

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

PERFIS DE VELOCIDADE TANGENCIAL EM UM HIDROCICLONE PARA SEPARAÇÃO ÓLEO-ÁGUA USANDO A VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

AUTORES:

Cristiano Agenor Oliveira de Araújo¹, Juliana Braga Rodrigues Loureiro², Cláudia Míriam Scheid³, Ricardo de Andrade Medronho¹

INSTITUIÇÃO:

¹Departamento de Engenharia Química, Escola de Química, UFRJ, ²Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, UFRJ, ³Departamento de Engenharia Química, Instituto de Tecnologia, UFRRJ.

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba-PR. 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 8ºPDPETRO.

PERFIS DE VELOCIDADE TANGENCIAL EM UM HIDROCICLONE PARA SEPARAÇÃO ÓLEO-ÁGUA USANDO A VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Abstract

The hydrocyclones are compact equipment, low operating costs and employing the centrifugal field to promote phase separation. Initially, it was designed for solid-liquid separation, but at the end of the 1970s, their use in liquid-liquid separations, especially oil-water, was started. The aim of this research is the replacement of the large tanks (known as three-phase separators) used on oil rigs to separate gas, oil and water, as well as particulate materials, based on the gravitational field. These separators occupy a large physical space in the platform because the high residence time required. The other hand, the hydrocyclones are compact devices and require a small deck area. The developments in the geometry of hydrocyclones for the oil-water mixtures separation culminated in dual inputs and two conic sections to increase the efficiency. In this work was employed a factorial design (type 2^{7-3}) for seven hydrocyclone geometric variables to the separation of mixtures of 40% oil in water derived from the exploitation of petroleum wells. All seventeen different geometries suggested by the factorial design were tested by computational fluid dynamics (CFD) using Ansys Fluent. The optimized hydrocyclone was built in acrylic and particle image velocimetry (PIV) technique was used to characterize the velocity field within the hydrocyclone. The tangential velocity profiles were determined experimentally and by means of numerical simulations. The experimental results were compared with simulated data and had low deviations.

Introdução

Os hidrociclones são equipamentos compactos empregados nas separações sólido/líquido, sólido/sólido, líquido/líquido e gás/líquido. Sua geometria é basicamente constituída por uma parte cilíndrica, que define o diâmetro do hidrociclone, acoplada a uma parte cônica. O final da década de 1970 marca o início do emprego dos hidrociclones destinados à separação de águas oleosas (Young *et al.*, 1994).

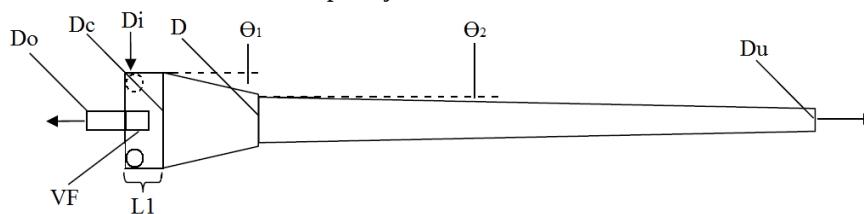
Neste trabalho, foi estudado o emprego de hidrociclones para a separação óleo-água com elevados teores de óleo disperso (40% v/v) visando a substituir os grandes tanques existentes em plataformas de produção de petróleo, conhecidos como separadores de produção.

Metodologia

As dimensões dos hidrociclones neste estudo foram escolhidas com base nos trabalhos anteriores do Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (Lab CFD - DEQ/UFRJ). Pode-se ressaltar os trabalhos de Freitas *et al.* (2009); Almeida *et al.* (2009); Alves & Medronho (2011, 2012); Coelho *et al.* (2011, 2012); Anjos *et al.* (2012); Queiroz & Medronho (2012); Araújo *et al.* (2012, 2013); Mendonça *et al.* (2013) e Braga *et al.* (2013).

A Figura 1 mostra um esquema do hidrociclone ressaltando todas as sete variáveis geométricas deste estudo. O diâmetro da parte cilíndrica (D_c) e o diâmetro compreendido entre as duas seções cônicas (D) foram mantidos constantes, com valores de 70 mm e 40 mm, respectivamente.

Figura 1: Esquema do hidrociclone deste estudo para separação óleo-água, mostrando as variáveis do planejamento fatorial.



Os intervalos de cada uma das sete variáveis em questão são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1- Faixa de cada uma das sete variáveis do hidrociclone estudadas no planejamento fatorial deste trabalho

Variáveis	Do (mm)	Du (mm)	Di (mm)	VF (mm)	L ₁ (mm)	Θ ₁ (grau)	Θ ₂ (grau)
Faixa	5 - 20	10 - 25	7,5 - 17,5	4 - 40	25 - 45	10 ⁰ - 30 ⁰	4 ⁰ - 30 ⁰

Do = diâmetro do tubo de *overflow*; Du = diâmetro do *underflow*; Di = diâmetro da entrada (alimentação); VF = comprimento do *vortex finder*; L₁ = comprimento da seção cilíndrica; Θ₁ = ângulo da primeira seção cônica do hidrociclone; Θ₂ = ângulo da segunda seção cônica do hidrociclone.

Todas as simulações foram realizadas no Fluent (ANSYS 12.1), em regime permanente. Devido ao escoamento espiralado (forte campo centrífugo) no interior do hidrociclone, o modelo de turbulência utilizado foi o *Reynolds Stress Model*, proposto por Gibson & Launder (1978). Um teste de malha indicou que aproximadamente 400 mil elementos foram suficientes para estabilizar os perfis de velocidade simulados. Quanto ao número de iterações, foram necessárias 30.000 iterações para estabilizar a eficiência granulométrica e a razão de fluido, além de garantir o fechamento do balanço de massa. A condição de contorno selecionada para a entrada foi a velocidade de entrada do fluido, *velocity inlet*, de 4 m s^{-1} para cada uma das duas entradas. Nas duas saídas, *overflow* e *underflow*, foi utilizada uma pressão de saída de 1 atm. As propriedades físicas da água e do óleo utilizadas nas simulações foram: densidades (ρ) iguais a $996,5 \text{ kg/m}^3$ e 840 kg/m^3 e viscosidades dinâmicas (μ) iguais a $8,55 \cdot 10^{-4} \text{ kg/(m s)}$ e $1,32 \cdot 10^{-2} \text{ kg/(m s)}$.

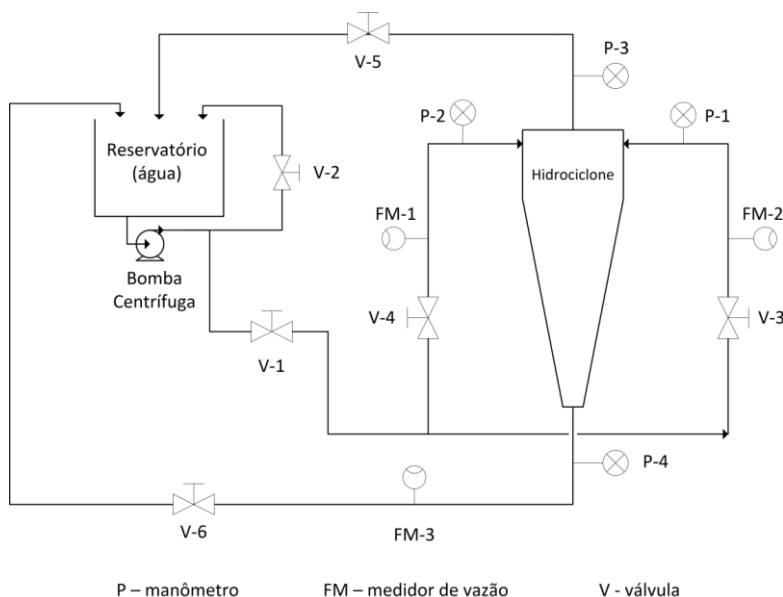
A Figura 2 mostra um esquema em circuito fechado operando apenas com água para as medidas de velocidade usando a técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV). As pressões nas entradas, no *overflow* e no *underflow* foram medidas por manômetros de Bourdon. Válvulas foram utilizadas para controlar as vazões com o objetivo de regular a razão de fluido total. Uma bomba centrífuga CAM-W10 de (2 cv) da marca DANCOR foi utilizada para alimentar o hidrociclone. Para a circulação apenas de água, como no caso do PIV, três medidores de vazão digitais PRO 1000 (Incontrol) foram utilizados nas duas entradas e no *underflow*. A vazão de líquido no *overflow* foi obtida por diferença e o sistema operava de maneira fechada, isto é, havia retorno de fluido para o tanque.

Resultados e Discussão

Planejamento de Experimentos

A Tabela 2 mostra os valores das variáveis geométricas para as dezessete simulações, onde também são mostrados os valores de eficiência granulométrica reduzida (G') e de razão de fluido (R_F).

Figura 2: Esquema do aparato experimental montado para as medidas dos perfis de velocidade.

Tabela 2 – Dimensões geométricas e valores de G' e R_F para o planejamento fatorial reduzido 2^{7-3} , com partículas de 250 μm de diâmetro.

Simulação	Do (mm)	Du (mm)	VF (mm)	L1 (mm)	Θ_1 (rad)	Θ_2 (rad)	Di (mm)	G' (%)	R_F (%)
1	5	10	4	25	0,0872	0,0349	7,5	33,95	0,40
2	20	10	4	25	0,2618	0,0349	17,5	99,97	62,20
3	5	25	4	25	0,2618	0,2618	7,5	0,00	0,00
4	20	25	4	25	0,0872	0,2618	17,5	49,50	1,80
5	5	10	40	25	0,2618	0,2618	17,5	9,42	8,50
6	20	10	40	25	0,0872	0,2618	7,5	57,92	94,40
7	5	25	40	25	0,0872	0,0349	17,5	0,00	0,00
8	20	25	40	25	0,2618	0,0349	7,5	94,87	1,00
9	5	10	4	45	0,0872	0,2618	17,5	41,36	0,00
10	20	10	4	45	0,2618	0,2618	7,5	(-)	100,00
11	5	25	4	45	0,2618	0,0349	17,5	0,00	0,00
12	20	25	4	45	0,0872	0,0349	7,5	99,70	3,40
13	5	10	40	45	0,2618	0,0349	7,5	16,50	4,60
14	20	10	40	45	0,0872	0,0349	17,5	99,92	58,20
15	5	25	40	45	0,0872	0,2618	7,5	1,67	0,40
16	20	25	40	45	0,2618	0,2618	17,5	32,33	10,32
17 (PC)	12,5	17,5	22	35	0,1745	0,1483	12,5	28,93	0,19

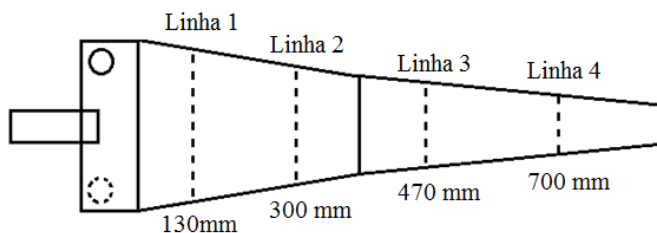
HC - hidrociclone

Foi possível observar na Tabela 2, que os hidrociclones HC 8 e HC 12 foram os hidrociclones que atingiram alto grau de eficiência e valores baixos para razão de fluido. Desses dois hidrociclones, o hidrociclone HC 12 foi alvo de investigação neste trabalho devido o fato de possuir o maior valor de eficiência granulométrica reduzida.

Perfis de Velocidade

Os perfis de velocidade tangencial foram medidos com PIV em diferentes comprimentos ao longo do corpo do hidrociclone 12. O campo de velocidade foi investigado nas linhas 2, 3 e 4 conforme mostra a Figura 3.

Figura 3: Posições onde foram realizadas medidas experimentais das velocidades tangenciais (linhas 2, 3 e 4).



Os perfis de velocidade tangenciais medidos experimentalmente apenas com água foram comparados com os perfis obtidos pelas simulações, também com água, nas linhas 2, 3 e 4, como mostra a Figura 4. A velocidade tangencial é importante por estar relacionada ao campo centrífugo no interior do equipamento. O formato dos perfis de velocidades encontrados neste trabalho estão de acordo com os perfis encontrados nos trabalhos de Slack *et al.* (2004), Dlamini *et al.* (2005), Marins *et al.* (2009), Noroozi & Hashemabadi (2011) e Zhen-bo *et al.* (2011).

Como pode ser observado na Figura 4, os valores da velocidade nos perfis tangenciais aumentam à medida que se afastam do eixo central do equipamento, até o momento que começam a diminuir sua intensidade quando se aproxima da parede do hidrociclone. O trabalho pioneiro de Kelsall (1952) na medição dos perfis de velocidade em hidrociclones mostrou que o pico de velocidade tangencial separa a região interna e externa do escoamento (*forced and free vortex*) de maneira abrupta, assim também como reportado aqui neste trabalho. A velocidade máxima medida nas três seções diminui seu valor à medida que se aproxima do orifício de underflow ou, em outras palavras, de acordo com a diminuição do diâmetro do hidrociclone que ocorre ao longo das duas seções cônicas. De acordo com o trabalho de Noroozi & Hashemabadi (2011) isto ocorre devido às alterações na taxa de dissipação da energia cinética que ocorre quando se aproximam da parede.

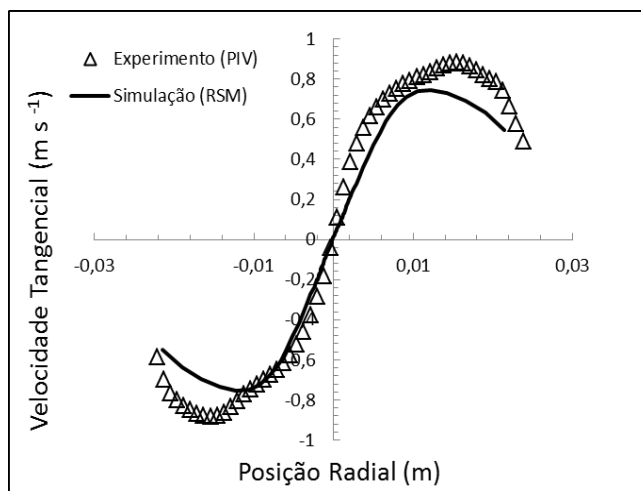
Foi possível observar que os perfis de velocidade tangenciais estimados por simulação apresentaram desvios quando comparados com os resultados experimentais. A magnitude da velocidade tangencial simulada foi menor do que as encontradas experimentalmente. Estes desvios aumentaram à medida que as seções investigadas se aproximaram do orifício de *underflow*, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Diferença entre os picos de velocidades tangenciais simulados e experimentais

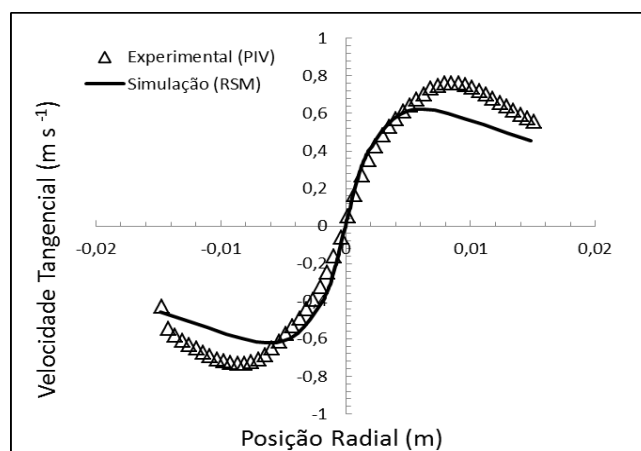
Seção	Vel. Exp. (m s^{-1})	Vel. Sim. (m s^{-1})	Desvio
2	0,8810	0,7338	16,70 %
3	0,7592	0,6154	18,94 %
4	0,6847	0,5177	24,39 %

Vel. Exp. = velocidade máxima experimental; Vel. Sim. = velocidade máxima simulada.

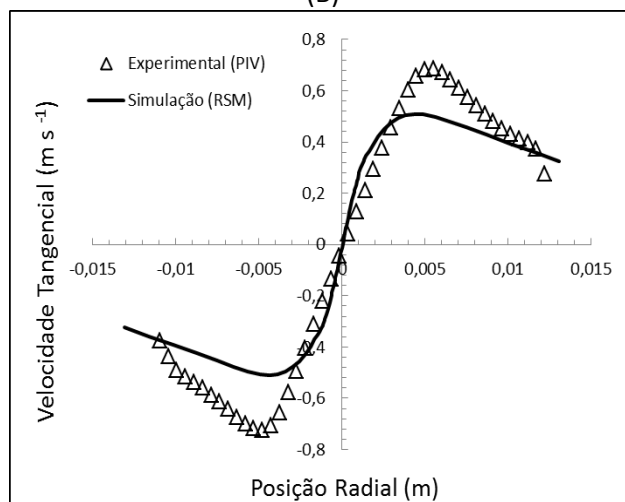
De acordo com o trabalho de Noroozi & Hashemabadi (2011), apenas malhas extremamente refinadas foram capazes de descrever de maneira razoável campos de velocidades com gradientes de velocidades bastante acentuados, como os que ocorrem em regiões próximas ao *underflow*. Isto acontece porque nessa região a intensidade da turbulência é grande como reportado no trabalho de Saidi *et al.* (2012). No trabalho de Marins *et al.* (2009), também foram investigados os perfis de velocidades tangenciais medidos pelas técnicas PIV e LDA (Laser Doppler Anemometry). As medidas foram feitas em seis seções e os desvios dos valores de velocidade máxima medidos em cinco dessas seções não ultrapassaram 5%. Já na última seção, localizada próxima ao orifício do *underflow*, o desvio entre as duas técnicas foi de 21,64%.



(A)



(B)



(C)

Figura 4: Perfis de velocidade tangencial experimental e simulado: (A) Seção 2 - 300 mm; (B) Seção 3 - 470 mm e (C) Seção 4 - 700 mm.

Conclusões

Um hidrociclone para a separação de misturas óleo-água contendo altos teores de óleo foi projetado por meio de simulações numéricas com fluidodinâmica computacional, construído e testado experimentalmente. Os perfis de velocidades tangenciais medidos foram comparados com os perfis

obtidos pelas simulações e apresentaram desvios médios em torno de 20%. O formato dos perfis de velocidades encontrados neste trabalho estão de acordo com os perfis encontrados nos trabalhos de Slack *et al.* (2004), Dlamini *et al.* (2005), Marins *et al.* (2009), Noroozi & Hashemabadi (2011) e Zhen-bo *et al.* (2011).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LabCFD), ao Núcleo Interdisciplinar da Dinâmica de Fluidos (NIDF), ambos situados no campus da UFRJ, e agradecem também ao Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF), no campus da UFRRJ, pela extensa colaboração neste trabalho.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, L.C.; OLIVEIRA JR., J.A.A.; MEDRONHO, R.A., Simulação numérica da separação água-óleo em hidrociclones para baixas frações de óleo. Anais do PDPETRO 2009 - 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, Fortaleza, 2009.

ALVES, J. V. B., MEDRONHO, R. A., Hidrociclone para a separação do óleo residual de água em refinarias. Anais do COBEQ 2012 - XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, ABEQ, Búzios, p.10958 – 10967, 2012.

ANJOS, R. P., OLIVEIRA, R. S., ALVES, J. V. B., MEDRONHO, R. A., Influência do número de entradas tangenciais e do ângulo da seção cônica de um hidrociclone no tratamento de águas oleosas. Anais do COBEQ 2012 - XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, ABEQ, Búzios, 2012.

ARAÚJO, C. A. O., OLIVEIRA, R. S., SCHEID, C. M., MEDRONHO, R. A., Hidrociclones para a separação de dispersões óleo-água com altos teores de óleo: um estudo com CFD. Anais do ENEMP 2013 - XXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maceió, 2013.

ARAÚJO, C. A. O., BARCELLOS, J. P. M., SCHEID, C. M., MEDRONHO, R. A., Efeito de variáveis geométricas no desempenho de hidrociclones para a separação de águas oleosas com alto teor de óleo. Anais do COBEQ 2012 - XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, ABEQ - Associação Brasileira de Engenharia Química, Búzios, p.5896 - 5904, 2012.

BRAGA, E. R., CAMPOS, J. B. L. M., SCHEID, C. M., MEDRONHO, R. A., Perfil de velocidades tangenciais em um hidrociclone para separação líquido/líquido. Anais do ENEMP 2013 - XXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maceió, 2013.

COELHO, D. B., ALVES, J. V. B., MEDRONHO, R. A., Desempenho de um Hidrociclone para a Separação de Águas Oleosas. Anais do PDPetro 2011 - 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, ABPG - Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás, Florianópolis, 2011.

COELHO, D. B., MEDRONHO, R. A., ALVES, J. V. B., A eficiência de separação de um hidrociclone para águas oleosas pelas abordagens lagrangeana e euleriana. Anais do COBEQ 2012 - XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, ABEQ, Búzios, p.7411 – 7420, 2012.

DLAMINI, M.F.; POWELL, M.S.; MEYER, C.J.; A CFD simulation of a single phase hydrocyclone flow field, *The Journal of the South Afrikan Institute of Mining and Metallurgy*, volume 105, 711-717, 2005.

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

GIBSON, M.M.; LAUNDER, B.E.; Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer, *J. Fluid Mech.*, 86: 491-511, 1978.

MARINS, L.P.M., DUARTE, D.G., LOUREIRO, J.B.R., MORAIS, C.A.C., SILVA FREIRE, A.P.; “LDA and PIV characterization of the flow in a hydrocyclone without an air-core, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 70, 168-176, 2010.

MENDONÇA, A. C. L. T., ARAÚJO, C. A. O., MEDRONHO, R. A., O hidrociclone na separação óleo/água: um estudo com o auxílio de fluidodinâmica computacional. Anais do PDPetro 2013 - 7º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, ABPG - Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás, Aracaju, 2013.

NOROOZI, S., HASHEMABADI, S.H.; CFD Analysis of Inlet Chamber Body Profile Effects on De-Oiling Hydrocyclone Efficiency, *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 968–977, 2011.

QUEIROZ, F. V., MEDRONHO, R. A., Simulação numérica de hidrociclones para a separação de misturas de alto teor de água em óleo como fase contínua. Anais do COBEQ 2012 - XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, ABEQ - Associação Brasileira de Engenharia Química, Búzios, p.5557 – 5566, 2012.

SLACK, M.D.; DEL PORTE, S.; ENGELMAN, M.S.; Designing automated computational fluid dynamics modeling tools for hydrocyclone design, *Minerals Engineering*, 17, 705-711, 2004.

YOUNG, G.A.B; WAKLEY, W.D.; TAGGART, D.L.; ANDREWS, S.L.; WORREL, J.R.; Oil water separation using hydrocyclones: an experimental search for optimum dimensions, *Journal Of Petroleum Science and Engineering*, 11, 37-50, 1994.

ZHEN-BO, WANG.; YI, MA.; YOU-HAI, JIN; Simulation and experiment of flow field in axial-flow Hydrocyclone, *Chemical Engineering Research and Design*, 89 (2011) 603–610.