

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

Anne Esther Ribeiro Targino Pereira de Oliveira<sup>1</sup>; Elvis Henrique Araujo Barboza<sup>2</sup>; Josinadja de Fátima Ferreira da Paixão<sup>3</sup> Severino Rodrigues de Farias Neto<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - [anne.targino@eq.ufcg.edu.br](mailto:anne.targino@eq.ufcg.edu.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - [elvis.barboza@eq.ufcg.edu.br](mailto:elvis.barboza@eq.ufcg.edu.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - [josi FERREIRA PAIXAO@gmail.com](mailto:josi FERREIRA PAIXAO@gmail.com)

<sup>4</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - [severino.rodrigues@ufcg.edu.br](mailto: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  $\mu\text{m}$ .

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

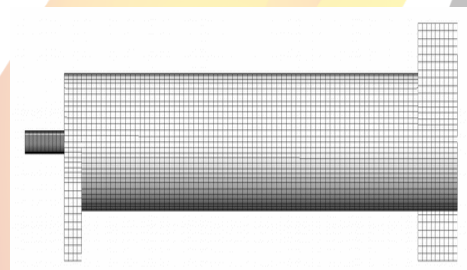


Figura 2: Representação da malha.

## 2.4 Equação de conservação de massa

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

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

## 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,  $M_\alpha$  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,  $C_\mu$  é uma constante de calibração experimental,  $\rho$  é a densidade,  $k$  é a energia cinética turbulenta,  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta.  $k$  e  $\varepsilon$  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,  $\varepsilon$  é a dissipação turbilhonar,  $k$  é matriz identidade e  $P$  é o termo exato de produção dado por:

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

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

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





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

com,

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

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

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

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 m<sup>3</sup>/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 <sup>3</sup> )	868,7	1,185
Viscosidade	(Pa.s)	0,1	1,831 10 <sup>-5</sup>

Tabela 2: Casos estudados.

Casos	Fração volumétrica de gás (%)	Vazão volumétrica da mistura (m <sup>3</sup> /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 m<sup>3</sup>/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.

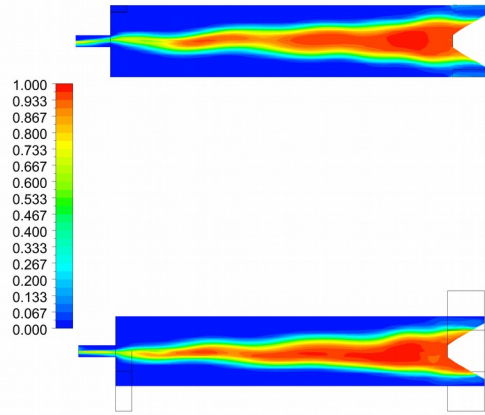


Figura 3: Representação dos campos de fração volumétrica do gás sobre os planos longitudinais XY (superior) e XZ (inferior) à 25 m<sup>3</sup>/h.

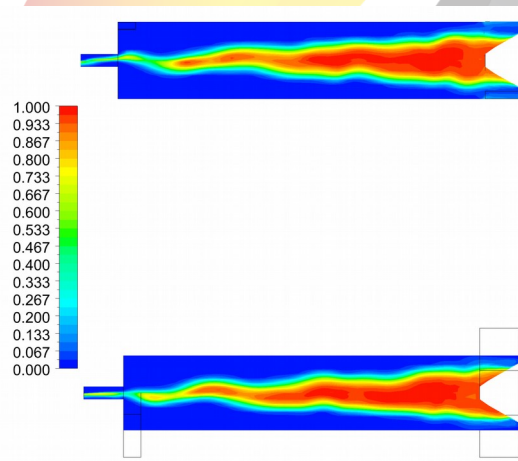


Figura 4: Representação dos campos de fração volumétrica do gás sobre os planos longitudinais XY (superior) e XZ (inferior) à



35 m<sup>3</sup>/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.

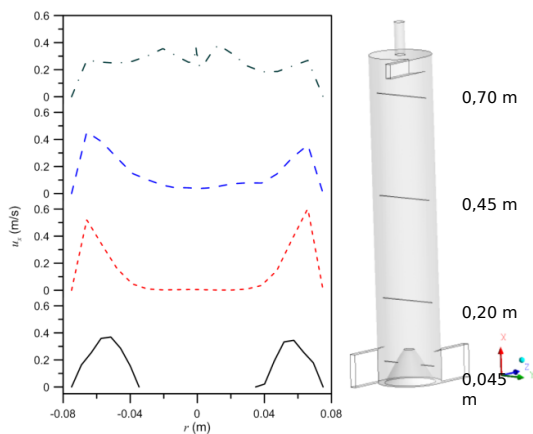


Figura 5: Perfis de velocidade superficial axial do óleo (25 m<sup>3</sup>/h).

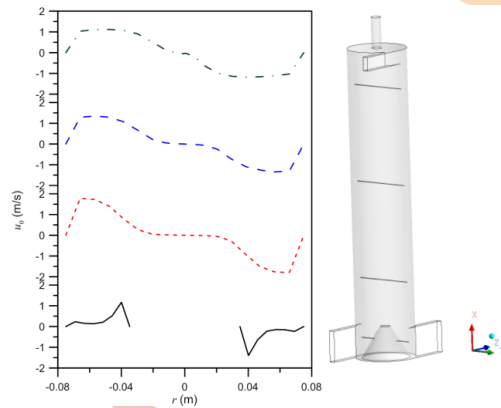


Figura 6: Perfis de velocidade superficial tangencial do óleo. (25 m<sup>3</sup>/h).

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 m<sup>3</sup>/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.

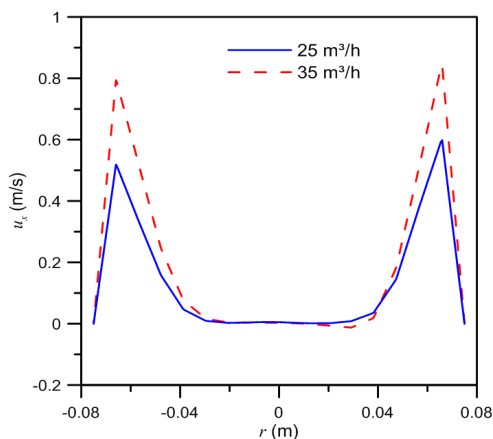


Figura 7: Perfis de velocidade superficial axial do óleo para diferentes vazões de entrada na posição longitudinal igual 0,20 m

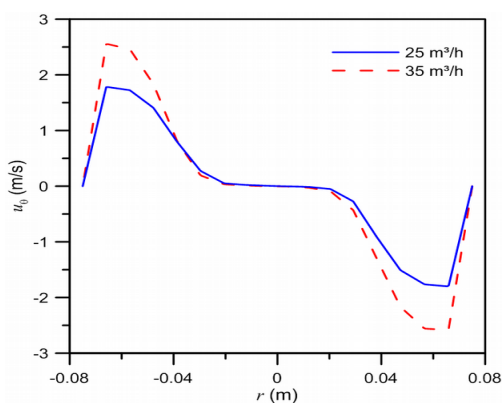


Figura 8: Perfis de velocidade superficial tangencial do óleo para diferentes vazões de entrada na posição longitudinal igual 0,20 m.

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 <sup>3</sup> /h)	$E_s$ (%)
02	25	84,18
04	35	76,65

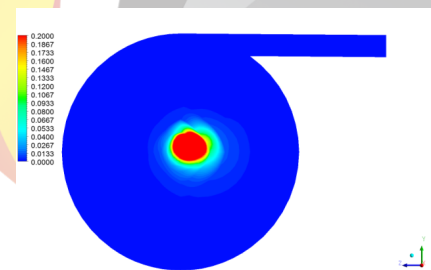




Figura 9: Representação dos campos de fração volumétrica do gás sobre o plano transversal YZ no centro da saída tangencial à 25 m<sup>3</sup>/h

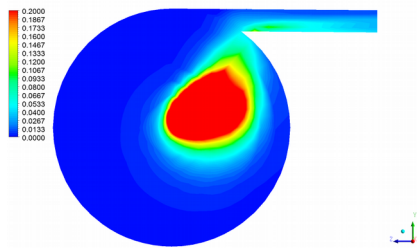


Figura 10: Representação dos campos de fração volumétrica do gás sobre o plano transversal YZ no centro da saída tangencial à 35 m<sup>3</sup>/h

#### 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.

