

AVALIAÇÃO DE UM SEPARADOR CICLÔNICO NO PROCESSO DE SEPARAÇÃO GÁS/ÓLEO: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Anne Esther Ribeiro Targino Pereira de Oliveira¹; Elvis Henrique Araujo Barboza²; Josinadja de Fátima Ferreira da Paixão³ Severino Rodrigues de Farias Neto⁴.

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - anne.targino@eq.ufcg.edu.br

² Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - elvis.barboza@eq.ufcg.edu.br

³ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - josiferreirapaixao@gmail.com

⁴ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - severino.rodrigues@ufcg.edu.br

RESUMO

O avanço da escassez de recursos naturais vem preocupando órgãos ambientais, indústrias e a sociedade. Especificamente na indústria do petróleo que se preocupa com o descarte de águas produzidas. Assim, tem-se buscado novas tecnologias para o tratamento e descarte correto desses efluentes. Neste sentido, o presente trabalho tem o objetivo avaliar numericamente a separação óleo/gás via separador ciclônico. Este dispositivo é formado por um corpo cilíndrico munido de duas entradas tangenciais que induzem um movimento dos fluidos com alta intensidade turbilhonar e duas saídas no lado oposto das entradas, sendo uma tangencial e outra axial. O modelo matemático é baseado na abordagem Euleriana-Euleriana e as equações de conservação de massa e momento linear, bem como o modelo de turbulência RNG k-ε são resolvidas usando o pacote comercial Ansys CFX. Os resultados do campo de pressão e fração volumétrica, bem como as linhas de fluxo e perfis de velocidade possibilitaram constatar o caráter tridimensional do escoamento das fases presentes (óleo e gás). O processo de separação apresentou uma eficiência de separação 74 e 84% para as vazões de alimentação do dispositivo avaliadas.

Palavras-Chave: Escoamento bifásico, Separador ciclônico, Simulação numérica

1. INTRODUÇÃO

Na indústria do petróleo um dos principais efluentes são as águas produzidas oriundas de recuperação secundária de petróleo em reservatórios petrolíferos. O descarte correto dessas águas deve atender as exigências e especificações dos órgãos

fiscalizadores que restringe a quantidade de poluentes que pode ser lançado no meio ambiente.

O CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, é o órgão no Brasil responsável por fiscalizar e aplicar leis em



II CONEPETRO

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

relação ao descarte de água produzida, de acordo com o Artigo 5 da resolução do CONAMA nº 393, de Agosto de 2007, estabelece que o descarte de águas produzidas não pode exceder a concentração média aritmética simples mensal de óleos e graxas de até 29 mg/L e valor máximo diário de 42 mg/L.

Os principais equipamentos utilizados no tratamento de águas produzidas são os separadores bifásicos e hidrociclones por apresentarem várias vantagens, dentre as quais podem se destacar a elevada capacidade de processamento, o baixo custo de manutenção e ocupam pouco espaço físico. Os hidrociclones apresentam altos níveis de intensidade turbilhonar (parâmetro que mede a relação entre o momento angular e o momento axial), induzidos por uma ou mais entradas tangenciais [FARIAS NETO,1997].

Vários trabalhos têm sido reportados na literatura utilizando o hidrociclone como dispositivo de separação água/óleo, a exemplo de Farias et al. [2009] e Farias et al. [2010], e têm mostrado uma eficiência de separação

que varia entre 60 a 90% dependendo de parâmetros geométricos e físico-químicos.

Souza et al. [2010] avaliaram a influência da temperatura no processo de separação água/óleo utilizando um hidrociclone com linhas de fluxo de entrada de 10°C para 100°C. Observaram um aumento na intensidade turbilhonar relacionado ao aumento da temperatura, tendo por consequência o aumento no número de voltas das linhas de fluxo no interior do hidrociclone. Estes autores obtiveram um aumento de eficiência de 55% para 62% com o aumento da temperatura de 10°C para 100°C.

Barbosa [2011] estudou numericamente quatro situações de escoamento monofásico (água), bifásico (água,óleo), trifásico (água,óleo,areia) e tetrafásico (água,óleo,areia,gás) num hidrociclone no tratamento de efluentes da indústria do petróleo. O autor observou que o modelo RNG k-ε modificado foi capaz de prever o comportamento do escoamento no hidrociclone, tão bem quanto o modelo turbulência SSG, por exemplo.

2. METODOLOGIA

2.1 Descrição do problema

www.conepetro.com
.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br



O dispositivo de separação óleo/gás, denominado de separado ciclônico, apresenta características semelhantes ao do hidrociclone tradicional. O separador ciclônico é constituído basicamente de duas entradas tangenciais conectadas a um corpo cilíndrico, visando proporcionar uma intensidade turbilhonar aos fluidos no interior do corpo cilíndrico. No lado oposto, se tem duas saídas, uma tangencial e outra axial, responsáveis pela coleta das fases (óleo e gás) separadas.

2.2 Domínio computacional

A malha numérica do separador ciclônico foi desenvolvida a partir da geometria com auxílio de pontos, curvas e superfícies usando o Ansys CFX. A malha ilustrada na Figura 2 foi confeccionada adotando o conceito de multi-blocos para, assim, gerar a malha usando elementos hexahédricos.

2.3 Modelagem matemática

Adotou-se a abordagem Euleriana-Euleriana para descrever o escoamento multifásico (óleo-gás), assumido o modelo de fase dispersa. Neste caso adotou-se que o gás é a fase dispersa e o óleo a fase contínua. Neste modelo se aplica as equações diferenciais de conservação de massa e

momento linear assumido-se as seguintes considerações:

- Escoamento incompressível no regime turbulento e permanente;
- Propriedades físico-químicas constantes;
- Transferência massa e momentum interfacial e fonte de massa desconsiderada;
- As forças de não arraste não são consideradas;
- Diâmetro médio da bolha de gás constante e igual a 100 μm .

Com estas considerações as equações de conservação de massa e momento linear se reduzem a:

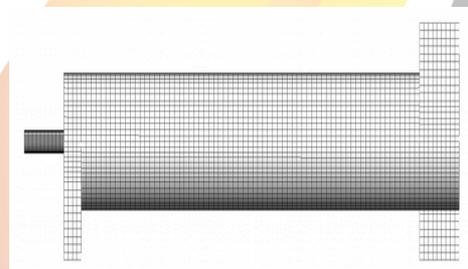


Figura 2: Representação da malha.

2.4 Equação de conservação de massa

$$\frac{d}{dt} \left(f_{\alpha} \rho_{\alpha} \right) + \nabla \cdot \left(f_{\alpha} \rho_{\alpha} \mathbf{U} \right) = 0 \quad [1]$$

onde f_{α} , ρ_{α} e \mathbf{U}_{α} são, respectivamente, a fração volumétrica, densidade e vetor velocidade da fase α .

2.5 Equação de momento linear

$$\begin{aligned} \nabla \cdot [(f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha))] &= -f_\alpha \nabla \rho_\alpha \\ + \nabla \cdot \{f_\alpha \mu_{\varepsilon f} [\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T]\} \\ + \vec{S}_{M\alpha} + \vec{M}_\alpha &= 0 \end{aligned} \quad [2]$$

onde, p_a é a pressão da fase a, $\vec{S}_{M\alpha}$ é o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume, M_α é a força total por unidade de volume, que no presente trabalho corresponde apenas as forças de arraste interfacial dada por:

$$M_\alpha = \frac{3 C_D}{4 d_p} f_\beta \rho_\alpha |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad [3]$$

onde d_p é o diâmetro da partícula e C_D é o coeficiente de arraste e igual a 0,44.

Na Equação [2] a viscosidade efetiva é definida por:

$$\mu_{ef} = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad [4]$$

onde, C_μ é uma constante de calibração experimental, ρ é a densidade, k é a energia cinética turbulenta, ε é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta. k e ε são obtidos

a partir do modelo de turbulência RNG $k-\varepsilon$ apresentado pelas equações que seguem.

2.6 Modelo de turbulência

O modelo padrão de Reynolds Stress é baseado na equação de dissipação turbilhonar e é definida pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \overline{u \otimes u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \overline{u \otimes u}) &= \\ \{P + \phi + \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{2}{3} c_S \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla \otimes u \otimes u \right] \\ - \frac{2}{3} \rho \varepsilon \delta \} & \quad [5] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla (\rho U \varepsilon) &= \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \\ + \nabla \cdot \left[\frac{1}{\sigma_{\varepsilon RS}} \left(\mu + \rho C_{\mu RS} \frac{k}{\varepsilon} \right) \nabla \cdot \varepsilon \right] & \quad [6] \end{aligned}$$

onde U é a velocidade dividida pela componente media, U_{med} , e a componente variando com o tempo, u , ($\vec{U} = U_{med} + u$), $\nabla \otimes u \otimes u$ é o tensor cisalhante, ε é a dissipação turbilhonar, k é matriz identidade e P é o termo exato de produção dado por:

$$P = -\rho \nabla \cdot (\vec{U} \otimes \vec{U}) + (\vec{U} \cdot \nabla) \cdot (\vec{U} \otimes \vec{U}) \quad [7]$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad [8]$$

$$\phi_1 = \rho \varepsilon \left[C_{S_1} a + C_{S_2} a - \frac{1}{3} a \delta \right] \quad [9]$$



$$\begin{aligned} \phi_2 = & -C_{r_1}Pa + C_{r_2}\rho kS - C_{r_3}\rho kS\sqrt{a \cdot a} \\ & + C_{r_4}\rho k \left(aS^T + Sa^T - \frac{2}{3}aS\delta \right) \\ & + C_{r_5}\rho k(aW^T + Wa^T) \end{aligned} \quad [10]$$

com,

$$a = \frac{\overline{u \cdot u}}{k} - \frac{2}{3}\delta \quad [11]$$

$$S = -\frac{1}{2} \nabla U + (\nabla U^T) \quad [12]$$

$$W = \frac{1}{2} \nabla u - (\nabla U^T) \quad [13]$$

onde a é o tensor anisotrópico, S é a taxa de cisalhamento e W é a vorticidade.

As constantes que aparecem nas Equações 5, 6, 9 e 10 são:

$$C_{r_5} = 0.2; C_{r_4} = 0.625; C_{r_3} = 0.65; C_{r_2} = 0.8;$$

$$C_{r_1} = 0.9; C_{s_2} = -1.05; C_{s_1} = 1.7; c_{\varepsilon_2} = 1.83;$$

$$c_{\varepsilon_1} = 1.45; c_s = 0.22 \sigma_{\varepsilon RS} = 1.36; C_{\mu RS} = 0.1$$

2.7 Condições de contorno:

Na seção de entrada: fração volumétrica de gás igual a , de acordo com o caso avaliado, 0,01 e 0,10, e um perfil de velocidade dado por:

$$u_e = \frac{1}{2} \frac{Q}{LW} \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \frac{x}{L} \quad [14]$$

onde, Q é a vazão volumétrica de entrada, assumida iguais a 25, 30 e 35 m³/h conforme o caso avaliado (ver Tabela 2); L e W correspondem respectivamente a altura e largura da seção de entrada; x a posição longitudinal da seção de entrada e n constante que depende do número de Reynolds da seção de entrada, assumida igual a 7 [Ver Fox e McDonald, 1998].

- Nas seções de saída axial e tangencial foram adotadas a condição de pressão estática prescrita e igual a 101325 Pa.
- Nas paredes internas do separador ciclônico foram adotadas a condição de não deslizamento, ou seja, componentes de velocidades nas direções x , y e z nulas.

As propriedades físico-químicas do gás e do óleo utilizadas estão apresentadas na Tabela 1 e na Tabela 2 são apresentados os casos avaliados no presente trabalho.

Para quantificar a eficiência de separação gás/óleo usando o separador ciclônico, foi utilizada a seguinte relação:

$$E_s (\%) = 100 \frac{\left(\dot{m}_g \right)_{saída\ axial}}{\left(\dot{m}_g \right)_{entrada}} \quad [15]$$

onde, $\left(\dot{m}_g \right)_{entrada}$ e $\left(\dot{m}_g \right)_{saída\ axial}$ são, respectivamente a vazão mássica de óleo na

entrada, na saída tangencial e na saída axial do separador ciclônico.

Tabela 1: Parâmetros e propriedades físico-química dos fluídos.

Parâmetros		Fluidos	
		Óleo	Gás
Densidade	(kg/m ³)	868,7	1,185
Viscosidade	(Pa.s)	0,1	1,831 10 ⁻⁵

Tabela 2: Casos estudados.

Casos	Fração volumétrica de gás (%)	Vazão volumétrica da mistura (m ³ /h)
01	1	25
02	10	25
04	10	35

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 3 e 4 estão representados os campos de fração volumétrica do gás sobre os planos XY e XZ para duas velocidades (25 e 35 m³/h). Estas figuras indicam claramente a formação de um núcleo de gás que segue em direção a saída axial. Um ponto interessante a ser observado é que, mesmo utilizando duas entradas tangencias, os fluidos apresentam um comportamento assimétrico ao longo do separador ciclônico. Luna e Farias Neto

[2011] verificaram comportamento semelhante, mas com um nível de assimetria bem mais elevado.

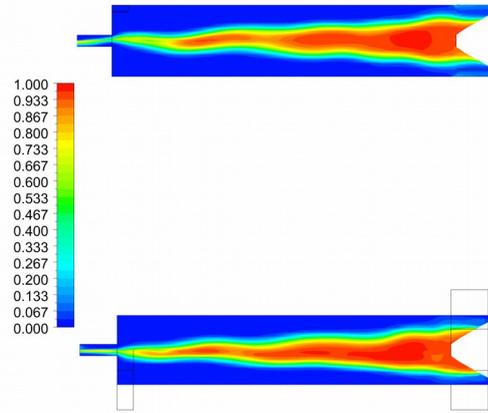


Figura 3: Representação dos campos de fração volumétrica do gás sobre os planos longitudinais XY (superior) e XZ (inferior) à 25 m³/h.

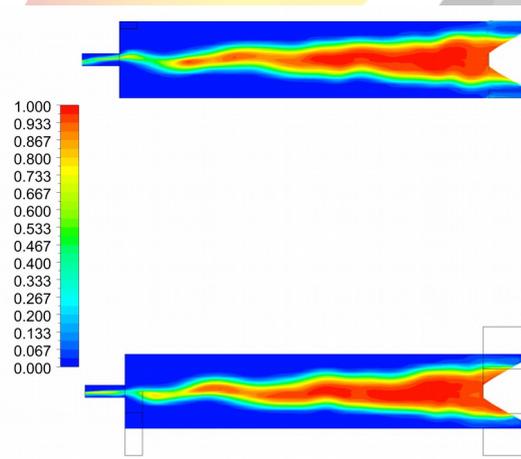


Figura 4: Representação dos campos de fração volumétrica do gás sobre os planos longitudinais XY (superior) e XZ (inferior) à



35 m³/h

Com o intuito de avaliar o comportamento das componentes de velocidade axial e tangencial no interior do separador ciclônico, estão representados nas Figuras 5 e 6 os perfis de velocidade axial e tangencial em quatro posições (0,045; 0,20; 0,45 e 0,70 m) medidos a partir das duas entradas tangenciais. Nota-se, em geral, que os maiores valores das componentes de velocidade, axial e tangencial, estão localizados nas proximidades da parede do separador ciclônico. Este fato pode ser explicado pela ação das forças de arraste e centrífuga impostas as correntes de óleo no interior do equipamento.

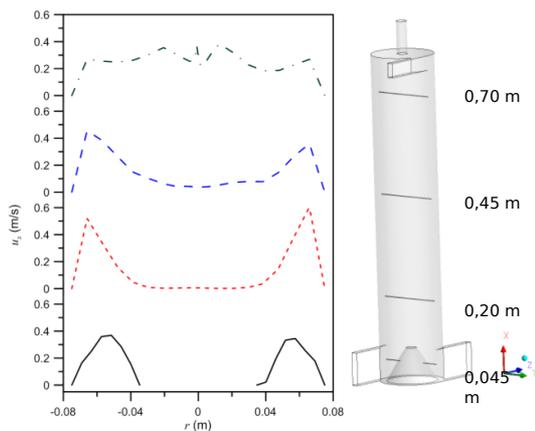


Figura 5: Perfis de velocidade superficial axial do óleo (25 m³/h).

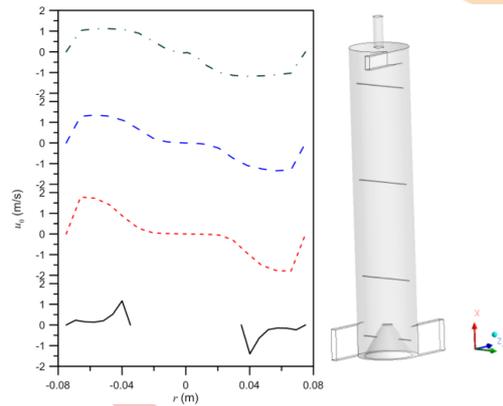


Figura 6: Perfis de velocidade superficial tangencial do óleo. (25 m³/h).

Observa-se igualmente na Figura 6 que as grandezas das componentes de velocidades tangenciais decrescem das paredes do separador ciclônico em direção a região central, onde a velocidade é nula.

Observa-se também que, à medida que o óleo se distancia das entradas tangenciais, há uma diminuição das componentes de velocidade tangenciais em virtude das perdas por atrito que conduzem a um decréscimo do momento angular e, conseqüente, aumento do momento axial, reduzindo assim a intensidade turbilhonar no interior do separador ciclônico. Comportamento semelhante foi observado por vários autores, a exemplo de Legentilhome e Legrand [1991], Lefebvre et al. [1998], Farias Neto et al. [1998, 2001], Simões [2005], Souza [2009], Luna e Farias Neto [2011], Silva e Farias Neto [2012].

Ao se comparar os perfis de velocidade axial e tangencial do óleo numa posição longitudinal igual a 0,20 m para as

vazões volumétricas de 25 e 35 m³/h de entrada no separador ciclônico, conforme apresentado nas Figuras 7 e 8, percebe-se que o comportamento dos perfis de velocidades são conservados nesta posição, modificando-se apenas as grandezas. Este fato induz, no entanto, um aumento da força centrífuga.

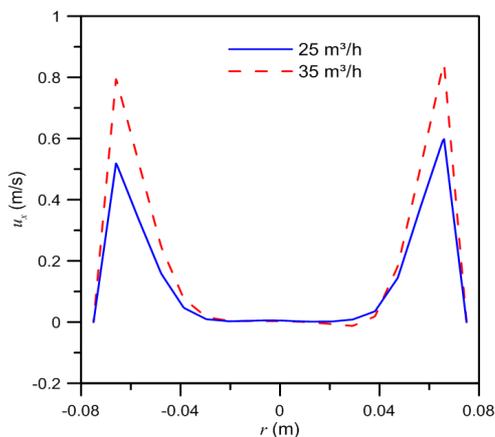


Figura 7: Perfis de velocidade superficial axial do óleo para diferentes vazões de entrada na posição longitudinal igual 0,20 m

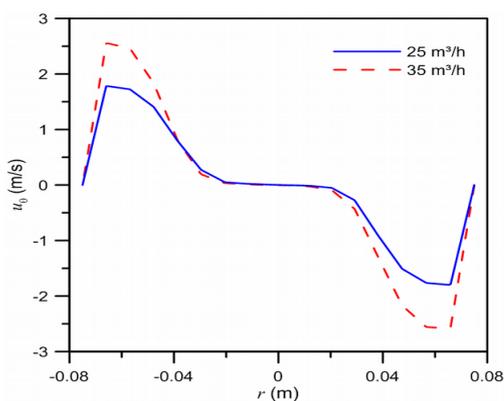


Figura 8: Perfis de velocidade superficial tangencial do óleo para diferentes vazões de entrada na posição longitudinal igual 0,20 m.

Visando averiguar o efeito do aumento da vazão de alimentação sobre a separação gás/óleo foi determinado a eficiência de separação para estas vazões usando a Equação [15] e apresentado na Tabela 3. Os resultados indicam que com o aumento da vazão houve uma redução na eficiência de separação gás/óleo. Uma provável explicação para esta queda pode estar relacionada com o aumento das forças de arraste sobre as partículas gasosas ou bolhas conduzindo-as em direção a saída tangencial como pode ser observado pela Figura 9 e 10, na quais estão representados, respectivamente, os campos de fração volumétrica do gás e velocidade superficial do gás sobre um plano YZ passando pela saída tangencial.

Tabela 3: Eficiência de separação gás/óleo no separador ciclônico

Casos	Q(m ³ /h)	E _s (%)
02	25	84,18
04	35	76,65

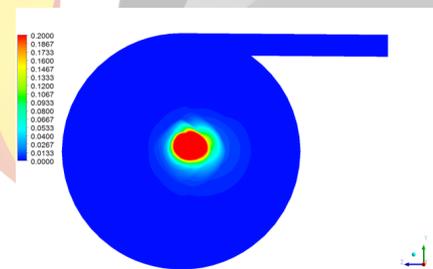


Figura 9: Representação dos campos de fração volumétrica do gás sobre o plano transversal YZ no centro da saída tangencial à 25 m³/h

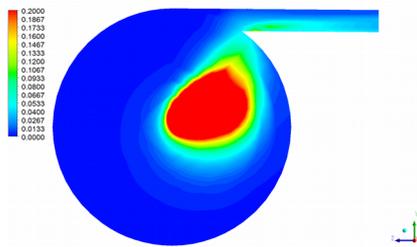


Figura 10: Representação dos campos de fração volumétrica do gás sobre o plano transversal YZ no centro da saída tangencial à 35 m³/h

4. CONCLUSÕES

Com os resultados das simulações numéricas para os casos estudados no processo de separação gás/óleo em um separador ciclônico pode-se concluir que o comportamento dos fluidos (gás e óleo) apresentaram um comportamento com características fortemente tridimensionais.

Observou-se a formação de um possível núcleo de gás escoando no centro do separador ciclônico em direção a saída tangencial;

Obteve-se uma razoável eficiência de separação na faixa de 76 a 84 %, todavia percebeu-se uma redução da eficiência com o

aumento da vazão de alimentação da mistura na entrada do separador ciclônico.

5. AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Campina Grande, à Unidade Acadêmica de Engenharia Química, ao CNPq pelo financiamento do projeto, ao Professor Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto pelo total apoio na realização deste projeto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, E.S., *Aspectos geométricos e hidrodinâmicos de um hidrociclone no processo de separação de sistemas multifásicos: aplicação a indústria de petróleo*. 2011, 191f., Seminário II (Doutorado em Engenharia de Processo) Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos. Campina Grande- PB.

FARIAS NETO, S. R.; LEGENTILHOMME, P.; LEGRAND, J., *Finite-element simulation of swirling decaying flow induced by means of a tangential inlet in an annulus*. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, v. 1, n. 165, p. 189-213, 1998.

FARIAS NETO, S.R., *Simulation numerique des écoulements annulaires non-établis des types axial et tourbillonnaire – cas du transfert de matière*. 1997, 266f. Tese de Doutorado (Université de Nantes) Nantes, France.

FARIAS NETO, S.R.; LEGENTILHOMME, P.; LEGRAND, J. *Finite element simulation of mass transfer in laminar swirl decaying flow induced by means of a tangential inlet in an annulus*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 1, p. 4713-4731, 2001.

FARIAS, F.P.M.; BURITI, C.J.O.; LIMA, W.C.P.B. DE; FARIAS NETO, S.R.; LIMA, A.G.B., *Simulação numérica do processo de separação areia/água/óleos pesados em hidrociclones*. In: Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, v. 1. p. 1-14, 2009.

FARIAS, F.P.M.; BURITI, C.J.O.; LIMA, W.C.P.B.; FARIAS NETO, S.R.; LIMA, A.G.B., *The effect of droplet diameter on the separation of heavy-oil from water using a hydrocyclone. defect and diffusion forum*, v. 303-304, p. 131-137, 2010.

LEGENTILHOMME, P.; LEGRAND, J., *The effects of inlet conditions on mass transfer*

in annular swirling decaying flow, International Journal Heat Mass Transfer, v.34, n. 4/5, p. 1281-1291, 1991.

LUNA, F.D.T.; FARIAS NETO, S.R., *Estudo numérico de um equipamento inovador no processo de separação água/óleo: célula turbilhonar*, VIII Congresso De Iniciação Científica Da Universidade Federal De Campina Grande, 2011.

SILVA, A.S.; FARIAS NETO, S.R., *Estudo dos efeitos das variáveis geométricas no desempenho da separador ciclônico no tratamento de efluentes industriais*, IX Congresso De Iniciação Científica Da Universidade Federal De Campina Grande, 2012.

SIMÕES, A.M.B.M. *Separação de água-óleo derramado no mar usando hidrociclone: Um estudo numérica da intensidade turbilhonar provocado pelo duto de alimentação*. 2005, 87p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química Grande. Campina Grande- PB.

SOUZA, J.S.; PAIVA, M.K.; FARIAS, F.P.M.; FARIAS NETO, S.R., LIMA, A.G.B., *Influência da temperatura no processo de separação água/óleo pesado via hidrociclone*

– *modelagem e simulação*. XVIII congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2010.

WANG B.; XU D.L.; CHU K.W; YU A.B.,
Numerical study of gas-solid flow in cyclone separator. Applied Mathematical Modelling, v. 30, p. [1326–1342](#), 2006.

