

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

**Otimização dos Processos de Separação
em
Hidrociclones Filtrantes**

Luiz Gustavo Martins Vieira

Uberlândia – Minas Gerais

março de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Otimização dos Processos de Separação

em

Hidrociclones Filtrantes

Eng. Luiz Gustavo Martins Vieira

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Uberlândia – Minas Gerais

março de 2006

Banca Examinadora da Tese de Doutorado do **Eng. Luiz Gustavo Martins Vieira** apresentada à Universidade Federal de Uberlândia em março de 2006.

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo
(*Orientador – PPG – FEQUI-UFU*)

Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
(*Co-orientador – PPG – FEQUI-UFU*)

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(*PPG – FEQUI-UFU*)

Prof. Dr. José Renato Coury
(*PPG – EQ - UFSCar*)

Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira
(*PPG – EQ - UEM*)

Dedicações plenas e infinitas à pessoa que além de dar-me a vida e conceder-me a honra de chamá-la de mãe, continua sendo acima de tudo, modelo de dedicação, humildade, mansidão, compreensão e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me ter concedido a oportunidade, a aptidão, o conhecimento e os recursos necessários para seguir e cumprir mais esta etapa de minha trajetória acadêmica.

Aos meus orientadores e grandes amigos, *Professores Marcos Antonio de Souza Barrozo e João Jorge Ribeiro Damasceno*, pelo zelo e profissionalismo dirigidos à elaboração desta tese, bem como pela sinceridade, amizade e confiança dedicadas a minha pessoa.

A todos os alunos de iniciação científica que colaboraram na execução deste trabalho, em especial, aos meus amigos *Maíra Alves Cerqueria, Carlos Alberto Silva Júnior, Rafael Mendes Rodrigues e Beatriz Cristina Siqueira*, pelo comprometimento, assiduidade, responsabilidade e auxílio, apresentados ao longo dos últimos anos.

A todos os funcionários da Faculdade de Engenharia Química da UFU, em especial, a *Alcides Cândido da Costa, Anísio Ferreira Martins Júnior, Cleide Lúcia Pereira, Édio José Alves, Ione Cordeiro de Castro, José Henrique Borges, José Maria Tiago, Roberta Alves Andrade, Silvino Joaquim Corrêa e Zuleide Ferreira Costa*, sem os quais a realização dos experimentos, simulações e o cumprimento das disciplinas teriam sido mais difíceis.

Ao programa e ao corpo docente da Pós-Graduação em Engenharia Química da UFU, em especial, aos professores *Alcina Maria Xavier, Carlos Henrique Ataíde, José Roberto Delalibera Finzer, José Romário Limaverde, Márcia Coelho Gonçalves, Moílton Ribeiro Franco Júnior, Valéria Viana Murata e Vicelma Luiz Cardoso*.

À CAPES e FAPEMIG por viabilizarem os recursos necessários ao desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Ao engenheiro *Edu Arruda Barbosa* pelo auxílio na confecção dos hidrociclones filtrantes.

A todos os meus amigos de graduação e pós-graduação em Engenharia Química, em especial, a *Cláudio Roberto Duarte e Fábio de Assis Pereira Ressel*, pela amizade, incentivo, perseverança, experiências profissionais e acadêmicas, comprometimento, presteza, sinceridade, responsabilidade e transparência, empenhados ao longo de nossa agradável convivência.

Ao meu amigo, *Dr. Rogério Almeida do Nascimento*, pelo incentivo e editoração das ilustrações contidas nesse trabalho. À querida *Profª Maria das Graças Pereira*, exemplo de vocação ao magistério, pela confiança, apoio e momentos de descontração.

Enfim, a todos que, de uma forma ou de outra, estiveram presentes em minha vida e foram, com certeza, a *ratio essendi* para a execução e conclusão desta obra.

*Entregue seu caminho a Deus, Nele confie e Ele
agirá. Ele manifestará a justiça de você como o
amanhecer e seu direito como o meio-dia.*

Salmo 37

V658o Vieira, Luiz Gustavo Martins, 1976-
Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes /
Luiz Gustavo Martins Vieira. - Uberlândia, 2006.
298f. : il.
Orientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.
1. Separação (Tecnologia) - Teses. 2. Hidrociclone - Teses. I. Barrozo,
Marcos Antonio de Souza. II. Universidade Federal de Uberlândia. Progra-
ma de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.066

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	xii
Resumo e <i>Abstract</i>	xiv

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	1
------------	---

1.1 – Objetivos.....	7
----------------------	---

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
-----------------------	---

2.1 – <i>Famílias</i> de Hidrociclones.....	9
2.2 – Funcionamento Básico de um Hidrociclone.....	9
2.3 – Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones pela Abordagem Clássica.....	11
2.3.1 – Grupos Adimensionais Aplicados a Hidrociclones.....	11
2.3.2 – Modelos Clássicos de Separação.....	12
2.3.2.1 – Modelo da Órbita de Equilíbrio.....	12
2.3.2.2 – Modelo do Tempo de Residência.....	14
2.3.2.3 – Modelo Populacional.....	17
2.3.2.4 - Modelo do Escoamento Bifásico Turbilhonar.....	17
2.3.3 – Alguns Desenvolvimentos e Aplicabilidades Atuais.....	17
2.4 – Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones pelas das técnicas de CFD.....	21
2.4.1 – Turbulência.....	21
2.4.2 – Modelagem de Turbulência.....	23
2.4.3 – Considerações Importantes sobre os Modelos de Turbulência.....	24

2.4.3.1 - Equações Médias de Reynolds (RANS) e a Hipótese de Boussinesq.....	26
2.4.4 – Modelos de Turbulência.....	28
2.4.4.1 – Modelo dos Tensores de Reynolds (RSM).....	30
2.4.5 – Escoamentos Multifásicos e Modelagem.....	31
2.4.5.1 – Modelos de Fase Discreta.....	33
2.4.6 – Equações de Transporte para Simulação Bidimensional.....	34
2.4.7 – Métodos Numéricos.....	36
2.4.8 – Aplicabilidade de CFD Hidrociclones.....	39
2.5 – Hidrociclones Filtrantes.....	44
2.6 – Otimização por Análise Canônica.....	52

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 – A Execução Experimental.....	55
3.1.1 – Planejamento Experimental.....	55
3.1.2 – Manufatura dos Hidrociclones Filtrantes.....	58
3.1.3 – Caracterização da Permeabilidade e Porosidade dos Troncos de Cone Porosos.....	63
3.1.4 - Análise Granulométrica e Material Particulado.....	64
3.1.5 – Unidade Experimental.....	67
3.1.6 – Procedimento Experimental.....	70
3.1.6.1 – Na Unidade Experimental.....	70
3.1.6.2 – No Mastersizer.....	71
3.1.7 – Obtenção das Principais Variáveis na Separação em Hidrociclones Filtrantes.....	72
3.2 – A Execução Numérica.....	76
3.2.1 – Confecção da Malha Computacional.....	76
3.2.2 – Condições de Contorno.....	78
3.2.3 – Seleção dos Modelos.....	79
3.2.4 – Obtenção das Principais Grandezas Simuladas.....	80

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

82

4.1- <i>Iter</i> a ser seguido no Capítulo dos Resultados e Discussões.....	82
4.2- Simulações com o Hidrociclone segundo as Dimensões sugeridas por DABIR (1983).....	83
4.3- Estudo Fluidodinâmico da Influência de cada Variável Geométrica na Performance dos Hidrociclones Filtrantes.....	86
4.3.1- Influência do diâmetro de alimentação (D_i).....	86
4.3.2- Influência do diâmetro de <i>overflow</i> (D_o).....	89
4.3.3- Influência do comprimento total (L).....	91
4.3.4- Influência do ângulo do cone (θ).....	93
4.4- Estudo da Influência das Variáveis Geométricas na Performance do Hidrociclone Filtrante segundo o Planejamento Composto Central.....	95
4.4.1- Número de Euler.....	95
4.4.2- Razão de Líquido.....	99
4.4.3- Eficiência Total de Coleta e Diâmetro de Corte.....	101
4.4.4- Otimização do Hidrociclone Filtrante pela análise conjunta de Euler e η	105
4.5- Estudo Comparativo entre Hidrociclones Filtrantes e Convencionais.....	109
4.5.1- Influência da Filtração sobre o número de Euler.....	109
4.5.2- Influência da Filtração sobre a Razão de Líquido.....	112
4.5.3- Influência da Filtração sobre a Velocidade Tangencial.....	114
4.5.4- Influência da Filtração sobre a Eficiência Total de Coleta e o Diâmetro de Corte....	117
4.6- <i>Famílias</i> Clássicas de Hidrociclone.....	123

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

127

5.1 – Principais Conclusões.....	127
5.2 – Sugestões para Futuros Trabalhos.....	130

APÊNDICES	131
Apêndice A Troncos de Cone Porosos – Porosidade e Permeabilidade – Determinação.....	132
A ₁ - Determinação da porosidade dos troncos de cone filtrantes.....	133
A ₂ - Determinação da permeabilidade dos troncos de cone filtrantes.....	134
Apêndice B Hidrociclones Filtrantes – Simulações.....	138
Apêndice C Hidrociclones Convencionais – Simulações.....	163
Apêndice D Hidrociclones Filtrantes – Dados Experimentais.....	188
Apêndice E Hidrociclones Convencionais – Dados Experimentais.....	218
Apêndice F Hidrociclones Filtrantes – Bradley, Rietema, Krebs e Demco.....	248
Apêndice G Razões de Líquido e Quedas de Pressão – Valores Simulados.....	263
Apêndice H Regressão Múltiplas – Hidrociclones Filtrantes.....	266
H ₁ – Regressões múltiplas para determinação das superfícies de resposta dos hidrociclones filtrantes.....	267
H ₂ – Planejamento composto central – considerações.....	271
H _{2.1} – Técnica das superfícies de resposta – considerações.....	274
H _{2.1.1} – Otimização das Superfícies de Resposta.....	275
H _{2.1.2} – Análise Canônica.....	277
H _{2.2} - Aplicação das técnicas de otimização e de análise canônica para os hidrociclones filtrantes.....	279
H _{2.2.1} – Número de Euler.....	279
H _{2.2.2} – Eficiência Total de Coleta.....	281
H _{2.2.3} – Razão de Líquido.....	281
Apêndice I Programa em Maple para o Cálculo de Número de Euler, Eficiência Total e Diâmetro de Corte.....	283

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	286
-----------------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Hidrociclone e seu esquema com as principais dimensões de projeto.....	2
Figura 1.2	Trajectoria simplificada adquirida pela suspensão, hidrociclone em funcionamento e correntes de <i>underflow</i> e <i>overflow</i>	3
Figura 1.3	Esquema simplificado entre um hidrociclone convencional e seu respectivo hidrociclone filtrante, bem como o filtrado aflorando da parede porosa.....	4
Figura 1.4	Esquema de <i>vortex breakdown</i> , recirculação, curto-circuito, preservação de vorticidade e <i>air core</i> em hidrociclones.....	6
Figura 2.1	Forma canônica para um superfície de resposta em duas variáveis.....	54
Figura 3.1	Dimensões relevantes utilizadas no estudo de hidrociclones filtrantes.....	55
Figura 3.2	Principais componentes de um hidrociclone.....	58
Figura 3.3	Cilindros dos hidrociclones e respectivas alturas.....	58
Figura 3.4	Trocós de cones impermeáveis e porosos.....	59
Figura 3.5	Dutos de alimentação e <i>overflow</i>	59
Figura 3.6	Configurações dos hidrociclones tomando como base o comprimento total....	62
Figura 3.7	Configurações dos hidrociclones tomando como base o tamanho do cone.....	62
Figura 3.8	Distribuição granulométrica da rocha fosfática.....	67
Figura 3.9	Unidade Experimental para o estudo de hidrociclones.....	68
Figura 3.10	Sistema de <i>bypass</i> , manômetro digital e um hidrociclone filtrante em funcionamento.....	69
Figura 3.11	Sistema de homogeneização do tanque e um hidrociclone filtrante em funcionamento.....	70
Figura 3.12	<i>Mastersizer</i> , compartimento de análise e sistema de agitação e bombeamento.....	71
Figura 3.13	Simetria, malha e células computacionais para os hidrociclones.....	77
Figura 4.1	Perfis de velocidade tangencial, axial e pressão, em função do número de Reynolds a 14300, 20100, 24300 e 26600.....	84
Figura 4.2	Perfis de velocidade tangencial segundo DABIR (1983) e simulações.....	85
Figura 4.3	Perfis de Pressão, Velocidade Axial e Velocidade Tangencial para HF ₁₇ e HF ₁₈	87
Figura 4.4	Perfis de Velocidade Radial a 4 cm da base dos hidrociclones Filtrantes HF ₁₇ e HF ₁₈	88

Figura 4.5	Perfis de Pressão, Velocidade Axial e Velocidade Tangencial para HF ₁₉ e HF ₂₀	89
Figura 4.6	Perfis de Velocidade Radial a 4 cm da base dos Hidrociclones Filtrantes HF ₁₉ e HF ₂₀	90
Perfis 4.7	Perfis de Pressão, Velocidade Axial e Velocidade Tangencial para HF ₂₁ e HF ₂₂	91
Figura 4.8	Perfis de Velocidade Radial a 4 cm da base dos hidrociclones Filtrantes HF ₂₁ e HF ₂₂	92
Figura 4.9	Perfis de Pressão, Velocidade Axial e Velocidade Tangencial para HF ₂₃ e HF ₂₄	93
Figura 4.10	Perfis de Velocidade Radial a 4 cm da base dos hidrociclones Filtrantes HF ₂₃ e HF ₂₄	94
Figura 4.11	Números de Euler experimentais para os hidrociclones filtrantes nas quedas de pressão de 0,9 kgf/cm ² ; 1,2 kgf/cm ² ; 1,5 kgf/cm ² e 1,8 kgf/cm ²	96
Figura 4.12	Superfícies de Resposta para o número de Euler segundo os pares X ₁ -X ₂ , X ₁ -X ₃ e X ₂ -X ₃	97
Figura 4.13	Razões de Líquido Experimentais para os Hidrociclones Filtrantes.....	99
Figura 4.14	Superfícies de Resposta para Razão de Líquido segundo os Pares X ₂ -X ₃ , X ₂ -X ₄ e X ₃ -X ₄	100
Figura 4.15	Eficiências Totais de coleta experimentais para os hidrociclones filtrantes nas quedas de pressão de 0,9 kgf/cm ² ; 1,2 kgf/cm ² ; 1,5 kgf/cm ² e 1,8 kgf/cm ²	102
Figura 4.16	Diâmetros de corte experimentais para os hidrociclones filtrantes nas quedas de pressão de 0,9 kgf/cm ² ; 1,2 kgf/cm ² ; 1,5 kgf/cm ² e 1,8 kgf/cm ²	103
Figura 4.17	Superfícies de Resposta para a eficiência total de acordo com os pares X ₂ -X ₄ , X ₂ -X ₅ e X ₄ -X ₅	104
Figura 4.18	Superfícies de Resposta para o diâmetro de corte de acordo com os pares X ₂ -X ₄ , X ₂ -X ₅ e X ₄ -X ₅	104
Figura 4.19	Comparação entre os números de Euler e as eficiências totais de coleta para os hidrociclones filtrante na queda de pressão de 1,5 kgf.cm ²	108
Figura 4.20	Comparativo entre os números de Euler na ausência e presença de filtração nas pressões de 0,9 kgf.cm ² ; 1,2 kgf.cm ² ; 1,5 kgf.cm ² e 1,8 kgf.cm ²	109
Figura 4.21	Perfis de Pressão Total para os Pares de Hidrociclones: HC ₁ -HF ₁ ; HC ₃ -HF ₃ ;	

	HC ₅ -HF ₅ ; HC ₉ -HF ₉ ; HC ₁₀ -HF ₁₀ ; HC ₁₁ -HF ₁₁	110
Figura 4.22	Perfis de Pressão Total para os Pares de Hidrociclones: HC ₁₅ -HF ₁₅ ; HC ₁₇ -HF ₁₇ ; HC ₁₉ -HF ₁₉ ; HC ₂₁ -HF ₂₁ ; HC ₂₃ -HF ₂₃ ; HC ₂₄ -HF ₂₄	111
Figura 4.23	Razões de Líquido para os Hidrociclones Filtrantes e Convencionais.....	113
Figura 4.24	Exemplos Comparativos de Perfis de Velocidade Tangencial entre Hidrociclones Filtrantes e Convencionais.....	115
Figura 4.25	Exemplos Comparativos de Perfis de Velocidade Tangencial entre Hidrociclones Filtrantes e Convencionais na região cônica próximos ao orifício de <i>underflow</i>	116
Figura 4.26	Comparativo entre as Eficiências Totais de Coleta na ausência e presença de filtração nas pressões de 0,9 kgf.cm ² ; 1,2 kgf.cm ² ; 1,5 kgf.cm ² e 1,8 kgf.cm ²	117
Figura 4.27	Comparativo entre os Diâmetros de Corte na ausência e presença de filtração nas pressões de 0,9 kgf.cm ² ; 1,2 kgf.cm ² ; 1,5 kgf.cm ² e 1,8 kgf.cm ²	118
Figura 4.28	Exemplos de Perfis de Velocidade Radial simulados próximos à parede dos pares HC ₁ -HF ₁ , HC ₂ -HF ₂ , HC ₃ -HF ₃ e HC ₉ -HF ₉ , a 2,5 cm acima do diâmetro de <i>underflow</i>	120
Figura 4.29	Exemplos de trajetória de partículas simuladas nos hidrociclones convencionais e filtrantes.....	121
Figura 4.30	Números de Euler para os hidrociclones Bradley e Rietema.....	125
Figura 4.31	Números de Euler para os hidrociclones Krebs e Demco.....	125
Figura 4.32	Diâmetros de corte reduzido para os hidrociclones Bradley e Rietema.....	126
Figura 4.33	Diâmetros de corte reduzido para os hidrociclones Krebs e Demco.....	126
Figura A ₁	Dimensões características de um tronco de cone.....	133
Figura A ₂	Dimensões características do tronco de cone filtrante, mostrando um escoamento incompressível, unidirecional e darcyano de filtrado através da parede.....	135
Figura B ₁	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁ , HF ₂ , HF ₃ e HF ₄	139
Figura B ₂	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Filtrantes HF ₅ , HF ₆ , HF ₇ e HF ₈	140
Figura B ₃	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Filtrantes HF ₉ , HF ₁₀ , HF ₁₁ e HF ₁₂	141

Figura B ₄	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁₃ , HF ₁₄ , HF ₁₅ e HF ₁₆	142
Figura B ₅	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁₇ , HF ₁₈ , HF ₁₉ e HF ₂₀	143
Figura B ₆	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Filtrantes HF ₂₁ , HF ₂₂ , HF ₂₃ , HF ₂₄ e HF ₂₅	144
Figura B ₇	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁ , HF ₂ , HF ₃ e HF ₄	145
Figura B ₈	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₅ , HF ₆ , HF ₇ e HF ₈	146
Figura B ₉	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₉ , HF ₁₀ , HF ₁₁ e HF ₁₂	147
Figura B ₁₀	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁₃ , HF ₁₄ , HF ₁₅ e HF ₁₆	148
Figura B ₁₁	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁₇ , HF ₁₈ , HF ₁₉ e HF ₂₀	149
Figura B ₁₂	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₂₁ , HF ₂₂ , HF ₂₃ , HF ₂₄ e HF ₂₅	150
Figura B ₁₃	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁ , HF ₂ , HF ₃ e HF ₄	151
Figura B ₁₄	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₅ , HF ₆ , HF ₇ e HF ₈	152
Figura B ₁₅	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₉ , HF ₁₀ , HF ₁₁ e HF ₁₂	153
Figura B ₁₆	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁₃ , HF ₁₄ , HF ₁₅ e HF ₁₆	154
Figura B ₁₇	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁₇ , HF ₁₈ , HF ₁₉ e HF ₂₀	155
Figura B ₁₈	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₂₁ , HF ₂₂ , HF ₂₃ , HF ₂₄ e HF ₂₅	156
Figura B ₁₉	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁ , HF ₂ , HF ₃ e HF ₄	157
Figura B ₂₀	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₅ , HF ₆ , HF ₇	

	e HF ₈	158
Figura B ₂₁	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₉ , HF ₁₀ , HF ₁₁ e HF ₁₂	159
Figura B ₂₂	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁₃ , HF ₁₄ , HF ₁₅ e HF ₁₆	160
Figura B ₂₃	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₁₇ , HF ₁₈ , HF ₁₉ e HF ₂₀	161
Figura B ₂₄	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Filtrantes HF ₂₁ , HF ₂₂ , HF ₂₃ , HF ₂₄ e HF ₂₅	162
Figura C ₁	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Convencionais HC ₁ , HC ₂ , HC ₃ e HC ₄	164
Figura C ₂	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Convencionais HC ₅ , HC ₆ , HC ₇ e HC ₈	165
Figura C ₃	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Convencionais HC ₉ , HC ₁₀ , HC ₁₁ e HC ₁₂	166
Figura C ₄	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Convencionais HC ₁₃ , HC ₁₄ , HC ₁₅ e HC ₁₆	167
Figura C ₅	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Convencionais HC ₁₇ , HC ₁₈ , HC ₁₉ e HC ₂₀	168
Figura C ₆	Perfis de Pressão Total para os Hidrociclones Convencionais HC ₂₁ , HC ₂₂ , HC ₂₃ , HC ₂₄ e HC ₂₅	169
Figura C ₇	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Convencionais HC ₁ , HC ₂ , HC ₃ e HC ₄	170
Figura C ₈	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Convencionais HC ₅ , HC ₆ , HC ₇ e HC ₈	171
Figura C ₉	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Convencionais HC ₉ , HC ₁₀ , HC ₁₁ e HC ₁₂	172
Figura C ₁₀	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Convencionais HC ₁₃ , HC ₁₄ , HC ₁₅ e HC ₁₆	173
Figura C ₁₁	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Convencionais HC ₁₇ , HC ₁₈ , HC ₁₉ e HC ₂₀	174
Figura C ₁₂	Perfis de Velocidade Tangencial para os Hidrociclones Convencionais HC ₂₁ , HC ₂₂ , HC ₂₃ , HC ₂₄ e HC ₂₅	175

Figura C ₁₃	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Convencionais HC ₁ , HC ₂ , HC ₃ e HC ₄	176
Figura C ₁₄	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Convencionais HC ₅ , HC ₆ , HC ₇ e HC ₈	177
Figura C ₁₅	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Convencionais HC ₉ , HC ₁₀ , HC ₁₁ e HC ₁₂	178
Figura C ₁₆	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Convencionais HC ₁₃ , HC ₁₄ , HC ₁₅ e HC ₁₆	179
Figura C ₁₇	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Convencionais HC ₁₇ , HC ₁₈ , HC ₁₉ e HC ₂₀	180
Figura C ₁₈	Perfis de Velocidade Axial para os Hidrociclones Convencionais HC ₂₁ , HC ₂₂ , HC ₂₃ , HC ₂₄ e HC ₂₅	181
Figura C ₁₉	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Convencionais HC ₁ , HC ₂ , HC ₃ e HC ₄	182
Figura C ₂₀	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Convencionais HC ₅ , HC ₆ , HC ₇ e HC ₈	183
Figura C ₂₁	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Convencionais HC ₉ , HC ₁₀ , HC ₁₁ e HC ₁₂	184
Figura C ₂₂	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Convencionais HC ₁₃ , HC ₁₄ , HC ₁₅ e HC ₁₆	185
Figura C ₂₃	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Convencionais HC ₁₇ , HC ₁₈ , HC ₁₉ e HC ₂₀	186
Figura C ₂₄	Perfis de Velocidade Radial para os Hidrociclones Convencionais HC ₂₁ , HC ₂₂ , HC ₂₃ , HC ₂₄ e HC ₂₅	187
Figura H ₁	Figura H ₁ – Translação de eixos para análise canônica.....	277

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Razões entre as principais relações geométricas pertencentes a algumas das famílias clássicas de hidrociclones (SVAROVSKY, 1984).....	9
Tabela 3.1	Planejamento Composto Central para 4 fatores, 3 níveis e 5 réplicas no centro.....	56
Tabela 3.2	Correspondência entre os fatores e suas formas codificadas.....	57
Tabela 3.3	Principais dimensões dos hidrociclones filtrantes.....	60
Tabela 4.1	Dimensões geométricas do hidrociclone utilizado por DABIR (1983).....	84
Tabela 4.2	Queda de Pressão Simulada e medida por DABIR (1983).....	85
Tabela 4.3	Superfície de Resposta para o número de Euler dos Hidrociclones Filtrantes.....	97
Tabela 4.4	Ponto de Mínimo Global para a Superfície de Resposta do Número de Euler dos Hidrociclones Filtrantes.....	98
Tabela 4.5	Superfície de Resposta para a Razão de Líquido dos Hidrociclones Filtrantes.....	100
Tabela 4.6	Superfície de Resposta para as eficiências totais dos hidrociclones filtrantes.....	103
Tabela 4.7	Superfícies de Resposta para os diâmetros de corte dos hidrociclones filtrantes.....	103
Tabela 4.8	Intervalos de dimensões geométricas nos quais os números de Euler dos hidrociclones filtrantes permaneceriam no menor patamar possível ($Eu < 1800$).....	106
Tabela 4.9	Intervalos de dimensões geométricas nos quais as eficiências totais de coleta dos hidrociclones filtrantes permaneceriam num maior patamar possível ($\eta > 75\%$).....	107
Tabela 4.10	Intervalos nos quais os hidrociclones filtrantes provavelmente apresentarão menores números de Euler conciliados com maiores eficiências de coleta...	107
Tabela A ₁	Dimensões geométricas e massas dos cones colmatados e limpos.....	134
Tabela A ₂	Valores para V_T , V_B , V_{RF} , V_P e E	134
Tabela A ₃	Valores experimentais de queda de pressão e vazão de filtrado.....	137
Tabela A ₄	Valores experimentais para permeabilidade.....	137
Tabela D ₁	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₁	189

Tabela D ₂	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₂	190
Tabela D ₃	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₃	191
Tabela D ₄	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₄	192
Tabela D ₅	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₅	193
Tabela D ₆	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₆	194
Tabela D ₇	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₇	195
Tabela D ₈	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₈	196
Tabela D ₉	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₉	197
Tabela D ₁₀	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₁₀	198
Tabela D ₁₁	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₁₁	199
Tabela D ₁₂	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₁₂	200
Tabela D ₁₃	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₁₃	201
Tabela D ₁₄	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₁₄	202
Tabela D ₁₅	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₁₅	203
Tabela D ₁₆	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₁₆	204
Tabela D ₁₇	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₁₇	205
Tabela D ₁₈	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₁₈	206
Tabela D ₁₉	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₁₉	207
Tabela D ₂₀	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₂₀	208
Tabela D ₂₁	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₂₁	209
Tabela D ₂₂	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₂₂	210
Tabela D ₂₃	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₂₃	211
Tabela D ₂₄	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₂₄	212
Tabela D ₂₅	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₂₅ (I).....	213
Tabela D ₂₆	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₂₅ (II).....	214
Tabela D ₂₇	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₂₅ (III).....	215
Tabela D ₂₈	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₂₅ (IV).....	216
Tabela D ₂₉	Dados Experimentais do Hidrociclone HF ₂₅ (V).....	217
Tabela E ₁	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₁	219
Tabela E ₂	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₂	220
Tabela E ₃	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₃	221
Tabela E ₄	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₄	222
Tabela E ₅	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₅	223

Tabela E ₆	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₆	224
Tabela E ₇	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₇	225
Tabela E ₈	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₈	226
Tabela E ₉	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₉	227
Tabela E ₁₀	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₁₀	228
Tabela E ₁₁	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₁₁	229
Tabela E ₁₂	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₁₂	230
Tabela E ₁₃	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₁₃	231
Tabela E ₁₄	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₁₄	232
Tabela E ₁₅	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₁₅	233
Tabela E ₁₆	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₁₆	234
Tabela E ₁₇	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₁₇	235
Tabela E ₁₈	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₁₈	236
Tabela E ₁₉	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₁₉	237
Tabela E ₂₀	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₂₀	238
Tabela E ₂₁	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₂₁	239
Tabela E ₂₂	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₂₂	240
Tabela E ₂₃	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₂₃	241
Tabela E ₂₄	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₂₄	242
Tabela E ₂₅	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₂₅ (I).....	243
Tabela E ₂₆	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₂₅ (II).....	244
Tabela E ₂₇	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₂₅ (III).....	245
Tabela E ₂₈	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₂₅ (IV).....	246
Tabela E ₂₉	Dados Experimentais do Hidrociclone HC ₂₅ (V).....	247
Tabela F ₁	Dados Experimentais para o Hidrociclone BF ₁	249
Tabela F ₂	Dados Experimentais para o Hidrociclone BC.....	250
Tabela F ₃	Dados Experimentais para o Hidrociclone RF ₁	251
Tabela F ₄	Dados Experimentais para o Hidrociclone RF ₂	252
Tabela F ₅	Dados Experimentais para o Hidrociclone RF ₃	253
Tabela F ₆	Dados Experimentais para o Hidrociclone RC.....	254
Tabela F ₇	Dados Experimentais para o Hidrociclone KF ₁	255
Tabela F ₈	Dados Experimentais para o Hidrociclone KF ₂	256
Tabela F ₉	Dados Experimentais para o Hidrociclone KF ₃	257

Tabela F ₁₀	Dados Experimentais para o Hidrociclone KC.....	258
Tabela F ₁₁	Dados Experimentais para o Hidrociclone DF ₁	259
Tabela F ₁₂	Dados Experimentais para o Hidrociclone DF ₂	260
Tabela F ₁₃	Dados Experimentais para o Hidrociclone DF ₃	261
Tabela F ₁₄	Dados Experimentais para o Hidrociclone DC.....	262
Tabela G ₁	Valores simulados de razão de líquido e queda de pressão obtidos via CFD para os hidrociclones filtrantes.....	264
Tabela G ₂	Valores simulados de razão de líquido e queda de pressão obtidos via CFD para os hidrociclones convencionais.....	265
Tabela H ₁	Regressões Múltiplas para as principais respostas do Hidrociclone Filtrante (- $\Delta P = 0,9 \text{ kgf.cm}^{-2}$).....	267
Tabela H ₂	Regressões Múltiplas para as principais respostas do Hidrociclone Filtrante (- $\Delta P = 1,2 \text{ kgf.cm}^{-2}$).....	268
Tabela H ₃	Regressões Múltiplas para as principais respostas do Hidrociclone Filtrante (- $\Delta P = 1,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$).....	269
Tabela H ₄	Regressões Múltiplas para as principais respostas do Hidrociclone Filtrante (- $\Delta P = 1,8 \text{ kgf.cm}^{-2}$).....	270

LISTA DE SÍMBOLOS

B_c	dimensão do duto de entrada do ciclone	[L]
C_v	concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação	[-]
C_{vu}	concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>	[-]
C_w	concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação	[-]
C_{wu}	concentração mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>	[-]
C_{y50}	número característico no ciclone	[-]
d_i	diferença entre o nível +1 e -1 da variável estudada	[-]
d_p	diâmetro da partícula	[L]
d_{stk}	diâmetro de Stokes	[L]
d_v	diâmetro volumétrico da partícula	[L]
d_{50}	diâmetro de corte	[L]
d'_{50}	diâmetro de corte reduzido	[L]
D_c	diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone	[L]
D_i	diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone	[L]
D_{inf}	diâmetro inferior do tronco de cone do hidrociclone	[L]
D_o	diâmetro do duto de <i>overflow</i> do hidrociclone	[L]
D_u	diâmetro do orifício de <i>underflow</i>	[-]
Eu	número de Euler	[L ³ .T ⁻¹]
F	vazão volumétrica de filtrado	[L.T ⁻²]
g	aceleração gravitacional	[-]
G	eficiência granulométrica	[-]
G'	eficiência granulométrica reduzida	[M.T ⁻¹]
G_m	taxa mássica de fluido	[L]
H	altura do tronco de cone	[-]
HC	hidrociclone convencional	[-]
HF	hidrociclone filtrante	[L]
h	altura do tronco de cilindro	[L ²]
K	constante característica para cada família de ciclone e/ou hidrociclone	[-]
K_m	permeabilidade do meio filtrante	[L]
k	fator estudado no planejamento de experimentos	[L]
ℓ	comprimento do vortex finder	[-]
L	comprimento do hidrociclone	[-]

L_1	comprimento do cilindro do hidrociclone	$[M.L^{-1}T^{-2}]$
N	número de células computacionais ou de ensaios experimentais	$[L.T^{-1}]$
n_r	número de réplicas no ponto central do PCC	$[L^3.T^{-1}]$
P	pressão do fluido	$[L^3.T^{-1}]$
Q_F	velocidade intersticial de filtrado	$[L^3.T^{-1}]$
Q	vazão volumétrica de alimentação do hidrociclone	$[L^3.T^{-1}]$
Q_F	vazão volumétrica de filtrado	$[-]$
Q_{o-}	vazão volumétrica de <i>overflow</i>	$[-]$
Q_u	vazão volumétrica de <i>underflow</i>	$[L^{-1}]$
Re	número de Reynolds	$[-]$
R_L	razão de líquido	$[T]$
R_m	resistência do meio filtrante	$[L.T^{-1}]$
Stk_{50}	número de Stokes	$[L.T^{-1}]$
t	tempo	$[L.T^{-1}]$
T	tempo de residência da partícula	$[L.T^{-1}]$
u	velocidade radial do fluido	$[L.T^{-1}]$
u_c	velocidade da suspensão com base na parte cilíndrica do hidrociclone	$[L.T^{-1}]$
u_e	velocidade radial do fluido na entrada do duto do hidrociclone	$[L.T^{-1}]$
u_r	velocidade da partícula na direção radial	$[L.T^{-1}]$
v	velocidade tangencial do fluido	$[-]$
v_e	velocidade tangencial do fluido na entrada do duto do hidrociclone	$[-]$
v_i	velocidade da partícula no duto de alimentação	$[L]$
v_z	velocidade da partícula na direção axial	$[L.T^{-1}]$
X	fração mássica de partículas na alimentação cujo diâmetro é inferior a d_{Stk}	$[L.T^{-1}]$
X_u	fração mássica de partículas no <i>underflow</i> cujo diâmetro é inferior a d_{Stk}	$[M.T^{-1}]$
z	posição axial	$[M.T^{-1}]$
w	velocidade axial do fluido	$[M.T^{-1}]$
w_e	velocidade axial do fluido no duto de entrada	$[M.T^{-1}]$
W	vazão mássica de alimentação	$[-]$
W_s	vazão mássica de sólidos na alimentação do hidrociclone	$[M.L^{-1}T^{-2}]$
W_{su}	vazão mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i>	$[M.L^{-1}T^{-2}]$
W_u	vazão mássica da corrente de <i>underflow</i>	$[-]$
α	fator de ortogonalidade do PCC	$[-]$

$-\Delta P$	queda de pressão do hidrociclone	[L]
$-\Delta P_m$	queda de pressão aplicada diretamente sobre a parede filtrante	[-]
δ_i	variável não codificada	[M.L ⁻¹ T ⁻¹]
δ_{ij}	delta de Kronecher	[^o]
ε	espessura do meio filtrante	[M.L ⁻³]
E	porosidade	[M.L ⁻³]
μ	viscosidade do fluido puro	[M.L ⁻³]
θ	ângulo da parte cônica do hidrociclone	[M.L ⁻³]
ρ	densidade do fluido puro	[M.L ⁻³]
ρ_a	densidade da suspensão da alimentação	
ρ_o	densidade da suspensão do <i>overflow</i>	
ρ_s	densidade do sólido	
ρ_u	densidade da suspensão do <i>underflow</i>	

RESUMO

Hidrociclones Filtrantes são equipamentos destinados à separação sólido-líquido, dotados de uma região cônica porosa. Assim, durante o funcionamento desses equipamentos, além das correntes tradicionalmente observadas (*underflow* e *overflow*), há ainda uma corrente adicional líquida proveniente do processo de filtração na região cônica. No intuito de melhor compreender a influência da filtração sobre a separação sólido-líquido em hidrociclones, foram propostos nesta tese, o estudo e a otimização desses separadores filtrantes. Para tanto, um planejamento composto central foi efetuado, levando em consideração as principais dimensões dum hidrociclone filtrante, tais como o diâmetro de alimentação, o diâmetro de *overflow*, o comprimento total e o ângulo do tronco de cone. Além disso, técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) foram subsidiariamente aplicadas e conjugadas às informações experimentais para melhor entendimento da performance dos hidrociclones filtrantes. De acordo com as simulações e os dados experimentais levantados nesta tese, concluiu-se que a filtração foi um fenômeno benéfico na separação em hidrociclones, pois nas mesmas condições operacionais dos hidrociclones convencionais, houve decréscimos nos números de Euler e acréscimos na eficiência de coleta de partículas.

Palavras-chaves: Hidrociclones, Separação Sólido-Líquido, Filtração, Otimização

ABSTRACT

Filtering Hydrocyclones are devices used to solid-liquid separation and they have porous cones. Thus, during the operation these devices, besides the traditional streams (*underflow* and *overflow*), there is still an additional liquid stream from the filtration on conical area. The study and optimization of the filtering hydrocyclones were proposed in this work to understand the influence of the filtration on the solid-liquid separation. Therefore, an experimental design was made and the main dimensions of a hydrocyclone were adopted, just like the inlet diameter, *overflow* diameter, total length and the angle of the cone. Moreover, computational fluid dynamics techniques (CFD) were subsidiary applied and conjugated to empirical data for understanding the filtering hydrocyclone performances. In according with the simulation and experimental data obtained in this study, on the used conditions, the filtration changed the flow inside hydrocyclone and it was a positive phenomenon on the filtering hydrocyclone performance because there was diminution on the energy cost and increase on the grade efficiency on the *underflow* stream.

Words key: Hydrocyclones, Solid-Liquid Separation, Filtration, Optimization