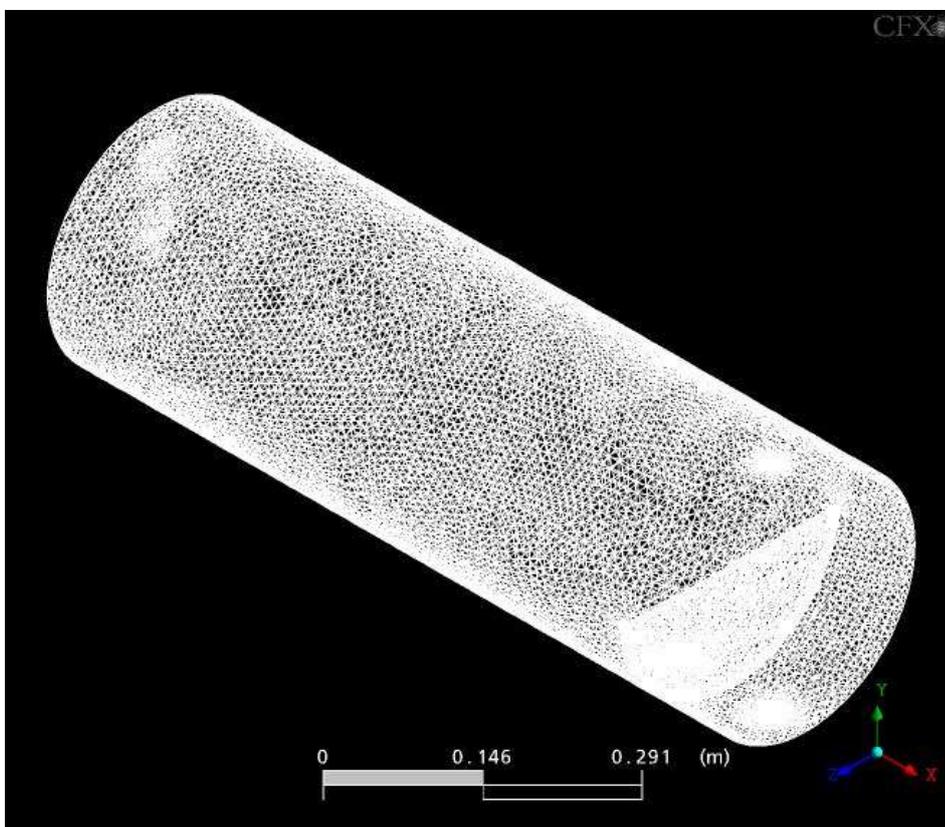


Figura 18 - Malha da geometria com o vertedor

3.4. Modelagem

Nesta seção serão abordados os modelos e as justificativas para a utilização dos mesmos nas simulações realizadas.

Dois tipos de simulação foram realizados: estacionário e transiente. Para o tipo estacionário, não há a necessidade da especificação de nenhum parâmetro de tempo, já que as variáveis são constantes ao longo de todo o tempo. Já para o tipo transiente, foi especificado um tempo total de simulação que deve estar relacionado com o tempo necessário para que seja alcançado o estado estacionário do escoamento estudado ou do fechamento de um ciclo de acontecimento de fenômenos. No caso apresentado, este tempo está relacionado ao tempo de residência do fluido escoando ao longo de todo o separador. Este tempo de residência pode ser calculado mediante o conhecimento da velocidade do escoamento no interior do separador e do comprimento do mesmo. Há a necessidade também da especificação de passos de tempo nos quais se quer resolver o problema.

O domínio da simulação, que é o interior do separador de produção, onde há o escoamento de fluido, foi escolhido como domínio fluido, e os fluidos utilizados foram o óleo e o gás. A pressão de referência é a própria pressão de operação do equipamento, 591 kPa abs. A opção de gravidade foi ativada, já que este é o princípio de operação de um separador gravitacional.

O modelo de *volume fluid (VoF)* foi escolhido para representar o modo de comportamento da interface entre os fluidos no escoamento multifásico. Este modelo se refere a uma situação de escoamento multifásico onde as fases estão separadas por uma interface bem definida. O modelo *volume fluid*

deve ser utilizado com o modelo homogêneo de escoamento sempre que possível, e assim foi feito neste trabalho.

O modelo homogêneo de escoamento é um modelo onde todas as fases compartilham de um mesmo campo de velocidades, e isto faz sentido neste caso porque as fases são completamente estratificadas.

Para um dado processo de transporte, o modelo homogêneo de escoamento assume que as quantidades transportadas, com exceção da fração volumétrica, são iguais para todas as fases:

$$\phi_\alpha = \phi \text{ para } 1 \leq \alpha \leq N_f \quad (22)$$

Onde ϕ é a quantidade transportada, α é a fase estudada e N_f é o número total de fases distintas.

Como as quantidades transportadas são compartilhadas no modelo homogêneo de escoamento, é suficiente então resolver o problema de para os campos compartilhados usando equações de transporte para a mistura como um todo, ao invés de resolver estas equações para cada fase presente.

O modelo de turbulência utilizado foi o k- ϵ , um modelo simples, onde a energia cinética turbulenta (k) e sua dissipação (ϵ) são calculados através de duas equações de transporte. Este tipo de modelo de turbulência resolve bem o escoamento estudado, pois é adequado ao tipo de escoamento observado.

Algumas expressões foram utilizadas para atuar como condições iniciais do sistema. Elas representam a determinação de fases bem definidas e a pressão da coluna de líquido sobre o fundo do equipamento, de acordo com o nível de líquido presente no mesmo. Estas expressões estão representadas a seguir:

$$q_{gás} = \text{deg rau} \left(\frac{y - h}{1m} \right) \quad (23)$$

$$q_{líq} = 1 - q_{gás} \quad (24)$$

$$P = \rho \cdot g \cdot q_{líq} \cdot (h - y) \quad (25)$$

A letra ρ representa a densidade do líquido em escoamento, que neste caso é o óleo; h representa a altura de líquido esperada no interior do equipamento, ou o nível normal de líquido; a equação (23) representa uma função degrau que diz que a fração volumétrica de gás ($q_{gás}$) será sempre igual a 1 em uma altura acima da altura do líquido no equipamento (h), assim a fração volumétrica de líquido fica definida de acordo com a equação (24). Finalmente, a equação (25) representa o cálculo da pressão inicial esperada sobre o fundo do equipamento, e conseqüentemente sobre as regiões de saída de líquido, que corresponde à pressão da coluna de líquido no seu nível normal de operação.

3.5. Condições de contorno

As condições de contorno representam as condições em cada região de entrada ou saída de fluido. As condições para cada uma dessas regiões estão discriminadas a seguir.

EntradaGas

É a região onde há a entrada de gás no domínio. Possui um diâmetro de 0,0203 m e a velocidade de entrada do gás nessa região é de 0,267 m/s, totalizando uma vazão volumétrica no valor de 0,311 m³/h.

EntradaLiquido

É a região de entrada de óleo. Com um diâmetro igual à da entrada de gás, por motivos já descritos anteriormente, e uma velocidade de entrada de óleo de 0,395 m/s, há a entrada de 0,46 m³/h de óleo. Com isso, as frações volumétricas de óleo e de gás no domínio tendem a ser 0,59 e 0,41, respectivamente. Como a fração volumétrica de óleo é um pouco maior que a de gás, a altura de líquido tenderá a se estabelecer um pouco acima do plano central do equipamento. A quantidade de turbulência na região de entrada de óleo é baixa, pois a velocidade do escoamento e a viscosidade alta do fluido contribuem para esta situação.

SaidaGas

Esta é a região de saída de gás, e o critério escolhido para a troca de massa e momento com o exterior do domínio foi o critério de pressão média sobre a superfície. A pressão escolhida neste caso foi a pressão de 0 kPa, já que a pressão de referência do domínio já é a pressão de operação do equipamento, e a pressão nesta superfície deve ser igual à esta última.

SaidaLiquido

Esta região destina-se a saída de óleo, que nas etapas concluídas ainda não é o óleo separado da água, é somente o óleo separado do gás. O critério escolhido para a troca de massa e momento com o exterior do domínio também foi o critério de pressão média sobre a superfície. Porém, neste caso, a pressão exercida sobre esta região é a pressão de operação do equipamento adicionada da pressão exercida pela coluna de óleo presente acima desta região, expressa pela equação (25).

SaidaAgua

Apesar desta saída não estar sendo usada nestas simulações para o propósito a que foi destinada neste equipamento, que é a saída da água separada do óleo, a saída existe no equipamento em operação, por exemplo, no primeiro ano de operação da plataforma, em que há somente produção de óleo e gás. E partindo disto, a mesma foi considerada nas simulações também para saída de óleo. O critério escolhido para a troca de massa e momento com a parte externa do domínio foi a mesma da saída de óleo, sendo a pressão de referência adicionada da pressão exercida a partir da coluna de líquido existente sobre esta região.

3.6. Critérios de convergência, esquemas de solução e condições de inicialização

As condições iniciais empregadas na simulação já foram descritas anteriormente. Além das frações volumétricas iniciais para o óleo e para o gás calculadas através das equações (23) e (24), também foi determinada a condição inicial de velocidade do escoamento no interior do separador. A vazão volumétrica total de fluido é a vazão de óleo e gás somadas, tem-se então, de acordo com os itens anteriores, que a vazão volumétrica total no interior do equipamento é de $0,771 \text{ m}^3/\text{h}$. Para o cálculo da velocidade no separador, é necessário o conhecimento da área da seção transversal do mesmo, que é de $0,0616 \text{ m}^2$, após a diminuição da escala do equipamento apresentada no item 3.1.

A velocidade média adotada então como uma das condições iniciais foi calculada e foi obtido o valor de $0,00347 \text{ m/s}$. Este valor baixo já era esperado, pois como o equipamento é destinado a separação de uma emulsão água-óleo,

que é uma separação difícil, mais tempo é necessário para que essa separação aconteça, e assim uma velocidade baixa se torna essencial.

Para os casos de simulação estacionária, foi utilizado como esquema de discretização o esquema de *High resolution* para todas as equações envolvidas. Este esquema de discretização do CFX 10.0 permite o cálculo preciso, como uma relaxação mínima, de todas as equações envolvidas nas regiões “suaves” da malha, ou onde os gradientes de variação das propriedades são mínimos. Já onde há a presença de descontinuidades ou grandes variações de propriedades, este esquema permite um cálculo mais livre, com uma relaxação grande, para que não haja problemas de convergência da simulação como um todo. É um esquema menos suscetível ao fenômeno de difusão numérica, ao contrário do método *Upwind*, porém implica em um maior gasto de poder computacional e em um maior tempo de simulação (Ansys Inc., Manual do CFX 10.0).

O controle de convergência escolhido para os casos estacionários simulados foi o *physical timestep*, mais efetivo no controle de convergência, principalmente em relação às equações de cálculo das frações volumétricas. Este tipo de controle foi calculado baseando-se em uma primeira simulação feita com o esquema de *auto timescale*, para que uma estimativa inicial do passo de tempo a ser utilizado fosse obtida. Este passo é calculado com base nas condições de contorno especificadas, nas condições iniciais da simulação e na geometria do domínio. Feita a simulação primeiramente com a opção de *auto timescale* ativada para a obtenção da estimativa de um passo inicial, foi calculado numa segunda etapa um passo de 10% deste valor obtido para o *physical timescale*, valor comumente utilizado nas simulações em que há

grande separação entre as fases envolvidas. Quanto menor o passo de tempo utilizado, melhor é o controle de convergência da simulação, principalmente no que diz respeito às equações do cálculo das frações volumétricas dos fluidos. Assim, o valor determinado para o passo de tempo da simulação foi de 0,00044 s, e o número máximo de iterações para o alcance da convergência utilizando-se este passo de tempo foi de 1500 iterações.

O critério de convergência utilizado foi um erro residual médio dos cálculos num valor de 10^{-5} . Este valor foi escolhido com base em algumas tentativas de simulação com um erro residual médio de 10^{-4} que eram terminadas rapidamente pelo alcance deste valor, sem o alcance de um resultado verossímil da simulação.

Para os casos de simulação transiente, o esquema de controle numérico da solução escolhido foi também o de *High resolution*, pelas mesmas razões já expostas acima. Para o esquema de controle de solução do termo transiente foi escolhido como método numérico geral o método de segunda ordem de Euler com extrapolação, mas para as equações de turbulência foi escolhido o método de Euler de primeira ordem. O método de primeira ordem de Euler é um método de passos de tempo implícito, com uma precisão de primeira ordem, ou seja, utiliza apenas um passo de tempo passado para determinar um passo de tempo futuro. O comportamento deste método é análogo ao esquema Upwind para o controle numérico da solução, e também sofre dos mesmos problemas de difusão numérica. Em geral, deve ser utilizado para estudos iniciais, mas sua utilização ao longo de todo um trabalho não é recomendada, exceto para as equações de turbulência. O método de segunda ordem de Euler também é um método de passos de tempo implícito, mas com uma precisão de segunda

ordem. É aplicável para passos de tempo constantes e variáveis. Assim como os esquemas de controle numérico de solução de segunda ordem, como o *High resolution*, não é monotônico e por diversas vezes não é apropriado a algumas quantidades que precisam ser mantidas limitadas, como turbulência e frações volumétricas. Para acelerar a convergência, foi utilizada a extrapolação no método de segunda ordem de Euler, ou seja, dois passos de tempo passados foram utilizados para calcular um passo de tempo futuro.

O critério de convergência utilizado para as simulações transientes foi o mesmo utilizado para os casos estacionários, pelas razões expostas acima.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas e algumas discussões sobre os mesmos.

4.1. Escoamento bifásico, geometria simples, ano 2011

Como já mencionado no item 3.1, foram realizadas neste trabalho simulações referentes ao início da produção da plataforma P-57 (ano 2011 – Tabela 1). Como seria mais difícil a convergência de uma simulação bifásica com todos os internos, foram realizadas, então, as etapas preparatórias para a simulação final. A resolução do escoamento bifásico, estacionário e com base na geometria simples sem internos foi a primeira etapa.

O primeiro resultado a ser analisado é o perfil de pressão. O perfil encontrado para este caso foi coerente com o esperado, ou seja, a menor pressão foi obtida na saída de gás e a maior pressão na saída de líquido, devido à pressão adicional exercida pela coluna de líquido acima da mesma. Este perfil de pressão é apresentado na Figura 19. O plano exposto nesta figura é o plano XY, na coordenada $z = 0$, localizado exatamente no centro do separador.

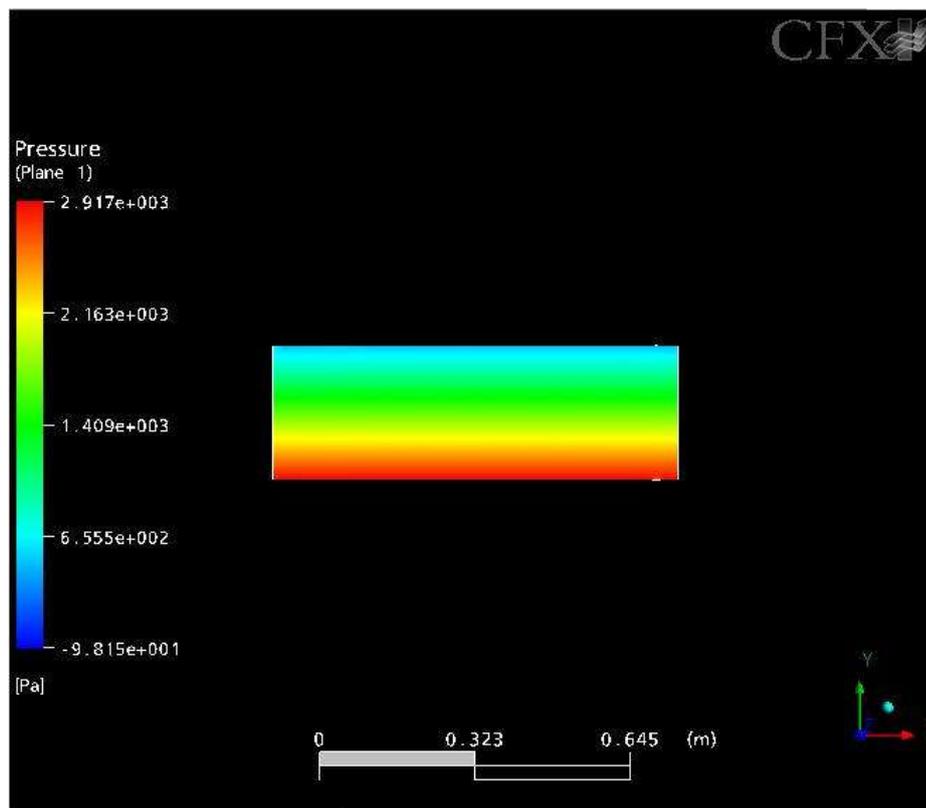


Figura 19 – Perfil de pressão no caso bifásico estacionário, geometria simples (sem internos)

Como se pode ver na Figura 19, a pressão na saída de líquido fica em torno de 2917 Pa acima da pressão de referência do equipamento, que é de 591 kPa. Comparando-se com o valor original, calculado pela equação (25), que é de 1234 Pa para uma altura de líquido de 0,14 m, o valor obtido nesta simulação é mais que o dobro do valor esperado, denotando um nível de líquido também mais alto que o esperado no separador. Vale lembrar também que nesta simulação, a saída de água está desativada, para uma simplificação total do escoamento, diminuindo a quantidade de líquido saindo do domínio, provocando um acúmulo de líquido maior do que o esperado no equipamento.

Agora tomando-se o nível como variável analisada, o resultado esperado seria o nível em torno do plano central do separador. Porém, nesta simulação

bifásica estacionária, foi obtido um resultado totalmente inverossímil, como pode ser observado na Figura 20:

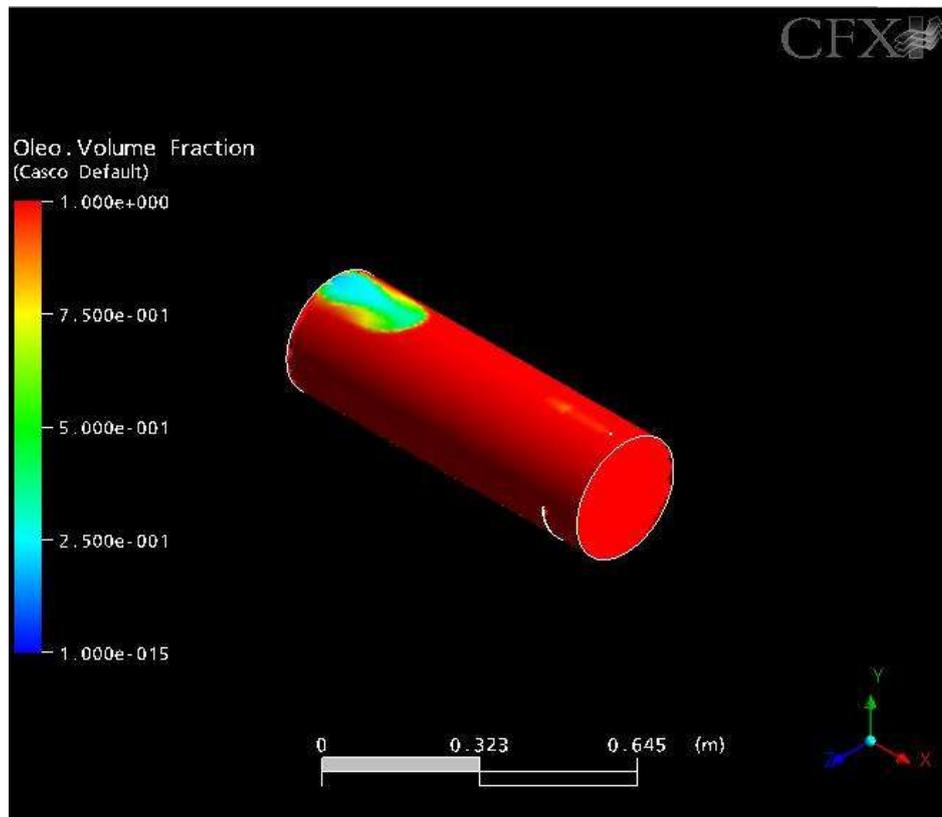


Figura 20 – Fração volumétrica de óleo no caso estacionário bifásico, geometria simples

O resultado apresentado na Figura 20 é inverossímil pelo simples fato de que o gás teria que ocupar uma faixa horizontal inteira no interior do separador, Uma idéia do que pode estar acontecendo na simulação é mostrada na figura 21, a seguir, que mostra as linhas de corrente do gás no interior do equipamento.

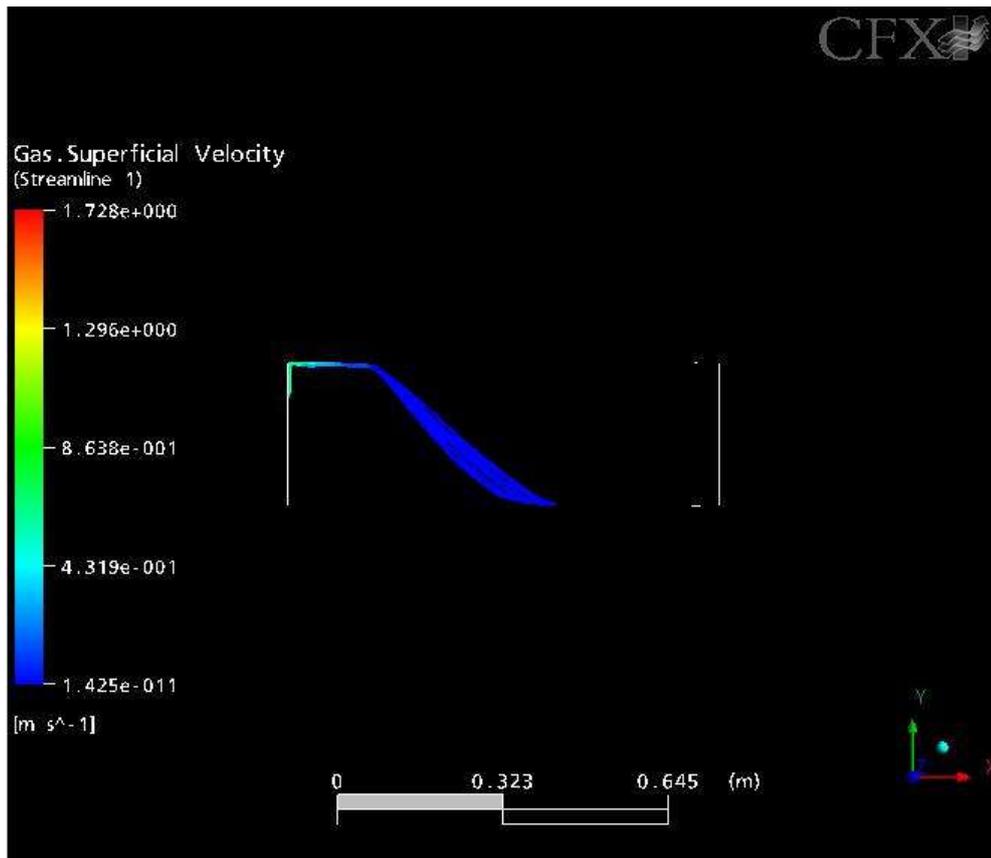


Figura 21 – Linhas de corrente do gás no caso estacionário bifásico, geometria simples

A Figura 21 mostra que o caminho que o gás poderia estar percorrendo seria um “túnel” no interior do óleo. Isto não é possível ocorrer sem a presença de obstáculos que forcem a passagem do gás por este trajeto. A passagem natural do gás seria pela parte superior do separador, até a saída de gás. Porém, gráficos de fração volumétrica de óleo *versus* y, mostram que a alternativa correta não seria esta e sim que o gás poderia estar formando apenas uma bolha logo acima da saída do mesmo e poderia estar sendo dissolvido novamente no óleo. Estes resultados são demonstrados nas Figuras 22 e 23.

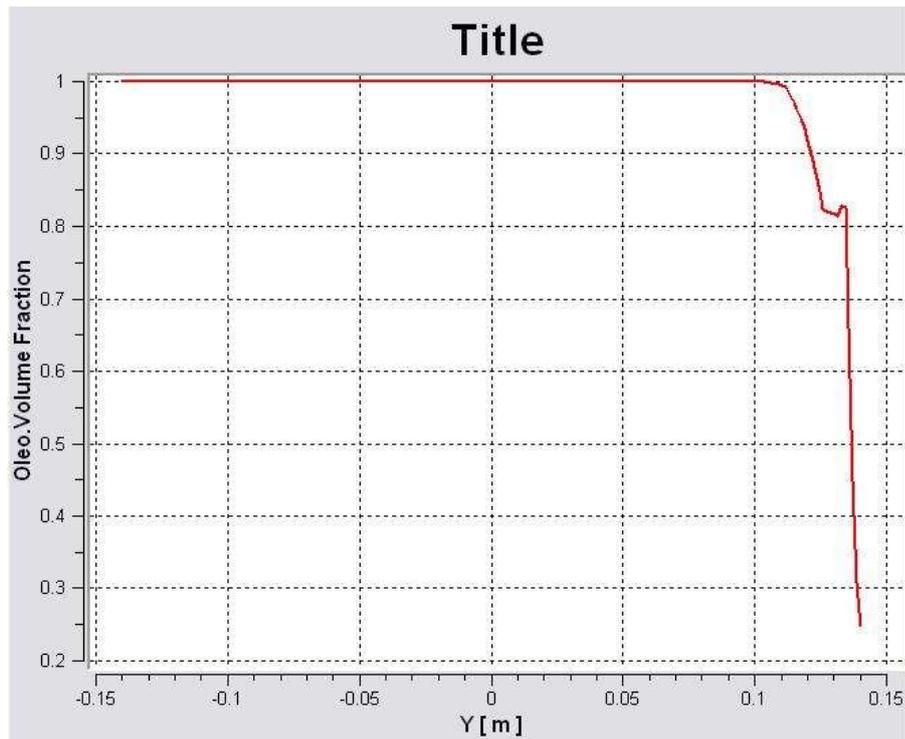


Figura 22 - Fração volumétrica de óleo na seção inicial do separador

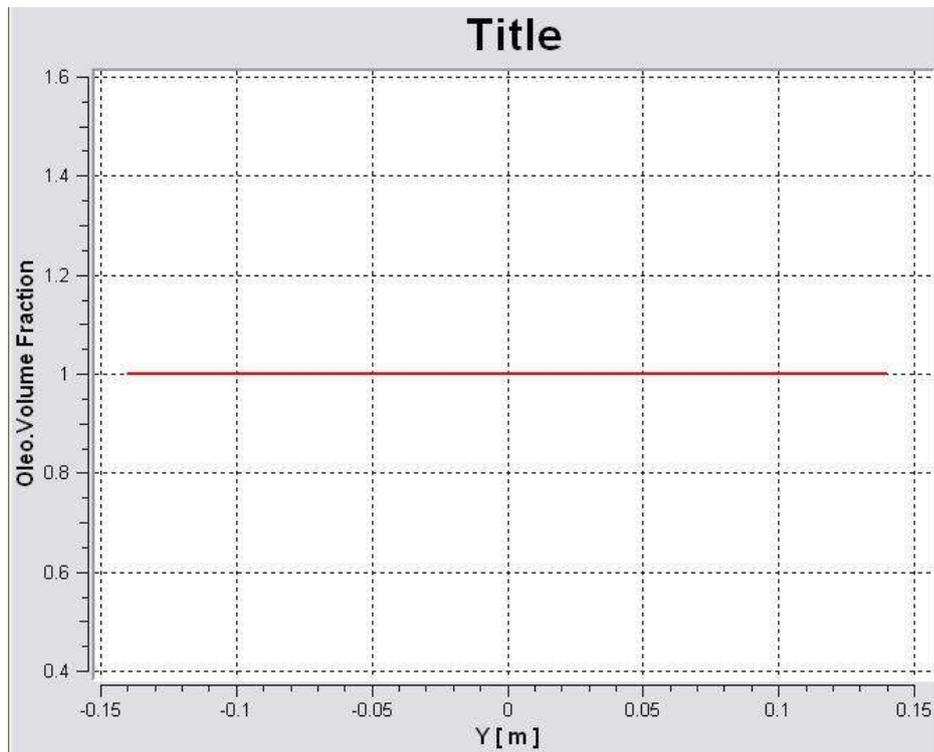


Figura 23 - Fração volumétrica de óleo na seção média do separador

Na Figura 22, onde a linha de partida do gráfico foi colocada na seção inicial do separador, a cerca de 0,1 m das entradas, fica claro que há a presença de gás livre somente na parte superior do equipamento, o que seria o resultado esperado. Porém, quando o mesmo gráfico é feito para uma linha colocada exatamente na seção média do equipamento, constata-se que não há gás livre no separador.

As linhas de corrente de óleo obtidas nesta simulação também são irrealizáveis, como mostrado nas Figuras 24 e 25.

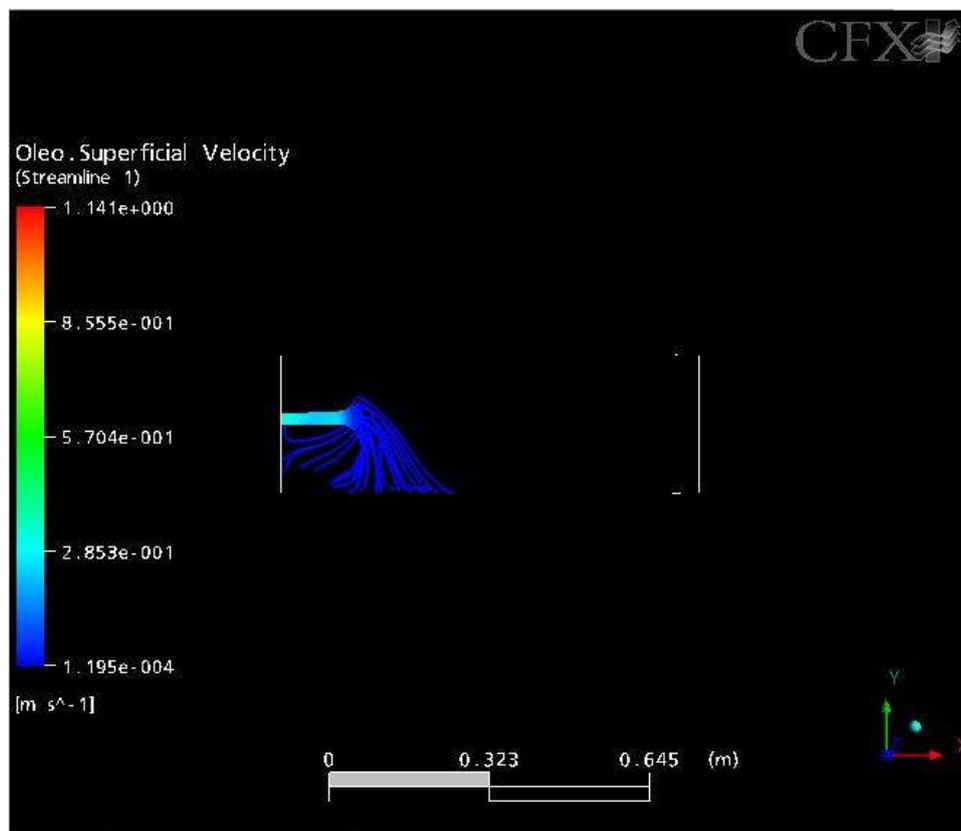


Figura 24 - Linhas de corrente de óleo no caso estacionário bifásico, geometria simples

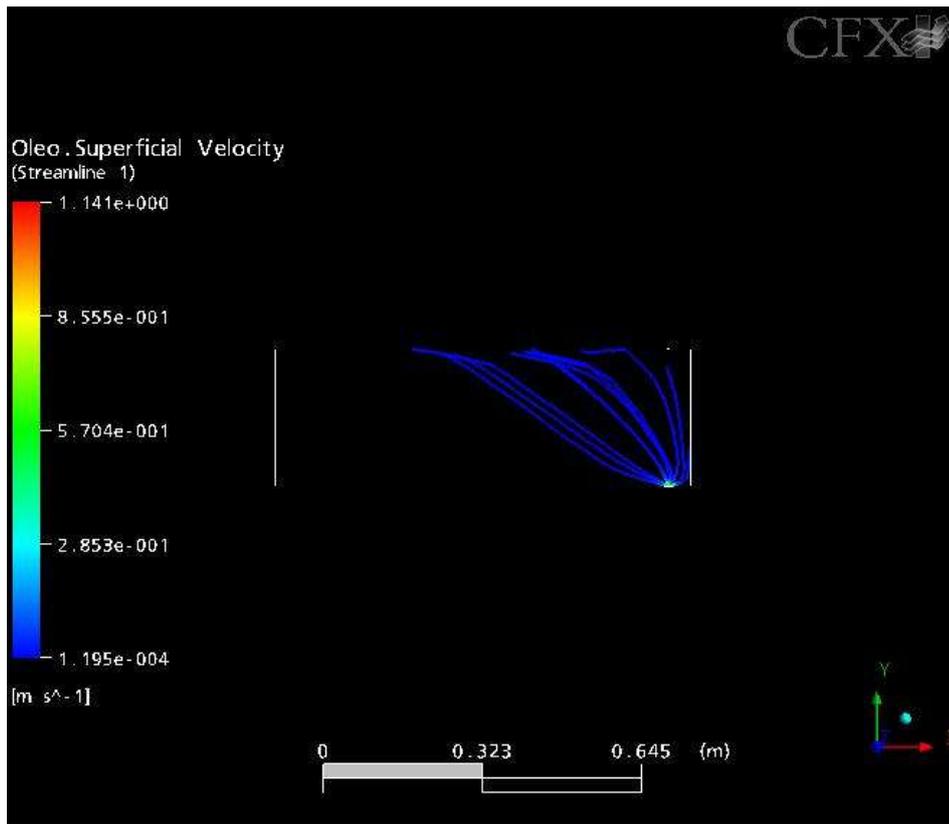


Figura 25 - Linhas de corrente de óleo no caso estacionário bifásico, geometria simples

As linhas de corrente de óleo apresentada nas figuras foram feitas a partir da entrada de líquido (Figura 24) e a partir da saída de líquido (Figura 25). Este perfil encontrado é irrealizável.

Outro resultado importante de ser verificado é o fechamento ou não do balanço de massa. Nesta simulação, o balanço de massa está apresentado a seguir:

Entrada de gás: 0.000328426 [kg s⁻¹]

Entrada de óleo: 0.111938 [kg s⁻¹]

Saída de óleo: 1.15388e-010 [kg s⁻¹] de gás e 0.172096 [kg s⁻¹] de óleo

Saída de gás: 1.99203e-008 [kg s⁻¹] de gás e 0.0155011 [kg s⁻¹] de óleo

O balanço global de massa possui, nesta simulação, um erro global de 40.2 %.

Estes resultados mostram que a simulação estacionária não converge para a solução correta. Ele só é realmente útil para a realização das etapas posteriores, como ponto inicial das simulações e como comparação para outros resultados, ajudando também na obtenção da solução mais correta.

4.2. Escoamento bifásico, geometria simples com o vertedor, utilizando-se como resultado inicial o escoamento bifásico com geometria simples, ano 2011

No escoamento bifásico utilizando-se o modelo com vertedor, foram realizados dois tipos de simulação: estacionário e transiente. O resultado deste caso bifásico com vertedor no tipo estacionário de simulação foi um pouco melhor que os resultados mostrados anteriormente, visto que partiu dos cálculos realizados na primeira simulação, mas ainda não foi o resultado esperado. Isto é, o resultado não foi totalmente coerente, como mostrado a seguir.

Para manter a mesma ordem de apresentação dos resultados, o primeiro resultado a ser discutido é o perfil de pressão obtido no separador. Este perfil é mostrado na Figura 26.

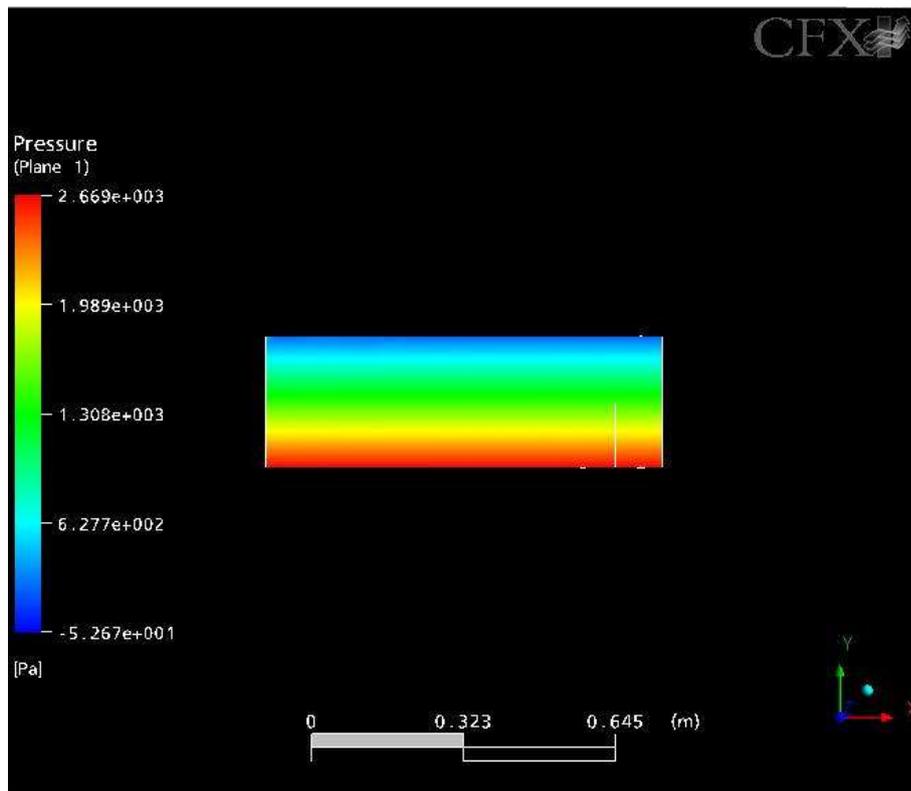


Figura 26 - Perfil de pressão no caso estacionário bifásico, geometria com vertedor

Observa-se através desta figura que o perfil de pressão se apresenta em uma faixa menos ampla que no caso anterior e que a pressão máxima, encontrada no fundo do separador, é um pouco menor do que a encontrada no resultado anterior. Isto mostra um aperfeiçoamento da solução.

O mesmo também ocorre com as linhas de corrente de líquido e de gás, mostradas nas Figuras 27 e 28.

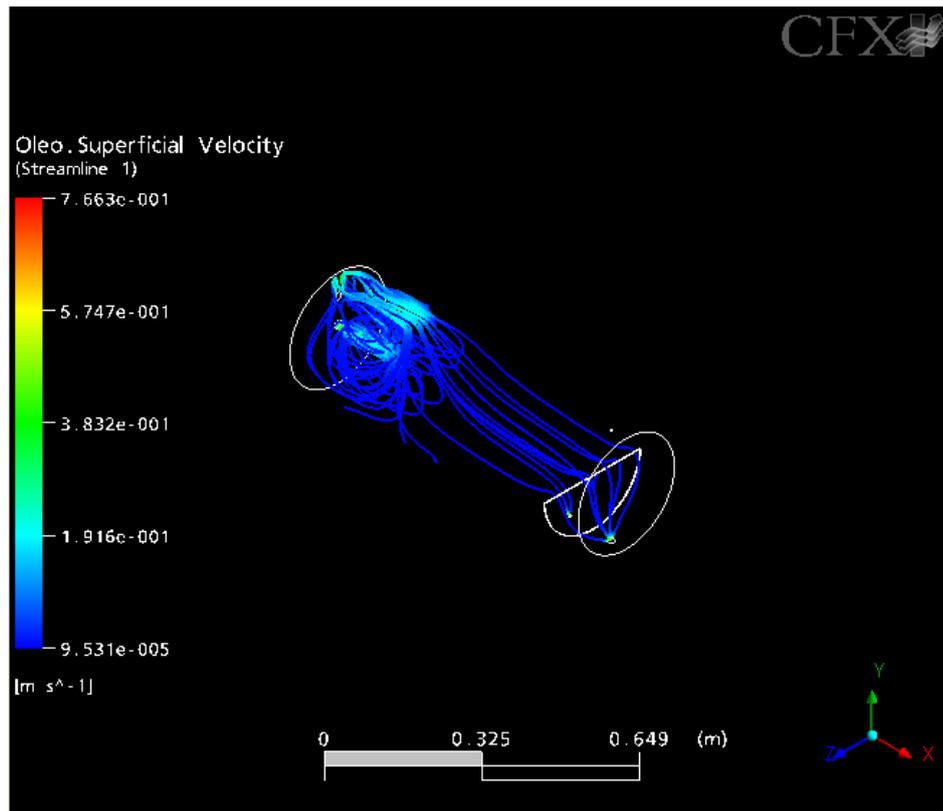


Figura 27 - Linhas de corrente do óleo, caso estacionário bifásico com vertedor

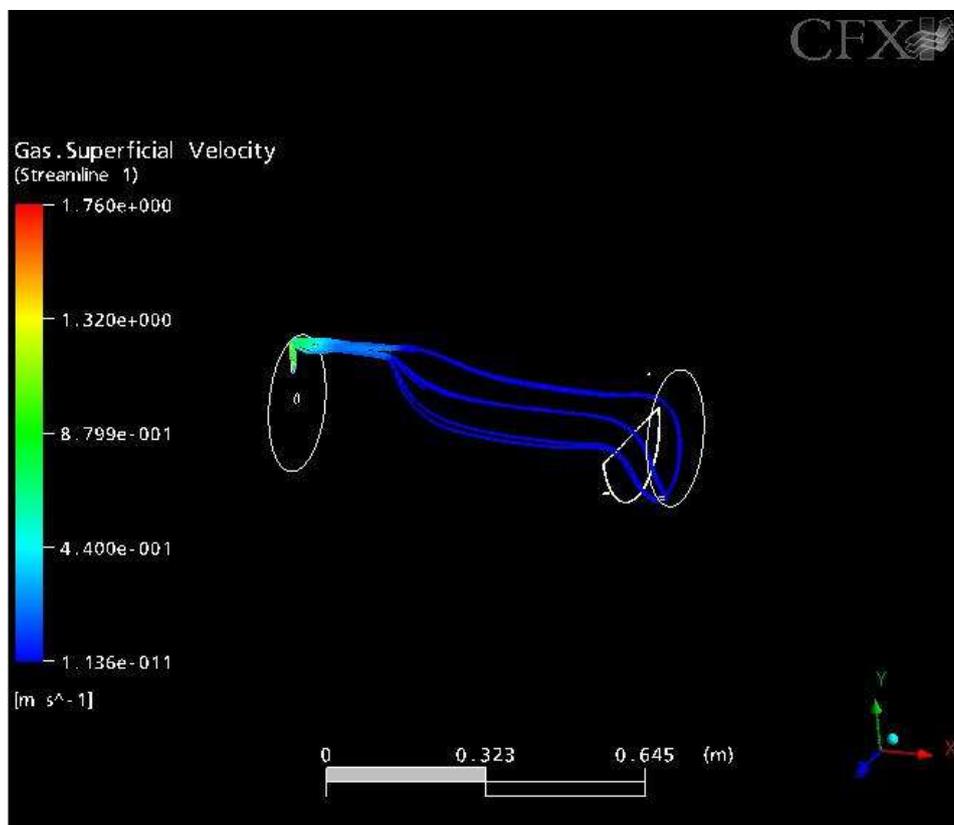


Figura 28 - Linhas de corrente de gás, caso estacionário bifásico na geometria com vertedor

Os resultados obtidos com as linhas de corrente de óleo também refletem a evolução do resultado das simulações. O comportamento obtido do óleo ao longo do separador é bem próximo do comportamento esperado, apesar de ainda haver uma grande recirculação na parte anterior do equipamento. Logo após a ocorrência da recirculação, o escoamento se torna praticamente unidirecional e paralelo ao eixo axial do separador na região central do mesmo.

As linhas de corrente de gás mostram um comportamento inicial que seria o comportamento esperado, porém, logo após a seção inicial há novamente o desvio das linhas de corrente. Novamente este desvio não poderia ocorrer se não houvesse um “caminho” que conduzisse o gás pelo interior do separador.

A Figura 29 mostra o nível de óleo no separador.

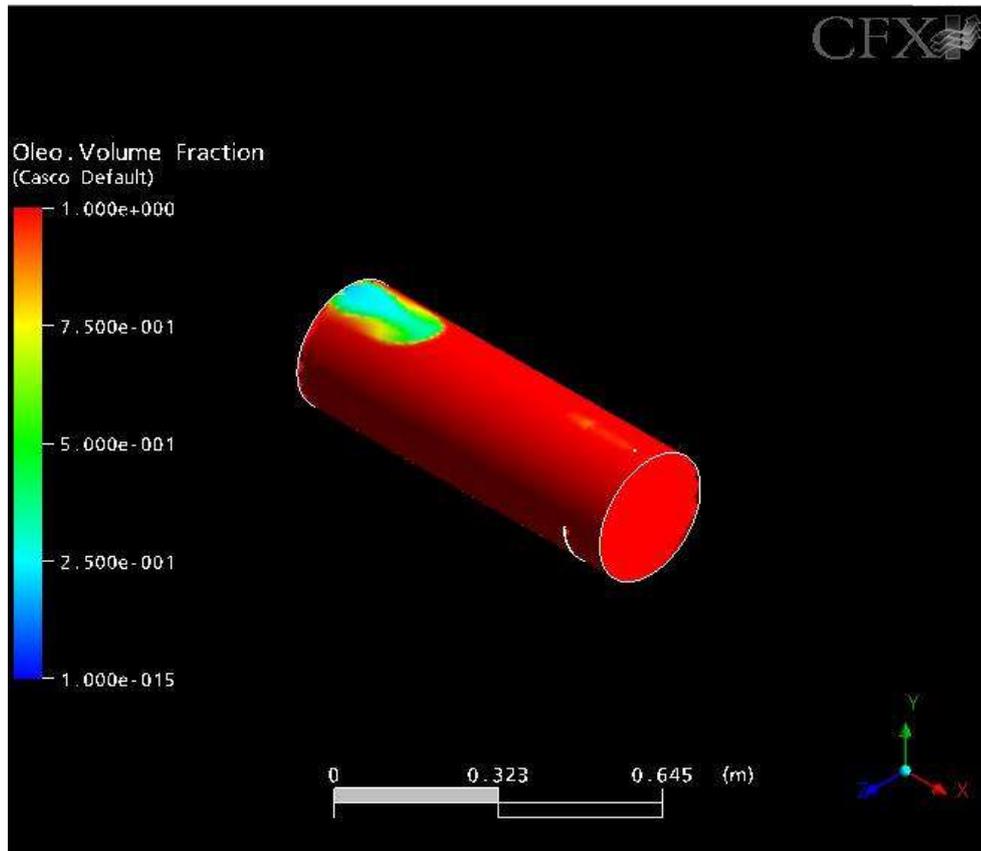


Figura 29 - Fração volumétrica de óleo no caso bifásico estacionário, na geometria com vertedor

Apesar do resultado das linhas de corrente de óleo ter sido um pouco mais próximo do esperado, o resultado de fração volumétrica de óleo foi praticamente igual ao resultado anterior.

As Figuras 30 e 31 comprovam o que ocorre na Figura 29, ou seja, que só há gás livre na parte inicial do separador e que na seção média do separador já não há mais vestígios de gás livre.

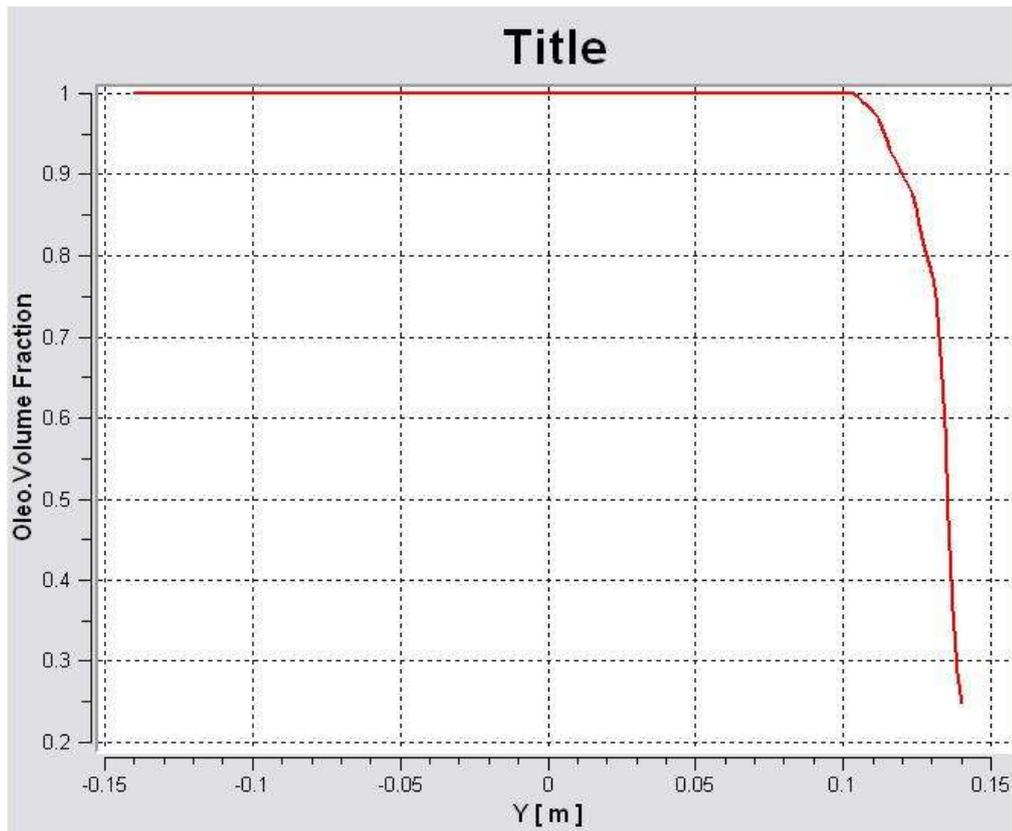


Figura 30 - Gráfico da fração volumétrica de óleo na seção inicial do separador

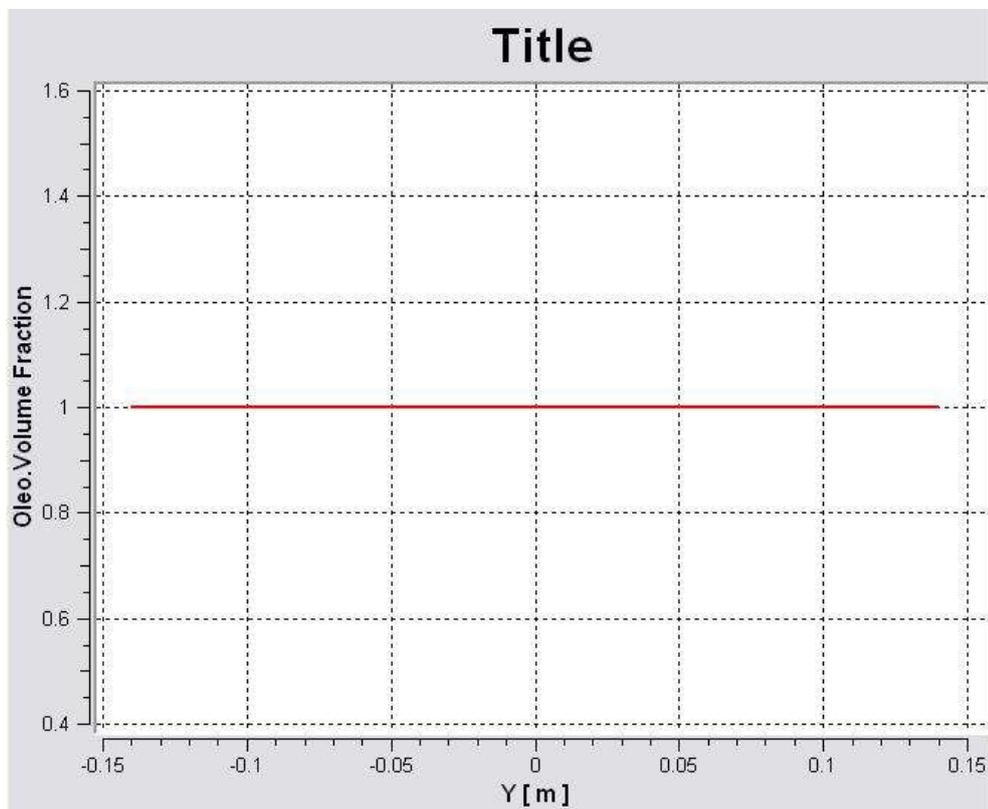


Figura 31 - Gráfico da fração volumétrica de óleo na seção média do separador

O balanço de massa encontrado nesta simulação foi o apresentado a seguir:

Entrada de gás: 0.000328426 [kg s⁻¹]

Entrada de óleo: 0.111938 [kg s⁻¹]

Saída de óleo: 7.738e-011 [kg s⁻¹] de gás e 0.115646 [kg s⁻¹] de óleo

Saída de gás: 1.60783e-008 [kg s⁻¹] de gás e 0.0102658 [kg s⁻¹] de óleo

Saída de água: 4.0964e-011 [kg s⁻¹] de gás e 0.0616868 [kg s⁻¹] de óleo

O balanço global de massa possui, nesta simulação, também um erro global de 40.2 %.

Como a simulação estacionária não foi satisfatória, mudou-se o tipo de simulação para transiente, uma vez que os resultados irrealistas encontrados podem estar relacionados ao método numérico interno de cálculo empregado pelo CFX 10.0 ou aos modelos escolhidos. O método de cálculo, na verdade, é sempre transiente, e para a realização de uma simulação em estado estacionário, ele é modificado de modo a criar um estado pseudo-estacionário, onde as propriedades do escoamento não variam com o passar do tempo. Os modelos escolhidos para a realização da simulação, como o modelo volume fluid, também podem ser mais adequados a uma simulação transiente ou, como dito anteriormente, a própria natureza do escoamento no interior do separador pode ser transiente.

Os resultados da simulação transiente são completamente diferentes. O perfil de pressão é o resultado menos influenciado, estando numa faixa um pouco menor que o resultado anterior, porém ainda na mesma ordem de

grandeza. Este resultado pode ser visto na Figura 32, mais ilustrativa, e na Figura 33, onde observa-se informações quantitativas.

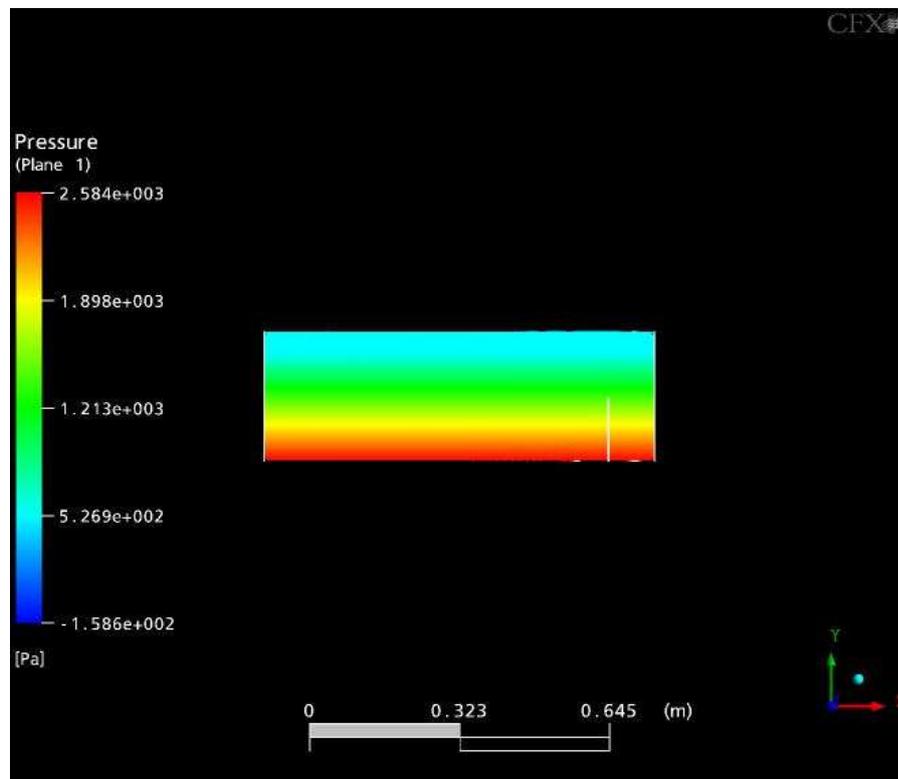


Figura 32 – Perfil de pressão no caso estacionário bifásico, geometria com vertedor

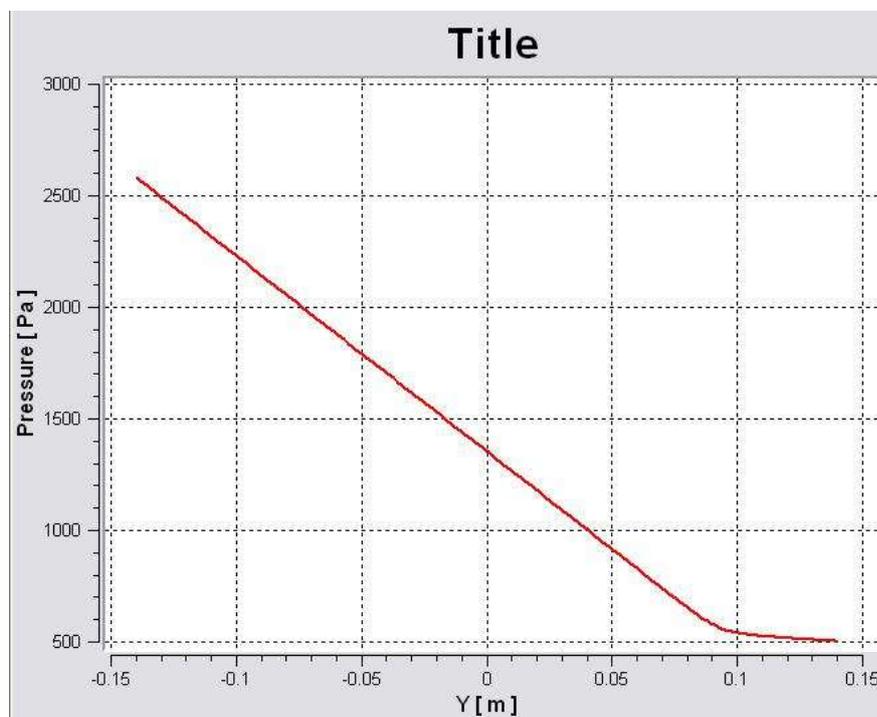


Figura 33 - Pressão ao longo de uma linha vertical situada na região central do separador

Quando os resultados para as linhas de corrente de óleo e de gás são analisadas a partir desta simulação em comparação com as outras, é que se nota o efeito marcante da mudança de tipo de simulação de estacionário para transiente. O resultado obtido é completamente dentro do esperado, um escoamento retilíneo e unidirecional até a barreira, que no caso é o vertedor. A camada de líquido situada abaixo da linha superior do vertedor sofre uma recirculação lenta, pois a velocidade é muito baixa neste ponto e isto é necessário, para não causar turbulência excessiva e, no caso de um separador trifásico, emulsionar novamente a água no óleo. Já a camada acima da linha do vertedor, sofre um desvio e segue uma trajetória uniforme até a saída de óleo. Mais detalhes podem ser vistos nas Figuras 34 e 35, que são duas vistas das linhas de corrente de óleo.

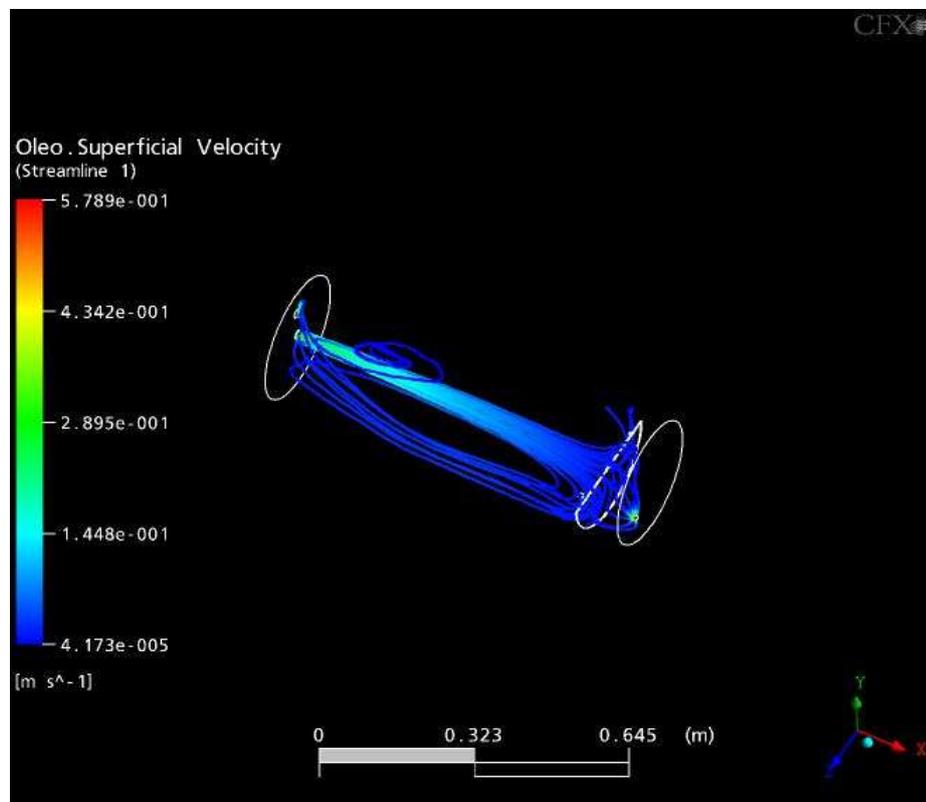


Figura 34 - Linhas de corrente de óleo no caso bifásico transiente, geometria com vertedor

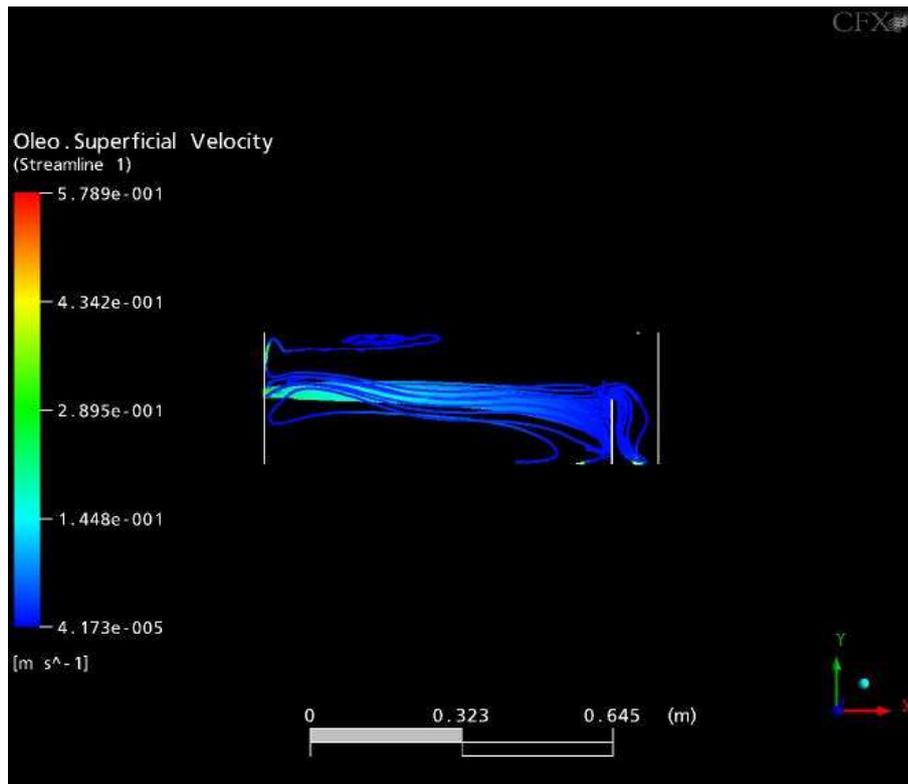


Figura 35 - Linhas de corrente de óleo no caso transiente bifásico, geometria com vertedor (vista lateral)

As recirculações são evidenciadas ainda mais na Figura 36, com o perfil de velocidade em forma vetorial. Estas são bem percebidas na parte inferior do separador, na câmara de separação.

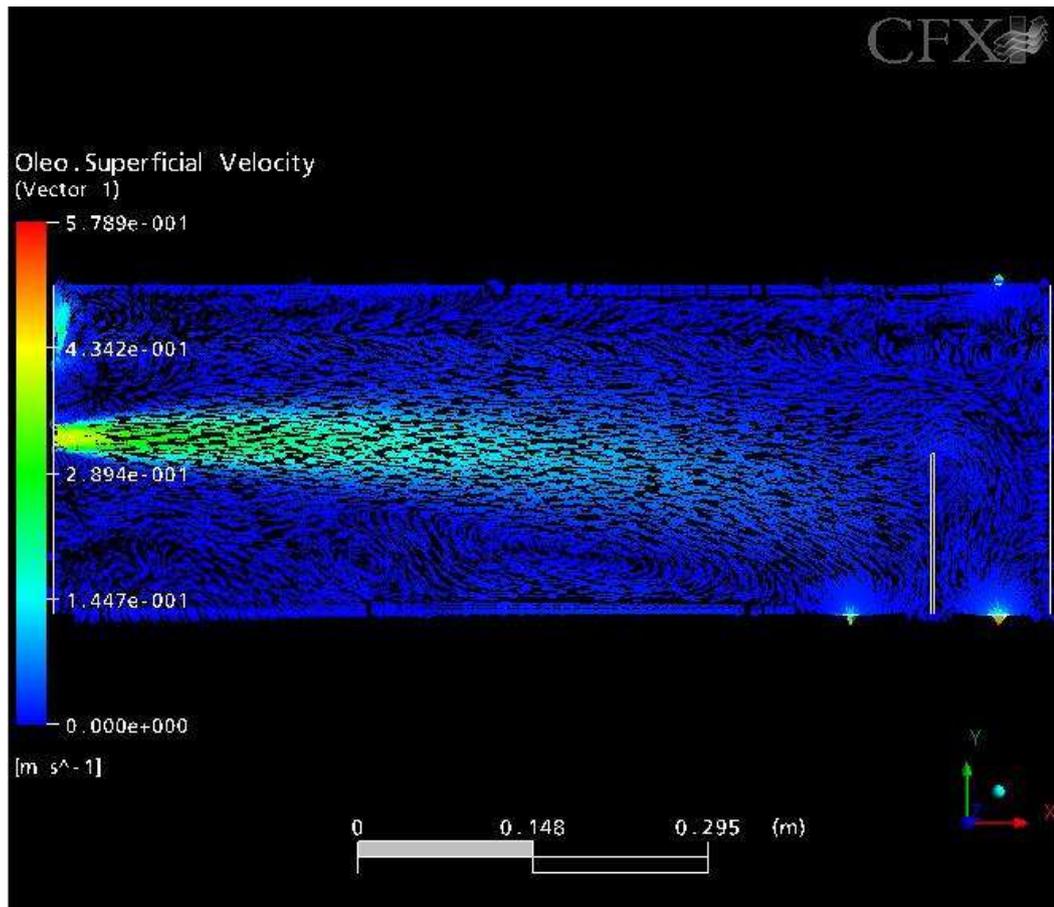


Figura 36 - Plano central vertical do separador, com perfil de velocidade em forma de vetores

Como mais uma forma de mostrar das recirculações, agora de forma quantitativa, tem-se a seguir a Figura 37, que é um gráfico de velocidade do óleo *versus* y, com amostras de dados tiradas de uma linha reta vertical que corta o separador exatamente no ponto central do mesmo.

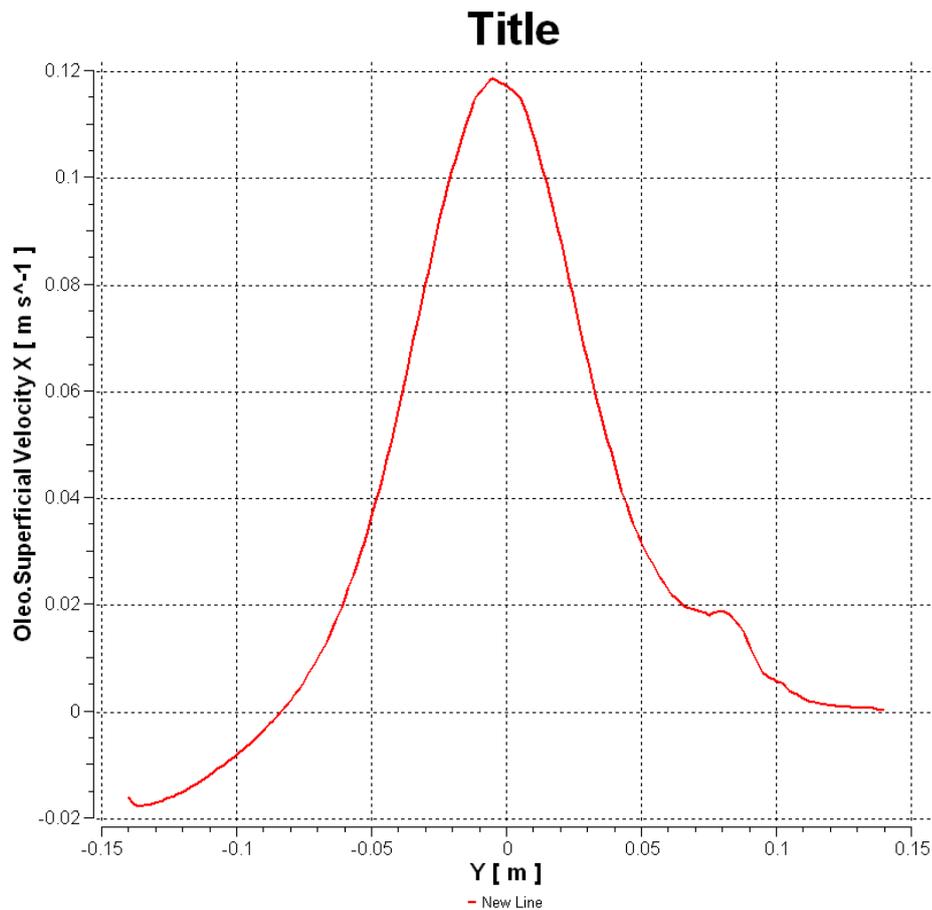


Figura 37 - Velocidade do óleo em função da altura, seção média do separador, caso bifásico transiente

Observa-se que a velocidade se torna negativa nos pontos mais baixos do separador, o que quer dizer que o fluido está em sentido contrário do que seria a sua direção normal. Estas recirculações, de certa maneira, poderiam ser prejudiciais no caso de uma separação água-óleo, pois poderiam ressuspender a camada inferior de água, refazendo parte da emulsão que já tinha sido separada. Esta situação poderia ser evitada com a utilização da placa perfurada na seção inicial do separador, diminuindo a velocidade do líquido e distribuindo o fluxo radialmente de modo que não haja mais a recirculação e evitando também a formação de caminhos preferenciais, que também dificultariam a separação água-óleo.

Nota-se também que a velocidade do óleo se aproxima rapidamente de zero um pouco acima da linha central do equipamento, evidenciando a presença da interface em torno deste local, o que pode ser comprovado pela Figura 38, que mostra o gráfico de fração volumétrica de óleo *versus* a altura (y).

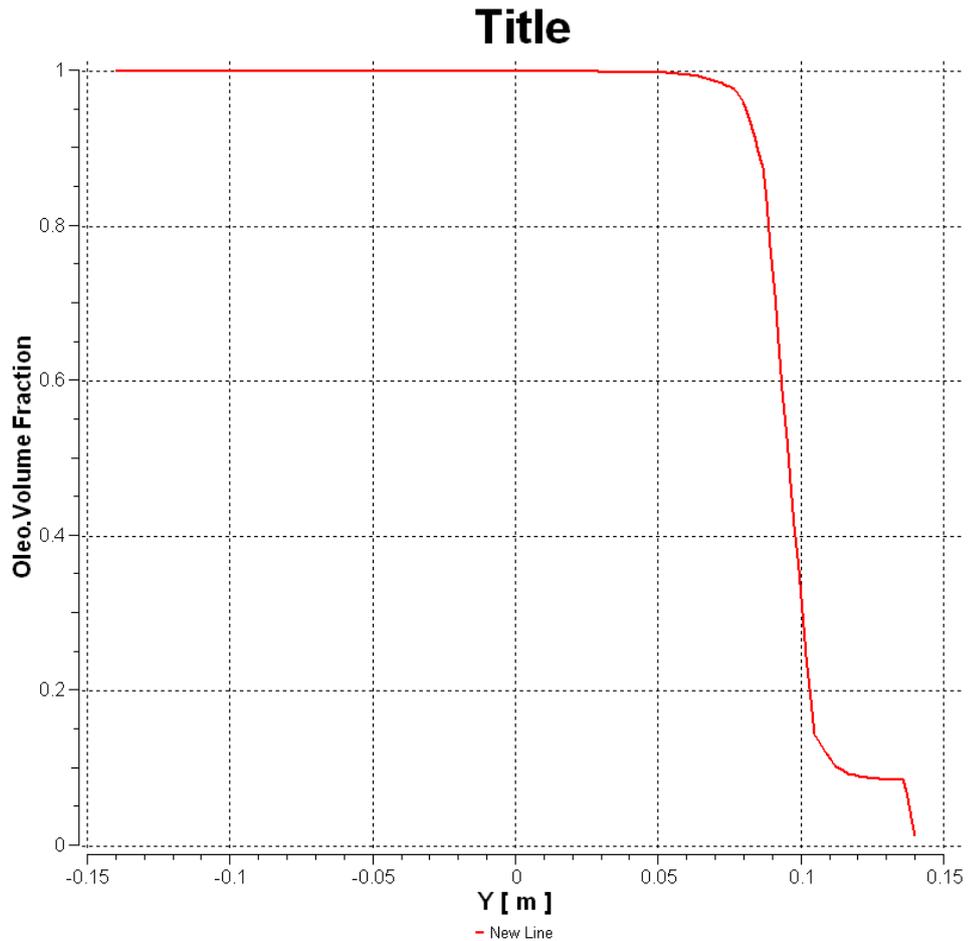


Figura 38 - Fração volumétrica de óleo, para o caso bifásico transiente, na seção média do separador

Este gráfico foi obtido através de amostras de dados colhidas na mesma linha vertical do gráfico anterior, na seção média do equipamento. Pode-se observar que a partir de aproximadamente 5 cm acima do plano central do separador, a fração volumétrica de óleo cai rapidamente a zero, no que seria o espaço ocupado majoritariamente pelo gás. A descontinuidade da curva de

fração volumétrica na região superior do separador pode ser atribuída a formação de uma pequena onda na interface entre os fluidos.

A Figura 39 apresenta a fração volumétrica de óleo para dados colhidos numa linha vertical próximo à entrada do separador, a cerca de 0.1 m da mesma, na Figura 38.

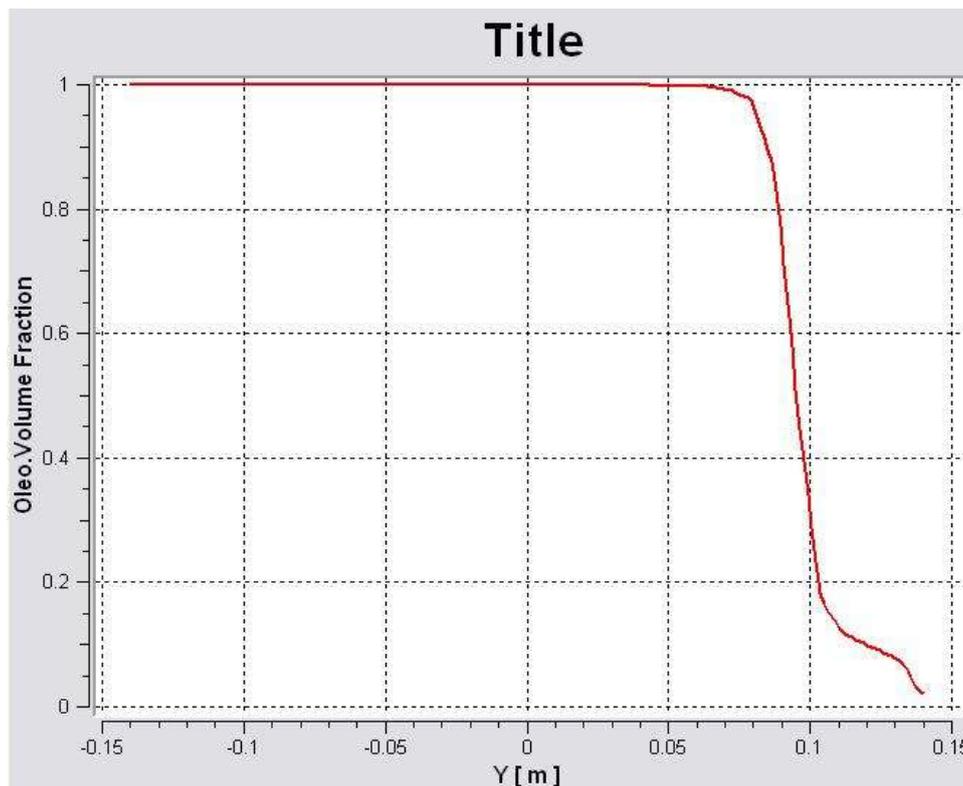


Figura 39 - Fração volumétrica, para o caso bifásico transiente, seção inicial do separador

Este resultado, observa-se que, mostra que o perfil de fração volumétrica é praticamente o mesmo do encontrado na seção média do separador.

A Figura 40 mostra, de forma mais ilustrativa, o nível de óleo no interior do separador, com uma interface de altura mínima, comprovando os resultados obtidos nos gráficos 38 e 39, resultados que refletem aproximadamente o que realmente ocorre no interior destes equipamentos.

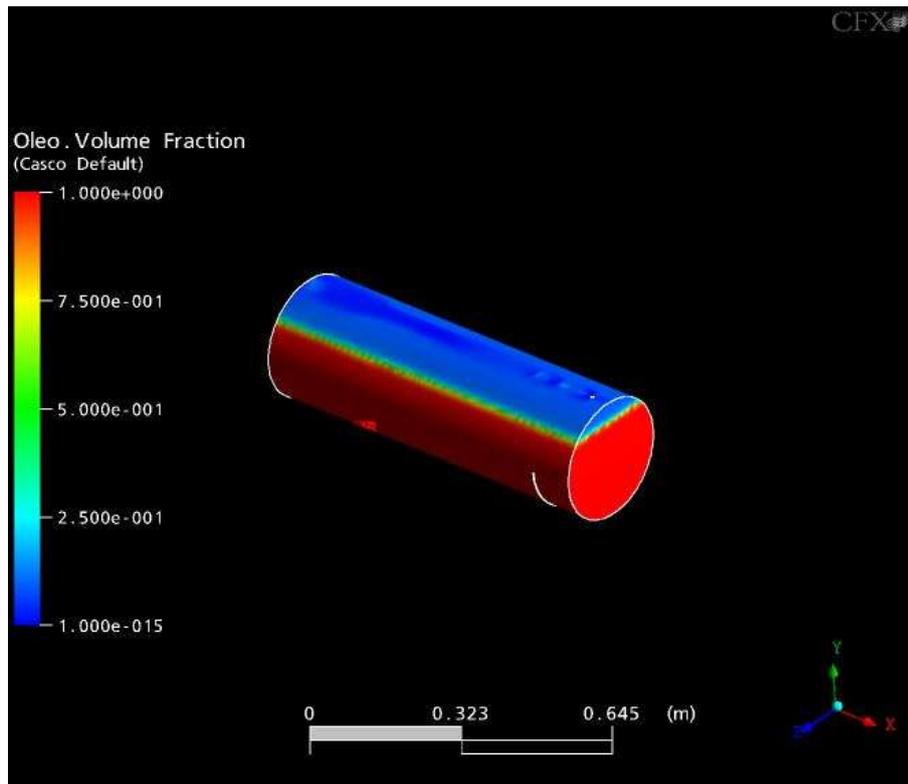


Figura 40 - Nível de óleo no separador, caso bifásico transiente

Como mais um resultado deste caso de simulação, tem-se a seguir a figura 40, mostrando as linhas de corrente de gás no interior do equipamento.

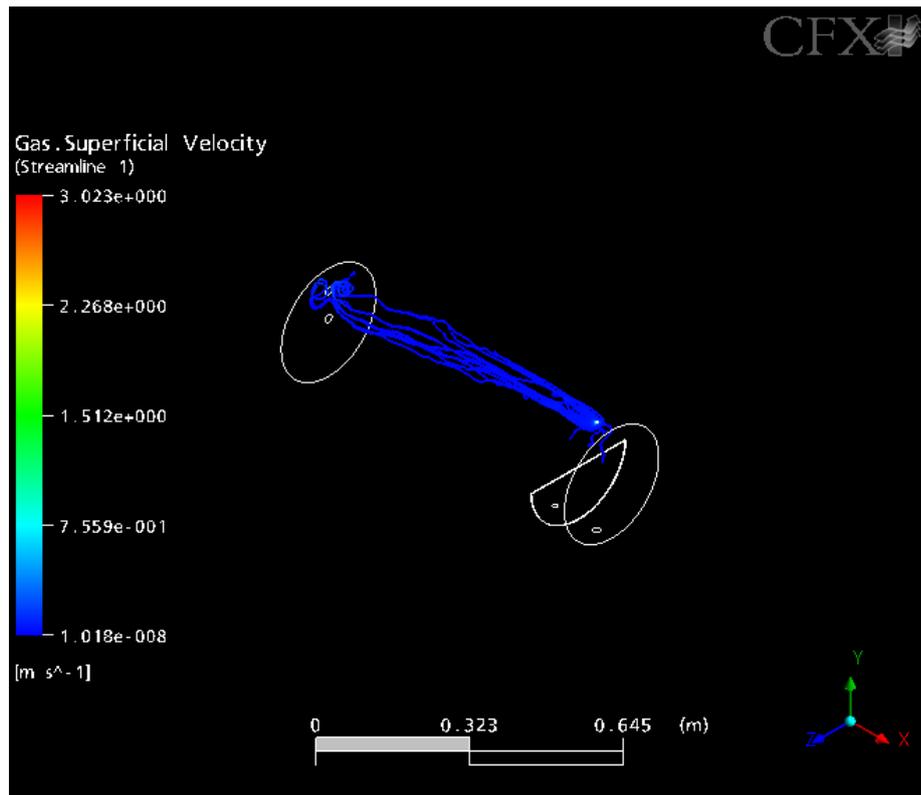


Figura 41 - Linhas de corrente de gás, caso bifásico transiente, geometria com vertedor

Como se pode verificar, as linhas de corrente de gás percorrem o caminho esperado, subindo à parte mais alta do separador e seguindo ao longo de todo o separador, até o bocal de saída do gás.

Para finalizar os resultados deste caso, o balanço de massa obtido para esta simulação é apresentado a seguir:

Entrada de gás: 0.000328426 [kg s⁻¹]

Entrada de óleo: 0.111938 [kg s⁻¹]

Saída de óleo: 2.71071e-007 [kg s⁻¹] de gás e 0.0885357 [kg s⁻¹] de óleo

Saída de gás: 0.000213025 [kg s⁻¹] de gás e 0.00439234 [kg s⁻¹] de óleo

Saída de água: 9.04512e-008 [kg s⁻¹] de gás e 0.0461483 [kg s⁻¹] de óleo

O erro global do balanço de massa nesta simulação foi de 19.4 %, bem menor que nos casos anteriores de simulação.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a simulação numérica de um separador gravitacional. Foram apresentados todos os aspectos de um separador, para que o entendimento deste equipamento ficasse claro antes da introdução das simulações. Muitas tentativas de simulação foram feitas até se chegar aos resultados apresentados aqui, e muitas outras foram feitas com o objetivo de se simular o escoamento trifásico completo. Estes resultados não foram mostrados aqui porque simplesmente não foi possível completá-los ainda, devido à limitação de tempo para a realização deste trabalho. Devido a todas as dificuldades encontradas, um aspecto percebido durante todo o tempo de trabalho foi que, além das simulações numéricas, é necessário todo um planejamento experimental em paralelo, para a validação dos dados das simulações.

Como uma investigação inicial, este trabalho forneceu algumas informações valiosas para a direção a ser tomada na realização destas simulações. Chegou-se a conclusão, por exemplo, de que não é possível simular este equipamento, com os modelos escolhidos neste trabalho, de forma estacionária, pois os resultados obtidos são irrealistas. Após todas as tentativas de simulação estacionária, chegou-se a uma simulação transiente que apresentou resultados mais coerentes que os obtidos com a simulação estacionária. Estes resultados, entretanto, ainda precisam de melhorias. E como conclusão final, foi observada a necessidade da realização de experimentos para a obtenção

de modelos de emulsão específicos para o óleo do campo estudado e para a obtenção de modelos de coalescência de gotas de água emulsionadas neste óleo específico.

Assim, a sugestão que fica para a continuidade deste trabalho é introduzir a água nas simulações, a fim de simular as condições de produção alguns anos após o início da produção da plataforma. Seria interessante também a simulação do equipamento em seu tamanho original e com as propriedades físicas reais dos fluidos. A inclusão de internos nas simulações também deveria ser mais explorada, principalmente a inclusão da placa perfurada logo na seção inicial do separador. Num estágio mais avançado, pode-se também incluir os movimentos de um navio-plataforma, para a observação das mudanças no escoamento dos fluidos no interior do equipamento nestas novas condições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ansys Inc, Manual do CFX 10.0

Silva, Rosivânia da Paixão – Geração e caracterização reológica de emulsões de água em óleo pesado para aplicações em projeto de separadores gravitacionais – Dissertação de Mestrado – Campinas, SP, 2004.

Lopes, Jansen M.; Neves, Guilherme B. M.; Lucas, Elizabeth F. – Avaliação da variação da viscosidade de óleo cru em função da adição de desemulsificante – Artigo publicado no 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

FOX, Robert W. & MACDONALD, Alan T. Introdução à mecânica dos fluidos. Rio de Janeiro: Guanabara S.A. 1988. 432p.