



DINÂMICA DO LÍQUIDO DE UM VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/ÓLEO: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Hortência Luma Fernandes Magalhães¹; Tairine Ellen Da Silva Freitas²; Severino Rodrigues de Farias Neto³

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química-
hortencia.luma@gmail.com

² Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química-
tairine.ellen@gmail.com

³ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química-
severino.rodrigues@ufcg.edu.br

RESUMO

Ao longo da vida produtiva de um campo petrolífero é comum observar uma produção simultânea de óleo, gás, água e contaminantes, dependendo das características da reserva petrolífera. O interesse econômico é a produção de hidrocarbonetos (gás/óleo), nesses casos empregam processos de separação, dentre os quais destaca-se os vasos separadores, sejam eles horizontais ou verticais, bifásicos ou trifásicos. Sabe-se que os vasos separadores horizontais usados na separação gás/líquido são mais eficientes especialmente quando há ocorrência de espumas ou altas razões gás/líquido, pois a área superficial de interface possibilita uma melhor decantação das gotículas de óleo presentes na fase gasosa, além de favorecer o desprendimento do gás da fase líquida. O conhecimento da dinâmica do equipamento possibilita a busca das melhores condições de funcionamento visando aprimorar o processo de separação. Neste sentido, foi realizada uma análise dos campos de fração volumétrica, pressão e velocidade superficial do óleo sob diferentes condições de entrada da mistura. Os resultados ilustram o comportamento da fase líquida e gasosa no interior do vaso separador para diferentes valores de viscosidade do óleo.

Palavras-chave: Separação água/óleo, superfície livre, ANSYS CFX.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da vida produtiva de um campo petrolífero é comum se observar uma produção simultânea de óleo, gás, água e contaminantes, dependendo das características da reserva petrolífera. A presença de água, geralmente, é decorrente da própria água conata ou da água injetada na recuperação secundária da reserva de petróleo [BRASIL *et al.*, 2011; ZIMMERMANN, 2014]. O gás, dependendo de sua razão de sensibilidade, costuma ser produzido misturado ao óleo (gás natural associado) ou isolado (gás natural não associado).

Em geral, os campos petrolíferos são constituídos por plantas de processamento primário, equipadas com instrumentos e sistemas cujo objetivo é promover a separação dos componentes (água, gás, óleo, partículas sólidas e contaminantes), visto que o mercado exige uma produção de qualidade de hidrocarbonetos (óleo e gás). A presença de outras substâncias pode ser um aspecto negativo, sobretudo no que diz respeito à segurança operacional e ao transporte.

A necessidade de separação do gás está ligada a formação de bolhas que podem conduzir a formação de diferentes



padrões de escoamento no interior de tubulações que podem prejudicar o transporte do óleo ou danificar os equipamentos conectados a esta tubulação. De acordo com Almeida [2006] em uma instalação de processamento primário de fluidos, o gás, por ser menos denso, é inicialmente separado do líquido por ação da gravidade em equipamentos denominados vasos separadores, que podem ser horizontais ou verticais, bifásicos ou trifásicos, atuando em série ou em paralelo.

Segundo Freitas *et al.* [2007], os vasos separadores horizontais usados na separação gás/líquido são mais eficientes especialmente quando há ocorrência de espumas ou altas razões gás/líquido. Tal fato é favorecido, segundo os autores, pela área superficial de interface que possibilita uma melhor decantação das gotículas de óleo presentes na fase gasosa, além de favorecer o desprendimento do gás da fase líquida separada.

De acordo com Pasetti [2007], tradicionalmente são posicionadas placas defletoras (chicanas) perpendicularmente ao duto de alimentação de um vaso separador visando evitar que a corrente de alimentação se projete diretamente dentro do equipamento. No entanto, o impacto do fluxo de alimentação com a placa defletora conduz à mistura das correntes de líquido e de gás, o que pode levar ao arraste de líquido pelo gás e de gás pelo líquido e, conseqüentemente, à formação de espuma. Este fato dificulta o controle do nível dentro do vaso e afeta a eficiência de separação gás/óleo.

Segundo Almeida [2006] o processamento primário se faz necessário, entre outros fatores para: promover a retirada de parte das impurezas em suspensão; tratar a água de modo a devolvê-la livre de impurezas (resíduo de óleo, gás carbônico etc) ao meio ambiente ou utilizá-la para reinjeção; facilitar o transporte para os terminais e refinarias.

O presente trabalho tem como propósito avaliar e investigar a dinâmica do escoamento de uma mistura bifásica (gás/óleo) em um vaso separador horizontal durante o processo de separação.

2. METODOLOGIA

2.1. Domínio físico de estudo

O problema físico estudado consiste no escoamento transiente, bifásico (gás, óleo) em um vaso separador equipado com uma seção de entrada e duas seções de saída como esquematizado na Figura 1.



Figura 1: Esquema de um separador bifásico (Fonte: THOMAS [2004])

Representação do vaso separador ilustrado na Figura 2 constitui-se de um vaso simplificado, em um plano bidimensional.

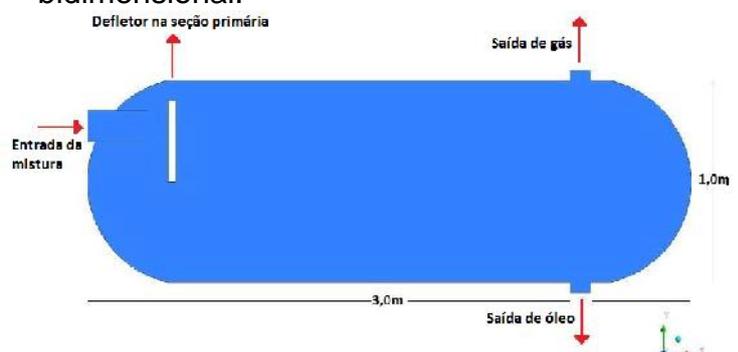


Figura 2: Geometria criada para representar o domínio físico de estudo.



2.2. Malha numérica

A malha numérica representada na Figura 3 é constituída por 87633 elementos prismáticos gerada usando o ICFM CFD.

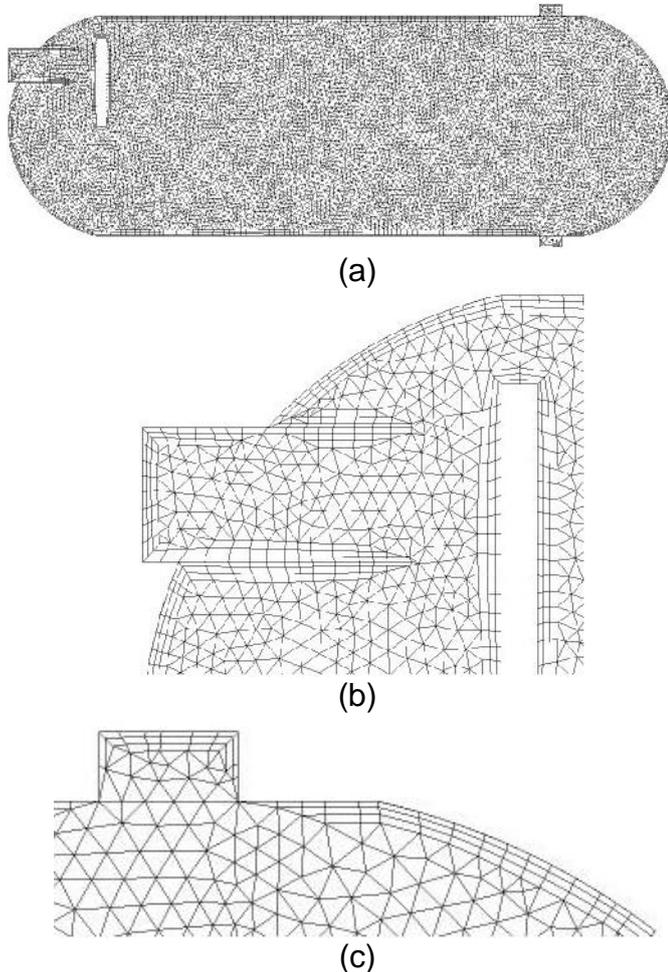


Figura 3: Representação da malha: (a) visão geral, (b) detalhamento da região de entrada e (c) detalhamento de uma das regiões de saída.

2.3. Modelo matemático

O modelo matemático é baseado nas equações conservação da massa e de quantidade de movimento.

Para o estudo do escoamento bifásico (gás/óleo) as seguintes considerações foram adotadas:

- O escoamento é isotérmico e os fluidos são incompressíveis;
- Regime transiente;

- Não há transferência de quantidade de movimento devido à transferência de massa na interface água/óleo;
- Não há reações químicas;
- O regime de escoamento é turbulento;
- As superfícies do vaso separador foram consideradas sem rugosidade.

O modelo de superfície livre utilizado para prever o escoamento assume que as fases presentes são contínuas e a força devido à tensão superficial é modelada como uma força concentrada na interface ao invés de uma força de superfície. O modelo de tensão superficial utilizado pelo CFX baseia-se no modelo da Força de Superfície Contínua de Brackbill *et al* [1992].

Assim, com estas considerações as equações de conservação de massa e momento linear reduzem-se à:

- Equação de conservação de massa

$$\frac{\partial \dots}{\partial t} + \nabla \cdot (f_r \dots_r \vec{U}_r) = 0 \quad [1]$$

onde f_α , ρ_α e U_α são, respectivamente, a fração volumétrica, viscosidade e vetor velocidade da fase α .

- Equação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial (\dots \bar{U})}{\partial t} + \nabla \cdot [f_r (\dots_r \vec{U}_r \otimes \vec{U}_r)] = -f_r \nabla p_r + \nabla \cdot \left\{ f_r \tilde{\nu}_{ef} \left[\nabla \vec{U}_r + (\nabla \vec{U}_r)^T \right] \right\} + S_{Mr} + F_{rs} \quad [2]$$

onde p é a pressão, $\tilde{\nu}_{ef}$ a viscosidade efetiva (viscosidade dinâmica mais a viscosidade turbulenta), o termo S_{Mr} representa as forças de momento devido às forças de corpo externas, tais como a



força de empuxo e força rotacional. F_{rs} representa a força de tensão superficial dada pela Equação 3:

$$F_{rs} = r_{rs} u_{rs} \quad [3]$$

onde r e u são dados pelas Equações 4 e 5:

$$r_{rs} = -\tau_{rs} |_{rs} n_{rs} + \nabla_s \tau \quad [4]$$

$$u_{rs} = |f_{rs}| \quad [5]$$

onde τ é o coeficiente de tensão superficial, n é o vetor normal à interface apontando do fluido primário ao secundário (calculado a partir do gradiente de uma fração volumétrica), ∇_s é o operador gradiente na interface e τ é a curvatura da superfície definida pela Equação 6:

$$|_{rs} = \nabla \cdot n_{rs} \quad [6]$$

A área de contato superficial por unidade de volume, A_{rs} , para o modelo de superfície livre é definida pela Equação 7:

$$A_{rs} = |\nabla f_r| \quad [7]$$

onde f representa a fração volumétrica da fase .

- Modelo de turbulência

Adotou-se o modelo de turbulência $k-\epsilon$.

- Condições de contorno

Para finalizar o modelo matemático foram definidas as seguintes condições de contorno sobre as fronteiras do domínio de estudo (Figura 2) para o escoamento dentro do vaso separador.

- Seção de entrada da mistura: foi adotado um valor uniforme e não

nulo para a fração volumétrica e para as componentes de velocidade da mistura.

$$u = v = 0 \text{ e } w = U_{\text{Água}} \text{ para } \forall(x, y) \quad [8]$$

$$f_{\text{Óleo}} = 1,0$$

- Nas paredes da tubulação, da placa defletora e do vaso, foi adotada a condição de não-deslizamento (*No Slip Wall*) para o óleo. Essa condição permite que óleo assuma a mesma velocidade da parede do tubo.
- As seções de saída de gás e óleo foram definidas como *Opening*, com pressão relativa igual a 0 Pa e *Opening Pressure*, respectivamente.

- Propriedades físico-químicas dos fluidos

Na Tabela 1 estão representados os valores das propriedades dos fluidos utilizados.

Tabela 1: Propriedades físico-químicas dos fluidos usados nas simulações do presente estudo.

Propriedades físicas	Gás	Óleo
Densidade (kg.m ⁻³)	1,185	925,5
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	1,831E-05	0,001 0,1 1,0 2,5 5,0
Tensão superficial (N.m ⁻¹)	0,072	0,072

Fonte: Buriti [2013]

As simulações foram realizadas em um computador Intel Core i3 2.4GHz, 4GB



RAM e HD de 500GB. Para a obtenção da simulação numérica foi utilizado o software ANSYS CFX Release 15.0. Com um critério de convergência de 10^{-7} kg.s⁻¹ para a massa.

O trabalho foi desenvolvido nas seguintes etapas:

- Inicialmente foram simulados os casos em regime de escoamento transiente variando a viscosidade do óleo e mantendo a mesma densidade;
- Posteriormente, foi escolhida uma viscosidade e foram simulados os casos em regime de escoamento transiente variando a vazão de entrada da mistura.

A Tabela 2 apresenta os dados e condições usados nas simulações.

Tabela 2: Dados e condições utilizados nas simulações.

Casos	Viscosidade (Pa.s)	Vazão (kg/s)
1	0,001	4
2	0,1	4
3	1,0	4
4	2,5	4
5	5,0	4
6	0,1	3
7	0,1	2

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Campos

Na Figura 4 estão representados os campos de fração volumétrica do óleo de viscosidade 0,1 Pa.s. Visando simular o comportamento de golfadas no interior do vaso separador foi definida uma condição de contorno de velocidade de entrada de líquido (água ou óleo) que assegura, no período de 0 a 5 segundos, uma corrente

contínua de líquido. No período seguinte (entre 5 e 10 s) foi interrompido a condição de entrada de líquido. Após os primeiros 5 segundos, observa-se uma redução no nível de líquido no interior vaso separador bifásico.

A Figura 4 ilustra o comportamento das fases gás e óleo no interior do vaso separador em diferentes instantes de tempo (0; 0,18; 0,48; 0,88; 1,28; 1,68; 2,58; 6,08; 7,78 e 10 s).

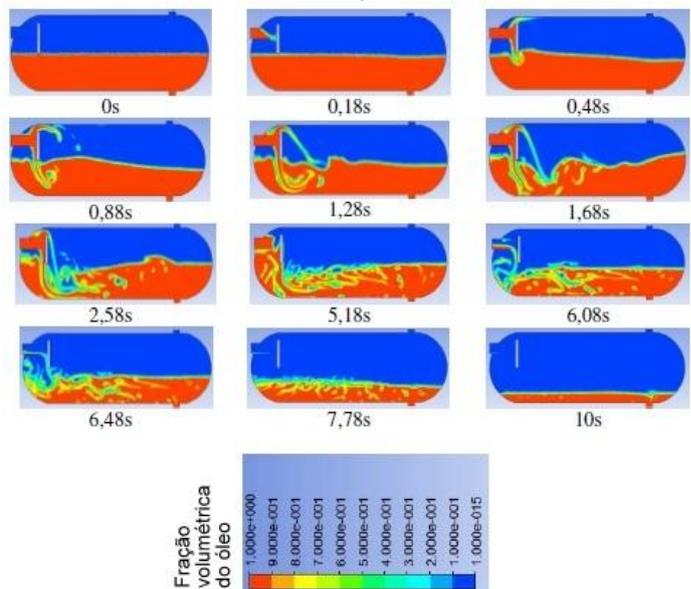


Figura 4: Campos de fração volumétrica do óleo no plano yz em diferentes instantes de tempo para a viscosidade 0,1 Pa.s.

No instante inicial, o vaso preenchido com óleo até a metade. Os fluidos ao entrar no vaso separador da início a mudanças no comportamento do óleo e do gás. A eficiência da separação é favorecida pelo choque do óleo com a placa defletora, uma fração do fluido é lançada sobre a placa, causando zonas de mistura (turbulência) no fluido a partir dos fluidos em repouso. Observa-se no instante 0,48s uma perturbação no nível de óleo, criando um movimento em ondas no interior do vaso separador.

Nas Figuras 5 e 6, estão representados os campos de pressão e de velocidade superficial para uma viscosidade constante (0,1 Pa.s) sobre um plano longitudinal. Observa-se de uma



maneira geral, que o campo de pressão varia com o tempo, em consequência das modificações do campo de velocidade observadas antes e após a interrupção do fluxo de óleo na seção de entrada no instante 5,0s.

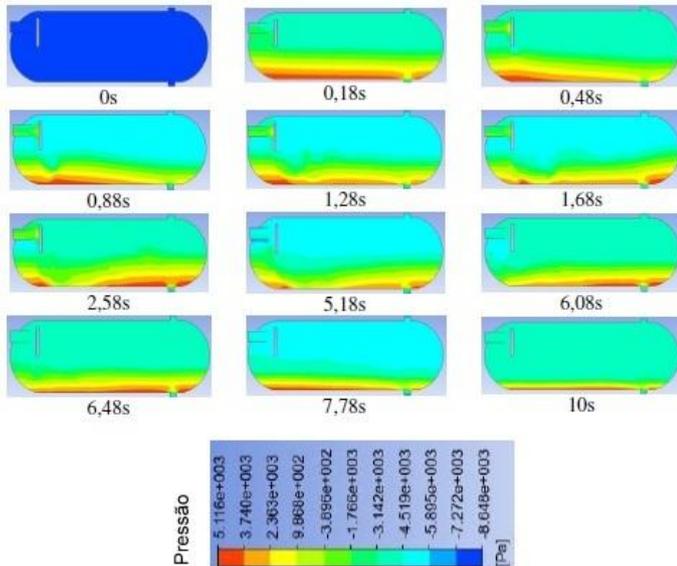


Figura 5: Campos de pressão do óleo no plano yz em diferentes instantes de tempo para a viscosidade 0,1 Pa.s.

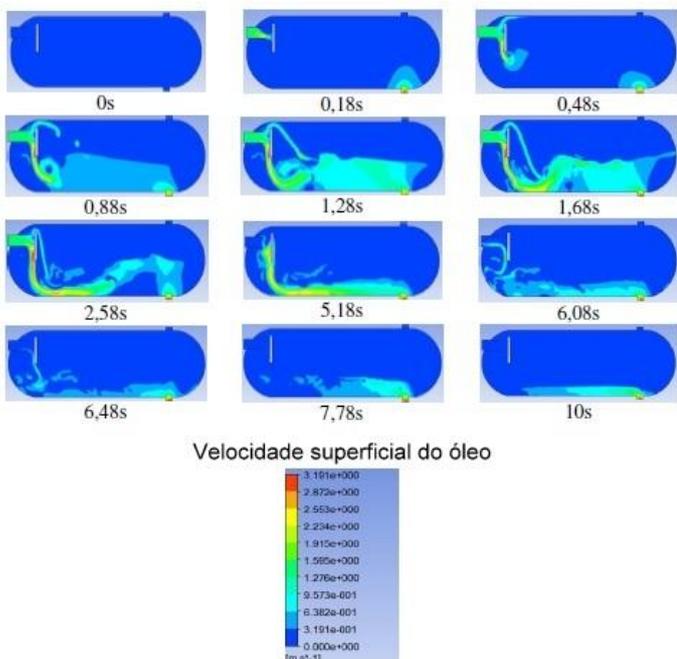


Figura 6: Campos de velocidade superficial do óleo no plano yz em diferentes instantes de tempo para a viscosidade 0,1 Pa.s

3.2. Efeito da viscosidade

Na Figura 7, estão representados os campos de fração volumétrica em três instantes (1,68; 5,18 e 7,78 s) para diferentes viscosidades do óleo (0,001; 0,1; 1,0; 2,5 e 5,0 Pa.s). É possível observar a diferença no comportamento do óleo de acordo com a mudança da viscosidade. De uma maneira geral, se observa uma diminuição significativa do nível de mistura gás-óleo no interior do vaso separador e, conseqüentemente, uma menor dispersão do gás no óleo. Este fato é interessante no que se diz a separação das fases.

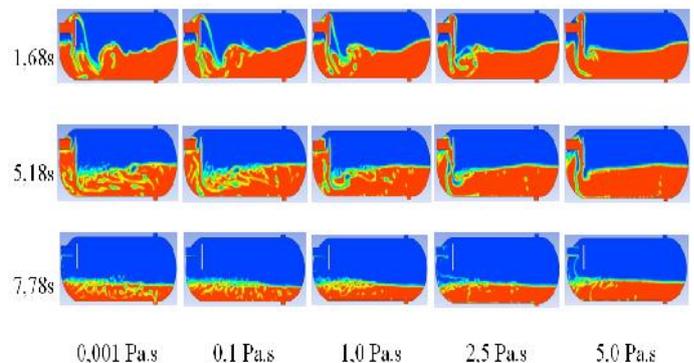


Figura 7: Frações volumétricas de óleos com diferentes viscosidades nos mesmos instantes de tempo.

No instante 1,68s, é possível observar algumas mudanças significativas. Nas viscosidades 2,5 Pa.s e 5,0 Pa.s, o fluido não consegue atingir um grande alcance em relação à placa defletora. Percebe-se que quanto mais viscoso o óleo, maior a dificuldade em ultrapassar a placa, ou seja, há uma maior resistência ao movimento. Conseqüentemente, a formação de zonas de mistura diminui, como pode ser observado comparando os óleos de viscosidade 0,001 Pa.s e 5,0 Pa.s. O escoamento de um líquido com baixa viscosidade cria movimentos de ondas dentro do reservatório, logo nota-se que, quanto menor a viscosidade, maior a instabilidade do nível de óleo presente no vaso.



No instante 5,18s, logo após o fechamento da válvula de entrada, observa-se uma diminuição das zonas de turbulência ao longo do vaso separador. A partir deste instante observa-se uma diminuição do nível de óleo no vaso separador, ratificado no instante 7,78s, ainda com a válvula fechada, pode-se notar que, além da diminuição das zonas de turbulência, há uma redução do nível de óleo. À medida que a viscosidade aumenta, a vazão de escoamento inferior diminui.

Este comportamento é ratificado com auxílio da Figura 8, onde foi representada a evolução da vazão de óleo de saída do vaso separador em função do tempo.

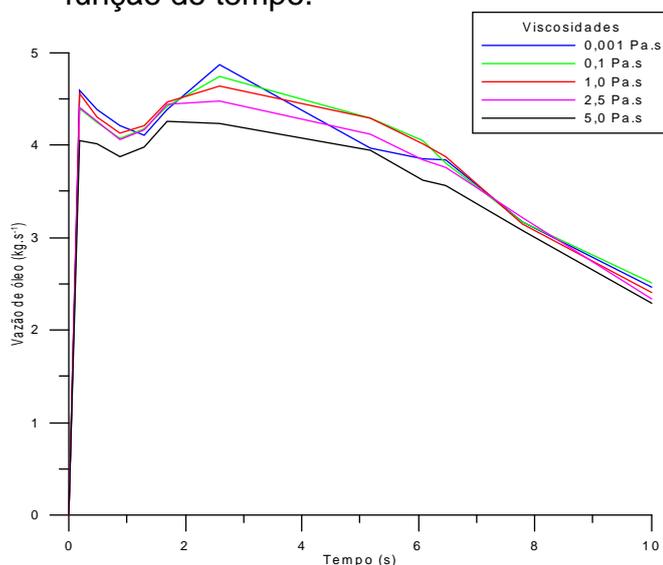


Figura 8: Vazão da saída de óleo em função do tempo.

As curvas da Figura 8 possuem comportamentos semelhantes ao longo do tempo, porém ao final da simulação, percebe-se que as vazões de saída de óleo variam significativamente com a variação da viscosidade.

Ainda com o propósito de avaliar a influência da viscosidade, plotou-se as curvas da fração volumétrica dos óleos em função do diâmetro do vaso separador para os diferentes valores de viscosidades avaliadas, como ilustrado na Figura 9.

Na posição $x = 1,5$ m foi traçada uma linha da parede inferior à parede superior do vaso, tornando possível avaliar o comportamento da fração volumétrica do óleo ao longo da posição y . Observa-se que, como esperado, o óleo possui frações volumétricas elevadas entre as posições -0,5 e -0,35 m, ou seja, na região inferior do vaso separador, onde se concentra o óleo decantado. É possível observar que, por ser mais viscoso, a fração volumétrica do óleo com viscosidade igual a 5,0 Pa.s possui um comportamento mais estável. À medida que se avança no eixo y , atinge-se a região de gás, na qual a fração volumétrica diminui até alcançar o valor nulo.

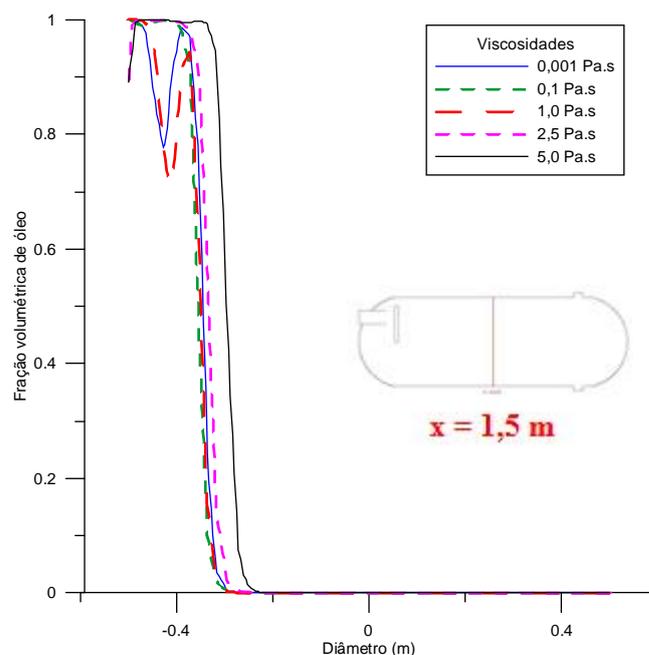


Figura 9: Fração volumétrica do óleo em função do diâmetro do vaso separador.

3.3. Efeito da vazão

Na Figura 10, estão representados os campos de fração volumétrica do óleo nos mesmos instantes de tempo para as três vazões estudadas 2(a), 3 (b) e 4 (c) kg.s^{-1} .

Observa-se que quando o óleo entra no vaso a uma vazão de $2,0 \text{ kg.s}^{-1}$, não tem força suficiente para ultrapassar



a placa defletora, consequente a maior parte do óleo é direcionada para a parte inferior do vaso separador. A menor vazão também acarreta menores ondas e zonas de turbulência, mantendo o nível do fluido mais estável em relação às outras duas vazões.

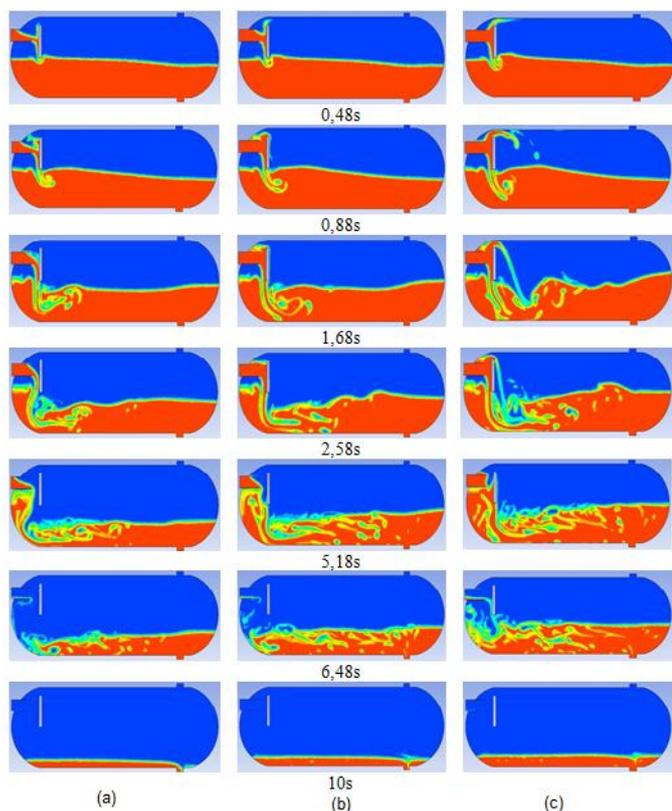


Figura 10: Evolução do campo de fração volumétrica em função do tempo para diferentes vazões: a) 2,0; b) 3,0; c) 4,0 kg.s^{-1} .

Na Figura 11 está representada a evolução da vazão de saída de óleo em função do tempo para três vazões mássicas de entrada no vaso separador. Observa-se que quanto menor a vazão de entrada da mistura, menor a vazão de saída do óleo. Há uma diferença de aproximadamente $1,44 \text{ kg.s}^{-1}$ entre a maior e a menor vazão de entrada.

Na Figura 12 estão representados os perfis de concentração para três vazões mássicas em função do diâmetro do vaso separador na posição $x = 1,5 \text{ m}$.

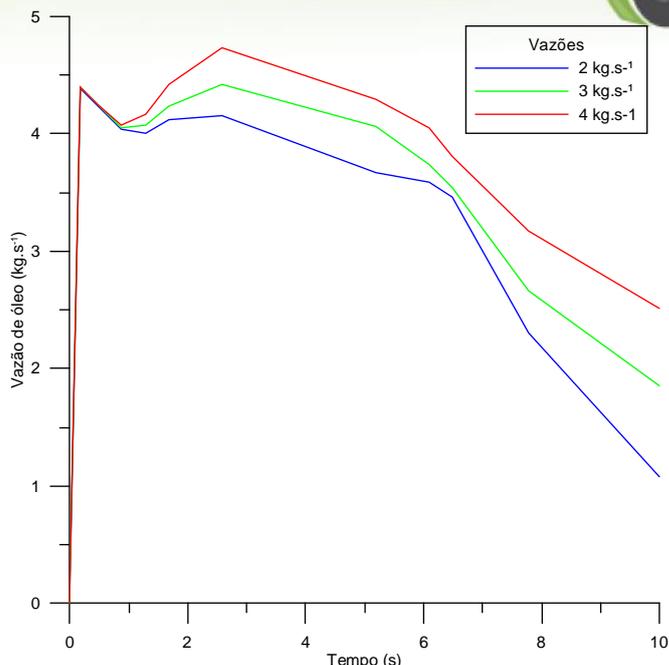


Figura 11: Vazão da saída de óleo em função do tempo.

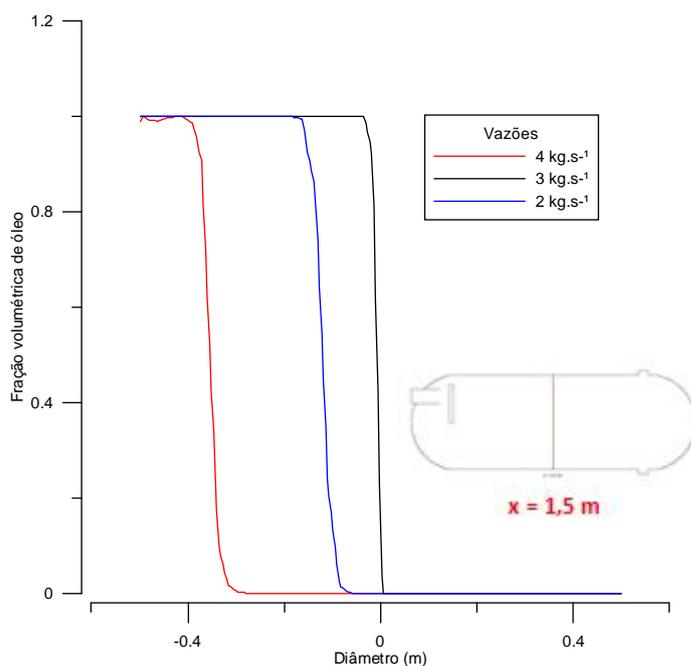


Figura 12: Fração volumétrica do óleo em função do diâmetro do vaso separador.

A maior vazão apresenta uma queda na fração volumétrica mais rápida em relação às outras duas vazões. Fazendo um paralelo entre as Figuras 12 e 10c, percebe-se que, na posição analisada há várias zonas de turbulência, mostrando



que a queda ocorre em aproximadamente $y = - 0,35$ m.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e apresentados a cerca do presente estudo, pode-se concluir que:

- A modelagem matemática foi capaz de representar o comportamento do óleo e do gás no interior do vaso separador;
- Foi possível observar que óleos de maior viscosidade proporcionam ondas no interior do vaso separador e regiões de mistura de menor intensidade;
- Verificou-se que menores vazões de mistura proporcionam ondas e zonas de mistura de menor intensidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. **Introdução a Indústria do Petróleo**. PETROBRAS. FURG-CTI. Rio Grande, 2006.

BRACKBILL, J. U.; KOTHE, D.B.; ZEMACH, C. **A Continuum Method for Modelling Surface Tension**, Journal of Computational Physics 100:335-354, 1992.

BRASIL, N. I.; ARAÚJO, M. A. S.; SOUSA, E.C.M. **Processamento Primário de Petróleo e Gás**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

BURITI, C. J. O. **Análise termofluidodinâmica de escoamento água-óleo em conexões na presença de vazamento: modelagem e simulação**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. UFCG, 2013.

FREITAS, A.G.B; SANTANA, C.R; SILVA, R.P.; SILVA, G.F. **Investigação das**

facilidades e métodos utilizados atualmente no processamento primário de petróleo em campos onshore e offshore. IV Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Campinas, 2007.

MARINHO, J.L.G. **Estudo do escoamento multifásico tipo bolha de Taylor em dutos e conexões curvadas**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. UFCG, 2008.

PASETTI, G., **Vaso separador teste**, Manual de operação e treinamento, PETROBRAS, IESA, Projetos Equip. e Mont. S/A, 2007.

THOMAS, J. E. (org.). **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Ed. Interciência: PETROBRAS, 2004. p.225 - 271.

ZIMMERMANN, M.S., **Modelagem e simulação do processo de separação gás/óleo empregando um separador ciclônico**. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Graduação em Engenharia Química. UFCG, 2014.