



## ASPECTOS HIDRODINÂMICOS DE UM HIDROCICLONE NO TRATAMENTO DE ÁGUAS PRODUZIDAS: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Hortência Luma Fernandes Magalhães<sup>1</sup>; Tairine Ellen da Silva Freitas<sup>2</sup>; Severino Rodrigues de Farias Neto<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - [hortencia.luma@gmail.com](mailto:hortencia.luma@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - [tairine.ellen@gmail.com](mailto:tairine.ellen@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - [severino.rodrigues@ufcg.edu.br](mailto:severino.rodrigues@ufcg.edu.br)

### RESUMO

O descarte de efluentes indústrias no meio ambiente é uma problemática que vêm despertando a atenção de engenheiros e pesquisadores, em especial, para as águas produzidas na indústria de petróleo. A presença de óleo nestas águas é uma situação bastante comum e seu descarte deve atender as especificações regulamentadas pelo órgão de controle do meio ambiente, que limita em 29 mg/L. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo estudar numericamente um hidrociclone no processo de separação água/óleo. Para isso foi utilizado o pacote comercial Ansys CFX, onde foi definido o modelo matemático para prever o escoamento bifásico, sendo adotado o modelo de partículas (Euleriana-Euleriana) e o modelo de turbulência RNG  $k-\epsilon$ . Foi avaliada a condição de não deslizamento para a fase contínua (água) nas paredes do hidrociclone. São apresentados e analisados os resultados dos perfis de velocidade axial e tangencial em diferentes posições do hidrociclone, além do campo de pressão e linhas de fluxo. Tornando possível a percepção do caráter tridimensional e a complexidade do mesmo.

**Palavras-chave:** Escoamento bifásico, hidrociclone, simulação, eficiência de separação, CFX.

### 1. INTRODUÇÃO

Um das grandes problemáticas na produção de petróleo consiste no descarte adequado das águas oriundas do processo de extração, necessitando, portanto, o desenvolvimento de equipamentos de separação água/óleo que atendam as especificações regulamentadas pelo órgão de controle ambiental. No Brasil, o descarte contínuo de água oleosa não pode ultrapassar o valor máximo mensal de 29 mg/L [CONAMA, 2007].

A indústria petrolífera vem aplicando diversos processos de separação, dentre eles tem se destacado os que utilizam o

movimento turbilhonar gerado por uma ou mais entradas tangenciais capazes de produzir uma aceleração maior que a gravitacional pelo campo centrífugo, a exemplo do hidrociclone. Os hidrociclones se destacam pela sua alta capacidade de processamento, exigência de pouco espaço para instalação, curto tempo de residência, baixo custo de manutenção e por apresentar um comportamento fluidodinâmico complexo.

Segundo Alves [2012] o desempenho de um hidrociclone é, principalmente, influenciado pela geometria do equipamento, diferença de densidades das fases, condições de operação como vazão da entrada,



concentração e distribuição de diâmetros da fase dispersa e das pressões nas saídas.

Xiaodong et al. [2003], mencionam acerca da influência da intensidade turbilhonar na eficiência de um separador ciclônico bifásico, sendo constatado que o aumento na turbulência diminui a eficiência de separação das fases, resultado semelhante foi obtido por Honorato [2013] ao estudar a influência do fluxo turbulento em um separador ciclônico, o autor estudou numericamente o processo de separação água/óleo, adotando o modelo de partícula dispersa, onde o óleo é considerado como a fase dispersa e a água a fase contínua, usando o modelo de turbulência o RNG | -v .

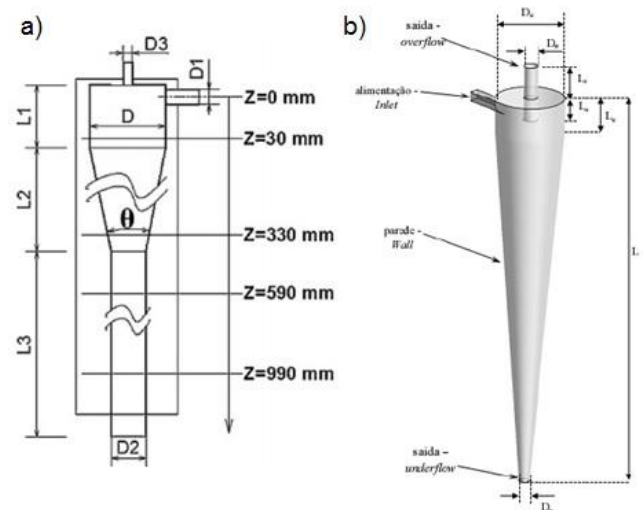
Kuang et al. [2012], estudaram o fluxo líquido/gás/sólido na classificação de um hidrociclone, empregando o modelo de tensões de Reynolds (RSM) para descrever o fluxo de turbulência e o modelo multifásico, demonstrando que quando a concentração de sólidos na alimentação aumenta, a eficiência de separação diminui, ocorrendo inicialmente a diminuição da pressão na entrada, que posteriormente aumenta após atingir um mínimo, como também que a variação na concentração de sólidos na alimentação induz a uma variação no campo de fluxo e desempenho de separação, mas não afeta significativamente o comportamento do hidrociclone.

Barbosa [2011] avaliou diferentes modelos de turbulência (k-e padrão e modificado, RNG | -v padrão e modificado, SST e RMS-SSG) no processo de separação água/óleo/areia/gás empregando um hidrociclone, utilizando para o estudo o pacote comercial CFX 12, o autor concluiu que o modelo RNG | -v modificado é capaz de prever o comportamento do escoamento tão bem quando o RSM, que na literatura é considerado o modelo de turbulência mais adequado para ciclones

e hidrociclone, com o menor esforço computacional.

Zhou et al. [2010] investigaram a distribuição de campos de velocidades em gotículas de óleo de 50 mm para o processo de separação óleo/água em um hidrociclone. Observando assimetrias axiais de distribuição do campo de fluxo no hidrociclone devido talvez ao uso de uma única entrada tangencial. Eles constataram que o tamanho médio das gotas de óleo diminuiu: 46-126  $\mu\text{m}$  em  $Z=0$  mm (topo) para 19-21  $\mu\text{m}$  em  $Z=990$  mm (parte inferior) a uma taxa de entrada de fluxo de 2000 L/h, com razão 20% de fluxo de rejeito. Essa diminuição no tamanho médio das gotas de óleo com o aumento da taxa de fluxo demonstra os impactos da taxa de fluxo de entrada na remoção de pequenas gotículas de óleo nesse processo de separação via hidrociclone.

O presente trabalho tem como proposta estudar numericamente a separação água/óleo utilizando um hidrociclone.



Fonte: Zhou et al., (2010)

Fonte: Farias et al., (2008)

Figura 1: a) Esboço estrutural com as alturas das seções; b) Representação geométrica de um hidrociclone.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Descrição do Problema

O hidrociclone é constituído por uma seção cônica unida a uma seção cilíndrica provida de uma entrada tangencial e duas saídas, conforme ilustrado na Figura 2.

### 2.2. Geração do domínio computacional

O domínio computacional do hidrociclone foi confeccionado usando o ICEM CFD que delimita o domínio físico por meio da criação e junção de pontos, curvas, superfícies, blocagem e manipulação de vértices, gerando subdomínio denominados volumes de controle. Para concepção da malha foram empregadas as seguintes etapas:

- Desenvolver uma estratégia de blocagem, adotando pontos e curva de apoio;
- Modelar interativamente o equipamento em questão utilizando da estratégia de blocagem pré-determinada, por meio de movimentação de vértices, secções, junções e definições das faces.
- Gerar uma malha representativa dentro das dimensões especificadas;
- Verificar a qualidade da malha para a obtenção de resultados coerente;
- Repetir o(s) procedimento(s) caso seja(m) necessário(s).

A malha estrutura resultante do processo de blocagem esta representada na Figura 3. A mesma foi confeccionada e refinada, sendo constituída por 281192 elementos.

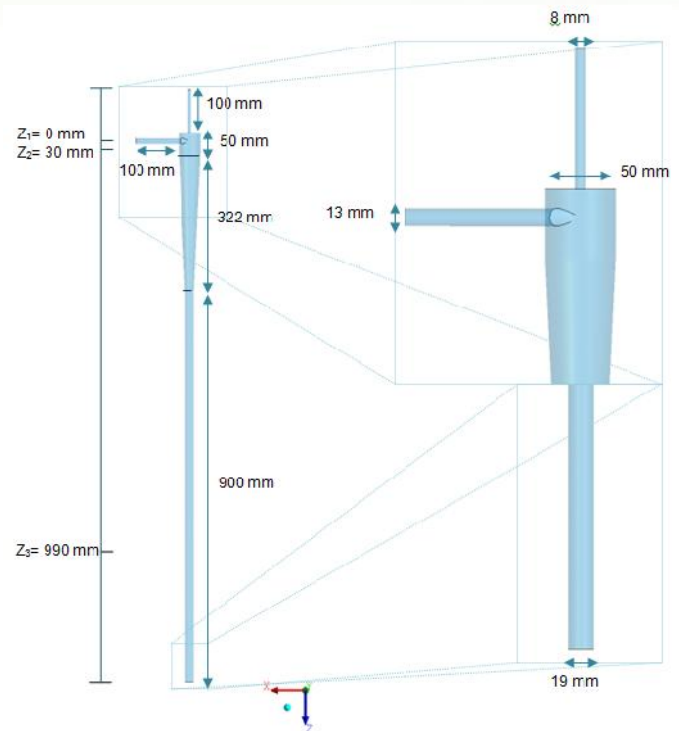


Figura 2: Representação geométrica do hidrociclone e suas dimensões.

### 2.3. Modelagem matemática

O modelo matemático utilizado para descrever o processo de separação água/óleo é baseado nas equações de conservação de massa e momento linear com as seguintes considerações:

- Escoamento bifásico (água-óleo) em regime permanente;
- Fluidos incompressíveis com propriedades constantes;
- Não são consideradas as forças de não arraste nem fonte de massa;
- Não transferência de quantidade de movimento em decorrência da transferência de massa interfacial;
- Adotou-se o coeficiente de arraste igual a 0,44;
- Adotou-se o modelo de partícula dispersa e assumiu-se um diâmetro médio da partícula de 0,5  $\mu$ m.



Com base nestas considerações as equações de conservação de massa e momento linear reduzem a:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_r \dots_r) + \nabla \cdot (f_r \dots_r \mathbf{U}) = 0 \quad [1]$$

onde,  $r_r$ ,  $f_r$ ,  $U_r$  são, respectivamente, a massa específica, fração volumétrica e vetor velocidade da fase  $r$ .

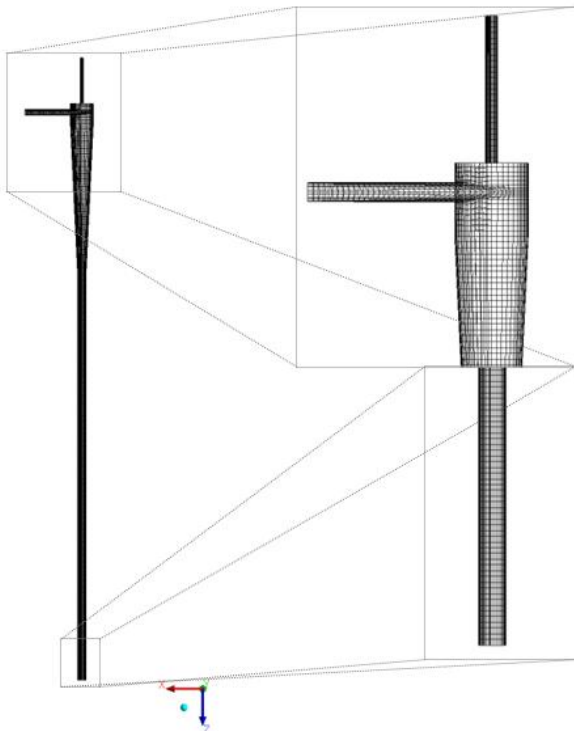


Figura 3: Representação da malha e detalhe da região superior e inferior do hidrociclone.

A equação de momento linear é estabelecida como sendo:

$$\nabla \cdot \left[ f_r \left( \dots_r \overline{U_r \otimes U_r} \right) \right] = -f_r \nabla p_r + \nabla \cdot \left\{ f_r \dots_r \left[ \nabla \overline{U_r} + \left( \nabla \overline{U_r} \right)^T \right] \right\} + S_{Mr} + M_r \quad [2]$$

onde  $p$  é a pressão,  $S_{M\alpha}$  representa o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume,  $M_r$  descreve as forças interfaciais por unidade de volume, que com a remissa

adotada apenas as forças de arraste são consideradas e é definida como sendo:

$$\mathbf{M}_r = \frac{3}{4} C_{D \dots_r} \frac{f_r}{d_r} \left| \mathbf{U}_s - \mathbf{U}_r \right| \left( \mathbf{U}_s - \mathbf{U}_r \right) \quad [3]$$

onde  $d_s$  é o diâmetro da fase dispersa (partícula) e  $C_D$  é o coeficiente de arraste.

## 2.4. Modelo de turbulência

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

$$\frac{\partial \dots \overline{u \otimes u}}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \dots \mathbf{U} \otimes \overline{u \otimes u} \right) = P + W + \nabla \cdot \left[ \left( \dots + \frac{2}{3} c_s \dots \frac{k^2}{v} \right) \nabla \otimes u \otimes u \right] - \frac{2}{3} \dots v u \quad [4]$$

$$\frac{\partial (\dots v)}{\partial t} + \nabla (\dots U v) = \frac{v}{k} (C_{v_1} P - C_{v_2} \dots v) + \nabla \cdot \left[ \frac{1}{\dagger_{vRS}} \left( \dots + \dots C_{-RS} \frac{k}{v} \right) \nabla \cdot v \right] \quad [5]$$

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

$$P = - \dots \left[ \left( \overline{u \otimes u} (\nabla \mathbf{U})^T + (\nabla \mathbf{U}) u \otimes u \right) \right] \quad [6]$$

$$W = W_1 + W_2 \quad [7]$$



$$W_1 = \dots V \left[ C_{s_1} a + C_{s_2} \left( aa - \frac{1}{3} a \cdot au \right) \right] \quad [8]$$

$$W_2 = -C_{r_1} Pa + C_{r_2} \dots kS - C_{r_3} \dots kS \sqrt{a \cdot a} \\ + C_{r_4} \dots k \left( aS^T + Sa^T - \frac{2}{3} a \cdot Su \right) \\ + C_{r_5} \dots k (aW^T + Wa^T) \quad [9]$$

com,

$$a = \frac{u \otimes u}{k} - \frac{2}{3} u \quad [10]$$

$$S = -\frac{1}{2} [\nabla U + (\nabla U^T)] \quad [11]$$

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

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

As constantes que aparecem nas Equações 4, 5, 8 e 9 são:  $C_{r_5} = 0.2$ ;  $C_{r_4} = 0.625$ ;  $C_{r_3} = 0.65$ ;  $C_{r_2} = 0.8$ ;  $C_{r_1} = 0.9$ ;  $C_{s_2} = -1.05$ ;  $C_{s_1} = 1.7$ ;  $c_{v_2} = 1.83$ ;  $c_{v_1} = 1.45$ ;  $c_s = 0.22$ ;  $\dagger_{vRS} = 1.36$ ;  $C_{-RS} = 0.1$ .

## 2.4. Condições de contorno

Foram utilizadas as seguintes condições de contorno:

- Condições de entrada:

Foi assumida uma vazão prescrita igual a 1300 l/h e uma fração volumétrica de óleo  $4,64 \cdot 10^{-5}$ .

- Condições de parede:

Foram adotadas as condições de não deslizamento e componentes de velocidade nulas.

- Condição de saída:

Foram definidos valores de pressão prescrita igual a 101325 Pa .

Na Tabela 1 estão apresentadas as propriedades físico-químicas dos fluidos utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

Tabela 1: Propriedades físico- químicas.

Parâmetros	Água	Óleo
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	998	860
Viscosidade (Pa.s)	1,003x10 <sup>-3</sup>	1,04x10 <sup>-1</sup>
Tensão superficial (N/m)	0,036	

Os experimentos numéricos foram realizados 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, usando um computador com quatro núcleos Intel Dual Xeon Processador E5430 de 2.66GHz com 8GB de memória RAM. O tempo médio de simulação para cada caso variou de 2 a 3 dias.

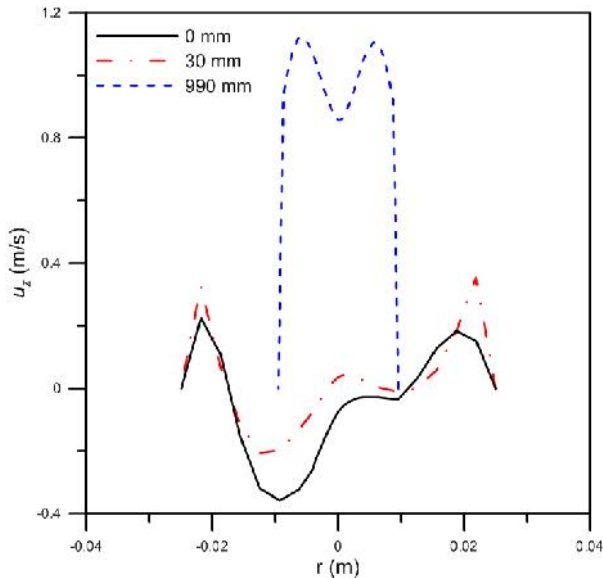
## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Velocidade tangencial

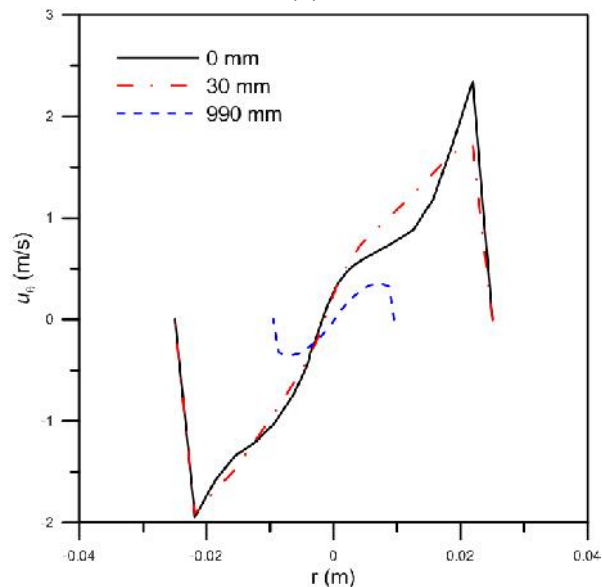
Na Figura 4 estão representados os perfis de velocidade axial e tangencial em três posições ao longo do hidrociclone,



referente ao caso 01. Observou-se que as posições 0 e 30 mm localizadas na seção cilíndrica do hidrociclone, as componentes de velocidade tangencial predominam em relação a axial.



(a)



(b)

Figura 4: Representação dos perfis de velocidade axial (a) e tangencial (b) em três posições longitudinais do hidrociclone para o Caso 01.

Esse comportamento era esperado, levando em consideração as forças centrífugas dominantes que atuam nessa região, como pode ser observado na

Figura 5, onde estão representadas as linhas de fluxo da fase água. Na posição 990 mm observou-se, desta vez, o domínio da componente axial perante a componente tangencial de velocidade, devido a sua maior relevância nessa região. Comportamento semelhante foi observado por Simões [2005] e Souza [2009] ao analisar o efeito da intensidade turbilhonar. Esses autores constataram que a intensidade turbilhonar decresce a medida que os fluidos se distanciam da entrada tangencial; os mesmos definem a intensidade turbilhonar como sendo a razão entre o momento angular pelo produto do raio e o momento axial.

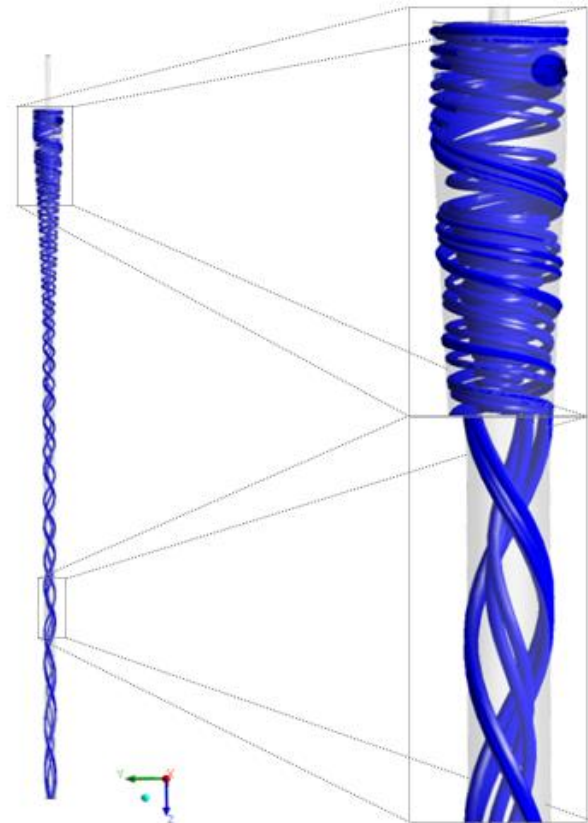


Figura 5: Representação das linhas de fluxo da água referente ao Caso 01.

O fato de a intensidade turbilhonar ser maior nas proximidades da entrada tangencial está relacionada com as forças por unidade de área atuando nessa região, ou seja, as pressões [Figura 6]. Podendo ser observado que a distribuição das pressões sobre o plano longitudinal



yz indicam que o gradiente de pressão reduz das paredes em direção ao centro. Este comportamento foi igualmente observado por Simões [2005], Souza [2009] e Barbosa [2011] estudando o processo de separação água/óleo.

Na Figura 7 estão representados os perfis de velocidade axial e tangencial da água na posição de 30 mm no hidrociclone (ver Figura 2) em duas posições angulares ( $0^\circ$  e  $90^\circ$ ) com relação a interseção do tubo de entrada e o corpo cilíndrico do hidrociclone. Esta figura põe em evidência o caráter tridimensional do escoamento no interior do hidrociclone, pois em cada um dos quadrantes pode ser observado com comportamento diferenciado dos perfis de velocidade axial e tangencial. Este fato é atribuído a perda de quantidade de momento decorrente dos efeitos das perdas por atrito nas paredes do hidrociclone.

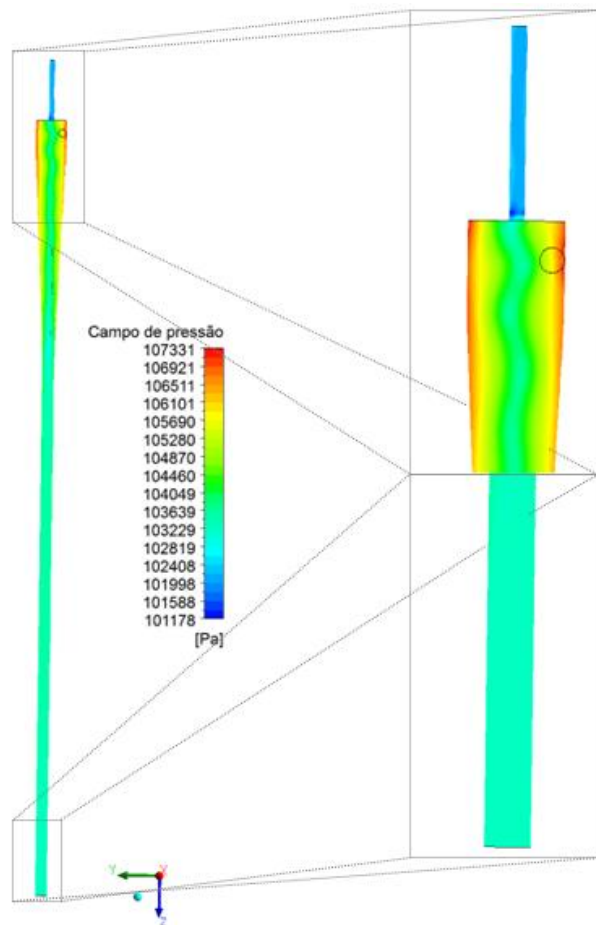
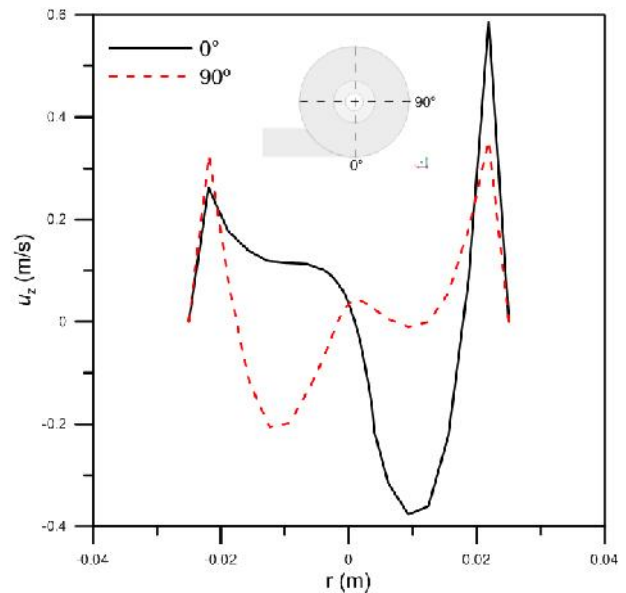
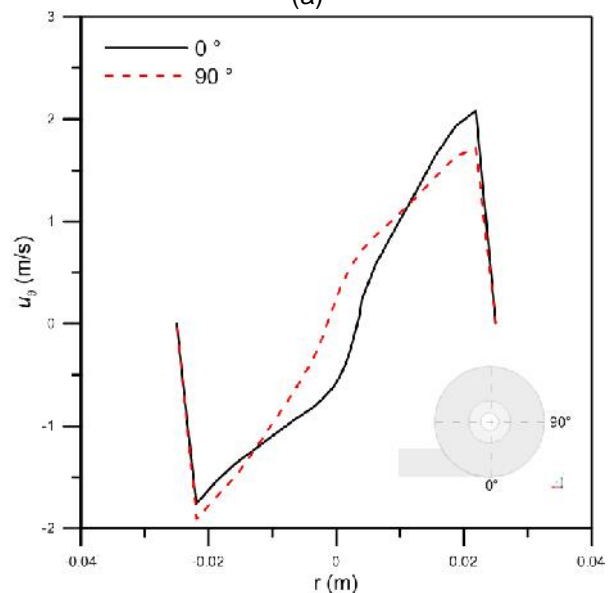


Figura 6: Campo de pressão sobre o plano longitudinal referente ao Caso 01.

Deve-se destacar ainda na Figura 7 a presença de velocidades negativas das componentes axiais, o que caracteriza zonas de recirculação decorrentes dos efeitos de arraste e expansão brusca nas proximidades do duto de entrada da mistura.



(a)



(b)

Figura 7: Representação dos perfis de velocidade axial (a) e tangencial (b) em duas posições angulares ( $0^\circ$  e  $90^\circ$ ) na posição de 30 mm no hidrociclone referente ao Caso 01.



#### 4. CONCLUSÕES

Com os resultados das simulações, pode-se concluir:

- Foi observado o caráter tridimensional do escoamento das fases no hidrociclone;
- Os perfis de velocidade são dependentes da posição angular no interior do hidrociclone;
- As maiores intensidades turbilhonares estão situadas nas proximidades da entrada tangencial.

#### 5. AGRADECIMENTOS

A equipe do LPFI (Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem) e do LCTF (Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos) pelo apoio e incentivo durante todo o período de desenvolvimento do presente trabalho.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. V.B. **Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias**. 2011. XVIII, 90 p.; il. (Dissertação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro 2012.

BRASIL. **Resolução 393/2007 do CONAMA**. Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências. Brasília-DF: CONAMA, 09 de agosto de 2007. BRASIL.

BARBOSA, E. S. **Aspectos geométricos e hidrodinâmicos de um hidrociclone no processo de separação de sistemas multifásicos: aplicação à indústria de petróleo**. 2011. 220f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Centro de

Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2011.

HONORATO, E. J. da S., **Aspectos geométricos do separador ciclônico usado na separação água/óleo: modelagem e simulação**. 2013. 52f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2013.

Kuang, S.B.; Chu, K.W.; Yu, A.B.; Vince, A.. **Numerical study of liquid-gas-solid flow in classifying hydrocyclones: Effect of feed solids concentration**. Minerals Engineering Journal. v.31, p. 17-31, 2012.

SIMÕES, M.B.M., **Separação de água-óleo derramado no mar usando hidrociclone: Um estudo numérico da intensidade turbilhonar provocado pelo duto de alimentação**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande, PB- Brasil (2005).

SOUZA, J. S. de. **Estudo numérico da termofluidodinâmica da separação de óleos pesados de uma corrente de águas oleosas via hidrociclone**. (Dissertação). Unidade Acadêmica de Engenharia Química. Mestrado em Engenharia Química, UFCG. Campina Grande – PB (2009).

XIAODONG, L.; JIANHUA, Y.; YUCHUN, C.; MINGJIANG, N.; KEFA, C. **Numerical simulation of the effects of turbulence intensity and boundary layer on separation efficiency in a cyclone separator**. Chemical Engineering Journal, v. 95, n. 1-3, p. 235 – 240, 2003.

Zhou N.; Gao Y; An W.; Yang M. **Investigation of velocity field and oil distribution in an oil-water**





**hydrocyclone using a particle  
dynamics analyzer.** Chemical  
Engineering Journal. V.157, p.73-79,  
2010.