

Análise do processo de separação óleo-água em hidrociclones via CFD

Oil-water separation process analysis in hydrocyclone via CFD

Análisis del proceso de separación petróleo-agua en hidrociclones vía CFD

Recebido: 25/11/2020 | Revisado: 03/12/2020 | Aceito: 04/12/2020 | Publicado: 07/12/2020

Endyara de Moraes Cabral

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2711-365X>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: endyara.engpetro@gmail.com

Josedite Saraiva de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1715-620X>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: prof.josedite@gmail.com

Hortência Luma Fernandes Magalhães

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7849-2792>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: hortencia.luma@gmail.com

Túlio Rafael Nascimento Porto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6744-4306>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: trnporto@gmail.com

Carlota Joaquina e Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6657-8759>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: carlota.jsilva@gmail.com

Ricardo Soares Gomez

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4387-4600>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: ricardosoaresgomez@gmail.com

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4067-2691>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: wam_magno@hotmail.com

Elisiane Santana de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3004-8841>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: limaelisianelima@hotmail.com

Antonio Gilson Barbosa de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-1872>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: antonio.gilson@ufcg.edu.br

Resumo

Hidrociclones são equipamentos usados em processos de separação óleo-água. São considerados eficientes, compactos, seguros, de simples construção e manutenção, e baixo custo, quando comparados a outros equipamentos de semelhante aplicação. Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar numericamente o processo de separação da mistura óleo-água em um hidrociclone, quanto ao seu aspecto fluidodinâmico. Para a solução numérica das equações governantes utilizou-se o software Ansys CFX. Resultados dos campos de pressão e fração volumétrica da fase óleo, e do desempenho de separação do equipamento são apresentados e analisados. Dos resultados obtidos verificou-se que as maiores pressões ocorrem próximo as paredes e entrada do equipamento, que as maiores frações volumétricas do óleo ocorrem na região central e próximo a saída do hidrociclone, e que este equipamento apresentou uma eficiência de separação superior a 99,8%.

Palavras-chave: Hidrociclone; Separação; Performance; Simulação numérica; CFX.

Abstract

Hydrocyclones are equipment used in oil-water separation processes. They are considered to be efficient, compact, safe, of simple construction and maintenance, and low cost, when compared to other equipment used in similar application. Therefore, this work aims to numerically analyze the separation process of an oil-water mixture in hydrocyclone, regarding to the fluid dynamic aspect. For the numerical solution of the governing equations, the Ansys CFX software was used. Results of the pressure and volumetric fraction fields of the oil phase, and the separation performance of the equipment are presented and analyzed. From the results obtained, it was found that the highest pressures occur near the walls and the entrance of the equipment, that the largest volumetric fractions of the oil occur in the central region

and close to the outlet of the hydrocyclone, and that this equipment presented separation efficiency greater than 99.8%.

Keywords: Hidrocyclone; Separation; Performance; Numerical simulation; CFX.

Resumen

Los hidrociclones son equipos que se utilizan en los procesos de separación de petróleo y agua. Se consideran eficientes, compactos, seguros, de construcción y mantenimiento sencillos y de bajo costo, en comparación con otros equipos de aplicación similar. Así, este trabajo tiene como objetivo analizar numéricamente el proceso de separación de la mezcla petróleo-agua en un hidrociclón, en cuanto a su aspecto fluidodinámico. Para la solución numérica de las ecuaciones gobernantes se utilizó el software Ansys CFX. Se presentan y analizan los resultados de la presión y fracción volumétrica de la fase oleosa y el rendimiento de separación del equipo. A partir de los resultados obtenidos, se encontró que las mayores presiones ocurren cerca de las paredes y la entrada de los equipos, que las mayores fracciones volumétricas del aceite ocurren en la región central y cerca de la salida del hidrociclón, y que este equipo presenta una eficiencia de separación mayor a 99,8%.

Palabras clave: Hidrociclón; Separación; Rendimiento; Simulación numérica; CFX.

1. Introdução

A migração e acumulação de óleo, gás e água no interior de um reservatório de petróleo é um processo que ocorre em um intervalo de milhões de anos. Dependendo da pressão e do local em que se encontra o petróleo acumulado, pode haver a segregação dos fluidos presentes, em diferentes fases, de acordo com o tipo de fluido e suas massas específicas, devido à ação da gravidade. A presença de água no reservatório está diretamente ligada à formação das bacias sedimentares e ao processo de origem do próprio petróleo (Vieira, 2016). Desta forma, é comum encontrar o gás natural ocupando regiões superiores no interior do reservatório, o óleo - podendo este ainda conter hidrocarbonetos gasosos dissolvidos - localizado em porção mediana e a água ocupando as partes mais profundas deste, dependendo das condições termodinâmicas que garantam a imiscibilidade entre esses fluidos.

Dependendo da disposição dos fluidos no reservatório e de suas propriedades, não apenas petróleo e gás são produzidos, mas também é possível que haja produção de água e sedimentos em suspensão (areia e outras impurezas sólidas, a exemplo de materiais

provenientes de processos de corrosão e de incrustação pela sedimentação de inorgânicos). Assim, via de regra, nenhuma destas fases é produzida isoladamente. Uma vez que ocorra a produção de petróleo e/ou gás - frações de interesse econômico, tal produção estará sempre relacionada à presença destes compostos, requerendo a existência de etapas de separação no processamento primário, especialmente para aqueles compostos que representam riscos à garantia de escoamento e, em caso de acidentes, ao meio ambiente.

A presença e as quantidades das fases (líquido e gás) em produção dependem das condições termodinâmicas e características dos fluidos, sofrendo modificações no decorrer da idade produtiva do reservatório. Isto acontece em especial para o volume de produção de água, à medida que a produção avança e o volume de óleo produzido declina.

Nesse sentido, é importante destacar que esse volume de água produzida (AP) merece um cuidado, pois, dentre os contaminantes mais indesejáveis presentes na produção, a água apresenta maiores dificuldades para ser removida. Isso acontece devido não apenas ao seu elevado volume de produção, mas também à forma - emulsificada - em que pode estar presente na fase líquida (Petrobras, 2007; Castro et al., 2019). A presença de água nas tubulações de produção de petróleo pode ocasionar a formação cristais de hidratos e a sedimentação de sais, que representam um risco ao movimento dos fluidos. Adicionalmente, dependendo do tipo de óleo, há ainda a possibilidade de ocorrência de deposição de parafinas nas paredes dos dutos (Ferreira et al., 2020). Estes componentes tem uma elevada capacidade de restrição de linhas de fluxo, se oferecidas condições de temperatura e pressão favoráveis, o que aumenta significativamente os custos de produção. Além disso, considerando a presença de poluentes na água, há a necessidade de sua adequação às normas ambientais, as quais variam de acordo com o destino final que será dado a este efluente.

Pode existir, ainda, um interesse quanto à recuperação do óleo emulsionado na AP por possuir importância de caráter econômico, uma vez que quantidades significativas de óleo estão presentes na água, devendo ser extraídas na etapa de tratamento (Thomas, 2004).

Em se tratando da destinação final, as opções que usualmente são escolhidas para emprego da AP são o descarte, injeção e o reuso. No entanto, para qualquer que seja o destino determinado, torna-se indispensável o seu tratamento, a fim de minimizar os danos ao meio ambiente, às tubulações e equipamentos empregados na produção do óleo, ou até mesmo, reutilizar sem causar prejuízos aos processos nos quais a AP será utilizada (Motta, 2013). O problema relacionado com o impacto ambiental do petróleo no mar tem sido abordado por Barboza e Freitas (2019).

Diante de tantos desafios, o desenvolvimento de equipamentos e processos que atuem na separação e tratamento da AP, torna-se crucial para a indústria do petróleo, viabilizando a manutenção das atividades de um poço, a segurança das instalações de produção e a destinação ecologicamente responsável do resíduo. Diante disso, os hidrociclones vêm se mostrando equipamentos eficientes, compactos, seguros, de simples construção e manutenção e baixo custo quando comparados a outros de semelhantes aplicações, para a separação óleo-água. Tais características os tornam de grande valor para as pesquisas e indústrias que o setor petrolífero abrange.

Hidrociclones são equipamentos de construção simples, por não utilizarem partes móveis internas como as centrífugas. Esta característica diminui os custos de manutenções e aumenta vida útil do equipamento. Devido às suas vantagens, os hidrociclones vêm aumentando sua popularidade mundial. Em uma análise da literatura realizada por Tian et al. (2018), foi verificado o crescimento do número de estudos publicados e citados, sobre hidrociclones, nas últimas duas décadas.

Apesar de sua construção simplificada, os hidrociclones apresentam um campo de aplicação bastante vasto (Alves, 2012). Nestes equipamentos, forças de campo geradas são elevadas o suficiente, para permitir que estes possam ser instalados horizontalmente ou verticalmente, e em estruturas móveis, sem comprometer seu desempenho.

Devido a importância do tema, várias pesquisas têm sido reportadas na literatura sobre o uso de hidrociclones em processos de separação (Moraes et al., 2009; Noroozi e Hashemabadi, 2011; Alves, 2012; Sales et al., 2013; Araújo et al., 2015; Motin et al., 2017; Zhou et al., 2010; Ji et al., 2017).

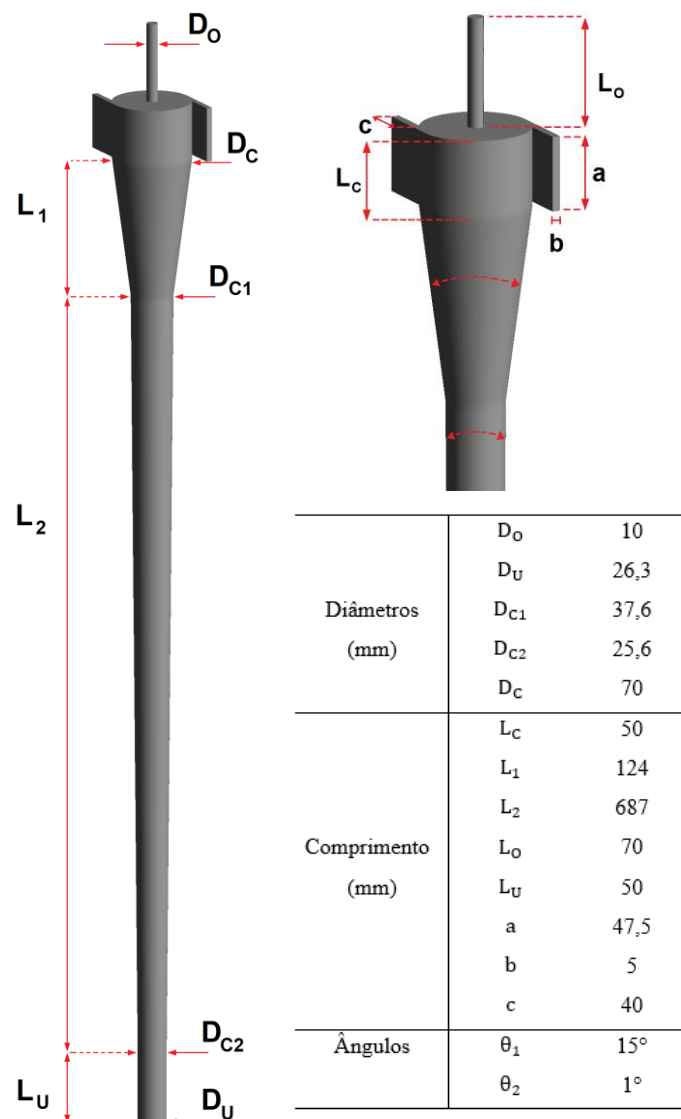
Com o advento das tecnologias computacionais, a fluidodinâmica computacional é uma ferramenta cada vez mais utilizada para o estudo dos hidrociclones voltados para a separação óleo-água, com o objetivo de entender detalhadamente o comportamento do escoamento e a influência das variáveis geométricas, ou das condições de operação sobre a eficiência de separação do equipamento. Além disso, verifica-se na literatura uma dificuldade de obtenção de determinados dados experimentais, como por exemplo, nos estudos de turbulência e nas análises da componente radial de velocidade, em que o grau de incerteza associado costuma ser alto (Marins, 2007). Diante disto, este trabalho tem como objetivo analisar numericamente o processo de separação óleo-água em hidrociclones, considerando os seus aspectos fluidodinâmicos.

2. Metodologia

2.1 Descrição do problema físico e da geometria

O problema proposto consiste no escoamento turbulento, incompressível e isotérmico, de óleo e água, no interior de um hidrociclone. A geometria definida para o hidrociclone baseou-se no equipamento utilizado no trabalho experimental de Marins (2007). Suas características e dimensões geométricas foram definidas de acordo com a Figura 1. A construção da geometria utilizada para a execução deste trabalho se deu com o auxílio de dois softwares: o *Inventor*, da empresa *AutoDesk*, e o *Design Modeler*, da *Ansys*.

Figura 1. Aspectos geométricos do hidrociclone usado na pesquisa.

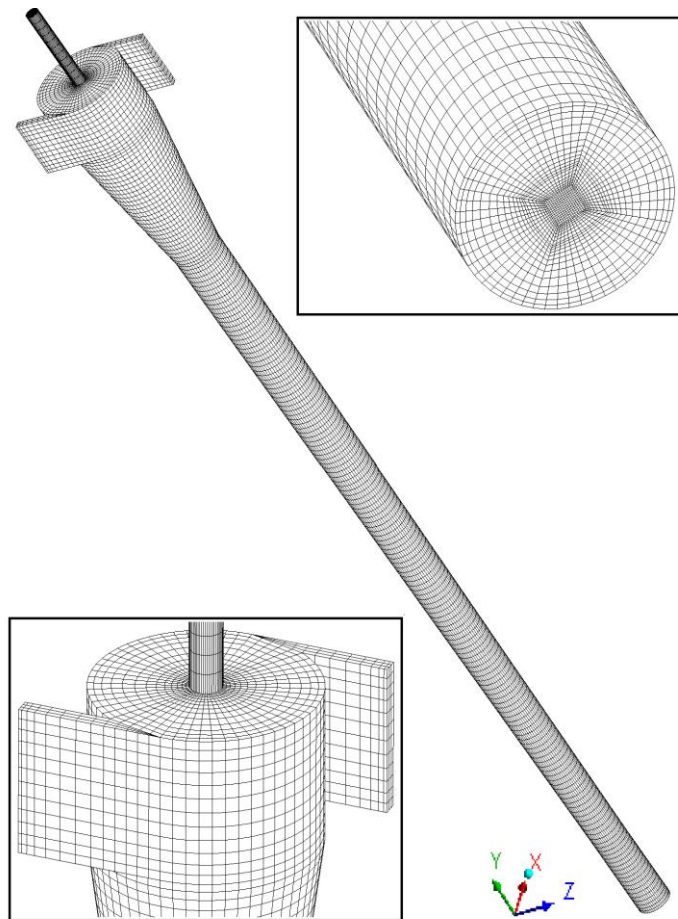


Fonte: Dados da pesquisa.

No modelo utilizado por Marins (2007), as entradas são paralelas ao *overflow* do equipamento e se conectam a câmaras convergentes tangenciais à seção cilíndrica, de área de passagem retangular e seção transversal decrescente conforme se aproxima do corpo do equipamento. No entanto, objetivando simplificar a construção geométrica do volume fluido, optou-se pela substituição por duas entradas tangenciais de seção retangular, conforme apresentado. Tais simplificações também foram adotadas por Barbosa (2011) e Raposo (2008).

A Figura 2 apresenta detalhes da malha hexaédrica estruturada (283 mil elementos) construída para o estudo numérico.

Figura 2. Malha numérica do hidrociclone.



Fonte: Dados da pesquisa.

2.2 Modelo matemático proposto

As condições tomadas para a aplicação das equações de conservação de massa e de momento linear foram as seguintes:

- Escoamento em regime permanente;
- Presença de duas fases fluidas (água e gotículas de óleo) incompressíveis;
- Escoamento interno turbulento;
- Escoamento isotérmico a 25°C;
- Condição de não deslizamento (as componentes do vetor velocidade do fluido próximo à parede são iguais a zero);
- Consideração do efeito da gravidade (na direção de y^- , com o equipamento na posição vertical);
- Paredes rugosas do equipamento (0,045 mm);
- Fenômenos de quebra e coalescência da fase dispersa não são considerados;
- Desconsideração de forças de não arraste;
- Não ocorrência de fonte de massa;
- Coeficiente de arrasto (C_D) igual a 0,44;
- Sem transferência de massa interfacial

Com isso, as equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear reduzem-se a:

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -f_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot \{f_\alpha \mu_{ef} [\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha^T)]\} + \vec{M}_\alpha \quad (2)$$

onde α e β são as fases envolvidas na mistura, \vec{U} é o vetor velocidade ($\vec{U} = (U_x, U_y, U_z)$), f é a fração volumétrica, ρ é a massa específica, p é a pressão, e \vec{M}_α é o termo que representa as forças interfaciais por unidade de volume.

A força total devido a interação entre as fases presentes é dada por.

$$\vec{M}_{\alpha\beta} = \sum_{\alpha \neq \beta} \vec{M}_{\alpha\beta} = \vec{M}_{\alpha\beta}^D + \vec{M}_{\alpha\beta}^L + \vec{M}_{\alpha\beta}^{LUB} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{VM} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{TD} + \vec{M}_S \dots \quad (3)$$

Os termos do lado direito da Equação 3 representam a força de arraste ($\vec{M}_{\alpha\beta}^D$), força de sustentação ($\vec{M}_{\alpha\beta}^L$), força de lubrificação da parede ($\vec{M}_{\alpha\beta}^{LUB}$), força de massa virtual ($\vec{M}_{\alpha\beta}^{VM}$), força de dispersão turbulenta ($\vec{M}_{\alpha\beta}^{TD}$) e força de pressão do sólido (\vec{M}_S).

A força de arrasto da fase contínua é dada pela Equação 4, como segue:

$$\vec{M}_{\alpha\beta}^D = C_{\alpha\beta}^{(d)} (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (4)$$

na qual o coeficiente $C_{\alpha\beta}^{(d)}$ é calculado a partir do coeficiente de arrasto C_D , de acordo com a Equação 5:

$$C_{\alpha\beta}^{(d)} = \frac{3 C_D}{4 d_p} f_\beta \rho_\alpha |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| \quad (5)$$

onde d_p é o diâmetro da partícula e C_D é o coeficiente de arrasto para escoamento turbulento e viscoso.

Nesta pesquisa utilizou-se o modelo de turbulência RNG $\kappa-\varepsilon$. Para a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação (ε), modificadas para a fase contínua, assumem a forma:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{kRNG}} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\varepsilon_{kRNG}} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1RNG} P_k - C_{\varepsilon 2RNG} \rho \varepsilon) \quad (7)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica e μ_t é a viscosidade turbulenta, a qual é dada pela Equação 8:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

em que C_μ é uma constante empírica.

O coeficiente $C_{\varepsilon 1RNG}$ é dado por:

$$C_{\varepsilon 1RNG} = 1,42 - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4,38}\right)}{1 + \eta^3 \beta_{RNG}} \quad (9)$$

sendo:

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho \varepsilon C_{\mu RNG}}} \quad (10)$$

em que P_k é o termo de produção de energia cinética turbulenta por efeito de cisalhamento, que é dado por:

$$P_k = \mu_t \nabla \vec{U} \cdot (\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) + P_{kb} \quad (11)$$

O termo P_{kb} representa a produção de flutuação, determinado como segue:

$$P_{kb} = - \frac{\mu_t}{\rho \sigma_p} \mathbf{g} \cdot \nabla \rho \quad (12)$$

onde \mathbf{g} é o vetor aceleração gravidade e σ_p é o Número de Prandtl turbulento.

Os valores das constantes de turbulência utilizadas no modelo RNG k- ε são os seguintes: $\sigma_{kRNG} = 0,7179$, $\sigma_{\varepsilon RNG} = 0,7179$, $C_{\varepsilon 1RNG} = 1,92$, $C_{\varepsilon 2RNG} = 1,68$, $\beta_{RNG} = 0,012$, e $C_{\mu RNG} = 0,085$.

Para a modelagem da turbulência da fase dispersa, adotou-se o modelo de zero equação, definido pela Equação (13), como segue.

$$\mu_{t,d} = \left(\frac{\rho_d}{\rho_c}\right) \frac{\mu_{t,c}}{\sigma} \quad (13)$$

2.3 Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas nas simulações foram configuradas de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Condições de contorno para as simulações.

Velocidade na entrada	Prescrita (Tabela 4)
Pressão no <i>overflow</i>	1 atm
Pressão no <i>underflow</i>	1 atm
Rugosidade da parede	0,045 mm
Velocidade na parede	0 (condição de não-deslizamento)

Fonte: Dados da pesquisa.

2.4 Eficiência de separação

A eficiência do equipamento foi calculada de acordo com a eficiência granulométrica reduzida (G'), que considera apenas o efeito da separação centrífuga do equipamento (desprezando a influência da divisão de correntes). É dada por.

$$G' = \frac{(G - R_f)}{(1 - R_f)} \quad (14)$$

A razão de fluido (R_f) é compreendida como a vazão mássica da fase água (contínua) que sai no *overflow* (W_f), em relação à vazão da mesma que entra na alimentação, como segue:

$$R_f = \frac{W_{CO}}{W_C} = \frac{Q_o(1 - C_{vo})}{Q(1 - C_v)} \quad (15)$$

na qual W_{CO} é a vazão mássica da fase contínua no *overflow*, W_C é a vazão mássica da fase contínua alimentada no hidrociclone, Q_o é a vazão volumétrica do *overflow*, Q é a vazão volumétrica da alimentação, C_{vo} é a concentração volumétrica do óleo no *overflow* e C_v concentração volumétrica do óleo na alimentação.

De acordo com Corrêa Júnior et al. (2018), a eficiência de separação está relacionada à capacidade que as gotas de líquido (no caso de separação líquido-líquido) de alcançar a região central do hidrociclone que, por sua vez, depende do seu diâmetro. Assim, para cada diâmetro de gota, há uma eficiência chamada eficiência granulométrica (G), dada por.

$$G = \frac{W_{do}}{W_d} \quad (16)$$

Em que W_{do} é a vazão mássica de partículas de tamanho d no *overflow* e W_d é a vazão mássica de partículas de mesmo tamanho na alimentação.

2.5 Propriedades físico-químicas dos fluidos e casos simulados

As propriedades físico-químicas dos fluidos e as condições operacionais utilizadas no presente trabalho estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Todas as simulações foram realizadas utilizando o software Ansys CFX.

Tabela 2. Propriedades físico-químicas.

Parâmetro	Fase	
	Água	Óleo
Massa específica (kg/m ³)	997	860
Viscosidade (kg/m.s)	0,0008899	0,013

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 3. Dados usados na simulação.

Velocidade de entrada (m/s)	Fração volumétrica de óleo	Diâmetro de partícula (μm)
5,0	0,01	100

Fonte: Dados da pesquisa.

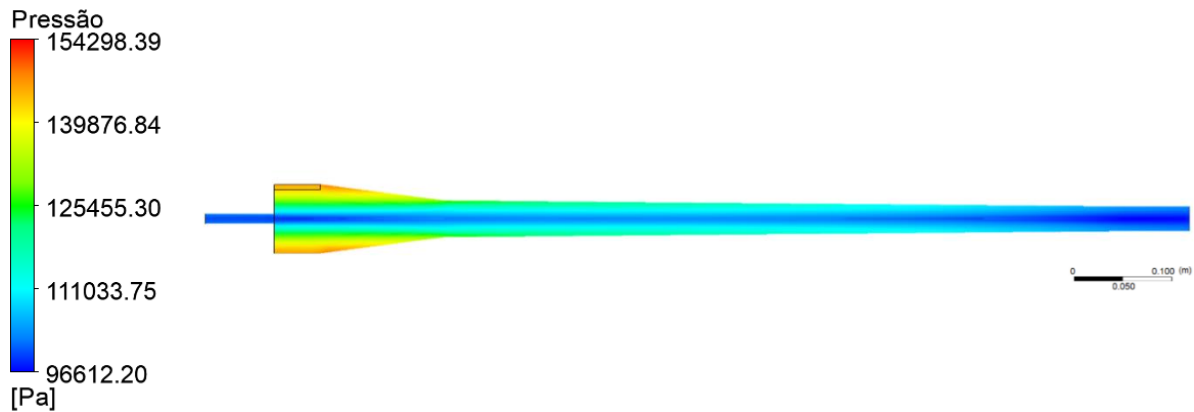
3. Resultados e Discussões

3.1 Análise dos parâmetros hidrodinâmicos

Na Figura 3 está ilustrada a distribuição de pressão no plano XY. Da análise desta figura, verificam-se pressões mais elevadas em regiões mais distantes do eixo central do hidrociclone, e menores à medida que se aproxima deste. Esse comportamento é provocado

pela ação do campo centrífugo, que promove o choque das partículas do fluido (atrito) contra as paredes laterais do equipamento, resultando em maiores pressões nestas regiões.

Figura 3. Campos de pressão no plano XY: (a) caso 1.

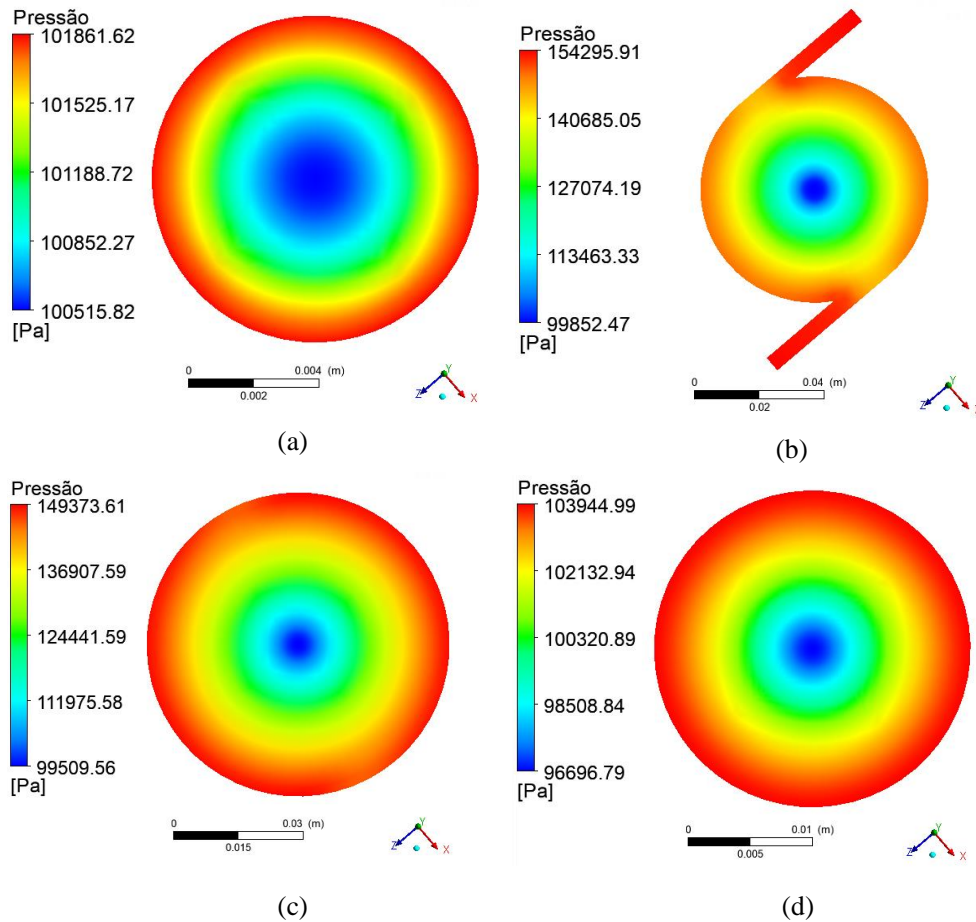


Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 4 estão representados os campos de pressão em diferentes alturas do equipamento: na saída do *overflow*, na altura da parede superior e na altura da base da sua seção cilíndrica, e na saída do *underflow*, respectivamente. Tais resultados evidenciam o comportamento radial da pressão no interior do equipamento, desde sua saída superior, passando por todo o comprimento do hidrociclone, até sua saída inferior.

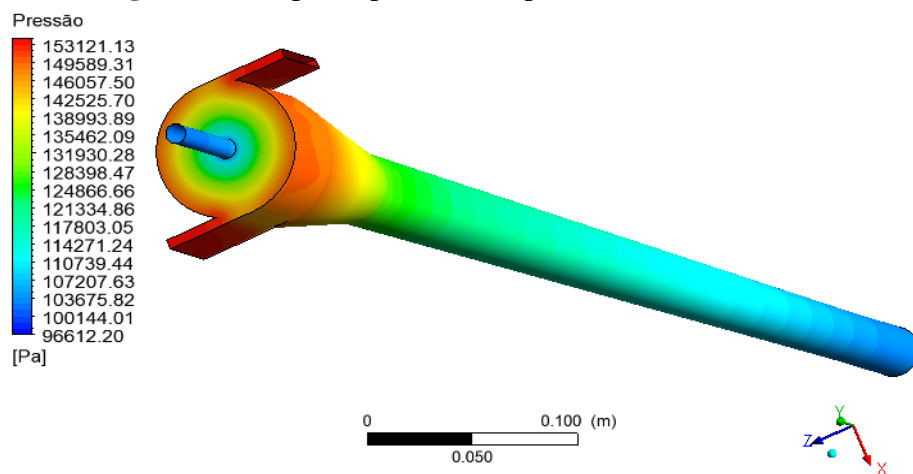
No entanto, na altura da seção cilíndrica, onde se encontra a alimentação do dispositivo, é que foram obtidas as maiores pressões na parede devido às elevadas velocidades tangenciais do fluido encontradas. Uma vez que, durante o escoamento pelo interior do dispositivo, o fluido sofre dissipação da sua energia dinâmica, devido ao choque de suas partículas entre si e com as paredes do equipamento, os índices de velocidade tangencial e de pressão tendem a ser menores em regiões próximas às saídas do hidrociclone. Este comportamento da pressão nas paredes está representado na Figura 5.

Figura 4. Campos de pressão em diferentes alturas do hidrociclone: (a) na saída do *overflow*, em $Y = 0$ mm; (b) na altura da parede superior da seção cilíndrica, em $Y = -70$ mm; (c) na altura da base da seção cilíndrica, em $Y = -120$ mm; e (d) na saída do *underflow*, em $Y = -930$ mm.



Fonte: Dados da pesquisa.

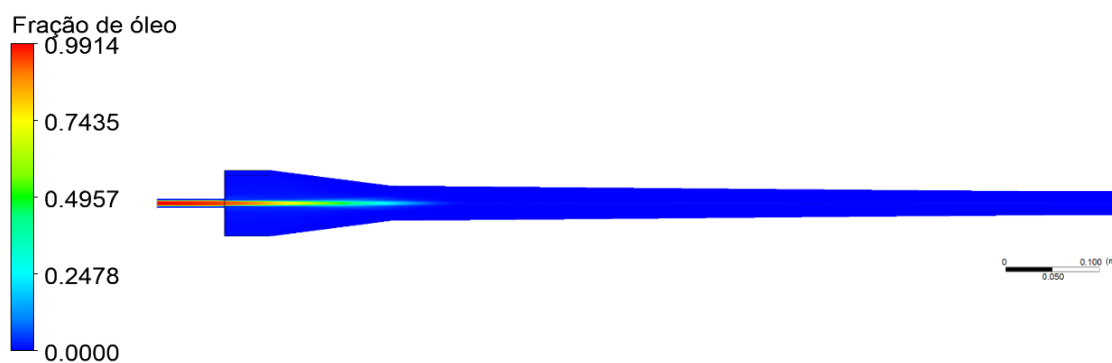
Figura 5. Campo de pressão nas paredes do hidrociclone.



Fonte: Dados da pesquisa.

A distribuição de fração volumétrica no plano XY está ilustrada na Figura 6. Da análise desta figura, verifica-se que há uma concentração de óleo na área central do equipamento, a qual se prolonga até pouco abaixo do término de sua seção cônica superior, tomando uma região menor que 30% da extensão vertical do equipamento (desconsiderando o comprimento do *overflow*), diferente do que foi apresentado por Grady et al. (2003). Esta concentração de óleo próximo ao eixo central é esperada para um hidrociclone, devido ao efeito do campo centrífugo que, em razão das menores pressões associadas, promove a migração da fase menos densa para esta região.

Figura 6. Campos de fração de óleo no plano XY em diferentes planos no interior do hidrociclone.

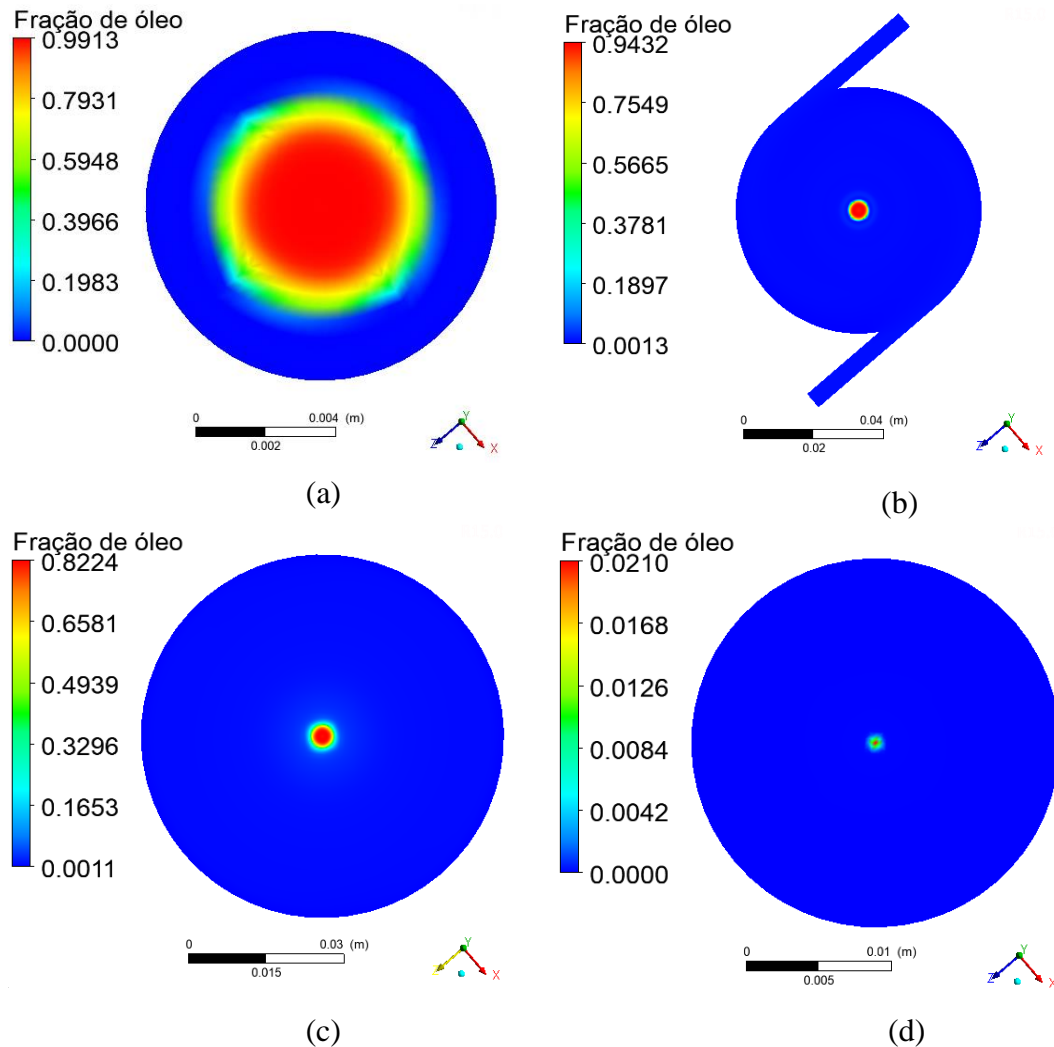


Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 7 estão representados os campos de fração volumétrica na saída do *overflow*, na altura da parede superior e na altura da base da seção cilíndrica do hidrociclone, na saída do *underflow*, respectivamente, e reforçam o comportamento radial desses perfis. A concentração de óleo diminui com o aumento do raio, de maneira inversa ao que ocorre com a pressão, como discutido anteriormente.

Quanto a eficiência granulométrica reduzida de separação, obteve-se com a simulação um valor de 99,89%, o que pode ser considerado um resultado excelente, evidenciando que se trata de um hidrociclone adequado e de alta performance. Isto deve-se ao fato de que a vazão volumétrica de entrada influencia na velocidade tangencial interna ao dispositivo, e esta é a componente responsável pela geração do campo centrífugo, que interfere diretamente na coleta das fases pela diferenciação entre elas.

Figura 7. Campo de fração de óleo em diferentes alturas do hidrociclone: (a) na saída do *overflow*, em $Y = 0$ mm; (b) na altura da parede superior da seção cilíndrica, em $Y = -70$ mm; (c) na altura da base da seção cilíndrica, em $Y = -120$ mm; e (d) na saída do *underflow*, em $Y = -930$ mm.



Fonte: Dados da pesquisa.

4. Considerações Finais

A partir da análise de resultados obtidos, pode-se concluir que: a) o modelo proposto foi capaz de prever adequadamente, a hidrodinâmica do processo de separação óleo-água, sendo possível construção dos campos de pressão e fração volumétrica, os quais possibilitaram a compreensão do comportamento tridimensional do escoamento, b) As maiores pressões no interior do hidrociclone ocorrem nas paredes e com maior intensidade na região de entrada do equipamento, c) A fração volumétrica de óleo apresenta seus maiores

valores na região central do equipamento, na qual esta fase líquida se desloca para a região superior do equipamento em direção ao overflow, e d) A alta eficiência de separação obtida pelo hidrociclone (acima de 99,8%), ratifica o fato que se trata de um dispositivo de alto desempenho.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e a FINEP pelo apoio financeiro, e aos pesquisadores referenciados no texto que, com suas pesquisas, contribuíram para o melhoramento do trabalho.

Referências

Alves, J. V. B. (2012). *Hidrociclone para a separação do óleo residual de água em refinarias*. Dissertação de Mestrado. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil. Obtido em <http://186.202.79.107/download/separacao-do-oleo-residual-de-agua-em-refinarias.pdf>

Araújo, C. A. O., Scheid, C. M., Klein, T. S., Loureiro, J. B. R., Medronho, R. A. (2015). *Eficiência de separação de hidrociclones para a separação de mistura óleo-água com alto teor de óleo: comparação entre resultados simulados e experimentais*. XXXVII ENEMP - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos, Paulo, Brasil. Recuperado de <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/eficincia-de-separao-de-hidrociclones-para-a-separao-de-mistura-leo-gua-com-alto-teor-de-leo-comparao-entre-resultados-simulados-e-experimentais-20691>

Barbosa, E. S. (2011). *Aspectos geométricos e hidrodinâmicos de um hidrociclone no processo de separação de sistemas multifásicos: aplicação à indústria do petróleo*. Tese de Doutorado. Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande. Brasil. Recuperado de http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UF CG_f44e703e6fdf48897db394c29d6ab9c0

Barboza, T. R., Freitas, R. R. (2019) Uma análise bibliométrica sobre os impactos do derramamento de petróleo na pesca marítima. *Research, Society and Development*, 8(1), e2281520, doi: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd>

Castro, M. A. F., Ribeiro, D. C., Freitas, R. R. (2019) Análise bibliométrica sobre o uso de ultrassom em emulsões do tipo óleo em água (O/A). *Research, Society and Development*, 8(1), e881514. doi: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd>

Corrêa Junior, C. A., Corrêa, R. A. P., Quintella, E. F., Nunes, G. C. (2018). *Modelagem computacional da eficiência de separação entre água e óleo em um hidrociclone*. Encontro de ciência e tecnologia de materiais. Instituto federal fluminense. Búzios, Rio de Janeiro.

Ferreira, D. N., Simonelli, G., Santos, L. C. L. (2020) Mecanismos de deposição de parafinas para aplicação em modelos: uma revisão. *Research, Society and Development*, 9(8), 1-16, doi: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd>

Grady, S. A., Wesson, G. D., Abdullah, M., Kalu, E. E. (2003). Prediction of 10-mm Hydrocyclone efficiency Using Computational Fluid Dynamics. *Filtration & Separation*, 40(9), 41-46. doi: [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(03\)00930-3](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(03)00930-3)

Ji, L., Kuang, S., Qi, Y. Chen, J., Yu, Aibing. (2017). Computational analysis and optimization of hydrocyclone size to mitigate adverse effect of particle density. *Separation and Purification Technology*, 174(1), 251-263. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.034>

Marins, L. P. M. (2007). *Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidrociclone sem núcleo gasoso*. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Recuperado de <http://www.nidf.ufrj.br/wp-content/uploads/2019/05/15-TeseMScLPMM.pdf>

Moraes, C. A. C., Marins, L. P. M., De Melo, D. C., Silva, F. S., Oliveira Junior, J. A. A., De Souza, M. A., Barca, L. F., De Souza, A. M. R. F., Almeida, C. S. (2009). Desenvolvimento de hidrociclones para altos, médios e baixos teores de óleo. *Boletim técnico da Produção de Petróleo*, 3(2), 259-287. Obtido de <https://docplayer.com.br/12058239-Desenvolvimento-de->

hidrociclones-para-altos-medios-e-baixos-teores-de-oleo-development-of-high-medium-and-low-oil-content-hydrocyclones.html

Motin, A., Tarabara, V. V., Petty, C. A., Bénard, A. (2017). Hydrodynamics within flooded hydrocyclones during excursion in the feed rate: Understanding of turndown ratio. *Separation and Purification Technology*, 185, 41-53. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.05.015>

Motta, A. R. P. De, Borges, C. P., Kiperstok, A., Esquerre, K. P., Araújo, P. M., Branco, L. P. N. (2013). Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo por processos de separação por membranas: revisão. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 18(1), 15-26. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000100003>.

Noroozi, S., Hashemabadi, S. H. (2011). CFD analysis of inlet chamber body profile effects on de-oiling hydrocyclone efficiency. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(7), 968-977. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.017>

Petrobras. (2007). *Processamento primário de petróleo*. Universidade PETROBRAS. Escola de Ciências e Tecnologias E&P.

Raposo, G. M. (2008). *Simulação numérica do escoamento em hidrociclone destinado a aplicações de alto teor de óleo*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Brasil. Recuperado de <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=13794@1>

Sales, C. R. S., Araújo, I. R., Azevedo, L. B., Cortes, J. M. R. (2013). *Análise da redução de custos com a implantação de hidrociclones em uma plataforma da Bacia de Campos*. IX Congresso Nacional de Excelência em Gestão. Brasil. Recuperado de https://www.inovarse.org/artigos-por-edicoes/IX-CNEG-2013/T13_0596_3579.pdf

Tian, J., Ni, L., Song, T., Olson, J. Zhao, J. (2018). An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations. *Separation and Purification Technology*, 206, 268-285. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.015>

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

Vieira, V. M. (2016). *Modelo de avaliação do gerenciamento da água produzida em operações de produção de petróleo em bacias terrestres brasileiras*. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia. Salvador. Brasil. Recuperado de <https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/21569>

Zhou, N., Gao, Y., An, W., Yang, M. (2010). Investigation of velocity field and oil distribution in an oil–water hydrocyclone using a particle dynamics analyzer. *Chemical Engineering Journal*, 157(1), 73 – 79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.049>.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Endyara de Moraes Cabral – 40%

Josedite Saraiva de Souza – 15%

Hortência Luma Fernandes Magalhães – 5%

Túlio Rafael Nascimento Porto – 5%

Carlota Joaquina e Silva – 5%

Ricardo Soares Gomez – 5%

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima – 5%

Elisiane Santana de Lima – 5%

Antonio Gilson Barbosa de Lima – 15%