



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
LABORATÓRIO DE PESQUISA EM FLUIDODINÂMICA E IMAGEM



FLÁVIA DAYLANE TAVARES DE LUNA

**ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE UM SISTEMA
BIFÁSICO EM SEPARADOR CICLÔNICO**

Campina Grande-PB, Fevereiro/2014

FLÁVIA DAYLANE TAVARES DE LUNA

**ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE UM SISTEMA
BIFÁSICO EM SEPARADOR CICLÔNICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Química da Universidade Federal de
Campina Grande como requisito para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Modelagem e Simulação

Orientador: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

Campina Grande-PB, Fevereiro/2014



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L961e Luna, Flávia Daylane Tavares de.
Estudo numérico do processo de separação de um sistema bifásico em separador ciclônico / Flávia Daylane Tavares de Luna. – Campina Grande, 2014.
82 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto".
Referências.

1. Fluidodinâmica. 2. Águas Produzidas. 3. Hidrociclones. 4. CFX.
I. Farias Neto, Severino Rodrigues de. II. Título.

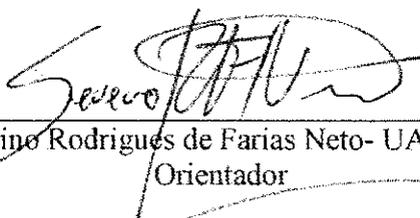
CDU 66.021.2(043)

FLÁVIA DAYLANE TAVARES DE LUNA

**ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE UM SISTEMA
BIFÁSICO EM SEPARADOR CICLÔNICO**

Dissertação aprovada em 20 de fevereiro de 2014.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto- UAEQ/CCT/UFCG
Orientador



Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima- UAEM/CCT/UFCG
Examinador Externo



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira- DESA/CCT/UEPB
Examinador Externo

Campina Grande-PB, Fevereiro/2014

RESUMO

LUNA, Flávia Daylane Tavares de. **Estudo numérico do processo de separação de um sistema bifásico em separador ciclônico.** Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, 2014. Dissertação (Mestrado).

O descarte de efluentes industriais no meio ambiente é uma problemática que vem despertando a atenção de engenheiros e pesquisadores. Na indústria de petróleo, as águas produzidas apresentam óleo em altas concentrações, fazendo com que o seu descarte provoque sérios problemas ao meio ambiente. Vários equipamentos de separação água/óleo apresentam dimensões que inviabilizam sua utilização em plataformas petrolíferas. Nessas situações tem-se utilizado equipamentos compactos a exemplo de separadores bifásicos e hidrociclones. O presente trabalho propõe estudar um separador água/óleo com princípios de funcionamento semelhantes ao hidrociclone tradicional, denominado separador ciclônico. Todas as simulações foram realizadas utilizando o pacote comercial Ansys CFX empregando o modelo de partícula para descrever o escoamento bifásico água-óleo e o modelo de turbulência RNG k- ϵ . Foi avaliada a dinâmica de escoamento, bem como a influência da vazão de alimentação e da concentração da mistura na eficiência de separação água/óleo usando o separador ciclônico. Os separadores ciclônicos propostos tendem a concentrar o óleo na região central desde o início do escoamento. Apresentando uma maior eficiência de separação, igual a 99,5%, para o caso de vazão de $9\text{m}^3/\text{h}$ e concentração de 5,0% de óleo na mistura alimentada no equipamento.

Palavras-chave: Águas Produzidas, Hidrociclones, CFX, Fluidodinâmica.

ABSTRACT

LUNA, Flávia Daylane Tavares de. **Numerical Study of the Separation Process of a Two-Phase System in the Cyclonic Separators.** Campina Grande: Post-Graduate in Chemical Engineering, Federal University of Campina Grande, 2014. Dissertation (Masters).

The disposal of industrial effluents into the environment is a problematic that has attracted the attention of engineers and researchers. In the petroleum industry, produced water contains oil in high concentrations, and your disposal causes serious problems to the environment. Several equipments of water/oil separation have dimensions that unfeasible its use on oil rigs. In these situations, have been used compact equipments such as two-phase separators and hydrocyclone. The present work proposes to study a water/oil separation equipment with operating principle similar to traditional hydrocyclone called cyclonic separator. All simulations were performed using the commercial package Ansys CFX using the particle model to describe the two-phase flow water/oil and the RNG $k-\epsilon$ turbulence model. Were evaluated the dynamics of flow, and the influence of feed flow rate and concentration of mixture on water/oil separation efficiency using the cyclonic separator. The proposed cyclonic separators tend to concentrate the oil in the central region since the beginning of the flow. Getting greater separation efficiency, equal to 99.5%, for the case of flow 9 m³/h oil concentration of 5.0 % in the mixture fed.

Keywords: Produced Water, Hydrocyclones, CFX, Fluid dynamics.

DEDICATÓRIA

A meus pais por todo o amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Todo Poderoso Deus, por estar presente em minha vida e tornar tudo possível. Por sempre me dar força e perseverança para enfrentar todos os desafios da jornada.

A minha Mãe, por todo o amor e dedicação que teve comigo, meu eterno agradecimento pelos momentos que estive ao meu lado, me apoiando e fazendo acreditar que nada é impossível.

Ao meu querido Pai, pelo exemplo de dignidade, de respeito e carisma que és para mim.

A minha irmã, minha segunda mãe, por todo o companheirismo e dedicação durante todos esses anos morando juntas. Por ter sido essa pessoa tão amável, tão carinhosa e ao mesmo tempo rigorosa, exigente. Enfim, tão Mãe! Essa vitória também é tua!

Ao meu namorado, Bruno, obrigada pelo teu carinho, tua atenção, tua vibração com as minhas conquistas e teu ombro em cada momento difícil que você ajudou a atravessar. Sem você, essa conquista não teria o mesmo gosto!

Ao meu orientador, professor e amigo, Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, pelos seus sábios ensinamentos, amizade, paciência, confiança.

Aos colegas e amigos que fazem parte do LPFI/ UAEG/ CCT/ UFCG e do LCTF/ UAEM/ CCT/ UFCG, que direta ou indiretamente colaboraram com esta pesquisa, pela convivência diária e constante troca de conhecimentos.

Um agradecimento especial ao amigo Prof. Dr. Enivaldo Santos Barbosa, por ter me passado seus conhecimentos de maneira tão dedicada, sem medir esforços.

Aos colegas e amigos de mestrado e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química que me ajudaram a trilhar esse caminho.

Dedico também um agradecimento à banca examinadora desta dissertação pelas discussões, comentários e sugestões a respeito deste trabalho.

Ao Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem, LPFI/UAEQ/UFMG e ao Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos, LCTF/UAEM/UFMG, que colocaram à minha disposição os recursos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo financiamento para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao CT BRASIL, CTPETRO, FINEP, PETROBRAS, RPCMOD e a Universidade Federal de Campina Grande pela parceria na realização deste trabalho.

“Não existem pessoas de sucesso e pessoas fracassadas, o que existem são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles”

Augusto Cury

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Produção mundial de óleo (a) 2007 e (b) 2012	5
Figura 3.2 Esquema típico de um reservatório de petróleo	6
Figura 3.3 Histórico e previsão da produção e injeção de água na Bacia de Campos	9
Figura 3.4 Esquema de um processo de produção com injeção de água	10
Figura 3.5 Esquema do processamento primário de petróleo	11
Figura 3.6 Primeira patente de ciclone, 1885	14
Figura 3.7 Representação geométrica do ciclone	15
Figura 3.8 Desenho esquemático do hidrociclone	16
Figura 3.9 Distribuição da velocidade axial em diferentes posições verticais	17
Figura 3.10 Perfil de velocidade axial para diferentes diâmetros (a) 50mm (b) 75 mm	18
Figura 3.11 Campo de velocidade tangencial em diferentes hidrociclones: a ₁ - Cilindro curto; a ₂ - Cilindro longo; b ₁ -Cone curto; b ₂ - Cone longo	19
Figura 3.12 Perfil de velocidade tangencial no hidrociclone	20
Figura 3.13 Perfil de velocidade radial utilizando o método LDA (a) Ausência de núcleo de ar (b) Presença de núcleo de ar	21
Figura 3.14 Perfil da velocidade radial	22
Figura 3.15 Descrição das importantes dimensões para a separação das famílias dos hidrociclones	23
Figura 3.16 Curva da eficiência granulométrica	25
Figura 3.17 Curva da eficiência granulométrica reduzida	27
Figura 3.18 Curva da eficiência granulométrica reduzida d/d'_{50}	27
Figura 3.19 Eficiência do ciclone em função da vazão de entrada	28
Figura 4.1 Descrição das entradas e saídas do separador ciclônico, (a) Separador A, (b) Separador B	39
Figura 4.2 Representação do separador ciclônico A	40
Figura 4.3 Representação do separador ciclônico B	41
Figura 4.4 Representação da estratégia de blocagem utilizada para a geração da malha do separador ciclônico	43
Figura 4.4 Malha: Separador ciclônico A	44
Figura 4.5 Malha: Separador ciclônico B	44

Figura 5.1 Linha de fluxo no interior do separador ciclônico A para vazão de entrada 9,0 m ³ /h e concentração volumétrica de óleo igual a 5,0%	49
Figura 5.2 Linha de fluxo no interior do separador ciclônico B para vazão de entrada 9,0 m ³ /h e concentração volumétrica de óleo igual a 5,0%	49
Figura 5.3 Linha de fluxo nas saídas do separador ciclônico A para a vazão de entrada igual a 9,0 m ³ /h e concentração volumétrica de óleo igual a 5,0%	50
Figura 5.4 Linha de fluxo nas saídas do separador ciclônico B para a vazão de entrada igual a 9,0 m ³ /h e concentração volumétrica de óleo igual a 5,0%	50
Figura 5.5 Representação do campo de pressão sobre os planos xz , para vazão de 9,0 m ³ /h e concentração volumétrica de 5,0% para o separador ciclônico A.....	51
Figura 5.6 Representação do campo de pressão sobre os planos xz , para vazão de 9,0 m ³ /h e concentração volumétrica de 5,0% para o separador ciclônico B	51
Figura 5.7 Representação do campo da componente da velocidade axial sobre os planos xz no separador ciclônico A para o caso estudado	52
Figura 5.8 Representação do campo da componente da velocidade axial sobre os planos xz no separador ciclônico B para o caso estudado	52
Figura 5.9 Vetores da velocidade da água, (a) Separador ciclônico A, (b) Destaque das saídas, (c) Destaques das entradas.....	53
Figura 5.10 Vetores da velocidade da água, (a) Separador ciclônico B, (b) Destaque das saídas, (c) Destaques das entradas.....	54
Figura 5.11 Representação do campo da componente da velocidade tangencial sobre os planos xz no separador ciclônico A para o caso estudado	56
Figura 5.12 Representação do campo da componente da velocidade tangencial sobre os planos xz no separador ciclônico B para o caso estudado	56
Figura 5.13 Representação do campo de concentração de óleo para o caso de vazão de 9,0 m ³ /h no separador ciclônico A sobre os planos (a) xz; (b) xy em z = 60 mm; (c) xy em z = 200 mm; (d) xy em z = 700 mm e (e) xy em z = 775 mm	57
Figura 5.14 Representação do campo de concentração de óleo para o caso de vazão de 9,0 m ³ /h no separador ciclônico A sobre os planos (a) xz; (b) xy em z = 60 mm; (c) xy em z = 200 mm; (d) xy em z = 700 mm e (e) xy em z = 775 mm	58
Figura 5.15 Localização das linhas de estudo. (a) Separador ciclônico A; (b) Separador ciclônico B	59
Figura 5.16 Análise da influência da vazão de entrada no perfil de pressão no separador ciclônico A (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm	60

Figura 5.17 Análise da influência da vazão de entrada no perfil de pressão no separador ciclônico B (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c)700 mm e (d) 775 mm	61
Figura 5.18 Análise da influência da vazão de entrada no perfil da velocidade axial para o separador ciclônico A (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c)700 mm e (d) 775 mm	62
Figura 5.19 Análise da influência da vazão de entrada no perfil da velocidade axial para o separador ciclônico A (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c)700 mm e (d) 775 mm	63
Figura 5.20 Análise da influência da concentração do óleo no perfil de velocidade axial para o separador ciclônico A (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm	64
Figura 5.21 Análise da influência da concentração do óleo no perfil de velocidade axial para o separador ciclônico A (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm	65
Figura 5.22 Análise da influência da vazão de entrada no perfil de velocidade tangencial para o separador ciclônico A (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm	66
Figura 5.23 Análise da influência da vazão de entrada no perfil de velocidade tangencial para o separador ciclônico B (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm	67
Figura 5.24 Análise da influência da concentração volumétrica no perfil de velocidade tangencial para o separador ciclônico A (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c)700 mm e (d) 775 mm	68
Figura 5.25 Análise da influência da concentração volumétrica no perfil de velocidade tangencial para o separador ciclônico B (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c)700 mm e (d) 775 mm	69
Figura 5.26 Análise da influência da vazão na concentração do óleo no centro do separador ciclônico A (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm	70
Figura 5.27 Análise da influência da vazão na concentração do óleo no centro do separador ciclônico B (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm.	71
Figura 5.28 Eficiência de separação em função da vazão de alimentação no separador ciclônico B	71
Figura 5.29 Eficiência de separação em função da concentração volumétrica do óleo no separador ciclônico B	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Classificação dos tipos de óleo a partir dos valores de °API	5
Tabela 3.2 Proporções geométricas das famílias de hidrociclones	23
Tabela 4.1 Propriedades físicas dos fluidos em estudos	47
Tabela 4.2 Casos estudados	47
Tabela 5.1 Valores das vazões volumétricas dos fluidos na entrada e saída e a concentração do óleo na entrada e saída para o separador ciclônico A	72
Tabela 5.2 Valores das vazões volumétricas dos fluidos na entrada e saída e a concentração do óleo na entrada e saída para o separador ciclônico B	72
Tabela 5.3 Valores das eficiências para os casos estudados no separador ciclônico A	47
Tabela 5.4 Valores das eficiências para os casos estudados no separador ciclônico B	47

LISTA DE SIGLAS

API - *American Petroleum Institute*

ASTM- *American Society for Testing and Materials*

BS&W -*Basic Water and Sediment*

CFD - *Computational Fluid Dynamics*

CETEPRO – *Centro Técnico de Ensino Profissionalizante*

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente

GB - Gigabyte

HD – *Hard Disk*

LCTF - Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos

LPFI – Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem

PETROBRAS S.A. – Petróleo Brasileiro S.A.

RNG – *Renormalization Group*

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande

NOMENCLATURA

Letras Latinas

$A_{\alpha\beta}$	Densidade de área interfacial	$[m^{-1}]$
C	Constante positivo	$[-]$
C_1	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	$[-]$
C_{IRVG}	Constante do modelo de turbulência RNG $k-\varepsilon$	$[-]$
C_2	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	$[-]$
c_μ	Constante empírica do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	$[-]$
c_α	Constante empírica do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	$[-]$
C_D	Coefficiente de arraste	$[-]$
d	Diâmetro da fase dispersa	$[m]$
f	Fração volumétrica	$[-]$
f_α	Fração volumétrica da fase <i>alfa</i>	$[-]$
f_β	Fração volumétrica da fase <i>beta</i>	$[-]$
f_o	Fração volumétrica de óleo	$[-]$
f_a	Fração volumétrica de água	$[-]$
G_α	Geração de energia cinética turbulenta no interior da fase <i>alfa</i>	$[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-3}]$
g	Aceleração da gravidade terrestre	$[m \cdot s^{-2}]$
k	Energia cinética turbulenta	$[m^2 \cdot s^{-2}]$
k_α	Energia cinética turbulenta para fase <i>alfa</i>	$[m^2 \cdot s^{-2}]$
m	Coefficiente positivo	$[-]$
M_α	Forças interfaciais agindo na fase <i>alfa</i>	$[N \cdot m^{-2}]$
P_α	Pressão da fase α	$[Pa]$
r	Posição radial no tubo	$[m]$
S_α	Termo fonte de energia	$[kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-3}]$
S_M	Fonte de momento devido à força de corpo externa	$[N]$
$S_{MS\alpha}$	Fonte de massa específica	$[N \cdot m^{-3}]$
\vec{U}	Vetor velocidade	$[m \cdot s^{-1}]$
U	Velocidade	$[m \cdot s^{-1}]$
\vec{U}_α	Vetor velocidade da fase <i>alfa</i>	$[m \cdot s^{-1}]$
\vec{U}_β	Vetor velocidade da fase <i>beta</i>	$[m \cdot s^{-1}]$
\bar{u}	Velocidade média	$[m \cdot s^{-1}]$

v_r Velocidade radial $[m \cdot s^{-1}]$

Letras Gregas

α, β, γ	Fases envolvidas	$[-]$
ε	Taxa de dissipação turbulenta	$[m^2 \cdot s^{-3}]$
ε_α	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta da fase <i>alfa</i>	$[m^2 \cdot s^{-3}]$
ϕ	Quantidade transportada em um processo	$[-]$
ϕ_α	Quantidade da fase <i>alfa</i> transportada no processo	$[-]$
ρ	Densidade	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_α	Densidade da fase <i>alfa</i>	$[kg \cdot m^{-3}]$
μ	Viscosidade dinâmica	$[Pa \cdot s]$
μ_α	Viscosidade dinâmica da fase <i>alfa</i>	$[Pa \cdot s]$
$\mu_{\alpha\beta}$	Viscosidade da mistura	$[Pa \cdot s]$
$\mu_{t\alpha}$	Viscosidade turbulenta	$[Pa \cdot s]$
σ_k	Constante do modelo de turbulência <i>k-ε</i>	$[-]$
σ_ε	Constante do modelo de turbulência <i>k-ε</i>	$[-]$
Γ	Taxa de fluxo de massa por unidade de volume	$[kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}]$
$\Gamma_{\alpha\beta}$	Termo de difusividade	$[kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}]$
$\Gamma_{\alpha\beta}^+$	Taxa positiva de fluxo de massa por unidade de volume da fase <i>beta</i> para a fase <i>alfa</i>	$[kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}]$
$\Gamma_{\beta\alpha}^+$	Taxa positiva de fluxo de massa por unidade de volume da fase <i>alfa</i> para a fase <i>beta</i>	$[kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}]$

Letras Especiais

∇	Operador nabla	$[-]$
$\frac{\partial}{\partial t}$	Derivada parcial com relação ao tempo	$[s^{-1}]$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. Objetivo Geral	2
2.2. Objetivos Especificos	2
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1. Petróleo.....	4
3.1.1. Ocorrências e Produção	6
3.2. Águas Produzidas	7
3.2.1. Impactos Ambientais	8
3.3. Processamento Primário	11
3.4. Ciclones	13
3.4.1. Histórico do Ciclone.....	13
3.4.2. Funcionamento do ciclone.....	15
3.4.2.1 Componente Axial da Velocidade.....	17
3.4.2.2 Componente Tangencial da Velocidade	19
3.4.2.3 Componente Radial da Velocidade	20
3.4.3. Classificação do Ciclone	22
3.4.4. Vantagens e Desvantagens	23
3.4.5. Critérios para Avaliação de Desempenho do Ciclone	24
3.4.5.1 Eficiência de Separação.....	24
3.4.5.2. Outros Fatores de Influência na Eficiência do Ciclone	26
3.5. Fluidodinâmica Computacional.....	29
3.6. Equacionamento do escoamento Multifásico	30
3.6.1. Abordagem Euleriana-Euleriana	30
3.6.2. Abordagem Euleriana-Lagrangeana.....	31
3.6.3. Equação da Conservação de Massa.....	31
3.6.4. Equação da Quantidade de Movimento.....	31
3.6.5. Modelo de Turbulência.....	32
3.6.5.1 Modelo k-ε.....	34

3.6.5.2 Modelo RNG k- ϵ	35
3.6.5.3 Turbulência na Fase Dispersa	37
4. METODOLOGIA	38
4.1. Programa e Poder Computacional	38
4.2. Geometrias	38
4.3. Malhas	42
4.4. Modelagem Matemática	44
4.4.1. Equação da Conservação de Massa	45
4.4.2. Equação da Quantidade de Movimento	45
4.4.3. Modelo de Turbulência	45
4.4. Condições de Contorno	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1. Resultados Qualitativos	48
5.1.1. Linhas de Fluxo	48
5.1.2. Campo de Pressão	50
5.1.3. Comportamento da Velocidade	51
5.1.4. Comportamento da Fração Volumétrica de Óleo	57
5.2. Resultados Quantitativos	58
5.2.1. Perfil de Pressão	59
5.2.1.1 Influência da Vazão de Entrada no Perfil de Pressão	60
5.2.2. Perfis de Velocidade Axial	61
5.2.2.1 Influência da Vazão de Entrada no Perfil de Velocidade Axial	61
5.2.2.2. Influência da Concentração Volumétrica de Óleo na Velocidade Axial	63
5.2.3. Perfis de Velocidade Tangencial	65
5.2.3.1 Influência da Vazão de Entrada no Perfil de Velocidade Tangencial	65
5.2.3.2 Influência da Concentração Volumétrica do Óleo no Perfil de Velocidade Tangencial	67
5.2.3. Perfis de Concentração de Óleo	69
5.2.3.1 Influência da Vazão Volumétrica de entrada no Perfil de Concentração de óleo	69
5.2.4. Eficiência de Separação	71

5.2.4.1. Influência da Vazão Volumétrica da Mistura na Alimentação sobre a Eficiência de Separação	73
5.2.4.2 Influência da Concentração Volumétrica de Óleo na Entrada sobre a Eficiência de Separação	74
6. CONCLUSÕES	76
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
REFERÊNCIAS	78

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas das indústrias está no tratamento de seus efluentes antes de seu descarte no meio ambiente ou em sistema de esgotamento público. Grande parcela dos rejeitos da indústria de petróleo, metalúrgica, automobilísticas entre outras apresentam em sua composição a presença de partículas sólidas e líquidos imiscíveis, que podem favorecer a formação de emulsões. Estas por sua vez podem ser definidas como sendo uma mistura de líquidos imiscíveis, na qual apresenta um deles na forma de gotículas com dimensões de 50 μm ou menos (fase dispersa) no seio do outro líquido (fase contínua).

Especificamente na indústria do petróleo, a presença de óleos nas águas produzidas (água obtida junto com o petróleo, doravante denominada “água produzida”) é uma situação bastante comum, proporcionando assim uma preocupação contínua da qualidade das águas que são descartadas com o intuito de assegurar a integridade do ecossistema. O descarte ou o reaproveitamento dessas águas só podem ser feito dentro de determinadas especificações, regulamentadas por órgão de controle do meio ambiente que limita a quantidade de poluentes nos efluentes aquosos. No Brasil, de acordo com o Artigo 5 da resolução do CONAMA nº 393/2007, o descarte de água produzida deverá obedecer à concentração média aritmética simples mensal de óleos e graxas de até 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L.

Neste sentido a indústria petrolífera vem empregando diferentes processos de separação a exemplo da decantação, coagulação/floculação, filtração, adsorção, centrifugação, tratamentos térmicos, entre outros. Dentre os diferentes equipamentos utilizados pode ser destacado o hidrociclone, tendo em vista as inúmeras vantagens por ele apresentada, por exemplo: alta capacidade de processamento, baixa manutenção, unidades menores e baixos tempos de residência, baixo custo de implantação e manutenção, entre outras.

Todavia, estes dispositivos têm apresentado uma deficiência no que diz respeito ao atendimento das especificações dos órgãos ambientais, ou seja, a água tratada ainda apresenta uma concentração de óleo superior a 29 mg/L.

Assim sendo, a proposta do presente trabalho é propor a configuração de um dispositivo que disponha dos princípios disponibilizados pelo hidrociclone, bem como pelo espaço cônico. A configuração proposta possibilitará a formação de um núcleo de óleo estável no centro do dispositivo.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Propor e avaliar dois novos equipamentos de separação água/óleo com geometrias diferenciadas do hidrociclone tradicional usando CFD.

2.1. Objetivos Específicos

- Propor um modelo matemático, capaz de avaliar o processo de separação água/óleo utilizando os separadores propostos;
- Confeccionar as geometrias e gerar malhas estruturadas representativas dos separadores ciclônicos utilizando o ICEM-CFD 12.1;
- Analisar as distribuições de velocidade, de pressão, de fração volumétrica e a eficiência de separação água/óleo ao utilizar os separadores ciclônicos;
- Avaliar a influência do fluxo de alimentação e da concentração da mistura sobre a eficiência de separação água/óleo;
- Comparar metodologias de cálculos da eficiência de separação dos fluidos.

CAPÍTULO 3

REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Petróleo

De acordo com a *ASTM (American Society for Testing and Materials)*: “O petróleo é uma mistura de ocorrência natural, consistindo predominantemente de hidrocarbonetos e derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados e/ou oxigenados, o qual é, ou pode ser removido da terra no estado líquido”. O petróleo é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e de cor variando entre o negro e o castanho escuro (SALVO, 2009). É encontrado em equilíbrio com o gás natural, água e impurezas, e contém certa quantidade de gás dissolvido (gás em solução) e água emulsionada (ANDRADE, 2004).

Os principais grupos de componentes do óleo são formados de hidrocarbonetos saturados, hidrocarbonetos aromáticos, resinas e asfaltenos. Nos hidrocarbonetos gasosos (moléculas com até quatro carbonos) são encontrados quantidades consideráveis de nitrogênio, dióxido de carbono e ácido sulfídrico. Nos hidrocarbonetos líquidos, há a presença de enxofre, oxigênio e nitrogênio, na forma elementar ou associada às moléculas de hidrocarbonetos.

O Instituto Americano de Petróleo utiliza o °API, que é uma análise na escala hidrométrica, para classificar o tipo de óleo a partir dos valores padrões da densidade relativa dos óleos, conforme observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Classificação do tipo de óleo a partir dos valores de °API

Classificação	Faixas de °API
Óleos leves	45,5 < °API < 31,1
Óleos pesados	30,2 < °API < 22,3
Óleos extra pesados	21,5 < °API < 10,0
Betume natural	6,5 < °API < 0,1

Fonte: Buriti (2009).

Por apresentar um alto valor comercial e baixo custo de produção, os óleos convencionais têm predominado ao longo de toda a história da indústria de petróleo. Porém, esses óleos estão se exaurindo, como apresentado na Figura 3.1, e por isso que as empresas vêm se interessando pelos óleos pesados, mesmo sabendo que eles têm um menor valor financeiro agregado, por apresentarem uma alta viscosidade, o que induz uma elevada perda de carga, exigindo elevada potência de bombeamento para assegurar uma vazão de escoamento.



Figura 3.1: Produção mundial de óleo (a) 2007; (b) 2012

Fonte: Alboudwarej *et al.* (2007).

Segundo Alboudwarej *et al.* (2007), apesar dessas dificuldades com os óleos pesados, as empresas possuem interesse nesse tipo de óleo, porque na situação econômica atual, os reservatórios de óleos pesados podem ser explorados satisfatoriamente e são abundantes. O CEPETRO, Centro de Estudos de Petróleo da Universidade Estadual de Campinas, afirma que os óleos pesados e extrapesados somam 6 trilhões de barris cerca de três vezes maior que o total de óleo convencional.

3.1.1. Ocorrência e Produção

O petróleo é formado pela decomposição de grandes quantidades de material vegetal e animal que, sobre ação da pressão e calor gera misturas de hidrocarbonetos.

Geralmente, o petróleo depois de formado não se acumula na rocha na qual foi gerado, migra sobre ação de pressões do subsolo, até encontrar uma rocha porosa, que, se cercada por uma rocha impermeável (rocha selante), aprisiona o petróleo em seu interior. E é a partir deste reservatório que o petróleo é extraído.

Dependendo da pressão e do local em que se encontra o petróleo acumulado, é comum encontrar o gás natural ocupando a parte mais alta do interior do reservatório, e o petróleo e a água salgada ocupando as partes mais baixas, em função da diferença de densidade e da imiscibilidade entre as fases, como apresentado na Figura 3.2.

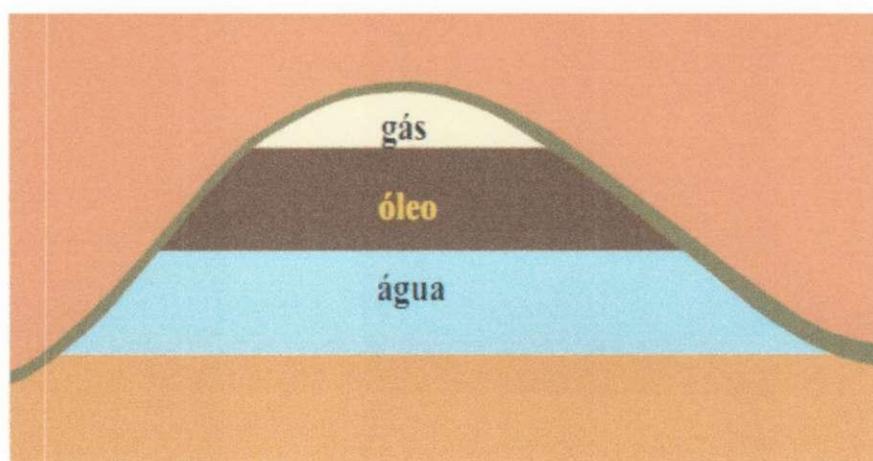


Figura 3.2: Esquema típico de um reservatório de petróleo.
Fonte: Petrobrás (2007).

Por conta da disposição das fases no reservatório e das condições necessárias para a produção, não apenas petróleo e gás são produzidos, mas também água e sedimentos (areia e outras impurezas sólidas em suspensão, como material de corrosão, produtos de incrustação, por exemplo) em quantidades variadas. Além destes, deve-se considerar que outros compostos não hidrocarbônicos também podem estar presentes no sistema, tais como os contaminantes CO_2 e H_2S , na fase gasosa ou mesmo dissolvidos na fase líquida.

Nenhuma destas fases (óleo e gás) é produzida isoladamente. O gás é produzido em quantidade e composição variada e percorre as tubulações de produção como bolhas

arrastadas no óleo. Alternativamente, gotículas de óleo podem ser arrastadas como névoa no gás.

A água de formação, denominada de águas produzidas, pode ser levada pelo gás na forma de vapor. Quando no estado líquido, pode ser produzida como água livre, dissolvida ou emulsionada como gotículas dentro do óleo. Mesmo a água livre separada, além dos sais presentes, contém sedimentos, gases dissolvidos e óleo arrastado. Por esse motivo, dentre todos os contaminantes esta é a mais indesejada e de maior dificuldade de ser removida, devido à quantidade ou à forma (emulsionada) em que pode estar presente na fase líquida.

3.2. Águas Produzidas

A água presente nos fluidos produzidos pode ter duas origens.

- a) Proveniente do próprio reservatório;
- b) Introduzida no sistema produtor em consequência da utilização de processos de recuperação secundária, tais como injeção de água ou vapor.

No início da produção de um reservatório, o teor de água no petróleo produzido tende a ser zero. Porém, com a continuidade da produção, este teor tende a aumentar, sendo comum ultrapassar 50%. A água produzida pode se aproximar de 100% à medida que o poço chega ao fim de sua vida produtiva. Quando a produção de petróleo é acompanhada de elevados teores de água, diz-se que o campo é maduro, sendo este teor avaliado pelo ensaio de BS&W (*Basic Water and Sediment*) que determina também o teor de sedimentos. A Figura 3.3 mostra um quadro com o histórico e a previsão de produção e injeção de água num sistema produtor típico da Bacia de Campos.

No reservatório as fases água e óleo encontram-se separadas. No entanto, em função da forte agitação imposta ao longo do processo de elevação e do intenso cisalhamento causado pela forte despressurização, podem-se formar emulsões. A Figura 3.4 mostra um sistema de produção com injeção de água do mar.

Segundo Silva (2000), as águas produzidas contêm diversos elementos, que a torna potencialmente perigosas ao meio ambiente. O local de descarte deve ser avaliado, para verificar os possíveis impactos ambientais.

3.2.1. Impactos Ambientais

A água produzida além de não apresentar nenhum valor econômico, apresenta sais em sua composição, tais como cloretos, sulfatos e carbonatos de sódio, cálcio, bário e magnésio, dentre outras espécies químicas, que podem provocar a corrosão e a formação de depósitos inorgânicos nas instalações de produção, transporte e refino.

As emulsões de petróleo apresentam viscosidade muito superior a do petróleo desidratado, afetando, portanto as operações de elevação e escoamento em função do aumento das perdas de carga, que podem levar a queda da eficiência do sistema de bombeio e transferência.

Além do mais, caso essas emulsões sejam desestabilizadas durante o transporte do fluido, poderá haver um aumento da taxa de corrosão dos dutos e um aumento de depósitos inorgânicos, incrustações, em função do aparecimento de águas livres contendo sais em sua composição. Outro problema é a produção de hidratos, que poderá bloquear as linhas de produção.

No Brasil, em relação ao descarte da água oleosa, o órgão responsável pela fiscalização é o Ministério do Meio Ambiente pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Até agosto de 2007 a resolução que dispunha "*sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamentos de efluentes, e dá outras providências* " era a resolução CONAMA nº 357 de Março de 2005, a qual havia revogado a antiga resolução CONAMA nº 20 de 1986. Em resumo, o CONAMA determinava, que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderiam ser lançados, diretamente ou indiretamente, nos corpos d'água desde que o teor de óleo mineral fosse inferior a 20 mg/L. Este valor era mais restritivo que os limites adotados, por exemplo, nos Estados Unidos, onde o teor de óleo médio mensal não deve ultrapassar 29 mg/L (THOMAS *et al.*, 2004).

Em agosto de 2007, uma nova resolução foi publicada, CONAMA nº 393 de 2007, a qual "*Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataforma marítima de petróleo e gás natural, e dá outras providências* ". O descarte de água produzida deve obedecer a concentração média aritmética simples mensal de óleo de 29 mg/L, não podendo ultrapassar o limite diário de 42 mg/ L (REGO, 2008).

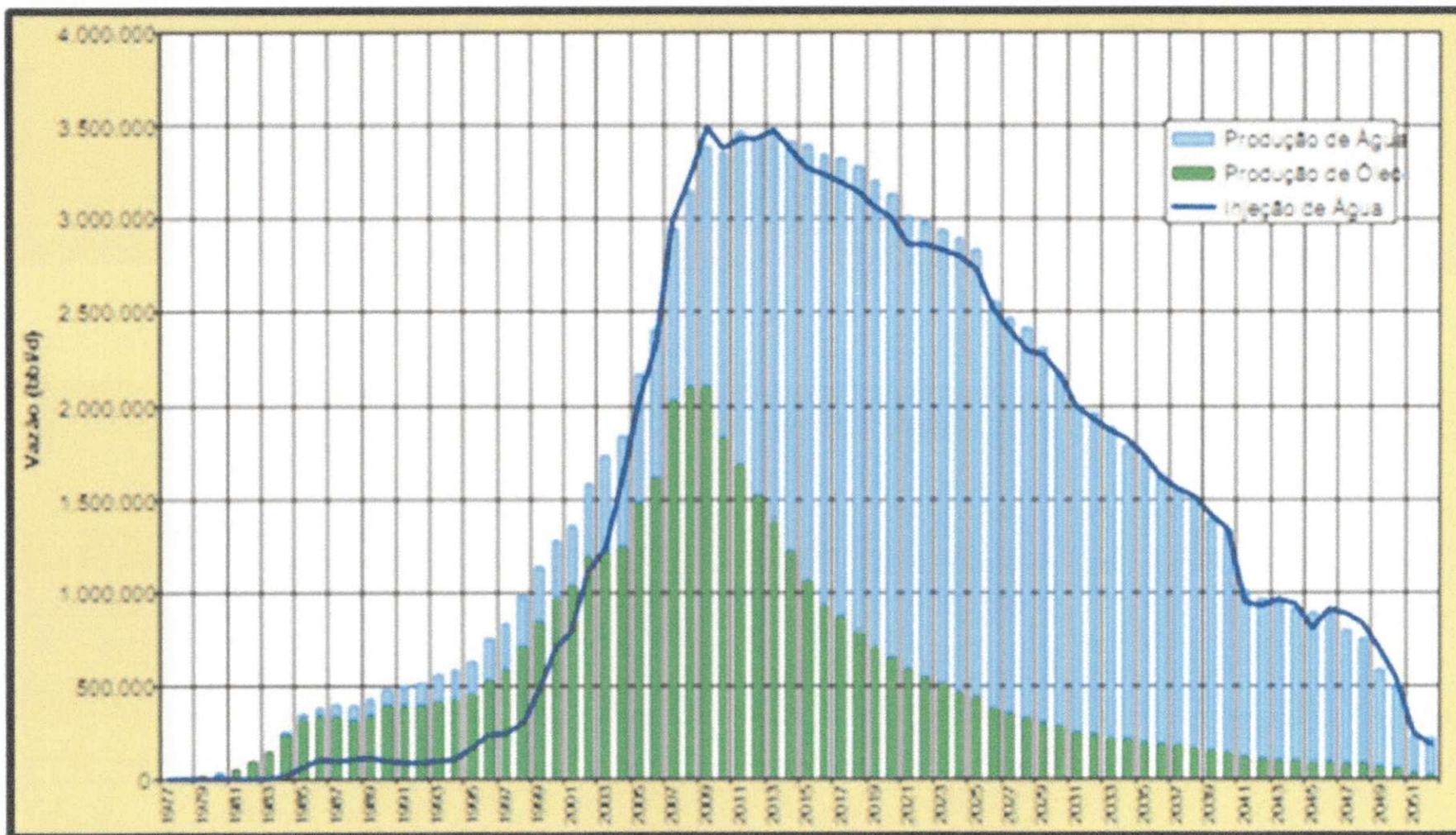


Figura 3.3: Histórico e previsão da produção e injeção de água na Bacia de Campos
 Fonte: Petrobrás (2007).

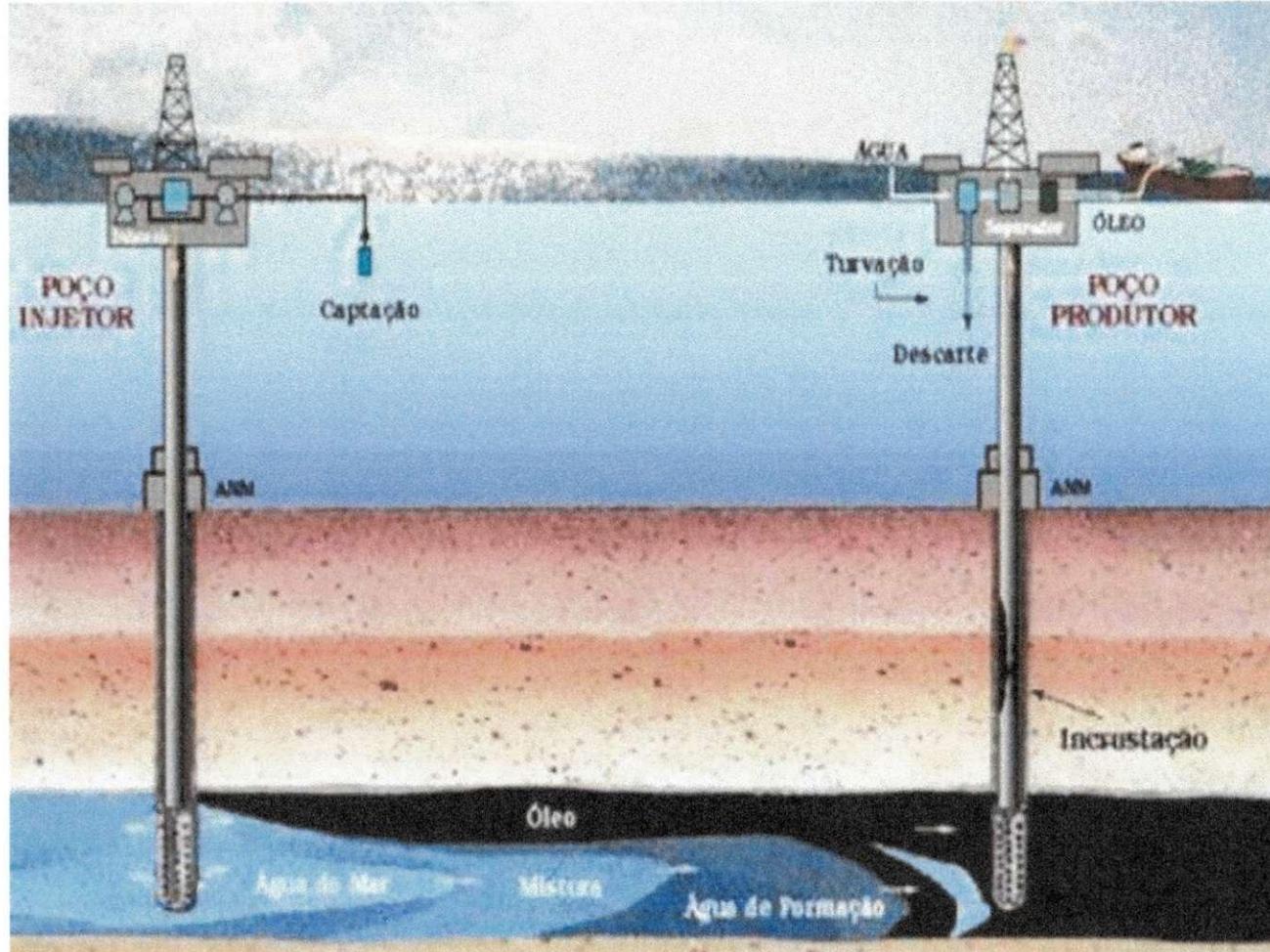


Figura 3.4: Esquema de um processo de produção com injeção de água.
 Fonte: Petrobrás (2007).

Diante disso, se faz necessário um tratamento do petróleo na própria plataforma de extração, tratamento esse denominado de processamento primário de petróleo.

3.3. Processamento Primário

As correntes de fluidos de diferentes poços que chegam através dos *manifolds* de produção até a superfície não se encontram ainda adequadas à utilização ou exportação. Como o interesse econômico é somente na produção de hidrocarbonetos, há necessidade de colocar nos campos, as instalações destinadas a efetuar o processamento primário dos fluidos, ou seja, a separação gás/óleo/água, como apresentado na Figura 3.5.

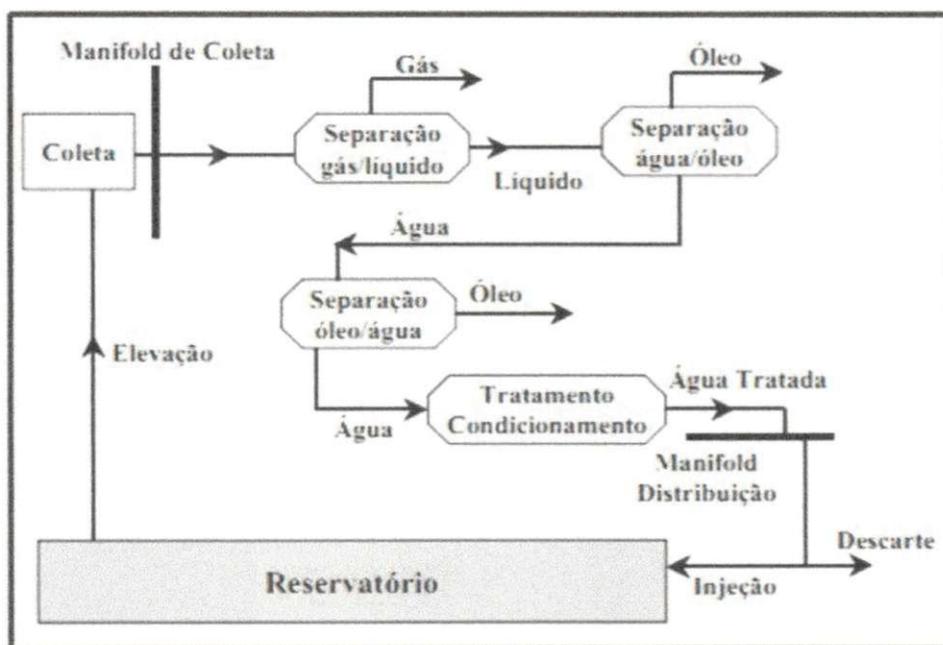


Figura 3.5: Esquema do processamento primário de petróleo.

Fonte: Adaptado de Petrobrás (2007).

Assim, o processamento primário da produção tem como finalidades:

- Promover a separação óleo/gás/água;
- Tratar ou condicionar os hidrocarbonetos para que possam ser transferidos para as refinarias ou Unidades de Processamento de Gás Natural;
- Tratar a água para que seja destinada à condição ambiental e tecnicamente mais aceitável (descarte ou reaproveitamento).

Para realizar essa separação inúmeras técnicas têm sido estudadas e utilizadas, dentre as quais, segundo Barillas (2005), Buriti (2009) e Freitas (2009), as mais importantes são:

a) **Sedimentação:** Consiste em deixar a gravidade atrair para o fundo do recipiente a substância mais densa e as mais leves são removidas. As principais desvantagens desse método são quando as partículas são muito pequenas necessita-se de um maior tempo de residência ou de adição de algum produto que as aglomere, além de necessitar de um grande espaço físico. Apesar dessas desvantagens é um processo bastante utilizado, devido ao seu baixo custo de operação.

b) **Centrifugação:** A mistura é inserida numa centrífuga que por sua vez, é submetida a altas rotações fazendo com que a parte mais densa acumule-se no fundo, ou seja, é um processo visando acelerar a decantação.

Fernandes Júnior (2006) utilizou o método de misturador-decantador de inversão de fases no tratamento de águas produzidas na indústria de petróleo, obtendo bons resultados na separação das duas fases para baixas concentrações de óleo (30 a 150 mg/L), concluindo que o processo pode ser uma boa alternativa no tratamento de águas oleosas.

c) **Filtração:** Consiste na separação mecânica das partículas sólidas de uma suspensão líquida ou gasosa por meio de um leito poroso na qual ocorre a retenção. Sobre o meio poroso é depositado as partículas de diâmetro maior, formando outro meio poroso. Uma desvantagem do processo de separação via filtração é que a vida útil da membrana é curta, então se torna um processo caro.

d) **Adsorção:** Processo no qual uma substância, gás ou líquido, adere à superfície de outra substância sólida. Pode ser um processo químico ou físico. Na adsorção química, há a reação da substância adsorvida com a superfície do adsorvente. Na adsorção física não há reação química, as moléculas são adsorvidas através das forças de Van der Waals, podendo ter várias camadas de moléculas adsorvidas.

e) **Flotação:** Consiste nas seguintes etapas – Geração de bolhas de gás no interior do efluente, colisão entre essas bolhas, adesão das bolhas de gás nas gotas de óleo e partículas de sólido. Como as fases gás e óleo são menos densas que a água, ambas tenderá ascender para a superfície e assim o óleo poderá ser removido. É um processo bastante utilizado nas refinarias de petróleo, graças a seu baixo custo operacional e elevada eficiência de separação.

f) Separação via ciclone: Consiste em uma separação devido às forças centrípeta, gravitacional e arrasto atuando sobre as partículas. É um processo eficiente, com baixo custo operacional e requer pouco espaço físico para operar. Por isso, é bastante utilizado nas plataformas de exploração de petróleo.

Nunes (2005) aborda a separação trifásica, para o tratamento de águas oleosas, executada em um processo compacto composto por arranjos de hidrociclone, coalescedores eletrostático e vasos gravitacionais. Segundo o autor, o arranjo dos equipamentos faz com que a perda de carga se localize nos hidrociclones, aproveitando, assim a energia de pressão do fluido na geração dos campos centrífugos, a passagem do fluido por sucessivos campos centrífugos provoca a coalescência das gotas dispersas, melhorando o desempenho. Concluindo que, a separação trifásica proposta resulta em ganhos nos custos devido a menor carga e área ocupada sobre o convés da unidade de produção.

3.4. Ciclone

3.4.1. Histórico do Ciclone

Os ciclones estão dentre os equipamentos mais utilizados para a separação de particulados. A sua patente ocorreu em 1885 por John M. Finch nos Estados Unidos, o qual foi chamado de “*Dust Collector*”, como apresentado na Figura 3.6 (HOFFMANN e STEIN, 2008; SALVO, 2009).

Porém, o uso dos hidrociclones em indústria de extração e processamento de minérios só teve início após a Segunda Guerra Mundial, ganhando posteriormente espaço nas indústrias químicas, petroquímicas, geração de energia, metalúrgica, entre outras (FREITAS, 2009).

O uso do hidrociclone para o tratamento de águas oleosas ocorreu na década de 70, motivado pelo acidente que ocorreu com um petroleiro, que resultou em um vazamento de uma carga de 227 mil toneladas de óleo nas costas da Cornuália. Posteriormente, o governo britânico incentivou as entidades de pesquisa para o desenvolvimento de um equipamento que permitisse tratar a água oleosa, dividindo em uma corrente de níveis de concentração de óleo elevados, e outra praticamente isenta de óleo, para que a última possa ser devolvida ao mar (FREITAS, 2009). O Professor Martin Thew da Universidade Southampton, na Inglaterra, foi

o pioneiro desse trabalho, desenvolvendo um equipamento de separação, que veio a ser conhecido como “Hidrociclone Colm-Thew” no final da década de 70 (MORAES, 2006).

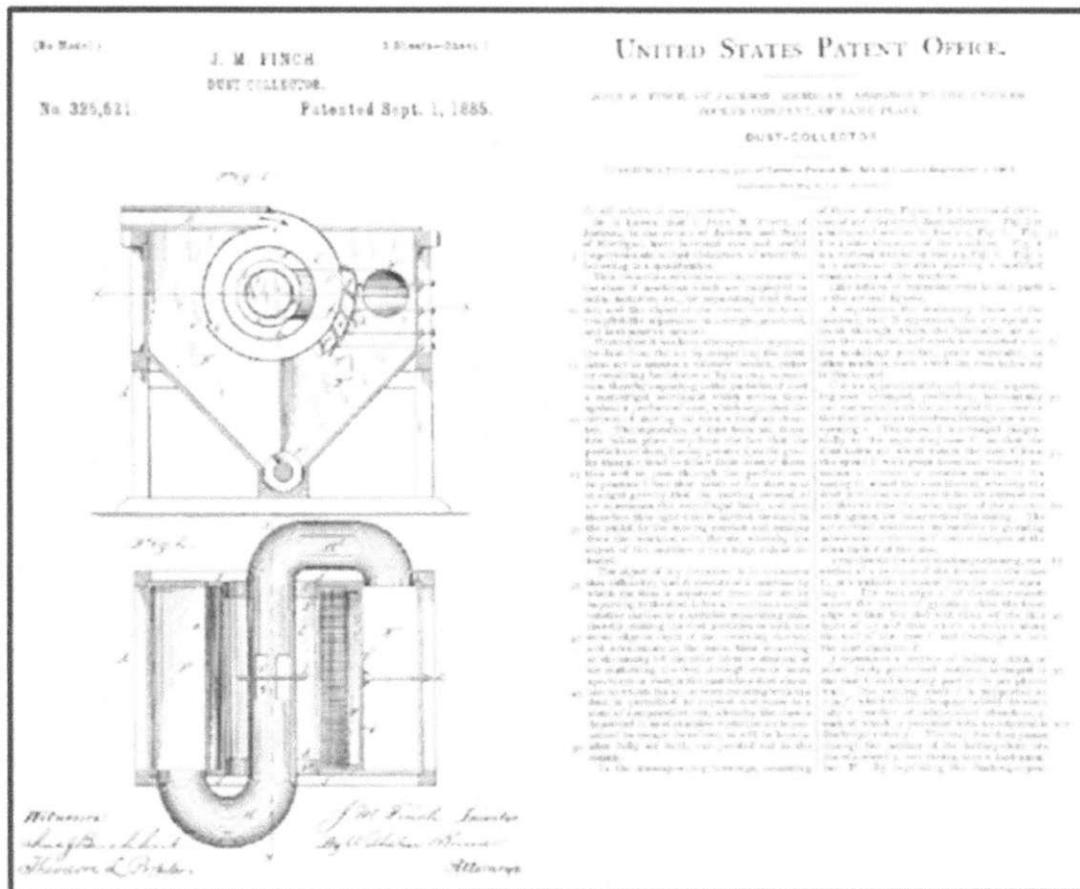


Figura 3.6: Primeira patente do Ciclone, 1885.
 Fonte: Hoffmann e Stein (2008).

Por apresentar facilidade na construção, manutenção, baixo custo operacional, fácil adaptação a operações extremas (alta pressão, baixa temperatura e presença de gases corrosivos), tamanho reduzido e além do mais uma elevada eficiência, o hidrociclone obteve uma boa aceitação, sendo bastante utilizado em indústrias petroquímicas, no tratamento primário do óleo (FARIAS *et al.*, 2001; BURITI *et al.*, 2007; BURITI, 2009; BARBOSA, 2011).

3.4.2. Funcionamento do Ciclone

Um ciclone convencional apresenta um corpo cônico conectado a um corpo cilíndrico na parte inferior, um duto de alimentação tangencialmente conectado a parte cônica. A região

cônica termina no orifício *underflow*, que é o diâmetro interno do ponto de descarga, conforme observado na Figura 3.7. As dimensões desse orifício são determinadas pelas aplicações envolvidas do equipamento. A outra saída é localizada no topo do equipamento, ligada à parte cônica denominada de *overflow* (SALVO, 2009).

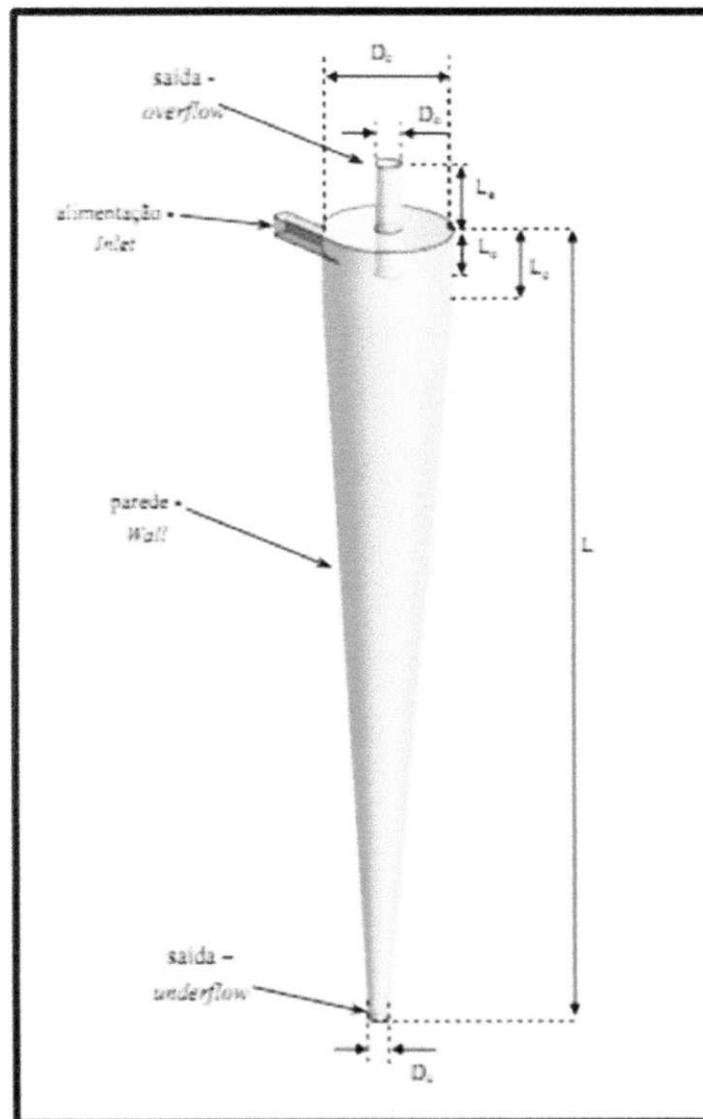


Figura 3.7: Representação geométrica do ciclone.
Fonte: Farias *et al.* (2009).

O funcionamento do ciclone consiste na introdução da mistura por um duto tangencial, sobre pressão, no trecho de maior diâmetro do hidrociclone, sendo direcionada internamente, em fluxo espiral, em direção ao trecho de menor diâmetro. O contínuo decréscimo de

diâmetro faz com que este fluxo seja acelerado, proporcionando que o componente mais pesado mova-se contra as paredes e em direção à saída inferior do hidrociclone.

O fluxo axial reverso ocorre na parte central do equipamento e é consequência do formato cônico do hidrociclone e da diferença de pressão existente entre as paredes e o centro, que se estabelece em decorrência do campo centrífugo em conjunto com a redução da intensidade do vórtice ao longo do escoamento axial. A diferença de densidade entre os componentes da mistura de entrada também é fator fundamental para que ocorra a separação. O efluente ou rejeito localizado no centro do hidrociclone deixa o dispositivo pelo tubo superior ou *overflow*, contendo óleo em maior proporção, como pode ser observado na Figura 3.8 (FILGUEIRAS, 2005).

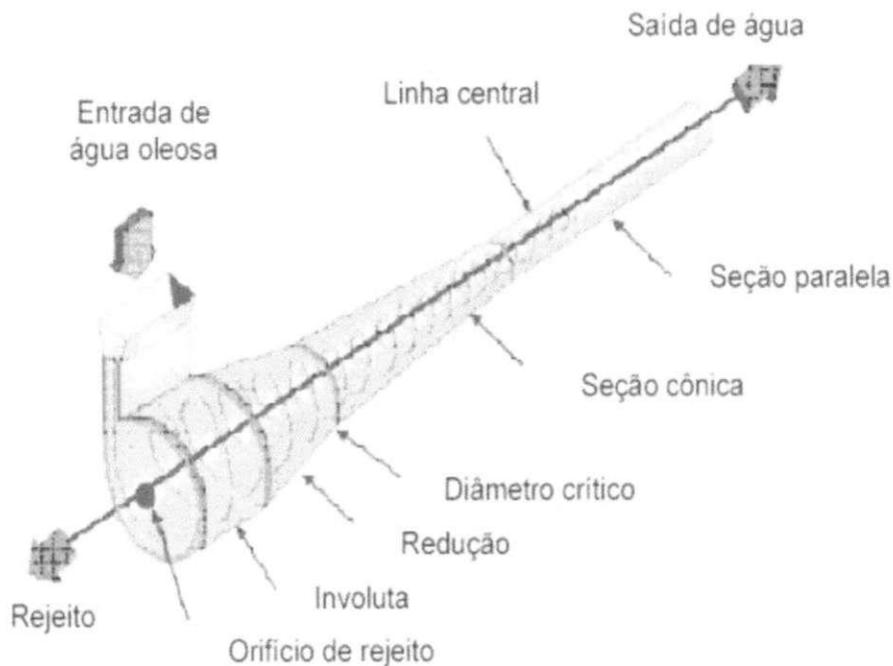


Figura 3.8: Desenho esquemático do hidrociclone.
Fonte: Triggia *et al.* (2001).

Como em todos os separadores que envolvem a dinâmica das partículas no sistema, a dinâmica do escoamento é extremamente importante para entender o mecanismo de funcionamento do mesmo. Desta forma, nas seções seguintes são apresentados os perfis de velocidade axial, tangencial e radial no interior de ciclones.

3.4.2.1 Componente Axial da Velocidade

Slack *et al.* (2000) observaram que existem dois tipos de velocidade vertical: Um para cima, indicando valores positivos de velocidade axial; e outro percorrendo para baixo, representando valores negativos da velocidade axial. Os valores negativos aumentam com o aumento da distância radial em relação ao eixo central do ciclone. Porém, quando se aproxima das paredes do equipamento a velocidade axial negativa começa a decrescer. Os valores positivos da velocidade axial diminuem com o aumento da distância radial em relação ao eixo central do ciclone até atingirem zero, como apresentado na Figura 3.9.

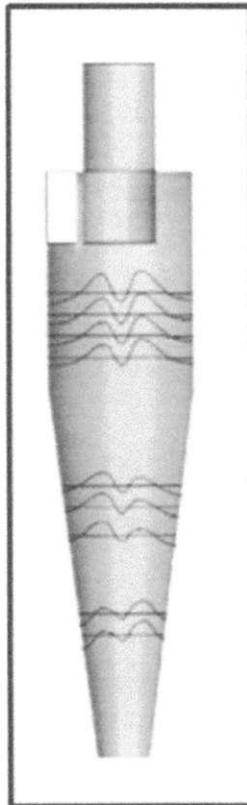


Figura 3.9: Distribuição da velocidade axial em diferentes posições verticais.

Fonte: Adaptada de Slack *et al.* (2000).

Slack *et al.* (2000) verificaram que o pico da velocidade axial positiva ocorre imediatamente antes do *vortex finder*, e o seu valor mínimo ocorre em regiões próximas ao *underflow*, como também pode ser observado na Figura 3.9.

Bhaskar *et al.* (2007) estudaram o perfil axial de dois ciclones de parte cônica com diferentes diâmetros na região cilíndrica, um com 50 mm e outro com 75 mm, e concluíram que a velocidade axial em ambos os sentidos, positivo e negativo, é maior em magnitude do ciclone de diâmetro menor, como apresentado na Figura 3.10.

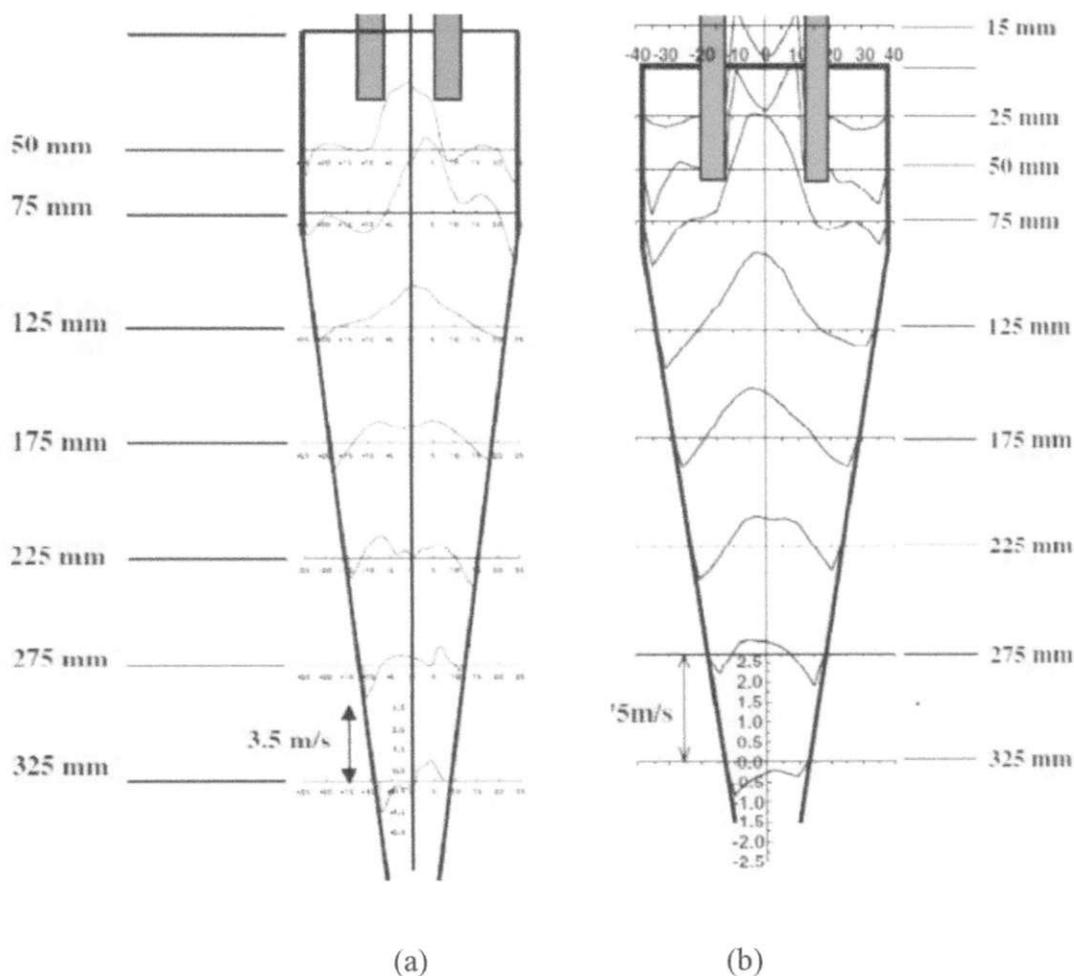


Figura 3.10: Perfil de velocidade axial para diferentes diâmetros (a) 50 mm; (b) 75 mm.
Fonte: Bhaskar *et al.* (2007).

3.4.2.2 Componente Tangencial da Velocidade

Segundo Fisher e Flack (2002), a velocidade tangencial é a componente de maior magnitude e de maior dominância no escoamento. É a componente que gera a força centrífuga necessária para a separação da fase mais densa. Estes autores relacionaram diferentes taxas de

fluxo na entrada do hidrociclone com a componente da velocidade, e verificaram que as curvas da velocidade tangencial estão linearmente relacionadas.

Wang e Yu (2006) estudando os efeitos do comprimento da parte cilíndrica e cônica do hidrociclone no perfil da velocidade tangencial, concluíram que a velocidade tangencial e a queda de pressão eram maiores para cilindro curto quando comparados com o cilindro longo. Comparando a parte cônica verificaram que a maior velocidade tangencial encontrava-se no hidrociclone de menor cone, como apresentado na Figura 3.11.

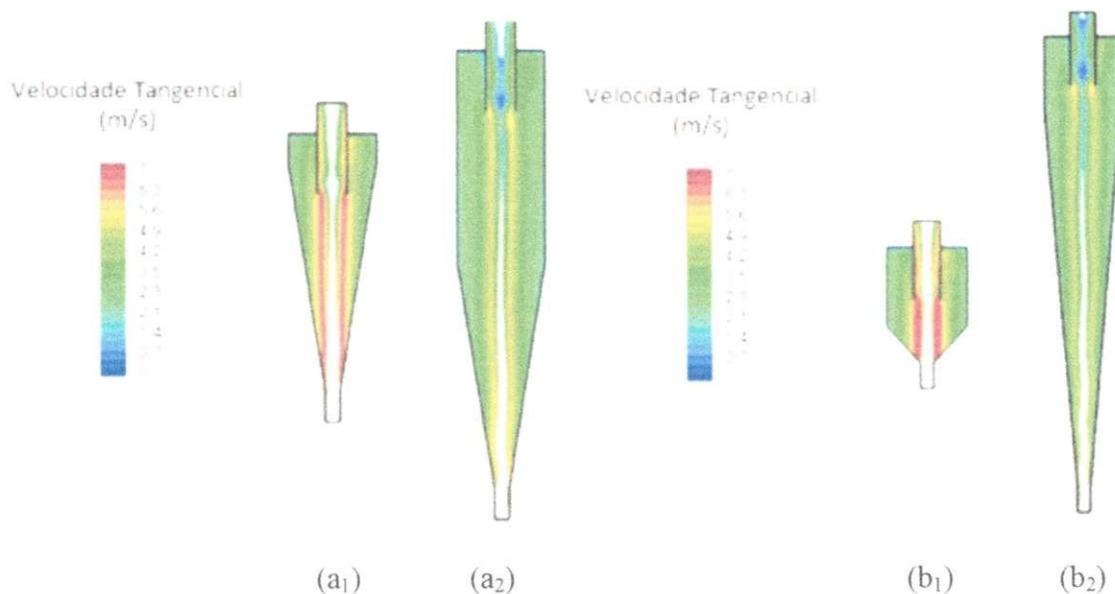


Figura 3.11: Campo de velocidade tangencial em diferentes hidrociclones: a₁-Cilindro curto; a₂- Cilindro longo; b₁- Cone curto; b₂- Cone longo.

Fonte: Wang e Yu (2006).

Bhaskar *et al.* (2007) fizeram um estudo numérico e focalizaram a discussão na distribuição da velocidade tangencial em ciclones de diferentes comprimentos. Observaram que, inicialmente, aumentando a distância radial do eixo, a velocidade tangencial aumenta. O valor de velocidade tangencial após atingir um máximo decresce com o aumento da distância radial, à medida que se aproxima das paredes. Este perfil permanece similar para diferentes posições axiais no corpo do ciclone, como apresentado na Figura 3.12.

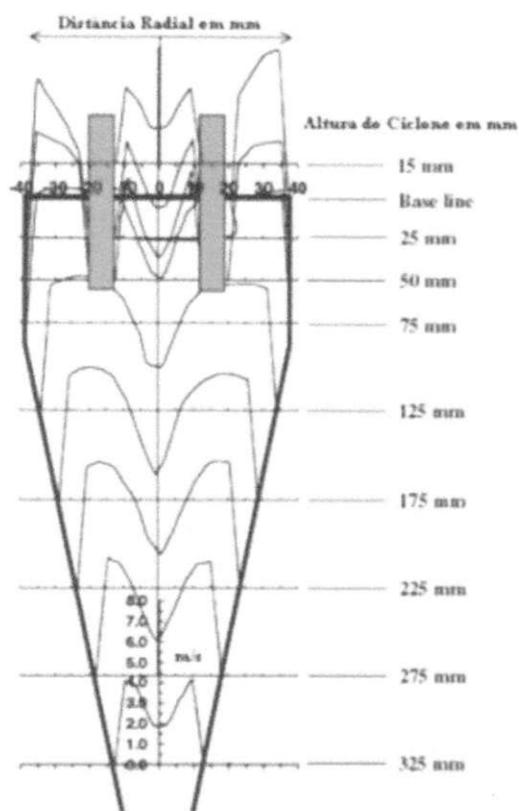


Figura 3.12: Perfil de velocidade tangencial no hidrociclone.
 Fonte: Bhaskar *et al.* (2007).

3.4.2.3 Componente Radial da Velocidade

Segundo Monredon *et al.* (1992), a componente radial da velocidade é a mais difícil de ser medida, pelo fato, de ser, em termos absoluto, menor do que as velocidades axial e tangencial.

Luo *et al.* (1989) estudaram a influência da geometria do hidrociclone nos perfis de velocidade. A Figura 3.13 apresenta o perfil de velocidade radial para duas geometrias, com presença e ausência de núcleo de ar. Eles propuseram que a velocidade radial na seção cônica pode ser aproximada pela Equação 3.1. Posteriormente Chu *et al.* (1993) mostraram que essa equação também pode ser corretamente utilizada para descrever o comportamento da velocidade radial na presença de partículas sólidas.

$$v_r r^m = -C \quad (3.1)$$

onde, v_r é a velocidade radial, m e C são constantes positivas.

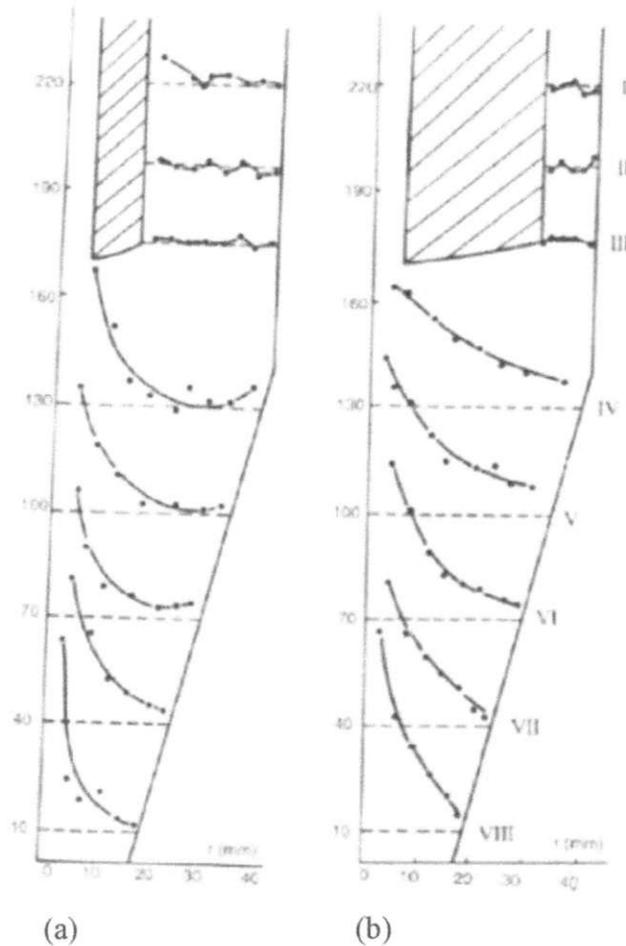


Figura 3.13: Perfil da velocidade radial utilizando o método LDA: (a) Ausência de núcleo de ar; (b) Presença de núcleo de ar.

Fonte: Luo *et al.* (1989).

Chu *et al.* (1993) mediram a velocidade radial pelo método PDA (*Particles Dynamics Analyzer*), usando partículas de estireno e verificaram que a velocidade radial atingiu um valor máximo próximo ao centro do ciclone, como apresentado na Figura 3.14.

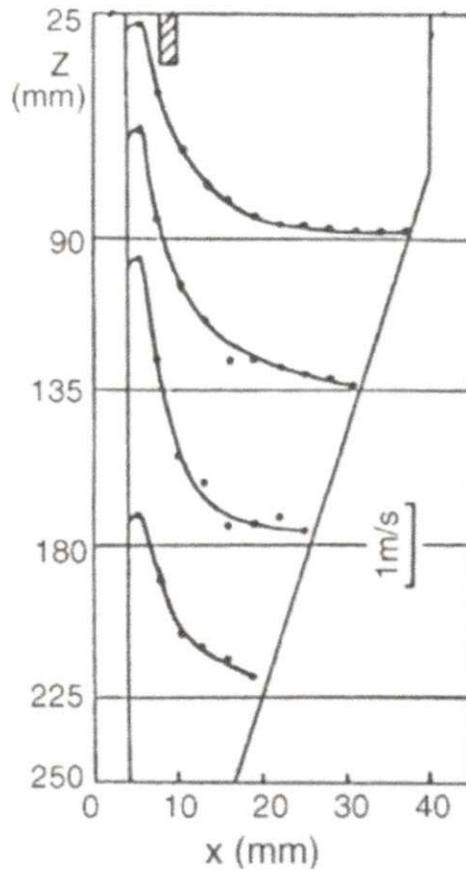


Figura 3.14: Perfil da velocidade radial.
 Fonte: Chu *et al.* (1993).

3.4.3. Classificação do Ciclone

Os ciclones são agrupados em famílias, possuindo como característica principal as relações com suas medidas geométricas. As famílias mais conhecidas e de maior interesse técnico-científico são as famílias: Bradley, Krebs e Rietema (SVAROVSKY, 2000). As principais relações geométricas são descritas na Figura 3.15 e apresentadas na Tabela 3.2.

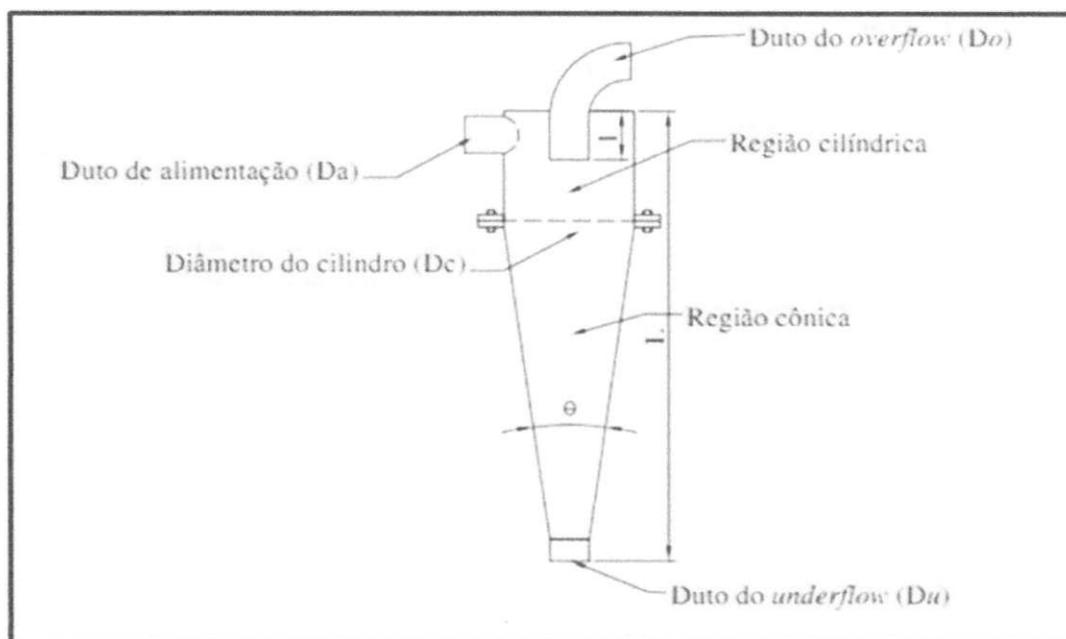


Figura 3.15: Descrição das importantes dimensões para a separação das famílias dos hidrociclones.

Tabela 3.2: Proporções geométricas das famílias de hidrociclone

Hidrociclone	D_a/D_c	D_o/D_c	l/D_c	L/D_c	θ
Rietema	0,280	0,340	0,400	5,000	20,000
Bradley	0,133	0,200	0,330	6,850	9,000
Krebs	0,267	0,159	—	5,874	12,700

Fonte: Adaptado de Vieira (2006).

As relações descritas na Tabela 3.2 são obtidas através de resultados experimentais, objetivando obter altas eficiências, e baixas quedas de pressão (SILVA, 2006). A vantagem de utilizar essas medidas é o elevado número de estudos realizados por diversos autores.

3.4.4. Vantagens e Desvantagens do Ciclone

Segundo Svarovsky (2000), Silva (2006) e Buriti (2009), as vantagens do uso do ciclone são basicamente:

- ✓ Equipamentos baratos, sem partes moveis, o que resultada em poucos gastos com manutenção.
- ✓ Operação simples.
- ✓ Pequeno espaço em relação a outros separadores, economizando assim espaço e também obtendo baixo tempo de residência das partículas.
- ✓ Extremamente versáteis na aplicação e podem ser usados para diversas finalidades, como por exemplo, clarificar líquidos, concentrar pastas, separar dos líquidos imiscíveis.
- ✓ Possuem elevada eficiência.

Como desvantagens, podem ser citadas:

- ✓ Inflexibilidade quando instalados, devido a sua forte dependência com a vazão e a concentração de alimentação, caso haja, uma variação em algum desses fatores, a sua eficiência fica comprometida.
- ✓ Susceptíveis a erosão, mas ações podem ser realizadas para reduzir esse efeito, tal como, aplicar uma camada anticorrosiva na parte interna do equipamento.
- ✓ A ruptura de flocos, devido ao movimento turbilhonar, pode ser uma desvantagem já que a floculação não pode ser utilizada para elevar a eficiência de separação.

3.4.5. Critérios para Avaliação de Desempenho de Hidrociclones

3.4.5.1. Eficiência de Separação

Em hidrociclones tradicionais, o sólido, mais denso que o líquido, é recolhido no *underflow*. Entretanto, em separações água-óleo, a fase dispersa óleo é coletada no *overflow*, e os cálculos de eficiência devem ser baseados nessa corrente. Assim sendo, a definição de eficiência granulométrica é a razão da taxa mássica de gotículas de óleo de um dado tamanho encontradas no overflow e a taxa mássica do óleo na alimentação, como apresentado na Equação 3.2.

$$G(d) = 100 \times \frac{W_{go}(d)}{W_g(d)} \quad (3.2)$$

onde:

$G(d)$ = Eficiência de separação;

$W_{go}(d)$ = Taxa mássica de óleo na forma de gotícula com tamanho definido no *overflow*;

$W_g(d)$ = Taxa mássica de óleo na forma de gotícula com tamanho definido na entrada.

Na Figura 3.16 é apresentado o comportamento característico da eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula de óleo em hidrociclones tradicionais. Observa-se que a eficiência mínima é superior a 0%, isso acontece por causa do efeito divisor das correntes dentro do equipamento. Essa eficiência mínima é, geralmente, o valor da razão de fluido, descrita posteriormente (NASCIMENTO, 2008). Na Figura 3.16, é representado d_{50} , que caracteriza o diâmetro da partícula capaz de gerar uma eficiência de 50% de separação no hidrociclone, nesse caso igual a 10 micrometros (μm).

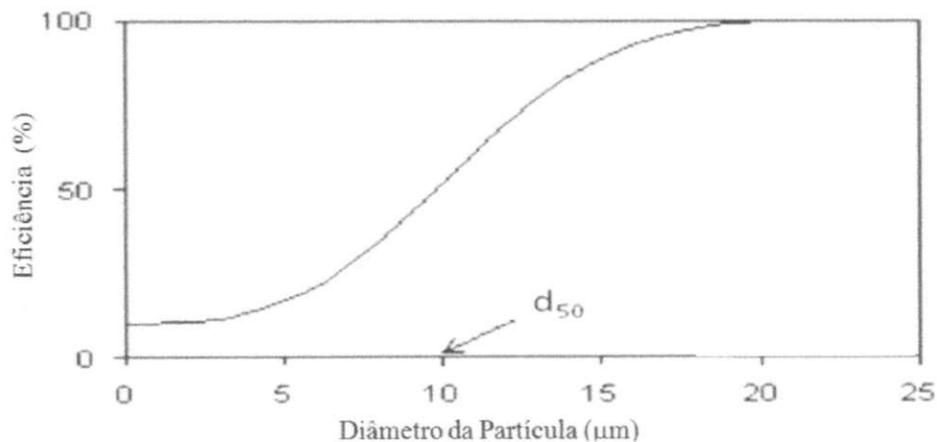


Figura 3.16: Curva de eficiência granulométrica
Fonte: Medronho (2004).

A eficiência granulométrica reduzida leva em consideração apenas o efeito centrífugo do equipamento para a separação das correntes, ou seja, nesse cálculo não é considerado o efeito divisor das correntes. Sendo representada de acordo com a Equação 3.4 (NASCIMENTO, 2008).

$$G' = \frac{(G - R_f)}{(1 - R_f)} \quad (3.3)$$

onde:

G' = Eficiência granulométrica reduzida;

G = Eficiência de separação;

R_f = Razão de fluxo.

A razão de fluxo é o parâmetro que relaciona a taxa mássica de água coletada no *overflow* e a taxa de massa de água que alimenta o hidrociclone, conforme apresentado na Equação 3.4.

$$R_f = \frac{W_o}{W_i} \quad (3.4)$$

onde,

R_f = Razão de fluxo;

W_o = Taxa mássica da água no *overflow*;

W_i = Taxa de mássica da água de alimentação

Na Figura 3.17, apresenta-se a eficiência granulométrica reduzida em função do diâmetro da partícula, e nela pode ser observado que a curva pode caracterizar uma eficiência de 0% em separação para o equipamento. Nesse caso, também é representado o d'_{50} , porém é superior ao representado pela Figura 3.16, sendo em torno de 12 micrometros (μm).

Na Figura 3.18 é representada a curva da Eficiência granulométrica reduzida (G') em função do d/d'_{50} , curva característica de hidrociclones tradicionais (MEDRONHO, 2004). Esse tipo de curva é bastante utilizado por vários estudiosos de hidrociclones, como exemplo, Coelho e Medronho (2001), Fonseca e Secchi (2006) e Marins *et al.* (2010).

3.4.5.2. Outros Fatores que Influenciam na Eficiência do Ciclone

Hashmi *et al.* (2004) estudaram a eficiência de separação de uma corrente de água e óleo utilizando o hidrociclone, e avaliaram a eficiência de separação em diferentes

concentrações de óleo alimentado. Concluíram que para baixas concentrações, o equipamento conseguia recuperar todo o óleo no *overflow*, enquanto que para altas concentrações, o ciclone não apresentava um bom desempenho.

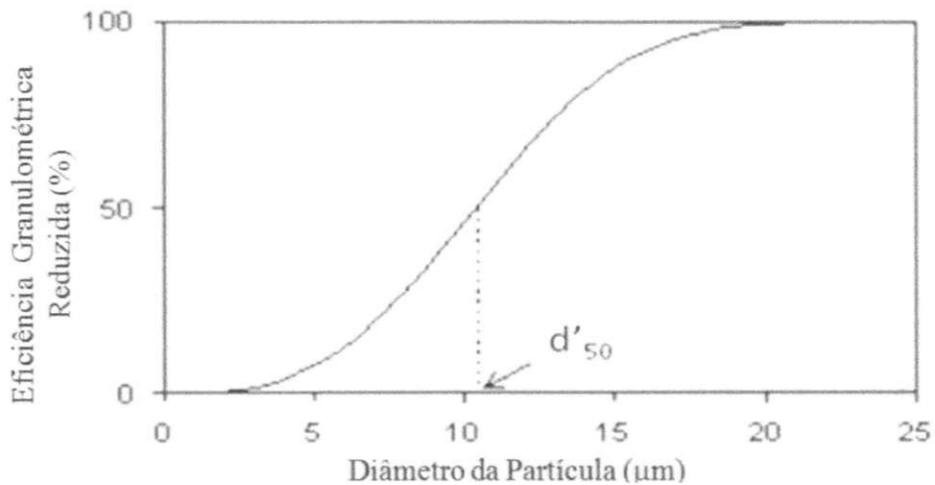


Figura 3.17: Curva de eficiência granulométrica reduzida
Fonte: Medronho (2004).

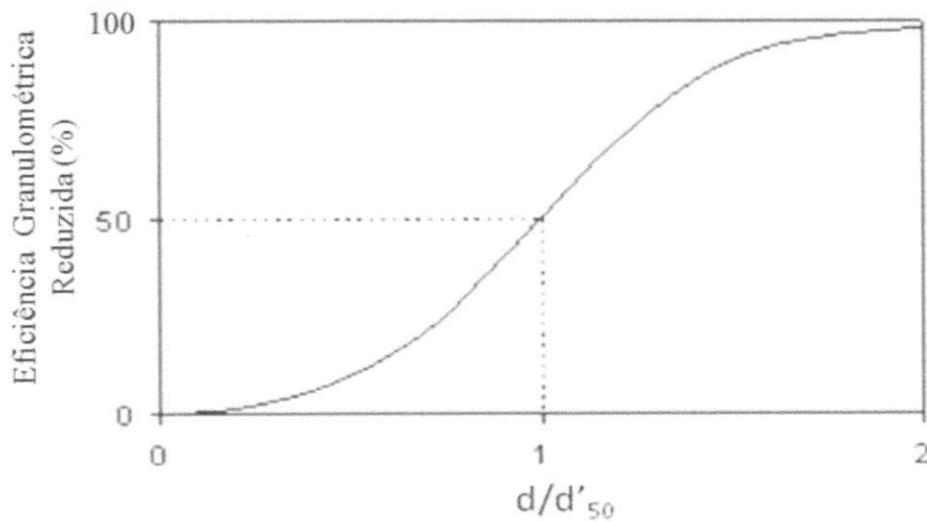


Figura 3.18: Curva de eficiência granulométrica reduzida em função de d/d'_{50}
Fonte: Medronho (2004).

As equações 3.5 e 3.6 foram utilizadas pelos autores:

$$FOR = 1 - \left(\frac{C_u Q_u}{C_A Q_A} \right) \quad (3.5)$$

$$E = 1 - \left(\frac{1 - C_o}{1 - C_A} \right) \quad (3.6)$$

onde C_u, C_A e C_o são as concentrações de óleo, na unidade de kg de óleo / m³ da mistura no *underflow*, na alimentação e no *overflow*, respectivamente, Q_u e Q_A são as taxas de fluxo volumétrico no *underflow* e na alimentação, respectivamente, e FOR e E são as eficiências de separação.

Husveg *et al.* (2007) analisaram a influência de taxa de fluxo de alimentação sobre a eficiência de separação do ciclone, verificando que a eficiência aumenta com o aumento da vazão no intervalo de 350 L/h a 720 L/h, como apresentado na Figura 3.19. A equação utilizada pelos autores para determinar a eficiência é dada pela Equação 3.7.

$$E' = 1 - \left(\frac{K_u}{K_A} \right) \quad (3.7)$$

onde, K_u e K_A são os fluxos de óleo e o fluxo da mistura no *underflow* e na entrada, respectivamente.

Farias *et al.* (2009) estudaram numericamente o processo de separação água/óleo de misturas com velocidade de entrada de 20, 25 e 30m/s e diâmetro de gota de óleo 0.1, 1 e 10 mm. Foi constatado que a variação na velocidade na entrada da mistura do hidrociclone proporciona a migração do óleo para a parte central do hidrociclone e a migração da água para as paredes do equipamento, devido à ação dos campos de aceleração (centrífugo e gravitacional) externos e internos e pela força de arraste exercida pelo fluido.

Souza *et al.* (2011) avaliaram a influência de alguns parâmetros num processo (não isotérmico) de separação água/óleo pesado. Os parâmetros avaliados foram velocidade de entrada, diâmetro da gota de óleo e viscosidade dos fluidos, sendo esta avaliada de duas formas diferentes: independente da temperatura e como função da temperatura. Os resultados mostraram que o aumento do diâmetro da gota de óleo proporciona um aumento na temperatura, uma vez que partículas de grande diâmetro retêm energia e favorecem a transferência de calor. Observou-se também que o aumento da temperatura reduziu a

viscosidade do óleo, proporcionando um aumento nas linhas de fluxo e, conseqüentemente, na intensidade turbilhonar. Além disso, verificou-se que aumentando a velocidade de entrada há o aumento da eficiência de separação.

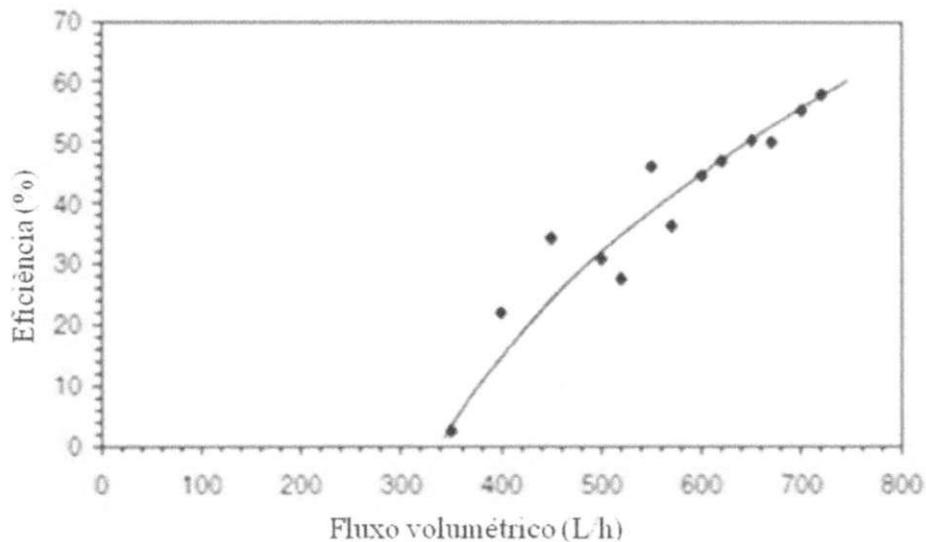


Figura 3.19: Eficiência do ciclone em função da vazão de entrada.
Fonte: Husveg *et al.* (2007).

Farias *et al.* (2011) investigaram os efeitos da concentração de areia e do diâmetro do *vortex finder* num processo de separação trifásica (água/óleo/areia). O aumento da concentração de areia na entrada do hidrociclone proporcionou maior intensidade de momento angular na fase dispersa, além de contribuir para a variação na queda de pressão do equipamento e o aumento da eficiência geral do hidrociclone, porém propiciando um aumento na quantidade de areia e água na saída de *overflow*. Os resultados obtidos para a variação do diâmetro do duto de *overflow* mostraram que à medida que se aumenta esse parâmetro, a eficiência de *underflow* diminui gradualmente para todas as fases.

3.5. Fluidodinâmica Computacional

A fluidodinâmica computacional é um estudo dos fenômenos de transporte que envolve escoamento de fluidos, transferência de calor, transporte de massa e reações químicas, utilizando métodos matemáticos, numéricos e computacionais.

A fluidodinâmica computacional vem se mostrando uma importante ferramenta e a sua crescente utilização acadêmica e industrial pode ser justificada pelas seguintes razões:

- ✓ Estudos que envolvem riscos quanto à realização experimental tais como altas temperaturas, pressões e materiais tóxicos;
- ✓ Quando a montagem de uma planta ou de um amparado experimental é muito cara ou de difícil elaboração, como túneis de vento, estudo de vazamento, entre outros;
- ✓ As simulações numéricas apresentam mais detalhamento que os experimentos reais, já que para obter detalhes no experimento real se faz necessária a presença de vários medidores;
- ✓ Avanço contínuo no poder computacional e na assimilação de novos métodos disponibilizados na literatura.

As técnicas CFD, segundo Inoue (2009), são aplicadas em várias áreas, em especial:

- ✓ Aerodinâmica de aviões e veículos;
- ✓ Engenharia ambiental – transporte de efluentes;
- ✓ Engenharia bioquímica – escoamento de sangue em artérias e veias;
- ✓ Engenharia elétrica – esfriamento de equipamentos incluindo micro equipamentos;
- ✓ Engenharia de processos químicos – mistura e separação;
- ✓ Meteorologia – previsão do tempo.

3.6. Equacionamento do Escoamento Multifásico

É a representação física da realidade na forma de um conjunto de equações consistentes. Os modelos matemáticos são componentes capazes de explicar qualquer fenômeno físico na engenharia, o qual corresponde a um conjunto de dados e ideias abstratas que permite propor uma explicação para o fenômeno em estudo (PINTO e LAGE, 2001).

3.6.1. Abordagem Euleriana-Euleriana

Para problemas multifásicos utilizando a abordagem Euleriana-Euleriana, todas as fases são resolvidas como contínuas, sendo que as equações médias de conservação de massa, momento e energia são resolvidas para todas as fases (SCHUTZ, 2009).

3.6.2. Abordagem Euleriana-Lagrangeana

Segundo Silva (2008), cada partícula (ou grupo de partículas) é simulada individualmente com base na segunda Lei de Newton para o movimento e no cálculo das forças atuantes sobre as mesmas, considerando as interações com o fluido ou outras partículas (colisões).

A trajetória da partícula é calculada baseada no balanço de forças na partícula e influenciada pelo escoamento da fase fluida, tais como o campo de escoamento e a turbulência. Para utilizar esta formulação, é necessário que a fase particulada seja diluída (SHOJAEEFARD *et al.*, 2006).

3.6.3. Equação da Conservação de Massa

A equação de conservação de massa para o escoamento multifásico é definida pela seguinte relação:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_{\alpha}\rho_{\alpha}) + \nabla \cdot (f_{\alpha}\rho_{\alpha}\vec{U}_{\alpha}) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (3.8)$$

onde os sub-índices gregos α e β representam as fases envolvidas na mistura bifásica, f , ρ , e \vec{U} são respectivamente a fração volumétrica, densidade e o vetor velocidade. Para a fase α , o vetor velocidade é dado por $\vec{U}_{\alpha} = (u, v, w)$. O termo $S_{MS\alpha}$ é o termo de fonte de massa, $\Gamma_{\alpha\beta}$ é o termo de difusividade mássica na interface bifásica das fases α e β envolvidas (MANUAL CFX, 2011).

3.6.4. Equação da Quantidade de Movimento

A equação de momento linear para o escoamento multifásico é definida por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha) + [f_\alpha (\rho_\alpha \bar{U}_\alpha \otimes \bar{U}_\alpha)] = f_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot \{f_\alpha \mu_\alpha [\nabla \bar{U}_\alpha + (\nabla \bar{U}_\alpha)^T]\} + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \bar{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \bar{U}_\alpha) + \bar{S}_{M\alpha} + \bar{M}_\alpha \quad (3.9)$$

onde p é a pressão, $\bar{S}_{M\alpha}$ representa o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume, $\Gamma_{\alpha\beta}^+$ correspondem à taxa de fluxo mássico por unidade de volume da fase β para a fase α , \bar{M}_α descreve a força total por unidade de volume (forças de arraste interfacial, de sustentação, de lubrificação de parede, de massa virtual e de dispersão turbulenta) sobre a fase α devido à interação com a fase β . O termo $\sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \bar{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \bar{U}_\alpha)$ representa a transferência de momento induzida pela transferência de massa na interface.

A força total da fase α , com a interação com outras fases é dada por:

$$\bar{M}_\alpha = \sum_{\alpha \neq \beta} \bar{M}_{\alpha\beta} \quad (3.10)$$

A somatória das forças interfaciais entre duas fases é decorrente de efeitos físicos independentes como definido por:

$$\bar{M}_{\alpha\beta} = \bar{M}_{\alpha\beta}^D + \bar{M}_{\alpha\beta}^L + \bar{M}_{\alpha\beta}^{LCB} + \bar{M}_{\alpha\beta}^{VM} + \bar{M}_{\alpha\beta}^{TD} + \bar{M}_S \quad (3.11)$$

onde cada um dos termos do lado direito da Equação 3.11 corresponde, respectivamente, as forças de arraste interfacial, de dissipação, de lubrificação na parede, de massa virtual, força de dispersão turbulenta e força de pressão dos sólidos.

3.6.5. Modelo de Turbulência

Em problemas que envolvem a presença da turbulência, uma variável tem a sua medida instantânea composta pela soma de duas componentes. A primeira representa a média temporal e a segunda representa a flutuação turbulenta, conforme apresentado na Equação 3.12, onde A é uma variável qualquer.

$$A(t) = \bar{A} + A' \quad (3.12)$$

Prandtl escolheu a energia cinética turbulenta por unidade de massa, k , baseada nas flutuações do vetor velocidade, como a base da escala de velocidade (Equação 3.13).

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{v_x'^2} + \overline{v_y'^2} + \overline{v_z'^2}) \quad (3.13)$$

A aplicação da média temporal na equação de Navier-Stokes para um escoamento monofásico, apresentada na Equação 3.14, gera a Equação 3.15, mostradas abaixo.

$$\frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(\bar{U} \otimes \bar{U})] = \nabla P + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \bar{U} + (\nabla \bar{U})^T \right) \right] + \bar{S}_M \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(\bar{u}_i \otimes \bar{u}_i)] = \nabla P + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \bar{u}_i + (\nabla \bar{u}_i)^T - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \right) \right] + \bar{S}_M \quad (3.15)$$

Devido ao termo adicional que surgiu na Equação 3.15, $\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$, conhecido como tensor de Reynolds, a resolução desta equação requer equações adicionais. Basicamente, há duas abordagens para se modelar as tensões de Reynolds:

- O conceito de viscosidade turbulenta;
- A modelagem de equação de transporte do tensor de Reynolds.

A primeira relaciona as contribuições da turbulência, na transferência de quantidade de movimento linear, à taxa de deformação do escoamento médio, por meio de uma viscosidade

adicional, a viscosidade turbulenta. Esta hipótese origina um ramo da modelagem conhecido como modelos de viscosidade turbulenta.

Na segunda técnica, também conhecida como o modelo de fechamento de momento de segunda ordem, o fluxo extra da quantidade de movimento é dado diretamente pela solução das equações de transporte. Porém, devido ao problema de fechamento de turbulência, há a necessidade de uma equação para a quantidade geradora de escala de comprimento. O resultado é um conjunto de equações diferenciais parciais para as tensões de Reynolds.

Pode-se determinar $\rho \overline{u_i u_j}$ pela seguinte equação:

$$\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \quad (3.16)$$

onde,

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

3.6.5.1. Modelo κ - ε

Segundo Pope (2003), o modelo κ - ε é constituído por:

- Uma equação de transporte para a energia cinética turbulenta, k ;
- Uma equação de transporte para a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, ε ;
- Uma equação para a viscosidade turbulenta.

Sendo suas equações apresentadas a seguir, segundo Silveira Neto (2002):

- Equação para a energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \left[\rho \overline{U}_\alpha k_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{\alpha\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla k_\alpha \right] \right\} = f_\alpha (G_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (3.18)$$

- Equação para a taxa de dissipação:

$$\frac{\partial(\rho f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \rho \bar{U}_\alpha \varepsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon_\alpha \right\} = f_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_1 G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (3.19)$$

- Equações auxiliares:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad (3.20)$$

$$l = \frac{C_\mu k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (3.21)$$

- Coeficientes de fechamento:

$$C_{\varepsilon 1}=1,44; C_{\varepsilon 2}=1,92; C_\mu=0,09; \sigma_k=1,0 \text{ e } \sigma_\varepsilon=1,3 \quad (3.22)$$

O modelo κ - ε padrão prevê bem o escoamento em regiões afastadas da camada limite, no entanto, possui sérias restrições quando utilizado nas simulações de escoamento próximos as paredes, em dutos não circulares ou com quinas.

3.6.5.2. Modelo RNG κ - ε

O modelo RNG κ - ε é uma alternativa do modelo κ - ε para fluxos com altos números de Reynolds. O modelo difere do modelo padrão apenas na equação da taxa de dissipação.

As constantes deste modelo são obtidas teoricamente e não empiricamente, como no modelo k - ε tradicional. Resultados indicam que este modelo fornece previsões mais precisas em situações de escoamento incluindo separação, linhas de correntes curvas e regiões de estagnação.

As equações que descrevem este modelo são apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = P + G - \rho \varepsilon \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho U \varepsilon) - \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] &= (C_1 - C_{1RNG}) \frac{\varepsilon}{k} [\theta P + C_3 \max(G, 0) \theta] \\ - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} & \end{aligned} \quad (3.24)$$

onde C_{1RNG} é dado pela Equação 3.23

$$C_{1RNG} = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{(1 + \beta \eta^3)} \quad (3.25)$$

$$\eta = \left(\frac{P_s}{\mu_T} \right)^{0.5} \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.26)$$

onde η_0 e β são as constantes adicionais do modelo e P_s é o termo de produção pelo efeito de cisalhamento. As constantes empíricas das equações são:

$$C_\mu = 0,09; \sigma_{kRNG} = 0,7179 \text{ e } C_{2RNG} = 1,68 \quad (3.27)$$

$$C_{\varepsilon 1RNG} = 1,42 - \frac{\eta \left(\frac{4,38 - \eta}{4,38} \right)}{1 + \eta^3 \beta_{RNG}} \text{ e } \eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho \varepsilon C_{\mu RNG}}} \quad (3.28)$$

onde p_k é a produção de turbulência devido às forças viscosas e de empuxo ou produção de cisalhamento de turbulência, o qual é modelado como:

$$p_k = \mu_T \nabla U (\nabla U + \nabla U^T) + p_{kb} \quad (3.29)$$

onde p_{kb} é o termo de produção de empuxo determinado pela seguinte relação:

$$p_{kb} = -\frac{\mu_T}{\rho\sigma_p} g\nabla\rho \quad (3.30)$$

onde σ_p é uma constante e igual a 1.

3.6.5.3. Turbulência na Fase Dispersa

Geralmente, a fase dispersa em um escoamento multifásico turbulento é modelada utilizando-se o modelo de zero equação dispersa. No qual, apresenta que a viscosidade turbulenta da fase dispersa é proporcional a fase contínua, e determinado pela equação:

$$\mu_{td} = \left(\frac{\rho_d}{\rho_c}\right) \frac{\mu_{tc}}{\sigma} \quad (3.31)$$

onde, μ_{td} , μ_{tc} , ρ_d , ρ_c e σ representam a viscosidade turbulenta na fase dispersa, viscosidade turbulenta na fase contínua, densidade da fase dispersa, densidade da fase contínua e tensão de superficial, respectivamente.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4.1. Programa

Os separadores ciclônicos foram avaliados por simulações numéricas empregando o programa Ansys CFX 12.1. O equipamento utilizado para os cálculos numéricos foi um servidor Quad-Core Intel Dual Xeon Processador E5430 de 2,66GHz com 8GB de memória RAM disponibilizados nos Laboratórios LPFI (Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e imagem) e LCTF (Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos) das Unidades Acadêmicas de Engenharia Química e Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, respectivamente.

4.2. Geometrias

Foram propostas duas configurações do dispositivo, denominados de separador ciclônico.

O primeiro separador ciclônico, denominado como separador ciclônico A, é constituído de um cone principal munido de duas entradas tangenciais e duas saídas, sendo uma tangencial e a outra axial. Na secção cilíndrica, nas proximidades das entradas tangenciais foi introduzido um tronco cônico, com o propósito de direcionar o fluxo de óleo

para a saída axial, como pode ser observado na Figura 4.1a. O segundo, chamado de separador ciclônico B, diferencia-se do primeiro por apresentar duas saídas axiais de raios diferentes (Figura 4.1b).

As dimensões dos separadores ciclônicos A e B foram adaptadas dos equipamentos estudados por Marins (2007) e são apresentadas na Figura 4.2 e 4.3, respectivamente.

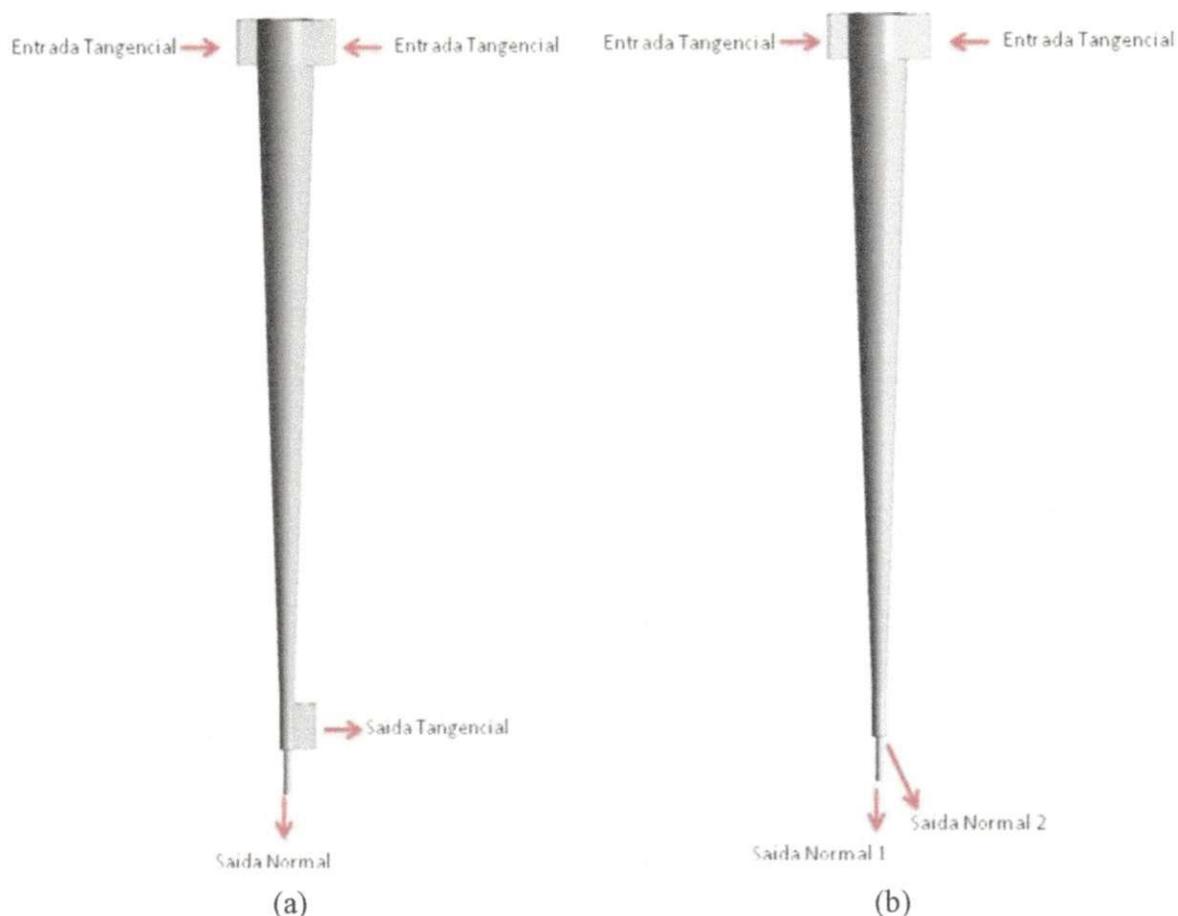
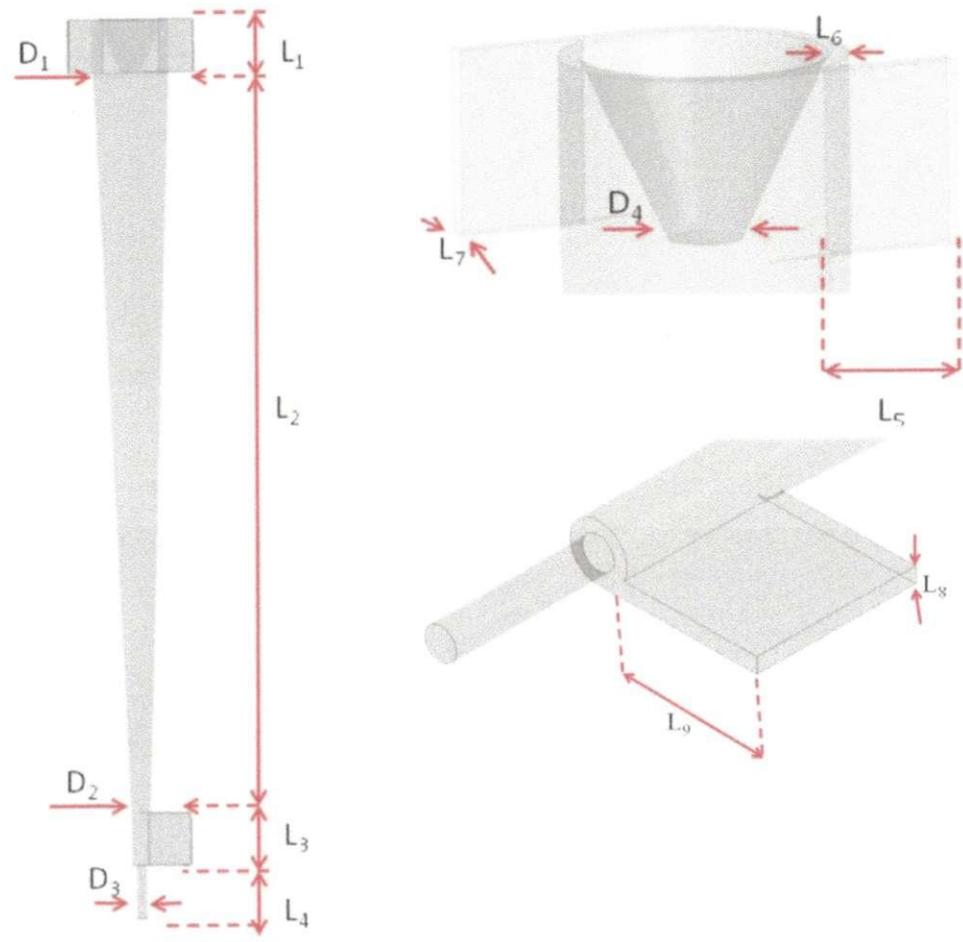


Figura 4.1: Descrição das entradas e saídas dos separadores ciclônicos, (a) Separador A; (b) Separador B.

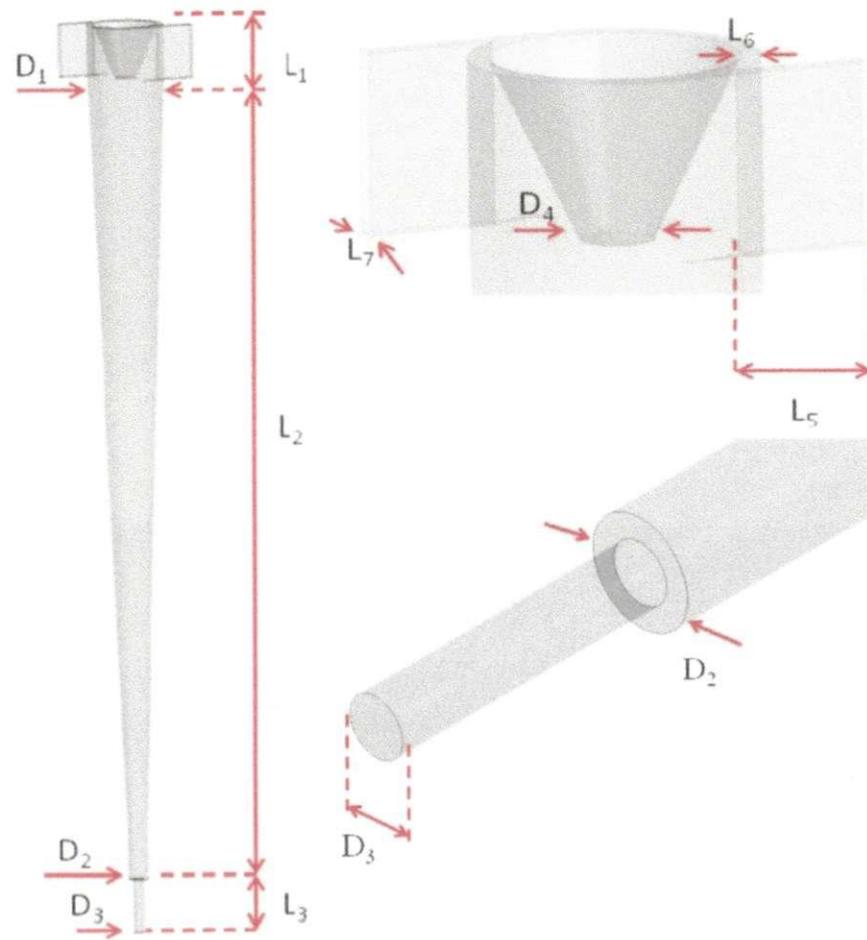
4.3. Malhas

Para se estudar numericamente o comportamento dos fluidos no interior dos separadores ciclônicos, bem como a eficiência de separação água/óleo faz-se necessário criar uma representação, o mais fiel possível da geometria do equipamento, em um domínio computacional denominado de malha.



Diâmetros (mm)	Parte cônica	D ₁	70
	Parte cilíndrica	D ₂	18
	Saída normal	D ₃	10
	Cone interno	D ₄	18
Comprimento (mm)	Entrada tangencial	L ₁	50
	Região cilíndrica	L ₂	700
	Saída tangencial	L ₃	50
	Saída normal	L ₄	50
Entrada tangencial (mm)	Altura	L ₅	50
	Largura	L ₇	5
	Comprimento	L ₁	50
Saídas	Altura	L ₉	50
	Espessura	L ₈	5

Figura 4.2: Representação do separador ciclônico A e dimensões.



Diâmetros (mm)	Parte cônica	D ₁	70
	Parte cilíndrica	D ₂	18
	Saída normal	D ₃	10
	Cone interno	D ₄	18
Comprimento (mm)	Entrada tangencial	L ₁	50
	Região cilíndrica	L ₂	700
	Saída tangencial	L ₃	50
	Saída normal	L ₄	50
Entrada tangencial (mm)	Altura	L ₅	50
	Largura	L ₇	5
	Comprimento	L ₁	50
Saídas	Diâmetro Saída 1	D ₂	18
	Diâmetro Saída 2	D ₃	10

Figura 4.3: Representação do separador ciclônico B e dimensões.

Para tanto, se faz necessário subdividir o domínio apresentado na Figura 4.1 em vários subdomínios ou elementos, formando assim a malha. Para se gerar esta malha do separador ciclônico utilizando o ICEM CFD foram seguidas as etapas:

- a) Definir interativamente um conjunto de blocos por meio de divisão, junção, definições de borda, modificações das faces e movimentos nos vértices;
- b) Verificar a qualidade dos blocos para assegurar que a blocagem gere uma malha de boa qualidade;
- c) Atribuir cotas nos lados dos blocos para definir o tamanho máximo dos elementos ou volumes de controle e razão de expansão;
- d) Gerar a malha com ou sem parâmetros de projeções especificadas;
- e) Verificar a qualidade da malha para garantir que os critérios de qualidade especificados sejam atendidos;
- f) Repetir o (s) procedimento (s) caso seja (m) necessário (s).

Na Figura 4.4, encontra-se a representação das blocagens utilizadas dentre as diferentes estratégias testadas no decorrer do mesmo.

As malhas estruturadas resultantes destas blocagens estão representadas na Figura 4.5 e 4.6. Estas malhas são resultados de diferentes refinamentos e são constituídas de 300000 volumes de controle cada. Estão igualmente representados na Figura 4.5 e 4.6 alguns detalhes das malhas, onde pode ser observada a boa distribuição dos elementos sobre o domínio de estudo.

4.4. Modelagem Matemática do Escoamento Bifásico

A fim de realizar as simulações tridimensionais foram feitas algumas considerações referentes ao escoamento bifásico (óleo-água) conforme descritas a seguir:

- ✓ Escoamento permanente;
- ✓ Escoamento isotérmico;
- ✓ Não há transferência de massa interfacial;
- ✓ Fluido Newtoniano;

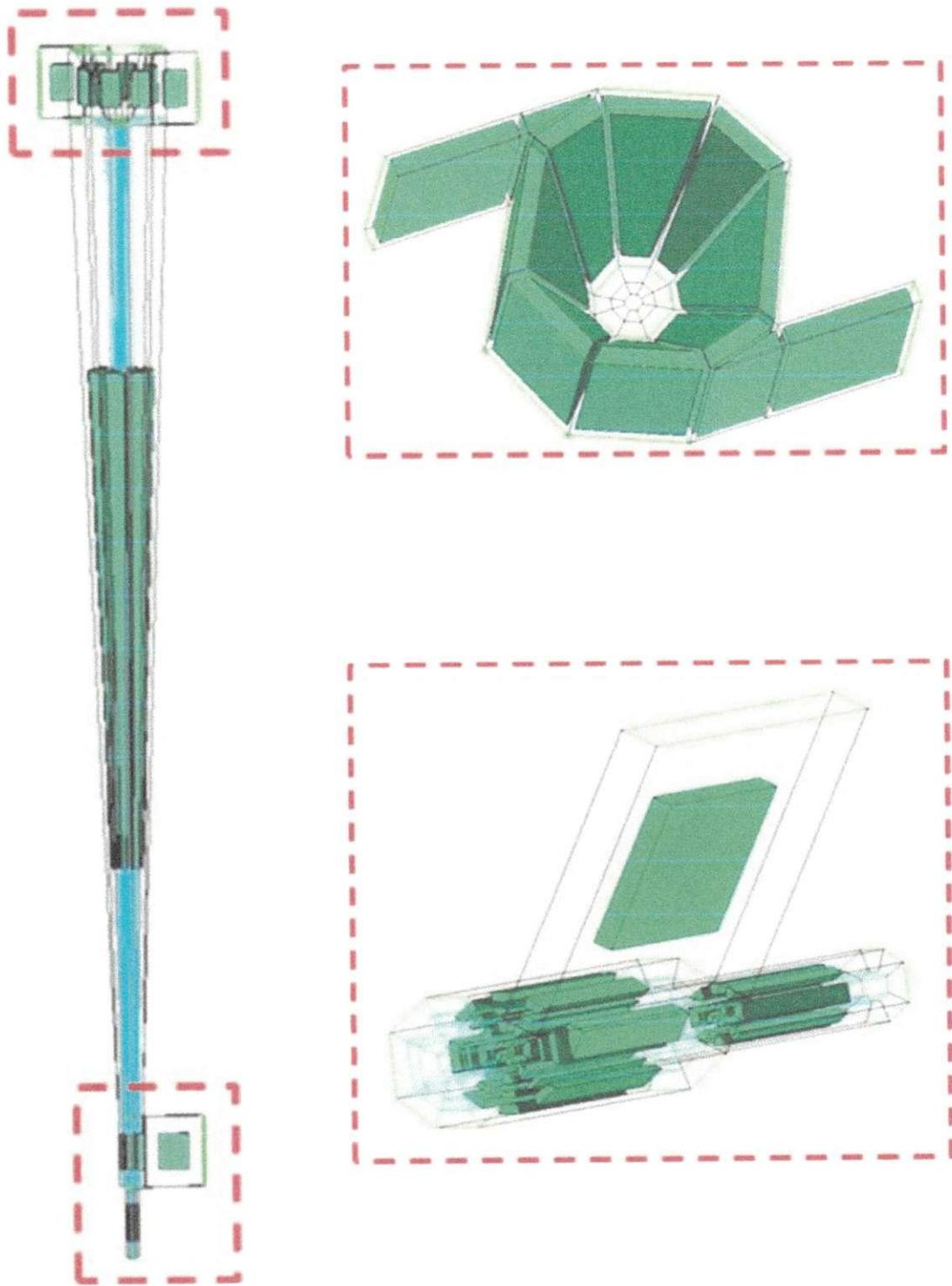


Figura 4.4: Representação da estratégia de blocagem utilizada para geração da malha do separador ciclônico.

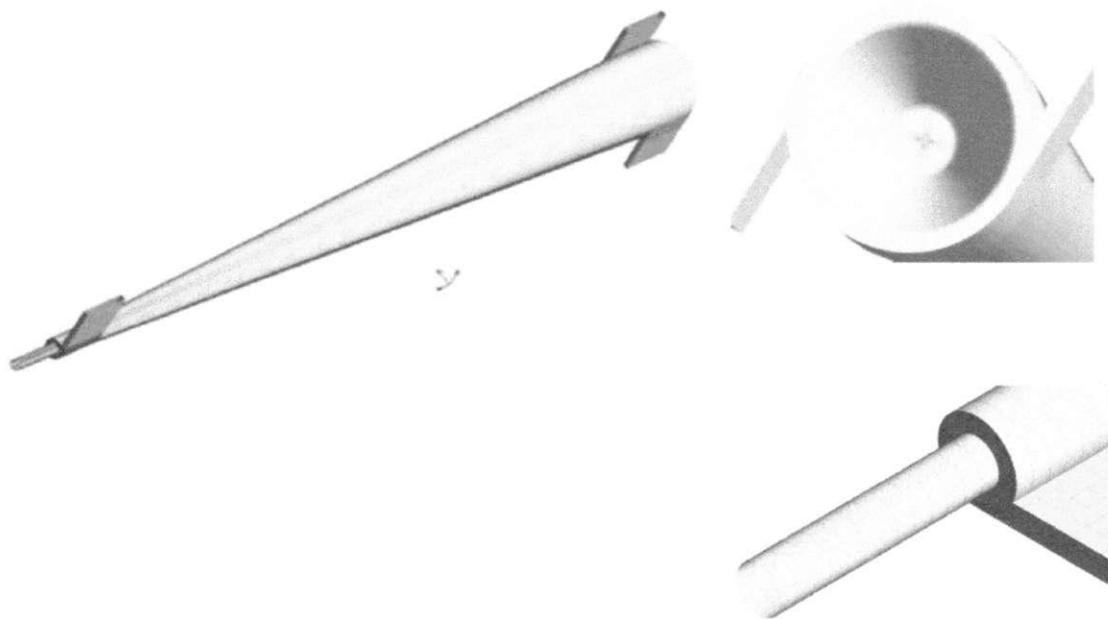


Figura 4.5: Representação da malha: Separador ciclônico A.

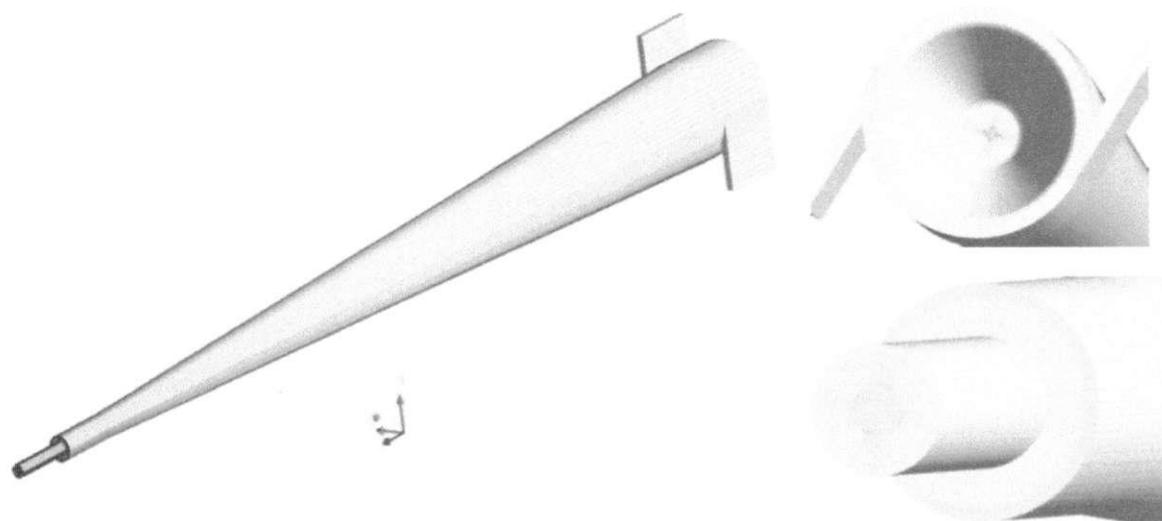


Figura 4.6: Representação da malha: Separador ciclônico B.

- ✓ Abordagem Euleriana-Euleriana, considerando-se a água como a fase contínua e o óleo como a fase dispersa;
- ✓ Utilizado o modelo de turbulência o modelo RNG $k-\epsilon$, considerando os efeitos do parâmetro de curvatura;
- ✓ Foi adotado o valor do coeficiente de arraste constante e igual a 0,44.

4.4.1 Equação da Conservação de Massa

A equação de conservação de massa (Equação 3.8) para o escoamento bifásico em estudo é definida pela seguinte relação:

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha) = 0 \quad (4.1)$$

onde ρ e \bar{U} são respectivamente densidade e o vetor velocidade. Para a fase α , o vetor velocidade é dado por $\bar{U}_\alpha = (u, v, w)$ (MANUAL CFX, 2011).

4.4.2 Equação da Quantidade de Movimento

Com as considerações adotadas a Equação 3.9 passa a ser escrita pela Equação 4.2.

$$\nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \bar{U}_\alpha \otimes \bar{U}_\alpha)] = -f_\alpha \nabla p_\alpha + \mu \nabla^2 f_\alpha v + \bar{M}_\alpha \quad (4.2)$$

onde p é a pressão, \bar{M}_α representa as forças de arraste definida por:

$$\bar{M}_\alpha = \frac{3C_D}{4d_p} f_\beta \rho_\alpha |\bar{U}_\beta - \bar{U}_\alpha| (\bar{U}_\beta - \bar{U}_\alpha) \quad (4.3)$$

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

4.4.3 Modelo de Turbulência

O modelo utilizado no presente trabalho foi o modelo de Reynolds Stress (RNG κ - ϵ). As equações 3.21 e 3.22, com as considerações do presente trabalho, se resumem à:

$$\nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = P + G - \rho \epsilon \quad (4.4)$$

$$\nabla(\rho U \varepsilon) - \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] = (C_1 - C_{IRNG}) \frac{\varepsilon}{k} [\theta P + C_3 \max(G, 0) \theta] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.5)$$

onde os valores das constantes são apresentados na seção 3.6.5.2 (página 35).

4.5. Condições de Contorno

As condições iniciais e de contorno aplicadas no domínio de estudo para resolver as equações de conservação de massa e momento linear são dadas a seguir:

- Considera-se a pressão em cada saída igual a 2,1 bar;
- Foi adotada a condição de não deslizamento nas paredes do separador ciclônico;
- A mistura tem vazões de entrada no equipamento variando entre 4,5 a 9,0 m³/h, descrito na Tabela 4.2;
- A mistura de alimentação do separador ciclônico tem concentração de óleo variando de 1 a 10 %, como descrito na Tabela 4.2.

As propriedades físico-químicas da água e do óleo a 293,15 K que foram utilizadas estão apresentadas na Tabela 4.1:

A Tabela 4.2 apresenta os diferentes casos simulados, onde estão apresentados o separador ciclônico estudado, a fração volumétrica das fases envolvidas (água e óleo), a vazão volumétrica da mistura bifásica na alimentação e o diâmetro da fase dispersa (óleo).

Tabela 4.1: Propriedades físicas dos fluidos em estudo.

Propriedades	Fluidos	
	Água	Óleo
Densidade (kg/m ³)	997	868,7
Viscosidade (Pa.s)	8,889 × 10 ⁻⁴	0,985
Massa molar (kg/kmol)	18,05	873,0
Tensão superficial (N/m)		0,01

Fonte: Barbosa (2011).

Tabela 4.2: Casos estudados

Casos	Separador Ciclônico	Vazão na Entrada da mistura, W (m ³ /h)	Concentração Volumétrica de óleo na Entrada, f _o (%)
Caso 01	A	4,5	5
Caso 02	A	6,3	5
Caso 03	A	9,0	5
Caso 04	B	4,5	5
Caso 05	B	6,3	5
Caso 06	B	9,0	5
Caso 07	A	6,3	1
Caso 08	A	6,3	10
Caso 09	B	6,3	1
Caso 10	B	6,3	10

A Tabela 4.3 resume as características do modelo matemático e tratamento numérico adotado neste trabalho.

Tabela 4.3: Considerações gerais do problema e da solução numérica

Tipo de escoamento	Bifásico (óleo-água), tridimensional, incompressível e isotérmico
Regime de fluxo	Permanente e turbulento
Modelo de Turbulência	RNG <i>k-epsilon</i>
Modelo de Transferência Interfacial	Modelo de Partícula
Força interfacial	Arraste (coeficiente de arraste = 0,44 - válido para o regime turbulento)
Esquema de interpolação para a pressão	Trilinear
Esquema de interpolação para a velocidade	Trilinear
Influência da parede para os fluidos	Sem deslizamento (<i>no slip</i>)
Influência na interface dos fluidos	Deslizamento livre (<i>free slip</i>)
Esquema de advecção	Alta resolução (<i>High Resolution</i>)
Critério de convergência para a massa	Resíduo médio quadrático (RMS) 10 ⁻⁷ kg/s

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultados Qualitativos

Os resultados numéricos obtidos com as simulações nos separadores ciclônicos A e B (Figura 4.1e 4.2) são analisados por linhas de fluxo, campo de pressão, perfis de velocidade axial e tangencial e concentração de óleo.

5.1.1. Linhas de Fluxo

Nas Figuras 5.1 e 5.2 está apresentado o comportamento das linhas de fluxo para o óleo e água no interior dos separadores ciclônicos A e B, respectivamente, para a vazão de entrada $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de óleo igual a 5% (Casos 03 e 06 da Tabela 4.2). Observa-se a presença de duas correntes fluidas bem distintas e ambas apresentadas em forma espiral, semelhante o que é observado em hidrociclones tradicionais, como apresentado em vários trabalhos na literatura, como exemplos, Moraes (2004), Cullivan *et al.* (2004), Ahmed *et al.* (2008), Wang e Yu (2008), Souza *et al.* (2011) e Farias *et al.* (2011). Nota-se também, que o fluxo espiral da corrente de água tende a escoar nas proximidades da parede do equipamento, enquanto que a corrente oleosa escoar mais internamente, devido à diferença de densidade entre as fases. Este fato pode ser ainda explicado com base nas forças a que os fluidos são submetidos (força de arraste, centrífuga e gravitacional). As forças de arraste

atuam desde o momento em que são introduzidos os fluidos pelo tubo tangencial de alimentação até o momento em que as correntes fluidas chocam-se contra a parede curva do corpo cilíndrico. Nesse instante entram em ação as forças centrífugas proporcionando um movimento circular das correntes que é traduzido por um aumento do momento angular. Devido à expansão a que as correntes de água e óleo são submetidas entre o tubo de alimentação e o corpo cilíndrico, as correntes se afastam da entrada tangencial em direção as saídas. Neste instante há uma competição entre o momento angular e o momento axial proporcionando uma redução na intensidade turbilhonar e, assim, o movimento circular formado se transforma em um movimento espiral. Graças a este tipo de comportamento é possível separar o óleo (fase dispersa) da corrente contínua (água).

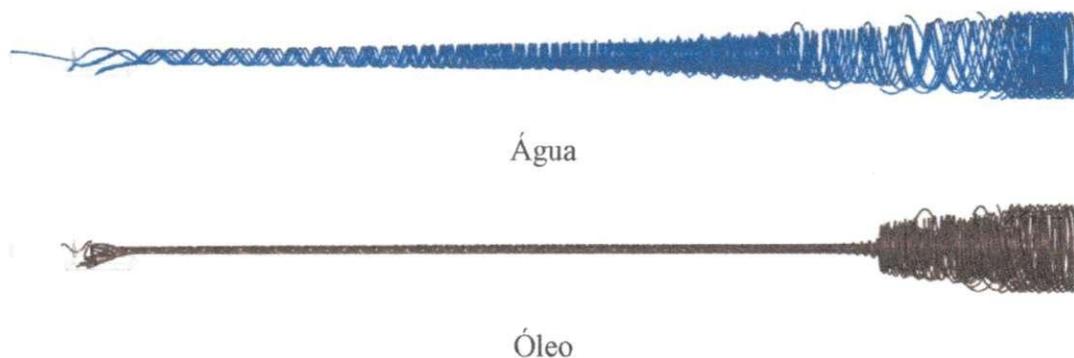


Figura 5.1: Linha de fluxo no interior do separador ciclônico A para vazão de entrada $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de óleo igual a 5,0%.

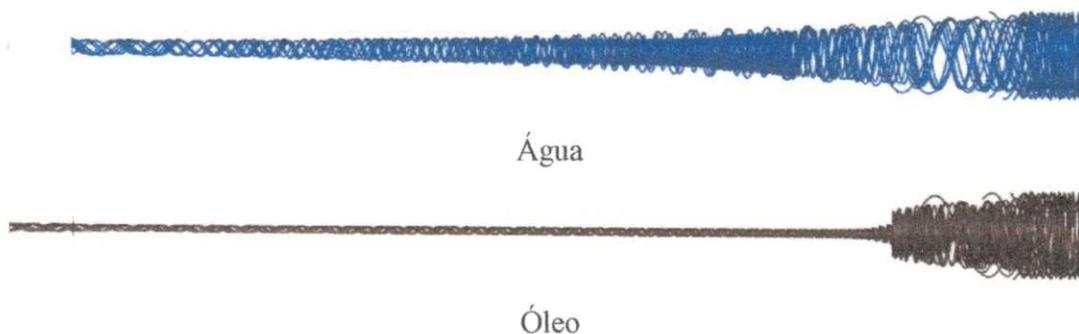


Figura 5.2: Linha de fluxo no interior do separador ciclônico B para vazão de entrada $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de óleo igual a 5,0%.

Com objetivo de analisar em detalhes esse comportamento na coleta dos fluidos, apresentam-se, nas Figuras 5.3 e 5.4, detalhes da região da saída dos separadores ciclônicos, onde se observam os fluxos de água e óleo. Verifica-se, na Figura 5.3, que há influência da saída tangencial sobre as linhas de fluxos de óleo e água; percebe-se que a corrente de óleo

localizado no centro do separador ciclônico é deformada, ocorrendo, assim, uma zona de mistura no final do equipamento. Comportamento este, não observado no separador ciclônico B (Figura 5.4), apresentando, assim, uma melhor coleta dos fluidos.

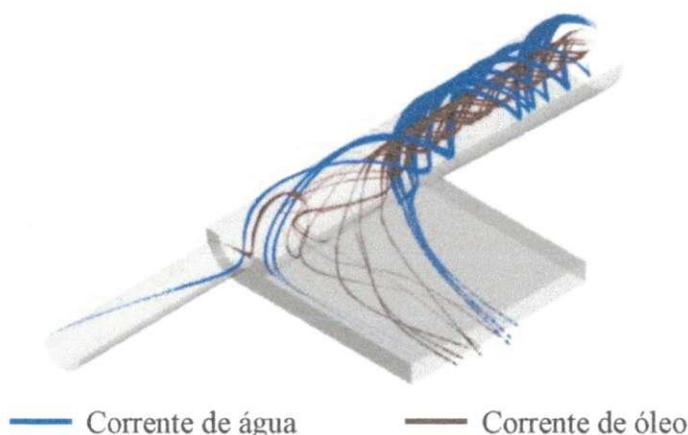


Figura 5.3: Linha de fluxo nas saídas do separador ciclônico A para a vazão de entrada igual a $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de óleo igual a $5,0\%$.

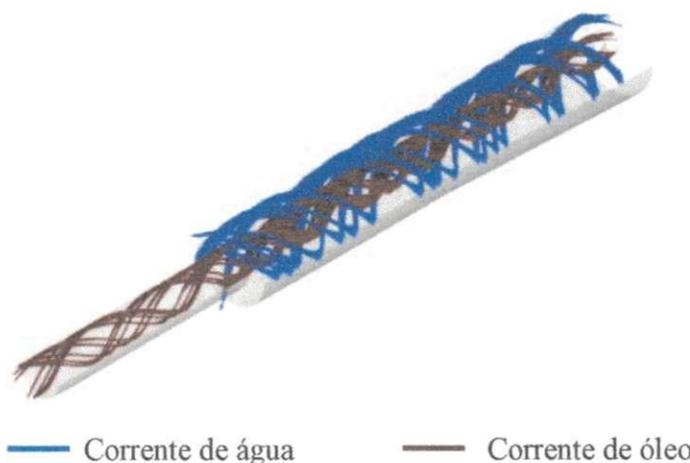


Figura 5.4: Linha de fluxo nas saídas do separador ciclônico A para a vazão de entrada igual a $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de óleo igual a $5,0 \%$.

5.1.2. Campo de Pressão

Nas Figuras 5.5 e 5.6 estão ilustradas as distribuições de pressão sobre o plano longitudinal xz , passando pelo eixo central dos separadores ciclônicos A e B, respectivamente, e sobre diferentes planos transversais xy , em diferentes posições ao longo do dispositivo, para vazão de entrada $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de óleo igual a $5,0 \%$. Estas figuras mostram que a pressão decresce radialmente em direção ao centro a partir da parede do separador, igualmente observado por outros autores como Souza *et al.* (2011);

Farias *et al.* (2011); Barbosa (2011) e Souza *et al.* (2011) ao estudarem hidrociclones tradicionais.

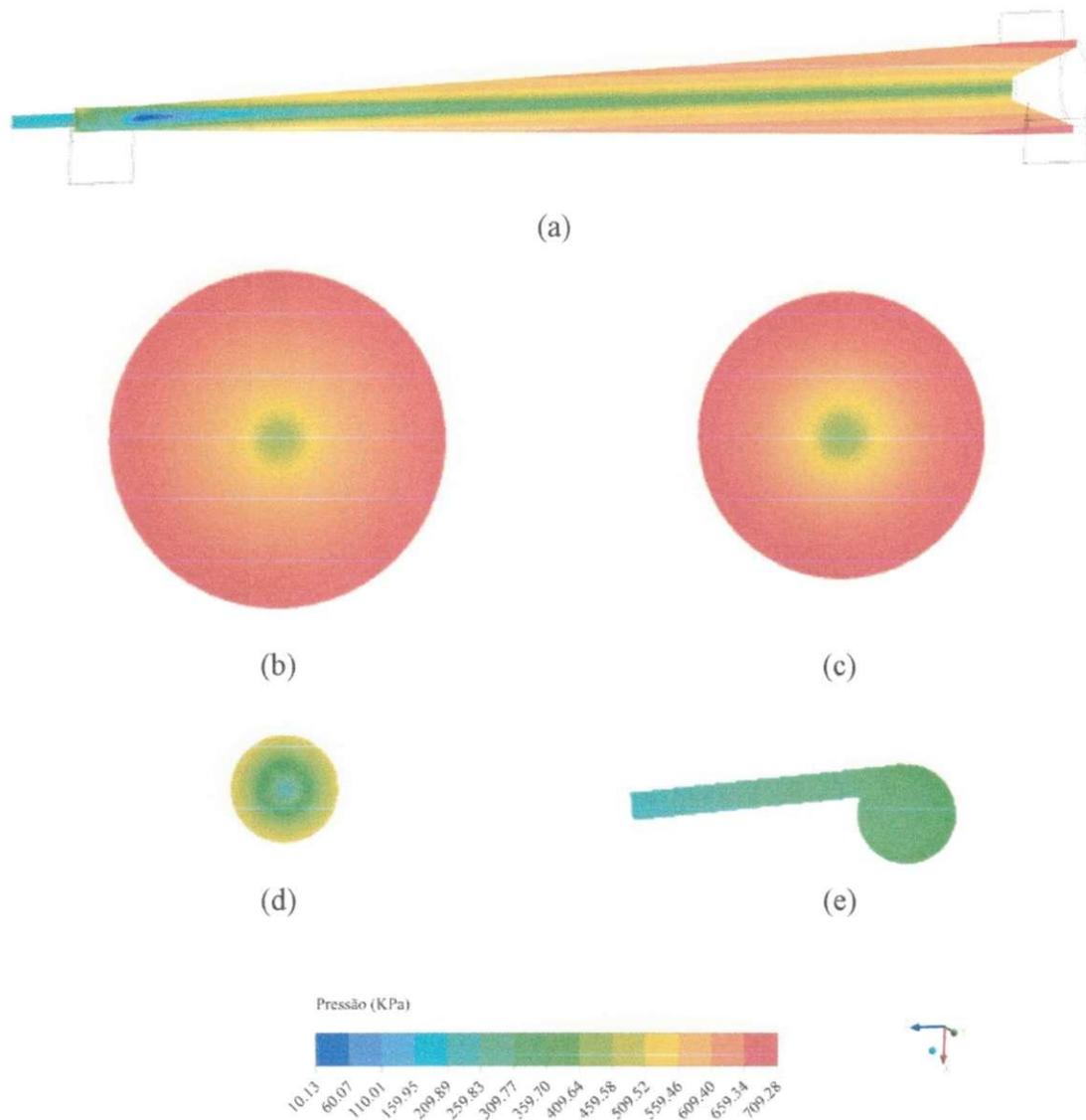


Figura 5.5: Campo de pressão no separador ciclônico A, para vazão de $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de $5,0\%$. sobre o plano, (a) xz , (b) xy em $z=60$ mm, (c) xy em $z=200$ mm, (d) xy em $z=700$ mm, (e) xy em $z=775$ mm.

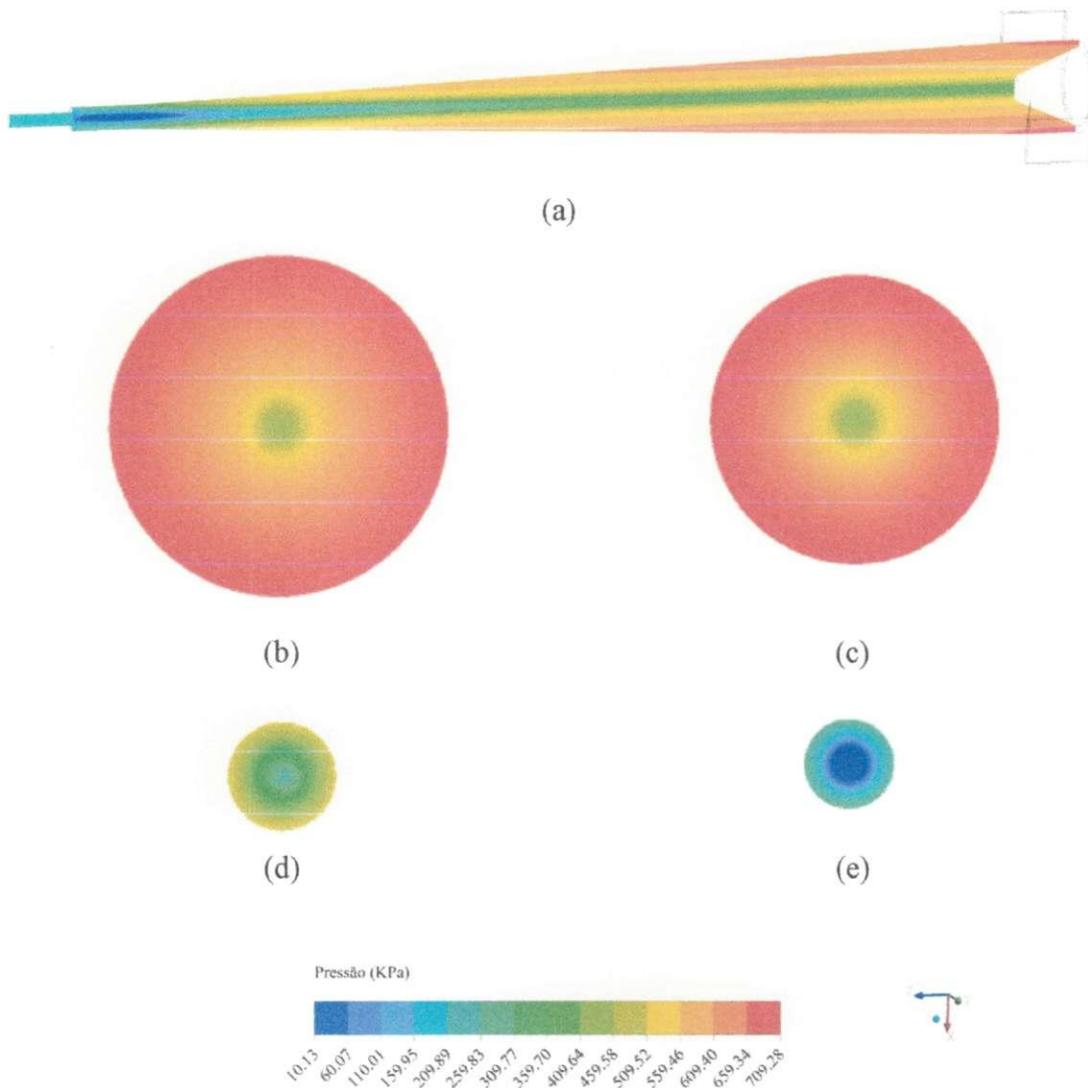


Figura 5.6: Campo de pressão no separador ciclônico B, para vazão de $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de $5,0\%$. sobre o plano, (a) xz , (b) xy em $z=60$ mm, (c) xy em $z=200$ mm, (d) xy em $z=700$ mm, (e) xy em $z=775$ mm.

5.1.3. Comportamento da Velocidade

Nas Figuras 5.7 e 5.8, estão representados os perfis de velocidade axial sobre um plano longitudinal xz , passando pelo eixo central dos separadores ciclônicos A e B, respectivamente. Observa-se que as maiores velocidades axiais são apresentadas no centro e as menores próximas às paredes do equipamento. Verifica-se que há velocidades axiais de valor negativo, evidenciando a presença de zona de recirculação de fluidos. Esta informação é confirmada pelas Figuras 5.9 e 5.10, onde são apresentados os vetores da velocidade da fase contínua ao longo do plano xz , passando pelo eixo central dos separadores ciclônicos A e B.

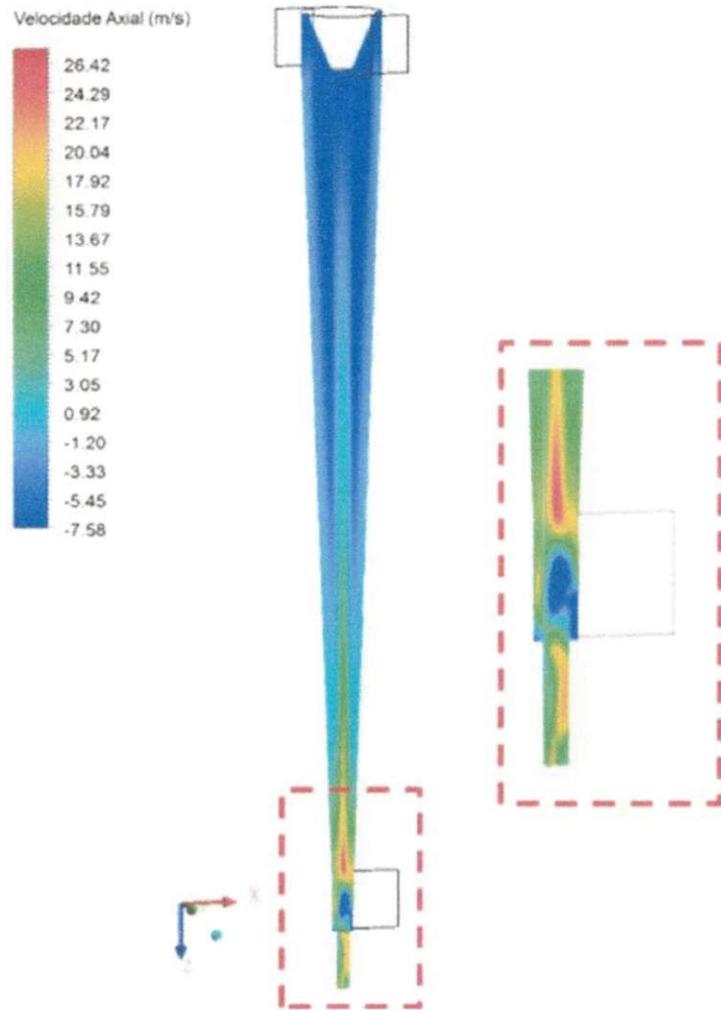


Figura 5.7: Campo da componente da velocidade axial sobre o plano xz no separador ciclônico A, para vazão de $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de 5,0%.

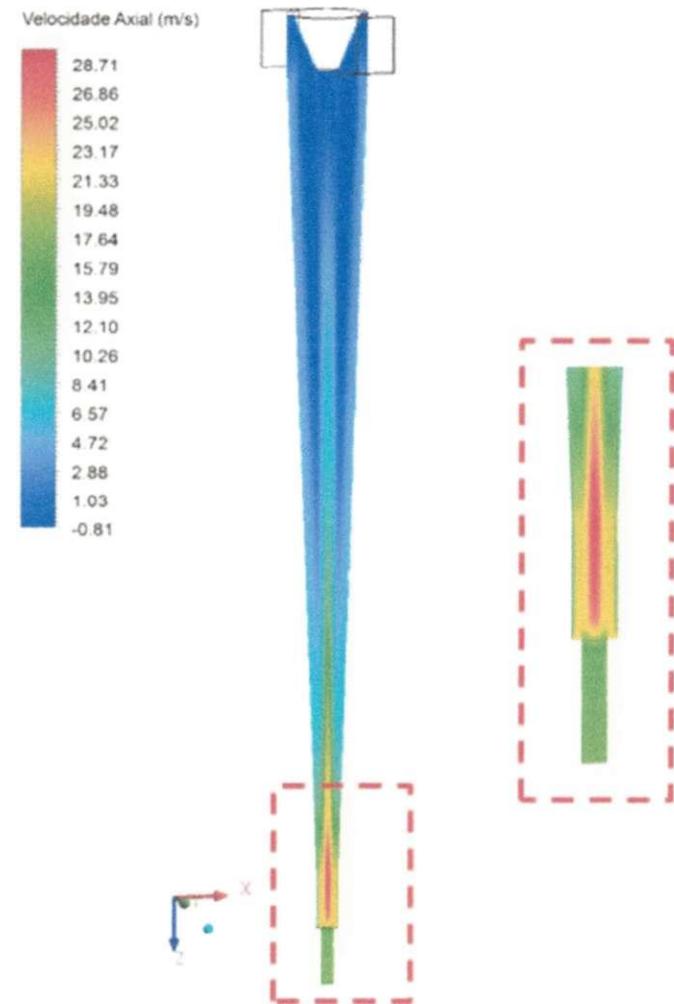


Figura 5.8: Campo da componente da velocidade axial sobre o plano xz no separador ciclônico B, para vazão de $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de 5,0%.

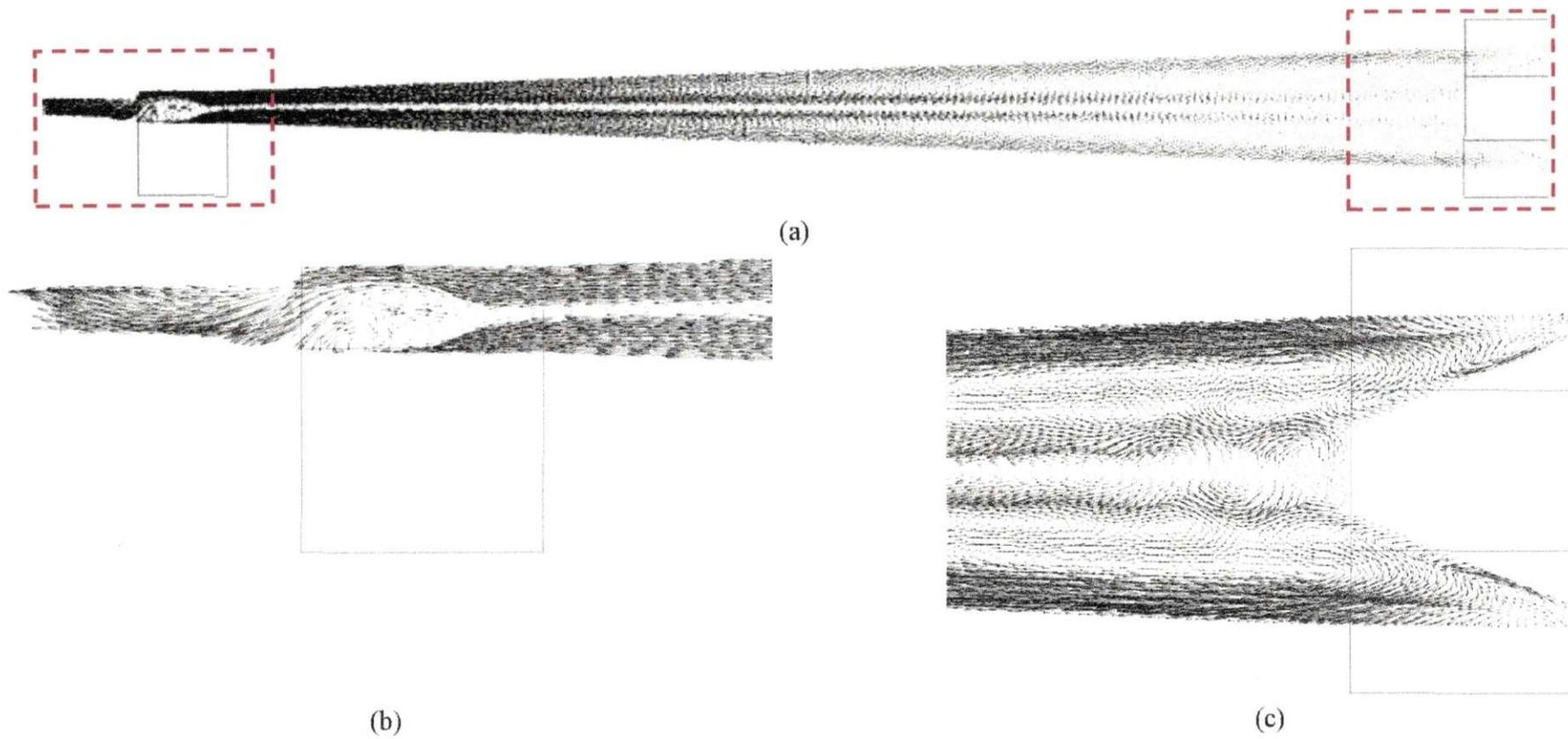


Figura 5.9: Vetores da velocidade da água, (a) Separador ciclônico A, (b) Destaque das saídas, (c) Destaque das entradas.

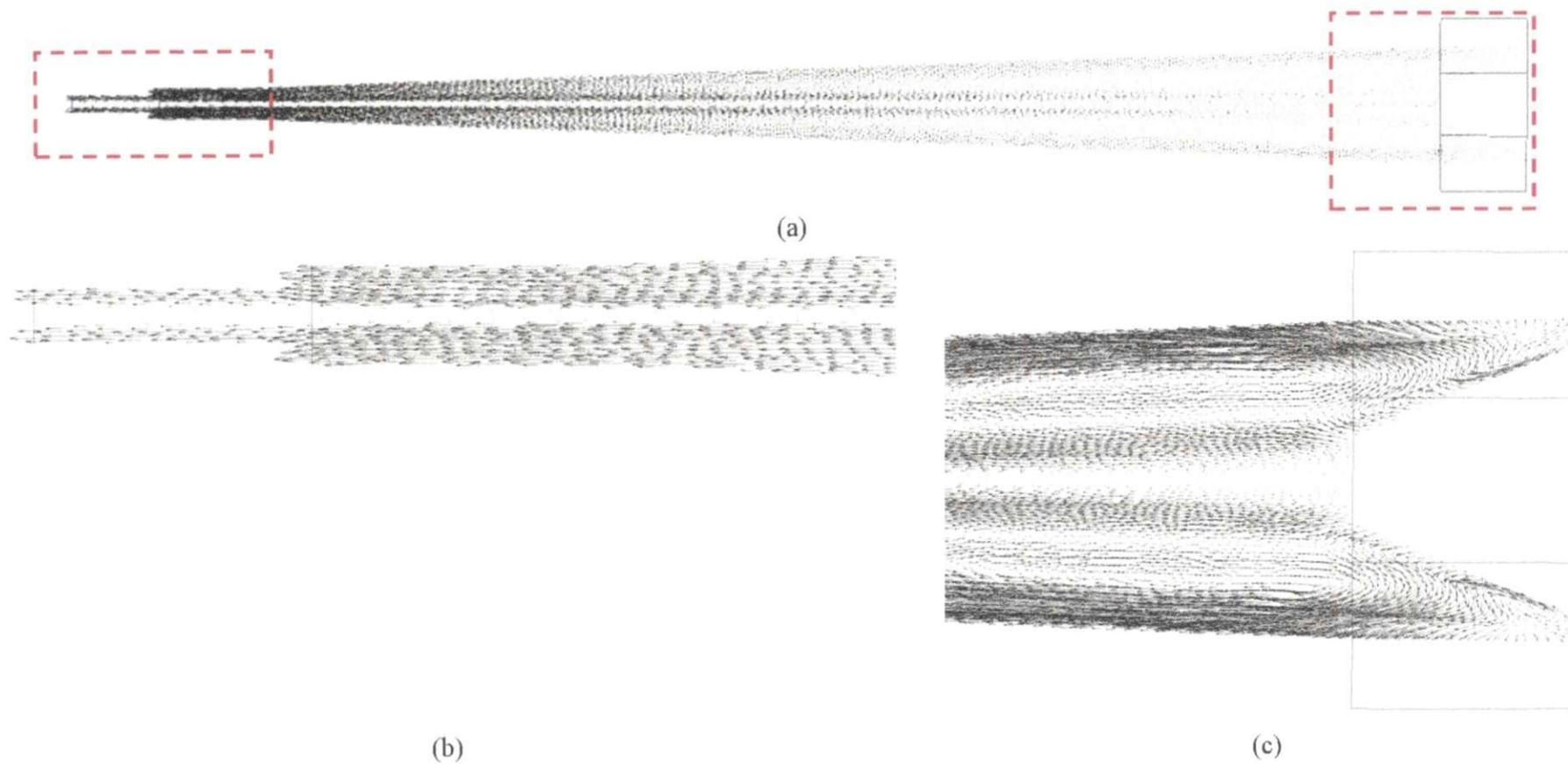


Figura 5.10: Vetores da velocidade da água, (a) Separador ciclônico B, (b) Destaque das saídas, (c) Destaque das entradas.

Nas Figuras 5.11 e 5.12, estão apresentados os perfis de velocidade tangenciais sobre um corte longitudinal, plano xz, passando pelo eixo central dos separadores ciclônicos A e B, respectivamente. Verifica-se que a componente da velocidade tangencial é positiva no sentido anti-horário de θ , comportamento este observado em hidrociclone tradicional por Farias *et al.* (2009), Buriti *et al.* (2011), Freitas (2009) e Barbosa (2011). Observa-se, em destaque, o comportamento da velocidade tangencial nas saídas, verificando, para os casos estudados, que no separador ciclônico A o perfil de velocidade perde sua forma característica, enquanto no separador B, este perfil característico da velocidade tangencial ocorre em todo o equipamento.

5.1.4. Comportamento da Fração Volumétrica de Óleo

Nas Figuras 5.13 e 5.14, estão representados os campos de fração volumétrica do óleo sobre o plano xz passando pelo eixo central do separador e sobre diferentes planos transversais xy, em diferentes posições ao longo do dispositivo, medida do topo do equipamento, para uma vazão de entrada igual a 9,0 m³/h e concentração de óleo igual a 5,0%, nos dois separadores em estudo. Estes resultados confirmam a informação das Figuras 5.1 e 5.2, no qual o óleo tende a se localizar no centro do separador desde o início do escoamento.

5.2. Resultados Quantitativos

Para analisar a influência da vazão volumétrica e concentração de óleo na alimentação sobre o comportamento dos perfis de pressão, velocidades axial e tangencial e concentração de óleo, foram estudados três casos variando a vazão volumétrica da mistura na entrada de 4,5 a 9,0 m³/h, fixando a concentração volumétrica de óleo em 5% (Casos 01, 02, 03, 04, 05 e 06) e três casos variando a concentração volumétrica de 1 a 10%, fixando a vazão volumétrica da mistura na entrada em 6,3 m³/h (Casos 02, 05, 07, 08, 09 e 10), como apresentado na Tabela 4.2. Foram criados os gráficos sobre quatro posições axiais medidas do topo do equipamento (50, 200, 700 e 775 mm) como mostrado na Figura 5.15.

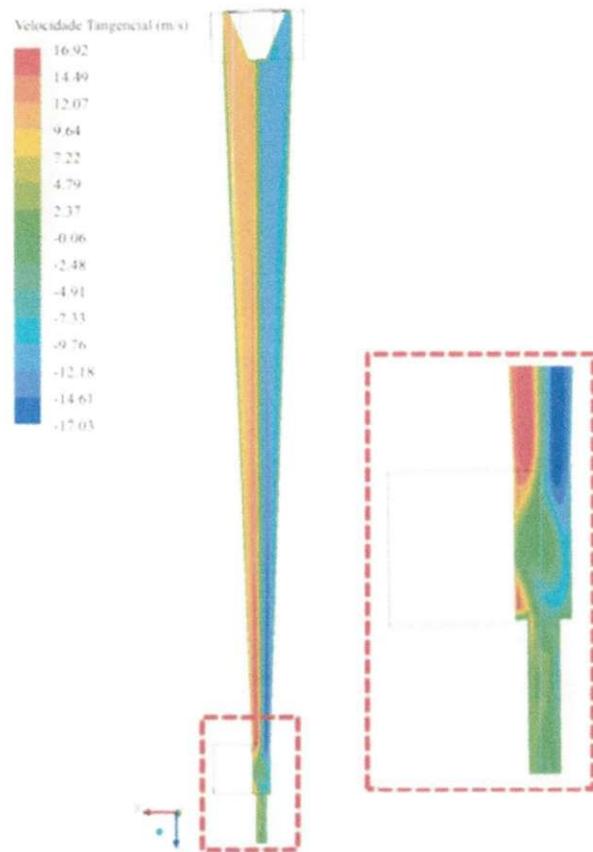


Figura 5.11: Campo da componente da velocidade tangencial sobre o plano xz no separador ciclônico A, para vazão de $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de $5,0\%$.

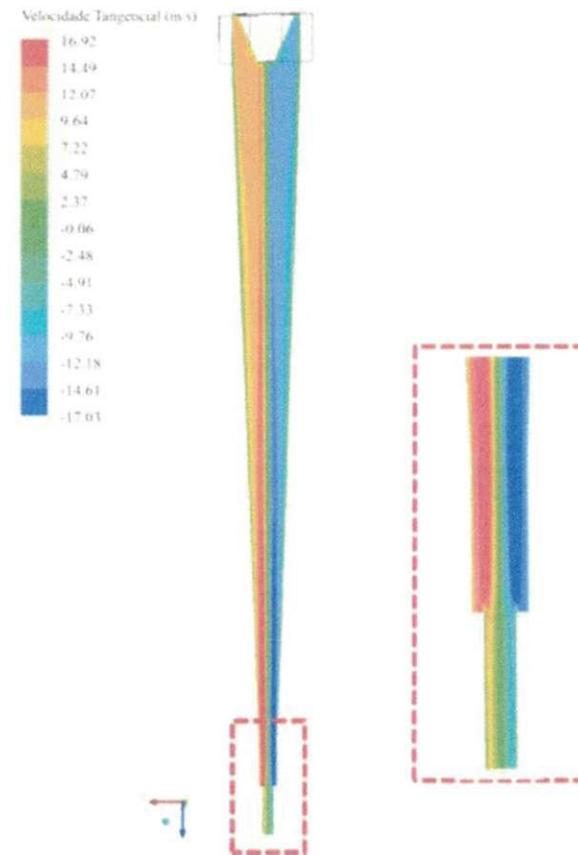


Figura 5.12: Campo da componente da velocidade tangencial sobre o plano xz no separador ciclônico B, para vazão de $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração volumétrica de $5,0\%$.

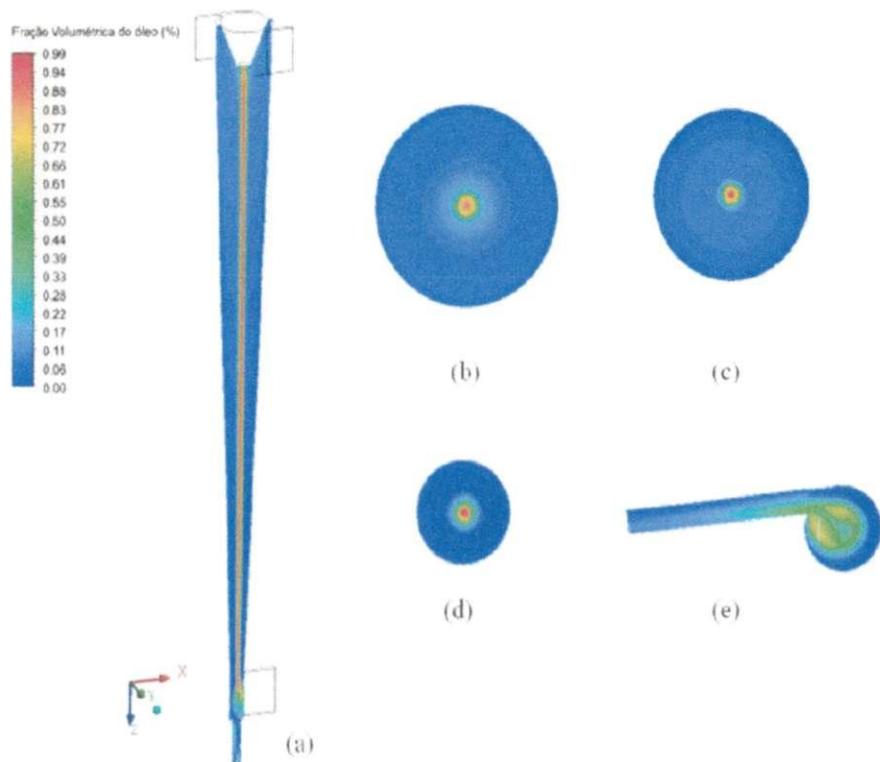


Figura 5.13: Campo de concentração de óleo no separador ciclônico A, para o caso de vazão de $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ no separador ciclônico A sobre os planos (a) xz; (b) xy em $z = 60 \text{ mm}$; (c) xy em $z = 200 \text{ mm}$; (d) xy em $z = 700 \text{ mm}$ e (e) xy em $z = 775 \text{ mm}$.

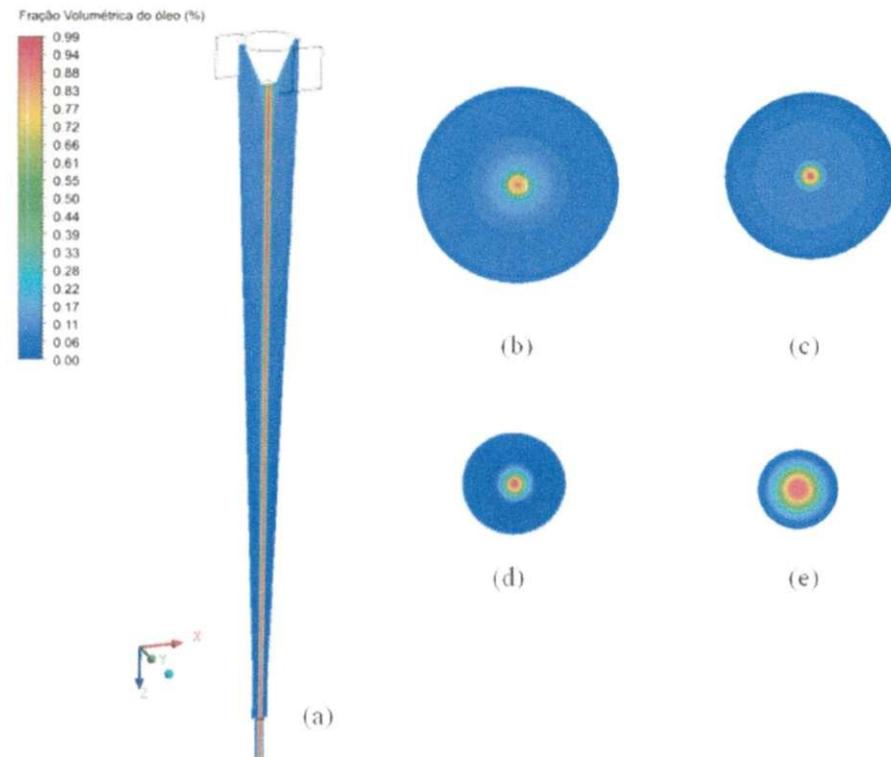


Figura 5.14: Campo de concentração de óleo no separador ciclônico B, para o caso de vazão de $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ sobre os planos (a) xz; (b) xy em $z = 60 \text{ mm}$; (c) xy em $z = 200 \text{ mm}$; (d) xy em $z = 700 \text{ mm}$ e (e) xy em $z = 775 \text{ mm}$

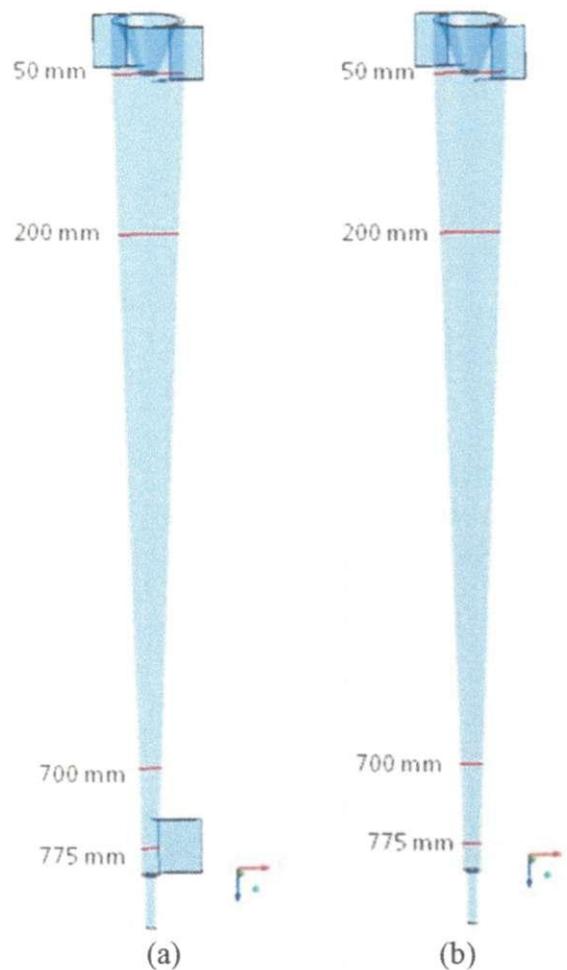


Figure 5.15: Localização das linhas de estudo. (a) Separador ciclônico A; (b) Separador ciclônico B.

5.2.1. Perfis de Pressão

A queda de pressão no separador ciclônico é uma importante variável operacional, que influencia fortemente na eficiência da separação. Neste tópico, é apresentado o comportamento do perfil de pressão com a variação da vazão volumétrica de alimentação.

5.2.1.1. Influência da Vazão de Entrada no Perfil de Pressão

Observa-se nas Figuras 5.16 e 5.17, o comportamento da pressão em função da vazão volumétrica de alimentação, dentro dos separadores ciclônicos A e B, respectivamente. Verifica-se que, quanto maior a vazão volumétrica na alimentação maior será a diferença

entre a pressão no centro e nas paredes do equipamento; o mesmo resultado foi encontrado por Tue Nenu e Yoshida (2008), Buriti (2009) e Chu *et al.* (2000) em hidrociclones tradicionais. Observa-se, ao comparar o comportamento da pressão na posição 775 mm (Figura 5.16d e 5.17d) dentro dos separadores ciclônicos A e B, verifica-se uma simétrica em relação ao eixo central no primeiro equipamento, o que difere do comportamento no separador B.

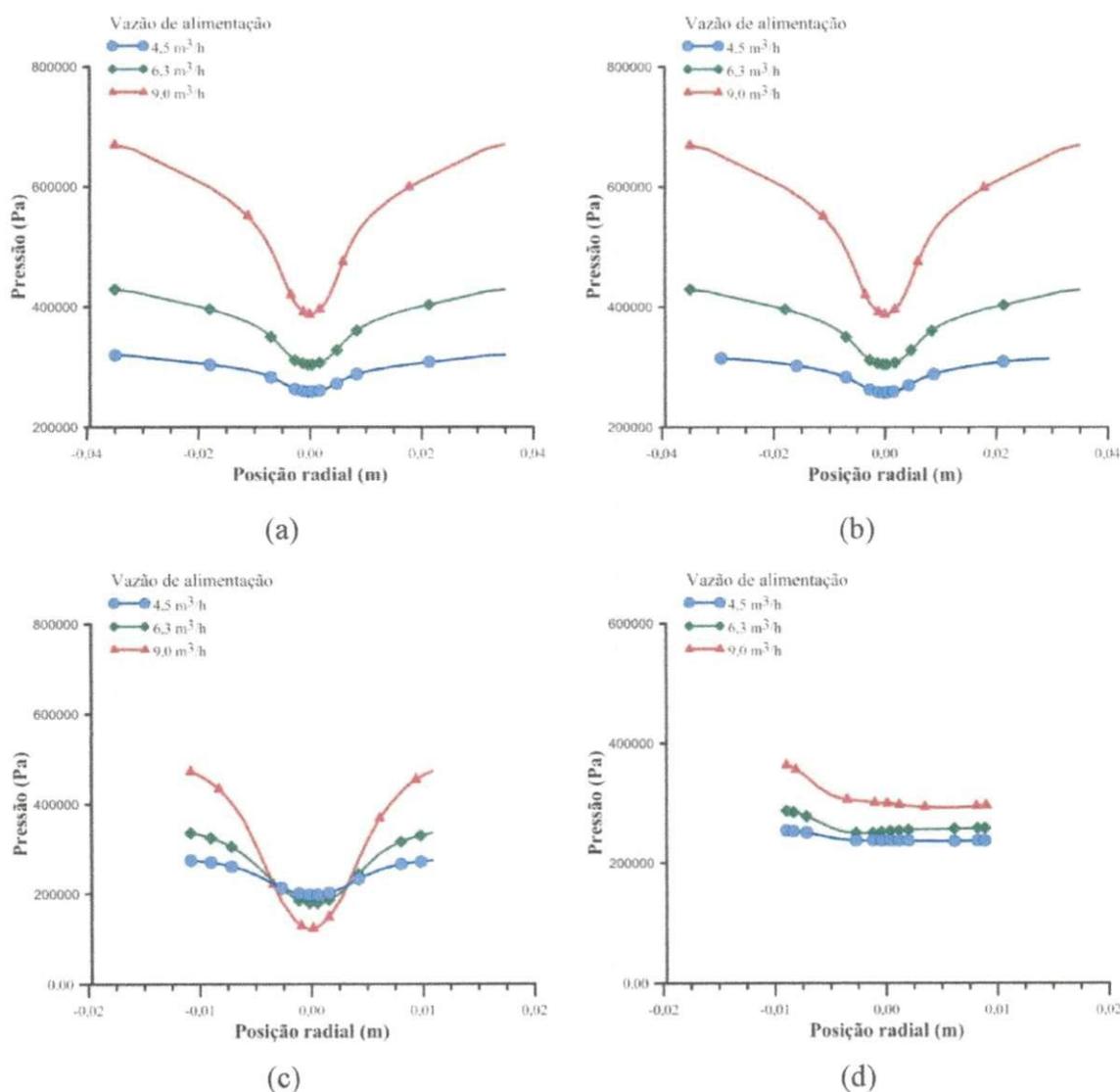
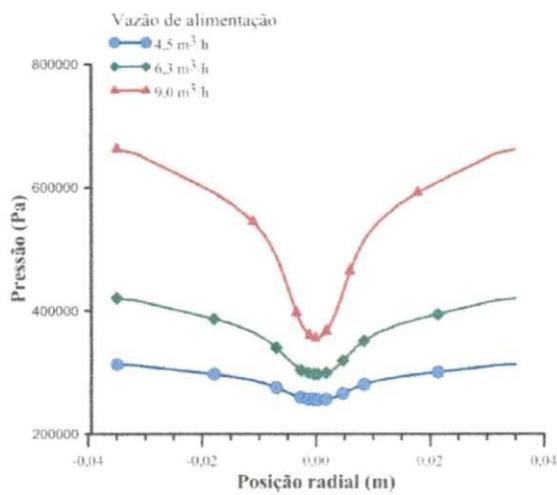
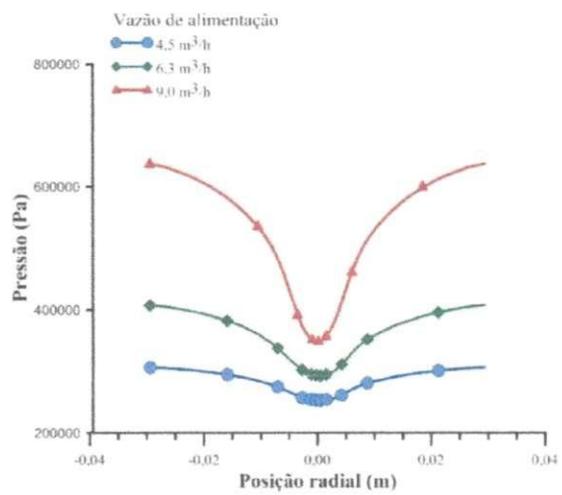


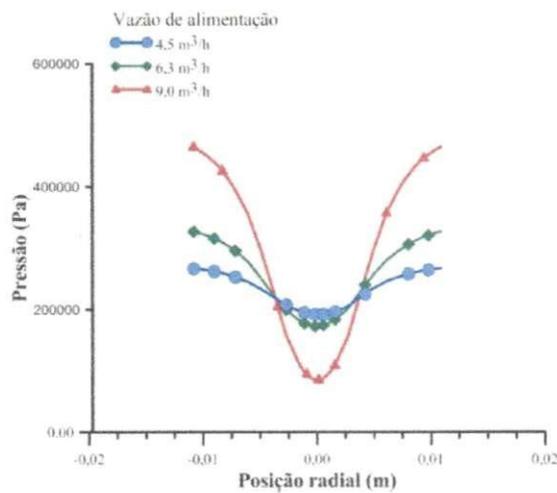
Figura 5.16: Análise da influência da vazão de entrada no perfil de pressão no separador ciclônico A. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm.



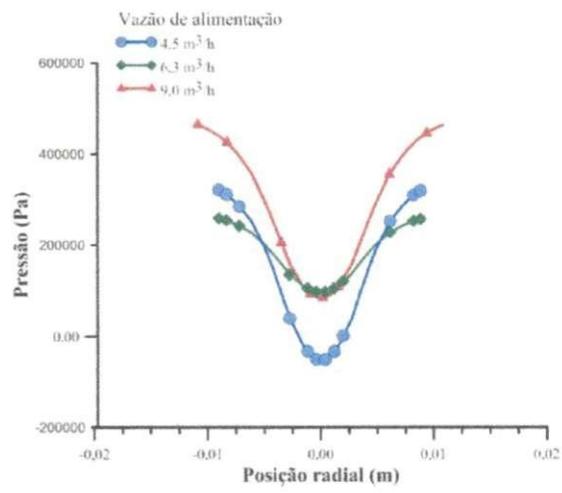
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.17: Análise da influência da vazão de entrada no perfil de pressão no separador ciclônico B. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm.

5.2.2. Perfis de Velocidade Axial

Foi analisada a influência da vazão e concentração de óleo na alimentação sobre o perfil de velocidade axial obtido dentro dos separadores ciclônicos.

5.2.2.1. Influência da Vazão de Entrada no Perfil de Velocidade Axial

Nas Figuras 5.18 e 5.19, são apresentados os perfis de velocidade axial nas quatro posições axiais apresentadas na Figura 5.15. Verifica-se que as velocidades axiais aumentam com o aumento da vazão de entrada, para todos os casos estudados. Observa-se, também, que os maiores valores obtidos de velocidade axial estão localizados no final do equipamento (próximo às saídas). Isto ocorre, porque, nessa região, o momento axial prevalece sobre o momento angular.

A Figura 5.18d mostra que o perfil da velocidade é deformado, ratificando, assim, as informações apresentadas na Figura 5.7. Este comportamento assimétrico não foi observado no separador ciclônico B.

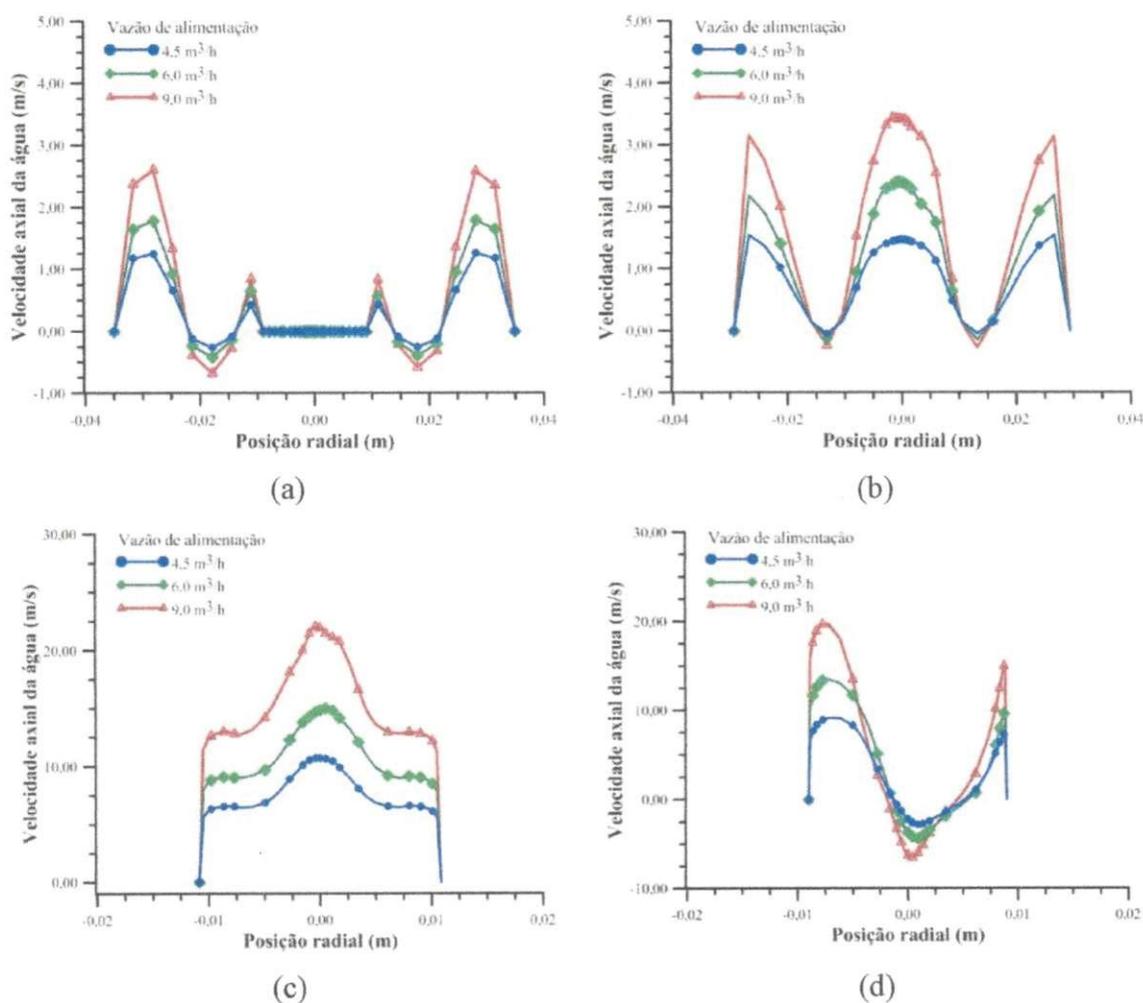


Figura 5.18: Análise da influência da vazão de entrada no perfil da velocidade axial para o separador ciclônico A. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm.

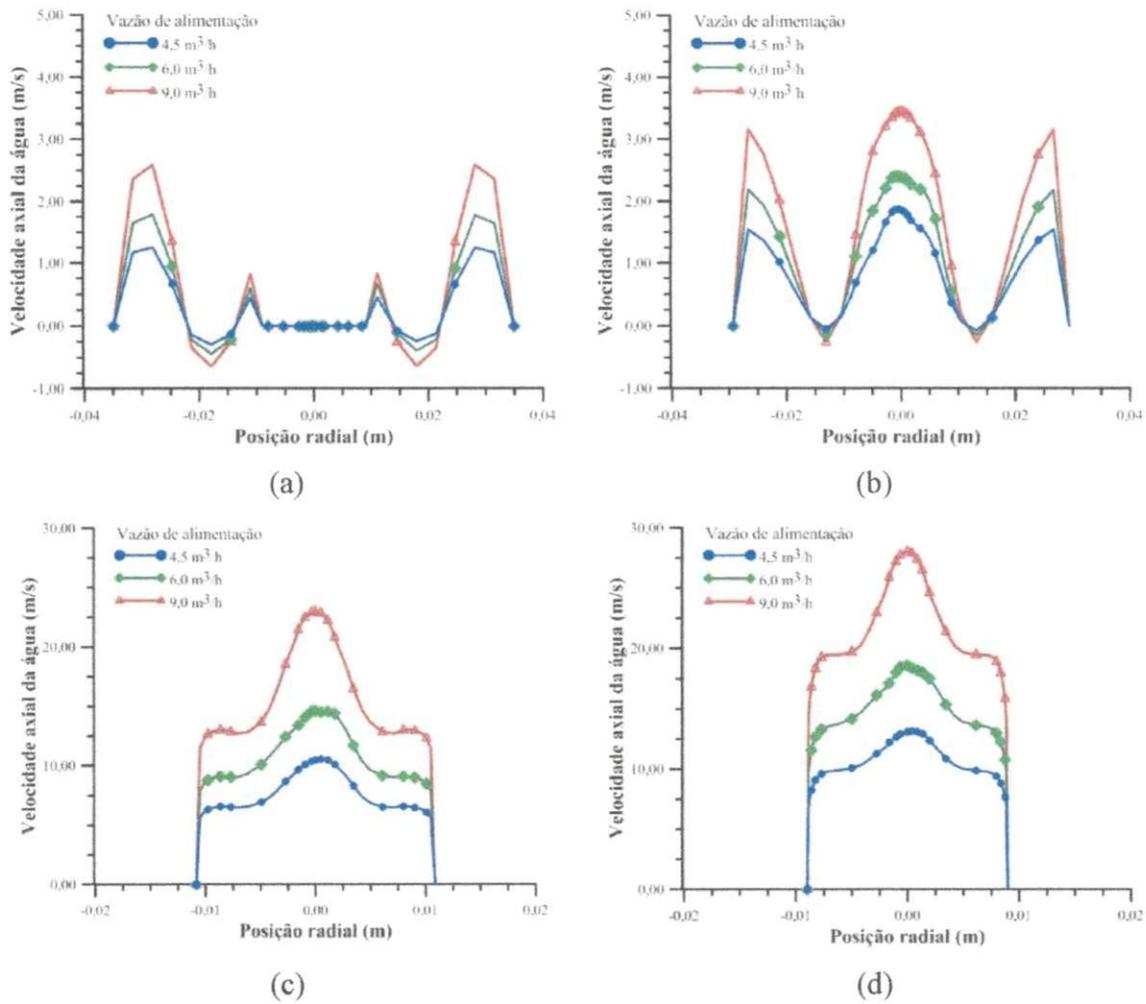


Figura 5.19: Análise da influência da vazão de entrada no perfil de velocidade axial para o separador ciclônico B. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm.

5.2.2.2. Influência da Concentração Volumétrica de Óleo na Velocidade Axial

Estão apresentados nas Figuras 5.20 e 5.21, os perfis de velocidade axial para os casos 02, 07, 08 e 05, 09, 10, respectivamente. Verifica-se que o aumento da concentração de óleo não influencia no perfil de velocidade axial, diferindo do observado por Maciel (2013), ao estudar um hidrociclone, no qual evidenciou que o aumento de óleo na entrada reduz o momento angular.

O caso estudado com menor fração volumétrica de óleo (1,0 %) não apresenta valores negativos de velocidade axial próximo às saídas, diferentemente dos demais casos (Figura 5.20), não havendo, portanto, uma zona de recirculação, refletindo em uma eficiência melhor.

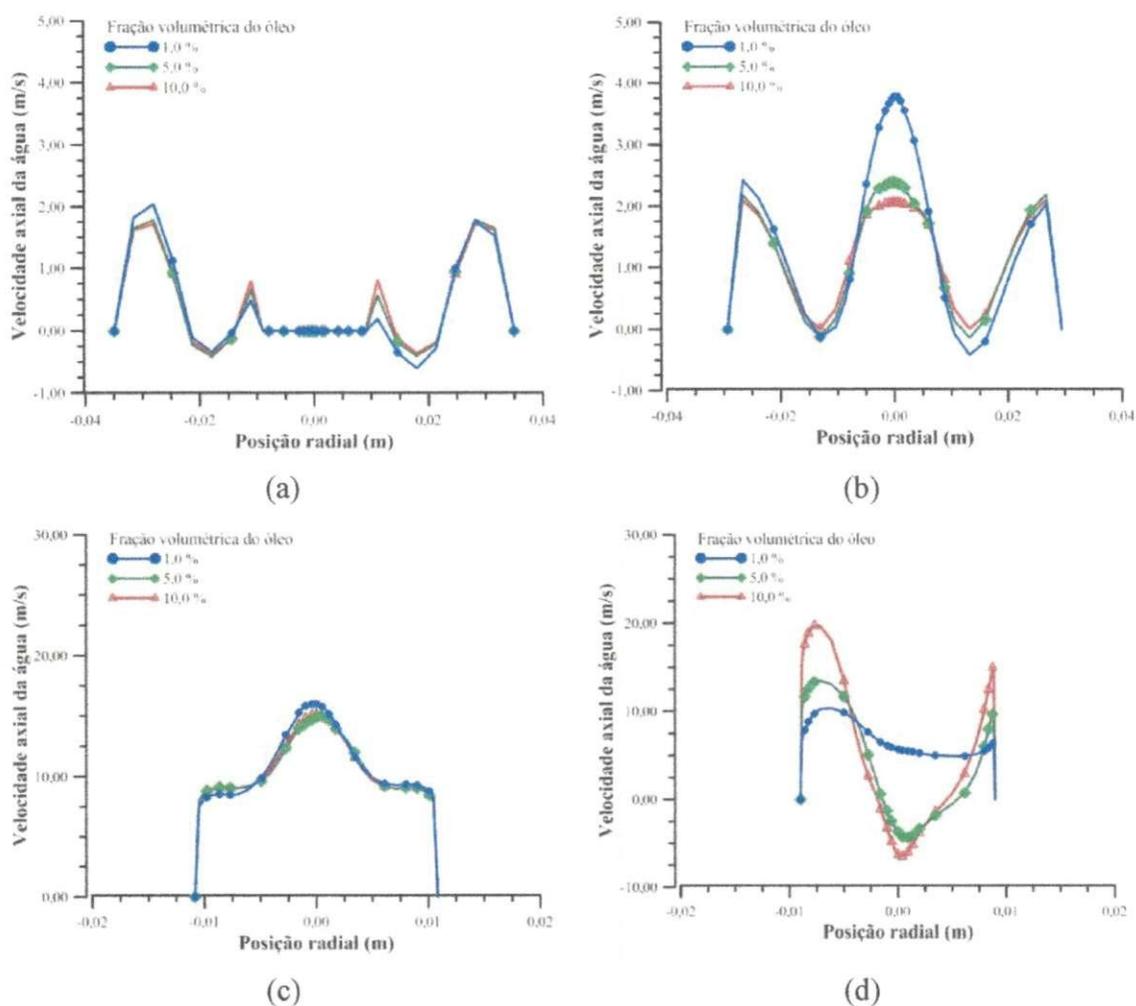


Figura 5.20: Análise da influência da concentração do óleo no perfil de velocidade axial para o separador ciclônico A. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm.

5.2.3. Perfis de Velocidade Tangencial

Foram analisadas as influências da vazão de entrada e da concentração volumétrica do óleo sobre os perfis de velocidade tangencial. Para tanto foram tomadas as quatro posições axiais, mostradas na Figura 5.15 (Página 59).

5.2.3.1. Influência da Vazão de Entrada no Perfil de Velocidade Tangencial

Nas Figuras 5.22 e 5.23, são apresentados os perfis de velocidade tangencial. As velocidades tangenciais aumentam com o aumento da vazão de entrada, e a amplitude da

velocidade tangencial aumenta ao longo do separador ciclônico. Comportamento semelhante foi obtido por Barbosa (2011), ao analisar o processo de separação água/óleo usando um hidrociclone de alta performance. Na posição 775 mm do separador ciclônico A (Figura 5.22d), a velocidade tangencial não apresenta o perfil simétrico mostrado nas demais posições, ratificando a Figura 5.9.

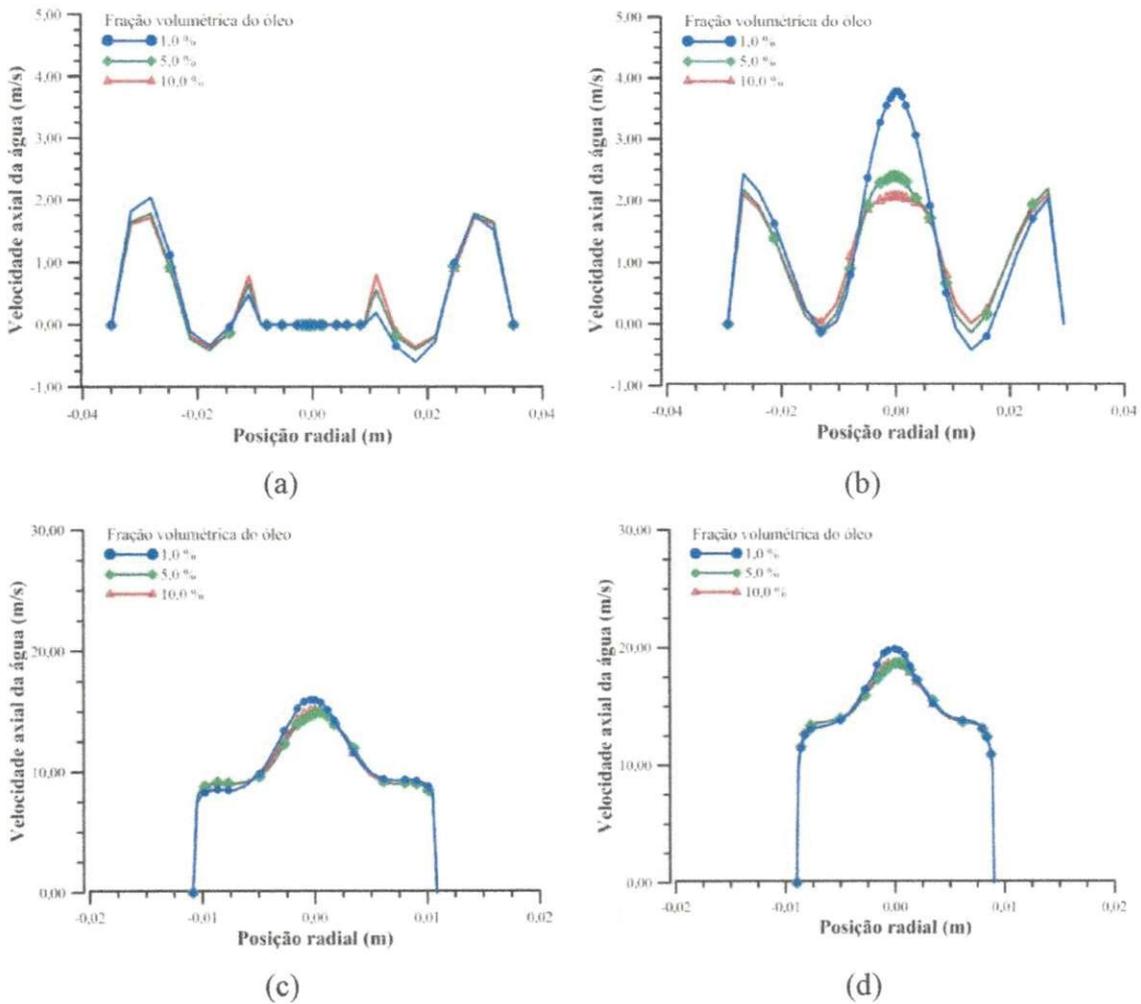
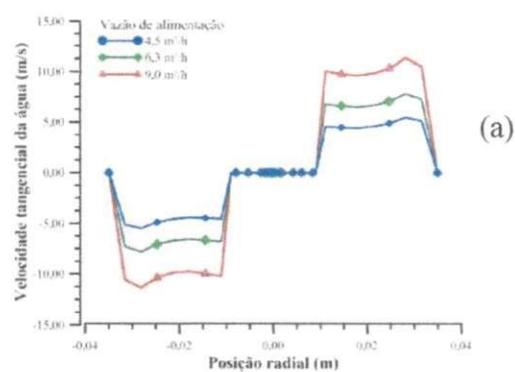
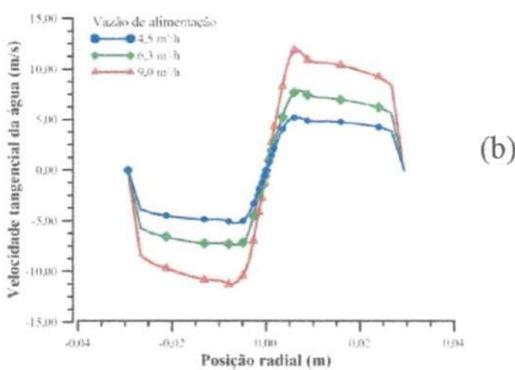


Figura 5.21: Análise da influência da concentração do óleo no perfil de velocidade axial para o separador ciclônico B. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm.

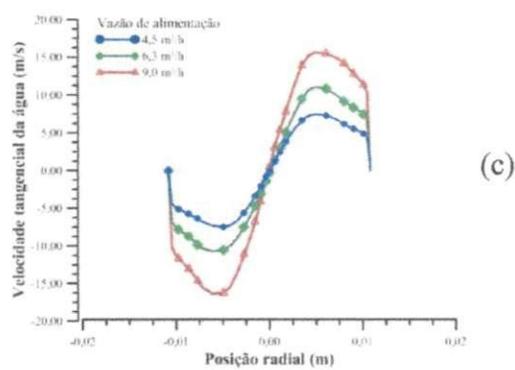
Silva e Farias Neto (2012) ao estudarem um separador ciclônico com corpo cilíndrico, verificaram uma redução da intensidade turbilhonar decorrente do movimento angular ao longo do dispositivo. No presente trabalho, ao utilizar o corpo cônico, o movimento angular se manteve em todo o separador.



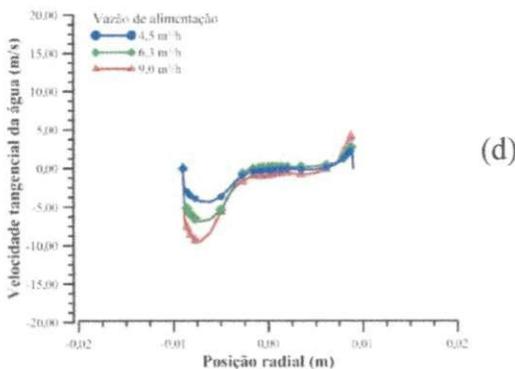
(a)



(b)

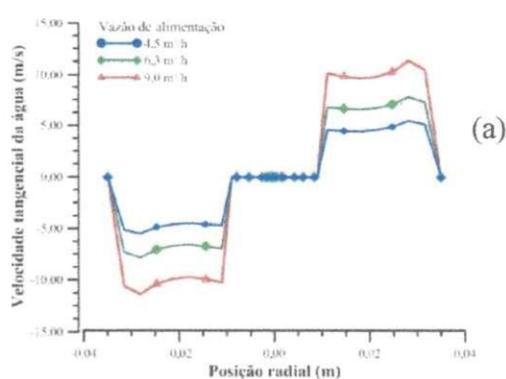


(c)

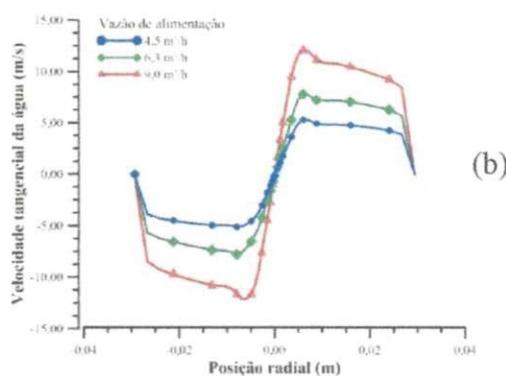


(d)

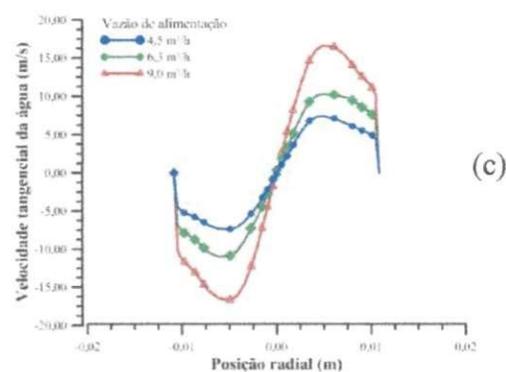
Figura 5.22: Análise da influência da vazão de entrada no perfil de velocidade tangencial para o separador ciclônico A. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm



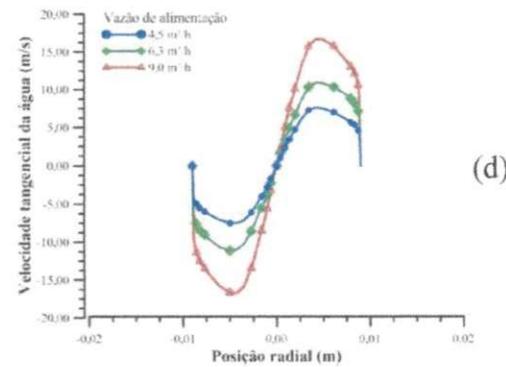
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.23: Análise da influência da vazão de entrada na velocidade tangencial no separador ciclônico B. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm

5.2.3.2. Influência da Concentração Volumétrica do Óleo no Perfil de Velocidade Tangencial

Nas Figuras 5.24 e 5.25, são apresentados os perfis de velocidade tangencial para três casos com diferentes concentrações volumétricas da mistura de alimentação. Dentre os casos estudados, o comportamento da tangencial sofre pouca influência da concentração da mistura na entrada. Para concentrações da fase dispersa acima de 10%, Silva e Farias Neto (2012) relatam que a velocidade tangencial sofre influência da variação de concentração de óleo na mistura, na faixa entre 10 a 40 %.

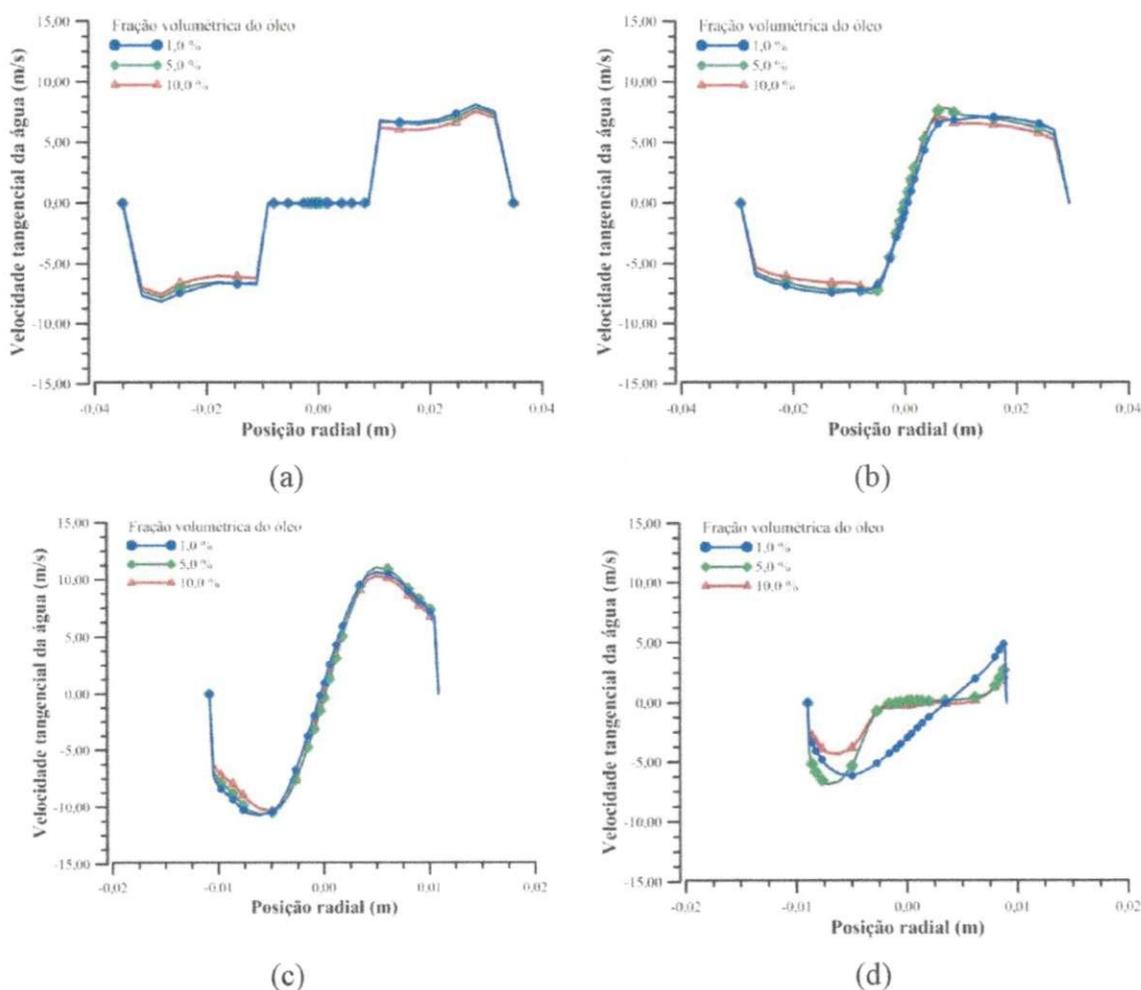


Figura 5.24: Análise da influência da concentração volumétrica no perfil de velocidade tangencial para o separador ciclônico A. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm.

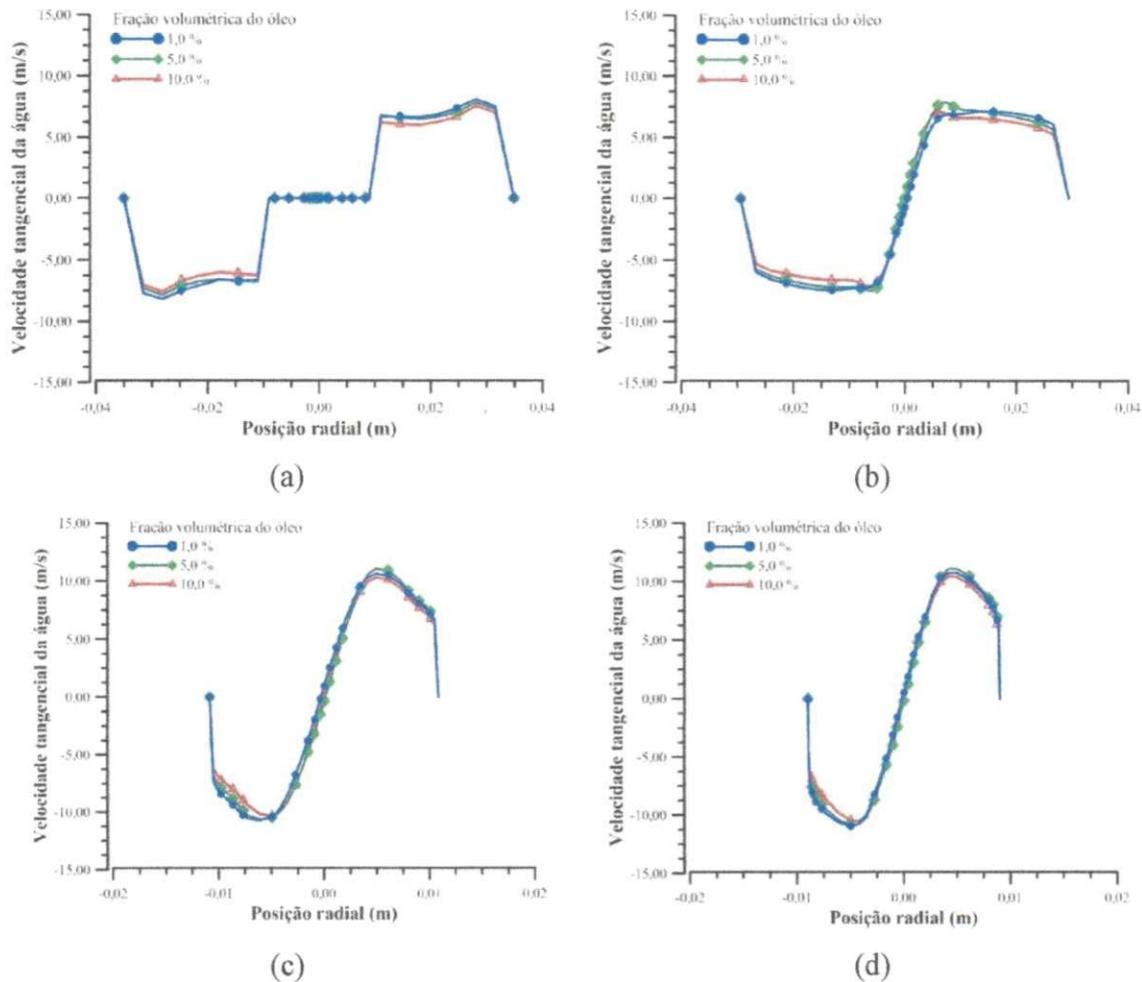


Figura 5.25: Análise da influência da concentração volumétrica no perfil de velocidade tangencial para o separador ciclônico B. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm.

5.2.4. Perfis de Concentração de óleo

Nas Figuras 5.26 e 5.27, estão representados os perfis da fração volumétrica de óleo nos separadores ciclônicos A e B, respectivamente.

5.2.4.1. Influência da Vazão Volumétrica de entrada no Perfil de Concentração de Óleo

Nas Figuras 5.26a e 5.27a, percebe-se que os separadores ciclônicos em estudo tendem a concentrar o óleo na região central do equipamento desde o início do escoamento, e assim segue pelas outras posições. Porém, o núcleo de óleo formado na região central do separador

A é desfeito em consequência da ação da saída tangencial (Figura 5.26d), mostrando a ineficiência do separador ciclônico A na coleta dos fluidos separados, ratificando as informações apresentadas nas Figuras 5.3 e 5.4. Observa-se também, que quanto maior a vazão de alimentação mais rapidamente o óleo se concentrará no centro do equipamento.

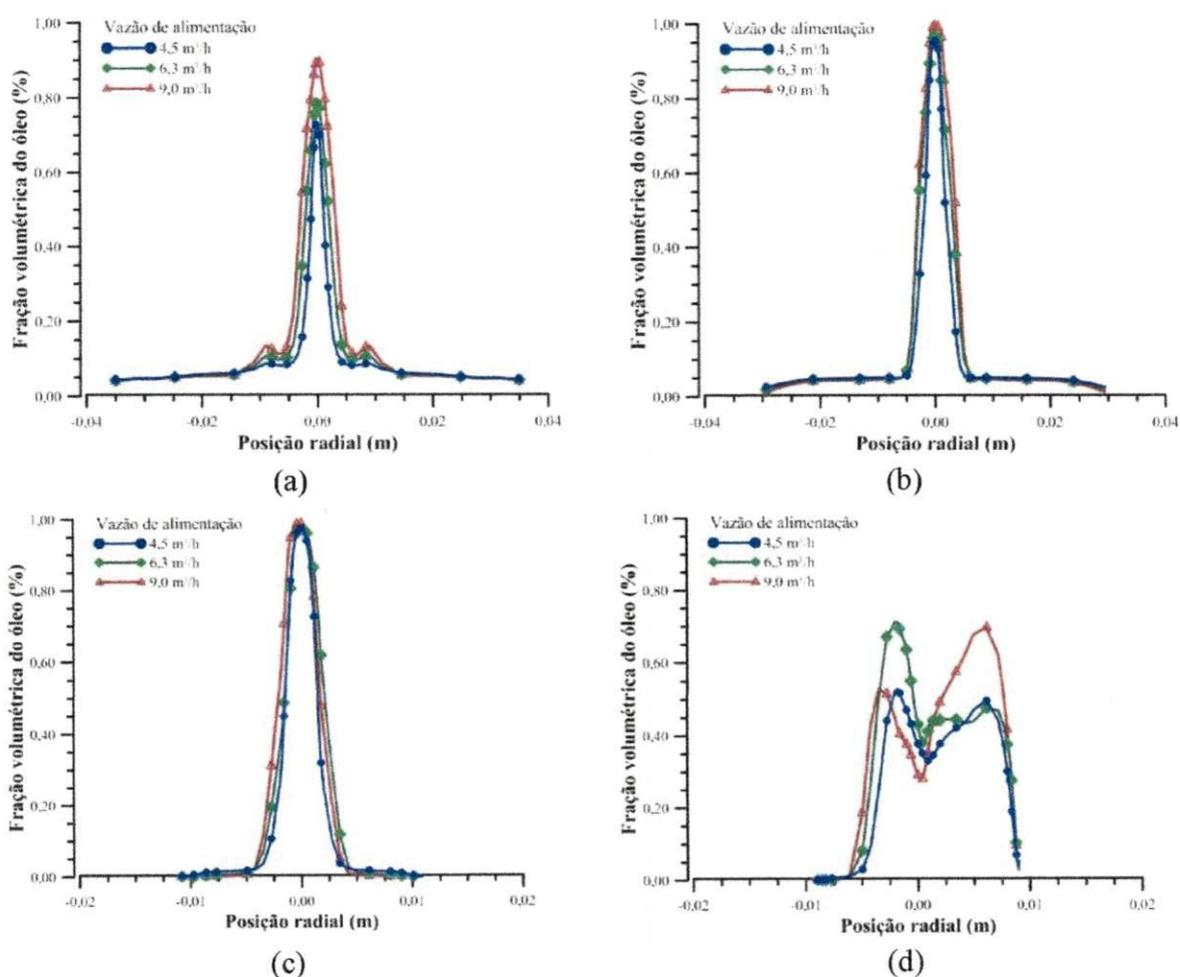


Figura 5.26: Análise da influência da vazão de alimentação na concentração do óleo no centro do separador ciclônico A. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm.

5.2.5. Eficiência de Separação

Foram utilizadas duas relações matemáticas para determinar a eficiência de separação água/óleo dentro dos separadores ciclônicos:

- a) A relação estudada por Hashmi *et al.* (2004), Equação 3.6, na qual leva em consideração

a concentração dos fluidos nas saídas;

- b) A equação utilizada por Husveg *et al.* (2007), Equação 3.7, que analisa o efeito divisor das correntes.

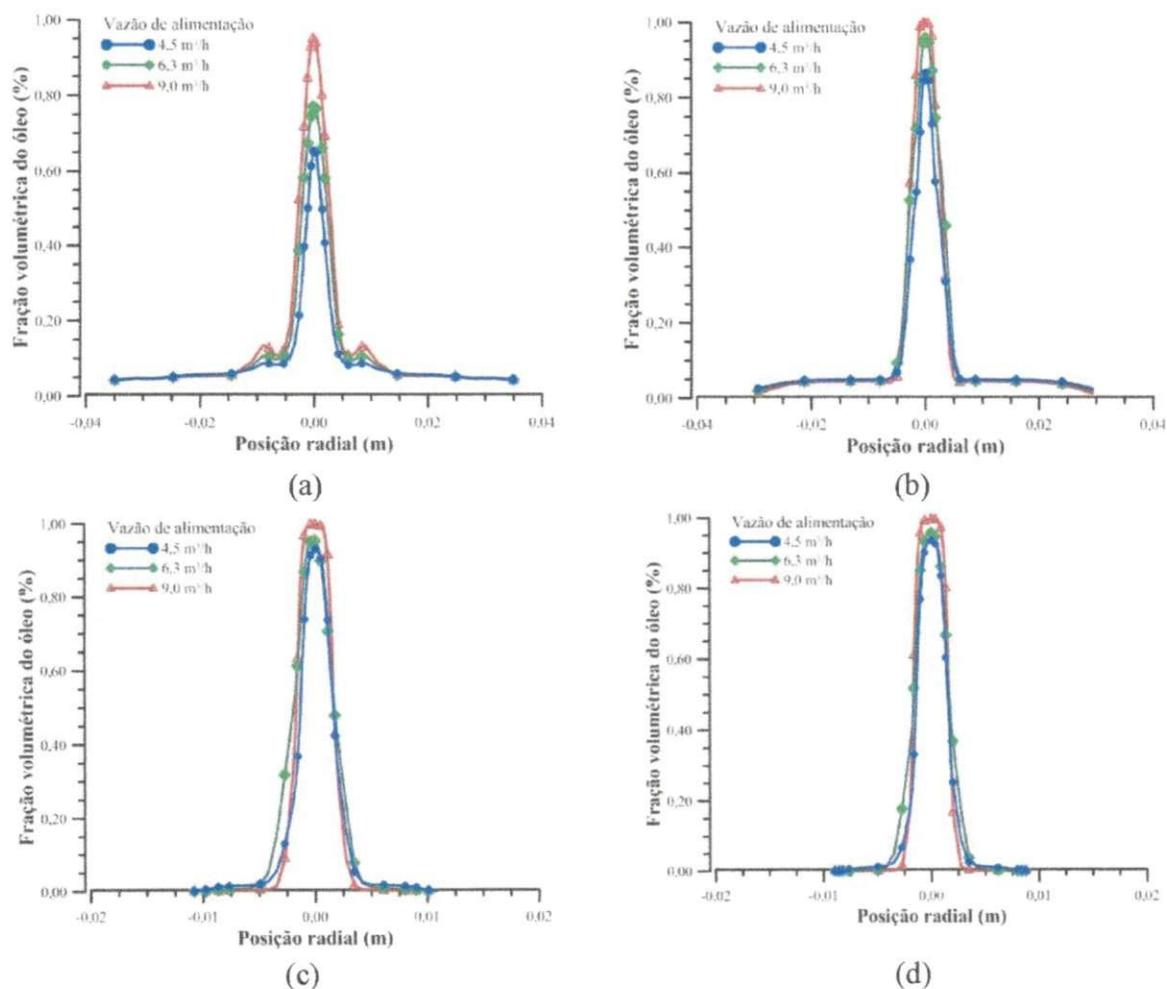


Figura 5.27: Análise da influência da vazão de alimentação na concentração do óleo no centro do separador ciclônico B. (a) 50 mm; (b) 200 mm; (c) 700 mm e (d) 775 mm.

Foram coletadas as vazões de entrada e saída para cada fluido nos separadores ciclônicos A e B e apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente. Em seguida, foram calculadas as eficiências, apresentadas na Tabela 5.3 e 5.4.

Tabela 5.1: Valores das vazões volumétricas dos fluidos e a concentração do óleo na entrada e saída do separador ciclônico A.

Casos	Vazão de água na Entrada (kg/s)	Vazão de óleo Entrada (kg/s)	Vazão de água Saída Tangencial (kg/s)	Vazão de água Saída Normal (kg/s)	Vazão de óleo Saída Tangencial (kg/s)	Vazão de óleo Saída Normal (kg/s)
01	2,367	0,108	1,729	0,636	0,087	0,024
02	3,272	0,152	2,420	0,841	0,130	0,041
03	4,734	0,216	3,538	1,164	0,142	0,074
07	3,454	0,030	2,585	0,858	0,01828	0,0215
08	3,146	0,304	2,595	0,545	0,272	0,0322

Tabela 5.2: Valores das vazões volumétricas dos fluidos e as concentrações volumétricas de óleo na entrada e saída no separador ciclônico B.

Casos	Vazão de água na Entrada (kg/s)	Vazão de óleo Entrada (kg/s)	Vazão de água Saída Normal 2 (kg/s)	Vazão de água Saída Normal 1 (kg/s)	Vazão de óleo Saída Normal 2 (kg/s)	Vazão de óleo Saída Normal 1 (kg/s)
04	2,367	0,108	1,842	0,522	0,011	0,099
05	3,272	0,152	2,603	0,668	0,004	0,155
06	4,734	0,216	3,784	0,951	0,001	0,215
09	3,454	0,030	2,566	0,889	0,001	0,029
10	3,146	0,304	2,565	0,575	0,0162	0,288

Tabela 5.3: Valores das eficiências de separação no equipamento ciclônico A.

Casos	Concentração de óleo na Entrada (kg/ m³)	Concentração de óleo na Saída Tangencial (kg/m³)	Eficiência 01* (E) (%)	Eficiência 02** (E') (%)
01	46,261	47,470	—	19,445
02	44,006	50,494	—	14,743
03	43,261	38,280	15,500	34,269
07	8,575	6,994	39,01	18,453
08	86,855	93,433	—	10,526

*Utilizando Equação 3.6;

** Utilizando Equação 3.7.

Os valores de eficiência para os casos 01, 02 e 08 ao utilizar a Equação 3.6, apresentaram incoerência, já que eram valores negativos, sendo, portanto, retirados da Tabela 5.3. Isto motiva o estudo aprofundado da eficiência deste equipamento, propondo a modificação no mesmo com vista a melhoria de performace.

Tabela 5.4: Valores das eficiências de separação no equipamento ciclônico B.

Casos	Concentração de óleo na Entrada (kg/ m³)	Concentração de óleo na Saída Normal 2 (kg/m³)	Eficiência 01*(E) (%)	Eficiência 02** (E') (%)
04	43,485	5,914	86,340	89,870
05	44,006	1,523	96,546	97,368
06	46,261	0,263	99,394	99,537
09	8,575	0,388	95,475	96,667
10	86,865	6,625	92,801	94,671

*Utilizando Equação 3.6;

** Utilizando Equação 3.7.

A seguir, serão apresentados os fatores de influência na eficiência de separação somente do separador ciclônico B.

5.2.4.1. Influência da Vazão Volumétrica da Mistura na Alimentação sobre Eficiência de Separação

Utilizando os valores apresentados na Tabela 5.4 (Casos 04, 05 e 06) e representando-os graficamente em função da vazão volumétrica da mistura, obtêm-se a Figura 5.28, demonstrando a eficiência de separação do separador ciclônico B.

Analisando a Figura 5.28, observa-se um aumento da eficiência de separação dos fluidos com o aumento da vazão de alimentação no separador ciclônico, ao se usar as duas relações. O mesmo fato, também foi observado por Husveg *et al.* (2007), como apresentado na Figura 3.19. O aumento da taxa de fluxo provoca um aumento da energia fornecida na entrada do dispositivo, a qual é convertida em movimento angular, consequentemente promovem a separação de fluidos.

Os valores obtidos com as relações matemáticas diferem, sendo E' (Eficiência 02) superior a E (Eficiência 01) para todos os casos estudados.

A máxima eficiência de separação fica em torno de 99,3%, que ocorre com a taxa de fluxo volumétrico de mistura $9 \text{ m}^3 / \text{h}$, sendo a mínima de 86,34%, para a vazão $4,5 \text{ m}^3 / \text{h}$, levando em consideração o efeito concentrador do equipamento.

5.2.4.1. Influência da Concentração Volumétrica de Óleo na Entrada sobre a Eficiência de Separação

Utilizando os valores apresentados na Tabela 5.4 (Casos 05, 09, 10) e mostrando-os graficamente em função da concentração volumétrica do óleo na alimentação, obtêm-se a Figura 5.29.

Os resultados mostram uma pequena elevação, seguida de um decaimento da eficiência com o aumento da concentração de óleo na entrada, para as duas equações utilizadas. O decaimento de eficiência para concentrações mais altas de óleo, também foi observado por outros autores, a exemplo de Hashmi *et al.* (2004). Esta redução pode ser explicada pelas mudanças observadas no comportamento fluidodinâmico da mistura no

interior do separador ciclônico. Este tipo de comportamento exerce uma influência significativa no balanço de forças e, assim, a corrente aquosa obriga as partículas de óleo (fase dispersa) a seguirem o movimento da corrente de água.

tendo em vista do estudo ter sido focalizado em baixas concentrações de óleo na alimentação, a influência da variação da concentração da mistura não foi observada nos perfis de velocidades, porém foi evidenciada na eficiência de separação.

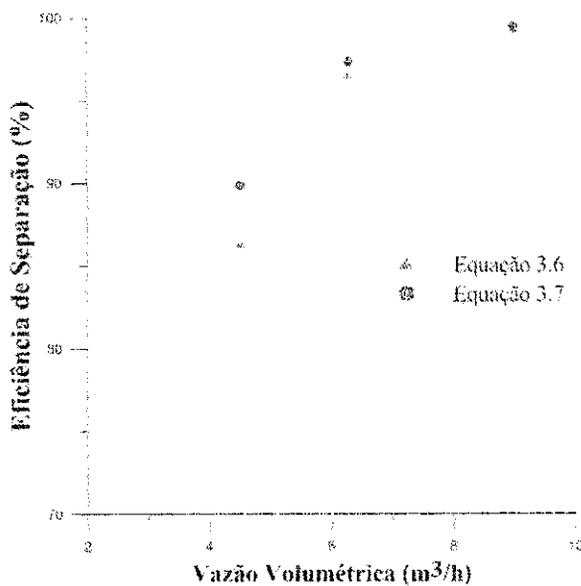


Figura 5.28: Eficiência de separação em função da vazão volumétrica da mistura do separador ciclônico B

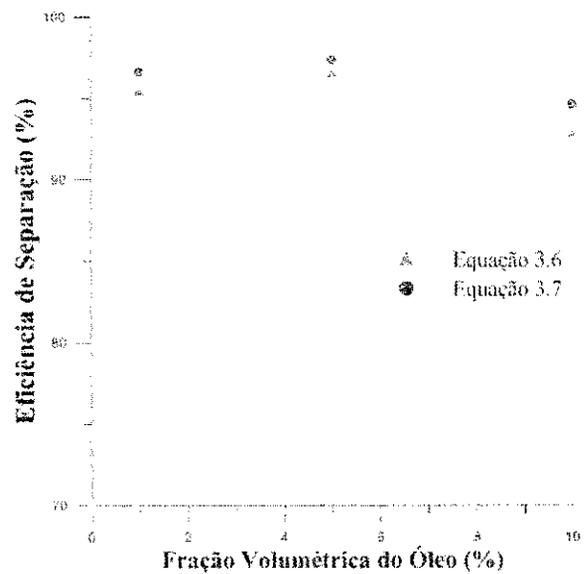


Figura 5.29: Eficiência de separação em função da concentração volumétrica do óleo no separador ciclônico B

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nas simulações numéricas com os separadores ciclônicos pode-se concluir que:

- O modelo matemático proposto mostrou-se capaz de avaliar o escoamento no interior dos separadores ciclônicos;
- Foi possível verificar o comportamento tridimensional do escoamento no interior de ambos os separadores ciclônicos;
- Os perfis de pressão e de velocidade tangencial dentro dos separadores ciclônicos se assemelham aos perfis obtidos em hidrociclones tradicionais;
- O aumento da vazão de alimentação elevou a amplitude da velocidade tangencial;
- O comportamento das velocidades tangencial e axial não sofreu influência com a variação da concentração;
- Os separadores ciclônicos propostos tendem a concentrar o óleo na região central desde o início do escoamento;
- O aumento da vazão de alimentação acelerou a concentração de óleo na região central dentro do separador ciclônico, para todos os casos estudados;

- O separador ciclônico A mostrou dificuldade na coleta dos fluidos separadamente, apresentando uma zona de mistura no final do equipamento, provocando, assim, uma baixíssima eficiência de separação (não ultrapassando 40%);
- O aumento da vazão de alimentação da mistura proporcionou uma maior eficiência de separação água /óleo para o separador ciclônico B, semelhante a resultados de hidrociclones tradicionais apresentados na literatura;
- O aumento de concentração do óleo na alimentação influencia a eficiência de separação do equipamento B;
- Houve diferenciação entre os valores de eficiência de separação obtidos ao utilizar as duas equações matemáticas;
- A maior eficiência de separação dos fluidos (99,5%) foi obtida com o separador ciclônico B para as condições de vazão igual a $9 \text{ m}^3/\text{h}$ e concentração de óleo 5%.

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, podem-se citar:

- Analisar a influência do comprimento do tronco cônico no escoamento e na separação dos fluidos;
- Investigar o efeito da coalescência das gotas de óleo sobre as forças atuantes;
- Estudar e analisar o comportamento do escoamento dentro de separadores ciclônicos de comprimentos e diâmetros diferentes;
- Analisar a performance do separador ciclônico A e B em posição vertical;
- Estudar o efeito não- isotérmico do escoamento;
- Realizar uma validação experimental para o escoamento bifásico dentro dos separadores ciclônicos.

REFERÊNCIAS

- AHMED, M.M.; IBRAHIM, G.A.; FARGHALV, M.G., *Performance of a three product hydrocyclone*. Journal of Mineral Processing, v. 86, p. 18-25, 2008.
- ALBOUDWAREJ, H.; FELIX, J.; TAYLOR, S.; BADRY, R.; BREMNER, C.; BROUGH, B.; SKEATES, C.; BAKER, A.; PALMER, D.; PATTISON, K.; BESHRY, M.; KRAWCHUK, P.; BROWN, G.; CALVO, R.; TRIANA, J. A. C.; HATHCOCK, R.; KOERNER, K.; HUGHES, T.; KUNDU, D.; CÁRDENAS, J. L.; WEST, C. *La importancia del petróleo pesado*. Oilfield Review, v.82, p. 38-59, 2007.
- ANDRADE, M.M., *Análise Física de Solo Contaminado por Petróleo*. Relatório de Estágio, Departamento de Química, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2004.
- BARBOSA, E.S., *Aspectos Geométricos e Hidrodinâmicos de um Hidrociclone no Processo de Separação de Sistemas Multifásicos: Aplicação na Indústria de Petróleo*. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação Engenharia de Processo, UFCG, Campina Grande-PB, 2011.
- BHASKAR, K.U; RAMA MURTHY, Y. ; RAMAKRISHNAN, N.; SRIVASTAVA, J.K, SARKAR, S.; KUMAR, V., *CFD validation for flyash particle classification in hydrocyclones*. Mineral Engineering, v.20, p.290-302, 2007.
- BIRD, B. R.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Fenômenos de Transporte*. 2ª Edição. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- BURITI, C.J.O, *Aplicação de um Hidrociclone no Processo de Separação de um Fluido Multifásico Óleo/Água/Areia Durante Produção de Petróleo*. Monografia. Graduação Engenharia Química, UFCG, Campina Grande-PB, 2009.
- BURITI, C.J.O.; FARIAS, F.P.M; FARIAS NETO, S.R.; LIMA, A.G.B., *Desempenho e avaliação numérica do processo de separação água/óleo pesado e ultraviscoso no interior de um hidrociclone*. 5º Congresso Brasileiro de P & D em Petróleo & Gás UFC, Fortaleza, 2007.
- CHU, L.Y., CHEN, W. M., *Research on the motion of solid particles in a hydrocyclone*. Sep. Sci. Technol, v. 10, p. 875-886, 1993.
- CHU L. Y., QIN J. J., CHEN W. M., LEE X. Z., *Energy consumption and its reduction in the hydrocyclone separation process. Part II. Time-averaged and fluctuating characteristics of the turbulent pressure in a hydrocyclone*, Sep. Sci. Technol, v. 35, p. 2543-2560, 2000.
- COELHO, M. A.Z; MEDRONHO, R. A., *A model for performance prediction of hydrocyclones*. Chemical Engineering Journal, v. 84, p. 7-14, 2001.
- CULLIVAN, J. C.; WILLIAMS, R. A.; DYAKOWSKI, T.; CROSS, C.R., *New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism from computational fluid dynamics*. Mineral Engineering, v. 17, p. 651-660, 2004.

FARIAS, F. P. M.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B.; BURITI, C.J.O.; LIMA, W. C. P., *The Effect of Droplet Diameter on the Separation of the Heavy-Oil from Water using Hydrocyclone CFD Simulation*. In: 3rd International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting. ACE-X, Roma, 2009.

FARIAS, F.P.M; SOUZA, J. S; LIMA, W.C.P.B ; MACÊDO, A.C.; FARIAS NETO, S.R.; LIMA, A.G.B., *Influence of Geometric Parameters of the Hydrocyclone and Sand Concentration on the Water/Sand/Heavy-Oil Separation Process: Modeling and Simulation*. The International Journal of Multiphysics, v. 5, p. 187-202, 2011.

FERNANDES JÚNIOR, W. E., *Projeto e operação em escala semi-industrial de um equipamento para tratamento de águas produzidas na indústria de petróleo utilizando nova tecnologia: Misturador-Decantador à Inversão de Fases (MIDIF)*. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação Engenharia Mecânica, UFRN, Natal -RN, 2006.

FILGUEIRAS, N. G. T. *Modelagem, Análise e Controle de um Processo de Separação Óleo/água*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, UFRJ, Rio de Janeiro- RJ, 2005.

FISHER, M. J.; FLACK, R. D., *Velocity distributions in a hydrocyclone separator*. Experiments in Fluids, v.32, p. 302-312, 2002.

FONSECA, M.T e SECCHI, A.B., *Tecnologias gerenciais de restaurantes*. 4. ed. São Paulo: SENAC, São Paulo, p. 187, 2006.

FREITAS, A. G. B., *Modelagem e Simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclone*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação Engenharia Química, UFS, São Cristóvão-SE, 2009.

HASHMI, K.A.; HAMZA, H.A.; WILSON, J.C., *CANMET hydrocyclone: an emerging alternative for the treatment*. Mineral Engineering, v.17, p.643-649, 2004.

HOFFMANN, A.C e STEIN, L.E. *Gas Cyclones And Swirl Turbines – Principles, Design and Operation*. Second Edition, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2008

HUSVEG, T.; RAMBEAU, O.; DRENGSTIG, T.; BILSTAD, T., *Performance of a deoiling hydrocyclone during variable flow rates*. Mineral Engineering, v.20, p.368-379, 2007.

INOUE, F.K., *Modelagem matemática em obras hidráulicas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UFPA, Paraná, 2009.

LUNA; F.D.T; FARIAS NETO,S.R. *Estudo numérico de um equipamento inovador no processo de separação água/óleo: Célula Turbilhonar*. In: VIII Congresso de iniciação científica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 1-2, Campina Grande, 2011.

LUO, Q., Deng C., Xu J., Yu L., Xiong G., *Comparison of the performance of water-sealed and commercial hydrocyclones*, International Journal of Mineral Processing, v.25, p. 297-310, 1989.

MARINS, L.P.M., *Caracterização Experimental do Escoamento no Interior de um Hidrociclone sem Núcleo Gasoso*. Dissertação de Mestrado, Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

MARINS, L. P.; DUARTE, D.; LOUREIRO, J.; MORAES, C.; FREIRE, A. Set al. *LDA and PIV characterization of the flow in a hydrocyclone without an air-core*. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 70, p. 168-176, 2010.

MEDRONHO, R.A., *Solid-liquid separation*. IN: MATTIASSON, B., HATTIKAUL, R., Isolation of proteins. Nova York, 2004.

MONREDON, T.C., HSIEH, K.T., RAJAMANI, R.K., *Fluid flow of the hydrocyclone: an investigation of device dimensions*. International Journal of Mineral Processing, v.35, p. 65-83, 1992.

MORAES, C. A. C., *Modelo fluidodinâmico para a estimativa de eficiência em hidrociclones para água oleosas*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação Engenharia Química, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2004.

MORAES, C.A.C., *Curso de hidrociclones e sistema de separação ciclônica*. Universidade Cooperativa. Rio de Janeiro-RJ, 2006.

NASCIMENTO, J. T., *Uso do CFD na otimização de proporções geométricas de um hidrociclone para separação óleo-água*. Projeto de final de curso, UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2008.

NUNES, G.C. *Concepção de unidade de separação trifásica compacta*, Bol. Téc. da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 48, p. 18-24, 2005.

PINTO, J. C., LAGE, P. L. C., *Métodos Numéricos em Engenharia Química*. 2ª ed. Rio de Janeiro, Brasil, E-papers, 2001.

POPE, S.B., *Tem questions concerning the large eddy simulation of turbulent flows*. New Journal of Physics, v. 6, p. 35, 2003.

REGO, F.C.A. *Estudo do Ciclone Cilíndrico de uma Unidade de Flotação Centrífuga com auxílio de Fluidodinâmica Computacional*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação Engenharia Química, UFSC, Florianópolis- SC, 2008.

SALVO, R. V. *Efeito de Modelos Submalhas no Escoamento em Ciclones*, Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, 2009.

SCHUTZ, S.; GORBACH, G.; PIESCHE, M. *Modeling fluid behavior and droplet interactions during liquid-liquid separation in hydrocyclones*. Chemical Engineering Science, v. 64, p. 3935-3952, 2009.

SHOJAEEFARD, M. H.; NOORPOOR, A.R.; YARJIABADI, H.; HABIBIAN, M. *Particle size effects on hydro-cyclone performance*. International Journal of Engineering Science, v. 17, p. 9-19, 2006.

SILVA, C R R., *Água produzida na extração de Petróleo*. Monografia, Graduação em Engenharia Ambiental e Saneamento, UFBA, Bahia, 2000.

SILVA, M. K. *Estudo de Modelagem Numérica Tridimensional de Ciclones do Tipo Lapple para Separação Gás-Sólido*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis- SC, 2006.

SILVA, L. F. L. R. *Desenvolvimento de Metodologias para Simulação de Escoamentos Polidispersos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação Engenharia Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

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

SILVEIRA NETO, A., *Turbulência nos fluidos: Aplicada*, Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação Engenharia Mecânica, PUCPR, Curitiba, 2002.

SLACK, M.D, PRASAD, R O,BOYSAN, F., *Advances in cyclone modeling using unstructure grids*. Trans IChemE, v. 78, p.78-89, 2000.

SOUZA, J. S. ; FARIAS, F. P. M.; SWARNAKAR, R. ; FARIAS NETO, S. R. ; LIMA, A. G. B. , *Non-Isothermal Separation Process of Two-Phase Mixture Water/Ultra-Viscous Heavy Oil by Hydrocyclone*. Advances in Chemical Engineering and Science, v. 1, p. 271-279, 2011.

SVAROVSKY, L. *Solid-liquid separation*. Editora. London: Butterworths, v.1, p. 568, 2000.

THOMAS, J.E. *Fundamentos de Engenharia do Petróleo*. Segunda Edição. Rio de Janeiro. Ed. Interciências: Petrobrás, 2004.

TRIGGIA, A. A., CORREIA, C. A., FILHO, C. V., *Processamento Primário de Fluidos*. In: Thomas, J. E., Barros, V., Santos, C. L., Fernandes, E., Fundamentos de Engenharia de Petróleo, 2ª ed., Capítulo 9, Rio de Janeiro, Brasil, Editora Interciência, 2001.

TUE N., R., YOSHIDA, H., *Comparison of separation performance between single and two inlets hydrocyclones*. Advanced Powder Technology, 2008.

VIEIRA, L.G.M, *Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes*. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação Engenharia Química, UFU, Uberlândia, 2006.

PETROBRAS, *Processamento Primário de Petróleo*, Universidade Petrobras: Escola de ciências e tecnologia, 2007.

WANG, B.; YU, A.B., *Numerical study of parti cle–fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions*. Mineral Engineering, v. 19, p. 1022-1033, 2006.

WANG, B.; YU, A. B., *Numerical study of the gas–liquid–solid flow in hydrocyclones with different configuration of vortex finder*. In: Chemical Engineering Journal, v. 135, p. 33–42, 2008.