



ESTUDO DOS EFEITOS DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS NO DESEMPENHO DA CÉLULA TURBILHONAR NO TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

Akleino Silvestre da Silva¹; Severino Rodrigues de Farias Neto²

¹ (bolsista CNPq), Pós-Graduação em Engenharia Química, UFCG – akleinosilvestre@yahoo.com.br

² Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química -
farias@deq.ufcg.edu.br

RESUMO

O descarte de águas produzidas é um problema ambiental enfrentado pela indústria de petróleo, que utiliza separadores multifásicos e hidrociclones para seu tratamento. Neste sentido foi avaliada uma concepção diferente de um separador água/óleo, denominado de separador ciclônico. Foram confeccionadas duas geometrias: uma munida de uma entrada e outra com duas entradas tangenciais. As malhas foram geradas usando o ICFM-CFD. Utilizaram-se as equações de conservação de massa e momento linear para as fases água e óleo e o modelo de turbulência RNG k-ε. Foi avaliada a influência da concentração de óleo na seção de entrada por meio dos campos de pressão e fração volumétrica e linhas de fluxo no interior do separador ciclônico, bem como os perfis de velocidade, pressão total. Foi observado uma redução proporcional em 50% do separador ciclônico não afetou de forma significativa no processo de separação água/óleo e que o separador ciclônico com duas entradas apresentou uma melhora no processo de separação água/óleo.

Palavras-chave: Separador ciclônico, escoamento multifásico, simulação numérica, águas produzidas.

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos industriais antes de serem descartados no meio ambiente ou em esgotamentos públicos tem que ser tratados. Um dos resíduos é uma mistura que pode ter a presença de partículas sólidas e líquidos, que podem favorecer a formação de emulsões. A emulsão pode ser descrita como sendo uma mistura entre dois líquidos imiscíveis onde um deles (a fase dispersa) encontra-se na forma de gotículas com dimensões de 20 µm ou menos, localiza-se no seio de outro líquido (a fase contínua), formando uma mistura estável [SIMÕES, 2005].

No Brasil empresas tem como obrigação adaptarem-se as exigências legais explicitadas através da Resolução

CONAMA no 393/2007 artigo 5º, que trata sobre o descarte dessas águas.

Neste sentido temos visto diferentes unidades de separação, sendo utilizadas pelas indústrias de petróleo, alimentícias, entre outras. Já a petroquímica tem empregado, por exemplo, a decantação, coagulação/floculação, filtração, adsorção, centrifugação, entre outros. Dentre os vários equipamentos utilizados o hidrociclone apresenta muitas vantagens, por exemplo: alta capacidade de processamento, baixa manutenção, unidades menores e baixos tempos de residência, baixo custo de implantação e manutenção, entre outras. Este tipo de equipamento forma um fluxo helicoidal descendente nas proximidades das paredes do hidrociclone e outro fluxo ascendente próximo ao eixo central,



chamados de vórtices [BARBOSA, 2011, BURITI, 2009, SOUSA, 2009, FARIAS et al., 2010, 2008a, 2008b, 2009, MARCIEL, 2013].

Muitos pesquisadores tem demonstrado interesse no estudo de escoamento turbilhonar, dentre os quais podem ser destacados: Legentilhomme e Legrand [1991], Aouabed et al. [1994], Aouabed et al. [1995], Farias Neto [1997], Lefebvre et al. [1998]; Farias Neto et al. [1998] e Farias Neto et al. [2001]. Esses autores, de uma maneira geral, utilizaram um dispositivo formado por um corpo cilíndrico munido de uma entrada e uma saída tangenciais posicionada perpendicularmente e em lados opostos. Observaram tanto numericamente como experimentalmente que o movimento turbilhonar (movimento helicoidal) induzido pela entrada tangencial proporciona altas taxas de transferência de massa e calor.

Neste sentido, foi avaliado a influência das variáveis geométricas e parâmetros de processo sobre a eficiência de separação água/óleo, bem como sobre a dinâmica de escoamento dos fluidos no interior do separador ciclônico proposto por Luna [2011].

2. METODOLOGIA

2.1. Descrição do problema

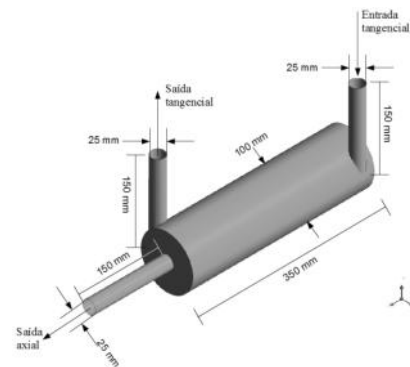
Foram utilizados dois modelos diferentes do separador ciclônico, o primeiro constituído de um corpo cilíndrico com uma entrada e duas saídas (uma tangencial e outra axial), conforme ilustrado na Figura 1.a, reduzindo-se proporcionalmente todas as dimensões em 50% do proposto originalmente por Luna [2011]. O segundo separador ciclônico utilizado diferencia apenas do primeiro por uma segunda entrada tangencial, conforme ilustrado na Figura 1.b.

A malha estruturada com 211.714 elementos hexahédricos, ilustrada na Figura 2, resultante de diferentes

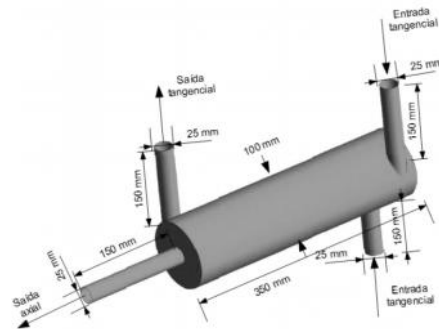
refinamentos, foi gerada no aplicativo computacional ICEM CFD da Ansys.

2.1. Modelagem matemática

O modelo matemático utilizado para prever o processo de escoamento e a separação das fases água e óleo no interior do separador ciclônico é constituída de equações de conservação de massa e momento linear, além do de turbulência RNG k- (Equações 1 a 4).



(a)



(b)

Figura 1 Representação do separador ciclônico usado na separação Água/Óleo, adaptado de Luna [2011], (a) Com uma entrada tangencial SC1, (b) Com duas entradas tangenciais SC2.

Foram realizadas algumas considerações, conforme descritas a seguir:

- Fluido newtoniano incompressível;
- Fluxo estacionário e isotérmico;
- Não há transferência de massa interfacial e nem fonte de massa;
- As paredes dos equipamentos são estáticas.



- As forças interfaciais de não arraste (forças de sustentação, lubrificação de parede, massa virtual, dispersão turbulenta e pressão de sólido) foram desprezadas. Apenas as forças de arraste foram adotadas nas simulações.

Com estas considerações as equações de conservação de massa e momento linear para o escoamento multifásico reduzem a:

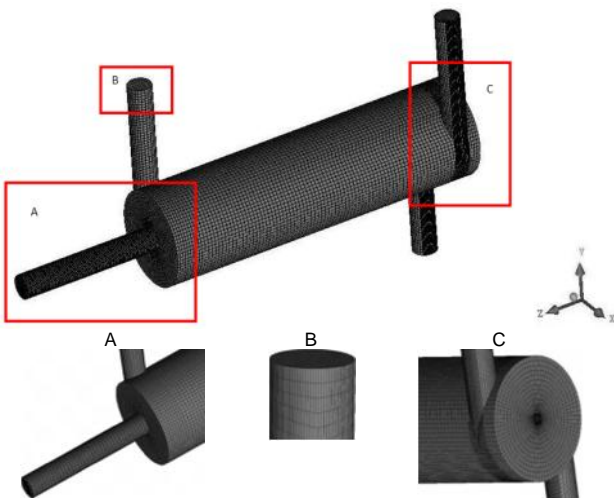


Figura 2: Representação malha estruturada do separador ciclônico SC2 e alguns detalhes.

Equação da conservação de massa

$$\nabla \cdot (r_{\alpha} \dots r_{\alpha} \vec{U}_{\alpha}) = 0 \quad [1]$$

onde, r_{α} , \dots , r_{α} e \vec{U}_{α} são, respectivamente a fração volumétrica, densidade e o vetor velocidade da fase α . O vetor velocidade é dado por $\vec{U}_{\alpha} = (u, v, w)$. (MANUAL CFX, 2011).

Equação da quantidade de movimento

$$\begin{aligned} \nabla \cdot [r_{\alpha} (\dots r_{\alpha} \vec{U}_{\alpha} \otimes \vec{U}_{\alpha})] &= -r_{\alpha} \nabla p_r + \\ + \nabla \cdot \left\{ r_{\alpha} \mu_{ef} \left[\nabla \vec{U}_{\alpha} + (\nabla \vec{U}_{\alpha})^T \right] \right\} &+ \\ + S_{M_r} + M_r & \end{aligned} \quad [2]$$

onde p é a pressão, μ_{ef} é a viscosidade efetiva (viscosidade dinâmica mais a

viscosidade turbulenta), o termo $S_{M_{\alpha}}$ representa o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume, tais como a força de empuxo e força rotacional. M_{α} representa as forças interfaciais agindo na fase devido à presença de outras fases definido por:

$$\vec{M}_r = \frac{3 C_D}{4 d_p} f_{s \dots r} |\vec{U}_s - \vec{U}_r| (\vec{U}_s - \vec{U}_r) \quad [3]$$

onde d_p é o diâmetro da partícula e C_D é o coeficiente de arraste, o qual foi assumido igual 0,44. E ρ corresponde à densidade da mistura.

Modelo RNG k- de turbulência

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left\{ r_r \left[\dots r_r \vec{U}_r k_r - \left(\sim + \frac{\tilde{\nu}_r}{\dagger_k} \right) \nabla k_r \right] \right\} &= \\ = r_r (G_r - \dots r_r V_r) & \end{aligned} \quad [3]$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left\{ r_r \dots r_r \vec{U}_r V_r - \left(\sim + \frac{\tilde{\nu}_r}{\dagger_k} \right) \nabla V_r \right\} &= \\ = r_r \frac{V_r}{k_r} (G_1 G_r - C_2 \dots r_r V_r) & \end{aligned} \quad [4]$$

onde k é a energia cinética turbulenta definida como a variação das flutuações de velocidade, ϵ é a dissipação turbilhonar e representa a taxa na qual as flutuações na velocidade se dissipam, μ_t é a viscosidade turbulenta.

2.2 Condições de contorno

As seguintes condições foram adotadas nas seções de entrada, saída e paredes (ver Tabela 1 e 2):



Tabela 1: Condições de Contorno para o separador ciclônico

Variáveis	Entrada	Saída	Parede
Fração volumétrica de óleo	f_o	-	-
Velocidade (m/s)	-	-	0
Vazão mássica W (kg/s)	W	-	-
Pressão (Pa)	-	101325	-

As propriedades físico-químicas da água e do óleo que foram utilizadas estão apresentadas na Tabela 2. Na Tabela 3 estão representados os casos estudados, onde foi variada a concentração de óleo na entrada do separador ciclônico.

Tabela 2: Parâmetros e propriedades físicas dos fluídos.

Parâmetros	Fluidos	
	Água	Óleo
Densidade (kg/m ³)	997,7	0,917
Viscosidade (Pa.s)	$8,889 \cdot 10^{-4}$	0,985
Peso Molecular (kg/kmol)	18,0	873
Diâmetro da gota (mm)	-	0,10
Tensão superficial (N/m)		0,01

Todos estes experimentos numéricos foram executados em um computador Quad-Core Intel Dual Xeon Processador E5430 de 2.66GHz com 8GB de memória RAM disponibilizados nos laboratórios LPFI (Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem) e

LCTF (Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos) das Unidades Acadêmicas de Engenharia Química e Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande. As simulações apresentaram um tempo de simulação de aproximadamente 1 a 5 dias/simulação.

Tabela 3: Casos estudados levando-se a variação da concentração de óleo na entrada do separador ciclônico.

Casos	Vazão mássica de alimentação, W (kg/s)	Fração volumétrica de óleo na alimentação f_o (%)
01	6,34	10
02	6,34	30
03	6,34	40
04	6,34	50

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3 e 4 representam a distribuição de pressão sobre as paredes do separador ciclônico para as quatro frações volumétricas de óleo (10, 30, 40 e 50 %) de alimentação avaliadas. Observa-se que a pressão é distribuída praticamente uniforme ao longo de todo o corpo cilíndrico e nas saídas das duas geometrias (SC1 e SC2). No entanto, destaca-se, nas proximidades da(s) entrada(s) tangencial(is) uma região de impacto da mistura que entra no separador ciclônico, regiões onde o campo de pressão são mais importantes. Este fato pode levar a um desgaste das paredes do hidrociclone, especialmente, se nesta mistura houvesse materiais abrasivos. O que pode ocasionar a deterioração da parede do dispositivo devido a ação da fricção com a superfície do separador ciclônico. Comportamento semelhante foi observado por Luna [2011] e por Farias [2006] usando um ciclone como secador de bagaço de cana, Buriti [2009], e Barbosa [2011] ao separar



água/óleo ou água/óleo/areia usando um hidrociclone.

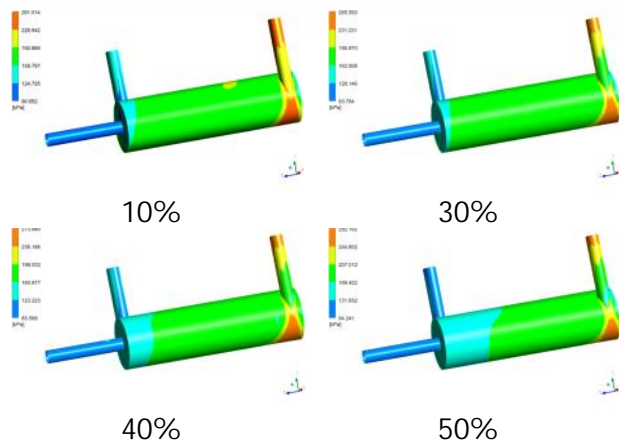


Figura 3: Representação do campo de pressão sobre as paredes do separador ciclônico SC1 para diferentes frações volumétricas de óleo na alimentação.

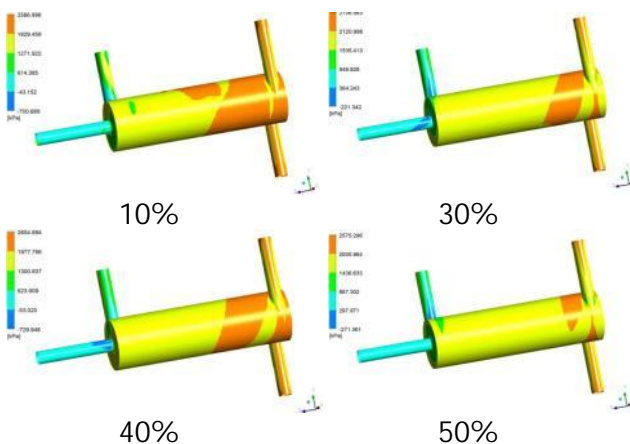


Figura 4: Representação do campo de pressão sobre as paredes do separador ciclônico SC2 para diferentes frações volumétricas de óleo na alimentação.

Nas Figuras 5 e 6 estão representados os comportamentos das linhas de fluxo da água e do óleo no interior do separador ciclônico para as quatro frações volumétricas de óleo da mistura que entra pelo(s) tubo(s) de entrada nas geometrias SC1 e SC2, respectivamente. Observa-se nos dois separadores ciclônicos, SC1 e SC2, a presença de duas correntes de fluidos em espiral bem distinta, sendo uma corrente de água caminhando mais próxima à parede cilíndrica enquanto que a de óleo

mais próxima do centro. Este tipo de comportamento está associado às forças que estas correntes estão submetidas, forças de arraste, peso e centrífuga, como também em consequência da diferença de densidade entre as fases água e óleo. Ao se comparar as linhas de fluxo para os separadores SC1 e SC2, Figuras 5 e 6 respectivamente, percebe-se claramente que o dispositivo com duas entradas tangenciais, SC2, proporciona maiores intensidades turbilhonares (quando o momento angular é maior do que o momento axial) e que se mantém praticamente até atingir as saídas axial e tangencial, quando comparado com o SC1.

Outro em destaque nas Figuras 5 e 6 é que, ao se aumentar a concentração ou fração volumétrica de óleo na seção de entrada, há um aumento das correntes de óleo que saem pelo tubo de saída tangencial, em especial para as concentrações de 40 e 50%, para os dois separadores SC1 e SC2. Este comportamento leva a acreditar que há uma queda na eficiência de separação água/óleo, fato igualmente observado por Luna [2011].

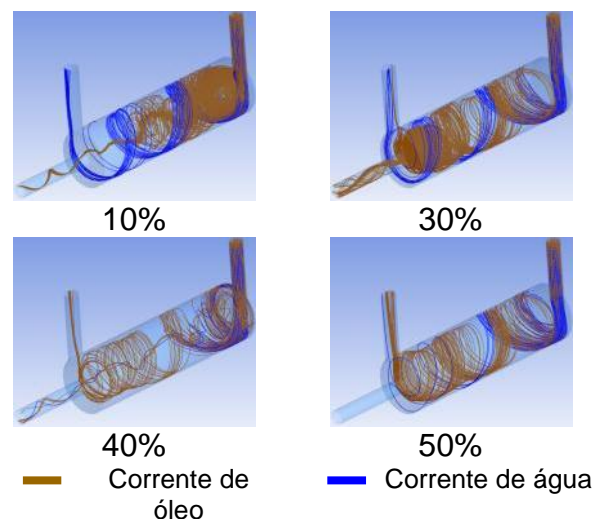


Figura 5: Representação das linhas de fluxo de água e óleo no interior do separador ciclônico SC1 para diferentes frações volumétricas de óleo na alimentação.

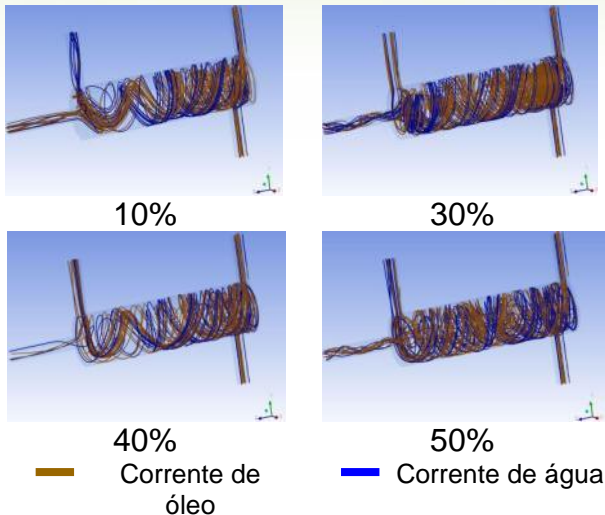


Figura 6: Representação das linhas de fluxo de água e óleo no interior do separador ciclônico SC2 para diferentes frações volumétricas de óleo na alimentação.

Com o intuito de verificar essa informação, foi representado sobre um plano longitudinal yz e sobre dois planos transversais xy em diferentes posições ao longo do separador ciclônico e sobre estes planos foram representados os campos de fração volumétrica de óleo para os dois separadores SC1 e SC2, como ilustrado nas Figuras 7 e 8, respectivamente. Observa-se nestas figuras que a água fica localizada nas proximidades da parede do corpo cilíndrico do separador ciclônico, enquanto que o óleo fica distribuído mais para o centro. Um ponto importante a ser destacado é o comportamento assimétrico dos fluidos ao longo do separador ciclônico, o que vem a ratificar a redução no processo de separação água/óleo com o aumento da concentração de óleo na(s) entrada(s) dos separadores ciclônicos SC1 e SC2.

Visando entender melhor como o comportamento no interior do separador ciclônico afeta (influencia) no processo de separação, foram definidas três posições diferentes (0,05 m, 0,17 m, 0,3 m) ao longo da seção cilíndrica para os dois dispositivos SC1 e SC2 (Figura 9). Sobre estas posições foram traçadas linhas

perpendiculares ao corpo cilíndrico do separador ciclônico, sobre as quais foram definidas as componentes de velocidade tangencial e axial do óleo. Em seguida, estes valores foram representados graficamente em função da posição longitudinal y, conforme estão representados nas Figuras 10 e 11.

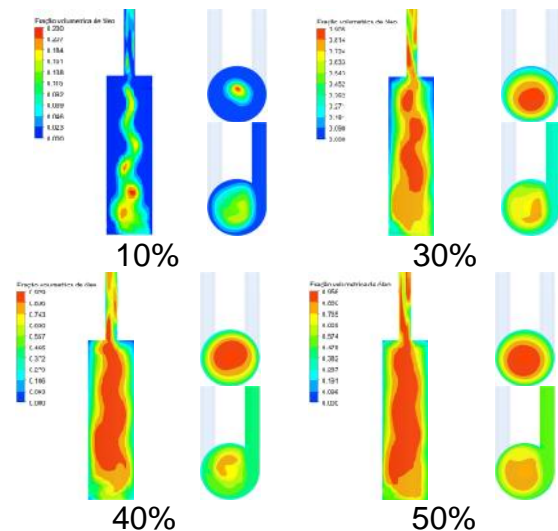


Figura 7: Representação do campo de fração volumétrica sobre os planos xy e xz para a fração volumétrica de óleo na alimentação no SC1.

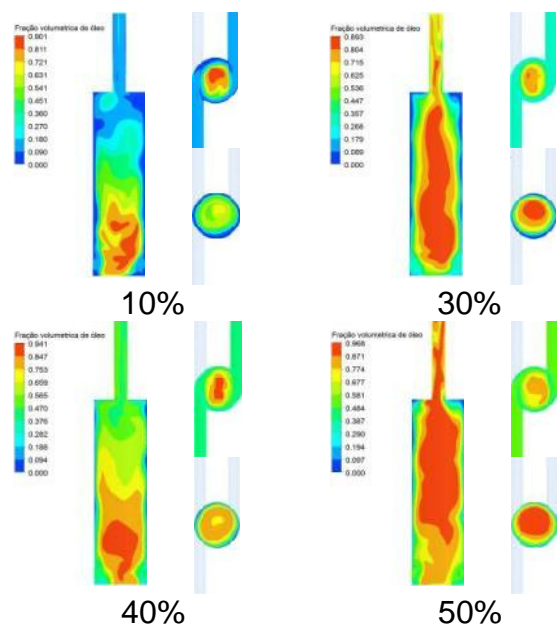


Figura 8: Representação do campo de fração volumétrica sobre os planos xy e xz para a fração volumétrica de óleo na alimentação no SC2.

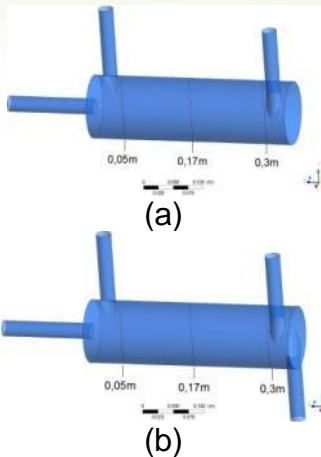


Figura 9: Representação dos três diferentes pontos nos separadores ciclônicos (a) SC1, (b) SC2.

A partir dos perfis de velocidade tangencial do óleo os perfis de velocidade nas três posições longitudinais (0,05 m, 0,17 m, 0,3 m) para uma fração volumétrica de óleo de 10 % na seção de entrada do(s) tubo(s) dos separadores SC1 e SC2 (Figura 10), pode ser notado que os maiores valores das componentes de velocidade estão nas proximidades da parede do separador ciclônico. No entanto, quando comparados os valores obtidos nos dois dispositivos (SC1 e SC2) verifica-se claramente a preeminência do separador SC2. Este fato é explicado pela maior força de arraste e centrífuga impostas as correntes de óleo no interior do equipamento. Verifica-se ainda, que as componentes de velocidade tangenciais decrescem ao se aproximar da região central. Percebe-se, ainda, uma redução destas componentes de velocidade a medida que os fluidos se afastam da região de entrada dos fluidos decorrente das perdas por atrito que levam a um decréscimo do momento angular e, conseqüentemente, um 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], ao avaliar o decréscimo da intensidade turbilhonar.

Na Figura 11 estão representados os perfis de velocidade axial do óleo em função da posição y para os separadores SC1 e SC2 em três posições longitudinais (0,05 m, 0,17 m, 0,3 m) para uma fração volumétrica de óleo de 10 % na seção do(s) tubo(s) de entrada. Observa-se na posição 0,3 m que existe dois comportamentos distintos: o primeiro indica que o óleo tende a caminhar nas proximidades da parede do equipamento em direção as saídas e, o segundo, percebe-se que há um movimento contrário do óleo, este caminha em direção a(s) entrada(s) do equipamento, ratificando o que se observa nas linhas de fluxo do óleo apresentadas nas Figuras 5 e 6. Este comportamento indica a formação de uma região de mistura e de alto nível de turbulência. Ao se afastar da região de alimentação do separador ciclônico, SC1 e SC2, percebe-se que há uma mudança de sentido das componentes de velocidade axial nas proximidades da região central e caminhando em direção as saídas do equipamento. Isto conduz a afirmar que há uma região de reversão destas componentes de velocidade, a uma determinada posição longitudinal semelhante àquela observada em ciclones ou hidrociclones, igualmente observadas por Farias [2006], Buriti [2009] e Barbosa [2011].

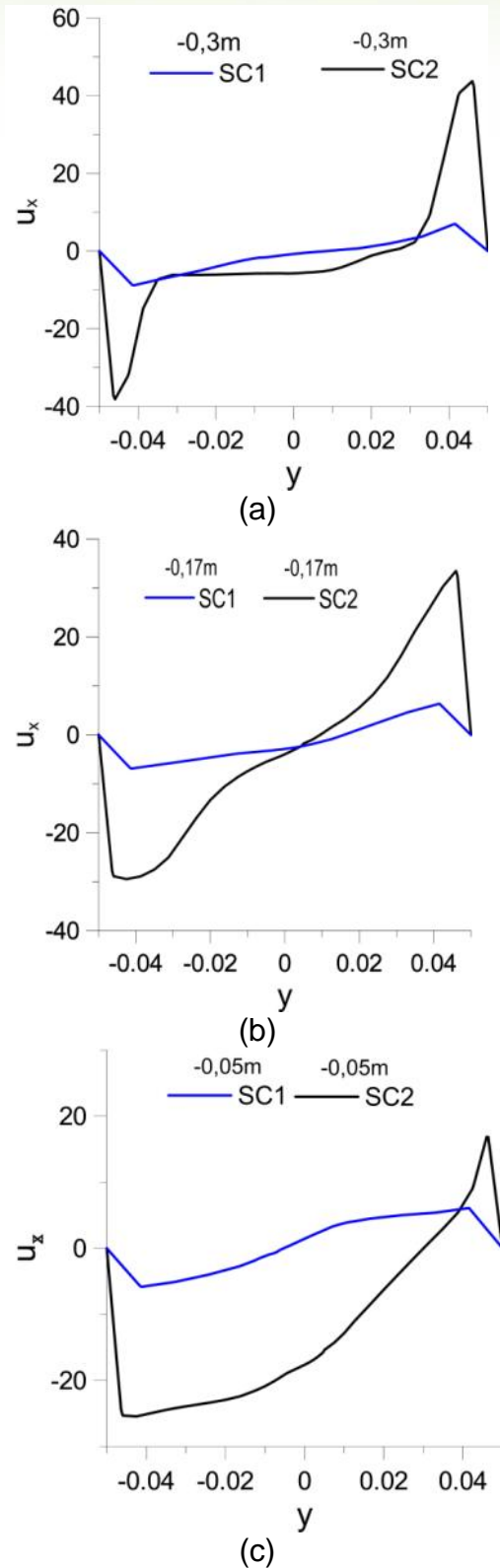


Figura 10: Perfil de velocidade tangencial nas posições (a) 0,3m (b) 0,17m (c) 0,05 m para uma fração volumétrica de óleo na entrada de 10%.

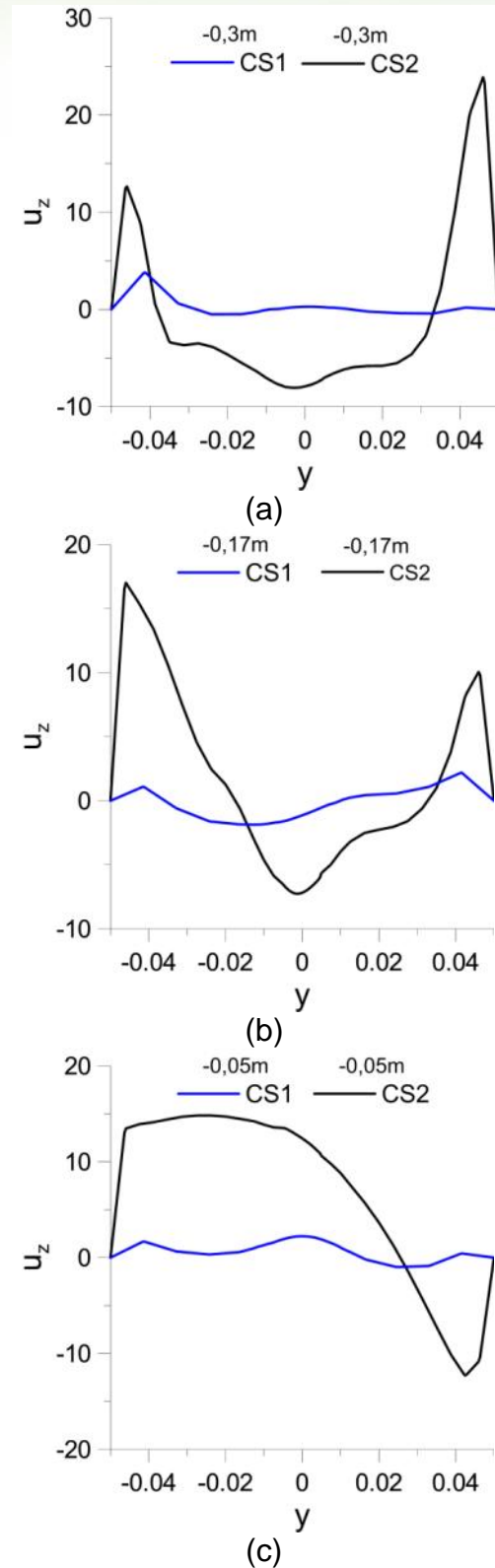


Figura 11: Perfil de velocidade axial nas posições (a) 0,3m (b) 0,17m (c) 0,05 m para uma fração volumétrica de óleo na entrada de 10%.



4. CONCLUSÕES

Com os resultados numéricos da simulação do processo de separação água/óleo usando o separador ciclônico pode-se concluir, dentro das condições avaliadas, que:

- O escoamento no interior do separador ciclônico apresentou um caráter tridimensional e fortemente assimétrico;
- O aumento na concentração de óleo na alimentação afeta significativamente o processo de separação água/óleo;
- A redução proporcional em 50% do separador ciclônico não afetou de forma significativa no processo de separação água/óleo;
- Ao se comparar o separador ciclônico com uma e duas entradas tangenciais verificou-se que a fluidodinâmica foi sensivelmente afetada. O que proporcionou um aumento significativo no momento angular e, conseqüentemente, um aumento na intensidade turbilhonar.
- O separador ciclônico com duas entradas apresentou uma melhora no processo de separação água/óleo, mas se faz necessário a realização de outras simulações variando-se outros parâmetros para se avaliar adequadamente a eficiência de separação do separador ciclônico com duas entradas se comparado com de uma única entrada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[CONAMA] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Classificação dos corpos de água e diretrizes para o seu enquadramento**. Brasília, DF 2005.

AOUABED, H.; LEGENTILHOMME, P.; Nouar, C., LEGRAND, J., **Experimental comparison of electrochemical and dot-point methods for the study of decaying swirling flow**. Journal Applied Electrochemical., v. 24, p. 619-625, 1994.

BARBOSA, E.S. **Aspectos geométricos e hidrodinâmicos de um hidrociclone no processo de separação de sistemas multifásicos: aplicação à indústria do petróleo**. 2011. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, programa de pós-graduação de Engenharia de Processos. Campina Grande – PB.

BURITI, C.J.O. **Aplicação de um hidrociclone no processo de separação de fluidos multifásicos óleo/água/areia durante o processo de produção de petróleo**. 2009, 88p. Monografia, Universidade Federal de Campina Grande, 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. **Estudo Teórico da Termofluidodinâmica em Secadores Ciclônicos**, 2006, 131f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, programa de pós-graduação de Engenharia de Processos. Campina Grande – PB.



FARIAS, F. P. M.; BURITI, C.; LIMA, W.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. **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.

FARIAS, F. P. M.; LIMA, A. G. B.; NETO, S. R. F. **Influência do duto de saída inferior do ciclone utilizado como secador: Modelagem e simulação.** In: XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ 2010). Recife, p. 1–8. 135, 2008a.

FARIAS, F. P. M.; NETO, S. R. de F.; LIMA, A. G. B. de; BURITI, C. J. O. **Performance of the water/glycerine separation by hydrocyclone.** In: The 8th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2008) & 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008). Venice: University of Padua and Politecnico di Milano, v. 1, p. 1 – 2, 2008b.

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: Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, v. 1, p. 1 – 14, 2009.

LEFEBVRE, G.; FARIAS NETO, S. R.; AOUABED, H.; LEGENTILHOMME, P.; LEGRAND, J., **Transfert de Matière Et Chute de Pression Lors D'Un Ecoulement Tourbillonnaire Annulaire Non-Entretenu Induit Par Une Entree Tangentielle,** The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 76, p. 1039-1050, 1998.

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

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

LUNA, F. D. T. **Estudo numérico de um equipamento inovador no processo de separação água/óleo: célula turbilhonar.** 2011, 17f. Relatório interno Iniciação Científica, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB.

MARCIAL, S. M. S.. **Efeito da influência de parâmetros operacionais no processo de separação água/óleo via hidrociclone.** 2013, 60p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Programa de pós-graduação de Engenharia Química. Campina Grande-PB.

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 de Engenharia Química. Campina Grande-PB.