

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de P&D em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Estudo da influência da saturação, vazão de entrada e geometria de vortex finder de um hidrociclone bradley para separação óleo/água

AUTORES:

Lucas Pena Assis Quintão, Letícia Fonseca Machado, Carolynne Morgana Leite Ferro, Lucas Meili, Leonardo Mendonça Tenório Oliveira, José Luis Gomes Marinho

E-mail: lucas.quintao@ctec.ufal.br

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia. Faculdade de Engenharia de Petróleo.

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SATURAÇÃO, VAZÃO DE ENTRADA E GEOMETRIA DE VORTEX FINDER DE UM HIDROCICLONE BRADLEY PARA SEPARAÇÃO ÓLEO/ÁGUA

Abstract

The objective of this work was to design a hydrocyclone for water-oil separation, using computational modeling via ANSYS 13.0, evaluating the influence of saturation, the geometry of the equipment (vortex finder format) and the inflow rate on separation. The used geometries followed the proportions required by the Bradley family. Three vortex finder formats were studied: cylindrical, truncated cone and without the presence of vortex finder. The meshes were constructed in an unstructured form, with predominantly tetrahedral elements. The turbulence model used was k- ϵ , with an average intensity of 5%. As convergence criterion, a maximum of 500 iterations was used or a 10^{-8} error of mean square residue. As main results, it was noticed that among the 3 geometries, the one that presented better efficiency was the one of truncated cone (if compared with the cylindrical vortex finder). In addition, the cylindrical geometry was the worst. The influence of the inflow rate was also evaluated. Therefore, the results of the simulations showed that the variation of the oil saturation in the produced water, when low concentrations are considerate, has an unimportant influence on the efficiency of the hydrocyclone. However, the optimization of the vortex finder was efficient on the truncated cone geometry, and confirmed that the regular vortex finder decreases the efficiency of the hydrocyclone in liquid-liquid separations. Finally, the study of flow influence showed that, from a certain flow, efficiency tends to fall. In all cases, the obtained results were similar to those expected and already affirmed in the literature, validating the present article.

Introdução

Água de produção é definida como a água contida nas formações subterrâneas e também injetadas, que são levadas para à superfície em conjunto com o petróleo e o gás na etapa de produção desses fluidos. Sua gestão representa um grande desafio para as empresas petrolíferas. O tratamento da água de produção é imprescindível para reduzir os impactos gerados pelo seu descarte no meio ambiente, precisando atender às exigências ambientais ou ainda para possibilitar o seu reuso nos processos que possa ser utilizada (MOTTA, et al.2013).

O objetivo principal do tratamento é a remoção do óleo contido na água. Sendo a forma emulsionada, a que apresenta uma maior dificuldade de remoção. Neste trabalho, o equipamento adotado para sua remoção, serão os hidrociclones.

Hidrociclones apresentam estrutura simples, destinados à separação de partículas presentes em uma corrente líquida. São representados geometricamente por uma parte cilíndrica acoplada a uma região cônica, não possuindo peças móveis. Possuem uma entrada lateral e duas saídas no eixo central do equipamento, chamadas underflow e overflow. Uma para partículas separadas da corrente fluida - qual delas dependerá da densidade da mesma em relação ao fluido, e outra para partículas e fluidos, permitindo a descarga da corrente fluida, composta por partículas finas, para um filtro (CREMASCO, 2012; SILVA. *et al*, 2014).

O dimensionamento das partes de um hidrociclone e o ângulo da parte cônica são variáveis determinantes no processo de separação e classificação desses equipamentos, feita em famílias. Eles utilizam um campo centrífugo, que possibilita a separação entre fluido e partícula. O funcionamento básico de um hidrociclone constitui-se de uma alimentação, energia de pressão, que é injetada na região superior da parte cilíndrica do hidrociclone, impulsionando o fluido a realizar um movimento rotacional, na forma espiral, ao longo do equipamento estendendo-se até a base (*underflow*) (SILVA. *et al*, 2014).

Portanto, este trabalho objetiva estudar a influência dos parâmetros de saturação e vazão de entrada em um hidrociclone da família Bradley para tratamento de um sistema água/óleo utilizando a fluidodinâmica computacional. Além disso, estudou-se a ação gerada por três conformações para vortex finder.

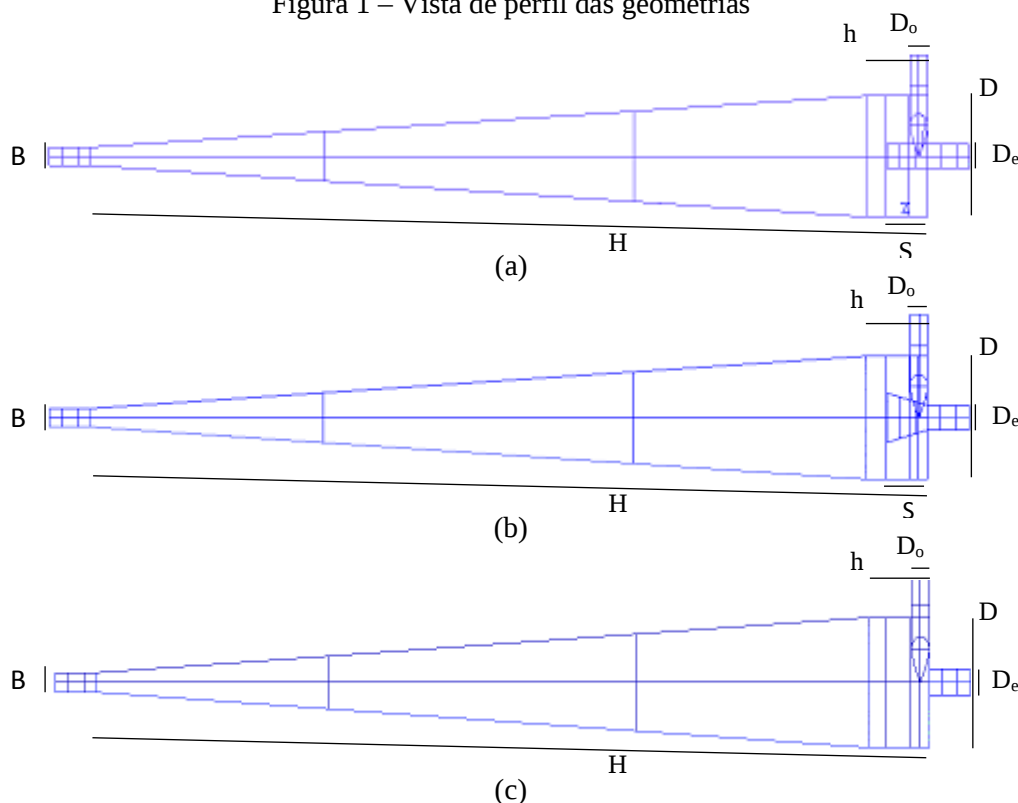
Metodologia

Na busca de alcançar os objetivos propostos foram executadas simulações computacionais utilizando ANSYS CFX 13.0, cujas fases de desenvolvimento e processamento são descritas a seguir.

Geração de geometria e malha

As geometrias dos hidrociclones usadas nas simulações são mostradas na figura 1. O vortex finder assumiu dois formatos, um cilíndrico, e o outro de tronco de cone, mostrados na Figura 1 (a) e (b), respectivamente. Foi usado também uma geometria sem a presença do vortex finder -como mostra a Figura 1(c).

Figura 1 – Vista de perfil das geometrias



Fonte: Autor

As medidas cotadas na Figura 1 foram obtidas respeitando a proporção delas com o diâmetro da parte cilíndrica (D), característica da família Bradley, partindo de 5.9 cm. Essas proporções são mostradas na Tabela 1. Tanto na Tabela 1 quanto na Figura 1 D_o representa o diâmetro da entrada, D_e o diâmetro do overflow, S o comprimento do vortex finder, h o comprimento da parte cilíndrica, H o comprimento total do hidrociclone e B o diâmetro do underflow.

Tabela 1-Proporções entre dimensões nos hidrociclones da família Bradley

Proporções Família Bradley					
D_o/D	D_e/D	h/D	S/D	B/D	H/D

0,2	0,1429	0,5	0,3333	0,15	6,8525
-----	--------	-----	--------	------	--------

Fonte: Cremasco, 2012.

A partir das geometrias descritas, foram geradas malhas não-estruturadas formadas de elementos predominantemente tetraédricos. Para os hidrociclones sem vortex finder, com vortex finder cilíndrico e com vortex finder cônico, obteve-se respectivamente 883.868, 911.253 e 921.552 elementos computacionais.

Modelagem

As simulações de fluxo foram feitas no CFX, considerando o processo no estado estacionário, com as equações governantes de Continuidade, Momento, Dissipação dos Vórtices de Turbulência, Energia Cinética devido a Turbulência e Fração de Volume sendo resolvidas simultaneamente, de forma acoplada, usando métodos iterativos até os valores definidos de convergência. O modelo de turbulência utilizado foi o $k-\epsilon$, com intensidade média de 5%. O modelo de fluido utilizado foi o Newtoniano, bifásico, com uma fase contínua e a outra dispersa.

Condições de contorno e iniciais

As condições de contorno das partes do hidrociclone são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Condições de contorno e iniciais.

Parte	Configuração	Condição de Contorno	Condição Inicial
Corpo do hidrociclone	Parede	Sem deslizamento	-
Tubo de alimentação	Entrada	Fluxo limitado ao sentido de entrada	Velocidade dos fluidos pré-definidas
Underflow	Aberta	Não limitado quanto ao sentido do fluxo dos fluidos	Zero Gradiente
Overflow	Aberta	Não limitado quanto ao sentido do fluxo dos fluidos	Zero Gradiente

Fonte: Autor.

Simulações

Durante o estudo foram feitos três tipos de simulações, uma variando nas condições iniciais a saturação de óleo na mistura, a outra variando a velocidade de entrada da mistura e a última variando a geometria do vortex finder.

A mistura de fluidos presente na simulação era composta de água e óleo, com comportamento isotérmico durante o processo. A água foi configurada como fase contínua com densidade de 997 kg/m³ e viscosidade 8,899E-04 kg/ms. O óleo foi configurado como fase dispersa, em gotículas com diâmetro de 30 µm, com densidade 840 kg/m³ e viscosidade 1,32E-02 kg/ms.

O solver foi configurado nas unidades do SI e no modo acoplado, onde as equações governantes são resolvidas simultaneamente e de forma acoplada. Como critério de convergência, foram usados um número máximo de 500 iterações ou o erro de 10⁻⁸ (cujo modelo era o RMS), o que ocorresse primeiro.

Resultados e Discussão

Influência da saturação na eficiência de separação

No estudo da influência da saturação de óleo na eficiência da separação, inicialmente, levou-se em consideração os dados da água de produção da Bacia Sergipe-Alagoas, presentes na Tabela 3. A partir desse valor, dos valores mínimo, máximo e um valor intermediário de TOG presentes na Tabela 4, encontrou-se três saturações explicitadas na Tabela 3. Esses valores foram encontrados dividindo a massa de óleo presente em 1 m³ de mistura pela massa total de mistura em 1 m³.

Tabela 3– Dados da água de produção da bacia Sergipe Alagoas.

Característica	Concentração Mínima (mg/l)	Concentração Máxima (mg/l)
Densidade a 20/4	1.020	1.125
Teor de Óleos e Graxas (TOG)	100	500

Fonte: adaptado de ANP. (2007)

Tabela 4 – TOG e saturação.

TOG 1	0,1 kg/m ³	Saturação 1	9,32427E-05
TOG 2	0,3 kg/m ³	Saturação 2	0,000279728
TOG 3	0,5 kg/m ³	Saturação 3	0,000466214

Fonte: Autor.

A partir disso, fez-se as simulações no hidrociclone com vortex finder de geometria cilíndrica, e obteve-se os resultados da Tabela 5, onde a saturação foi variada. A eficiência foi obtida pela relação entre a vazão mássica do óleo no concentrado em relação à massa de entrada.

Tabela 5 – Eficiência pela variação da saturação característica da Bacia Sergipe-Alagoas.

Hidrociclone Bradley vortex finder cilíndrico - velocidade entrada constante 11 m/s			
Saturação (%)	0,01	0,03	0,05
Eficiência (%)	55,68	55,67	55,65

Fonte: Autor.

Como não houve mudança significativa na eficiência do equipamento com a variação pré-estabelecida nas saturações, fez-se necessário simulações com novas saturações. Foram usados valores maiores, porém relativamente pequenos, para não fugir do referencial que é a água de produção utilizada. Os dados obtidos nas novas simulações, geraram a Tabela 6.

Tabela 6 – Eficiência pela variação da saturação.

Hidrociclone Bradley com vortex finder cilíndrico - velocidade entrada constante 11 m/s			
Saturação (%)	0,1	0,5	1
Eficiência (%)	53,31	53,19	53,13

Fonte: Autor.

Analisando-se as Tabela 5 e 6, pôde-se observar, então, que apesar da visível diminuição da eficiência com o aumento da saturação de óleo na água de produção, ela não era tão considerável, visto que, para os dois intervalos escolhidos, a influência acontecia apenas na casa decimal. Com isso, observou-se um comportamento já previsto por Colman et al. (1980), que concluiu que a eficiência de separação é quase constante, ou seja, apresenta pouca variação para aumento da concentração de óleo na entrada, considerando baixos valores de concentração de óleo na água.

Melhoria na geometria da família Bradley

Depois de obter os resultados das primeiras simulações de investigação da influência da saturação na eficiência do hidrociclone, considerou-se que as eficiências estavam baixas e poderiam ser melhoradas. Com o uso do CFD-Post, linhas de corrente do escoamento de óleo foram geradas e, a partir da visualização das mesmas, pôde-se perceber que o diâmetro do vórtice ascendente era maior que o diâmetro do vortex finder cilíndrico e uma possível consequência desse problema seria a baixa eficiência de separação.

Uma nova geometria para o vortex finder foi criada, modificando a geometria cilíndrica, característica da família Bradley apenas no diâmetro da seção transversal inferior, que foi dobrado, transformando-a em um tronco de cone. A seção transversal modificada é a responsável direta pelo raio de captação do fluxo ascendente de fluido.

Novas simulações foram feitas, considerando os mesmos valores de velocidade e saturação, mudando apenas as geometrias e tamanhos do vortex finder. Aplicou-se, então, o vortex finder cilíndrico com raio estabelecido pela família Bradley; sem a presença de vortex finder; e o vortex finder em formato de tronco de cone. Os resultados obtidos foram organizados na Tabela 7.

Tabela 7 – Influência do vortex finder na eficiência do hidrociclone.

Velocidade de entrada 5 m/s	Hidrociclone Bradley com vortex finder cilíndrico		
Saturação (%)	0,05	5	10
Eficiência (%)	63,77	60,60	59,36

(a)

Velocidade de entrada 5 m/s	Hidrociclone Bradley sem vortex finder		
Saturação (%)	0,05	5	10
Eficiência (%)	65,68	64,48	63,29

(b)

Velocidade de entrada 5 m/s	Hidrociclone Bradley com vortex finder cônico		
Saturação (%)	0,05	5	10
Eficiência (%)	68,76	66,14	65,48

(c)

Fonte: Autor.

Observando os resultados explicitados na Tabela 7, constatou-se que a melhor configuração do vortex finder é a de tronco de cone. Esta configuração apresenta maior área de seção transversal na extremidade inferior, maximizando a captação do vortex de fluido ascendente em relação as outras,

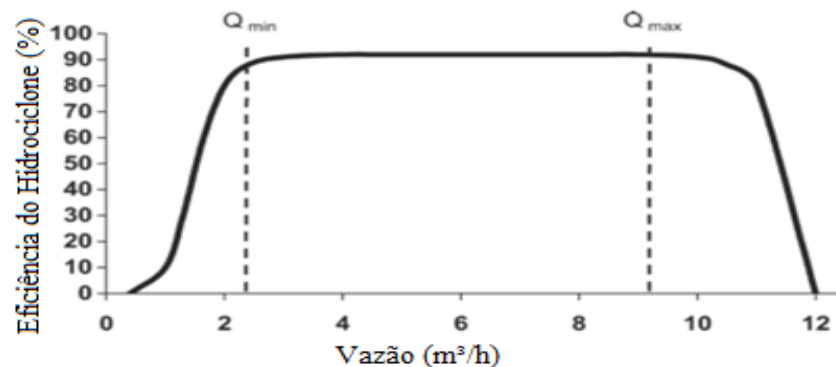
como consequência a eficiência de separação foi maior do que em todos os outros casos testados. Esta geometria é mostrada na Figura 1 (b).

Influência da vazão na eficiência de separação

Decidiu-se investigar outro fator que pudesse aumentar a eficiência do equipamento. O passo seguinte foi variar a vazão de entrada, mantendo a saturação de óleo constante em 0,05%, e observar a sua influência utilizando o hidrociclone com geometria do vortex finder em tronco de cone.

As vazões foram variadas de forma crescente, com o único objetivo de observar se representariam o comportamento descrito por Husveg et al (2007), no Gráfico 1.

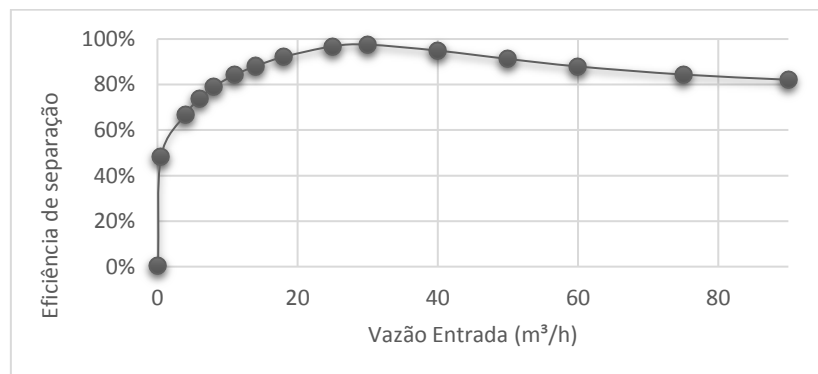
Gráfico 1 – Eficiência do hidrociclone em função da vazão de entrada.



Fonte: adaptado Husveg et al. (2007)

Por fim, analisando-se o gráfico 2, que correlaciona os resultados obtidos nas simulações de tratamento variando a vazão de entrada, pôde-se observar que o comportamento tende ao sugerido por Husveg et al. (2007) e que, a partir de um certo ponto, a eficiência começa a cair.

Gráfico 2 – Eficiência do hidrociclone pela vazão.



Fonte: Autor.

Esse comportamento é explicado por Gomez et al. (2001), pelo balanço da força centrípeta crescente com o tempo de residência decrescente à medida que a vazão de entrada aumenta. A queda a partir de Q_{max} acontece, segundo Meldrum (1988), devido à dissolução das gotículas de óleo pelas forças de atrito e turbulência, e/ou gradiente de pressão insuficiente para mover a camada de óleo separada até o overflow quando a pressão no eixo do hidrociclone é reduzida.

Conclusões

Os resultados das simulações mostraram que a variação da saturação de óleo na água de produção, desde que trabalhada em baixas concentrações, pouco influencia a eficiência do hidrociclone.

Afirmações como essa já haviam sido feitas na literatura, o que mostra que os resultados obtidos seguiram o esperado, validando as simulações.

Já a otimização do vortex finder se mostrou eficiente na geometria de tronco de cone, onde dobrou-se o diâmetro do vortex finder sem, de fato, mudar o diâmetro do overflow, mas tendo um efeito final muito parecido com o esperado, já que Freitas (2009) afirmou que, dentre as 6 variáveis testadas em seu estudo, – sendo elas o diâmetro nominal do hidrociclone, diâmetro overflow, diâmetro do underflow, altura do duto de alimentação, comprimento do vortex finder e altura da parte cilíndrica – as que mais afetam a eficiência de separação são os diâmetros de overflow e de underflow. Logo, a mudança no diâmetro da base do tronco de cone aumentou a captação de fluido proveniente do vórtice ascendente, sem que o diâmetro da saída do overflow fosse alterado.

Por fim, o estudo da influência da vazão se mostrou, também, de acordo com o já representado na literatura, quando Husveg et al. (2007) afirmou que, a partir de uma certa vazão, a eficiência tende a cair. As simulações forneceram dados capazes de gerar um gráfico bastante parecido com o que Husveg et al. (2007) propôs e conseguiu-se ainda encontrar justificativas na literatura para tal comportamento.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Alagoas, em especial ao Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos pelo uso do espaço físico.

Referências Bibliográficas

MOTTA, A.R.P. et al. **Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo por processos de separação de membranas.** v.18, n.1, p. 15-26 , 2013.

CREMASCO, Marco Aurélio. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos.** São Paulo: Blucher, 2012. 423 p.

SILVA, H. M & MACIEL, G. F. (2014). **Desenvolvimento e otimização de hidrociclones frente a modificações de variáveis geométricas e de processo.** Disponível em: < https://www.revistapensar.com.br/engenharia/pasta_upload/artigos/a137.pdf > . Acesso em : 03 abril. 2017.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Boletim de petróleo e gás natural, 2013.

HUSVEG, T.; JOHANSEN, O.; BILSTAD, T. **Operational control of hydrocyclones during variable produced water flow rates - Frøy case study.** SPE Production and Operations, v. 22, n. 3, p. 294–300, 2007.

COLMAN, D.A.; THEW, M.T.; CORNEY, D.R. **Hydrocyclones for Oil/Water Separation. Proc.,** International Conference on Hydrocyclones. Cambridge, U.K.: BHRA, 1980.

GOMEZ, C. et al. **Oil-Water Separation in Liquid-Liquid Hydrocyclones (LLHC)—Experiment and Modeling.** Paper SPE 71538 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 30 September–3 October. DOI: 10.2118/71538-MS, 2001.

MELDRUM, N. **Hydrocyclones: A Solution to Produced-Water Treatment.** SPEPE 3 (4): 669–676. SPE-16642-PA. DOI: 10.2118/16642-PA, 1988.

FREITAS, A. G. B., **Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclones.** 2009. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão. 2009