

SIMULAÇÃO DE HIDROCICLONES PARA AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS

Alexandre Garcia de Oliveira (UFLA) E-mail: alexandre.garcia48@gmail.com

Felipe Orlando da Costa (UFLA) E-mail: felipeorlandodacosta@gmail.com

Irineu Petri Júnior (UFLA) E-mail: irineupetri@gmail.com

Resumo: Na indústria petroquímica, faz-se uso da hidrociclonagem na separação de material particulado, advindo da perfuração do poço, juntamente com fluido de perfuração, visto que a não retirada desse cascalho, gerado pelo processo, pode ocasionar o desgaste prematuro da broca ou entupimento do poço. Este estudo tem como objetivo realizar a simulação numérica, de um hidrociclone operando com fluido não-newtoniano, avaliando os parâmetros de eficiência total e razão de líquido e também comparação a diferença na utilização de um fluido não-newtoniano e um newtoniano de mesma densidade. Para isso, foram construídas cinco geometrias com diferentes diâmetros de *underflow* e, após a simulação das mesmas, obteve-se resultados de perfis de velocidade, viscosidade e pressão, posteriormente foi efetuada a injeção de partículas para obtenção dos valores de eficiência total. Os valores de eficiência total e razão de líquido foram comparados com a literatura. Em geral, para eficiência total, os resultados dos erros relativos obtidos, quando comparados com o trabalho de referência, apresentaram valores satisfatórios, com desvios menores ou iguais a 11%. Já para os valores de razão de líquido, foi possível obter dois resultados satisfatórios, no caso a geometria 4 e 5, que apresentaram erros relativos de 2,89% e 15,07%, respectivamente. E através da comparação entre a operação com fluidos não-newtoniano e newtonianos, foi possível observar a influência da variação da viscosidade no processo de separação. Os resultados encontrados permitiram concluir que a análise CFD comprovou ser eficaz para prever o escoamento de fluido não-newtonianos em hidrociclones.

Palavras-chave: eficiência total, razão de líquido, indústria petroquímica, fluido de perfuração.

HYDROCYCLONE MODELING AND SIMULATION TO EVALUATE FLUID FLOW NON-NEWTONIANS

Abstract: In the petrochemical industry, hydrocycloning is used to separate particulate material from the well, together with drilling fluid, since not removing the gravel generated by the process can cause premature wear of the drill bit or blockage of the well. This study aims to perform a numerical simulation, of a hydrocyclone operating with non-Newtonian fluid, evaluating the parameters of total efficiency and ratio fluid and comparing the difference in the use of a non-Newtonian fluid and a Newtonian fluid of the same density. For this, five geometries with different underflow diameters were constructed and, after their simulation, results of velocity, viscosity and pressure profiles were obtained, then the injection of particles was carried out to obtain the values of total efficiency. The values of total efficiency and ratio fluid were compared with the literature. In general, for total efficiency, the results of the relative errors obtained, when compared with the reference work, presented satisfactory values, with deviations less than or equal to 11%. For the values of fluid ratio, it was possible to obtain two satisfactory results, in the case of geometry 4 and 5, which presented relative errors of 2.89% and 15.07%, respectively. Moreover, by comparing the operation with non-Newtonian and Newtonian fluids, it was possible to observe the influence of the variation in viscosity in the separation process. The results found allowed the conclusion that the CFD analysis proved to be effective in predicting the flow of non-Newtonian fluid in hydrocyclones.

Keywords: total efficiency, fluid ratio, petrochemical industry, drilling fluid.

1. Introdução

A indústria do petróleo é um dos segmentos onde, em seu processo, se faz necessária a separação sólido-líquido do material que é gerado pela broca durante a perfuração do poço. Para que a perfuração possa ocorrer de maneira eficiente, o cascalho gerado deve ser removido de dentro do poço, tal remoção é feita pelo bombeamento do fluido de perfuração que arrasta cascalho até a superfície, conhecido como limpeza de poço.

Os fluidos de perfuração consistem em uma mistura complexa de diversos componentes e sua estrutura química varia dependendo do tipo de fluido em questão, podendo ser do tipo não-newtoniano. Têm o objetivo primordial de promover a limpeza do interior do poço, exercer pressão hidrostática sobre as formações, selar as formações, lubrificar a coluna, resfriar a broca e transmitir energia hidráulica a broca. (PANISSET, 2014)

Como o fluido é responsável por diversos fatores importantes durante o processo de separação, o acúmulo de cascalho nele gera muitos problemas, pois o cascalho presente no fluido altera suas propriedades. Pensando em uma alternativa para diminuir os gastos com a compra de fluido de perfuração, a indústria do petróleo buscou tecnologias para a separação de fluido e cascalho, como ocorre na indústria de mineração.

Dessa forma, a indústria do petróleo desenvolveu um sistema de separação de cascalhos, que é composta de uma série de operações unitárias visando a separação entre as duas fases. Dentre as operações unitárias presentes nesse sistema, está a hidrociclonagem, que consiste na utilização de um hidrociclone para a separação do fluido de perfuração e do cascalho. Como a perfuração de um poço envolve milhares de metros cúbicos de fluido, é de extrema necessidade entender como a operação de hidrociclonagem acontece na presença de um fluido não-newtoniano para que se possa otimizar o processo de separação e diminuir os custos de operação.

Para facilitar e reduzir os custos dos estudos práticos para avaliação do comportamento e da eficiência de separação, pode-se utilizar a fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) para prever o comportamento do escoamento interno do fluido. A fluidodinâmica utiliza técnicas matemáticas, computacionais e numéricas, para que se possa prever o comportamento do equipamento, no caso um hidrociclone, quando aplicado às condições reais de funcionamento.

A utilização de CFD para simulação da operação de hidrociclonagem é encontrada em alguns estudos, como por exemplo, Alves (2012), que estudou, com o auxílio do CFD, a otimização das proporções geométricas de um hidrociclone para minimizar a fração volumétrica de óleo, presente em águas oleosas oriundas de refinarias, na corrente diluída, com altos valores de eficiência de separação água/óleo. No trabalho de Araújo (2015), foi proposto a medição dos perfis de velocidade de um hidrociclone para separação de dispersões óleo-água a partir da fluidodinâmica computacional e por velocimetria por imagens de partículas (*Particle Image Velocimetry* - PIV).

Apesar de haver trabalhos de simulação na área de separação por hidrociclone, não há muitos trabalhos utilizando essa técnica para simulação de fluidos não-newtonianos em hidrociclones. Esse tipo de escoamento é muito importante para a indústria petroquímica, assim, faz-se necessário o estudo dessa área para previsões do comportamento desse fluido em hidrociclones.

Em vista disso, o objetivo deste trabalho consiste na simulação, via fluidodinâmica computacional, do escoamento no interior de um hidrociclone, utilizando um fluido não-newtoniano do tipo pseudoplástico e comparando resultados de razão de líquido, e eficiência total com o trabalho de Mognon (2015). Para análise do escoamento do fluido não-newtoniano no interior do hidrociclone foram gerados perfis de velocidade, viscosidade e pressão. E por fim, será comparado o escoamento no interior do hidrociclone operando com fluido newtoniano (água) e fluido não-newtoniano (fluido de perfuração), analisando a diferença da razão de líquido, eficiência total, perfis de velocidade, viscosidade e fase.

2. Metodologia numérica

2.1. Geometria e malha computacional

As dimensões dos hidrociclones foram baseadas no trabalho de Mognon (2015), cujo estudo buscou avaliar parâmetros geométricos ótimos na separação de fluidos não-newtonianos na indústria do petróleo. Os parâmetros ótimos selecionados foram comprimento o *vortex finder* (l), o comprimento da parte cilíndrica (L_l) e o ângulo do cone (θ), e os parâmetros de diâmetro do *underflow* (D_u) e comprimento total (H) foram alterados a fim de determinar qual seria a geometria com os melhores resultados. Dessa maneira, construiu-se as 5 geometrias que se diferenciam apenas no H e no D_u . A Tabela 1 apresenta as dimensões em comum, das 5 geometrias e a Tabela 2 apresenta as dimensões específicas de cada uma das 5 geometrias construídas. Vale ressaltar que D_i é o diâmetro da alimentação, D_o é o diâmetro do *overflow* e D_c é o diâmetro da parte cilíndrica.

Tabela 1 – Dimensões em comum das 5 geometrias simuladas

D_i (mm)	D_o (mm)	D_c (mm)	l (mm)	L_l (mm)	θ (°)
9,1	10,5	30	20,85	32,1	6

Tabela 2 – Dimensões específicas de cada uma das 5 geometrias

Geometrias	D_u (mm)	H (mm)
1	4	248,05
2	5	238,50
3	6	229,00
4	7	219,40
5	8	210,00

A geometria foi construída no *software* SpaceClaim 19.2, e as malhas computacionais pelo *software* Meshing 19.2, preocupando-se sempre com a qualidade da malha, pois estas são medidas essenciais para um bom resultado da simulação. O número de células das malhas foi baseado no trabalho de Cavalcante et al. (2019). A Tabela 3 mostra os números de células totais de cada geometria construída.

Tabela 3 – Número de células em cada amostra simulada

Geometrias	1	2	3	4	5
Nº de Células	638.274	655.472	677.280	651.429	648.921

Para avaliar a qualidade das malhas, analisou-se os parâmetros de *Aspect Ratio*, *Skewness* e *Jacobian Ratio*. A Tabela 4 apresenta um resumo dos valores médios de *Aspect Ratio*, *Skewness* e *Jacobian Ratio* das 5 geometrias, obtidos a partir do *software* Meshing.

Tabela 4 – Valores médios de *Aspect Ratio*, *Skewness* e *Jacobian Ratio* para cada uma das geometrias

Teste de qualidade	Geometria				
	1	2	3	4	5
<i>Aspecto Ratio</i>	1,90	1,91	1,80	1,92	1,87
<i>Skewness</i>	0,20	0,22	0,22	0,21	0,20
<i>Jacobian Ratio</i>	1,00	1,00	1,08	1,16	1,06

Os valores médios de *Aspect Ratio* e *Skewness* apresentaram uma proximidade com 1 e 0, respectivamente, indicando que a malha computacional manufatura apresenta baixa deformação em seus elementos. E os valores médios de *Jacobian Ratio* foram extremamente próximos à 1, indicando que a malha construída é confiável do ponto de vista computacional.

2.2. Modelos e condições de contorno

Feita a montagem das malhas, as mesmas foram carregadas no *software* Fluent 19.2 para simulação, no *software* foi aplicada a gravidade no eixo axial com valor igual a 9,81 m/s² e a referência de pressão atmosférica na saída do *overflow* igual a 101.325 Pa. Além disso, para simulação, foram usados os seguintes métodos de solução, tendo como base o trabalho de Petri & Vieira (2012), onde foi utilizado o método SIMPLE para Acoplamento Pressão-Velocidade, esquema de interpolação espacial PRESTO! para pressão, *Bounded Central Differencing* para o momento e *Compressive* para fração volumétrica.

Para implementação do modelo de viscosidade do fluido não-newtoniano, representada pelo modelo de Herschel-Bulkley (Equação 1), utilizou-se uma função definida pelo usuário (*User Defined Function* – UDF), construída em linguagem C++ e contendo os valores dos parâmetros do modelo obtidos no trabalho de Mognon (2015), sendo eles: $K = 1,16943$, $n = 0,50638$ e $\tau_0 = 4,1000$. O fluido possui uma densidade igual a 998,2 kg/m³.

$$\tau = \tau_0 + K\gamma^n \quad (1)$$

Onde: τ é tensão de cisalhamento (Pa); τ_0 é tensão inicial de cisalhamento (Pa); K é o índice de consistência (Pa.sⁿ); γ é a taxa de deformação (s⁻¹); n é o índice de comportamento (-).

Utilizou-se o modelo de turbulência *Large Eddy Simulation* (LES), assim como descrito no trabalho de Anjos (2016). Também foi utilizado o modelo *Volume of Fluid* (VOF), para que pudesse representar a formação do *air-core* formado pela entrada de ar no *overflow* e *underflow* (PETRI & VIEIRA, 2012b). A alimentação foi definida como sendo uma condição de pressão de entrada (*Pressure Inlet*) com valor de 1,03322745 kgf/cm² assim como descrito, experimentalmente, no trabalho de Mognon (2015).

Considerou o sistema diluído, por ter apenas 1% de sólido em suspensão, e realizou a injeção Lagrangeana *one-way* de partículas de rocha fosfática para obter os resultados de eficiência total. A distribuição granulométrica das partículas foi representada pelo modelo RRB, assim como mostrado pela Equação 2.

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{D}{28,47}\right)^{1,0206}} \quad (2)$$

2.3. Simulações

Foram realizadas simulações para as 5 geometrias construídas contendo o fluido não-newtoniano, o tempo total de simulação foi ajustado para 5 segundos, o que já garantia o estado estacionário do escoamento. Utilizou-se um passo de tempo de 1x10⁻⁶, que foi aumentado gradativamente até 3x10⁻⁶.

Com as simulações concluídas, foi possível obter os perfis de velocidade, viscosidade e pressão, para avaliar o comportamento de um fluido não-newtoniano no interior do

hidrociclone. E com os resultados médios de vazão de entrada e saída no *underflow* foram obtidos os resultados de razão de líquido.

Posteriormente foi feita a injeção de partículas utilizando o modelo Lagrangeano, com a abordagem desacoplada, pois tem-se uma solução diluída, assim sendo, a presença do material particulado não exerce influência sobre a fase fluida. Em seguida foi coletado os valores de vazão de partículas na entrada e *underflow*, para obter os valores das eficiências total para todas geometrias utilizadas.

Para avaliar de fato a influência de um fluido não-newtoniano no interior de um hidrociclone, foi feita a comparação dos resultados obtidos da simulação do fluido de perfuração com um fluido com viscosidade constante (fluido newtoniano) de mesma densidade, para isso, optou-se pela utilização da água. Vale ressaltar que essa comparação foi realizada somente para a geometria 2.

Para a simulação do hidrociclone utilizando o fluido newtoniano, foi feito o mesmo procedimento, ao termino da simulação foi coletado os perfis de velocidade, viscosidade e fase, sendo o último para avaliar a formação do *air-core*. E também foi definida a razão de líquido, utilizando as vazões de entrada e do *underflow*. Posteriormente foi feita a injeção do material particulado e por fim foi determinado a eficiência total de separação utilizando a água como fluido de operação.

3. Resultados e discussões

3.1. Validação da simulação numérica

O primeiro passo de toda simulação numérica é validar os modelos utilizados para assegurasse que os modelos utilizados de fato representam o comportamento obtido experimentalmente. Para isso, foi utilizado os valores de razão de líquido e de eficiência total obtidos em Mognon (2015). Os valores de razão de líquido simulados e os experimentais obtidos por Mognon (2015) estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação dos valores de Razão de Líquido de todas as geometrias simuladas com o trabalho de Mognon (2015)

Geometrias	R _L Mognon (%)	RL Simulado (%)	Erro Relativo (%)
1	7,35	16,27	121,36
2	11,76	23,79	102,3
3	20,86	28,9	38,54
4	26,32	27,08	2,89
5	37,82	43,52	15,07

Como pode ser observado na Tabela 5, a geometrias 4 apresentou um ótimo resultado, tendo em vista, o baixo erro relativo obtido, já a geometria 5 apresentou um erro relativo aceitável para simulações CFD de hidrociclones, pois o valor obtido do erro relativo está em torno de 15%.

Já as geometrias 1, 2 e 3 apresentaram altos valores de erro relativo, comprometendo a confiabilidade dos valores obtidos para estas simulações, no entanto, esse alto erro relativo pode ser justificado devido ao baixo valor do diâmetro do *underflow* e isso ocasionou imprecisões experimentais e numéricas nas vazões, fazemos com que os

valores flutuassem.

Porém, no geral, os modelos utilizados foram válidos para simulação do hidrociclone com fluidos não-newtonianos, apenas como algumas restrições quanto ao diâmetro do *underflow*. Pois os valores da razão de líquido apresentaram a mesma tendência apresentada no trabalho de Mognon (2015). Os valores de eficiência total calculados e os dados experimentais estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Comparação dos valores de Eficiência total de todas as geometrias simuladas com o trabalho de Mognon (2015)

Geometrias	η Mognon (%)	η Simulado (%)	Erro Relativo (%)
1	81,23	87,38	7,57
2	82,52	91,30	10,64
3	85,08	93,85	10,31
4	86,49	94,64	9,42
5	89,33	97,03	6,62

Assim como observado experimentalmente, o aumento do diâmetro de *underflow* levou ao aumento da eficiência total, o que mostra que a simulação apresentou uma ótima aproximação. Além disso, todas as simulações tiveram ótimos valores de eficiência quando comparados com o trabalho base, visto que o erro relativo apresentado foi menor que 11%.

Além do mais, a eficiência apresentada mostra que este tipo de geometria simulada tem alto potencial de uso para as indústrias petrolíferas, dado que o *underflow* sai com correntes bastante concentradas.

As pequenas diferenças apresentadas podem ser explicadas devido ao fato de que na injeção de partículas foram consideradas partículas esféricas, já que o trabalho de Mognon (2015) não apresentou nenhum valor de esfericidade para as partículas.

3.2. Comportamento do fluido não-newtoniano no interior dos hidrociclones

Para analisar o comportamento do fluido não-newtoniano no interior do hidrociclone foi gerado contornos de velocidade axial, com o qual é possível verificar a ascendência e descendência do fluido. A Figura 1 mostra o perfil de velocidade axial para cada uma das geometrias.

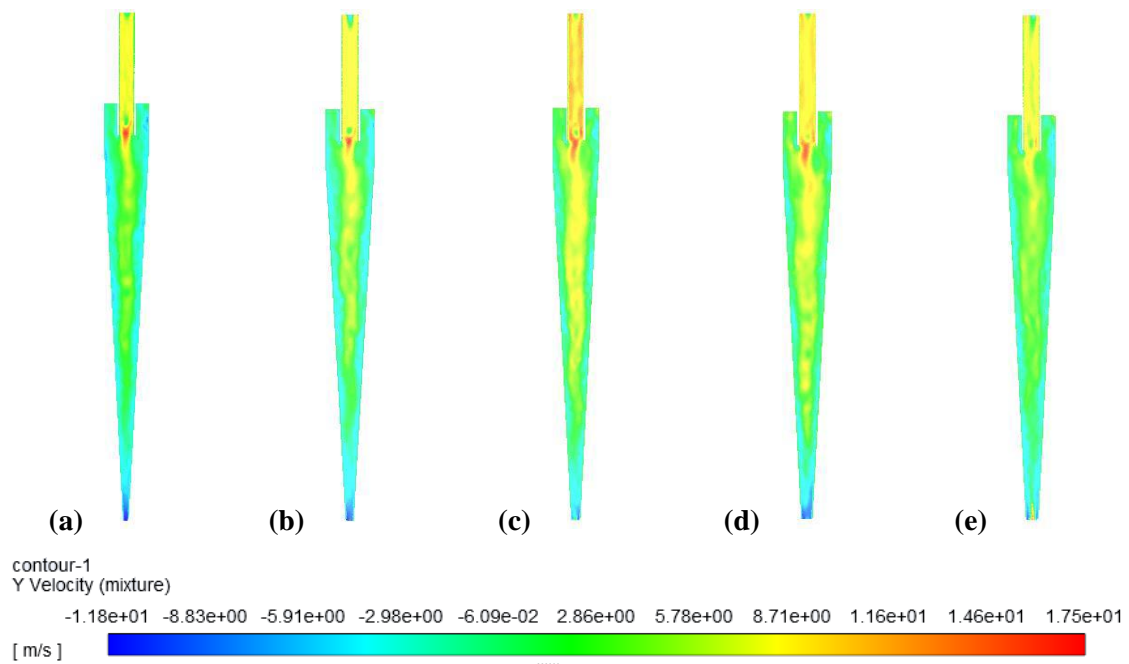


Figura 1 – Perfil de velocidade axial das geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5

Os resultados da Figura 1 apresentaram valores negativos de velocidade axial perto das paredes, o que mostra a descendência das correntes do fluido. Com a diminuição do raio houve o aumento da velocidade, o que confirma a ascendência das correntes, mostrando que houve a formação do vórtice secundário, responsável pela ascensão das partículas para o *overflow*. A Figura 1c, que apresenta um valor intermediário de diâmetro de *underflow*, foi a simulação que apresentou a maior velocidade no centro do equipamento, mostrando que houve uma maior ascendência de fluido nesta geometria.

Para verificar a pseudoplasticidade do fluido no interior do hidrociclone foram gerados perfis de viscosidade molecular (Figura 2) e calculados os valores médios da viscosidade molecular (Tabela 7), para cada uma das geometrias simuladas.

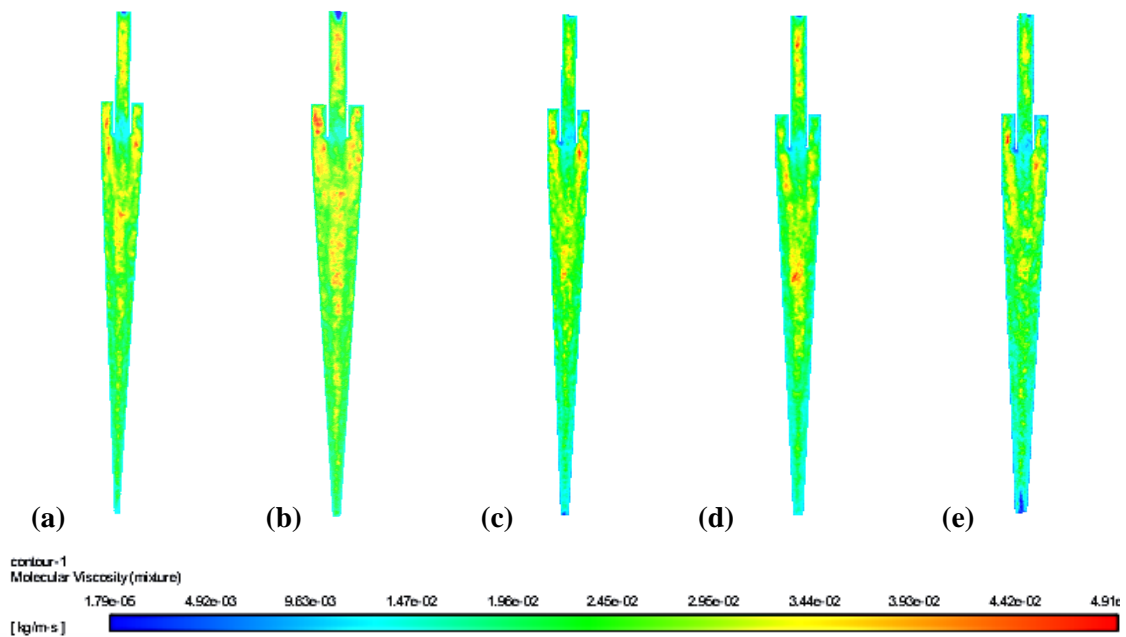


Figura 2 – Perfil de viscosidade moleculares das geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5

Tabela 7 – Valores médios da viscosidade molecular para cada uma das geometrias com seus respectivos desvios padrões

Geometrias	Viscosidade molecular média (kg/m.s)
1	0,02655±0,01408
2	0,02644±0,01441
3	0,02613±0,01401
4	0,02746±0,01474
5	0,02608±0,01312

Os resultados da Figura 2 mostram a variação da viscosidade molecular do fluido dentro do equipamento, devido a utilização de um fluido não-newtoniano nas simulações, mostrando a ocorrência das turbulências e de diferentes tensões cisalhantes dentro do equipamento. Pode-se observar que os maiores valores de viscosidade foram nas regiões de menor velocidade axial, pois é onde há as menores tensões. Maior viscosidade acarreta o arraste das partículas solidas para o *underflow*, produzindo correntes mais limpas no *overflow*.

E através da Tabela 7 pode-se observar que o fluido de perfuração possui uma alta viscosidade e principalmente pode-se observar que há uma alta variabilidade dos valores obtidos de viscosidade molecular através do desvio padrão, sendo isso uma característica dos fluidos não-newtonianos, pois a viscosidade não é constante e varia com a tensão de cisalhamento no equipamento.

A fim de verificar o comportamento do fluido não-newtoniano e da perda de carga em um hidrociclone, foram gerados perfis de pressão estática para todas as geometrias simuladas, apresentadas na Figura 3.

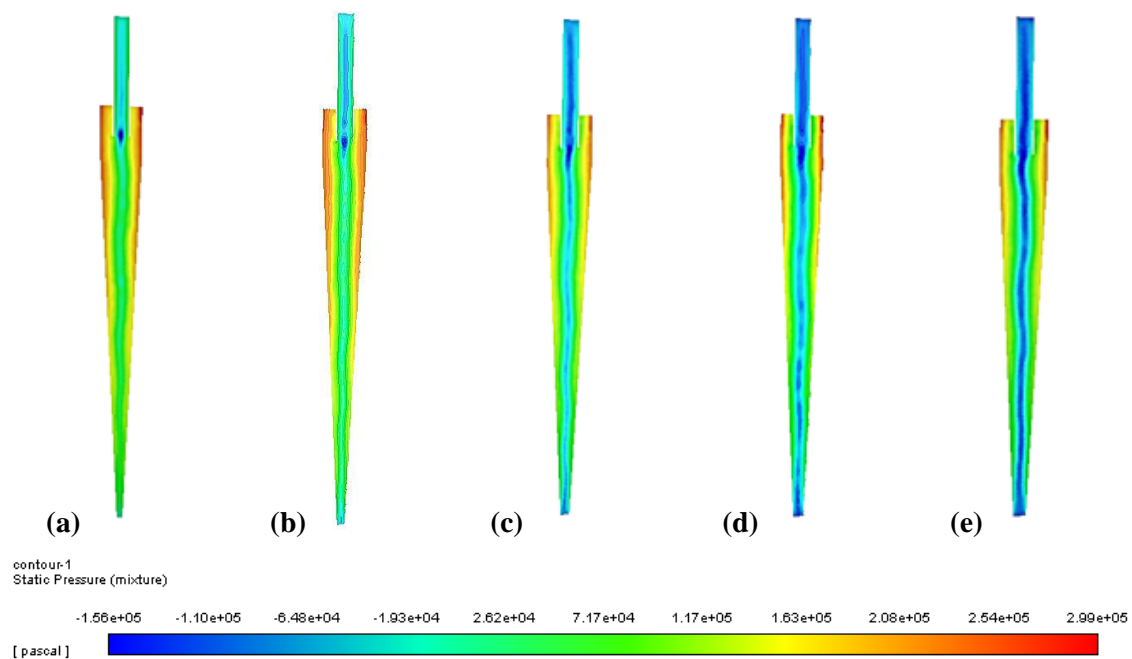


Figura 3 – Perfil de pressão das geometrias a) 1; b) 2; c) 3; d) 4 e e) 5

A Figura 3 mostra que houve maiores pressões nas paredes da parte cilíndrica e conforme o fluido percorre o equipamento de forma descendente, tem-se a diminuição da pressão

nas paredes, decorrente da perda de carga do fluido durante a operação, corroborando os resultados de Silva et al. (2012). O centro do equipamento apresentou pressões negativas, ocasionadas pela formação do *air core*, e quanto menor for essa pressão no interior maior será o *air core* (PETRI et al., 2011).

Pode-se verificar também que a pressão dentro do hidrociclone diminui com o decréscimo do raio, e é este gradiente de pressão que é responsável pela separação das fases em um hidrociclone, pois a menor pressão no centro arrasta a fase menos densa para essa região (CAVALCANTE et al., 2019).

3.3. Comparação do escoamento entre fluido newtoniano e não-newtoniano

Para comparar os efeitos da utilização de fluidos diferentes na operação de hidrociclonagem, simulou-se a geometria 2 com fluido não-newtoniano e com água como fluidos de operação. Como a comparação é entre fluidos diferentes, o perfil de velocidade a ser analisado deve ser o de magnitude da velocidade. A Figura 4 apresenta o perfil de cada simulação.

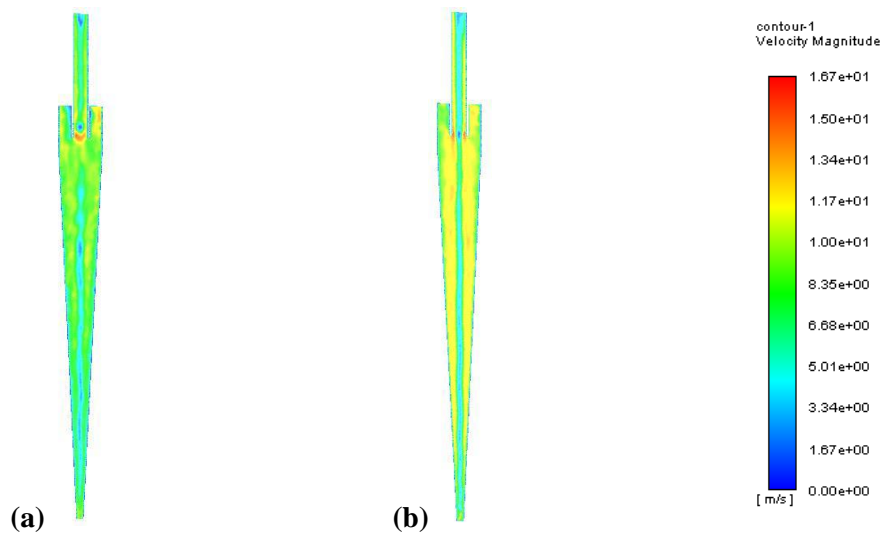


Figura 4 – Perfil de magnitude de velocidade da geometria 2 a) fluido não-newtoniano; b) água

Observando a Figura 4 pode-se visualizar um valor de zero nas paredes do equipamento nas duas simulações, isso devido a condição de não deslizamento. Pode-se também observar que quanto mais longe das paredes, ou seja, em direção ao centro do equipamento, maior a velocidade. No entanto, no centro do equipamento percebe-se a diminuição da velocidade e o aparecimento de um rastro que praticamente liga o *overflow* ao *underflow*, isso ocorre em consequência da formação do vórtice secundário responsável pela ascensão e separação das partículas.

As principais diferenças entre os perfis são a maior velocidade e o rastro mais visível da formação do vórtice secundário na Figura 4.b, que ocorrem porque a água tem menor viscosidade, sendo assim, é mais fácil este fluido atingir velocidades mais altas. Para confirmar essas observações, a Figura 5 apresenta os perfis de viscosidade molecular para cada um dos fluidos e a Tabela 8 contém os valores de viscosidade molecular média com seus respectivos desvios padrões.

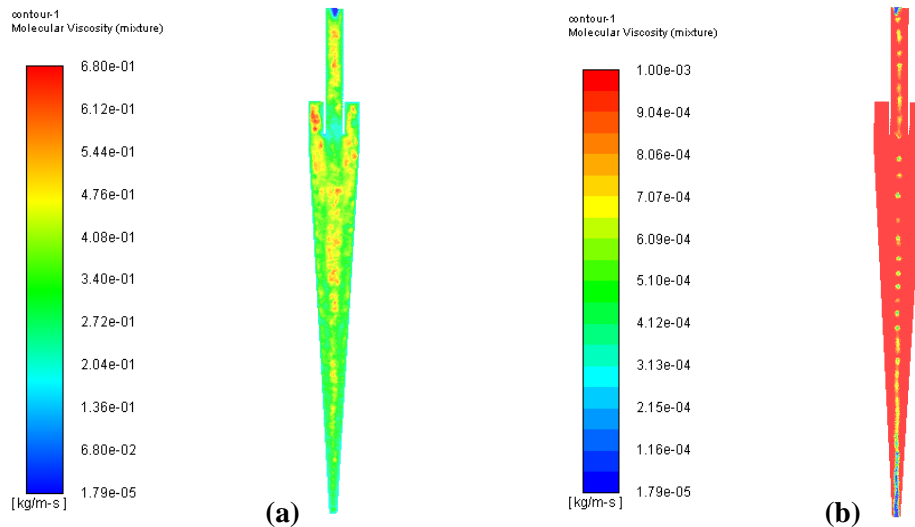


Figura 5 – Perfil de viscosidade da geometria 2 a) fluido não-newtoniano; b) água

Tabela 8 -Valores médios da viscosidade molecular da geometria 2 a) fluido não-newtoniano; b) água

Simulação	Viscosidade molecular média (kg/m.s)
Fluido não-newtoniano	0,02644±0,01441
Água	0,00099±0,00004

A Figura 5 mostra a variação da viscosidade molecular do fluido não-newtoniano, causada pelas diferentes tensões dentro do equipamento, o que é confirmado pela Tabela 8, onde o desvio padrão mostra a alta variação do valor médio de viscosidade. Já no perfil da água, pode-se observar que, dentro do equipamento, a viscosidade predominante é de aproximadamente 1×10^{-3} kg/m.s, exatamente o valor de viscosidade da água definida nas condições de contorno, não havendo influência das tensões. Porém, no centro do equipamento, nota-se a presença de viscosidades diferentes que é devido a presença do ar gerado pelo fenômeno de *air-core*.

Para confirmar a presença do *air-core*, pode-se analisar o perfil de fase do equipamento. A Figura 6 apresenta este perfil para a geometria 2 com fluidos diferentes.

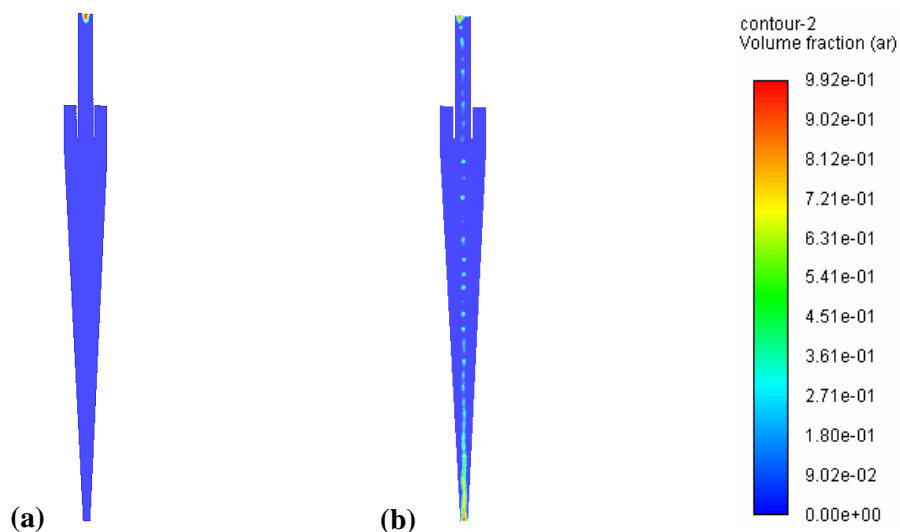


Figura 6 – Diagrama de fases na geometria 2 a) fluido não-newtoniano; b) água

A Figura 6 mostra uma maior entrada de ar dentro da geometria simulada com água, o que confirma a presença de um maior *air-core* quando comparado ao da simulação com fluido não-newtoniano. O menor *air-core* formado na simulação com fluido não-newtoniano pode ser explicado devido a maior viscosidade deste fluido, o que dificulta a entrada de ar pelas saídas do equipamento.

Ao final das duas simulações, pode-se comparar os valores de razão de líquido e eficiência total de ambos os fluidos, apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Comparação dos valores de Razão de Líquido e Eficiência total para o fluido newtoniano e não-newtoniano.

Simulação	R _L (%)	η (%)
Fluido não-newtoniano	23,79	91,30
Fluido newtoniano (água)	13,61	86,11

A Tabela 9 mostra uma diferença de 42,8% entre os resultados de razão de líquido, que é ocasionada pela viscosidade dos fluidos. Como o fluido não-newtoniano apresenta uma maior viscosidade média, a ascensão desse fluido se torna mais difícil e, conseqüentemente, acaba aumentando o valor de razão de líquido para esta simulação. Pode-se observar também que há uma diferença de 6% entre os valores de eficiência, visto que a maior viscosidade média do fluido não-newtoniano pode acabar carregando uma maior quantidade de partículas para o *underflow*, acarretando em uma maior eficiência.

4. Conclusão

Pôde-se comparar os resultados de eficiência total e razão de líquidos simulados com os resultados práticos do trabalho de Mognon (2015). Para razão de líquido, a geometria 4 apresentou um bom resultado e a geometria 5 apresentou um resultado aceitável quando comparados com os resultados experimentais de Mognon (2015). As demais simulações tiveram valores que não podem ser considerados condizentes com a prática devido ao alto erro relativo apresentado, que são decorrentes do baixo diâmetro do *underflow* que ocasiona flutuações nos valores das vazões simuladas e experimentais.

Os resultados gerados pelas simulações serviram para demonstrar vários fenômenos que ocorrem dentro de um hidrociclone. Pode-se observar os perfis de velocidade, o que comprovou as informações obtidas na literatura sobre o comportamento da velocidade e das correntes do fluido dentro do equipamento. Além destes perfis, foi possível analisar a reologia do fluido não-newtoniano e o seu comportamento na presença de turbulência no equipamento.

Com o perfil de pressão, pode-se confirmar que, com a utilização do modelo VOF, todos os equipamentos apresentaram uma região de pressão negativa no centro de seu raio, o que confirmou a formação do *air core*, essencial para a separação das fases nesta operação unitária. No entanto, após a injeção de partículas e o cálculo da eficiência total, as simulações apresentaram ótimos valores quando comparados com o trabalho base, isso porque todas elas tiveram um erro relativo abaixo ou igual a 11%.

Desta forma, pode-se concluir que este trabalho apresentou resultados satisfatórios em relação ao funcionamento de um hidrociclone e comprovou a eficácia do uso de CFD para previsão de resultados preliminares para a operação de hidrociclonagem. Apesar dos resultados promissores, ainda existem pontos a serem melhorados de forma a encontrar razões de líquido mais próximas do experimental para hidrociclones com menores diâmetros de *underflow*.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico-financeiro proporcionado pela FAPEMIG (APQ-00022-18), CNPq (427962/2018-8) e UFLA (PIDEG357-2018).

Referências

ALVES, J. V. B. Hidrociclone para separação do óleo residual de água em refinarias. 2012. 90 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://186.202.79.107/download/separacao-do-oleo-residual-de-agua-em-refinarias.pdf>>. Acesso em 10 set. 2020.

ANJOS, R. P. dos. Avaliação do desempenho de modelos de turbulência em hidrociclones utilizando o openfoam. 2016. 98 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://186.202.79.107/download/desempenho-de-modelos-de-turbulencia-em-hidrociclones-utilizando-o-openfoam.pdf>>. Acesso em 10 set. 2020.

DE ARAÚJO, C. A. O., SCHEID, C. M., LOUREIRO, J. B. R., KLEIN, T. S., & MEDRONHO, R. A. Hydrocyclone for oil-water separations with high oil content: Comparison between CFD simulations and experimental data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187, 106788, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106788>.

ARRUDA, A. A. Otimização de um hidrociclone utilizado na separação de uma mistura líquido-líquido. 2008. 47 f. Universidade Católica de Pernambuco, 2008. Disponível em: <http://tede2.unicap.br:8080/bitstream/tede/915/2/dissertacao_aziel_alves_arruda.pdf>. Acesso em 10 set. 2020.

CAVALCANTE, I. R. M., STORTI, F. C., FILHO, J. A. C., & NOLETO, L. G. Modelagem e simulação numérica de escoamento bifásico para estudo de hidrociclone via CFD. *Brazilian Journal of Development*, 5(9), 15362–15378, 2019. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n9-122>

MOGNON, J. L. Mini-hidrociclones aplicados ao sistema de controle de sólidos na perfuração de poços de petróleo. 2015. 98 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15265/1/MiniHidrociclonesAplicados.pdf>>. Acesso em 10 set. 2020.

PANISSET, C. M. de Á. Novas Alternativas Para o Sistema de Separação Sólido-Líquido na Perfuração de Poços de Petróleo: teste de uma unidade de VCS; busca do aumento de eficiência da operação de hidrociclonagem; e tratamento da borra de centrifugação por microondas. 2014. 278 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2014. Disponível em: <https://7006bdce-4e1b-4e27-b4a4-e221d0e0d253.filesusr.com/ugd/b9cd9f_1bb3e245772749dfafdf840eb77663cb.pdf?index=true>. Acesso em 10 set. 2020.

PETRI, I. J., ATAIDE, C. H., SILVA, R. B., et al. "Estudo da fluidodinâmica de um hidrociclone do tipo desilter operando com fluido de perfuração através de técnicas de CFD". IX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Maringá, PR, jul. 2011. , p. 6. https://7006bdce-4e1b-4e27-b4a4-e221d0e0d253.filesusr.com/ugd/b9cd9f_91aadd27ce544af0bd1556cea34e8c4f.pdf?index=true

PETRI, I. J., VIEIRA, L. G. M. "Otimização de um hidrociclone recuperador de líquido a partir da modificação do orifício de underflow e das técnicas de CFD". XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Búzios, RJ, set. 2012b. , p. 10. https://7006bdce-4e1b-4e27-b4a4-e221d0e0d253.filesusr.com/ugd/b9cd9f_32a6420fd0294691935c520020bd2d3b.pdf?index=true.

PETRI, I. J., VIEIRA, L. G. M. "Otimização de um hidrociclone recuperador de líquido a partir da modificação do orifício de underflow e das técnicas de CFD". XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Búzios, RJ, set. 2012b. , p. 10.

SILVA, R. B., PETRI, I. J., PANISSET, C. M. A., et al. "Influência dos modelos de viscosidade cinemática na fluidodinâmica de um hidrociclone dessiltadores via CFD". XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Búzios, RJ, set. 2012. , p. 10. https://7006bdce-4e1b-4e27-b4a4-e221d0e0d253.filesusr.com/ugd/b9cd9f_996d9973b3854872bb8361ab69c5c9ab.pdf?index=true.

SVAROVSKY, L. Solid-Liquid Separation. 4rd Ed ed. Czech Republic, Butterworth Heinemann, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-70795-4.50011-5>.