



**Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Unidade Acadêmica em Engenharia Química  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química**

**EFEITO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NO PROCESSO  
DE SEPARAÇÃO ÁGUA/ÓLEO VIA HIDROCICLONE**

**SHEILA MIRELLE SILVA MACIEL**

**Campina Grande, PB.**

**2013**

**EFEITO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NO PROCESSO  
DE SEPARAÇÃO ÁGUA/ÓLEO VIA HIDROCICLONE**

**SHEILA MIRELLE SILVA MACIEL**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

**Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos**

**Orientador: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto**


**Campina Grande, PB.**


**2013**

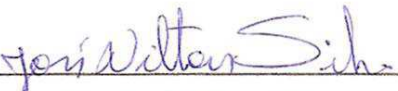
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE SHEILA MIRELLE SILVA MACIEL APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

**EFEITO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NO PROCESSO DE SEPARAÇÃO ÁGUA/ÓLEO VIA HIDROCICLONE**

Dissertação de Mestrado aprovada em 30 de agosto de 2013.

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto**  
Orientador (UFCG – CCT- UAEQ)

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Enivaldo Santos Barbosa**  
Examinador Externo (UFCG – CCT – UAEM)

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. José Nilton Silva**  
Examinador Externo (UFCG – CCT – UAEQ)

**Campina Grande, PB, Brasil.**

**Agosto de 2013.**

*Aos meus pais, a minha irmã e ao meu noivo por  
todo estímulo dado e pelo amor incondicional.  
Aos meus professores, em especial ao meu orientador,  
por me apoiar nesse desafio, **Dedico.***

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela força, proteção e determinação em toda essa caminhada.

Aos meus pais Edvaldo e Edneide, e a minha irmã Stefany por estarem sempre tão presentes me ajudando e apoiando da forma mais sutil e verdadeira.

Ao meu noivo Jeremias Lima, pela companhia, por me apoiar e incentivar em todos os momentos.

Ao meu professor orientador Severino Rodrigues de Farias Neto, pela atenção, paciência, ajuda e compreensão para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu professor e amigo Enivaldo Barbosa pela ajuda e apoio dado.

Ao meu tio Antônio Almeida por todo o incentivo, apoio e conselhos dados.

Aos meus professores, especialmente a Antonio Gilson, Nilton e Tony, por avaliar e incentivar este trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

A Universidade Federal de Campina Grande e ao Programa de Pós Graduação de Engenharia Química.

Ao Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI) e ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluido (LCTF). A Unidade Acadêmica de Engenharia Química e a Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica

A Maricé pelo incentivo e por toda atenção dada.

A toda minha família, e em memória ao meu avô João Guedes e minha tia Edileuza que almejavam essa realização. A todos meus amigos que direta ou indiretamente estiveram me dando força e apoio, especialmente a Monise, Italo, Vanessa, Mariana e Laryssa.

*“No meio da dificuldade  
encontra-se a oportunidade.”  
(Albert Einstein)*

## RESUMO

Maciel, Sheila Mirelle Silva. Efeito da Influência de Parâmetros Operacionais no Processo de Separação Água/Óleo via Hidrociclone. Campina Grande, PB: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande – Campus I, 2013. 61p. Dissertação (Mestrado).

Os óleos, principalmente os originários do setor petrolífero, são produtos que entre o seu processamento e transporte possuem misturas de outros componentes em sua composição, tais como gás, areia e o mais comum, a água. Dessa forma, a indústria petrolífera vem empregando diferentes processos de separação, dentre os quais vem se destacando os processos que utilizam movimentos circulares ou turbilhonares, como por exemplo, o hidrociclone. Os hidrociclones são usados com frequência na separação de água/óleo pela indústria de petróleo, devido à elevada capacidade de processamento, baixo custo de manutenção, exigência de pouco espaço para instalação e pela diferença de densidade entre fases. A presente pesquisa tem o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros operacionais sobre a eficiência de separação água/óleo realizada por um hidrociclone. O trabalho partiu do desenvolvimento de uma malha estruturada representativa do domínio de estudo, e usando o modelo de turbulência RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  modificado foram efetuadas simulações usando o programa comercial Ansys CFX<sup>®</sup>. Com os resultados numéricos gerados, foi possível avaliar e analisar sob a ótica da fluidodinâmica computacional. Os resultados obtidos foram confrontados com os dados experimentais reportados na literatura e apresentaram uma boa concordância. Os resultados indicaram que a dinâmica de escoamento era afetada pela concentração de óleo na entrada do hidrociclone.

**Palavras-chave:** Separação de água/óleo. Hidrociclone. Fluidodinâmica computacional.

## ABSTRACT

Maciel, Sheila Mirelle Silva. Effect of Influence of Operating Parameters on Separation Process Water/Oil via Hydrocyclone. Campina Grande, PB: Graduate Program in Chemical Engineering from the Federal University of Campina Grande - Campus I, 2013. 61p. Dissertation (Master's degree).

Oils, mainly originating from the oil sector, are products that, among its processing and transportation have mixtures of other components in the composition, such as gas, sand and the most common, water. Thus, the oil industry has employed different separation processes, among which has been highlighting the processes using circular motions or swirling, for example, the hydrocyclone. The hydrocyclones are often used in the separation of water / oil by the oil industry due to high processing power, low maintenance, requiring little installation space and the density difference between phases. This research has the objective of evaluate the influence of operating parameters on the separation efficiency water/oil performed by hydrocyclone. The work started developing a structured mesh representative of the study domain, and using the turbulence model RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  modified simulations were performed using the commercial software Ansys CFX<sup>®</sup>. With the numerical results generated, it was possible to evaluate and analyze from the perspective of computational fluid dynamics. Results obtained were compared with experimental data reported in the literature and presented a good agreement. The results indicated that the dynamic flow was affected by the concentration of oil in the inlet of the hydrocyclone.

**Keywords:** Separation of water/oil. Hydrocyclone. Computational fluid dynamics.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da geometria de um hidrociclone.....	15
Figura 2 – Locais de principais bacias do Brasil e campos de petróleo/gás.....	18
Figura 3 – Evolução da produção anual de petróleo do Brasil entre 1990-2009.....	20
Figura 4 – Representação de um hidrociclone.....	24
Figura 5 – Representação do hidrociclone (a) e detalhe da seção de entrada (b).....	33
Figura 6 – Representação da malha numérica.....	35
Figura 7 – Detalhe da malha do hidrociclone.....	35
Figura 8 – (a) Representação da região transversal superior do hidrociclone; (b) Ampliação da região de uma das entradas do hidrociclone.....	36
Figura 9 – Eficiência versus nº de iterações.....	40
Figura 10 – Posições das linhas do hidrociclone.....	41
Figura 11 – Comparativo do comportamento da componente axial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição axial 180 mm...42	42
Figura 12 – Comparativo do comportamento da componente axial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição axial 220 mm...43	43
Figura 13 – Comparativo do comportamento da componente axial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição axial 320 mm...43	43
Figura 14 – Comparativo do comportamento da componente axial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição axial 440 mm...44	44
Figura 15 – Comparativo do comportamento da componente axial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição axial 600 mm...44	44
Figura 16 – Comparativo do comportamento da componente tangencial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição tangencial 180mm.....	45
Figura 17 – Comparativo do comportamento da componente tangencial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição tangencial 220mm.....	46
Figura 18 – Comparativo do comportamento da componente tangencial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição tangencial 320mm.....	46

Figura 19 – Comparativo do comportamento da componente tangencial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição tangencial 440mm. ....	47
Figura 20 – Comparativo do comportamento da componente tangencial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição tangencial 600mm. ....	47
Figura 21 – Perfis da pressão total para três concentrações de óleo em diferentes posições longitudinais no hidrociclone. ....	49
Figura 22 – Perfis da velocidade axial para diferentes posições longitudinais no hidrociclone (180, 320 e 600 mm) para diferentes vazões de entrada. ....	51
Figura 23 – Perfis da velocidade tangencial para diferentes posições longitudinais no hidrociclone 180 mm (a), 320 mm (b) e 600 mm (c) para diferentes vazões de entrada. ....	52
Figura 24 – Campo de pressão total ao longo do hidrociclone de acordo com diferentes variações de vazão de entrada, 6,5; 4,5 e 5,5 m <sup>3</sup> /h referentes aos casos 01, 04 e 05, respectivamente. ....	53
Figura 25 – Representação da distribuição da fração volumétrica de óleo ao longo do hidrociclone para diferentes variações de vazão de entrada. ....	54

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de petróleo e consumo no Brasil, 1990-2002 (em milhares de b/d) .....	19
Tabela 2 – Especificações de óleo/água após o processamento primário .....	21
Tabela 3 – Valores dos parâmetros dos modelos $\kappa$ - $\epsilon$ e RNG $\kappa$ - $\epsilon$ padrões.....	32
Tabela 4 – Dimensões do hidrociclone.....	34
Tabela 5 – Casos que analisados no escoamento .....	39
Tabela 6 – Propriedades físico-químicas das fases .....	39
Tabela 7 – Eficiência de remoção de óleo .....	55

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis
API	<i>American Petroleum Institute</i>
B/D	Barris por dia
BS&W	<i>Basic Sediment and Water</i>
CEPETRO	Centro de Estudos de Petróleo
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
Co	Concentração de óleo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
LCTF	Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos
LDV	Velocimetria por efeito Doppler
LPFI	Laboratório de Pesquisa Fluidodinâmica e Imagem
PDA	Partícula Dinâmica Analisadora
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PIV	Velocimetria por Imagem de Partículas
RNG	<i>Renormalization Group Theory</i>
TOG	Teor de Óleo e Graxas
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
UAEQ	Unidade Acadêmica de Engenharia Química
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1</b> .....	<b>14</b>
1. Introdução .....	14
1.1. Objetivos específicos.....	16
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>17</b>
2. Revisão Bibliográfica .....	17
2.1. Considerações gerais .....	17
2.2. Métodos de separação .....	22
2.3. Hidrociclone .....	24
2.4. Trabalhos usando hidrociclones .....	26
2.5. Modelagem matemática para escoamento multifásico.....	28
2.5.1. <i>Equação da continuidade</i> .....	28
2.5.2. <i>Equação de transporte da quantidade de movimento linear</i> .....	28
2.5.3. <i>Modelos de turbulência para a fase contínua</i> .....	29
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>33</b>
3. Metodologia.....	33
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>40</b>
4. Resultados e discussões .....	40
4.1. Eficiência <i>versus</i> Número de iterações .....	40
4.2. Análise do escoamento bifásico .....	41
4.2.1. <i>Análise em diferentes concentrações de óleo</i> .....	41
4.2.2. <i>Análise em diferentes vazões de entrada</i> .....	50
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>56</b>
5. Conclusões.....	56
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>

# Capítulo 1

## 1. Introdução

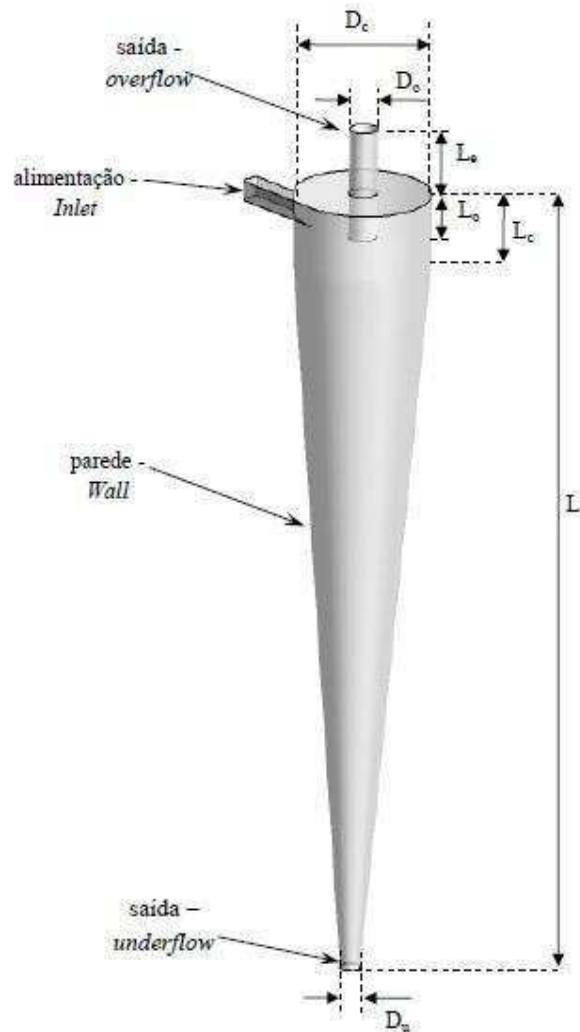
Os óleos são produtos de imensa utilidade principalmente devido as suas várias aplicações, englobando óleos vegetais e os óleos minerais, sendo estes últimos obtidos a partir do petróleo. Os óleos originários da indústria petrolífera são produtos que, desde sua produção e transporte, podem escoar juntamente com água, gás e areia, os quais devem ser devidamente separados.

Dessa forma, a indústria petrolífera vem empregando diferentes processos de separação. Podendo ser destacado o hidrociclone, o qual utiliza a força centrífuga induzida por uma ou mais entradas tangenciais. Vem sendo reportada na literatura a utilização desse equipamento no processo de separação de água/óleo principalmente no tratamento de águas oleosas, devido à elevada capacidade de processamento, baixo custo de manutenção e por exigirem pouco espaço para sua instalação (Hargreves e Silvester, 1990; Rosa, 2002; Simões, 2005; Husveg et al., 2007; Souza, 2009; Farias et al., 2010; Barbosa, 2011; Amini et al., 2011; Hwang et al., 2013).

O hidrociclone é um dispositivo constituído de uma seção cônica unida a uma seção cilíndrica, na qual está acoplada tangencialmente um duto retangular ou cilíndrico que alimenta o equipamento conforme a Figura 1. Na parte superior há uma seção de saída denominada *overflow*, com um alongamento axial para dentro do equipamento, chamado de *vortex finder*. Na saída *overflow*, geralmente escoam uma corrente menos densa. Na parte inferior há uma seção de saída denominada *underflow*, na qual geralmente se tem o escoamento da corrente mais densa.

No interior do hidrociclone o óleo migra para o centro enquanto a água é forçada para a parede. Dessa forma, como a água é mais densa que o óleo, ela sai do hidrociclone através do *underflow*, enquanto que o óleo, menos denso, sai pelo *overflow* (Husveg et al., 2007).

Figura 1 – Representação da geometria de um hidrociclone



Fonte: Farias et al., 2008b.

A proposta do presente trabalho é dar continuidade as atividades que vem sendo desenvolvidas no Laboratório de Pesquisa Fluidodinâmica e Imagem – LPFI/UAEQ/UFCG utilizando o hidrociclone no processo de separação óleo/água. Neste sentido, tem-se como objetivo principal avaliar a influência dos parâmetros operacionais sobre a eficiência de separação água/óleo realizada por um hidrociclone.

### 1.1. Objetivos específicos

- Avaliar a influência da concentração de óleo e a influência da vazão de alimentação sobre o comportamento fluidodinâmico no interior do hidrociclone e sobre a eficiência de separação água/óleo;
- Analisar o comportamento das fases (água e óleo) no interior do hidrociclone;
- Avaliar os campos de pressão, velocidade e fração volumétrica de óleo no interior do hidrociclone, em várias condições operacionais;
- Comparar os resultados numéricos com dados experimentais reportados na literatura.



### 2. Revisão Bibliográfica

#### 2.1. Considerações gerais

Atualmente os combustíveis renováveis podem contribuir para reduzir o consumo dos combustíveis fósseis, entretanto eles não podem substituí-los. Mesmo se todas as gorduras animais e vegetais atualmente disponíveis no mercado fossem convertidas em biocombustível, isto ainda cobriria apenas uma parte limitada da demanda por combustível. Além disso, as chances do preço do biodiesel ser capaz de competir com o diesel fóssil são limitadas pelo preço do óleo vegetal, que representa cerca de 80% do preço final do biocombustível (Bozbas, 2008; Apostolakou et al., 2009; Hasheminejad et al., 2011; Santori et al., 2012).

A maior parte do óleo vegetal usado atualmente na fabricação de biodiesel também pode ser usado como óleo comestível, e esse fato introduz uma nova variável no pressionado mercado alimentício, impedindo um controle eficiente sobre os preços dos produtos básicos destinados a alimentação (Santori et al., 2012).

Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) “o petróleo é derivado de matéria orgânica de origem biológica. Os restos de plantas e animais, depois de sedimentarem em lamas argilosas, são submetidos a transformações aeróbias e anaeróbias por bactérias. O produto degradado, junto com os restos de bactérias, mais tarde é transformado sob alta pressão e a temperaturas que não excedem 150°C. Durante esses processos o petróleo que está disperso, acumula-se por migração em reservatórios e finalmente formam os poços de petróleo” (Souza, 2009).

Em julho de 1997, o Governo do Brasil aprovou a Lei de Investimento Brasileiro de Petróleo. A produção de petróleo e de pesquisa nos últimos anos mudou devido à consolidação da Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis (ANP) e seu papel no cenário nacional (Pessoa Filho et al. 2006).

As reservas de petróleo provadas no Brasil (Figura 2) aumentaram a partir de 8,15 bilhões de barris em 1999 para 10,6 bilhões de barris em 2003, enquanto a produção de petróleo aumentou de 1,132 milhões barris por dia (b/d) em 1999 para 1,55 milhões (b/d) em 2003. Dessa forma, é notado que tanto as reservas como a produção de petróleo no Brasil aumentaram muito mais rapidamente do que em outros períodos (Pessôa Filho et al. 2006).

Figura 2 – Locais de principais bacias do Brasil e campos de petróleo/gás



Fonte: ANP; Adaptado de Pessôa Filho et al., 2006.

O crescimento da produção e do consumo de petróleo no Brasil está representado na Tabela 1. Em 1990 o Brasil importou cerca de 40% do petróleo necessário para consumo, o que ocasionou um impacto adverso significativo sobre a economia do país. No entanto, em 2002, essa quota de importação foi reduzida para cerca de 20% (Pessôa Filho et al., 2006).

**Tabela 1 – Produção de petróleo e consumo no Brasil, 1990-2002 (em milhares de b/d)**

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
<b>Produção (total)<sup>a</sup></b>	821	838	824	839	893	925	1,035	1,102	1,264	1,430	1,575	1,601	1,773
<b>Produção (Petróleo Bruto)</b>	631	630	626	643	671	695	795	841	969	1,132	1,269	1,295	1,455
<b>Consumo</b>	1,466	1,484	1,521	1,580	1,674	1,788	1,904	2,031	2,096	2,130	2,166	2,199	2,162

<sup>a</sup> Inclui o petróleo bruto, líquidos vegetais de gás natural, outros líquidos, e ganho de refinaria.

Fonte: Adaptado de Pessoa Filho et al. (2006).

Os principais países fornecedores de petróleo e derivados do Brasil são Argentina, Arábia Saudita e Venezuela. Com o aumento significativo da produção interna, o Brasil tem chegado perto de autossuficiência em produção de petróleo. Os avanços na produção e exploração de petróleo são resultado de um esforço considerável por parte da empresa Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), a fim de enfrentar os desafios atuais em água profundas e ultraprofundas. Importantes desenvolvimentos tecnológicos e científicos foram atingidos tanto nas áreas clássicas de reservatório, quanto na produção de perfuração, e engenharia de conclusão (Pessoa Filho et al., 2006).

A Figura 3 apresenta os dados da evolução da produção anual de petróleo entre 1990 e 2009 segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis (ANP).

Como órgão regulador da indústria nacional de petróleo, gás natural e biocombustíveis, a ANP conforme atribuições previstas na Lei nº 9.478/1997, faz cumprir as boas práticas de conservação e uso racional do petróleo, dos seus derivados, de gás natural, de biocombustíveis e de preservação do meio ambiente (Pessoa Filho et al., 2006).

Figura 3 – Evolução da produção anual de petróleo do Brasil entre 1990-2009



Fonte: Adaptado de ANP – Tavares, 2011.

Para extrair e fazer o uso do petróleo, normalmente é avaliado se o óleo é o convencional (óleo leve), ou se este é um óleo pesado, caracterizado pela sua densidade relativa que é medida em grau API (Barbosa, 2011). O Grau API é uma escala criada pelo American Petroleum Institute (API), a qual é medida em graus, variando inversamente à densidade relativa. O petróleo pode ser classificado em leve (grau API maior que 30), médio (entre 22 e 30 °API), pesado (abaixo de 22° API) e extrapesado (grau API igual ou abaixo a 10) (Moreira, 2006).

Os óleos convencionais predominaram ao longo do tempo na indústria do petróleo, uma vez que é de baixo custo de produção e, por ser mais puro, acarretam um maior valor comercial. No entanto, esses óleos estão se exaurindo. Essa situação conduz a necessidade de investimentos pelas indústrias petrolíferas, mesmo sabendo que os óleos pesados são mais difíceis de serem produzidos e refinados. Dessa forma, os óleos pesados tendem a ter um maior crescimento à medida que as reservas de óleo convencionais diminuem (Souza, 2009; Barbosa, 2011).

Segundo o Centro de Estudos de Petróleo – CEPETRO (UNICAMP) os recursos mundiais de óleo pesado e extrapesado somam um volume cerca de três vezes maior que o total de óleo convencional, sendo que aproximadamente metade do óleo convencional já foi

produzido. Em 2000, de 25 bilhões de barris de petróleo produzidos no mundo, os óleos pesados responderam por três bilhões. De toda forma, ultimamente, a maior parte das descobertas de reservas de petróleo no Brasil é de óleos pesados (Mothé e Silva, 2008; Souza, 2009; Barbosa, 2011).

Os óleos pesados possuem uma viscosidade entre 100 e 1000 vezes a viscosidade da água, o que é considerada uma viscosidade elevada. Devido a isso, o escoamento do óleo pesado do reservatório até a superfície, torna-se complexo e caro, de tal forma que às vezes o reservatório torna-se inviabilizado comercialmente (Barbosa, 2011). Essa alta viscosidade dos óleos pesados, ainda induz uma elevada perda de carga quando em contato direto com as paredes de dispositivos como poços, tubulações e dispositivos de separação, exigindo elevadas potências de bombeamento para assegurar altas vazões (Souza, 2009).

Durante a produção de óleos pesados é comum a presença de águas produzidas, as quais possuem em sua composição sais dissolvidos com características do próprio reservatório de petróleo. Tais sais presentes podem provocar corrosão e formação de depósitos inorgânicos no processo de produção, transporte e refino do petróleo (Silva et al., 2007; Melo, 2007; Barbosa, 2011). Essas águas tornam-se potencialmente prejudiciais ao meio ambiente, não podendo ser descartadas sem um tratamento, levando em conta um possível impacto ambiental (Melo, 2007; Souza, 2009; Barbosa, 2011).

A água produzida deve possuir um valor mínimo de óleo disperso (teor de óleo e graxas - TOG) para poder ser descartada que, segundo as regulamentações no Brasil, é de 20 mg/L, conforme pode ser verificado na Tabela 2, que reporta as principais especificações do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), em relação aos teores de sedimentos, óleos e graxas (Silva et al., 2007; Souza, 2009).

**Tabela 2 – Especificações de óleo/água após o processamento primário**

Corrente	Parâmetro	Especificação
Óleo	BS&W	Refino: máx. 1% vol
		Exportação: máx. 0,5% vol
	Teor de sais	Refino: máx. 570 mg/L (em NaCl)
		Exportação: máx. 285 mg/L (em NaCl)
Água Produzida	TOG	máx. 20ppm
	Temperatura	máx. 40°C

Fonte: ANP/ Adaptado de Silva et al., 2007.

## 2.2. Métodos de separação

Com o aumento de investimento da produção de petróleo, principalmente dos óleos pesados, aumenta-se também a necessidade de separação das fases água/óleo.

Um dos grandes problemas que as indústrias de petróleo enfrentam está relacionado com o tratamento do seu efluente antes que este seja reaproveitado ou descartado no meio ambiente. A poluição por petróleo produz efeitos nocivos à fauna e a flora do manancial d'água, pois a contaminação de óleo reduz a penetração de luz, decorrente de um filme insolúvel na superfície da água (Rosa, 2002).

As águas oleosas correspondem a uma mistura de água e óleo que podem ser observadas em diferentes estágios da produção, extração, transporte e refino. O cisalhamento causado por bombas, válvulas, acessórios e outros equipamentos conduzem a uma mistura das fases (água e óleo) que em muitas vezes podem conduzir a emulsões estáveis. Visando minimizar esses efeitos, muitos estudos vêm sendo realizados sobre os processos de separação água/óleo ou água/óleo/partículas sólida empregando, por exemplo, aqueles processos que utilizam-se de movimentos circulares ou turbilhonares induzidos por uma ou mais entradas tangenciais, a exemplo do hidrociclones (Hargreaves e Silvester, 1990; Simões et al., 2004; Simões, 2005; Husveg et al., 2007; Vieira et al., 2007; Mousavian e Najafi, 2008; Farias et al., 2008a e 2008b; Farias et al., 2009; Buriti, 2009; Farias et al., 2010; Barbosa, 2011; Souza, 2012, Hwang et al., 2013).

Devido à necessidade de separação das fases, tem-se observado uma crescente evolução no desenvolvimento de tecnologias nos processos de separação água/óleo. Estes dispositivos abrangem princípios de separação, tais como: sedimentação/decantação, centrifugação e ultracentrifugação, filtração, flotação, eletroflotação, hidrociclonagem, entre outros.

- **Sedimentação/ decantação:** Esse processo é utilizado na separação de misturas heterogêneas e consiste em deixar a gravidade atrair a substância mais densa para o fundo do recipiente enquanto que as mais leves são removidas.

- **Centrifugação:** Processo que visa acelerar o procedimento de decantação, no qual se adiciona uma mistura de substâncias na centrifuga que é submetida a altas rotações fazendo com que a parte mais densa acumule no fundo.
- **Filtração:** É um fenômeno que separa mecanicamente as partículas sólidas de uma suspensão (líquida ou gasosa) através de um leito poroso, ocorrendo à retenção das partículas. O filtro funciona como um suporte de retenção do sólido.
- **Flotação:** Processo utilizado em diversas áreas, tais como, mecânica, petroquímica, e principalmente na remoção de óleos emulsionados de efluentes de refinarias de petróleo, entre outras. Este processo consiste em etapas: geração de bolhas de gás no interior do efluente; colisão entre as bolhas de gás e as gotas de óleo suspensas na água; adesão das bolhas de gás nas gotas de óleo e partículas de sólido. As fases gás e óleo/sólidos são menos densas que água, dessa forma, ambas ascende naturalmente até a superfície, onde o óleo é removido. Uma das desvantagens deste processo está no fato de que, caso existam partículas sólidas de graxa, estas não irão ascender, pois tenderão sempre a sedimentar.
- **Eletroflotação:** Processo em que um campo elétrico é gerado pela aplicação de uma corrente contínua entre duas placas, que faz com que algumas gotículas de água adquiram cargas negativas e outras adquiram cargas positivas. Dessa forma, as gotas se atraem formando gotas maiores que se separam do óleo por efeito da gravidade.
- **Separação via hidrociclone:** Processo físico no qual as partículas dispersas são separadas da fase contínua (líquida) pela ação das forças peso e de arraste, que dependem de alguns fatores, tais como a diferença de densidade entre as fases, tempo de residência, dimensões das partículas, dimensões do hidrociclone, entre outros. Este processo é utilizado em diversas áreas, principalmente na petroquímica, aonde vem se destacando.

Os hidrociclones e os flotores são os equipamentos de separação óleo/água mais utilizados em unidades *offshore* (plataforma marítima). Enquanto a flotação se baseia no aumento da velocidade de separação via aumento da diferença entre densidades das fases, os hidrociclones aceleram este processo através do aumento do parâmetro relativo à força de campo. Dentre as vantagens do uso de hidrociclones para tratamento de água oleosa destacam-se:

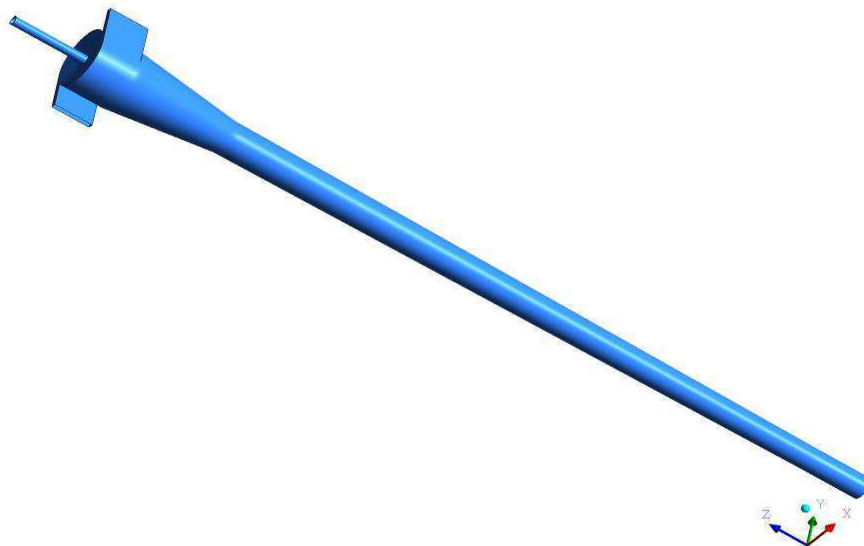
- são compactos;
- apresentam grande capacidade por área instalada;
- não requer dosagem de polieletrólitos;
- não possuem partes móveis, requerendo baixa manutenção mecânica e baixo consumo de energia;
- não sofrem efeito do balanço, pois operam a elevadas velocidades lineares.

### 2.3. Hidrociclone

A indústria de petróleo tem utilizado o hidrociclone como equipamento de separação, porque o mesmo exige pouco espaço na instalação, possui baixo custo de capital e manutenção, é de fácil operação e ainda possui alta capacidade de processamento, sendo este um equipamento capaz de converter o potencial de fluxo de alimentação em energia cinética (Kraipech et al., 2006; Barbosa, 2011).

Os ciclones/hidrociclones são equipamentos que, em geral, possuem uma ou mais entradas tangenciais perpendiculares a uma seção cilíndrica que se encontra conectada a uma seção cônica. No topo da seção cilíndrica encontra-se um tubo central, conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Representação de um hidrociclone





O hidrociclone visa à separação das fases pela ação de intensas forças de campo, que são criadas pela rotação do fluido que entra no equipamento. Por sua vez, o movimento de rotação do fluido proporciona um intenso campo centrífugo que é equilibrado por um gradiente de pressão estabelecido na direção radial do equipamento. Por um referencial de inércia, as partículas do fluido se mantêm numa trajetória espiral, pela diferença de pressão entre as faces interna e externa ao eixo do equipamento (Marins, 2007).

Segundo Marins (2007), os hidrociclones quando comparados com tradicionais separadores gravitacionais apresentam algumas vantagens, tais como:

- Facilidade na montagem: pode ser montado tanto em posição horizontal quanto na vertical, ou qualquer outra necessária;
- Redução nas dimensões e no peso, e assim, os fluidos no interior do equipamento passam menor tempo de residência;
- Ideal para aplicações em navios e plataformas semi-submersíveis, não tendo o desempenho afetado por movimentos do mar.

Os hidrociclones são agrupados em famílias conforme as relações entre suas dimensões. Como definição, tem-se que a família é a que mantêm entre si uma proporção constante e exclusiva de suas principais dimensões geométricas com o diâmetro da seção cilíndrica, em um determinado grupo de hidrociclones. Tal proporcionalidade está diretamente relacionada com a capacidade de seleção e eficiência de separação. Famílias de hidrociclones com uma região cilíndrica relativamente grande apresentam mais capacidade de processamento, e as que têm a altura da parte cônica com maior dimensão induzem uma maior eficiência de coleta. E assim, observa-se que no geral, os hidrociclones apresentam a parte cônica maior do que a seção cilíndrica (Hargreaves e Silvester, 1990; Simões, 2005; Vieira, 2006; Marins, 2007; Raposo, 2008; Barbosa, 2011; Amini et al., 2011).

O emprego de uma família de hidrociclones geralmente se restringe à necessidade de equipamentos com um alto poder classificador ou concentrador. Os hidrociclones podem ser altamente eficientes no processo de separação de partículas entre 5 a 400  $\mu\text{m}$ , o que os torna versáteis, podendo ser aplicados na classificação seletiva, fracionamento e recuperação de líquidos, entre outros (Vieira, 2006).

Diversos parâmetros podem influenciar no desempenho dos hidrociclones. Os principais tem relação com os fatores geométricos, diâmetro de entrada, de corpos cilíndrico/cônico, *vortex*, *finder*, entre outros; e também os fatores operacionais, ou seja, os que englobam parâmetros termofísicos dos fluidos e sólidos: percentagem de sólidos e viscosidade do fluido na alimentação, pressão de admissão e granulométrica do sólido, entre outros (Barbosa, 2011).

#### **2.4. Trabalhos usando hidrociclones**

Marins (2007) analisou experimentalmente o escoamento monofásico de água em um hidrociclone, por meio do comportamento dos perfis das componentes azimutal e axial da velocidade, em diversas seções ao longo do hidrociclone. Para tanto, foram utilizadas duas técnicas não intrusivas de medição de velocidade, com medição a laser: Velocimetria por efeito Doppler (LDV) e Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). Os resultados mostraram uma excelente concordância para o perfil do componente azimutal da velocidade e uma boa concordância para o componente axial. Contudo, outras características peculiares do escoamento, também foram obtidas nos experimentos e validadas por ambas às técnicas.

Bai et al. (2009) fizeram um estudo utilizando o hidrociclone, com a tecnologia de LDV, realizando assim um mapeamento não-intrusivo completo do campo de escoamento. Os principais resultados mostraram que as velocidades de flutuação com núcleo de ar é maior do que sem o núcleo de ar e que a colisão entre a parede e o fluido faz as flutuações de turbulência ser maiores perto da parede. As flutuações de turbulência próximas ao núcleo causam desvantagem na separação porque a flutuação de gotas de óleo faz o retorno do líquido removido. Os autores concluíram ainda que as magnitudes da velocidade axial e tangencial dependem da taxa de fluxo de entrada.

Barbosa (2011) estudou numericamente via CFX o processo de separação de areia, água e gás em correntes de óleos pesados usando um hidrociclone baseado no trabalho de Marins (2007) e as simplificações proposta por Raposo (2008). Os resultados numéricos obtidos concordaram com dados experimentais da distribuição radial das componentes de

velocidade tangencial e axial. A simplificação da forma geométrica na entrada do hidrociclone não alterou significativamente os resultados obtidos por simulação. Observou-se que o modelo RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  modificado previu o comportamento do escoamento tão bem quanto o modelo RSM, o qual é considerado como um dos modelos mais adequados para prever o comportamento em ciclones/hidrociclones com menor esforço computacional. O hidrociclone avaliado por Barbosa (2011) possibilitou a separação da água, areia e gás da corrente oleosa adequadamente, com eficiência de remoção 33,07%, 92,52% e 3,81%, respectivamente. O autor conclui ainda que a presença de uma baixa concentração de óleo não influencia significativamente o comportamento da corrente aquosa, validando assim os resultados numéricos do escoamento bifásico com os dados experimentais, para escoamento monofásico.

Souza (2009) analisou a termofluidodinâmica do processo de separação de óleo pesado de uma corrente de água oleosa via hidrociclone. Concluiu que ao se variar o diâmetro das partículas, se tem uma considerável influência na eficiência de separação, na potência de bombeamento e na distribuição de temperatura no hidrociclone.

Amini et al. (2011) estudaram uma nova abordagem matemática para avaliar a eficiência de desolificação de um hidrociclone. Para tal, os pesquisadores utilizaram um modelo com padrão de fluxo de fase dispersa e a teoria de separação de camada limite. A eficiência de separação do hidrociclone foi calculada considerando-se a distribuição do tamanho de gotas da alimentação e da espessura da camada limite. As comparações com dados experimentais validaram o novo modelo proposto, o qual teve um bom desempenho na predição da eficiência de separação, respondendo bem às alterações de geometrias do hidrociclone e as condições de operação, tais como a taxa de fluxo.

Zhou et al. (2010) tiveram como objetivo, em seu trabalho, determinar o campo de fluxo e distribuição de gotas de óleo num hidrociclone de óleo/água, usando a partícula dinâmica analisadora - PDA (a qual é uma extensão da técnica de Velocimetria Laser Doppler- LDV). Com os principais resultados, pôde-se concluir que a PDA mede eficazmente o campo de velocidade e o campo de concentração num hidrociclone de óleo/água simultaneamente. Observaram que as velocidades de flutuação aumentam com o aumento da taxa de fluxo de entrada e concluíram também que a distribuição do tamanho médio das gotículas de óleo diminuiu com o aumento da razão de fluxo de rejeição.

## 2.5. Modelagem matemática para escoamento multifásico

O modelo matemático que descreve o escoamento multifásico consiste das equações diferenciais parciais de conservação da massa e momento linear, juntamente com as equações do modelo de turbulência e as equações constitutivas (Barbosa, 2011).

### 2.5.1. Equação da continuidade

A equação da conservação de massa para o escoamento multifásico aplicado a uma fase  $\alpha$  é descrita por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = \sum_{\beta=1}^{Np} \Gamma_{\alpha\beta} + \vec{S}_{M\alpha} \quad (2.1)$$

onde,  $f_\alpha$  é a fração volumétrica;  $\rho_\alpha$  é a massa específica;  $\vec{U}_\alpha$  é o vetor velocidade;  $\Gamma_{\alpha\beta}$  é o fluxo mássico interfacial por unidade de volume;  $S_{M\alpha}$  é a representação de possíveis fontes de massa.

### 2.5.2. Equação de transporte da quantidade de movimento linear

A equação de transporte de quantidade de movimento para a fase  $\alpha$  é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) + \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -f_\alpha \nabla p + \\ \nabla \cdot [f_\alpha (\tau_a + \tau_a^{turb} + \tau_s)] + \sum_{\beta=1}^{Np} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_\beta - \Gamma_{\alpha\beta}^- \vec{U}_\alpha) + \vec{S}_{M\alpha} + \vec{M}_\alpha \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde,  $p$  é a pressão;  $\Gamma^+$  é a taxa de fluxo mássico;  $\vec{M}_\alpha$  é a força interfacial total que interage com a fase  $\beta$ ;  $\vec{S}_{M\alpha}$  é o termo fonte da quantidade de movimento;  $\tau_a$  e  $\tau_a^{turb}$  são termos que se referem às tensões viscosas e às tensões turbulenta de Reynolds na fase  $\alpha$ , respectivamente;  $\tau_s$  é a tensão da fase sólida;  $\sum_{\beta=1}^{Np} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_\beta - \Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U})$  é a transferência de momento induzida pela transferência de massa interfacial.

### 2.5.3. Modelos de turbulência para a fase contínua

Segundo reportado na literatura, (Souza, 2009; Barbosa, 2011), alguns modelos de turbulência auxiliam na previsão do comportamento do escoamento turbulento e podem ser classificados em:

- Modelos algébricos: os quais são empregados na determinação da viscosidade turbulenta;
- Modelos de uma equação: os quais usam igualmente a hipótese de viscosidade turbulenta, porém empregam uma equação diferencial de transporte para se determinar uma propriedade turbulenta;
- Modelos de duas equações: geralmente são empregadas duas equações diferenciais de transporte de propriedades,  $\kappa$  e  $\epsilon$ ; A energia cinética turbulenta, e a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta por unidade de massa, respectivamente;
- Modelos para tensões de Reynolds: para esses modelos utilizam-se equações de transporte explícitas para as tensões de Reynolds e uma equação de transporte complementar para  $\epsilon$  ou  $\omega$ , visando obter o fechamento do problema.

#### ➤ Modelo $\kappa$ - $\epsilon$ padrão

O modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão é o modelo de duas equações mais usado, o qual utiliza a hipótese da viscosidade turbulenta, em que as tensões de Reynolds podem ser relacionadas linearmente com os gradientes médios da velocidade. As equações de turbulência a serem

determinadas são as de energia cinética turbulenta  $\kappa$ , e a taxa de dissipação de turbulência  $\varepsilon$ . Suas equações são:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \nabla \cdot (\rho\vec{U}\kappa) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + P_\kappa + G - \rho\varepsilon \quad (2.3)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla \cdot (\rho\vec{U}\varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{\kappa} (P_\kappa + C_3 \max(G; 0)) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (2.4)$$

onde,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $\sigma_\kappa$  e  $\sigma_\varepsilon$  são constantes determinadas empiricamente. O termo  $P_\kappa$  representa a parcela de produção de energia cinética turbulenta dada por:

$$P_\kappa = \mu_{ef} \nabla \vec{U}_\alpha \left[ \nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right] - \frac{2}{3} \nabla \vec{U}_\alpha (\mu_{eff} \nabla \vec{U}_\alpha + \rho\kappa) \quad (2.5)$$

e  $G$  é a produção devido a força de corpo, dada como refere:

$$G = G_{buoy} + G_{rot} + G_{res} \quad (2.6)$$

onde,  $G_{buoy}$ ,  $G_{rot}$  e  $G_{res}$  referem-se a produção devido ao empuxo, rotação e resistência, respectivamente.

### ➤ Modelo RNG $\kappa$ - $\varepsilon$

O modelo RNG (*Renormalization Group Theory*) é uma alternativa do modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  para os fluxos com elevado número de Reynolds. A normalização de grupos melhora a caracterização da viscosidade turbulenta a partir do modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão, uma vez que tenta amenizar as não conformidades do modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  com sua hipótese de viscosidade turbulenta isotrópica. Este modelo é diferente do modelo padrão pela taxa de dissipação  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \kappa) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\kappa RNG}} \right) \nabla \kappa \right] + P_{\kappa} - \rho \varepsilon \quad (2.7)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_{\kappa} - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon) \quad (2.8)$$

onde,  $\kappa$  é a energia cinética turbulenta;  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta;  $\mu$  é a viscosidade dinâmica;  $\rho$  é a densidade;  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta.

O modelo  $\kappa$ -  $\varepsilon$  para escoamento com massa específica constante, tem como princípios a modelagem da viscosidade turbulenta proposta por Prandtl, dada por:

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

onde,  $C_{\mu}$  é uma constante de calibração experimental.

O coeficiente  $C_{\varepsilon 1 RNG}$  é dado por:

$$C_{\varepsilon 1 RNG} = 1,42 - \frac{\eta \left( 1 - \frac{\eta}{4,38} \right)}{1 + \eta^3 \beta_{RNG}} \quad (2.10)$$

em que,

$$\eta = \sqrt{\frac{P_{\kappa}}{\rho \varepsilon C_{\mu RNG}}} \quad (2.11)$$

sendo,  $P_{\kappa}$  o termo de produção pelo efeito de cisalhamento, determinado como refere:

$$P_{\kappa} = \mu_t \nabla \vec{U} \cdot (\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) + P_{Kb} \quad (2.12)$$

onde,  $P_{Kb}$  é o termo de produção de flutuação, dado por:

$$P_{Kb} = -\frac{\mu_T}{\rho \sigma_{\rho}} g \cdot \nabla \rho \quad (2.13)$$

onde,  $\mu_T$  é a viscosidade turbulenta;  $g$  é o vetor aceleração gravidade;  $\rho$  é a massa específica do fluido; e  $\sigma_{\rho}$  é o número de Prandtl turbulento.

As constantes do modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG:  $C_{\epsilon 2RNG}$ ,  $C_{\mu RNG}$ ,  $\beta_{RNG}$ ,  $\sigma_{\kappa RNG}$  e  $\sigma_{\epsilon RNG}$  têm os seus valores especificadas na Tabela 3:

**Tabela 3 – Valores dos parâmetros dos modelos  $\kappa$ - $\epsilon$  e RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  padrões**

Parâmetro	$C_{\epsilon}$	$C_{\mu}$	$\beta$	$\sigma_{\kappa}$	$\sigma_{\epsilon}$
<b><math>\kappa</math>-<math>\epsilon</math></b>	1,44	0,1	-	1,0	1,3
<b>RNG <math>\kappa</math>-<math>\epsilon</math></b>	1,9200	0,0850	0,0120	0,7179	0,7179

O modelo RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  têm mostrado melhoramentos substanciais, principalmente em escoamentos que apresentam fortes curvaturas de correntes e grandes vorticidade e rotação, quando comparado com o modelo de  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão (Vieira, 2006).



### 3. Metodologia

A pesquisa relacionada com o processo de separação água/óleo em hidrociclone foi desenvolvida nos laboratórios: Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI) e Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (LCTF) da Universidade Federal de Campina Grande. Todas as simulações foram realizadas com auxílio do pacote comercial Ansys CFX<sup>®</sup>.

Para realizar a pesquisa, foi utilizado a malha do hidrociclone (domínio computacional) do trabalho de Barbosa (2011) o qual é baseado no trabalho de Marins (2007) com as simplificações na geometria do hidrociclone proposta por Raposo (2008), conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Representação do hidrociclone (a) e detalhe da seção de entrada (b)

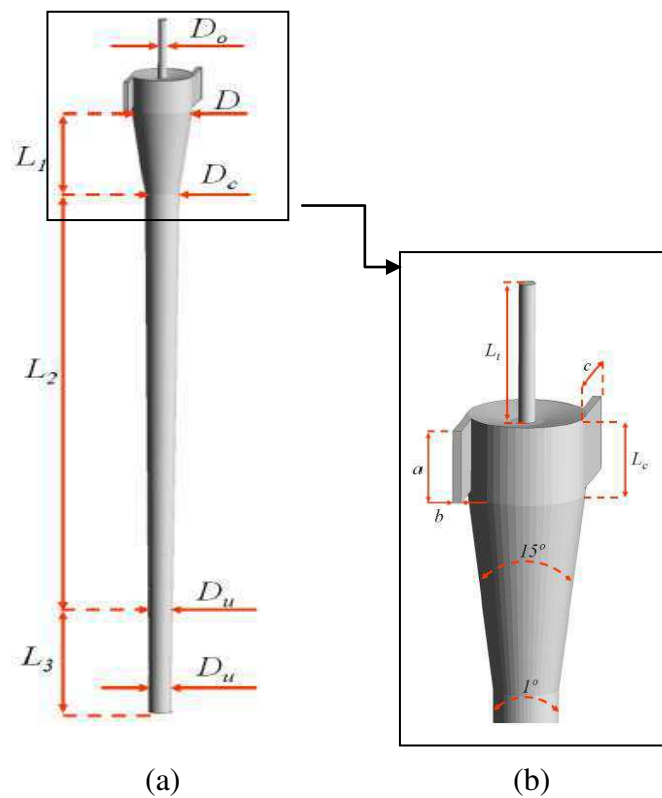


Tabela 4 – Dimensões do hidrociclone

Geometria		Dimensões (mm)
Diâmetro do hidrociclone	$D$	70
Diâmetro do rejeito	$D_o$	10
Diâmetro da seção cônica (15°)	$D_c$	39,28
Diâmetro da saída	$D_u$	26,3
Altura do topo	$L_t$	84,4
Altura da seção cilíndrica	$L_c$	47,56
Altura da região cônica – 15°	$L_1$	120,44
Altura da região cônica – 1°	$L_2$	686,85
Altura da região cilíndrica	$L_3$	63,15
Altura total	$L$	998
Altura da região de entrada	$a$	44
Largura da região de entrada	$b$	5
Comprimento da região de entrada	$c$	50

### 3.1. Domínio computacional

Na Figura 6 esta representada a malha desenvolvida por Barbosa (2011), que gentilmente foi cedida para o desenvolvimento deste trabalho. Decidiu-se, portanto, aumentar a sua densidade visando um melhor refinamento da malha, a qual é formada por 292144 volumes de controle do tipo hexahédricos. A partir do detalhe na Figura 7 é possível ver um refinamento nas proximidades das paredes do dispositivo. Na Figura 8 é possível observar o detalhe da vista superior do hidrociclone pondo em evidência o refinamento da malha. Para geração da malha foi necessário representar a geometria no ICEM-CFD com auxílio de pontos previamente definidos, curvas e superfícies em um espaço tridimensional.

Figura 6 – Representação da malha numérica

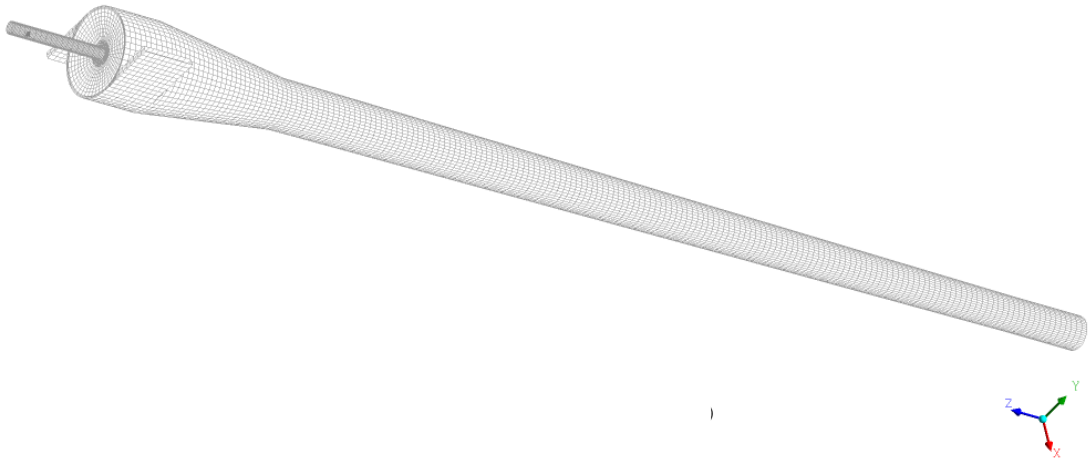


Figura 7 – Detalhe da malha do hidrociclone

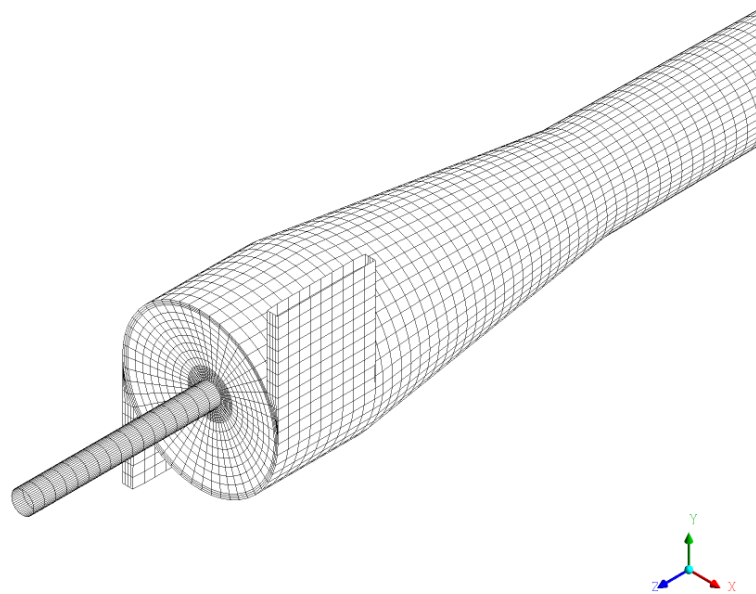
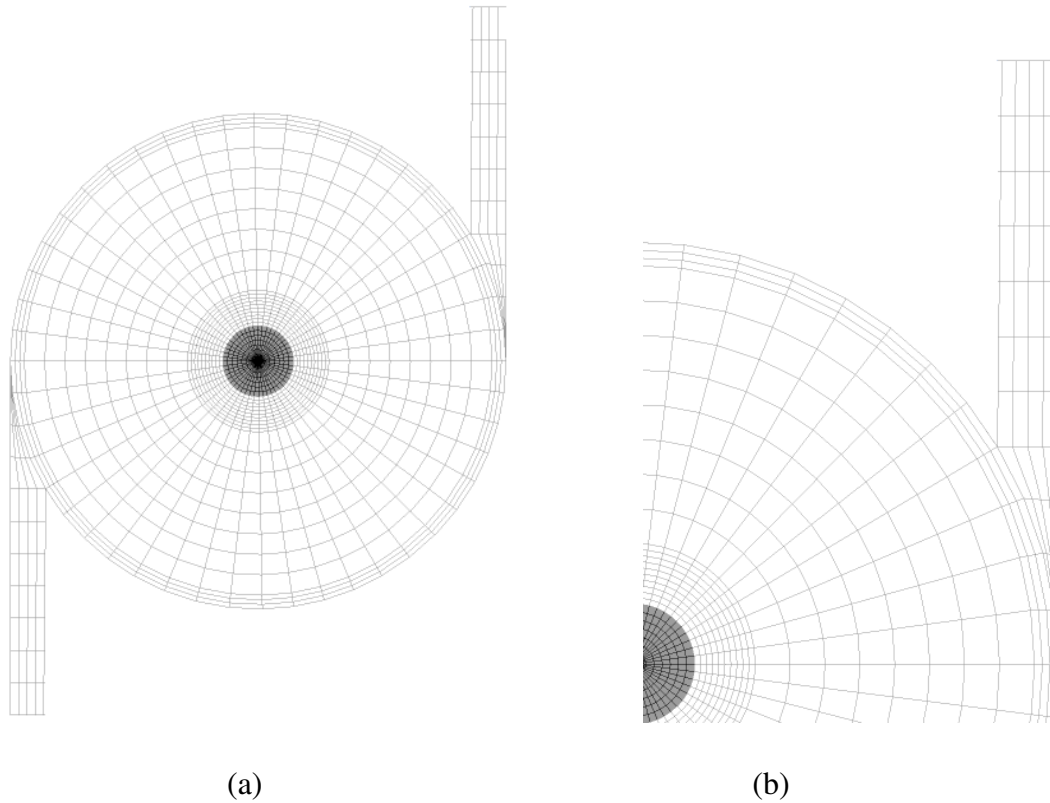


Figura 8 – (a) Representação da região transversal superior do hidrociclone; (b) Ampliação da região de uma das entradas do hidrociclone



### 3.2. Modelo matemático

O escoamento bifásico (água e óleo) é estudado teoricamente com base nas equações de conservação de massa e de momento linear com as seguintes considerações simplificadoras:

- Escoamento em regime permanente;
- Escoamento incompressível e isotérmico, na temperatura de 25°C;
- Fonte de massa considerada nula;
- Rugosidade do hidrociclone foi desconsiderada;
- A água é a fase contínua e o óleo a fase dispersa (diâmetro de partícula igual a 10 $\mu$ m);

- Forças de não-arraste foram desconsideradas;
- A gravidade foi considerada;

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

**Equação de conservação de massa:**

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (3.1)$$

onde,  $f_\alpha$  é a fração volumétrica;  $\rho_\alpha$  é a massa específica;  $\vec{U}_\alpha$  é o vetor velocidade da fase  $\alpha$  que é composta por água e óleo.

**Equação de momento linear:**

$$\begin{aligned} \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] &= -f_\alpha \nabla \vec{p}_\alpha + \\ \nabla \cdot \{f_\alpha \mu_{ef} [\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T]\} &+ \vec{S}_{M\alpha} + \vec{M}_\alpha \end{aligned} \quad (3.2)$$

onde,  $\vec{p}$  é a pressão;  $\mu_{ef}$  corresponde a viscosidade efetiva, definida como sendo a soma da viscosidade dinâmica,  $\mu$ , e a viscosidade turbulenta;  $\vec{S}_{M\alpha}$  é o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume;  $\vec{M}_\alpha$  representa as forças interfaciais atuando na fase  $\alpha$  devido à presença de outras fases, definida por:

$$\vec{M}_\alpha = \frac{C_D}{8} \rho_\alpha A_{\alpha\beta} |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (3.3)$$

onde,  $C_D$  é o coeficiente de arraste, assumido por 0,44;  $\rho_{\alpha\beta}$  corresponde à densidade da mistura.  $A$  é área superficial por unidade de volume sendo definido por:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{6f_{\alpha}}{d_{\beta}} \quad (3.4)$$

onde,  $d_{\beta}$  é o diâmetro da fase dispersa  $\beta$ .

No presente trabalho é utilizado o modelo RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  modificado (apresentados nas Equações 2.7 a 2.13) proposto por Spalart e Shur (1997), uma vez que este foi mostrado no trabalho de Barbosa (2011) e apresentou um dos melhores resultados na comparação realizada com os outros modelos, e comparados com resultados experimentais.

### Condições de contorno:

As condições de contorno utilizadas sobre o hidrociclone correspondem a:

➤ **Condição de entrada:**

Nas seções de entrada do hidrociclone foi definido um valor prescrito para vazão total iguais a 4,5; 5,5 e 6,5 m<sup>3</sup>/h e frações volumétricas iguais a 1, 5 e 10%.

➤ **Condição de saída:**

Nas seções de saídas (outlet) superior e inferior do hidrociclone, foram definidos valores prescritos para pressão média nas saídas superior e inferior iguais a 1,2 bar e 2,05 bar, respectivamente.

➤ **Condição nas paredes:**

Na fronteira foi utilizada a condição de parede de não - deslizamento (no-slip), que é a condição onde o fluido próximo à parede assume velocidade zero. Assim por definição:

$$U_x = U_y = U_z = 0 \quad (3.5)$$

onde  $U_x, U_y, U_z$  são componentes do vetor velocidade.

Para se estimar a eficiência de separação água/óleo em um hidrociclone emprega-se a seguinte equação:

$$E = 1 - \left( \frac{W_{in} - W_{out}^{sup}}{W_{in} - W_{out}^{inf}} \right) \quad (3.6)$$

onde,  $W_{in}$  corresponde à vazão de entrada;  $W_{out}$  corresponde à vazão de saída;  $E_{sup}$  refere-se a superior e  $E_{inf}$  refere-se a inferior.

Na Tabela 5 observam-se os casos analisados na presente pesquisa.

**Tabela 5 – Casos que analisados no escoamento**

Caso	Vazão volumétrica (m <sup>3</sup> /h)	Fração volumétrica da fase		Diâmetro de partícula da fase dispersa, Dp (µm)
		Contínua (água) (%)	Dispersa (óleo) (%)	
01	6,5	99	1	10
02	6,5	95	5	10
03	6,5	90	10	10
04	4,5	99	1	10
05	5,5	99	1	10

As propriedades físico-químicas da separação dos fluidos água/óleo utilizadas na simulação no presente trabalho apresentam-se na Tabela 6.

**Tabela 6 – Propriedades físico-químicas das fases**

Fases contínua e dispersa	Massa específica $\rho$ , (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade $\mu$ (centipoise)	Tensão interfacial $\tau$ , (mN/m)
Água	997,05	0,890	70
Óleo	870,9	100	

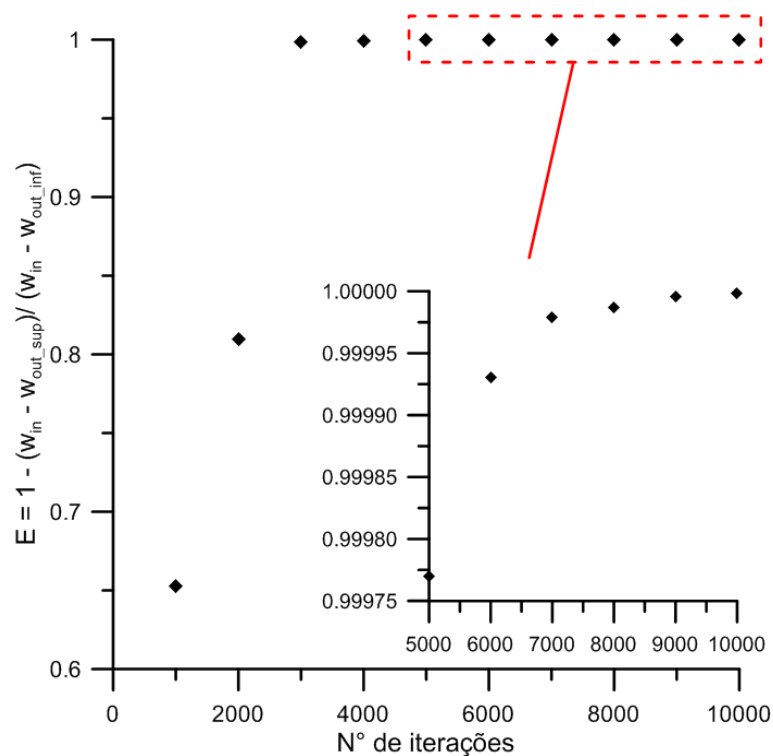
## 4. Resultados e discussões

Os resultados das simulações do escoamento bifásico, em regime permanente da mistura água/óleo no interior do hidrociclone, tal como o comportamento das componentes axial e tangencial da velocidade numérica do processo de separação, de acordo com os fundamentos e modelagem matemáticos abordados neste presente trabalho.

### 4.1. Eficiência versus Número de iterações

Na Figura 9 está representada a eficiência de separação água/óleo em função do número de iterações. Os resultados indicam que os resultados numéricos dependem do número de iterações, mas observa-se que esta dependência passa a ser menor após 7000 iterações.

Figura 9 – Eficiência versus nº de iterações

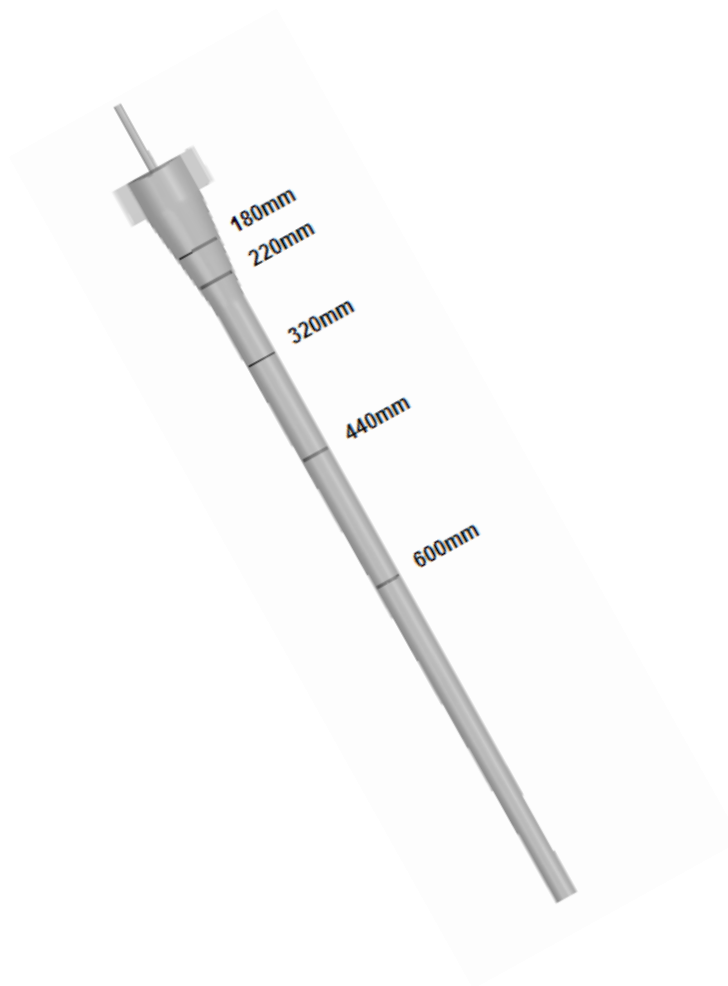




## 4.2. Análise do escoamento bifásico

Os resultados foram analisados ao longo do hidrociclone em linhas específicas, tanto para a velocidade axial, quanto para a velocidade tangencial. As linhas escolhidas foram de 180 mm, 220 mm, 320 mm, 440 mm e 600 mm, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Posições das linhas do hidrociclone



### 4.2.1. Análise em diferentes concentrações de óleo

Nessa etapa, foram realizadas análises para avaliar o efeito da pressão, velocidade e a variação da fração volumétrica de óleo, tal como o efeito da concentração de óleo de acordo com os casos 01, 02 e 03 da tabela 5.

Nas Figuras 11 a 15 estão representados os perfis de velocidade axial em diferentes posições ao longo do hidrociclone. Estes resultados são comparados com os dados experimentais de Marins (2007).

Cada uma das figuras representa uma posição longitudinal no hidrociclone (180, 220, 320, 400 e 600 mm) medidos desde o topo do hidrociclone. Percebe-se um bom acordo dos resultados numéricos com os dados experimentais, apresentando pequenas discrepâncias, em especial nas proximidades do eixo do hidrociclone.

Deve-se destacar ainda o efeito da concentração de óleo no comportamento dos perfis de velocidade axial. Percebe-se uma amortização das componentes de velocidade, em especial na região central proporcionando, assim, uma redução significativa da velocidade máxima.

Figura 11 – Comparativo do comportamento da componente axial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição axial 180 mm.

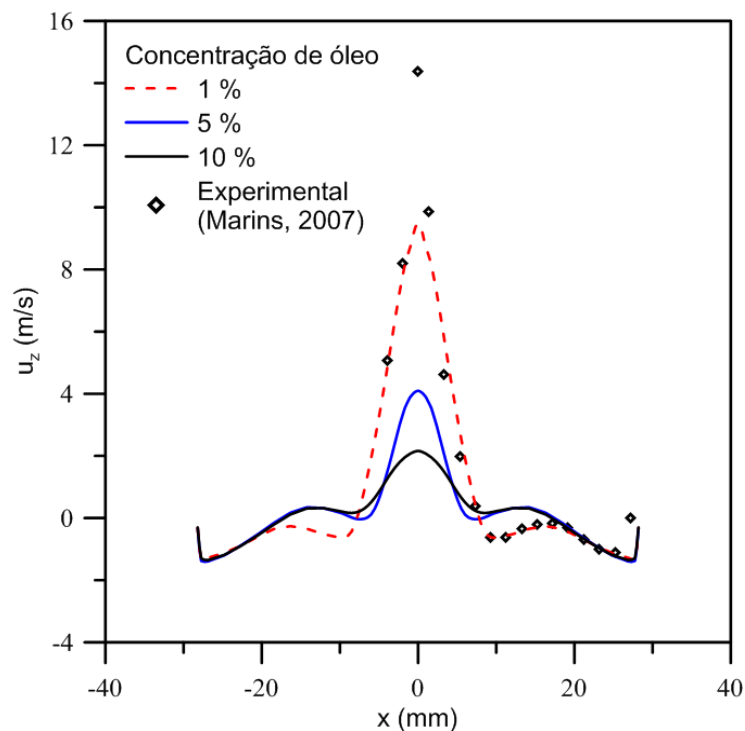


Figura 12 – Comparativo do comportamento da componente axial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição axial 220 mm.

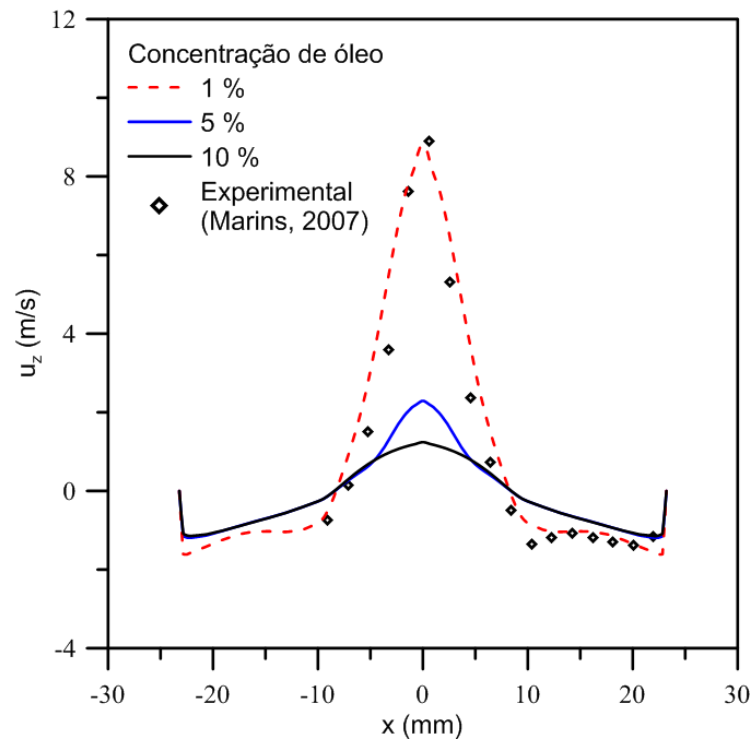


Figura 13 – Comparativo do comportamento da componente axial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição axial 320 mm.

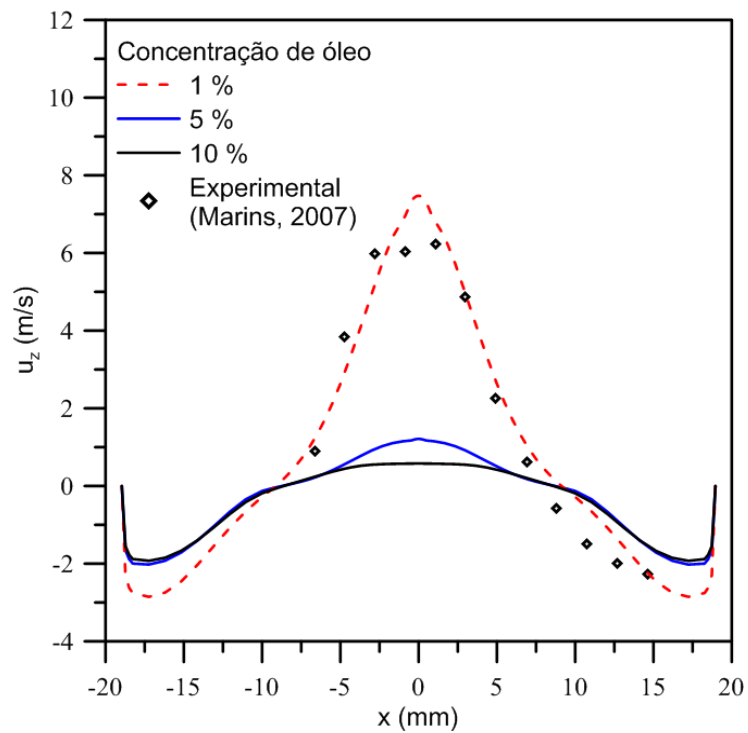


Figura 14 – Comparativo do comportamento da componente axial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição axial 440 mm.

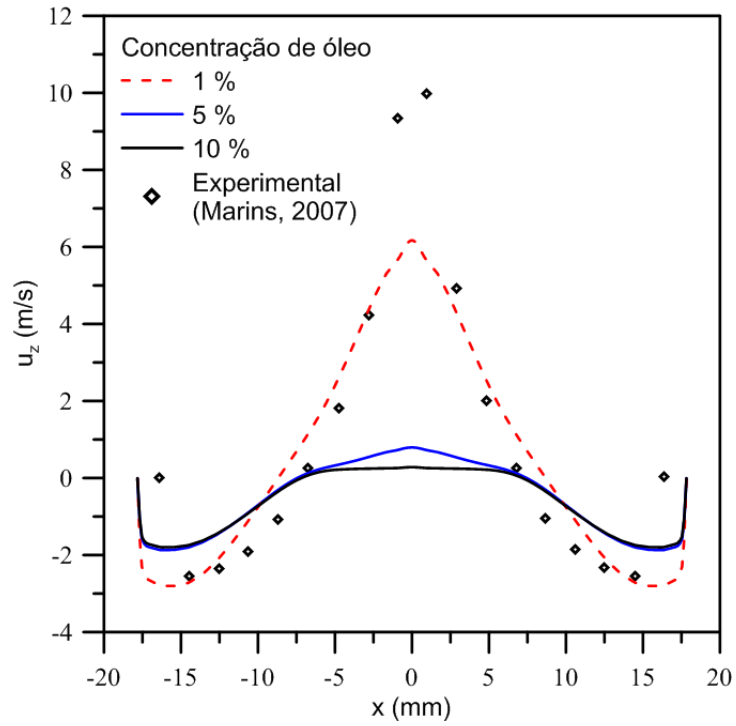
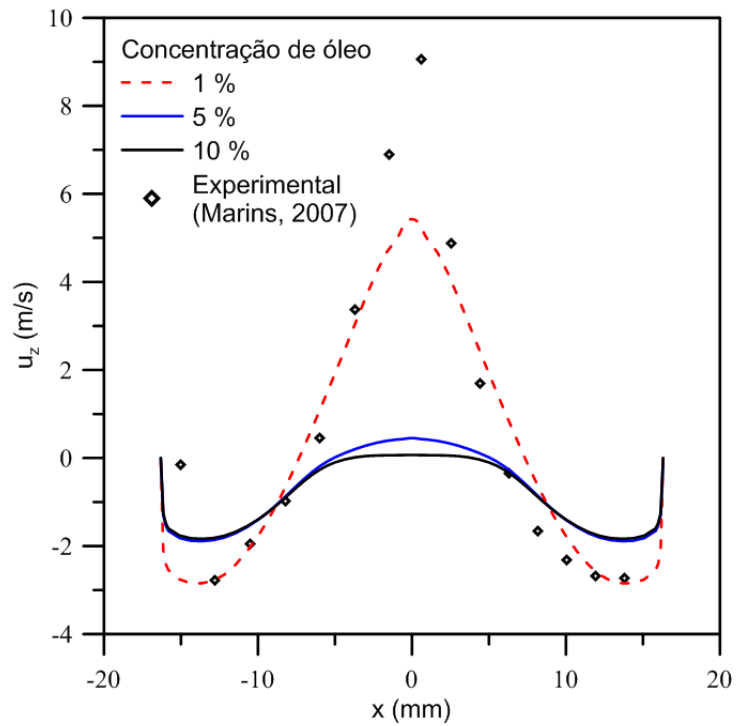


Figura 15 – Comparativo do comportamento da componente axial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição axial 600 mm.



Nas Figuras 16 a 20 estão representados os perfis de velocidade tangencial em diferentes posições ao longo do hidrociclone (180, 220, 340, 440 e 600 mm). Estes resultados são comparados com os dados experimentais de Marins (2007).

Observa-se uma discrepância entre os resultados numéricos e experimentais. Este fato pode ser atribuído à concentração de óleo presente, tendo em vista que o estudo de Marins (2007) utilizou apenas água. Estes resultados indicam que há uma amortização significativa das componentes velocidade tangenciais com o aumento da concentração de óleo da mistura que entra no hidrociclone, o que conduz a uma redução do momento angular decorrente das perdas por atrito e diminuição das forças centrífugas.

Figura 16 – Comparativo do comportamento da componente tangencial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição tangencial 180mm.

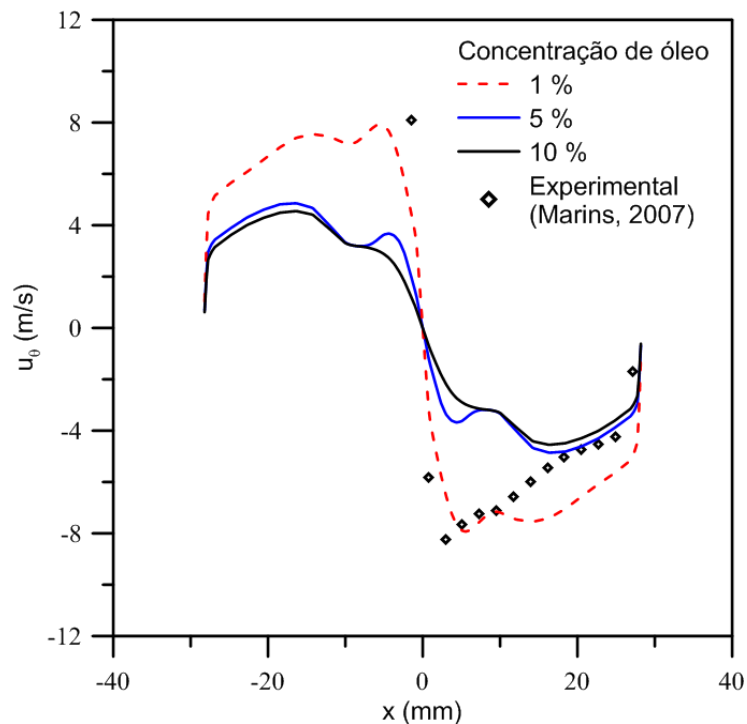


Figura 17 – Comparativo do comportamento da componente tangencial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição tangencial 220mm.

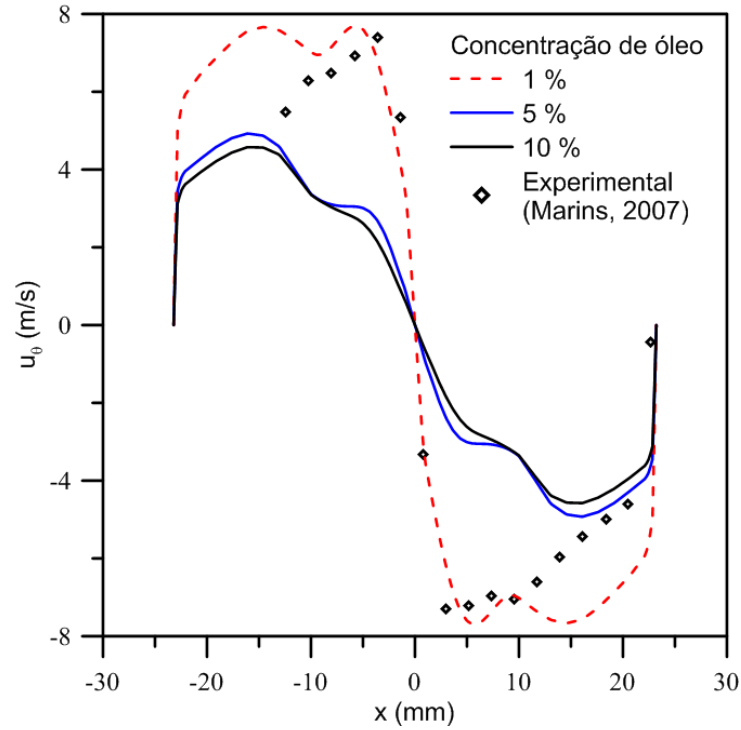


Figura 18 – Comparativo do comportamento da componente tangencial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição tangencial 320mm.

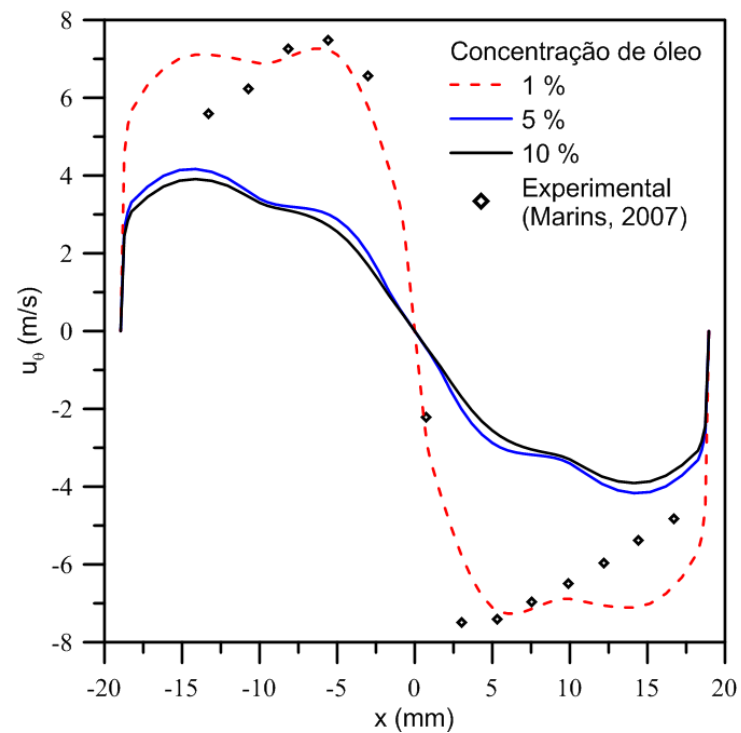


Figura 19 – Comparativo do comportamento da componente tangencial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição tangencial 440mm.

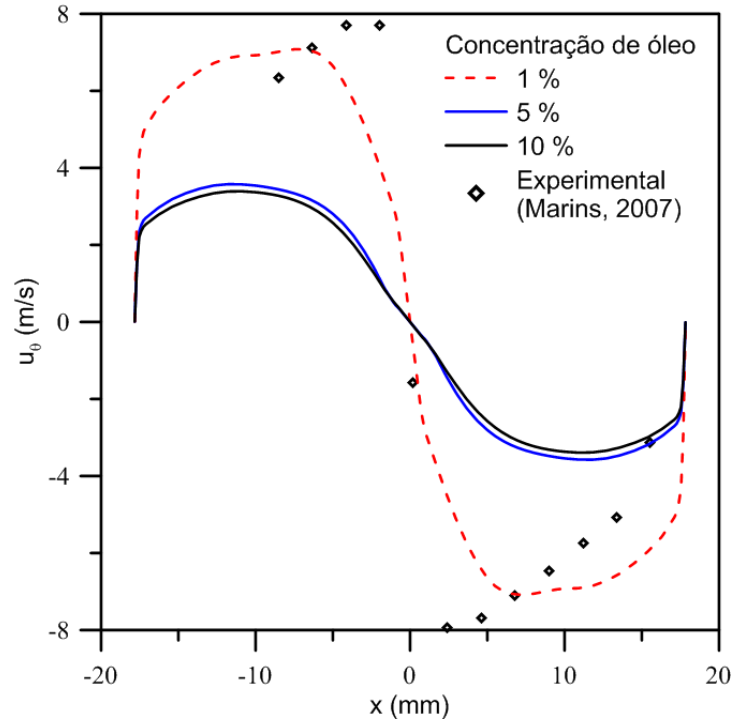
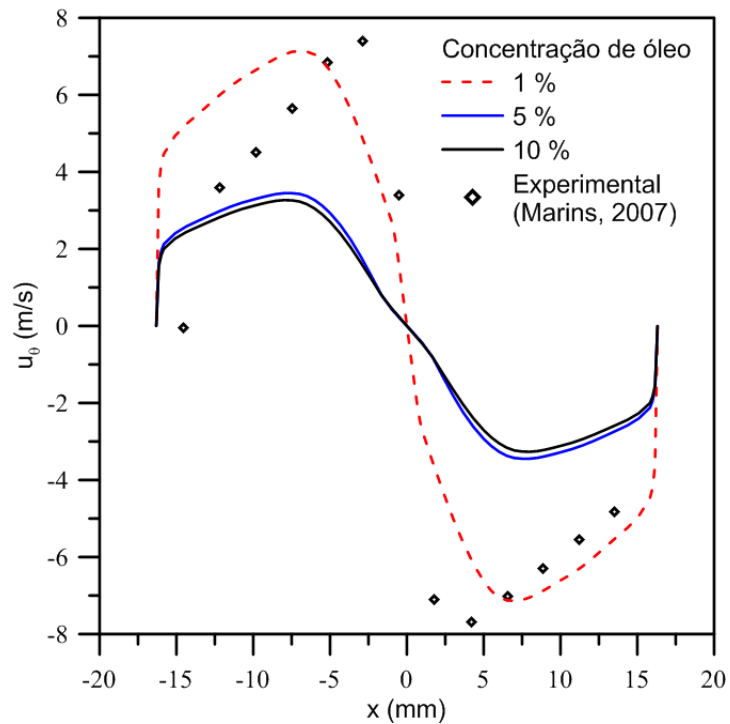


Figura 20 – Comparativo do comportamento da componente tangencial da velocidade e do resultado experimental (Marins, 2007) ao longo do hidrociclone na posição tangencial 600mm.



Com relação aos perfis de velocidade axial, nota-se um bom comportamento em comparação com os dados experimentais, principalmente com a concentração de 1% de óleo, assim como pode ser melhor visualizado na posição de 220 mm (Figura 13). É observado também que há uma pequena divergência entre os valores e que essa divergência é melhor observada principalmente na região do centro do hidrociclone.

Assim como nos perfis de velocidade axial, com relação aos perfis de velocidade tangencial, nota-se uma boa concordância com os dados experimentais principalmente para a concentração de óleo em 1% e para as posições de 180 mm e 320 mm. Pequenas divergências também são verificadas próximas à região do centro. Tal fato pode estar relacionado com o modelo de turbulência, que pode subestimar a velocidade tangencial e axial na região central do hidrociclone.

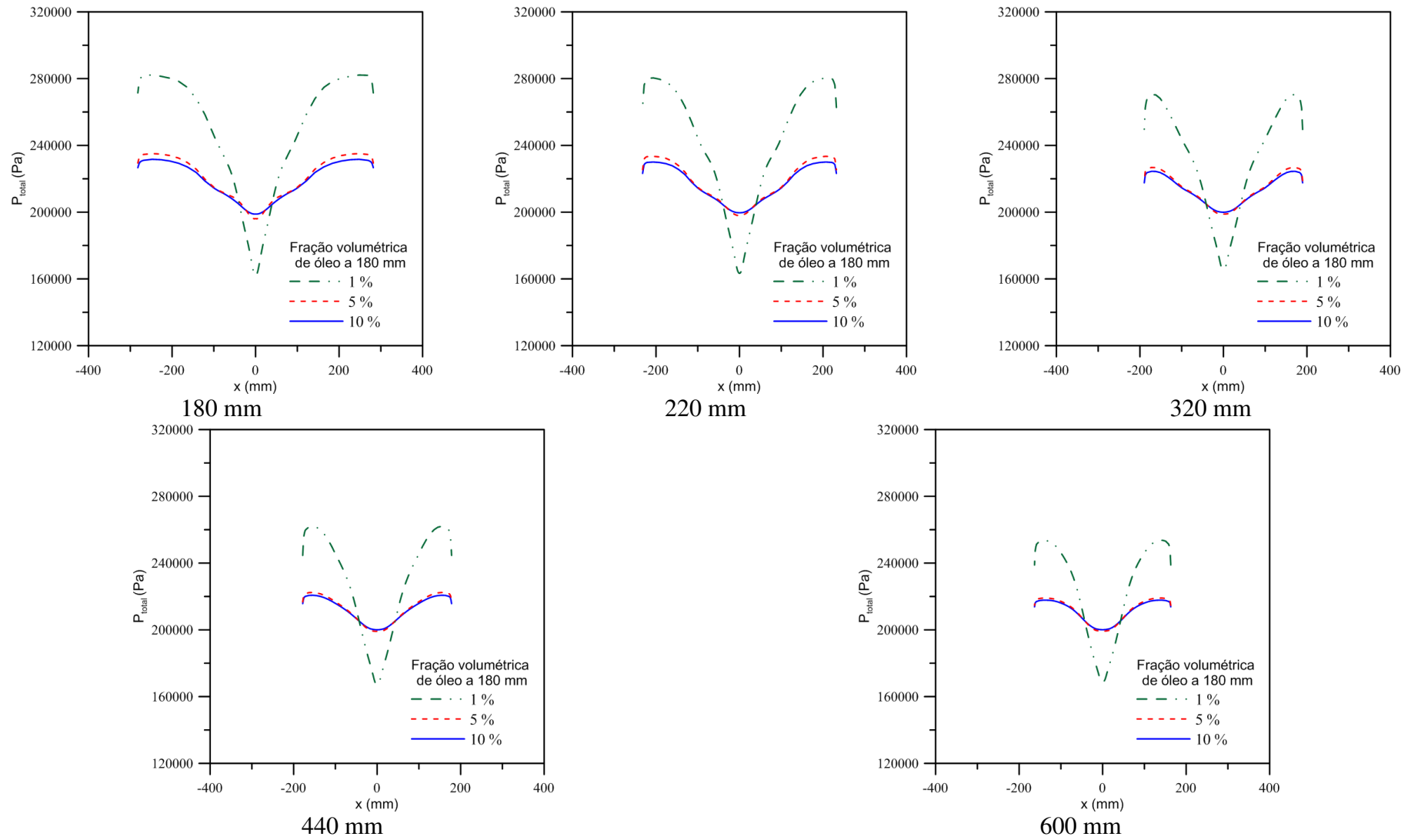
- **Efeito da pressão**

Na Figura 21 está representado o campo de pressão total sobre o plano longitudinal XY para as três concentrações avaliadas (1, 5 e 10% em fração volumétrica). Estes resultados indicam uma redução da pressão total em direção ao centro do hidrociclone, em especial, nas proximidades das entradas tangenciais. Este fenômeno é menos acentuado com o aumento da concentração de óleo. Este fato pode ser explicado pela redução da força centrífuga e consequente redução do momento angular.

Estes resultados indicam que as componentes de pressão são mais importantes nas proximidades das entradas tangenciais e que vão reduzindo ao longo do hidrociclone. Este fenômeno é atribuído às perdas por atrito e a redução do momento angular e aumento do momento axial, comportamento semelhante foi observado por Simões (2005), ao avaliar a influência da intensidade turbilhonar no processo de separação água/óleo via hidrociclone.



Figura 21 – Perfis da pressão total para três concentrações de óleo em diferentes posições longitudinais no hidrociclone.



#### ***4.2.2. Análise em diferentes vazões de entrada***

Nessa etapa, foram realizadas análises para avaliar o efeito da pressão, velocidade e fração volumétrica de óleo, de acordo com o efeito da vazão de entrada conforme os casos 01, 04 e 05 da Tabela 5.

As Figuras 22 (a), (b) e (c) e 23 (a), (b) e (c) apresentam os perfis da velocidade axial e tangencial para as posições longitudinais 180 mm, 320 mm e 600 mm do hidrociclone, respectivamente, em diferentes vazões de entrada (4,5; 5,5 e 6,5 m<sup>3</sup>/h). Estes resultados indicam que, como era esperado, quanto maior a vazão volumétrica de entrada no hidrociclone maiores as componentes de velocidade axial e tangencial, resultados igualmente observados por Buriti (2009), Souza (2009), Zhou et al. (2010), Barbosa (2011).

A Figura 24 apresenta o campo de pressão total sobre o plano XZ para as três vazões de entrada avaliadas (6,5; 4,5 e 5,5 m<sup>3</sup>/h, respectivamente casos 01, 04 e 05). Estes resultados indicam que a pressão total apresenta um comportamento radial em direção ao centro do hidrociclone a partir das paredes, em especial, nas proximidades das entradas tangenciais, em especial para vazão de 6,5 m<sup>3</sup>/h (caso 01). Este fato pode ser explicado porque os maiores valores dos gradientes de pressão estão localizados próximos das entradas tangenciais e da parede cilíndrica, dessa forma, quanto maior a vazão de entrada, maior a pressão exercida pelos fluidos sobre as paredes do hidrociclone. Ao observar o caso de menor vazão de entrada (caso 04), nota-se que o campo de pressão apresenta uma distribuição quase uniforme, fato que também foi observado no trabalho de Barbosa (2011).

A Figura 25 apresenta a distribuição da fração volumétrica de óleo ao longo do hidrociclone sobre os planos XZ para as três vazões de entrada avaliadas (6,5; 4,5 e 5,5 m<sup>3</sup>/h, respectivamente caso 01, caso 04 e caso 05). Os resultados da Figura 25 indicam que a concentração de óleo aumenta nas regiões próximas ao eixo do hidrociclone e decresce radialmente em direção à parede cilíndrico-cônica.

Figura 22 – Perfis da velocidade axial para diferentes posições longitudinais no hidrociclone (180, 320 e 600 mm) para diferentes vazões de entrada.

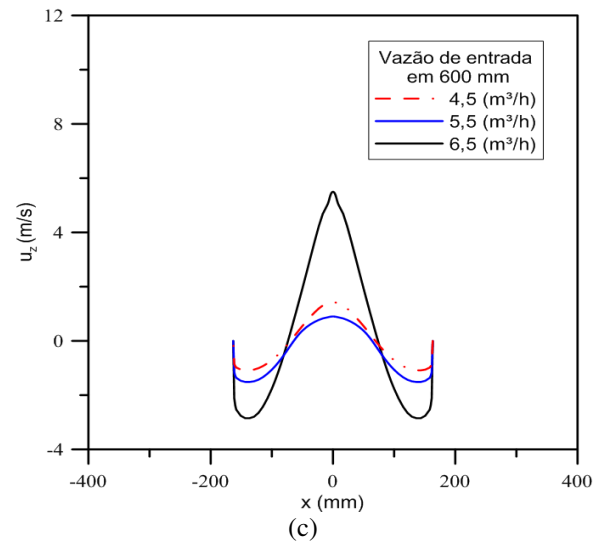
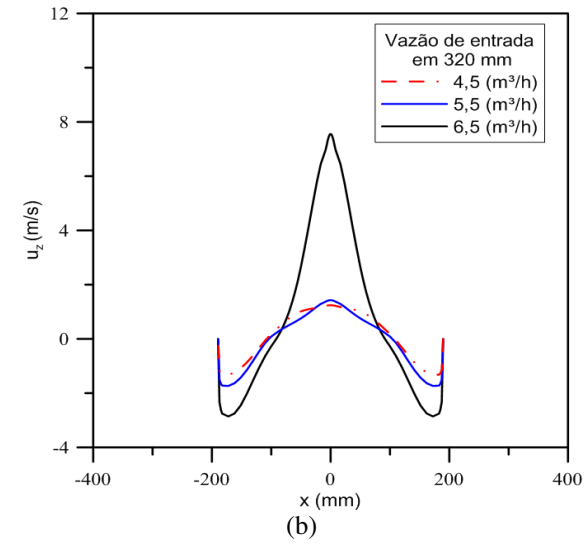
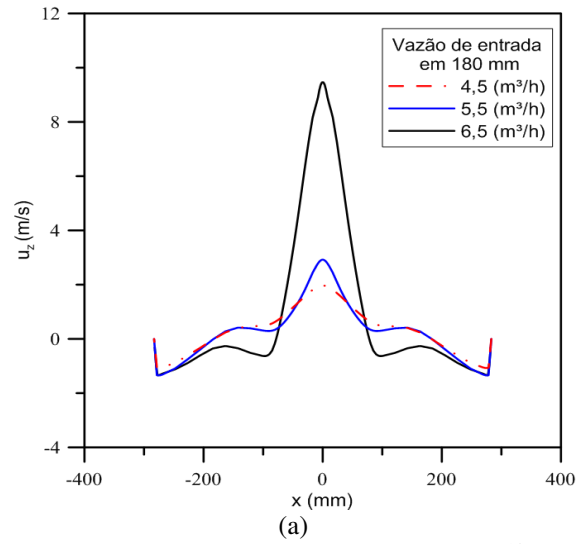


Figura 23 – Perfis da velocidade tangencial para diferentes posições longitudinais no hidrociclone 180 mm (a), 320 mm (b) e 600 mm (c) para diferentes vazões de entrada.

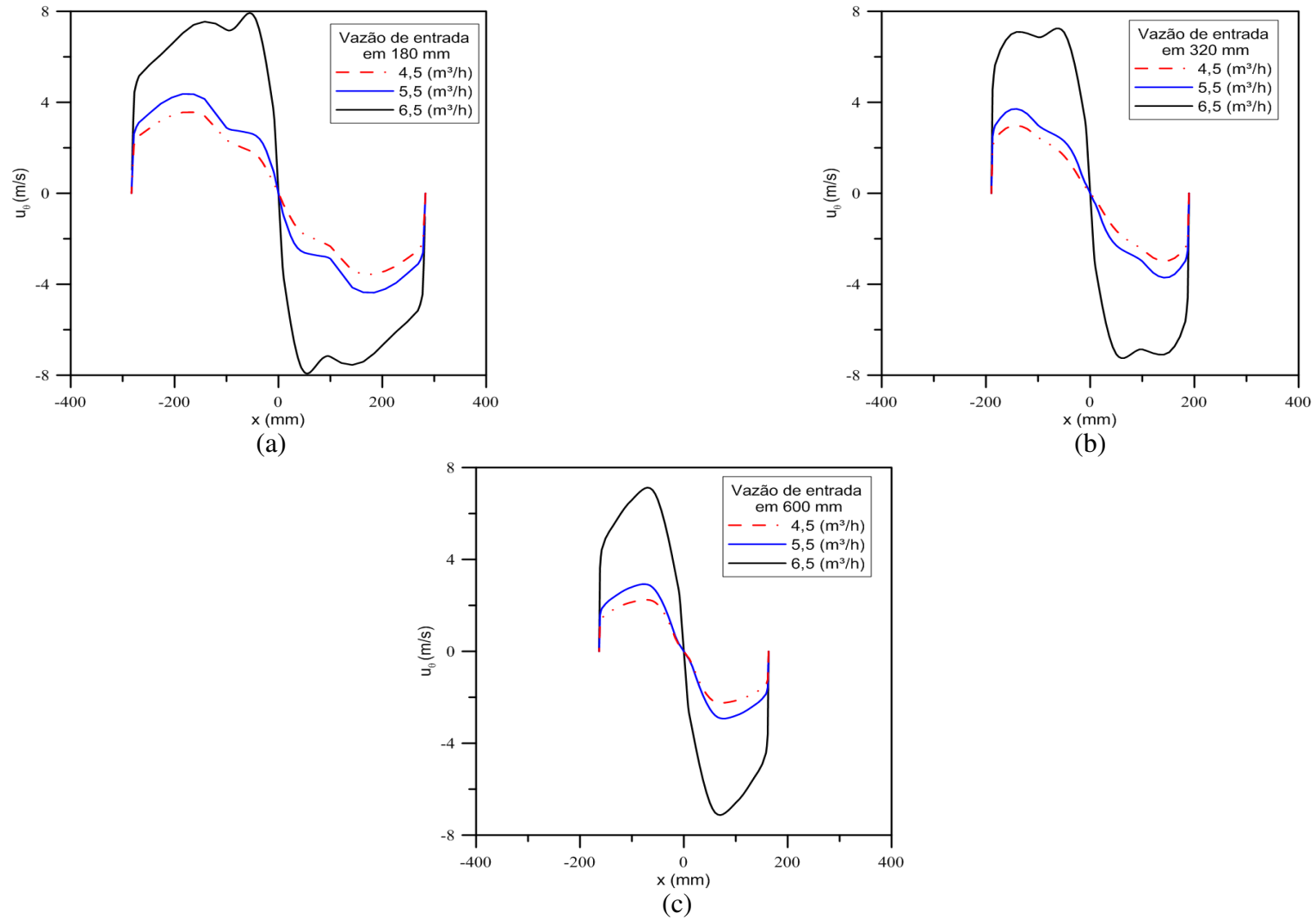


Figura 24 – Campo de pressão total ao longo do hidrociclone de acordo com diferentes variações de vazão de entrada, 6,5; 4,5 e 5,5 m<sup>3</sup>/h referentes aos casos 01, 04 e 05, respectivamente.

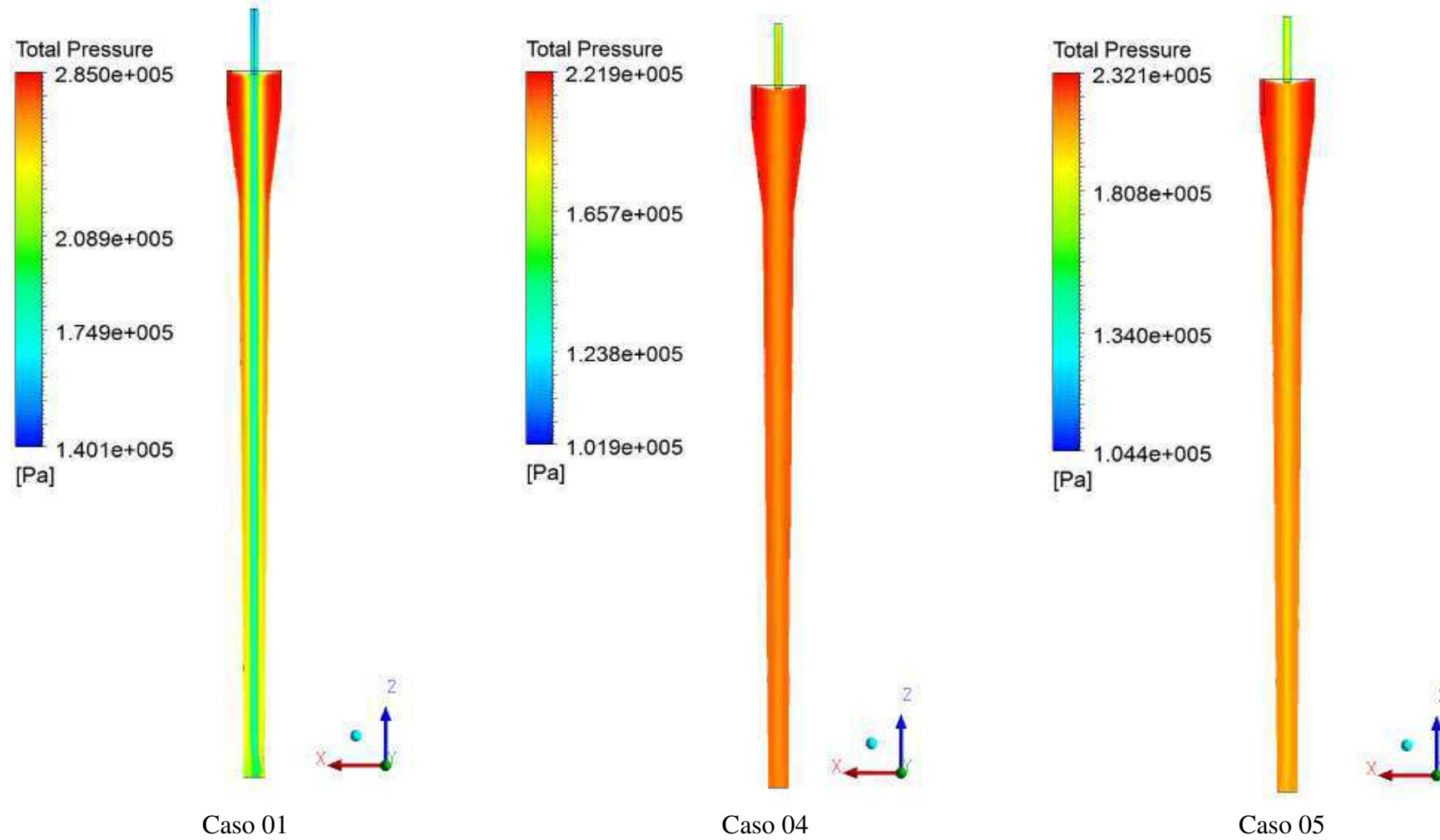
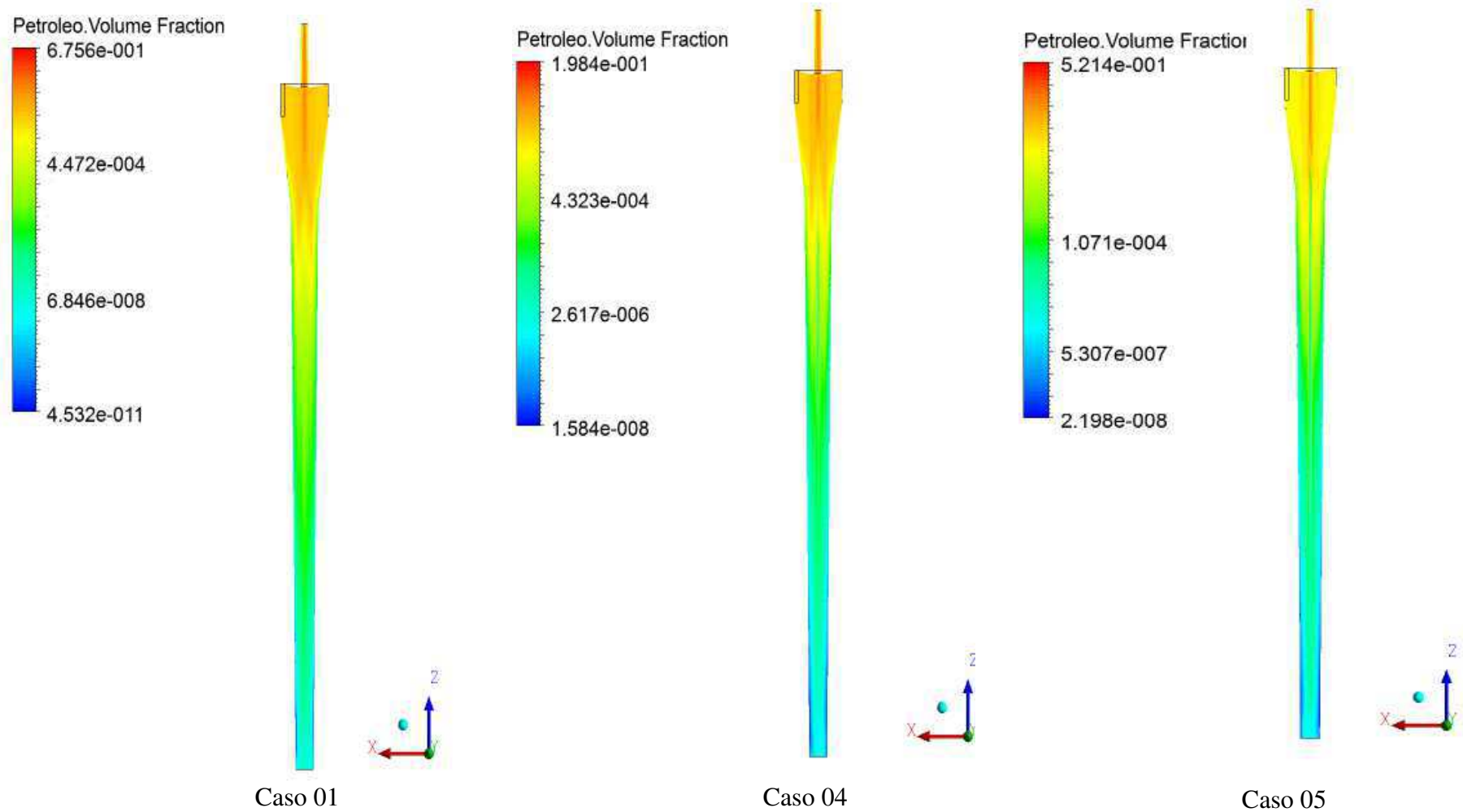


Figura 25 – Representação da distribuição da fração volumétrica de óleo ao longo do hidrociclone para diferentes variações de vazão de entrada.



- **Eficiência de remoção de óleo**

De acordo com a Tabela 7, observa-se a eficiência de remoção de óleo para os cinco casos analisados.

**Tabela 7 – Eficiência de remoção de óleo**

<b>Caso</b>	<b>Co (%)</b>	<b>Vazão de entrada (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Eficiência de separação</b>
Caso 01	1	6,5	99.999
Caso 02	5	6,5	99.986
Caso 03	10	6,5	99.925
Caso 04	1	4,5	99.999
Caso 05	1	7,5	99.996

A alta eficiência para os cinco casos, indica que o hidrociclone que vem sendo estudado por Marins (2007), Raposo (2008), Barbosa (2011) e do presente trabalho é um dispositivo de separação água/óleo adequado e eficiente.

Os resultados indicam que ao se alterar os processos operacionais, a eficiência de separação se manteve na ordem de 99,9% indicando que estes parâmetros tem pouca influência nesta configuração geométrica. Mas por que se tem esta alta eficiência, visto que em vários trabalhos publicados na literatura (Simões, 2005; Buriti, 2007; Souza, 2009, por exemplo) não atingem valores acima dos 70%? Uma resposta para este questionamento está relacionada com a forma geométrica do hidrociclone, ou seja, um corpo cônico longo possibilita o desenvolvimento de projeto de hidrociclones de alta eficiência. Para exemplificar este fato pode citar os trabalhos de Raposo (2008), Barbosa (2011), Amini et al. (2011), entre outros.

### 5. Conclusões

Com base nos resultados numéricos obtidos, pode-se concluir que:

- Ao variar as frações volumétricas do óleo percebe-se que quanto menor a concentração de óleo ( $C_o$ ), os resultados apresentam-se mais próximos do escoamento monofásico (água) reportado na literatura;
- Observa-se que a eficiência de separação aumenta com a diminuição da concentração de óleo, mas não significativamente, se mantendo praticamente constante;
- Com relação aos perfis de velocidade axial e velocidade tangencial, observou-se uma pequena divergência entre os resultados numéricos e os dados experimentais;
- Ao variar a vazão volumétrica, observou-se que quanto maior a vazão volumétrica de entrada no hidrociclone maiores as componentes de velocidade axial e tangencial;
- O modelo RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  modificado juntamente com as equações de conservação de massa e momento linear possibilitaram a previsão da dinâmica de escoamento no interior do hidrociclone com pequenas discrepâncias com relação ao que é observado experimentalmente.



## REFERÊNCIAS

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). SDP – Superintendência de desenvolvimento e produção. **Boletim da produção de Petróleo e gás natural**, Junho de 2012.

AMINI, S.; MOWLA, D.; GOLKAR, M. Developing a new approach for evaluating a de-oiling hydrocyclone efficiency, **Desalination**, v. 285, p. 131–137, 2011.

APOSTOLAKOU, A.A.; KOOKOS, L.K.; MARAZIOTI, C.; ANGELOPOLOUS, K.C. Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils. **Fuel Proc Technol**, 2009.

BAI, Z.; WANG, H.; TU, S. Experimental study of flow patterns in deoiling hydrocyclone. **Minerals Engineering**, v. 22, p 319 – 323, 2009.

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

BOZBAS K. Biodiesel as an alternative motor fuel: production and policies in the European Union. **Renew Sust Energy Rev**. p. 542–52, 2008.

BURITI, C.J.O. **Aplicação de um hidrociclone no processo de separação de fluidos multifásico óleo/água/areia durante produção de petróleo**. Monografia PRH-25/ANP-UFCG, 2009.

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.

HARGREAVES, J. H., SILVESTER, R.S. Computational fluid dynamics applied to the analysis of deoling hydroclone performance. **Institution of Chemical Engineers**, v. 68, part A, 1990.

HASHEMINEJAD, M.; TABATABAEI, M.; MANSOURPANAH, Y.; KHATAMI; FAR, M.; JAVANI, A. Upstream and downstream strategies to economize biodiesel production. **Bioresour Technol**, 2011.

HUSVEG, T., RAMBEAU, O., DRENGSTIG, T., BILSTAD, T. Performance of deoling hydrocyclone during variables flow rates. **Minerals Engineering** v. 20, p. 368 – 379, 2007.

HWANG, K.-J.; HWANG, Ya-Wen; YOSHIDA, H. Design of novel hydrocyclone for improving fine particle separation using computational fluid dynamics. **Chemical Engineering Science**, v. 85, p. 62 – 68, 2013.

KRAIPECH, W.; CHEN, W.; DYAKOWSKIC, T.; NOWAKOWSKI, A. The performance of the empirical models on industrial hydrocyclone design. **Int. J. Miner. Process.** v. 80, p. 100 – 115, 2006.

MARINS, L. P. M. **Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidrociclone sem núcleo gasoso**. Dissertação (Mestrado no programa de pós-graduação de Engenharia Mecânica) – UFRJ, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

MELO, E. M. **Estabilidade de emulsões de petróleo em sistemas pressurizados**. Dissertação (Mestrado no programa de pós-graduação de Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju, 2007.

MOREIRA, F. de S. **Alternativas tecnológicas para a maximização da produção de olefinas leves a partir de petróleos pesados**. Projeto de Final de Curso (Programa Eq-Anp. Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural) – UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

MOTHÉ, C. G.; SILVA, C. da S. Petróleo pesado e ultrapesado - reservas e produção mundial. **Revista TN Petróleo**, v. 57, p. 76 – 81, 2008.

MOUSAVIAN, S.M., NAJAFI, A.F. Numerical simulations of gas-liquid-solid flows in a hydrocyclone separator. **Arch Appl Mech** DOI 10.1007/s00419-008-0237-2. Springer-Verlag, 2008.

PESSÔA FILHO, de A. P.; SANTOS, F.L.S.; MANSOORI, G.A. An update on the developments in petroleum production research in Brazil. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. v. 51, p. 1 – 5, 2006.

RAPOSO, G. M. **Simulação numérica do escoamento em hidrociclone destinado a Aplicações de alto teor de óleo**. Dissertação (Mestrado no programa de pós-graduação de Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC, Rio de Janeiro, 2008.

ROSA, J.J. **Tratamento de efluentes oleosos por floculação pneumática em linha e separação por flotação: Processo FF**. Tese (Doutorado no programa de pós-graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – UFRGS, Porto Alegre, 2002.

SANTORI, G.; NICOLA, GIOVANNI D.; MOGLIE, M.; POLONARA, F.A. A review analyzing the industrial biodiesel production practice starting from vegetable oil refining. **Applied Energy**, v. 92, p. 109–132, 2012.

SILVA, A.L.F. da; FILHO, J.E. de S.; RAMALHO, J.B.V. da S.; MELO, M. de V.; LEITE, M. de M.; BRASIL, N. Í. do; PEREIRA JUNIOR, O. de A.; OLIVEIRA, R. C.G. de; ALVES, R. P.; COSTA, R. F.D.; KUNERT, R.; GOMES, W. Processamento

primário de petróleo. Kunert R, editor. Recursos Humanos. **Escola de Ciências e Tecnologias E&P**. Universidade Petrobras. Rio de Janeiro, 2007.

SIMÕES, A.M.B.M., FARIAS NETO, S.R., CAVALCANTI, R.S. Avaliação da intensidade turbilhonar em um corpo cilíndrico-cônico via CFX, In: **XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Curitiba, 2004.

SIMÕES, A.M.B.M. **Separação de água-óleo derramado no mar usando hidrociclone: Um estudo numérico da intensidade turbilhonar provocado pelo duto de alimentação**. Dissertação (Mestrado no programa de pós-graduação de Engenharia Química) – UFCG, Campina Grande – PB, 2005.

SOUZA, J. S. de. **Estudo numérico da termofluidodinâmica da separação de óleos pesados de uma corrente de águas oleosas via hidrociclone**. Dissertação (Mestrado no programa de pós-graduação de Engenharia Química) – UFCG, Campina Grande – PB, 2009.

SOUZA, J.A.R. **Secagem de sólidos via ciclones: modelagem e simulação**. Tese (Doutorado no programa de pós-graduação de Engenharia de Processos) – UFCG, Campina Grande – PB, 2012.

SPALART, P. R.; SHUR, M. On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature. **Aerospace Science and Technology**, v. 1, n. 5, p. 297 – 302, 1997. ISSN 1270-9638.

TAVARES K. Os efeitos do Consenso de Washington na economia brasileira, 2011. **Política e economia**. Disponível em: <http://www.politicaeconomia.com/2011/10/os-efeitos-do-consenso-de-washington-na.html>. Acessado em: 01.08.2013.

VIEIRA, L. G.M., SILVA, Jr C. A., DAMASCENO J.J.R., BARROZO M. A.S. A study of the fluid dynamic behaviour of filtering hydrocyclones. **Separation and Purification Technology**, v. 58, p. 282–287, 2007.

VIEIRA, L.G.M. **Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes**. Tese (Doutorado no programa de pós-graduação de Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2006.

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, China, 2010.