

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

SIMULAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DE ÓLEO EM ÁGUAS
PRODUZIDAS USANDO HIDROCILONE

AUTORES:

João Paulo Teixeira Matias, Raquel Bezerra Rodrigues de Melo Freitas, Vanessa Katllen Costa, Wayne Gabriel Nóbrega Firme, Drº Tony Herbert Freire de Andrade

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

SIMULAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DE ÓLEO EM ÁGUAS PRODUZIDAS USANDO HIDROCILONE

Abstract

Different techniques of treatment it has been applied in the industrial processes for the desestabilization of emulsions in which occurs the separation in distinct phases. One way to promote this separation that is proving increasingly effective is hydrocyclone. The hydrocyclone is a device that separates fluids by means of centrifuge separation, in which the motive force of separation comes for the transformation of static energy of the fluid in dynamic energy. Therefor, is a good alternative for the separation of produced waters, as it has a low operating costs and has high efficiency. This work has objective evaluate through the numeric simulation the processo of separation of oil in produced waters whit fractions of 5%, 10% and 15% via hydrocyclones. For this, was used the commercial package ANSYS CFX Release 2015. The mathmatic model used considerate the threedimensional flow, turbulent and permanente. And, for this, used the model of interfacial transfer of particules, the equations of moment conservation and mass, and the turbulence model RNG k- ϵ . In this sense, will be evaluated the pression field, volumetric fracions, superficial velocity of the envolved phases, beyond efficiency of separation of this phases, in the hydrocyclon.

Introdução

Durante a exploração de um campo de petróleo, costuma-se produzir, simultaneamente, gás, óleo, água e alguns sólidos contaminantes. A água está sempre associada ao fluido produzido, sendo proveniente da formação ou da injeção de água no reservatório, decorrente de algum método de recuperação suplementar. Ao escoar do reservatório à superfície, através da coluna de produção, o fluido produzido é elevado sob regime turbulento, sendo submetido à altas taxas de cisalhamento, formando uma emulsão, devido à presença de tensoativos naturais do petróleo. A emulsão formada tem a água produzida como fase dispersa e a fração oleosa como fase contínua (THOMAS, 2004).

Diversas técnicas de tratamento têm sido aplicadas nos processos industriais para a desestabilização de emulsões, na qual ocorra a separação em fases distintas. Um dos principais processos de separação para a desestabilização da emulsão consiste na aplicação de campo gravitacional (separadores gravitacionais) ou de campo centrífugo (hidrociclone), sendo este último particularmente útil para a separação óleo em água (O/A), conhecida como emulsões inversas, na qual apresentam gotas de óleo dispersas em água. A eficiência desse equipamento na separação de fases depende da geometria do hidrociclone e de parâmetros operacionais, que incluem: massa específica das fases, viscosidade do fluido de alimentação, fração volumétrica dos componentes e a pressão de admissão (BARBOSA, 2011).

Os hidrociclones possuem forma cone-cilíndrica e realizam a separação das fases de acordo com a diferença de densidade entre elas. Esses equipamentos consistem em vasos de pressão de forma cilindro-cônica, o fluido a ser separado é injetado tangencialmente na extremidade de maior diâmetro, como ilustrado na Figura 1. Ao fluir pelo interior do hidrociclone, o fluido desenvolve um padrão de fluxo de vórtice, semelhante ao de um ciclone. As linhas de fluxo giram em torno do eixo central, à medida que ele passa da entrada e em direção à inferior (*underflow*), ao longo do interior da parede do equipamento. A velocidade de fluxo rotacional acelera conforme o diâmetro do cone diminui. Perto da extremidade do vértice, a abertura de pequeno diâmetro evita a descarga da maior parte do fluxo, que em vez disso gira em um vórtice interno no núcleo do hidrociclone. Por possuir maior massa específica que o óleo, água concentra-se na parede do equipamento devido à força centrífuga e é descarregado no topo da estrutura (*overflow*). (Doshi & Deyer, 2016).

O presente trabalho tem por objetivo estudar o escoamento em um hidrociclone, utilizando a fluidodinâmica computacional, variando a razão óleo-água e a velocidade de entrada do fluido no equipamento, a fim de obter os parâmetros de maior eficiência.

Metodologia

O presente trabalho foi realizado por meio de simulações numéricas computacionais através do software ANSYS®. As simulações obtidas foram analisadas quanto ao perfil de velocidade tangencial e axial, assim quanto à análise pressão e fração volumétrica das fases, eficiência de separação para uma água produzida com um teor de óleo de 5, 10 e 15% e queda de pressão.

O Hidrociclone em análise utilizado para esse caso de estudo, foi disponibilizado pelo Dr. Tony Herbert, representado na Figura 1, que mostra as dimensões da geometria do hidrociclone utilizados nas simulações de escoamento, a malha foi disponibilizada e criada no módulo ANSYS ICEM CFD® Release 15.0 O presente estudo levou em consideração as seguintes informações dados no problema: a densidade do óleo de 20ºAPI, a viscosidade do óleo igual a 3 Pa.s e a densidade da água igual a 1000 kg/m³.

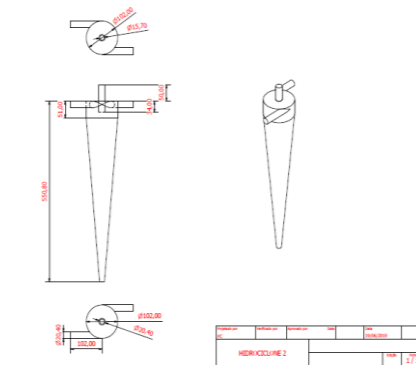


Figura 1 - Malha do Hidrociclone em estudo com detalhes para as suas dimensões.

A partir de todos os dados obtidos, foi possível realizar a exportação do arquivo para o CFX 15.0, onde foram definidas as especificações do material e os seus respectivos domínios. Tendo sido estabelecido os teores de óleo de 0.05, 0.1 e 0.15, uma pressão de 1atm para as saídas overflow e underflow e foram consideradas as condições de não deslizamento nas paredes e a rugosidade.

MODELO MULTIFÁSICO MATEMÁTICO

O modelo matemático utilizado para descrever o processo de separação água/óleo é baseado nas equações de conservação de massa e momento linear com as seguintes considerações:

- Escoamento bifásico (água-óleo) em regime permanente;
- Fluidos incompressíveis com propriedades constantes;
- Adotou-se o modelo de partícula dispersa e assumiu-se um diâmetro médio da partícula de 10µm.
- Não são consideradas as forças de não arraste nem fonte de massa;
- Não transferência de quantidade de movimento em decorrência da transferência de massa interfacial;

EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

A equação que descreve a conservação da massa é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_{\alpha} \rho_{\alpha}) + \nabla \cdot (f_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{U}_{\alpha}) = \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} + S_{MS\alpha} \quad (1)$$

Onde, f_{α} = Fração volumétrica; ρ_{α} = Massa específica; $\vec{U}_{\alpha}$ = Vetor velocidade; $\Gamma_{\alpha\beta}$ = Fluxo mássico interfacial por unidade de volume; $S_{MS\alpha}$ = representa possíveis fontes de massa.

No nosso caso, não a levamos em consideração:

$$S_{MS\alpha} = 0 \quad (2)$$

Os subscritos α ou β representam a fase continua ou a dispersa. O N_p é o número total de fases no escoamento multifásico.

EQUAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO LINEAR

A equação para a quantidade de movimento linear é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_{\alpha} \rho_{\alpha} \bar{U}_{\alpha}) + \nabla \cdot [f_{\alpha} (\rho_{\alpha} \bar{U}_{\alpha} \otimes \bar{U}_{\alpha})] = -f_{\alpha} \nabla p + \nabla \cdot [f_{\alpha} (\tau_{\alpha} + \tau_{\alpha}^{turb} + \tau_s)] + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \bar{U}_{\beta} - \Gamma_{\alpha\beta}^- \bar{U}_{\alpha}) + \overline{S_{M\alpha}} + \overline{M_{\alpha}} \quad (3)$$

Onde, p = pressão; μ = viscosidade dinâmica; Γ^+ = taxa de fluxo mássico; $\overline{M}$ = força interfacial total que atua na fase α devido a interação com a fase β ; $\overline{S_M}$ = termo fonte da quantidade de movimento devido às forças externas; τ_{α} e τ_{α}^{turb} = referem-se às tensões viscosas e às tensões turbulentas de Reynolds na fase α , respectivamente. τ_s representa a tensão da fase sólida, e o termo $\sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \bar{U}_{\beta} - \Gamma_{\alpha\beta}^- \bar{U}_{\alpha})$ representa a transferência de momento induzida pela transferência de massa interfacial.

MODELO DE TURBULENCIA

O modelo $K-\varepsilon$ é um modelo a duas equações baseado no conceito de viscosidade turbulenta. A viscosidade turbulenta, que é introduzida no escoamento, é um termo desconhecido que precisa ser modelado matematicamente. Essa viscosidade pode ser escrita como uma função de κ e de ε , energia cinética turbulenta e dissipação viscosa da energia cinética turbulenta, respectivamente. São dadas por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \kappa) + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \kappa) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\kappa}} \right) \nabla \kappa \right] + P_{\kappa} + G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{\kappa} (P_{\kappa} + C_3 \max(G; 0)) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (5)$$

em que C_1 , C_2 , C_3 , σ_{ε} , σ_{κ} , são constantes do modelo determinadas empiricamente. O termo P_{κ} que aparece em ambas as equações representa a parcela de produção de energia cinética turbulenta. É determinada por:

$$P_{\kappa} = \mu_{ef} \nabla \bar{U}_{\alpha} \left[\nabla \bar{U}_{\alpha} + (\nabla \bar{U}_{\alpha})^T \right] - \frac{2}{3} \nabla \bar{U}_{\alpha} (\mu_{eff} \nabla \bar{U}_{\alpha} + \rho \kappa) \quad (6)$$

sendo G a produção devido a força de corpo indicada por:

$$G = G_{buoy} + G_{rot} + G_{res} \quad (7)$$

onde, G_{rot} , G_{res} são os termos referentes a produção devido ao empuxo, rotação e resistência, respectivamente. Esse modelo de turbulência para escoamentos dotados de altas vorticidades desempenham um papel significativo em muitos casos de interesse prático, como: escoamentos em hidrociclones.

EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS

De acordo com Barbosa (2011), essas equações são expressas por meio de uma constante de proporcionalidade simples levando em consideração as características do material ou substância que se está utilizando. No presente trabalho, usamos o modelo de partícula para a análise do escoamento bifásico da água e óleo no interior do hidrociclone. E, neste trabalho foi considerado o efeito de arrasto. A força total exercida pela fase β para a fase α é:

$$\overline{M_{\alpha}} = C_D \rho_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} |\bar{U}_{\beta} - \bar{U}_{\alpha}| (\bar{U}_{\beta} - \bar{U}_{\alpha}) \quad (8)$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto e pode ser assumido como 0.44, pois nosso regime é turbulento. A área superficial por unidade de volume é dado pelo termo $A_{\alpha\beta}$. A massa específica da mistura é dado por $\rho_{\alpha\beta}$ e $|\overline{U}_\beta - \overline{U}_\alpha|$ é a velocidade de deslizamento do escoamento. A densidade e a viscosidade da mistura, por sua vez, é dado em:

$$\rho_{\alpha\beta} = f_\alpha \rho_\alpha + f_\beta \rho_\beta \quad (9)$$

$$\mu_{\alpha\beta} = f_\alpha \mu_\alpha + f_\beta \mu_\beta \quad (10)$$

No presente trabalho, executamos os processos para baixas velocidades em que o coeficiente de arraste (C_D) depende apenas do número de Reynolds da mistura. Sendo dado por:

$$Re_{\alpha\beta} = \frac{\rho_{\alpha\beta} |\overline{U}_\beta - \overline{U}_\alpha| d_{\alpha\beta}}{\mu_{\alpha\beta}} \quad (11)$$

onde $d_{\alpha\beta}$ é o diâmetro médio da mistura.

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Densidade da água	1000 kg/m ³
Densidade do óleo	950 kg/m ³
Viscosidade do óleo	3 Pa.s
Modelos matemáticos	Euleriana-Lagrangeana e Euleriana-Euleriana
Modelo de turbulência	κ - ϵ
Regime	Permanente

Tabela 1 - Condições de contorno para a simulação bifásica

Para as condições de contorno nas entradas do hidrociclone, foram definidas velocidades que variaram de acordo com os teores do óleo requerido no problema, ou seja, 5%, 10% e 15%, com o intuito de encontrar uma vazão, que pudesse estabelecer a melhor eficiência possível. As variações de velocidades utilizadas foram 1.5, 3.0 e 4.1 m/s para todos os teores de óleo.

Para as condições de contorno na parede do poço foram consideradas a condição de não deslizamento e a rugosidade da parede. E para as condições de saída foram criados campos de pressão e calculadas pressões estáticas.

Resultados e Discussões

Através das simulações numéricas realizadas para o escoamento bifásico água-óleo com os seguintes teores de óleo, 5%, 10% e 15%, foi possível analisar alguns parâmetros qualitativo e quantitativos, como o campo de pressão, as correntes de fluxo e as frações volumétricas para as fases. Também se obteve a eficiência do hidrociclone para as velocidades numéricas adotadas na simulação conforme indica as tabelas 2, 3 e 4. Para o cálculo da eficiência, foi feita a razão entre a soma das vazões de entrada dos fluidos e a vazão na saída *underflow* do hidrociclone. Dada pela seguinte equação:

$$e = \frac{Q_{entrada}}{Q_{saída}}$$

Essas vazões foram obtidas a partir do comando *function calculator* da ferramenta CFD-Post.

Velocidade Numérica (m/s)	Vazão na entrada 1 (Kg/s)	Vazão na entrada 2 (Kg/s)	Vazão Total de entrada (Kg/s)	Vazão de água na saída <i>underflow</i> (Kg/s)	Eficiência (%)
1,5	0,479766	0,480175	0,959941	0,389108	40,534
4,1	1,31136	1,31248	2,62384	1,07666	41,033
7,0	2,23891	2,24082	4,47973	1,84044	41,083

Tabela 2 - Eficiências do hidrociclone para escoamento bifásico água-óleo com teor de 5% de óleo para as determinadas velocidades.

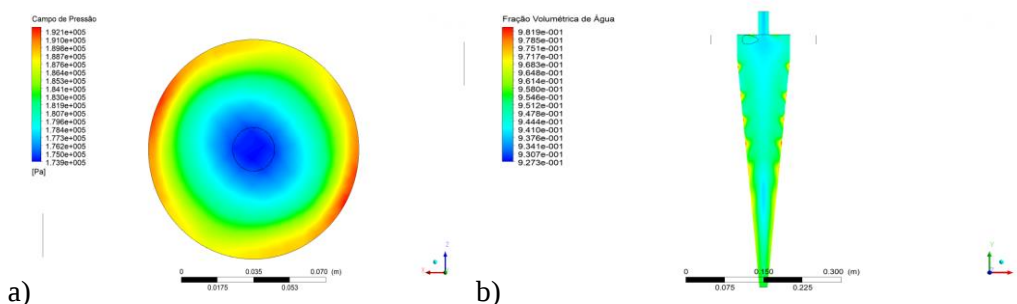
Velocidade Numérica (m/s)	Vazão na entrada 1 (Kg/s)	Vazão na entrada 2 (Kg/s)	Vazão Total de entrada (Kg/s)	Vazão de água na saída <i>underflow</i> (Kg/s)	Eficiência (%)
1,5	0,478633	0,479041	0,957674	0,362065	37,806
4,1	1,30826	1,30938	2,61764	1,01932	38,940
7,0	2,23362	2,23552	4,46914	1,755	39,269

Tabela 3 - Eficiências do hidrociclone para escoamento bifásico água-óleo com teor de 10% de óleo para as determinadas velocidades.

Velocidade Numérica (m/s)	Vazão na entrada 1 (Kg/s)	Vazão na entrada 2 (Kg/s)	Vazão Total de entrada (Kg/s)	Vazão de água na saída <i>underflow</i> (Kg/s)	Eficiência (%)
1,5	0,443146	0,44279	0,885936	2,45873	36,,032
4,1	1,30516	1,30628	2,61144	0,958596	36,707
7,0	2,22833	2,23023	4,45856	1,65806	37,188

Tabela 4 - Eficiências do hidrociclone para escoamento bifásico água-óleo com teor de 15% de óleo para as determinadas velocidades.

Como observado nos dados das tabelas acima, é possível notar que a eficiência do hidrociclone em estudo aumenta à medida que se aumenta a velocidade numérica. Contudo, notou-se que quando a medida que se aumentava a velocidade a partir da velocidade de 7,0 m/s, a eficiência de separação aumentava muito pouco, e por se tratar de velocidades mais elevadas o escoamento se comportaria cada vez mais turbulento acarretando numa maior perda de carga. Por esse motivo nos resultados deste trabalho se adotou a velocidade que apresentou melhor eficiência, no caso 7,0 m/s, além campos de pressão e de frações volumétricas condizentes com a realidade. Tais resultados são apresentados nas figuras a seguir, para os casos estudados neste trabalho, com os respectivos teores de óleo 5%, 10% e 15%.



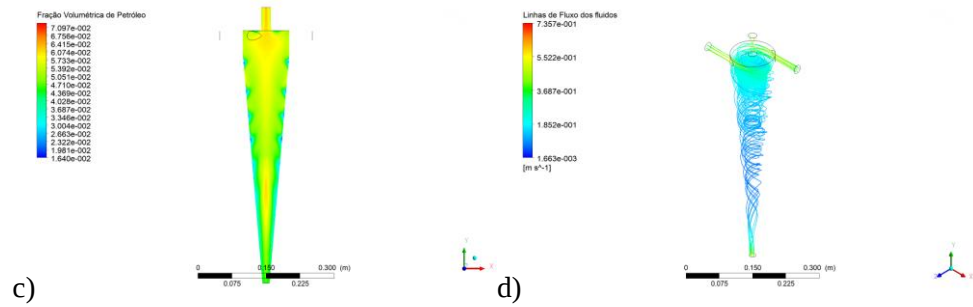


Figura 2 – Resultados para a situação com 5% de Petróleo. (a) Campo de pressão na altura 0,52m; (b) Fração volumétrica de água; (c) Fração volumétrica de petróleo; (d) Linhas de fluxo;

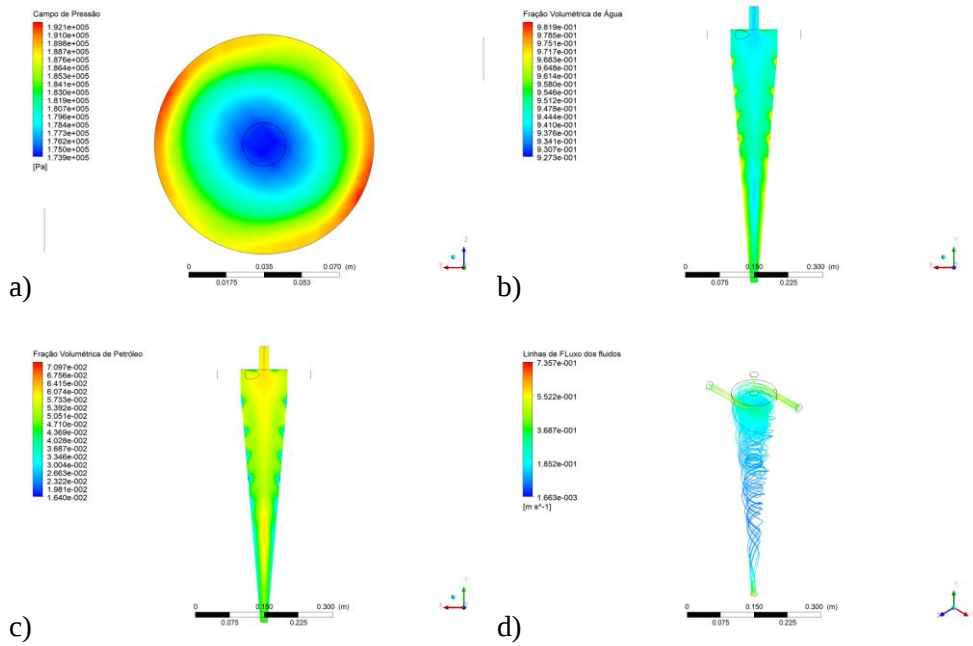


Figura 3 – Resultados para a situação com 10% de Petróleo. (a) Campo de pressão na altura 0,52m; (b) Fração volumétrica de água; (c) Fração volumétrica de petróleo; (d) Linhas de fluxo;

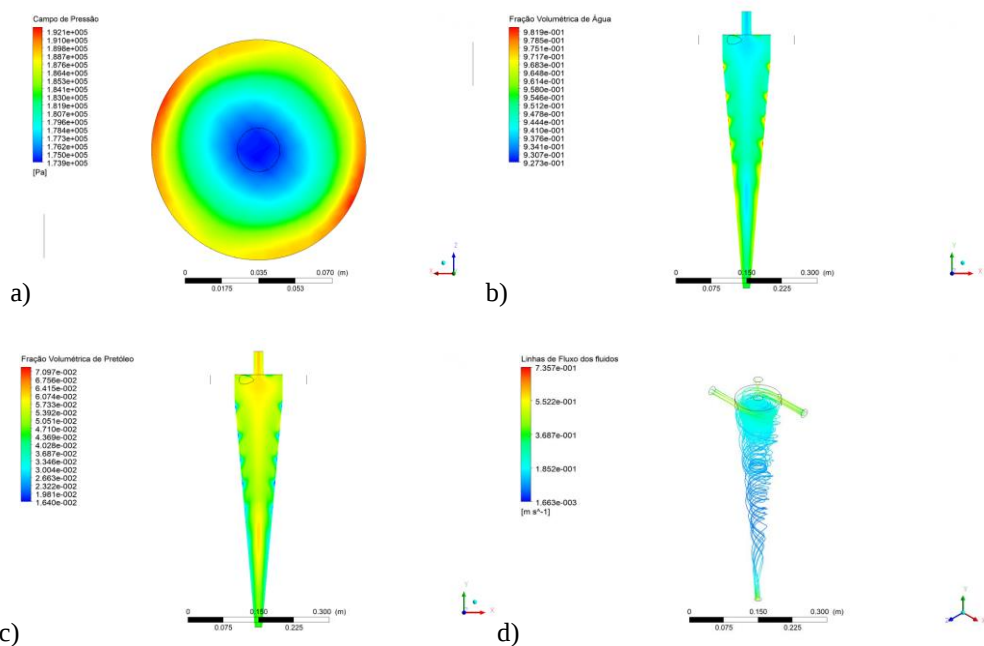


Figura 4 – Resultados para a situação com 15% de Petróleo. (a) Campo de pressão na altura 0,52m; (b) Fração volumétrica de água; (c) Fração volumétrica de petróleo; (d) Linhas de fluxo;

A partir das imagens podemos concluir que de fato o comportamento dos fluidos no hidrocilone condiz com o que de fato ocorre numa situação real. É possível observar nos campos de pressão que a pressão maior vai se encontrar nas paredes do hidrociclone e vai diminuindo à medida que se aproxima do centro, permitindo assim a separação dos fluidos. Analogamente, vê-se o comportamento das frações volumétricas dos fluidos envolvidos, onde o óleo se encontra concentrado no meio da geometria sendo escoado pela saída *overflow*, enquanto a água encontra-se em maior parte nas paredes separando-se e saindo pela saída *underflow*.

Conclusões

Considerando os resultados obtidos nas simulações numéricas para o hidrociclone proposto no trabalho, podemos tomar as seguintes conclusões:

- Nos três casos estudados, com teores de óleo de 5, 10 e 15%, para a malha utilizada nas simulações, a separação de fato irá ocorrer;
- Para os três casos estudados, conclui-se que a medida que a velocidade numérica aumenta a eficiência também irá aumentar. Contudo a partir de um certo ponto esse aumento é muito pequeno, o que não justificaria uma maior vazão de entrada;
- Para a malha estudada com a velocidade adotada nos resultados, concluiu-se que o comportamento no hidrocilone é condizente com a realidade, portanto temos uma malha aceitável do ponto de vista comercial;

Agradecimentos

A Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, pela oportunidade de adquirir conhecimentos. Ao Laboratório de Pesquisa e Simulação em Engenharia de Petróleo - SimPetro. Ao orientador Dr. Tony Hebert Freire de Andrade, pelo suporte, pelas correções e pela confiança.

Referências Bibliográficas

BARBOSA, Enivaldo Santos. **Aspectos geométricos e hidrodinâmicos de um hidrociclone no processo de separação de sistemas multifásicos: Aplicação à indústria do petróleo**. 2011. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

DOSHI, M.R.; DYER, J.M, **Module in Materials Science and Materials Engineering**, 2016.

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