

ANÁLISE DAS EFICIÊNCIAS ENERGÉTICA E MECÂNICA DA SEPARAÇÃO ÓLEO PESADO/ÁGUA POR HIDROCICLONE: UMA ABORDAGEM VIA CFD

Kelly Cristinne Leite Angelim¹; Sidclei Benevides da Conceição²; Antonio Gilson Barbosa de Lima³

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica –
kellyangelim01@gmail.com

² Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia de Mecânica –
sidcleibenevides@yahoo.com.br

³ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica –
antonio.gilson@ufcg.edu.br

RESUMO

A maior parte das descobertas de reservas de petróleo realizadas nos últimos anos tem sido de reservatórios de óleos pesados, fato que tem despertado interesse das empresas no desenvolvimento de novas tecnologias que permitam aumentar a produção desses óleos e otimizar o tratamento das águas produzidas. Desse modo, um novo cenário da indústria petrolífera vem se formando e exige a adaptação das unidades de extração, tratamento e refino desses óleos, cujas reservas são abundantes, mas que ainda mostram dificuldades operacionais. Dentre as melhorias tecnológicas a serem exploradas, destaca-se o uso de hidrociclones, equipamentos que apresentam um bom desempenho no tratamento e separação de águas oleosas, atendendo as exigências ambientais. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo investigar numericamente o processo de separação do óleo pesado de uma corrente de água oleosa via hidrociclone, utilizando a técnica da fluidodinâmica computacional. Considerou-se o escoamento bifásico, tridimensional, estacionário, isotérmico e no regime turbulento. Resultados das linhas de fluxos, campos de pressão, velocidade e fração volumétrica das fases no interior do hidrociclone, bem como as eficiências mecânica e energética envolvidas no processo de separação são apresentados e analisados. Verificou-se que com o aumento da velocidade de entrada dos fluidos no hidrociclone há um aumento na queda de pressão, indicando um maior consumo de energia para o bombeamento da mistura no equipamento, e que essa variação de velocidade influencia consideravelmente na eficiência de separação das fases envolvidas no processo.

Palavras-chave: Óleo Pesado, Hidrociclone, Eficiência Energética, CFD, CFX.

1. INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera tem significativa importância no contexto energético, econômico e estratégico de todo o mundo, entretanto, trata-se, também, de um dos setores com maior potencial para degradação do meio ambiente. As águas produzidas apresentam, em geral, altos teores de contaminantes tóxicos, cuja combinação

desses elementos, a quantidade e as características do local onde estas forem descartadas devem ser levados em consideração para avaliar um possível impacto ambiental, sendo necessário, portanto, um tratamento adequado desse efluente [LIMA *et al.*, 2008]. Os hidrociclones são equipamentos que apresentam um bom desempenho no

tratamento de águas oleosas [SIMÕES, 2005; MATVIENKO e EVTYUSHKIN, 2007, SOUZA *et al.*, 2015]. Desenvolvimentos recentes na tecnologia dos hidrociclones têm permitido o uso destes equipamentos para lidar com teores cada vez mais crescentes de óleo. Uma grande dificuldade se mostra quando a corrente de água oleosa é formada por óleos pesados e ultra-viscosos, pois a alta viscosidade destes induz a uma elevada perda de carga, o que exige elevadas potências de bombeamento no processo de separação [SOUZA *et al.*, 2015]. No entanto, o cenário evolutivo do petróleo indica, em geral, uma participação crescente dos óleos ditos não-convencionais na produção mundial. A expectativa de crescimento acentuado da produção de petróleo pesado no Brasil para os próximos anos, principalmente com o advento do Pré-Sal, além de justificar o aumento dos investimentos nas atividades de exploração e de produção, tem levado também à expansão de atividades de pesquisa e desenvolvimento na área. Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar o processo de separação do óleo de uma corrente de águas oleosas por hidrociclone, utilizando a técnica da fluidodinâmica computacional, de modo a obter condições otimizadas no desempenho deste equipamento com um maior aproveitamento da energia requerida.

2. METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (LCTF), da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UEAM) do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O computador utilizado para criação da malha e desenvolvimento da geometria foi um PC Intel Quad Core 3.2 GHz, 8Gb Ram e HD de 1 Terabyte.

O hidrociclone observado no presente trabalho corresponde ao dispositivo utilizado por Souza [2009], cujas dimensões estão conforme a Figura 1. A malha não-estruturada foi gerada no módulo CFX-Build 5.5 e é formada por 228.219 elementos tetraédricos (Ver Figura 2). Maiores detalhes da confecção da geometria e da malha numérica deve-se reportar ao trabalho de Souza [2009].

2.1 Modelagem Matemática

O modelo matemático utilizado no presente trabalho considera o escoamento bifásico óleo pesado-água, tridimensional, estacionário, isotérmico e no regime turbulento. Para descrever o escoamento no interior do hidrociclone utilizou-se das seguintes equações:

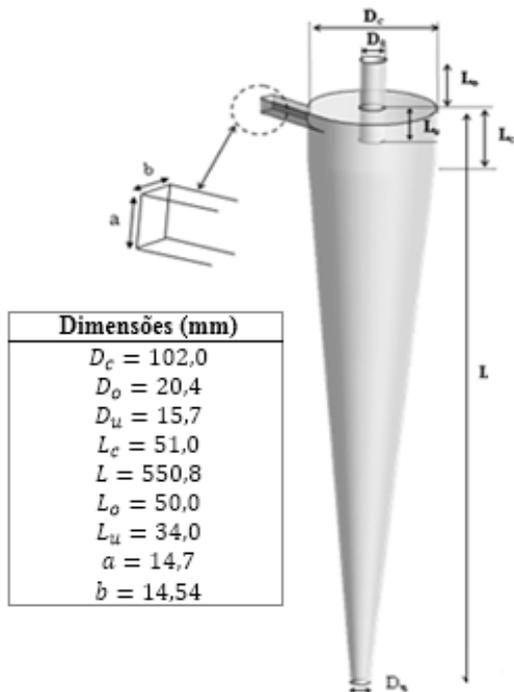


Figura 1: Representação geométrica do hidrociclone

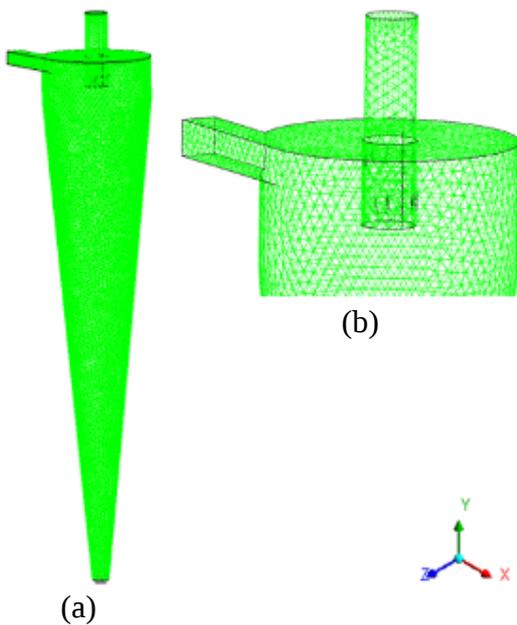


Figura 2: Representação da malha não-estruturada do hidrociclone (a) malha gerada no CFXBuild (b) detalhe da parte superior da malha.

- Equação da Continuidade:

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

onde o sub-índice grego α representa as fases envolvidas na mistura bifásica água/óleo pesado e ultraviscoso, f , ρ , e \vec{U} são respectivamente a fração volumétrica, densidade e o vetor velocidade. Para a fase α , o vetor velocidade é dado por $\vec{U}_\alpha = (u, v, w)$.

- Equação da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) + \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -f_\alpha \nabla P_\alpha + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{U}_\alpha) \quad [2]$$

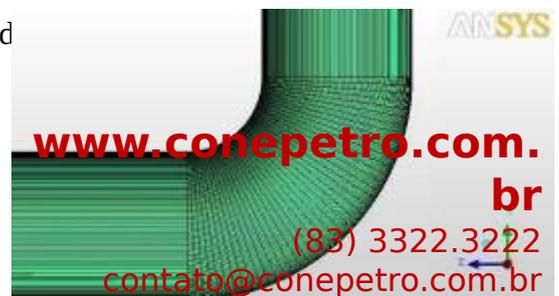
onde μ é a viscosidade dinâmica, P é a pressão e \vec{M}_α descreve a força total por unidade de volume (forças de arraste interfacial, de sustentação, de lubrificação de parede, de massa virtual e de dispersão turbulenta).

A força total da fase α , com a interação com outras fases é dada pela Equação 3:

$$\vec{M}_\alpha = \sum_{\alpha\beta} \vec{M}_{\alpha\beta} \quad [3]$$

$$\vec{M}_{\alpha\beta} = \vec{M}_{\alpha\beta}^L + \vec{M}_{\alpha\beta}^{LUB} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{VM} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{TD} + \vec{M}_s \quad [4]$$

A somatória das forças interfaciais entre duas fases é decorrente de efeitos físicos independentes



onde cada um dos termos do lado direito da Equação 4 corresponde, respectivamente, as forças de arraste interfacial, de dissipação, de lubrificação na parede, de massa virtual, força de dispersão turbulenta e força de pressão dos sólidos.

Pode-se notar que neste trabalho a Equação da Conservação de Energia não foi considerada, pois o problema físico envolve um sistema de escoamento em condições isotérmicas de operação.

2.2 Modelo de Turbulência

Devido ao regime de escoamento no interior do equipamento, utilizou-se o modelo de turbulência k - ϵ , onde os valores da energia cinética turbulenta, k , e da taxa de dissipação turbulenta, ϵ , são obtidas diretamente pelas Equações 5 e 6:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{kRNG}} \right) \nabla k \right] +$$

[5]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon RNG}} \right) \nabla \epsilon \right] +$$

[6]

onde P_k é a produção de turbulência devido às forças relativa a viscosidade e das forças de flutuação e μ_t é a viscosidade turbulenta, dada pela Equação 7, como segue:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

[7]

sendo $C_\mu = \sigma_{kRNG} = 0,7179$, $\sigma_{\epsilon RNG} = 0,7179$ e $C_{\epsilon 2RNG} = 1,68$.

2.3 Condições Iniciais e de Contorno

Para realizar a análise do escoamento dos fluidos no hidrociclone, as seguintes condições iniciais e de contorno foram utilizadas:

- *Entrada:* Foram estabelecidos valores entre 1 e 32 m/s de velocidades de entrada dos fluidos no interior do equipamento; fração volumétrica de 0,3 e 0,7 para as fases óleo e água, respectivamente, e uma temperatura fixa de 298 K.
- *Saída:* Foi adotada a condição de pressão prescrita nas duas saídas do hidrociclone (overflow e underflow) e igual à pressão atmosférica ($P = 101325$ Pa).
- *Parede:* Definiu-se todas as componentes de velocidade nulas nas paredes internas do hidrociclone (condição de não deslizamento) e estas possuindo uma rugosidade de 0,045 mm.

Na Tabela 1 estão ilustradas as propriedades físicas dos fluidos (água e óleo pesado) usadas no presente trabalho.

Tabela 1: Propriedade físicas dos fluidos

Propriedades	Óleo	Água
Densidade (ρ) [kg/m ³]	963,6	997,0
Viscosidade (μ) [Pa.s]	1,2	0,000904
Massa molar [kg/kmol]	100	18,015

2.3 Eficiência de Separação e Potência de Bombeamento

A eficiência de separação dos fluidos no interior do hidrociclone foi calculada considerando o fluxo mássico do óleo no overflow, M_o , pelo fluxo mássico do óleo na alimentação, M_a , dada pela Equação 8.

$$E(\%) = \frac{M_o}{M_a} \cdot 100 \quad [8]$$

A queda de pressão no hidrociclone foi determinada a partir da diferença da pressão na seção de entrada e nas seções de saída superior e inferior. A partir dos valores da queda de pressão no hidrociclone foi possível determinar a potência de bombeamento da mistura usando a Equação 9.

$$Potência = \Delta P \times Q \quad [9]$$

onde ΔP é a queda de pressão no hidrociclone e Q é o fluxo volumétrico da mistura na entrada do hidrociclone.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 1 e 2 estão representadas as linhas de fluxo no hidrociclone para o óleo pesado e a água, respectivamente, considerando as velocidades de entrada de 4 m/s e 32 m/s. Verifica-se que a velocidade de entrada influencia consideravelmente no comportamento destas linhas, favorecendo um aumento da força centrífuga e de arraste, proporcionando, assim, um aumento no número de voltas no interior do hidrociclone.

Na Figura 3 estão representados os campos da fração volumétrica das fases (óleo e água) sobre o plano YZ para a velocidade de 4 m/s. Verifica-se que há uma maior concentração de óleo nas proximidades do eixo (Ver Figura 3a) e de água na parte inferior do equipamento (Ver Figura 3b). Isso ocorre devido à

diferença de densidade entre as fases da mistura.

Na Figura 4 estão representados os campos de pressão sobre o plano YZ passando pelo eixo central do hidrociclone. Pode-se observar uma queda de pressão de 7466 Pa para a velocidade de entrada de 4 m/s e de 311983 Pa para 32 m/s. Assim, nota-se que com o aumento do fluxo de alimentação há um aumento na queda de pressão, indicando um maior consumo de energia para o bombeamento da mistura para o interior do hidrociclone.

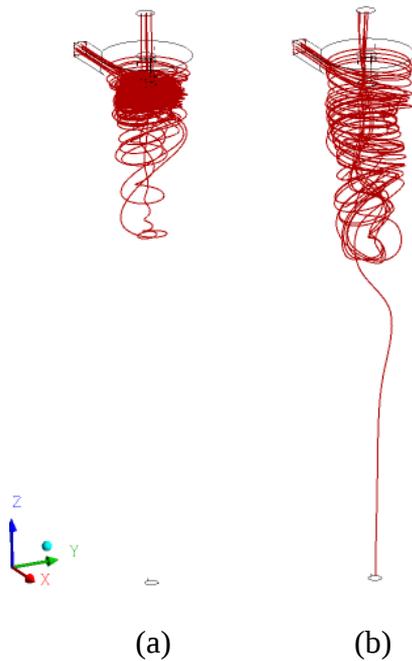


Figura 1: Linhas de fluxo do óleo pesado para as velocidades de (a) 4 m/s e (b) 32 m/s.



Figura 2: Linhas de fluxo da água para as velocidades de (a) 4 m/s e (b) 32 m/s.

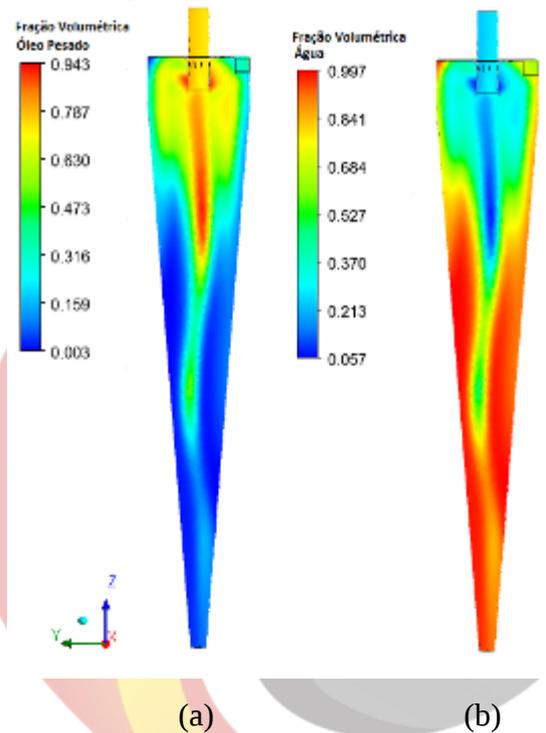


Figura 3: Campos de fração volumétrica sobre o plano YZ para as fases (a) óleo pesado e (b) água.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

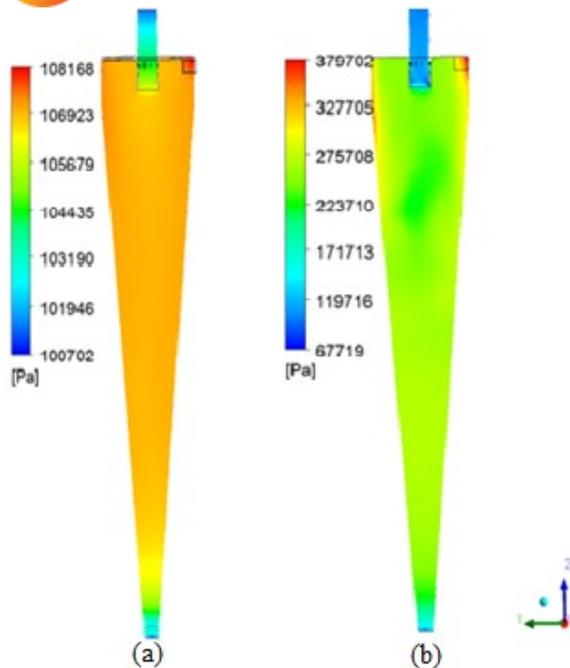


Figura 4: Campos de pressões sobre os plano YZ para velocidade (a) 4 m/s e (b) 32 m/s.

Na Figura 5 é apresentado o perfil de velocidade axial sobre um plano longitudinal XZ do hidrociclone, para as velocidades de entrada de 4 m/s e 32 m/s. Observa-se que as maiores velocidades axiais são apresentadas no centro e as menores próximas às paredes do equipamento. Verifica-se, também, que há velocidades axiais de valor negativo, evidenciando a presença de uma zona de recirculação de fluidos.

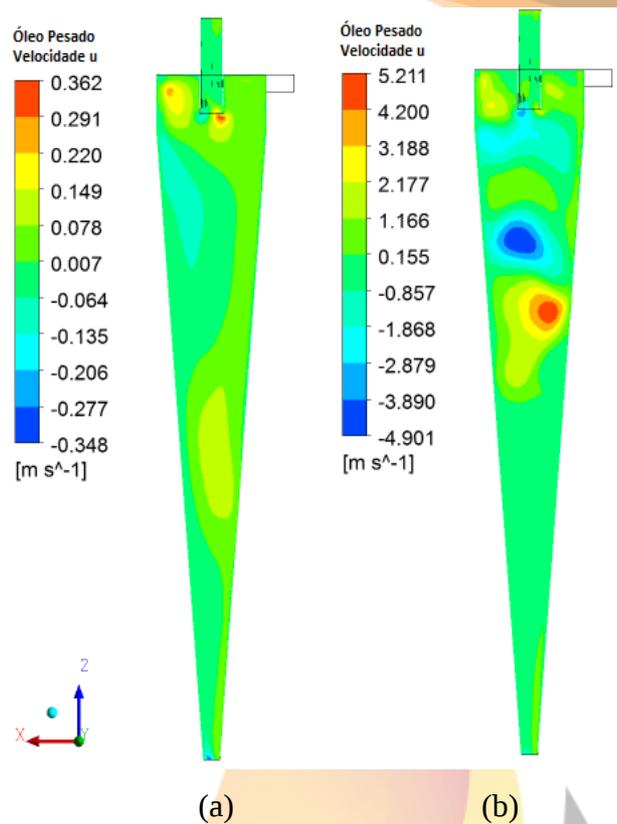


Figura 5: Perfil de velocidade axial sobre um plano longitudinal XZ do hidrociclone, para as velocidades de entrada de (a) 4 m/s e (b) 32 m/s.

Esse comportamento pode ser confirmado pela Figura 6, onde são apresentados os vetores da velocidade da fase dispersa (óleo) ao longo do plano XZ, para as diferentes velocidades de entrada no interior do hidrociclone. Nota-se que a região de recirculação é mais acentuada quando maiores fluxos de alimentação são usados.

www.conepetro.com.br

br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

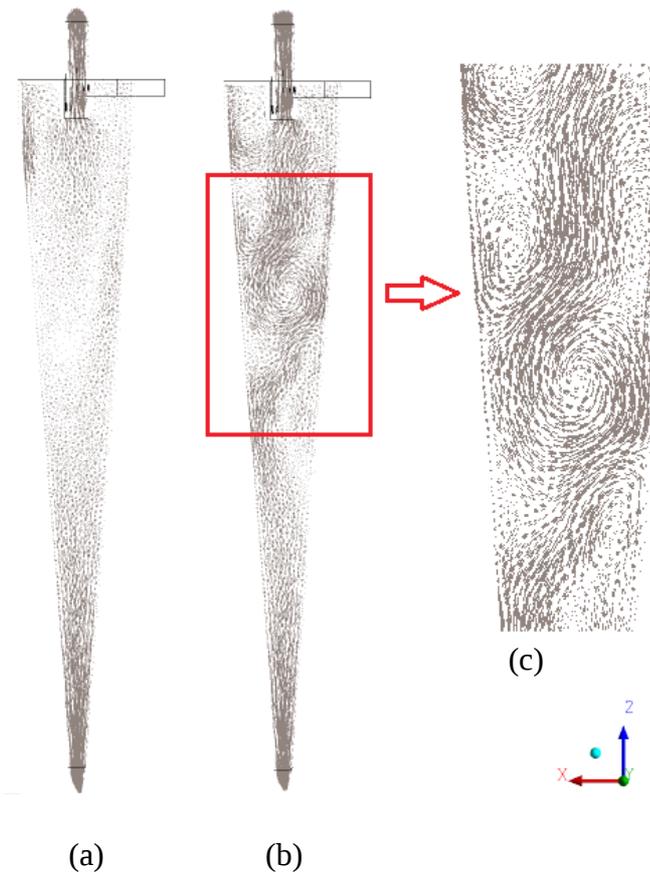


Figura 6: Vetores da velocidade axial do óleo ao longo do plano XZ, para as velocidades de entrada de (a) 4 m/s e (b) 32 m/s e (c) detalhe da zona de recirculação.

A Figura 7 mostra a eficiência de separação das fases em função da velocidade de entrada dos fluidos no interior do hidrociclone. Verifica-se que essa eficiência de separação cresce com o aumento do fluxo de alimentação, atingindo seu valor máximo para a velocidade de 4 m/s. Em seguida, pode-se notar que mesmo aumentando a velocidade de entrada, ela decresce até certo ponto e se mantém praticamente constante.

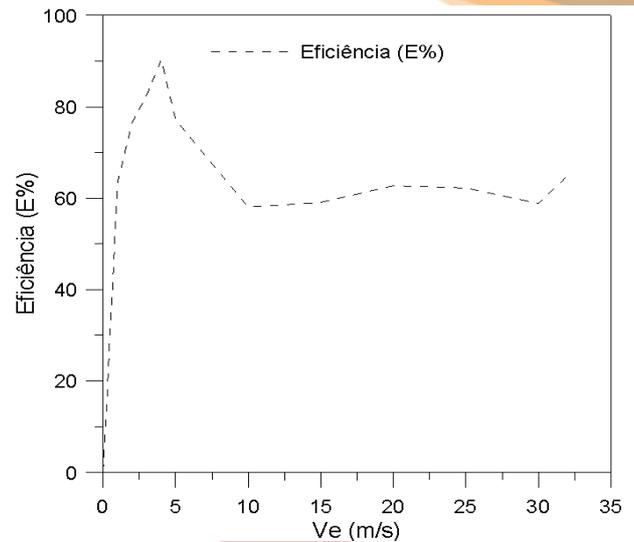


Figura 7: Eficiência de separação das fases em função da velocidade de entrada dos fluidos.

A Figura 8 mostra a potência de bombeamento em função da velocidade de entrada dos fluidos no interior do hidrociclone. Pode-se observar que há um incremento na potência para maiores valores de velocidades e esse fato pode ser atribuído a um aumento da queda de pressão no equipamento, o que indica um maior consumo de energia para o bombeamento da mistura para o equipamento.

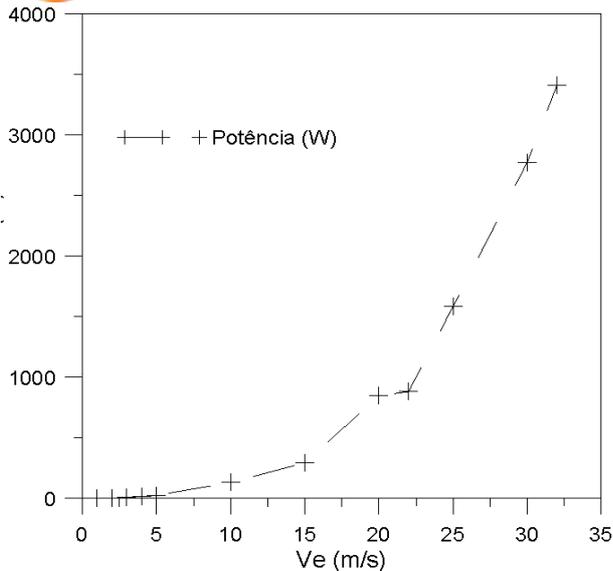


Figura 8: Potência de bombeamento em função da velocidade de entrada dos fluidos.

Vale salientar que, apesar dos resultados obtidos no presente trabalho não terem sido comparados com dados experimentais a esta geometria particular do hidrociclone, os resultados físicos obtidos estão condizentes com diversos trabalhos reportados na literatura. Contudo, recomenda-se estudos experimentais nesse sentido.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos com as simulações numéricas do comportamento dos fluidos no interior do hidrociclone, pode-se concluir que:

- O modelo matemático mostrou-se adequado para descrever o fenômeno de forma realística e com ampla gama de detalhes, sendo capaz de prever o processo de separação óleo pesado-água via hidrociclone;
- Os campos de pressão, fração volumétrica e as linhas de fluxo possibilitaram a construção do comportamento tridimensional do escoamento;
- Os campos de fração volumétrica mostraram que há uma maior concentração de água na parte inferior do equipamento e de óleo nas proximidades do eixo. Isso ocorre devido à diferença de densidade entre as fases da mistura;
- A velocidade de entrada influencia no comportamento nas linhas de fluxo, favorecendo um aumento da força centrífuga e de arraste, proporcionando, assim, um aumento no número de voltas no interior do hidrociclone;
- Com o aumento do fluxo de alimentação há um aumento na queda de pressão, indicando um maior consumo de energia para o

bombeamento da mistura para o interior do hidrociclone;

- A eficiência de separação das fases cresce com o aumento do fluxo de alimentação, atingindo seu ponto máximo para a velocidade de 4 m/s, com um valor de 90 %;

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a ANP/UFMG/PRH-42, a CAPES, ao CNPq, a FINEP, e a PETROBRÁS, por todo apoio financeiro, a UFMG e ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, pela estrutura disponibilizada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIMA, R. M. G. de; WILDHAGEN, G. R. da S.; DIAS, J. W. S.; AFONSO, J. C., 2008; **Remoção do Íon Amônio de Águas Produzidas na Exploração de Petróleo em Áreas Offshore por Adsorção em Clinoptilolita.** Química Nova, v. 31, p. 1237-1242.

MATVIENKO, O.V EVTYUSHKIN, E.V., 2007. **Theoretical investigation of the processo of cleaning oil-polluted soil in hydrocyclone apparatuses.** Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 80, n°. 3, pp 72-80.

SIMÕES, A.M.B.M., 2005. **Separação de água-óleo derramado no mar usando hidrociclone: Um estudo numérico da intensidade turbilhonar provocado pelo duto de alimentação,** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, PB- Brasil.

SOUZA, J. S., 2009. **Estudo numérico da termofluidodinâmica da separação de óleos pesados de uma corrente águas oleosas via hidrociclone,** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande – PB, Brasil.

SOUZA, J. S, FARIAS NETO, S. R., LIMA, A. G. B., 2015. **Separação de líquidos via hidrociclones: Termofluidodinâmica.** Germany: NEA Novas Edições Acadêmicas, 2015, v.1. p.156., ISBN: 9783639699463.

