



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE HIDROCICLONES COM CILINDROS
E CONES PERMEÁVEIS**

Fernanda Falqueto Salvador

Uberlândia – MG

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE HIDROCICLONES COM CILINDROS
E CONES PERMEÁVEIS**

Fernanda Falqueto Salvador

Orientadores: Luiz Gustavo Martins Vieira
Marcos Antonio de Souza Barrozo

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Química da Universidade Federal
de Uberlândia como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Doutora em
Engenharia Química.

Uberlândia – MG

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S182o Salvador, Fernanda Falqueto. 1988
2017 Otimização geométrica de hidrociclos com cilindros e cones
permeáveis / Fernanda Falqueto Salvador. - 2017.
132 f. : il.

Orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira.
Coorientador: Marco Antonio de Souza Barrozo.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Separação (Tecnologia) - Teses. 3.
Filtração por membranas - Teses. 4. - Teses. I. Vieira, Luiz Gustavo
Martins, . II. Barrozo, Marco Antonio de Souza, . III. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química. IV. Título.

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTORA EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 24 DE JULHO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira

Orientador PPGEQ/UFU

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo

Orientador PPGEQ/UFU

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde

PPGEQ/UFU

Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva

PPGEA/UFU

Prof. Dra. Maria do Carmo Ferreira

DEQ/UFSCAR

Isabele Cristina Bicalho

Prof. Dra. Isabele Cristina Bicalho

DEG/UFLA

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ser meu guia e proteção sempre. Agradeço imensamente a meus pais, Sandra e Edson, que estiveram ao meu lado em todos os momentos, me incentivando a seguir com os estudos. Sem vocês eu não teria chegado até aqui, muito obrigada é pouco! À minha irmã, Duda, que traz enorme felicidade para minha vida, mas principalmente por nos ter presenteado com o Léo. Aos meus avós, tios e primos queridos que sempre me motivaram a seguir em frente e não desaninar.

Aos meus orientadores, Luiz Gustavo Martins Vieira e Marcos Antonio de Souza Barrozo, pelo apoio, dedicação e ensinamentos ao longo desses quatro anos de doutorado, foram imprescindíveis para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

A todos os meus amigos que compartilharam comigo as dificuldades da pós-graduação, e também os momentos de alegria e diversão. Em especial à Betânia, Taciana, Tais, Verônica, Janaína, Adriana e Ana Carolina.

Aos companheiros e amigos do laboratório LASER, João Paulo, Laiane, Suélen e Yanne, que estiveram sempre presente durante a execução desse trabalho, me auxiliando no que fosse necessário.

Aos alunos de iniciação científica Maria Tereza e Victor que colaboraram na coleta dados experimentais e estiveram sempre dispostos a ajudar.

Aos professores membros da banca examinadora, Danylo de Oliveira Silva, Carlos Henrique Ataíde, Maria do Carmo Ferreira e Isabele Cristina Bicalho pelas valiosas contribuições para a melhoria desta tese.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Química, que colaboraram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade concedida.

À Capes e à FAPEMIG pelo apoio financeiro durante todo o meu trabalho.

Meus mais sinceros agradecimentos.

*“Confia ao Senhor a tua sorte,
espera Nele e Ele agirá.”*
(Salmos 36, 5)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 - Objetivos	4
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 - Características Gerais dos Hidrociclones	5
2.2 - Complexidade do Escoamento em um Hidrociclone	8
2.3 - Variáveis de Interesse Relacionadas à Separação em Hidrociclones	11
2.3.1 - Concentrações Volumétricas	11
2.3.2 - Vazões Volumétricas.....	12
2.3.3 - Número de Euler	13
2.3.4 - Razão de Líquido	13
2.3.5 - Eficiência Total e Eficiência Total Reduzida	14
2.3.6 - Eficiência Granulométrica e Eficiência Granulométrica Reduzida	14
2.3.7 - Diâmetro de Corte e Diâmetro de Corte Reduzido	15
2.4 - Breve Histórico sobre Hidrociclones Filtrantes.....	16
2.5 - Otimização.....	25
2.5.1 - Formulação e Resolução dos Problemas de Otimização	25
2.5.2 - Aplicação do Algoritmo de Evolução Diferencial	27
Capítulo 3 - Material e Métodos.....	31
3.1 - Material Particulado	31
3.2 - Descrição da Unidade Experimental	33

3.2.1 - Reservatório para Armazenamento da Suspensão	34
3.2.2 - Bomba Centrífuga	34
3.2.3 - Medidor de Vazão	35
3.2.4 - Manômetro Digital	35
3.2.5 - Hidrociclones	36
3.3 - Procedimento Experimental	42
3.4 - Otimização: Aplicação do Algoritmo de Evolução Diferencial	43
3.4.1 - Variáveis de Projeto	45
3.4.2 - Restrições.....	46
3.4.3 - Funções Objetivo	47
Capítulo 4 - Resultados e Discussão	49
4.1 - Estudo do Desempenho do Hidrociclone Cilíndrico-Cônico-Filtrante	49
4.1.1 - Vazão de Alimentação e Número de Euler.....	50
4.1.2 - Razão de Líquido	55
4.1.3 - Eficiência Total e Diâmetro de Corte.....	59
4.1.4 - Concentração Volumétrica da Corrente de <i>Underflow</i>	64
4.2 - Estudo do Desempenho do Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante	65
4.2.1 - Vazão de Alimentação e Número de Euler.....	66
4.2.2 - Razão de Líquido	70
4.2.3 - Eficiência Total e Diâmetro de Corte.....	73
4.2.4 - Concentração Volumétrica da Corrente de <i>Underflow</i>	77
4.3 - Estudo do Desempenho do Hidrociclone Cônico-Filtrante.....	78
4.3.1 - Vazão de Alimentação e Número de Euler.....	79
4.3.2 - Razão de Líquido	83
4.3.3 - Eficiência Total e Diâmetro de Corte.....	86
4.3.4 - Concentração Volumétrica da Corrente de <i>Underflow</i>	90
4.4 - Estudos de Caso de Otimização.....	91

4.4.1 - Caso 1: Maximização da Eficiência Total com $Eu < 5000$	92
4.4.1.1 - Validação Experimental para o Caso 1 do Hidrociclone HCICOF.....	93
4.4.1.2 - Validação Experimental para o Caso 1 do Hidrociclone HCIF.....	94
4.4.1.3 - Validação Experimental para o Caso 1 do Hidrociclone HCOF.....	95
4.4.1.4 - Validação Experimental para o Caso 1 do Hidrociclone HCON.....	96
4.4.2 - Caso 2: Minimização da Razão de Líquido com $d_{50} < 14 \mu\text{m}$	97
4.4.2.1 - Validação Experimental para o Caso 2 do Hidrociclone HCICOF.....	98
4.4.2.2 - Validação Experimental para o Caso 2 do Hidrociclone HCIF.....	99
4.4.2.3 - Validação Experimental para o Caso 2 do Hidrociclone HCOF.....	100
4.4.2.4 - Validação Experimental para o Caso 2 do Hidrociclone HCON.....	101
4.4.3 - Caso 3: Minimização do Número de Euler com $d_{50} < 14 \mu\text{m}$	102
4.4.3.1 - Validação Experimental para o Caso 3 do Hidrociclone HCICOF.....	103
4.4.3.2 - Validação Experimental para o Caso 3 do Hidrociclone HCIF.....	105
4.4.3.3 - Validação Experimental para o Caso 3 do Hidrociclone HCOF.....	106
4.4.3.4 - Validação Experimental para o Caso 3 do Hidrociclone HCON.....	107
4.4.4 - Análise Comparativa dos Hidrociclos Otimizados.....	108
Capítulo 5 - Conclusões e Sugestões	111
5.1 - Conclusões.....	111
5.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
APÊNDICE A - Determinação da Permeabilidade e da Porosidade dos Cilindros e Cones Porosos	121
A.1 - Determinação da Permeabilidade dos Cilindros e Cones Porosos.....	121
A.2 - Determinação da Porosidade dos Cilindros e Cones Permeáveis	126
APÊNDICE B - Resultados Experimentais para os Hidrociclos Filtrantes e Convencional.....	127
B.1 - Resultados do PCC para os Hidrociclos HCICOF, HCIF, HCOF e HCON	127

B.2 - Resultados dos Hidrociclones Otimizados dos Casos de Estudo 1, 2 e 3	131
B.3 - Valores dos Desvios Experimentais das Grandezas Analisadas	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Trajetória simplificada da suspensão no interior de um hidrociclone. Adaptado de Silva (2014)	3
Figura 2.1 – Principais dimensões de um hidrociclone. Fonte: Adaptada de Silva (2014).	6
Figura 2.2 – Modelos de hidrociclones convencionais baseados no ângulo do tronco de cone. Fonte: Adaptado de Svarovsky (2000).....	7
Figura 2.3 – Balanço de forças da partícula no hidrociclone. Fonte: Adaptada de Wills e Napier-Munn (2006).	9
Figura 2.4 – Representação das componentes de velocidade tangencial, axial e radial. Fonte: Adaptada de Bergström (2006).....	10
Figura 2.5 – Representação esquemática do fluxo de curto-circuito e do fluxo caótico em hidrociclones. Fonte: SILVA (2012).	11
Figura 2.6 – Esquema de um hidrociclone convencional (a) e de um hidrociclone filtrante (b). Fonte: SALVADOR (2013).	16
Figura 2.7 – Comparação entre os números de Euler e as eficiências totais para os hidrociclones filtrantes na queda de pressão de 1,5 kgf/cm ² . Fonte: VIEIRA (2006).....	21
Figura 2.8 – Fluxograma da classificação dos problemas de otimização. Fonte: Adaptado de Sahab <i>et al.</i> (2013).....	27
Figura 2.9 – Fundamentação teórica da Evolução Diferencial. Fonte: Adaptada de Lobato (2008).....	29
Figura 3.1 – Distribuição granulométrica típica do quartzito.....	33
Figura 3.2 – Unidade experimental. Fonte: SALVADOR (2013).	34
Figura 3.3 – Medidor de vazão mássica tipo Coriolis instalado na unidade de hidrociclonagem – (I) sensor e (II) <i>display</i> com transmissor de dados de vazão. Fonte: SALVADOR (2013).....	35
Figura 3.4 – Estrutura modular de montagem dos hidrociclones. Fonte: VIEIRA (2006)	38
Figura 3.5 – Dutos de alimentação (a) e tubos <i>overflow</i> (b). Fonte: VIEIRA (2006).	39
Figura 3.6 – Cilindros dos hidrociclones com as respectivas denominações de altura. Fonte: VIEIRA (2006).....	39

Figura 3.7 – Troncos de cone impermeáveis. Fonte: VIEIRA (2006).....	40
Figura 3.8 – Troncos de cone porosos.	41
Figura 3.9 – Seções cilíndricas porosas.	41
Figura 3.10 – (I) HCON, (II) HCIF, (III) HCOF E (IV) HCICOF.....	42
Figura 3.11 – Fluxograma geral de um algoritmo de ED. Fonte: Adaptada de Silva (2012). .	44
Figura 4.1 – Vazão de filtrado para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes.	50
Figura 4.2 – Vazão volumétrica de alimentação para os hidrociclos HCICOF e HCON. ...	51
Figura 4.3 – Número de Euler para os hidrociclos HCICOF e HCON.	53
Figura 4.4 – Superfícies de resposta para o número de Euler para os hidrociclos HCICOF segundo os pares X ₁ -X ₂ (a) e X ₁ -X ₃ (b).....	54
Figura 4.5 – Razão de líquido para os hidrociclos HCICOF e HCON.	55
Figura 4.6 – Superfícies de resposta para a razão de líquido para os hidrociclos HCICOF segundo os pares X ₁ -X ₂ (a) e X ₂ -X ₃ (b) e X ₂ -X ₄ (c).....	59
Figura 4.7 – Eficiência total para os hidrociclos HCICOF e HCON.	60
Figura 4.8 – Diâmetro de corte para os hidrociclos HCICOF e HCON.	61
Figura 4.9 – Superfícies de resposta para a eficiência total para os hidrociclos HCICOF segundo os pares X ₁ -X ₂ (a) e X ₂ -X ₄ (b).....	63
Figura 4.10 – Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclos HCICOF e HCON.....	64
Figura 4.11 – Vazão de filtrado para os hidrociclos cilíndrico-filtrantes.	66
Figura 4.12 – Vazão volumétrica de alimentação para os hidrociclos HCIF e HCON.....	66
Figura 4.13 – Número de Euler para os hidrociclos HCIF e HCON.	68
Figura 4.14 – Superfícies de resposta para o número de Euler para os hidrociclos HCIF segundo os pares X ₁ -X ₂ (a) e X ₁ -X ₃ (b).....	69
Figura 4.15 – Razão de líquido para os hidrociclos HCIF e HCON.	70
Figura 4.16 – Superfícies de resposta para a razão de líquido para os hidrociclos HCIF segundo os pares X ₁ -X ₂ (a), X ₂ -X ₃ (b) e X ₂ -X ₄ (c).	72
Figura 4.17 – Eficiência total para os hidrociclos HCIF e HCON.	73

Figura 4.18 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCIF e HCON	75
Figura 4.19 – Superfícies de resposta para a eficiência total para os hidrociclones HCIF segundo os pares X ₁ -X ₂ (a) e X ₂ -X ₄ (b).....	76
Figura 4.20 – Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclones HCIF e HCON	77
Figura 4.21 – Vazão de filtrado para os hidrociclones cônicos-filtrantes.	79
Figura 4.22 – Vazão volumétrica de alimentação para os hidrociclones HCOF e HCON.	80
Figura 4.23 – Número de Euler para os hidrociclones HCOF e HCON.	81
Figura 4.24 – Superfícies de resposta para o número de Euler para os hidrociclones HCOF segundo os pares X ₁ -X ₂ (a), X ₁ -X ₃ (b) e X ₂ -X ₃ (c).	83
Figura 4.25 – Razão de líquido para os hidrociclones HCOF e HCON	84
Figura 4.26 – Superfícies de resposta para a razão de líquido para os hidrociclones HCOF segundo os pares X ₂ -X ₃ (a) e X ₂ -X ₄ (b).....	86
Figura 4.27 – Eficiência total para os hidrociclones HCOF e HCON.	87
Figura 4.28 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCOF e HCON.....	88
Figura 4.29 – Superfícies de resposta para a eficiência total para os hidrociclones HCOF segundo os pares X ₂ -X ₄ (a) e X ₃ -X ₄ (b).	90
Figura 4.30 – Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> para os hidrociclones HCOF e HCON.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relações geométricas para algumas famílias de hidrociclones (Adaptada de Svarovsky, 1984)	7
Tabela 3.1 – Matriz de planejamento para a confecção dos hidrociclones	37
Tabela 3.2 – Correspondência entre os fatores e suas formas codificadas.	38
Tabela 4.1 – Resultados do algoritmo de Evolução Diferencial para otimização do Caso 1 ...	93
Tabela 4.2 – Resultados experimentais de eficiência total e número de Euler para o caso 1 dos hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes.	93
Tabela 4.3 – Resultados experimentais de eficiência total e número de Euler para o caso 1 dos hidrociclones cilíndrico-filtrantes.	94
Tabela 4.4 – Resultados experimentais de eficiência total e número de Euler para o caso 1 dos hidrociclones cônico-filtrantes.	95
Tabela 4.5 – Resultados experimentais de eficiência total e número de Euler para o caso 1 dos hidrociclones convencionais.	96
Tabela 4.6 – Resultados do algoritmo de Evolução Diferencial para as otimizações do Caso 2.	98
Tabela 4.7 – Resultados experimentais para o HCICOF-OT2 e para os hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes com menores razões de líquido.	98
Tabela 4.8 – Resultados experimentais para o HCIF-OT2 e para os hidrociclones cilíndrico-filtrantes com menores razões de líquido.	100
Tabela 4.9 – Resultados experimentais para o HCOF-OT2 e para os hidrociclones cônico-filtrantes com menores razões de líquido.	101
Tabela 4.10 – Resultados experimentais para o HCON-OT2 e para os hidrociclones convencionais com menores razões de líquido.	102
Tabela 4.11 – Resultados do algoritmo de Evolução Diferencial para as otimizações do Caso 3.	103
Tabela 4.12 – Resultados experimentais para o HCICOF-OT3 e para os hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes com menores números de Euler.	104

Tabela 4.13 – Resultados experimentais para o HCIF-OT3 e para os hidrociclones cilíndrico-filtrantes com menores números de Euler	105
Tabela 4.14 – Resultados experimentais para o HCOF-OT3 e para os hidrociclones cônico-filtrantes com menores números de Euler	106
Tabela 4.15 – Resultados experimentais para o HCON-OT3 e para os hidrociclones convencionais com menores números de Euler.....	107
Tabela 4.16 – Resultados experimentais do estudo de caso 1 para os hidrociclones HCICOF, HCIF, HCOF e HCON.....	108
Tabela 4.17 – Resultados experimentais do estudo de caso 2 para os hidrociclones HCICOF, HCIF, HCOF e HCON.....	109
Tabela 4.18 – Resultados experimentais do estudo de caso 3 para os hidrociclones HCICOF, HCIF, HCOF e HCON.....	110
Tabela A.1 – Valores experimentais de vazão volumétrica de filtrado para os cilindros porosos em função da queda de pressão após o procedimento de colmatação.	122
Tabela A.2 – Valores experimentais de vazão volumétrica de filtrado para os cones porosos em função da queda de pressão após o procedimento de colmatação.	124
Tabela A.3 – Valores para ψ e k_m para os cilindros e cones porosos.....	125
Tabela A.4 – Valores de porosidade dos cilindros e cones filtrantes após o processo de colmatação.....	126
Tabela B.1 – Resultados experimentais para os hidrociclones HCICOF do PCC a 1,47 bar.	127
Tabela B.2 – Resultados experimentais para os hidrociclones HCIF do PCC a 1,47 bar.....	128
Tabela B.3 – Resultados experimentais para os hidrociclones HCOF do PCC a 1,47 bar.	129
Tabela B.4 – Resultados experimentais para os hidrociclones HCON do PCC a 1,47 bar. ..	130
Tabela B.5 – Resultados experimentais para os hidrociclones otimizados do caso 1.	131
Tabela B.6 – Resultados experimentais para os hidrociclones otimizados do caso 2.	131
Tabela B.7 – Resultados experimentais para os hidrociclones otimizados do caso 3.	131
Tabela B.8 – Valores dos desvios experimentais das grandezas analisadas em relação aos hidrociclones 25 da matriz de planejamento (ponto central).	132

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{lateral}$	Área lateral do meio poroso, $[M^0L^2T^0]$
Cr	Probabilidade de cruzamento, $[M^0L^0T^0]$
C_V	Concentração volumétrica de sólidos, $[M^0L^0T^0]$
C_{VA}	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
C_{VU}	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
C_{WA}	Concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
C_{WU}	Concentração mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
d_{50}	Diâmetro de corte, $[M^0L^1T^0]$
d_{50}	Diâmetro de corte reduzido, $[M^0L^1T^0]$
$d_{63,2}$	Parâmetro ajustado do modelo RRB, $[M^0L^1T^0]$
Dc	Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
Di	Diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
Do	Diâmetro do duto de <i>overflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
d_p	Diâmetro da partícula, $[M^0L^1T^0]$
Du	Diâmetro do duto de <i>underflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
Eu	Número de Euler, $[M^0L^0T^0]$
F	Taxa de perturbação, $[M^0L^0T^0]$
G	Eficiência granulométrica, $[M^0L^0T^0]$
G'	Eficiência granulométrica reduzida, $[M^0L^0T^0]$
H	Comprimento da seção cônica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
H_c	Altura do meio filtrante da seção cilíndrica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
h	Comprimento da seção cilíndrica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
k_m	Permeabilidade do meio filtrante, $[M^0L^2T^0]$
L	Comprimento total do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$

ℓ	Comprimento do <i>vortex finder</i> , $[M^0 L^1 T^0]$
N	Tamanho da população, $[M^0 L^0 T^0]$
n	Parâmetro ajustado do modelo RRB, $[M^0 L^0 T^0]$
q	Velocidade superficial do fluido, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
Q	Vazão volumétrica da corrente de alimentação do hidrociclone, $[M^0 L^3 T^{-1}]$
Q_F	Vazão volumétrica da corrente de filtrado do hidrociclone, $[M^0 L^3 T^{-1}]$
Q_O	Vazão volumétrica da corrente de <i>overflow</i> do hidrociclone, $[M^0 L^3 T^{-1}]$
Q_U	Vazão volumétrica da corrente de <i>underflow</i> do hidrociclone, $[M^0 L^3 T^{-1}]$
Re	Número de Reynolds, $[M^0 L^0 T^0]$
RL	Razão de líquido, $[M^0 L^0 T^0]$
u_c	Velocidade do fluido na seção cilíndrica, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
W	Vazão mássica da corrente de alimentação, $[M^1 L^0 T^{-1}]$
W_u	Vazão mássica da corrente de <i>underflow</i> , $[M^1 L^0 T^{-1}]$
X	Fração mássica de partículas iguais ou menores do que d_p na corrente de alimentação, $[M^0 L^0 T^0]$
X_u	Fração mássica de partículas iguais ou menores do que d_p na corrente de <i>underflow</i> , $[M^0 L^0 T^0]$
X_i	Variável i codificada, $[M^0 L^0 T^0]$

Símbolos Gregos

$-\Delta P$	Queda de pressão, $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$
ε	Porosidade do meio filtrante, $[M^0 L^0 T^0]$
η	Eficiência total, $[M^0 L^0 T^0]$
η'	Eficiência total reduzida, $[M^0 L^0 T^0]$
θ	Ângulo da parte cônica do hidrociclone, $[^{\circ}]$

μ	Viscosidade do fluido, $[M^1L^{-1}T^{-1}]$
ξ	Espessura da parede filtrante, $[M^0L^1T^0]$
ρ	Densidade da corrente do líquido, $[M^1L^{-3}T^0]$
ρ_A	Densidade da corrente de alimentação, $[M^1L^{-3}T^0]$
ρ_s	Densidade dos sólidos, $[M^1L^{-3}T^0]$
ρ_u	Densidade da corrente de <i>underflow</i> , $[M^1L^{-3}T^0]$
ψ	Constante que relaciona a vazão de filtrado e a queda de pressão, $[M^{-1}L^4T^1]$

RESUMO

Os hidrociclones são equipamentos versáteis utilizados em diversos processos industriais, que usam o princípio da separação centrífuga para remover ou classificar partículas sólidas de um fluido, com base no tamanho, forma e densidade. Cada aplicação tem seus requisitos particulares que interferem tanto no projeto quanto nas condições de operação. Portanto, escolher adequadamente as dimensões do equipamento depende do objetivo principal do processo. Além disso, é possível potencializar o desempenho dos hidrociclones mediante o uso simultâneo de novas operações unitárias à hidrociclonagem como a filtração. O hidrociclone filtrante, que está inserido na categoria de equipamentos não convencionais, foi desenvolvido por pesquisadores da FEQUI/UFU a fim de melhorar a eficiência de separação ou reduzir os custos de energia. Nesta tese, foi estudado experimentalmente o efeito da incorporação do cilindro e cone porosos, conjunta ou separadamente, ao hidrociclone convencional. Assim, um planejamento composto central foi proposto para cada uma das quatro modalidades estudadas (HCICOF, HCIF, HCOF e HCON) considerando as principais dimensões de um hidrociclone. Uma otimização foi realizada a partir dos dados experimentais do PCC, levando a três novas geometrias para cada modalidade por meio da técnica de superfícies de respostas combinada ao uso do algoritmo de Evolução Diferencial. O objetivo da otimização foi encontrar três categorias de hidrociclone: caso 1 - máxima eficiência de separação; caso 2 - mínima razão de líquido; caso 3 - mínimo número de Euler. Os resultados experimentais foram satisfatórios para validar as técnicas de otimização mostrando que as geometrias otimizadas alcançaram maiores eficiências totais (HCICOF-OT1: $\eta=89,59\%$; HCIF-OT1: $\eta=91,91\%$; HCOF-OT1: $\eta=90,31\%$; HCON-OT1: $\eta=95,47\%$), menores razões de líquido (HCICOF-OT2: $RL=12,41\%$; HCIF-OT2: $RL=7,89\%$; HCOF-OT2: $RL=9,59\%$; HCON-OT2: $RL=5,53\%$) e menores números de Euler (HCICOF-OT3: $Eu=582$; HCIF-OT3: $Eu=665$; HCOF-OT3: $Eu=648$; HCON-OT3: $Eu=845$) do que os obtidos para as 25 configurações do planejamento composto central.

Palavras-chave: separação sólido-líquido, hidrociclone, filtração, Evolução Diferencial.

ABSTRACT

Hydrocyclones are versatile equipments used in several industrial processes, which use the centrifugal separation principle to remove or classify solid particles in a fluid, based on particle size, shape and density. Each application has its own particular requirements and interferes both in the design and in the operating conditions. Therefore, appropriately choosing the equipment dimensions depends on the main objective of the process. In addition, it is possible to enhance the performance of the hydrocyclones by the simultaneous use of new unit operations with a hydrocyclone, such as filtration. The filtering hydrocyclone, which is part of the category of unconventional equipment, was developed by researchers of FEQUI/UFU in order to improve separation efficiency or reduce energy costs. In this thesis, the effect of the incorporation of the porous cylinder and cone, together or separately, on the conventional hydrocyclone was studied experimentally. Thus, the central composite design was proposed for each of the four modalities studied (HCICOF, HCIF, HCOF and HCON) considering the main dimensions of a hydrocyclone. An optimization was performed from the experimental data of the CCD, where three new geometries were obtained for each modality through the response surface methodology combined with the use of the Differential Evolution algorithm. The objective of the optimization was to find three categories of hydrocyclone: case 1 - maximum separation efficiency; Case 2 - minimum underflow-to-throughput ratio; Case 3 - minimum Euler number. The experimental results were satisfactory to validate the optimization techniques showing that the optimized geometries reached higher total efficiencies (HCICOF-OT1: $\eta=89.59\%$; HCIF-OT1: $\eta=91.91\%$; HCOF-OT1: $\eta=90.31\%$; HCON-OT1: $\eta=95.47\%$), lower underflow-to-throughput ratio (HCICOF-OT2: $RL=12.41\%$; HCIF-OT2: $RL=7.89\%$; HCOF-OT2: $RL=9.59\%$; HCON-OT2: $RL=5.53\%$) and lower Euler numbers (HCICOF-OT3: $Eu=582$; HCIF-OT3: $Eu=665$; HCOF-OT3: $Eu=648$; HCON-OT3: $Eu=845$) than those obtained for the 25 configurations of the central composite design.

Keywords: solid-liquid separation, hydrocyclone, filtration, Differential Evolution.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A separação sólido-líquido refere-se, principalmente, a processos mecânicos para a separação da fase líquida e partículas sólidas finas insolúveis. A natureza e o dimensionamento dos equipamentos utilizados nesse processo dependem do valor econômico e das proporções das fases, bem como das propriedades físicas que influenciam o movimento relativo do líquido e das partículas (COUPER *et al.*, 2010).

De acordo com Rushton *et al.* (2000) é difícil identificar um processo industrial em grande escala que não envolva alguma forma de separação sólido-líquido. Geralmente, estes processos são baseados em dois princípios de separação:

- Filtração: onde a mistura sólido-líquido é direcionada para um meio, que pode ser papel, tecido, membrana etc. Nesse processo, a fase líquida ou o filtrado fluem através do meio, enquanto os sólidos são retidos na superfície ou dentro do mesmo.
- Separação por sedimentação ou por outro um campo de força (gravitacional, centrífugo, elétrico, magnético) utilizando as diferenças entre as densidades das fases (sólida e líquida) ou alguma propriedade físico-química do material.

Inicialmente o ciclone líquido tornou-se conhecido como ciclone hidráulico por meio da prevalência de aplicações onde a água é o meio fluido. Posteriormente, o ciclone hidráulico foi abreviado para "hidrociclone" (BRADLEY, 1965). Esse equipamento é destinado à separação sólido-líquido ou líquido-líquido e utiliza o campo centrífugo como princípio básico de separação. Devido à sua concepção simples, baixo custo de aquisição, fácil operação e baixa manutenção, eles assumiram um papel importante na separação de sólidos e líquidos.

Os hidrociclos surgiram em 1891 com o intuito de separar areia da água (COUPER *et al.*, 2010). Na indústria, têm sido utilizados desde a década de 1940, principalmente em

setores de processamento mineral, de tratamento de efluentes, de alimentos, químico, petroquímico, têxtil, entre outros.

Devido à grande aplicabilidade dos hidrociclos, esses equipamentos podem ser empregados em processos para: separar partículas por tamanho, densidade, ou ainda, pela velocidade terminal de sedimentação; remoção de sólidos em suspensão de um líquido; separar líquidos imiscíveis de diferentes densidades; retirar o líquido de suspensões para fornecer um produto mais concentrado ou clarificado; “quebrar” as dispersões líquido-líquido ou gás-líquido; remoção de gases dissolvidos de líquidos (RICHARDSON *et al.*, 2002).

Um hidrociclo típico é constituído por uma seção cônica, com uma abertura na sua parte mais estreita denominada *underflow*, unida a uma seção cilíndrica, que tem uma entrada de alimentação tangencial. O topo da seção cilíndrica é fechado com uma placa através da qual passa um tubo de descarga axialmente (*overflow*). O tubo é prolongado para dentro do corpo do hidrociclo por uma seção curta conhecida como *vortex finder* (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

A alimentação é introduzida sob pressão, em alta velocidade, através da entrada tangencial que transmite um movimento espiralado à suspensão. À medida que o fluido entra no hidrociclo, a força centrífuga sobre a suspensão acelera as partículas até à parede do equipamento. A mistura de líquido e sólidos, gira em alta velocidade, enquanto segue espiralando para baixo em direção ao apex do cone. As partículas de maior densidade ou tamanho movem-se em direção à parede, e quando atingem a abertura do cone, no *underflow*, são descarregadas junto com uma pequena quantidade de fluido. A descarga é restringida pelo tamanho do *underflow*. Então, as partículas menores e menos densas, que foram concentradas no centro do hidrociclo, são forçadas a inverter a direção do fluxo em um trajeto ascendente, sendo direcionadas para o *vortex finder* até sair através do *overflow* (MORGAN, 2005). A trajetória descrita para a suspensão alimentada no hidrociclo pode ser visualizada no esquema da Figura 1.1.

Considerando a vasta aplicabilidade de hidrociclos nas indústrias, vários estudos foram realizados a fim de otimizar o equipamento fornecendo melhorias na tecnologia de separação. Entre esses estudos, está a criação de equipamentos não convencionais para atender às necessidades individuais de cada processo industrial. Dessa forma, as modificações nos separadores tradicionais podem ser feitas alterando a geometria do hidrociclo ou adicionando outra operação ao processo de hidrociclonagem.

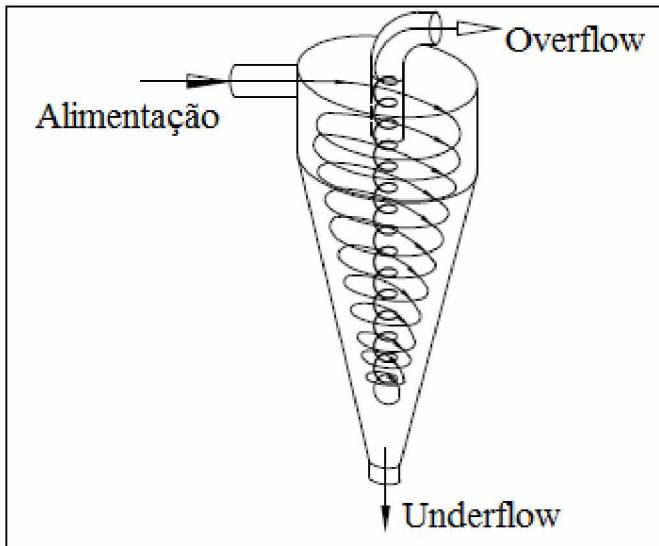


Figura 1.1 – Trajetória simplificada da suspensão no interior de um hidrociclone. Adaptado de Silva (2014).

Nesse contexto, pesquisadores da Faculdade de Engenharia Química da UFU vêm estudando um equipamento não convencional com a finalidade de analisar variáveis relacionadas ao custo energético e ao poder de separação. Tais pesquisadores propuseram a incorporação de um cone permeável a um hidrociclone de geometria convencional, originando um novo separador, conhecido como hidrociclone filtrante.

O processo de separação no hidrociclone filtrante é semelhante ao do equipamento convencional, sendo que novo equipamento há uma corrente adicional de fluido advinda da região cônica porosa do separador, além das correntes de alimentação, *overflow* e *underflow*.

Diversas pesquisas com hidrociclos filtrantes foram realizadas pelo grupo da FEQUI/UFU. Dentre esses trabalhos foram estudados hidrociclos apenas com a seção cônica ou cilíndrica porosa, e ainda, separadores que tinham as duas seções permeáveis simultaneamente. Os resultados obtidos mostraram que a incorporação do meio filtrante proporcionava menores custos energéticos ao equipamento, ao mesmo tempo em que poderia aumentar a eficiência de separação.

A necessidade específica de um processo é que determina o emprego de um separador com alto poder classificador ou com grande potencial como concentrador. Um hidrociclone considerado ideal do ponto de vista global apresenta as seguintes características: grande poder de classificação, baixo consumo energético e elevada concentração de sólidos na corrente de *underflow*. Embora, em alguns processos, nem todas essas características são

necessárias simultaneamente. Além disso, é muito difícil alcançar esses objetivos concomitantemente em um equipamento industrial, pois seria preciso o dimensionamento de um separador com características contraditórias, uma vez que um alto desempenho de separação, demanda um elevado gasto energético, por exemplo.

Diante do exposto, faz-se necessário o uso de técnicas de otimização, a fim de encontrar uma configuração de hidrociclone, seja este convencional ou filtrante, que atenda às necessidades específicas de um determinado processo.

1.1 - Objetivos

Considerando todos os aspectos citados até aqui, o objetivo geral dessa tese foi otimizar a geometria dos hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrante (HCICOF), cilíndrico-filtrante (HCIF), cônico-filtrante (HCOF) e convencional (HCON) dando continuidade aos trabalhos desenvolvidos na FEQUI/UFU.

Por sua vez, os objetivos específicos do presente trabalho foram:

- Avaliar a influência das variáveis geométricas (diâmetro de alimentação, diâmetro de *overflow*, comprimento total e ângulo do tronco de cone) no desempenho dos hidrociclos segundo um planejamento composto central;
- Formular e resolver problemas de otimização, a fim de propor três novas configurações geométricas para cada modalidade de hidrociclone (HCICOF, HCIF, HCOF e HCON) que forneçam máxima eficiência (com restrição no número de Euler), mínima razão de líquido (com restrição no diâmetro de corte) e mínimo gasto energético (com restrição no diâmetro de corte);
- Realizar testes experimentais com as configurações geométricas ótimas obtidas, com a finalidade de ratificar os resultados obtidos pela técnica de otimização utilizada (Evolução Diferencial).

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, a revisão da literatura apresenta as principais características dos hidrociclones, bem como uma discussão sobre o escoamento no interior do equipamento. Além disso, as definições das variáveis importantes ao processo de separação em hidrociclones são apresentadas. Em sequência, é realizado um breve histórico dos estudos com hidrociclones filtrantes conduzidos na FEQUI/UFU. E, por fim, a última seção desse capítulo mostra uma visão geral sobre otimização e o algoritmo de Evolução Diferencial, que foi a técnica usada no presente trabalho.

2.1 - Características Gerais dos Hidrociclones

As principais dimensões características de um hidrociclone convencional são: comprimento total (L), comprimento da parte cilíndrica (h), comprimento do tronco de cone (H), comprimento de *vortex finder* (ℓ), diâmetro da parte cilíndrica (D_c), diâmetro da alimentação (D_i), diâmetro de *overflow* (D_o), diâmetro de *underflow* (D_u), e o ângulo do tronco de cone (θ). Essas dimensões geométricas estão apresentadas na Figura 2.1.

Os hidrociclones são agrupados em famílias, possuindo como característica a manutenção da proporção entre as principais dimensões geométricas destes equipamentos em relação ao diâmetro da parte cilíndrica, em cada família (SVAROVSKY, 1984). As famílias de hidrociclones mais conhecidas e mais estudadas são: Rietema, Bradley e Demco (VIEIRA, 2006). As proporções geométricas destas e outras famílias de hidrociclones estão indicadas na Tabela 2.1.

A escolha de uma determinada família de hidrociclones depende da necessidade do processo no qual o equipamento será empregado. Na indústria, as principais operações em que se utilizam hidrociclones são: classificação, clarificação e espessamento. A operação de

classificação consiste na separação sólido-líquido baseada no tamanho das partículas. A clarificação visa a obtenção de uma corrente de *overflow* diluída, com o mínimo de sólidos possível. Já o espessamento tem como objetivo a obtenção de uma corrente de *underflow* altamente concentrada em sólidos (SVAROVSKY, 2000).

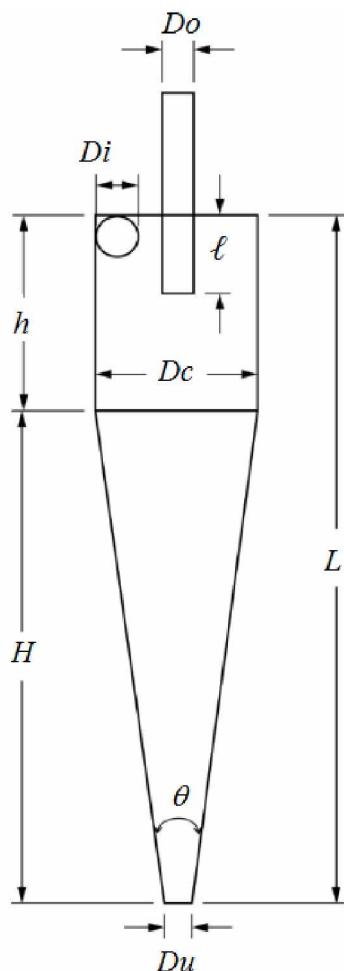


Figura 2.1 – Principais dimensões de um hidrociclone. Fonte: Adaptada de Silva (2014).

A Figura 2.2 ilustra um esquema de hidrociclones com ângulos do tronco de cone largos e estreitos. O ângulo do cone é uma das principais variáveis que define a aplicação espessadora, clarificadora ou classificadora do hidrociclone (RUSHTON *et al.*, 2000). Essa dimensão tem forte importância no escoamento circulatório: em ângulos estreitos (até 25°), essa zona de recirculação não é tão evidente e isto torna o hidrociclone eficiente para a separação de partículas finas. Esses hidrociclones são então utilizados sempre que o tamanho de corte requerido é relativamente baixo, tal como em aplicações de classificação de materiais finos (SVAROVSKY, 2000).

Tabela 2.1 – Relações geométricas para algumas famílias de hidrociclones (Adaptada de Svarovsky, 1984).

Família de Hidrociclone	Proporções Geométricas				
	Di/Dc	Do/Dc	ℓ/Dc	L/Dc	θ
Rietema	0,28	0,34	0,4	5	20°
Bradley	0,133	0,2	0,33	6,85	9°
Mozley	0,154	0,214	0,57	7,43	6°
Mozley	0,16	0,25	0,57	7,71	6°
Mozley	0,197	0,32	0,57	7,71	6°
Warman	0,29	0,2	0,31	4	15°
RW 2515	0,2	0,32	0,8	6,24	15°
Hi-Klone	0,175	0,25	0,92	5,6	10°
Hi-Klone	0,15	0,2	0,8	5,4	10°
Demco	0,217	0,5	1	4,7	25°
Demco	0,244	0,313	0,833	3,9	20°

No entanto, segundo Svarovsky (2000), o uso de hidrociclones com ângulos maiores que 25° é benéfico em alguns casos, pois os fluxos circulatórios em seu interior atuam como leitos fluidizados circulantes e podem classificar materiais de acordo com a densidade ou forma da partícula.

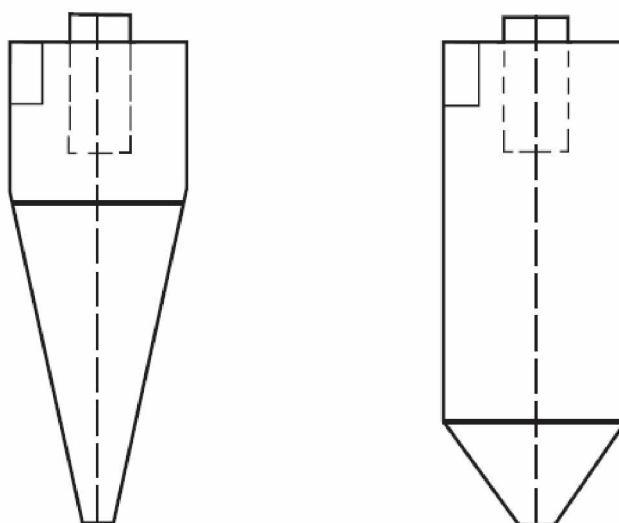


Figura 2.2 – Modelos de hidrociclones convencionais baseados no ângulo do tronco de cone.
Fonte: Adaptado de Svarovsky (2000).

A fim de melhor aproveitar as vantagens oferecidas pelo hidrociclone, muitas vezes são utilizadas múltiplas unidades, conectadas em série ou em paralelo (RUSHTON *et al.*, 2000). Em processos de clarificação, por exemplo, as ligações em paralelo permitem que sejam usadas unidades mais eficientes e de diâmetros menores para tratar vazões elevadas. As conexões (baterias) em série, por outro lado, são utilizadas para melhorar a recuperação em clarificação, para produzir um *underflow* mais espesso e um *overflow* mais diluído simultaneamente, para lavar sólidos ou para melhorar a classificação (SVAROVSKY, 2000).

2.2 - Complexidade do Escoamento em um Hidrociclone

O hidrociclone é um equipamento que utiliza a entrada tangencial e energia de pressão para criar o movimento rotacional do fluido, o que provoca um movimento relativo de materiais suspensos no fluido, permitindo assim a separação. A rotação é produzida pela injeção tangencial do fluido no topo do equipamento. O hidrociclone no ponto de entrada é geralmente cilíndrico, podendo permanecer cilíndrico em todo o seu comprimento, embora seja mais usual para que ele se torne cônico (BRADLEY, 1965).

As partículas e o fluido são acelerados por centrifugação e a separação ocorre na direção radial. Materiais mais densos, mais pesados ou de maior momento angular migram para a parede do hidrociclone, enquanto materiais menos densos, mais leves ou de menor momento angular se movem em direção ao eixo interno. O fluxo no hidrociclone é caracterizado por dois vórtices que fluem em sentidos opostos. O fluxo mais denso tende a deslocar-se ao longo do vórtice primário até o *underflow* e o material menos denso percorre o vórtice secundário na direção do *overflow* (ALDRICH, 2014).

De acordo com a teoria clássica, as partículas no hidrociclone estão sujeitas a duas forças opostas: uma força centrífuga direcionada para o exterior e uma força de arraste direcionada para o interior do equipamento, como indicado na Figura 2.3. As partículas são separadas pela força de aceleração centrífuga com base no tamanho, forma e densidade, enquanto a força de arraste move partículas de sedimentação mais lentas para a zona de baixa pressão ao longo do eixo do hidrociclone, onde são transportadas para cima através do *vortex finder* para o *overflow* (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

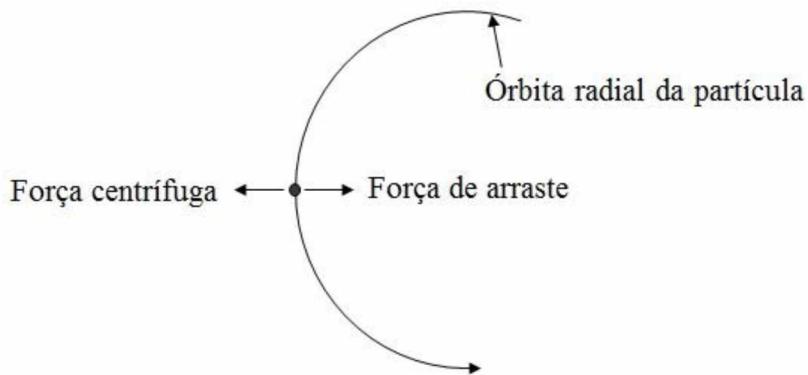


Figura 2.3 – Balanço de forças da partícula no hidrociclone. Fonte: Adaptada de Wills e Napier-Munn (2006).

A magnitude destas forças depende das propriedades físicas, tanto do fluido como do material em suspensão (por exemplo, tamanho das partículas, forma das partículas, densidade das partículas e do fluido, e viscosidade do fluido), e a utilização destas propriedades pode, consequentemente, ser feita para efetuar separações de um material do fluido (BRADLEY, 1965).

De acordo com Svarovsky (1984), a gravidade não afeta significativamente a separação, uma vez que o campo centrífugo é muito maior que o campo gravitacional. Com isso, o equipamento não precisa ser operado na vertical podendo operar inclinado ou até mesmo invertido se necessário, embora a remoção do *underflow* seja facilitada com o eixo na vertical (MORGAN, 2005).

Apesar das características construtivas bastante simples dos hidrociclos, o escoamento em seu interior é bastante complexo, sendo comumente representado por três componentes de velocidade em um sistema de coordenadas cilíndricas: a velocidade tangencial (v_θ), a velocidade radial (v_r) e a velocidade vertical ou axial (v_a) (BERGSTRÖM, 2006). O escoamento em um hidrociclone tem simetria circular, com exceção da região de entrada, e é geometricamente centrado no eixo hidrociclone, como mostra a Figura 2.4.

A mais significativa das três componentes da velocidade é a tangencial (BRADLEY, 1965). Essa componente é responsável por gerar as forças centrífugas e de cisalhamento que atuam em um hidrociclone e essas forças mantêm a parede livre do acúmulo de sólidos. Já as componentes axial e radial, dependendo da posição no interior do equipamento, são diretamente responsáveis pela coleta de partícula (SCHAPEL; CHASE, 1998).

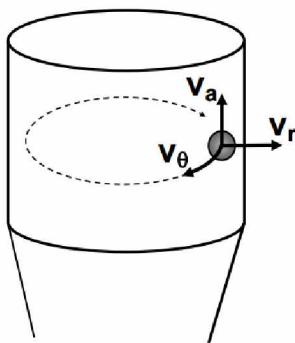


Figura 2.4 – Representação das componentes de velocidade tangencial, axial e radial. Fonte: Adaptada de Bergström (2006).

As velocidades das partículas e do líquido devem diferir em pelo menos uma direção, haja vista a tendência que o líquido tem para se concentrar no *overflow* e os sólidos no *underflow* (RUSHTON *et al.*, 2000). Para partículas em suspensão, as velocidades axial e tangencial tendem a ser um pouco diferentes das velocidades do líquido. No entanto, na direção radial, as partículas se movimentam no raio em que a força centrífuga é equilibrada pela força de arrasto do fluido. Isto significa que o raio da órbita da partícula num líquido aumentará com o tamanho e a densidade das partículas, ou mais particularmente com a velocidade terminal. Como resultado, as partículas maiores e mais densas mover-se-ão seletivamente em direção às paredes do hidrociclone e serão descarregadas no *underflow*. Para que se obtenha uma separação eficiente, os tempos de residência das partículas devem ser suficientemente longos para que possam atingir as suas órbitas de equilíbrio dentro do hidrociclone (RICHARDSON *et al.*, 2002).

O escoamento nos hidrociclos apresenta algumas particularidades além do escoamento básico descrito anteriormente. Entre estas particularidades, pode ser incluído o curto-circuito, que ocorre junto ao topo da seção cilíndrica devido à obstrução do fluxo tangencial pela corrente que acaba de entrar no equipamento. Como mostra a Figura 2.5, esse fenômeno faz com que uma fração da suspensão alimentada passe diretamente através do *vortex finder* sem que a mesma tenha sofrido a ação do campo centrífugo. Para minimizar esse efeito, que prejudica a eficiência de separação em hidrociclos, é que se utiliza o *vortex finder* prolongado para o interior da seção cilíndrica (BRADLEY, 1965).

Outra particularidade seria a ocorrência de uma coluna de ar interna chamada de *air core*, que se forma devido às altas velocidades tangenciais, associadas ao movimento helicoidal do fluido ao longo do hidrociclone, que criam um gradiente de pressão em direção

às paredes do equipamento, resultando assim em um núcleo de baixa pressão no eixo central do equipamento. Em sistemas pressurizados, o núcleo de ar pode ser muito reduzido em tamanho, e às vezes completamente eliminado (RICHARDSON *et al.*, 2002). Vakamalla *et al.* (2017) relataram que a eliminação do *air core* nos hidrociclones pode melhorar a eficiência de separação.

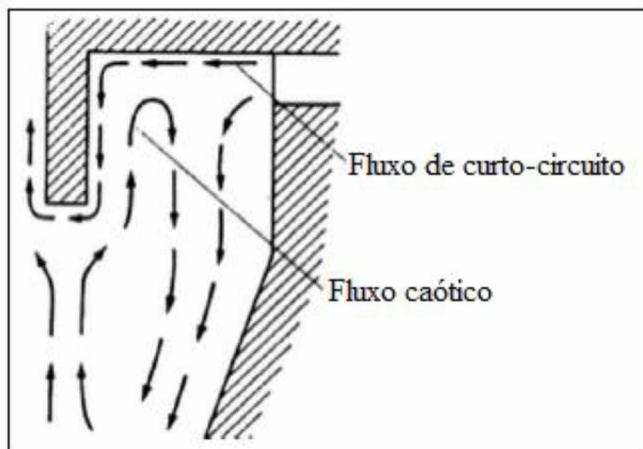


Figura 2.5 – Representação esquemática do fluxo de curto-círcuito e do fluxo caótico em hidrociclones. Fonte: SILVA (2012).

2.3 - Variáveis de Interesse Relacionadas à Separação em Hidrociclones

Para o desenvolvimento e otimização de novas geometrias de hidrociclones, são utilizadas variáveis importantes associadas a este separador. Assim, nessa seção, serão apresentados os conceitos fundamentais no estudo de hidrociclones, tais como: concentrações volumétricas (C_V), vazões volumétricas (Q), número de Euler (Eu), razão de líquido (RL), eficiência total (η), eficiência total reduzida (η'), eficiência granulométrica (G), eficiência granulométrica reduzida (G'), diâmetro de corte (d_{50}) e diâmetro de corte reduzido (d'_{50}).

2.3.1 - Concentrações Volumétricas

As concentrações volumétricas são calculadas a partir das concentrações mássicas e das densidades do fluido e do material particulado. As Equações 2.1 e 2.2 apresentam o

cálculo das concentrações volumétricas das correntes de alimentação e *underflow*, respectivamente:

$$C_{VA} = \frac{1}{\left[\frac{\rho_s}{\rho} \left(\frac{1}{C_{WA}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (2.1)$$

$$C_{VU} = \frac{1}{\left[\frac{\rho_s}{\rho} \left(\frac{1}{C_{WU}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (2.2)$$

Em que os subscritos “*A*” e “*U*” indicam as correntes de alimentação e de *underflow*; C_W são concentrações mássicas de sólidos nas correntes; ρ_s é a densidade dos sólidos e ρ a densidade do líquido.

2.3.2 - Vazões Volumétricas

As vazões volumétricas das correntes de alimentação e *underflow* são calculadas conforme as Equações 2.3 e 2.4. Essas vazões relacionam as vazões mássicas de cada corrente, obtida experimentalmente, e suas respectivas densidades. A vazão de alimentação no equipamento em determinada queda de pressão também é chamada de capacidade de processamento do hidrociclon.

$$Q = \frac{W}{\rho_A} \quad (2.3)$$

$$Q_U = \frac{W_u}{\rho_u} \quad (2.4)$$

Por sua vez, W e W_u são vazões mássicas, e ρ_A e ρ_u são, respectivamente, as densidades das correntes de alimentação e *underflow*, que podem ser obtidas pelas Equações 2.5 e 2.6.

$$\rho_A = \frac{\rho}{1 - C_{WA} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)} \quad (2.5)$$

$$\rho_u = \frac{\rho}{1 - C_{wu} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)} \quad (2.6)$$

2.3.3 - Número de Euler

O número de Euler é um número adimensional que expressa a relação entre uma queda de pressão (diferença de pressão entre a alimentação e a corrente de *overflow*) e a energia cinética por volume, como mostra a Equação 2.7.

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho u_c^2}{2}} \quad (2.7)$$

Em que $-\Delta P$ é a queda de pressão entre a alimentação e o *overflow* e u_c é velocidade do fluido na seção cilíndrica, representada pela Equação 2.8.

$$u_c = \frac{4Q}{\pi D c^2} \quad (2.8)$$

Esse número adimensional relaciona a quantidade de energia necessária (representada pela queda de pressão) para a operação de um hidrociclone a uma determinada vazão. Assim, definida uma queda de pressão, é interessante que o hidrociclone apresente a maior vazão de alimentação possível, ou seja, o menor número de Euler.

2.3.4 - Razão de Líquido

A razão de líquido (*RL*) representa a fração de líquido que, inicialmente alimentada no hidrociclone é descarregada na corrente de *underflow*. O hidrociclone age como um divisor de corrente, conhecido como “efeito T”. Dessa forma, mesmo que o equipamento não esteja separando devido à ação do campo centrífugo, uma quantidade de sólidos é removida no concentrado, numa fração igual à razão de líquido, representada pela Equação 2.9.

$$RL = \frac{Q_u (1 - C_{wu})}{Q (1 - C_{va})} \quad (2.9)$$

Quanto maior a vazão da corrente de *underflow*, maior também é a razão de líquido, que está diretamente relacionada ao poder de recuperação e de concentração de sólidos em hidrociclones. Se a razão de líquido aumenta, mais partículas serão também arrastadas para a corrente de *underflow*, e por consequência, maior será a eficiência de separação.

2.3.5 - Eficiência Total e Eficiência Total Reduzida

A eficiência total (η) leva em conta todas as partículas descarregadas no orifício de *underflow* e é calculada conforme a Equação 2.10. Representa o percentual de massa de sólidos coletado na corrente de *underflow* frente à quantidade inicialmente introduzida na alimentação do hidrociclone, independentemente se a separação se deu por mero arraste ou centrifugação propriamente dita.

$$\eta = \frac{C_{WU}}{C_{WA}} \frac{W_u}{W} \quad (2.10)$$

A eficiência total reduzida (η') representa a relação somente das partículas coletadas no *underflow* devido à ação do campo centrífugo. Logo, o efeito da razão de líquido (“efeito T”) deve ser descontado conforme mostra a Equação 2.11.

$$\eta' = \frac{\eta - RL}{1 - RL} \quad (2.11)$$

2.3.6 - Eficiência Granulométrica e Eficiência Granulométrica Reduzida

A eficiência de separação em um hidrociclone tem um caráter de probabilidade (SVAROVSKY, 2000). A curva de eficiência granulométrica é conhecida como curva de probabilidade, pois a curva é a probabilidade de que partículas de determinado tamanho sejam separadas na corrente de *underflow* a partir da alimentação em um hidrociclone (SILVA, 2012).

A eficiência granulométrica (G), também chamada de eficiência por tamanho, está relacionada ao poder de separação do hidrociclone em relação a um determinado tamanho individual da partícula e pode ser calculada a partir do conhecimento das distribuições granulométricas da alimentação e *underflow*, conforme a Equação 2.12.

$$G = \eta \frac{\frac{dX_u}{d(d_p)}}{\frac{dX}{d(d_p)}} \quad (2.12)$$

Em que X_u é a fração mássica de partículas com tamanho iguais ou menores do que d_p na corrente de *underflow*, X é a fração mássica de partículas com tamanho iguais ou menores do que d_p na corrente de alimentação e d_p é o diâmetro da partícula.

Analogamente à eficiência total reduzida (η'), a eficiência granulométrica reduzida (G') também contabiliza apenas as partículas coletadas devido à ação do campo centrífugo e exclui a separação devido ao “efeito T”, como pode ser visto na Equação 2.13.

$$G' = \frac{G - RL}{1 - RL} \quad (2.13)$$

2.3.7 - Diâmetro de Corte e Diâmetro de Corte Reduzido

O diâmetro de corte (d_{50}) e o diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) representam o diâmetro de uma partícula que será separada com eficiência granulométrica (G) e eficiência granulométrica reduzida (G') de 50%, respectivamente (SVAROVSKY, 1984). Esses parâmetros determinam o poder de separação do hidrociclone.

As partículas com diâmetro d_{50} têm a mesma chance de serem direcionadas tanto para o *underflow* quanto para o *overflow*. Já as partículas maiores que d_{50} terão mais chances de serem coletadas com uma eficiência granulométrica superior a 50%, enquanto partículas menores que o diâmetro de corte, provavelmente, serão coletadas com uma eficiência abaixo de 50%.

Como nos casos das variáveis anteriores, o diâmetro de corte reduzido tem o efeito da razão de líquido descontado. O diâmetro de corte reduzido é utilizado como referência ao poder de classificação de um hidrociclone quando se considera apenas a atuação do campo centrífugo.

2.4 - Breve Histórico sobre Hidrociclones Filtrantes

O hidrociclone filtrante se diferencia do convencional por apresentar uma parede cônica feita de material poroso, tornando-a permeável, e tem como objetivo melhorar o desempenho dos hidrociclones, reduzindo os custos operacionais e elevando o potencial de separação. O processo de separação do hidrociclone filtrante é semelhante ao do convencional, sendo que no novo equipamento há o surgimento de uma corrente adicional de fluido (Q_F), advinda da coleta de filtrado produzido na região cônica do separador, além das vazões volumétricas de alimentação (Q), *overflow* (Q_O) e *underflow* (Q_U), como mostra a Figura 2.6.

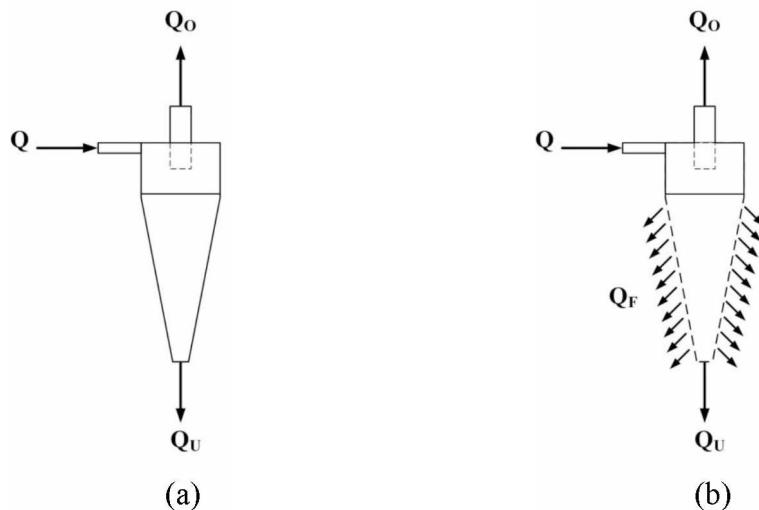


Figura 2.6 – Esquema de um hidrociclone convencional (a) e de um hidrociclone filtrante (b).
Fonte: SALVADOR (2013).

O hidrociclone filtrante foi inspirado em um sedimentador com fundo filtrante desenvolvido por Damasceno e Massarani (1986) e foi objeto de patente do Departamento de Engenharia Química da UFU em 1991.

Lanna *et al.* (1992) realizaram o primeiro trabalho com hidrociclones filtrantes com o objetivo de estudar o desempenho, a eficiência total de separação e o diâmetro de corte em relação ao equipamento convencional. Para tanto, foi construído um hidrociclone filtrante de geometria Bradley, com uma seção cilíndrica de 30 mm de diâmetro, sendo que a região cônica do hidrociclone filtrante foi construída de um tecido de nylon. Os autores observaram que o hidrociclone filtrante apresentou acréscimos na vazão volumétrica de alimentação, bem

como na concentração de sólidos na corrente de *underflow* em relação ao convencional. Foi verificado também, um decréscimo nos custos energéticos devido à queda no número de Euler. Em contrapartida, houve uma diminuição na eficiência total e um aumento no diâmetro de corte reduzido.

Vieira (1997) continuou estudando os hidrociclones filtrantes da família Bradley nas mesmas condições operacionais e geométricas de Lanna *et al.* (1992). Porém o meio filtrante utilizado na seção cônica foi modificado, passando a ser constituído de um tecido de polipropileno. O autor observou que o hidrociclone com meio filtrante de polipropileno apresentou resultados semelhantes àquele com meio filtrante de nylon se comparado ao convencional, diferindo apenas na ordem de grandeza.

Souza (1999) propôs uma metodologia que incluía o efeito do meio filtrante no processo de separação para hidrociclones da família Bradley, uma vez que nos trabalhos realizados anteriormente por Lanna *et al.* (1992) e Vieira (1997) a resistência do meio filtrante não era levada em consideração.

No trabalho de Souza (1999), foram avaliados hidrociclones filtrantes nas mesmas condições geométricas e operacionais dos trabalhos anteriores, porém com cones permeáveis confeccionados de partículas de bronze sinterizado. O autor propôs uma formulação para as equações de projeto do hidrociclone filtrante, acrescentando a resistência do meio filtrante e a resistividade da torta às variáveis clássicas já utilizadas. Porém, a resistividade da torta mostrou-se irrelevante ao processo, já que não havia a formação de torta no interior do hidrociclone devido às altas forças cisalhantes presentes na parede do equipamento.

Após grande esforço experimental, Souza (1999) constatou que nas mesmas condições operacionais de um hidrociclone convencional, o hidrociclone filtrante da família Bradley apresentou acréscimos na vazão volumétrica de alimentação. Esse acréscimo na capacidade de processamento era inversamente proporcional da resistência do meio filtrante. Foi observado também que houve um decréscimo no número de Euler e que esta grandeza para os hidrociclones filtrantes é uma função da resistência do meio filtrante, da razão de líquido e das características geométricas do equipamento.

Souza (1999) verificou ainda, que à medida que a resistência do meio filtrante era maior a razão de líquido também aumentava. Este fato está relacionado à existência do efeito de migração de corrente nos hidrociclones filtrantes, pois acredita-se que a corrente de filtrado pode interferir nos perfis dos vórtices interno e externo gerados pela turbulência através da

modificação nas relações entre os volumes das correntes de *overflow* e *underflow* que compõem esses vórtices. Assim, para um meio filtrante de baixa resistência, esse efeito seria mais intenso, direcionando um maior volume da suspensão para a corrente de *overflow*. Consequentemente, haveria uma diminuição no valor da razão de líquido, pois um volume de suspensão menor deixaria o hidrociclone pelo orifício de *underflow*.

Os diâmetros de corte dos hidrociclos filtrantes da geometria Bradley foram maiores que aqueles obtidos para os convencionais, diminuindo a eficiência de coleta (SOUZA, 1999). O autor sugeriu que esse acréscimo do diâmetro de corte ocorria devido à migração de corrente do vórtice externo para o vórtice interno, levando a um arraste mais intenso das partículas no sentido da corrente de *overflow*. Esse efeito seria mais intenso em meios mais permeáveis (SOUZA, 1999).

Vieira (2001) realizou estudos com hidrociclos da família Rietema a fim de verificar a influência do meio filtrante nessa geometria. Neste trabalho foram avaliados três cones filtrantes, construídos de bronze sinterizado e possuindo diferentes resistências à filtração, operando nas mesmas condições operacionais que os hidrociclos Bradley estudados por Lanna *et al.* (1992) e Souza (1999).

As razões de líquido para os hidrociclos filtrantes sofreram um aumento em relação às do hidrociclo convencional da família Rietema, gerando correntes de *underflow* mais diluídas (VIEIRA, 2001). Foi observado que, nas mesmas condições de queda de pressão, houve uma diminuição nas vazões volumétricas dos equipamentos filtrantes. Assim, os hidrociclos filtrantes Rietema apresentaram acréscimos para o número de Euler em relação ao convencional de mesma geometria (VIEIRA, 2001).

Vieira (2001) verificou que, nas mesmas condições de vazão volumétrica de um hidrociclo convencional, os hidrociclos filtrantes Rietema apresentaram valores menores para o diâmetro de corte reduzido e, por consequência, um aumento na eficiência total, o que foi explicado pelo aumento na razão de líquido deste equipamento.

A geometria do tronco de cone é uma importante variável no processo de separação sólido-líquido, pois o hidrociclo pode apresentar um determinado desempenho por manter uma menor ou maior distância entre os vórtices interno e externo, a depender do ângulo de abertura do tronco de cone. Nos hidrociclos filtrantes Bradley, havia uma interferência maior do vórtice interno sobre o vórtice externo, promovendo o arraste de líquido e de partículas desta região para a corrente de *overflow*, devido a uma menor abertura para o

tronco de cone ($9,0^\circ$). Por conseguinte, haveria um decréscimo na razão de líquido, causando uma diminuição na eficiência total e um aumento no número de Euler. Já nos hidrociclos filtrantes Rietema, havia uma maior distância entre os vórtices forçado e livre, pelo fato do ângulo do tronco de cone ser maior ($20,0^\circ$). Dessa forma, o líquido e as partículas presentes no vórtice externo estão menos suscetíveis a ser arrastados pelo vórtice interno e estão mais aptos a manterem-se nesta região, até que alcancem a corrente de *underflow* (VIEIRA, 2001).

Os hidrociclos filtrantes da família Krebs, cujo ângulo de abertura do tronco de cone era $\theta = 12,7^\circ$, foram estudados por Arruda *et al.* (2002). Nesse estudo foi observado que o meio filtrante não acarretava modificações significativas nas principais variáveis relacionadas ao desempenho do hidrociclo. Em comparação com as demais famílias estudadas (Bradley e Rietema), os hidrociclos filtrantes Krebs tiveram número de Euler próximo àqueles encontrados para os equipamentos filtrantes de geometria Rietema e apresentaram o menor diâmetro de corte reduzido, devido a maiores razões de líquido e vazões volumétricas de alimentação.

Os hidrociclos filtrantes da família Demco ($\theta = 20,0^\circ$) foram estudados por Arruda (2003). O autor percebeu que a inserção do meio filtrante na região cônica não acarretou grandes modificações na performance do hidrociclo filtrante em relação ao hidrociclo convencional de mesma família. Foi observado que os hidrociclos da geometria Demco apresentaram os menores valores para a razão de líquido, dentre as demais geometrias já estudadas (Bradley, Rietema e Krebs). Além disso, a razão de líquido do hidrociclo filtrante Demco registrou aumentos significativos em relação ao convencional, proporcionando corrente de *underflow* mais diluída. Os números de Euler obtidos para os hidrociclos filtrantes da família Demco foram os menores dentre todas as famílias estudadas. O hidrociclo filtrante Demco, revelou-se um excelente concentrador. O autor propôs ainda, correlações de projeto para os hidrociclos de acordo com a metodologia de Coelho e Medronho (2001).

Vieira (2006) desenvolveu um trabalho que teve como principal objetivo encontrar as dimensões geométricas e condições operacionais ótimas, nas quais os hidrociclos filtrantes apresentassem uma máxima eficiência de separação associada a um custo energético mínimo. Para tanto, realizou um estudo no qual as relações geométricas empregadas alcançassem toda faixa de famílias de hidrociclos utilizadas comercialmente.

As variáveis geométricas escolhidas para o estudo de Vieira (2006) foram o diâmetro da alimentação (Di), o diâmetro de *overflow* (Do), o comprimento total do hidrociclo (L) e

o ângulo do tronco de cone (θ), sendo as três primeiras postas em termo de uma relação geométrica com o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone (Dc). O diâmetro da parte cilíndrica, o comprimento do *vortex finder* e o diâmetro de *underflow* foram mantidos fixos em 30, 12 e 5 mm, respectivamente. Um planejamento composto central com quatro réplicas no ponto central foi proposto para a análise das variáveis geométricas em questão.

Vieira (2006) utilizou a simulação por fluidodinâmica computacional (CFD) bidimensional para possibilitar a melhor compreensão dos perfis de escoamento no interior do equipamento, além das técnicas experimentais. Diante disso, foi verificado que um incremento no diâmetro de alimentação de um hidrociclone filtrante proporcionou um aumento na capacidade volumétrica de alimentação do equipamento, e, portanto, uma menor energia foi necessária para o bombeamento da suspensão. Já um incremento no diâmetro de *overflow* no hidrociclone filtrante gerou um acréscimo na capacidade volumétrica de alimentação e diminuiu a eficiência total. Um aumento no comprimento total do hidrociclone filtrante influenciou apenas a capacidade de processamento do equipamento, já que numa mesma queda de pressão o hidrociclone filtrante foi capaz de processar volumes mais expressivos de suspensões, requerendo assim, menos energia de bombeamento. Por fim, uma diminuição no ângulo do tronco de cone dos hidrociclos filtrantes favoreceu a eficiência total em virtude das maiores razões de líquido e menores velocidades radiais.

A técnica de análise de superfície de respostas foi utilizada por Vieira (2006) para avaliar a influência das variáveis geométricas no desempenho de hidrociclos filtrantes. A partir dos dados experimentais, foi realizada uma regressão múltipla dos valores e superfícies de resposta para o número de Euler, a razão de líquido, a eficiência total e o diâmetro de corte foram estimadas. A Figura 2.7 mostra os resultados obtidos de número de Euler e eficiência total para as 25 configurações de hidrociclos.

Em seu trabalho, Vieira (2006) propôs intervalos para as relações geométricas nos quais os hidrociclos filtrantes conseguissem conciliar baixos números de Euler com as mais altas eficiências totais. Para tanto o hidrociclone deveria ter as relações geométricas nas seguintes condições: $0,21 \leq Di/Dc \leq 0,29$; $Do/Dc = 0,22$; $4,7 \leq L/Dc \leq 7,6$ e $11,2^\circ \leq \theta \leq 14,5^\circ$. Assim, dentre os hidrociclos filtrantes estudados, o hidrociclone HF11 foi aquele que apresentou o melhor desempenho, cujas dimensões otimizadas para Di/Dc , Do/Dc , L/Dc e θ foram respectivamente 0,26; 0,22; 6,9 e 11,2°.

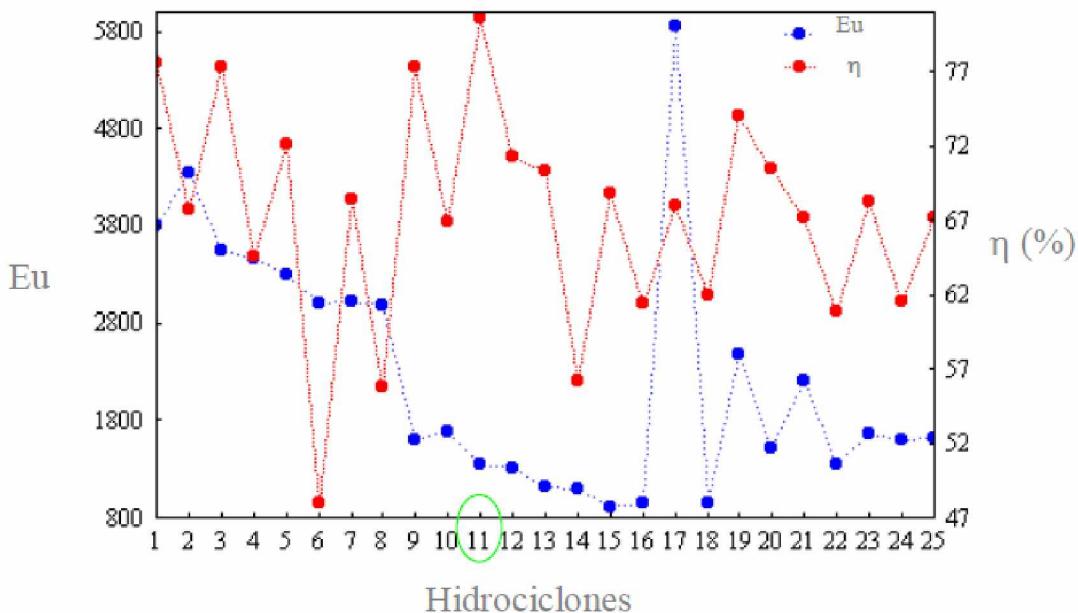


Figura 2.7 – Comparação entre os números de Euler e as eficiências totais para os hidrociclos filtrantes na queda de pressão de 1,5 kgf/cm². Fonte: VIEIRA (2006).

A fim de dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa, Almeida (2008) estudou a influência do diâmetro de *underflow* (*D_u*) e do comprimento do *vortex finder* (*l*) na performance do hidrociclo filtrante HF11 pré-definido por Vieira (2006). Neste trabalho foram utilizados três níveis distintos para cada uma das variáveis supracitadas. Os resultados experimentais e via CFD obtidos por Almeida (2008) mostraram que o número de Euler da configuração filtrante sempre se apresentava inferior ao observado para a configuração convencional e os diâmetros de corte obtidos para o hidrociclo filtrante foram menores do que para o convencional, refletindo em maiores eficiências de separação.

Almeida (2008) observou que o número de Euler sofria uma elevação à medida que o comprimento do *vortex finder* aumentava. Já os diâmetros de corte atingiram valores mínimos, isto é, eficiência de coleta máxima, quando níveis intermediários de *vortex finder* foram utilizados. O autor verificou também, que a razão de líquido não era influenciada pelo comprimento do *vortex finder*, pois as quantidades de fluido descarregados na corrente de *underflow* eram quase que idênticas para qualquer nível desta variável.

Em se tratando da variável diâmetro de *underflow*, Almeida (2008) verificou que maiores diâmetros de *underflow* fornecem menor número de Euler, implicando em um menor gasto energético. Por sua vez, a razão de líquido aumentava na medida em que se incrementava o diâmetro de *underflow*. A variável diâmetro de *underflow* influenciou

diretamente no poder de classificação das partículas, pois quanto maior o valor da razão de líquido, maior também será o arraste de partículas para a corrente de *underflow* e, consequentemente, menores serão os diâmetros de corte.

Diante disso, Almeida (2008) observou que o nível ideal das variáveis estudadas depende da aplicação de cada equipamento. Desta forma, se o equipamento for utilizado como classificador, o diâmetro de *underflow* de 5 mm e o comprimento do *vortex finder* de 21 mm seriam ideais, já se o hidrociclone for usado como concentrador recomendar-se-ia o diâmetro de *underflow* de 3 mm e comprimento do *vortex finder* de 12 mm.

Em todos os hidrociclos filtrantes descritos até aqui, a parede filtrante era somente na região cônica. Façanha (2012) investigou a mudança da parede filtrante da seção cônica para a seção cilíndrica na geometria otimizada HC11 de Vieira (2006), dando origem ao hidrociclo cilíndrico-filtrante (HCIF). A autora utilizou três matrizes cilíndricas porosas com diferentes permeabilidades ($k_1 = 1,71 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$; $k_2 = 2,95 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$; $k_3 = 3,6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$) para avaliar como a permeabilidade dos cilindros porosos influencia o desempenho do hidrociclo cilíndrico-filtrante.

Foi observado por Façanha (2012) que tanto o hidrociclo cilíndrico-filtrante quanto o hidrociclo cônico-filtrante (HCOF) apresentaram uma diminuição no número de Euler em relação ao hidrociclo convencional (HCON). O número de Euler para o equipamento HCIF foi cerca de 7 % menor do que para o HCOF. As razões de líquido dos equipamentos HCIF e HCOF sofreram decréscimos em relação ao HCON. Essa diminuição está associada à presença das matrizes porosas e ao aumento da capacidade de alimentação dos hidrociclos filtrantes, que modificaram a relação entre as componentes da velocidade do fluido de maneira a diminuir a porcentagem de líquido que passou a ser descarregada na corrente de *underflow*. Já em relação à eficiência total reduzida houve um aumento para o hidrociclo HCOF e uma redução para o HCIF em relação ao HCON.

Segundo Façanha (2012), nas condições operacionais utilizadas, a escolha da posição da matriz porosa depende do interesse do usuário e do tipo de material particulado. O hidrociclo HCOF é mais indicado quando se faz uso de partículas mais finas, pois melhora a eficiência de separação com redução simultânea dos custos energéticos. Por sua vez, para materiais particulados mais grossos, o hidrociclo HCIF é mais vantajoso, pois é capaz de processar um volume maior de suspensão ao mesmo tempo em que mantém o desempenho de separação.

O desempenho do hidrociclone HCIF foi alterado significativamente de acordo com a permeabilidade empregada na região cilíndrica filtrante (FAÇANHA, 2012). A partir dos dados experimentais, a autora observou que o hidrociclone HCIF- k_2 (permeabilidade intermediária) foi o que apresentou os menores valores para o número de Euler e para a razão de líquido. Já para a eficiência total reduzida, foi observado que seções cilíndricas com permeabilidades mais altas prejudicariam a separação, assim, o hidrociclone HCIF- k_1 foi o equipamento que forneceu uma perda menos acentuada de material particulado.

Dando sequência aos estudos que visavam melhorar o desempenho do hidrociclone de geometria otimizada por Vieira (2006), HF11, Salvador (2013) comparou o desempenho de um hidrociclone totalmente filtrante (HCICOF) com o hidrociclone convencional, cônico-filtrante e cilíndrico-filtrante. Além disso, a autora avaliou a influência da variação da permeabilidade do meio filtrante. Foi observado que o número de Euler dos hidrociclos filtrantes aumentou ou diminuiu em relação ao hidrociclone convencional, dependendo da permeabilidade do meio poroso. Quando se utilizou a permeabilidade menor o número de Euler para os hidrociclos filtrantes foi menor do que para o hidrociclone convencional. Nos maiores valores de permeabilidade, o número de Euler teve seu valor aumentado em relação ao hidrociclone convencional. Independentemente se o hidrociclone era filtrante ou convencional o número de Euler sofreu decréscimos com o aumento do diâmetro de *underflow*.

Salvador (2013) observou ainda que, para as condições estudadas, nas três modalidades de hidrociclone filtrante, a retirada de filtrado fazia com que a razão de líquido desses equipamentos fosse maior do que a do hidrociclone convencional. Além disso, verificou-se que a eficiência total dos três tipos de hidrociclos filtrantes não apresentou modificações significativas em relação ao hidrociclone convencional.

Silva (2014) realizou um estudo de otimização do hidrociclone cônico-filtrante com base nos dados de Vieira (2006) utilizando técnicas de superfície de resposta e o algoritmo de Evolução Diferencial. Três estudos de caso foram realizados por meio da otimização das variáveis Di/Dc , Do/Dc , L/Dc e θ : o Caso 1 era para maximizar a eficiência (HFOT1), o Caso 2 era destinado a minimizar a razão de líquido (HFOT2) e o Caso 3 tinha como objetivo minimizar o número de Euler (HFOT3).

Os resultados experimentais obtidos por Silva (2014) mostraram que a eficiência total do HFOT1 foi de 89,11%, logo, esse equipamento era adequado para a recuperação de sólidos. O HFOT2 apresentou uma razão de líquido de 17,12%, sendo esse valor superior à

razão de líquido do HF6 da matriz de planejamento, porém o HFOT2 apresentou também uma eficiência total mais elevada. Já para o HFOT3 foi obtido um número de Euler muito baixo, equivalente a 753, sendo que esse separador se revelou ainda um excelente concentrador.

A influência das variáveis geométricas diâmetro de *underflow* (D_u) e comprimento do *vortex finder* (ℓ) também foi avaliada por Silva (2014). A autora observou que o efeito do D_u e do ℓ depende do caso a ser estudado, pois existe uma grande diferença nos tamanhos de cone e cilindro das geometrias otimizadas.

Gonçalves (2016) estudou a geometria HFOT3 otimizada por Silva (2014) para analisar o efeito do diâmetro de *underflow* e da concentração volumétrica da alimentação através de um planejamento fatorial a 3 níveis no desempenho desse hidrociclone filtrante.

Os hidrociclos HFOT3 alcançaram, independentemente das condições operacionais, altas capacidades de processamento e baixa razão de líquido. Foi observado que um aumento no D_u provocou acréscimos no número de Euler, na razão de líquido e na eficiência, e uma diminuição na concentração volumétrica da corrente de *underflow*. Já um aumento na concentração volumétrica de alimentação fez com que diminuísse o número de Euler e a eficiência e aumentasse a concentração volumétrica de sólidos no *underflow* (GONÇALVES, 2016).

Gonçalves (2016) concluiu que a geometria otimizada HFOT3 era um excelente equipamento para a operação de espessamento, haja vista que foram obtidos valores para a razão de líquido extremamente baixos, 0,9%, 4,2% e 9,4%, para os respectivos diâmetros de *underflow* de 3, 4 e 5 mm, na concentração de sólidos de 1,0% em volume.

Além dos trabalhos realizados na FEQUI/UFU com hidrociclos filtrantes, outros grupos de pesquisa desenvolveram equipamentos em que se emprega a filtração associada ao processo de hidrociclonagem. Neste contexto, pode-se listar algumas patentes que almejaram aproveitar os benefícios da filtração. A patente SU1242247-A descreve a incorporação de um elemento filtrante dentro do duto de alimentação do hidrociclone. Na patente US5478484-A, o duto de *overflow* é constituído de material filtrante. Já na patente RU2251445-C2, a filtração ocorre por meio de uma prolongação do tubo *overflow* que possui extremidade filtrante. Em todos os casos mencionados, a filtração ocorre de maneira completamente diferente da que acontece nos hidrociclos filtrantes estudados na FEQUI/UFU, já que nestes a filtração se processa por meio dos poros da parede da parte cônica e/ou cilíndrica do hidrociclone.

2.5 - Otimização

Otimização significa melhorar o que já existe, ou ainda, projetar o novo de maneira mais eficiente e com menor custo. A otimização objetiva determinar a melhor configuração sem ter que testar todas as possibilidades envolvidas (SARAMAGO, 2003). O processo de otimização está na raiz da engenharia, uma vez que a função clássica do engenheiro é projetar sistemas novos, melhores, mais eficientes e menos dispendiosos, bem como conceber planos e procedimentos para a operação melhorada dos sistemas existentes (RAVINDRAN *et al.*, 2006).

Problemas de otimização são aqueles que visam determinar pontos extremos de uma função, seja ele mínimo (problemas de minimização) ou máximo (problemas de maximização), num contexto em que podem existir restrições. A otimização é primordial em muitas aplicações, como em experimentos científicos, atividades comerciais e projetos industriais. Os objetivos da otimização podem ser, por exemplo, minimizar o consumo de energia e os custos ou maximizar o lucro, a produção, o desempenho e a eficiência. Como os recursos, tempo e dinheiro são sempre limitados em aplicações do mundo real, é necessário encontrar soluções para otimizar essas variáveis sob várias restrições (YANG, 2014).

Diminuir o tempo dedicado ao projeto, possibilitar o tratamento simultâneo de uma grande quantidade de variáveis e restrições, possibilitar a obtenção de algo melhor, obtenção de soluções não tradicionais e menor custo são algumas das vantagens oferecidas pela otimização. Entretanto, esse processo tem como limitações: o aumento do tempo computacional quando o número de variáveis de projeto aumenta; o surgimento de funções descontínuas que apresentam lenta convergência; funções com presença de muitos mínimos locais onde o mínimo global raramente é obtido (SARAMAGO, 2003).

2.5.1 - Formulação e Resolução dos Problemas de Otimização

Os principais elementos da formulação de um problema de otimização são (LOBATO, 2008; RAO, 2009):

- Variáveis de projeto: conjunto de parâmetros independentes do processo de otimização que definem as características do modelo a ser analisado. Ou ainda, são as variáveis que se deseja determinar dentro de um intervalo e para as quais o problema é

solucionado. Quando manipuladas, promovem modificações que aumentam ou diminuem o valor da função objetivo. Essas variáveis são também conhecidas como variáveis de decisão ou variáveis de busca.

- Função objetivo: é uma função matemática que define a característica em relação a qual o projeto deve ser otimizado e é expressa em função das variáveis de projeto (minimizada ou maximizada). A escolha da função objetivo é governada pela natureza do problema.
- Restrições: são funções de igualdade ou de desigualdade sobre as variáveis de decisão, que limitam os valores da função objetivo a certas regiões do espaço de projeto, expressando uma situação desejável do comportamento do sistema.

Não existe um único método disponível para resolver todos os problemas de otimização eficientemente. Assim, vários métodos de otimização foram desenvolvidos para resolver diferentes tipos de problemas de otimização. Os métodos de busca são também conhecidos como técnicas de programação matemática (RAO, 2009).

O método de otimização escolhido para um estudo particular depende das características da função objetivo, das restrições e do número de variáveis do problema. Assim, existem algumas etapas que devem ser considerados na formulação e solução de um problema de otimização, são elas (SECCHI, 2015):

- Análise do processo, identificando e caracterizando suas variáveis;
- Escolha do critério para otimização, especificando a função objetivo em termos das variáveis do processo;
- Desenvolvimento de expressões matemáticas para o processo, relacionando as suas variáveis através de restrições de igualdade e desigualdade;
- Se a formulação do problema é complexa, dividir o problema em partes menores ou simplificar a função objetivo e/ou o modelo;
- Aplicação de técnicas matemáticas de otimização apropriadas;
- Verificar a solução obtida, analisando a sensibilidade das respostas frente a variações em parâmetros do modelo e das considerações (hipóteses) utilizadas.

De acordo com Sahab *et al.* (2013) os problemas de otimização podem ser classificados segundo diversas categorias, como mostra o esquema da Figura 2.8.

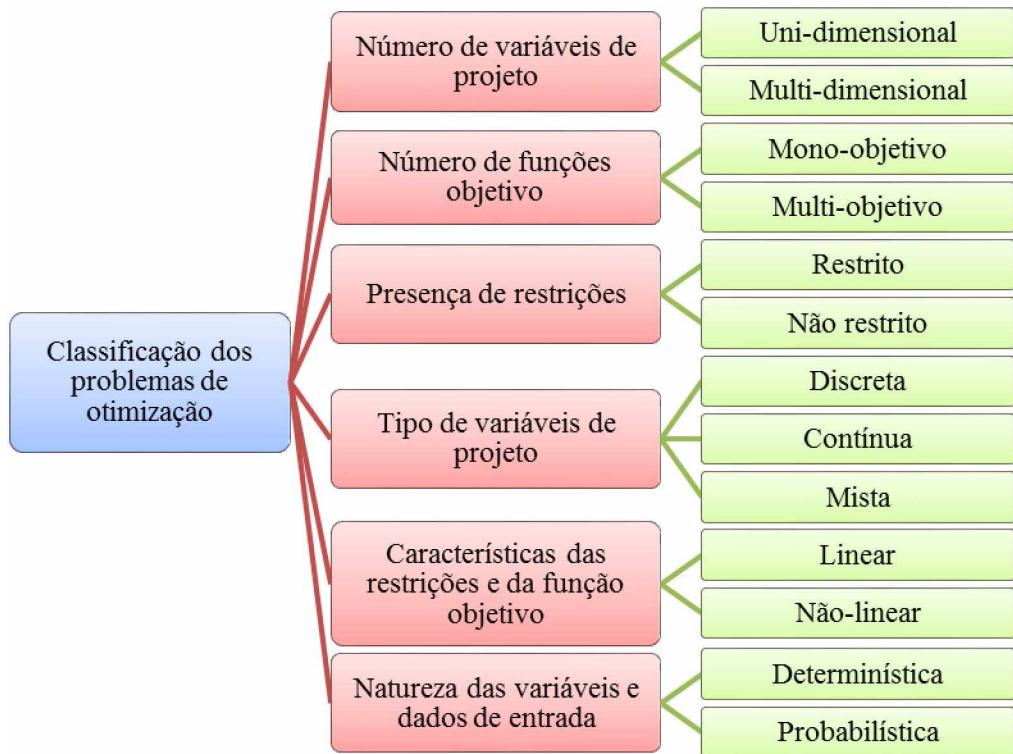


Figura 2.8 – Fluxograma da classificação dos problemas de otimização. Fonte: Adaptado de Sahab *et al.* (2013).

O interesse do presente trabalho é aplicar um processo de otimização a hidrociclones. Na indústria, um hidrociclone que apresente um elevado poder de classificação, associado a um baixo gasto energético e com elevada concentração de sólidos no *underflow* é considerado um excelente separador. Entretanto, tais objetivos (classificação, consumo energético, concentração) dificilmente são alcançados simultaneamente na prática industrial. Portanto, neste trabalho, foram estudados problemas mono-objetivo.

A partir das metodologias existentes para a resolução de problemas de otimização, foi escolhido o algoritmo de Evolução Diferencial para ser utilizado.

2.5.2 - Aplicação do Algoritmo de Evolução Diferencial

A computação evolutiva é inspirada nos princípios da teoria da evolução pela seleção natural, também conhecida como Darwinismo. Assim, as ideias oriundas dessa teoria são aplicadas como modelo para resolução de problemas através de computadores, pois se acredita que a seleção natural explica o desaparecimento de indivíduos não adaptados ao

meio, causada pelas alterações genéticas não ótimas. Desta forma, a evolução biológica é considerada uma ferramenta para o processo de otimização aplicada à minimização ou maximização dos recursos a serem potencializados (COSTA, 2010).

Na computação evolutiva existem vários métodos de otimização, e dentre eles está o algoritmo de evolução diferencial. Price e Storn (PRICE *et al.*, 2005) desenvolveram o algoritmo de Evolução Diferencial (ED – Differential Evolution) para ser um otimizador confiável e versátil e que também é simples de usar. A primeira publicação escrita sobre evolução diferencial apareceu como um relatório técnico em 1995. Desde então, o algoritmo tem sido amplamente utilizado em uma enorme variedade de aplicações (PRICE *et al.*, 2005).

A Evolução Diferencial é um método que apresenta características desejáveis a um algoritmo de otimização global: robustez para convergir ao verdadeiro ótimo e tempo computacional para a busca da solução que não é demasiadamente excessivo (PRICE *et al.*, 2005).

Uma das principais características dessa metodologia é a atualização de cada indivíduo, realizada por meio de operações vetoriais. Durante a otimização são utilizados operadores genéticos para determinar a busca pela solução ótima, produzindo assim novas gerações geneticamente melhoradas. Esses operadores são usados em cada geração até que a convergência do problema seja atingida. A fundamentação do algoritmo de Evolução Diferencial pode ser melhor compreendida com o auxílio da Figura 2.9.

O algoritmo é iniciado criando uma população inicial escolhida aleatoriamente, devendo cobrir todo o espaço de busca. Geralmente, é criada por uma distribuição de probabilidade uniforme, quando não há nenhum conhecimento sobre o problema. Então, a partir de três vetores (\vec{x}_1 , \vec{x}_2 e \vec{x}_3), são escolhidos aleatoriamente dois deles (no caso, \vec{x}_2 e \vec{x}_3), e um é subtraído do outro. O resultado é multiplicado por um escalar F , gerando assim um vetor com módulo diferente da subtração original, mas com mesma direção e sentido. O novo vetor é então somado a \vec{x}_1 , gerando assim um novo vetor \vec{v}_i , que indicará uma nova posição no espaço, ou seja, ocorrerá a geração de um novo indivíduo. Assim, o novo indivíduo gerado é avaliado através da função objetivo, de forma que se for mais bem sucedido que o indivíduo anterior o substituirá (SILVA, 2012).

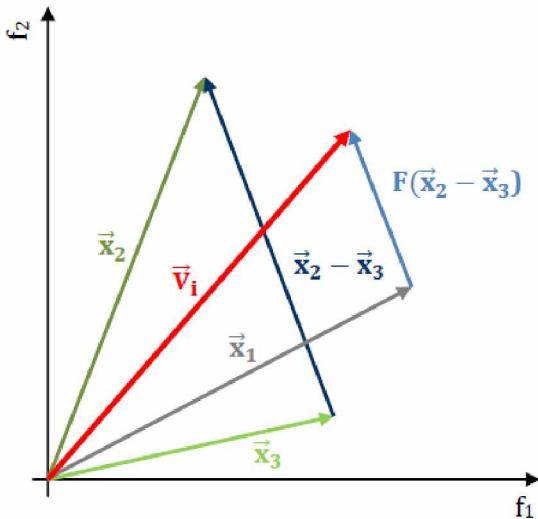


Figura 2.9 – Fundamentação teórica da Evolução Diferencial. Fonte: Adaptada de Lobato (2008).

Durante o processo realizado pelo algoritmo, a cada iteração a população é modificada, usando as melhores características dos elementos da geração anterior e submetendo-as a três tipos básicos de operadores, para produzir melhores resultados. Esses operadores são os seguintes (SARAMAGO, 2003):

- Reprodução: é um processo no qual cada cadeia é copiada levando em conta os valores da função de adaptação F ;
- Cruzamento: é um processo no qual a combinação em partes de cada um de dois cromossomos gera um novo descendente;
- Mutação: é a modificação aleatória ocasional (de baixa probabilidade) do valor de um alelo da cadeia.

Segundo Feoktistov (2006) é necessário que o usuário ajuste os seguintes parâmetros de otimização para controle do algoritmo: constante de diferenciação ou de mutação F , constante de cruzamento Cr e tamanho da população N .

Devido ao desempenho e versatilidade do algoritmo de Evolução Diferencial diversas aplicações em problemas práticos podem ser encontradas na literatura, entre elas o uso dessa metodologia para otimização de hidrociclones.

O algoritmo de ED foi utilizado para otimizar as variáveis Di/Dc , Do/Dc , L/Dc e θ para hidrociclones convencionais (SILVA, 2012) e filtrantes (SILVA, 2014). Esses autores propuseram três estudos de caso de otimização com diferentes objetivos: um hidrociclone

classificador de alta eficiência; um segundo equipamento para minimizar a razão de líquido; e o terceiro tinha como finalidade a minimização dos custos energéticos.

Capítulo 3

MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as informações relevantes sobre a preparação da amostra a ser utilizada, a unidade experimental e os hidrociclos, bem como o procedimento experimental e a metodologia empregada na otimização do desempenho dos hidrociclos em três estudos de caso.

3.1 - Material Particulado

O material particulado escolhido para ser utilizado no desenvolvimento dessa tese foi o quartzito. Esse material foi obtido junto à ANEX Mineração sediada em Itabirito – MG. O quartzito é uma rocha metamórfica, originada devido aos processos metamórficos desenvolvidos em rochas sedimentares ricas em quartzo. Sua composição química, determinada pela mineradora que forneceu o material, foi avaliada através de análise de espectrometria de raios X e pode ser visualizada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química do quartzito.

Espécie	Composição Química (%)
SiO ₂	95,45
TiO ₂	0,08
Al ₂ O ₃	3,56
Fe ₂ O ₃	0,04
CaO	0,01
MgO	0,01
Na ₂ O	0,20
K ₂ O	0,65

A rocha da qual é formado o quartzito apresenta uma tendência a ser coesa, com estrutura cristalina densa e organizada de modo que a força entre as partículas propicia uma resistência interna bastante alta (SANTOS *et al.*, 2014). Esse material é muito usado na construção civil, podendo ser empregado como rocha ornamental ou como componente estrutural da obra. Entre outras aplicações, o quartzito pode ser usado para: artesanato mineral, construção de mesas e outros objetos de decoração, pisos internos e externos com alta resistência, material abrasivo para preparação de instrumentos de corte, indústria siderúrgica, e ainda, é fonte de sílica para usos diversos.

Devido às características apresentadas pelo material particulado, o quartzito mostrou-se excelente para ser utilizado em operações de hidrociclonagem por ser duro, estável e resistente à quebra. Isto permite uma classificação por tamanho mais precisa, uma vez que as partículas mantêm o seu tamanho original.

A preparação do material particulado constituiu-se na cominuição em um moinho de bolas para que as partículas de quartzito atingissem a distribuição de tamanho de partículas na faixa desejada. As partículas deveriam ser finas, uma vez que partículas grosseiras dificultam a comparação da performance dos equipamentos estudados. Dessa forma, as bateladas foram realizadas em um moinho contendo um vaso cerâmico de aproximadamente 20 cm de diâmetro e 30 cm de altura, a uma rotação de 23 rpm, utilizando 75 bolas de cerâmica, cada qual com aproximadamente 4 cm de diâmetro. Em sequência, uma quantidade de quartzito foi quarteada, a fim de que amostras representativas fossem coletadas para a realização de análises granulométrica e de densidade.

A distribuição granulométrica característica do quartzito foi obtida através do analisador de partículas por difração a *laser* da Malvern modelo Mastersizer Microplus e está apresentada na Figura 3.1. A dimensão característica fornecida pelo equipamento foi o diâmetro volumétrico das partículas.

O ajuste da distribuição granulométrica foi realizado com a ajuda do *software* Statistica®, sendo que o modelo bi-paramétrico Rosin-Rammler-Bennet (RRB) foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais do quartzito, com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9917, cujos parâmetros ($d_{63,2}$ e n) estão apresentados junto à Equação 3.1.

$$X = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_p}{19,98} \right)^{1,08} \right] \quad (3.1)$$

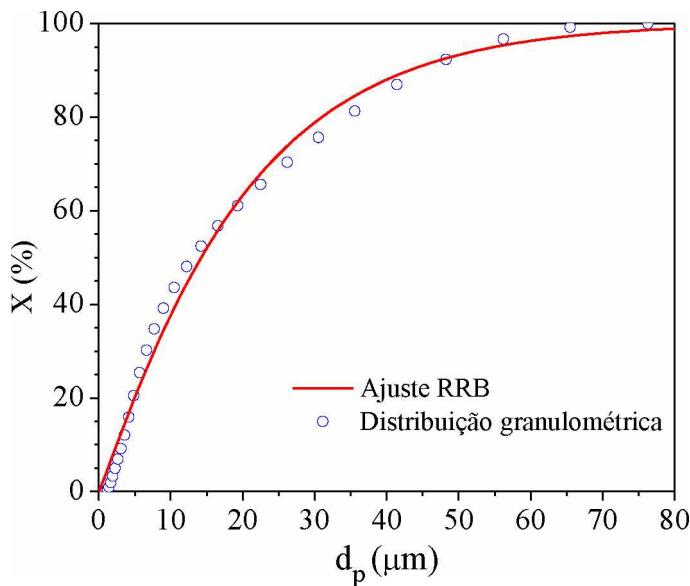


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica típica do quartzito.

A densidade real do quartzito, determinada pela técnica de picnometria com deslocamento de gás Hélio, foi equivalente a $2,6707 \pm 0,0008$ g/cm³. Já o valor encontrado para a densidade aparente do material particulado, por meio de picnometria, foi de $2,6282 \pm 0,0152$ g/cm³.

3.2 - Descrição da Unidade Experimental

Os ensaios foram realizados na unidade experimental do Laboratório de Separação e Energias Renováveis da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (LASER/FEQUI/UFU). A unidade era constituída de um reservatório para armazenamento da suspensão (1), um agitador mecânico para homogeneizar (2), uma bomba centrífuga para fornecer energia de pressão (3), um medidor de vazão do tipo Coriolis (4), um manômetro digital (5) e um hidrociclone (6), como mostra a Figura 3.2. A descrição detalhada de cada componente da unidade experimental será realizada nas próximas subseções.

A suspensão era bombeada através da tubulação que, em seu trajeto, era dividida em duas partes. Na parte superior, tinha-se a linha de alimentação do hidrociclone (A) e na parte inferior o duto de *bypass* (B), que ajuda no ajuste da vazão. O ajuste da vazão em cada uma das linhas era realizado manualmente, através de válvulas globo (a) e gaveta (b).



Figura 3.2 – Unidade experimental. Fonte: SALVADOR (2013).

3.2.1 - Reservatório para Armazenamento da Suspensão

O tanque utilizado para armazenar a suspensão durante os ensaios experimentais tinha um volume de 250 L e era fabricado em polietileno. A fim de evitar a formação de vórtices no tanque de armazenamento e promover uma boa homogeneização da mistura sólido-líquido foi instalado um par de chicanas próximo às paredes e foi utilizado um agitador mecânico de 1,5 cv, com inversor de frequência.

3.2.2 - Bomba Centrífuga

A bomba utilizada na unidade experimental foi uma bomba centrífuga modelo 1,5/1B-AH da Weir Minerals, resistente à abrasão e corrosão, própria para o bombeamento de polpas abrasivas. Com uma potência de 5 cv, fornecia energia suficiente para o bombeamento da suspensão do tanque para o hidrociclone alcançar a pressão desejada.

3.2.3 - Medidor de Vazão

O medidor de vazão mássica utilizado (Metroval – modelo RHM08-3FS1PN) era constituído de duas unidades: o sensor de medição de vazão do tipo Coriolis e um *display* com transmissor de dados de vazão (Figura 3.3). Esse medidor foi instalado na linha principal da unidade, para que pudesse ser determinada a vazão mássica na linha de alimentação do hidrociclone. A faixa de operação do equipamento era de 300 a 1800 kg/h, sendo que o mesmo suporta pressões de até 15,5 bar. A fim de conferir a calibração do medidor de vazão realizada pelo fabricante, foram feitas aferições com medidas gravimétricas confirmando os valores fornecidos pelo totalizador.



Figura 3.3 – Medidor de vazão mássica tipo Coriolis instalado na unidade de hidrociclonagem – (I) sensor e (II) *display* com transmissor de dados de vazão. Fonte: SALVADOR (2013).

3.2.4 - Manômetro Digital

A queda de pressão no interior do hidrociclone era determinada por um manômetro digital do tipo Bourdon, acoplado imediatamente antes da entrada da alimentação do separador. Esse indicador de pressão operava na faixa de 0 a 7 bar. O valor aferido no manômetro correspondia à queda de pressão no interior do equipamento, uma vez que as correntes de *overflow* e *underflow* eram descarregadas à pressão atmosférica.

3.2.5 - Hidrociclones

No Capítulo 1 do presente trabalho, foi relatado que o objetivo deste estudo era otimizar a separação em hidrociclones convencional e filtrantes com paredes cilíndricas e/ou cônicas permeáveis. Portanto, foi proposto um planejamento de experimentos baseado no trabalho de Vieira (2006). As variáveis escolhidas para esse planejamento foram o diâmetro da alimentação (Di), o diâmetro do *overflow* (Do), o comprimento total do hidrociclone (L) e o ângulo do tronco de cone (θ), sendo que as três primeiras estavam relacionadas com o diâmetro da seção cilíndrica (Dc).

A escolha de quatro variáveis para serem avaliadas utilizando um planejamento fatorial completo levaria à realização de 81 testes para cada modalidade de hidrociclone estudada. No entanto, foi proposto um Planejamento Composto Central (PCC) ortogonal, que reduz significativamente o esforço experimental sem comprometer os resultados, uma vez que os parâmetros estimados através dessa técnica não são correlacionados entre si.

O Planejamento Composto Central que está apresentado na Tabela 3.1, foi realizado utilizando os quatro fatores mencionados anteriormente ($k = 4$), cinco réplicas no ponto central ($n_r = 5$) e cinco níveis, contabilizando 25 hidrociclones diferentes ($2^k + n_r + 2k$).

Pelo PCC cada fator passa a ser representado pela forma codificada ($-\alpha$, -1 , 0 , $+1$ e $+\alpha$). A Equação 3.2 representa a equação de codificação para uma determinada variável (δ). Nela, δ_i representa o valor do fator na escala original, $\bar{\delta}_i$ é o nível central na escala original e d_i a diferença entre o nível alto ($+1$) e o nível baixo (-1).

$$X_i = 2 \frac{\delta_i - \bar{\delta}_i}{d_i} \quad (3.2)$$

Os valores adotados para $-\alpha$ e $+\alpha$ devem ser escolhidos adequadamente para que os parâmetros do modelo a serem estimados não estejam correlacionados entre si. Tal fato somente se verificará com a escolha adequada da ortogonalidade (α) de modo que o produto entre a matriz de planejamento e a sua inversa seja uma matriz ortogonal, isto é, todos os elementos da matriz são nulos, exceto os da diagonal principal (VIEIRA, 2006).

Na Tabela 3.1 cada variável está representada sob a forma codificada, nos termos das Equações 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6:

$$X_1 = \frac{Di/Dc - 0,21}{0,05} \quad (3.3)$$

$$X_2 = \frac{Do/Dc - 0,27}{0,05} \quad (3.4)$$

$$X_3 = \frac{L/Dc - 5,8}{1,1} \quad (3.5)$$

$$X_4 = \frac{\theta - 14,5}{3,3} \quad (3.6)$$

Tabela 3.1 – Matriz de planejamento para a confecção dos hidrociclos.

Hidrociclos	Di/Dc	Do/Dc	L/Dc	θ
H1	-1	-1	-1	-1
H2	-1	-1	-1	+1
H3	-1	-1	+1	-1
H4	-1	-1	+1	+1
H5	-1	+1	-1	-1
H6	-1	+1	-1	+1
H7	-1	+1	+1	-1
H8	-1	+1	+1	+1
H9	+1	-1	-1	-1
H10	+1	-1	-1	+1
H11	+1	-1	+1	-1
H12	+1	-1	+1	+1
H13	+1	+1	-1	-1
H14	+1	+1	-1	+1
H15	+1	+1	+1	-1
H16	+1	+1	+1	+1
H17	$-\alpha$	0	0	0
H18	$+\alpha$	0	0	0
H19	0	$-\alpha$	0	0
H20	0	$+\alpha$	0	0
H21	0	0	$-\alpha$	0
H22	0	0	$+\alpha$	0
H23	0	0	0	$-\alpha$
H24	0	0	0	$+\alpha$
H25 (5)	0	0	0	0

A correspondência de cada um dos fatores com a sua forma codificada, pode ser vista na Tabela 3.2. Os valores apresentados estão de acordo com as equações de codificação para cada fator e com o valor de $\alpha = 1,66$ para a ortogonalidade.

Tabela 3.2 – Correspondência entre os fatores e suas formas codificadas.

	Di/Dc	Do/Dc	L/Dc	θ
$-\alpha$	0,13	0,19	3,9	9,0°
-1	0,16	0,22	4,7	11,2°
0	0,21	0,27	5,8	14,5°
+1	0,26	0,32	6,9	17,8°
$+\alpha$	0,29	0,35	7,6	20,0°

Devido à grande quantidade de equipamentos requeridos pelo planejamento, os hidrociclones estudados nesta tese tiveram seu sistema de montagem modular como mostra a Figura 3.4. Assim, os dutos de alimentação, os tubos de *overflow*, as seções cilíndricas e os troncos de cone, tanto os impermeáveis quanto os filtrantes, foram fabricados individualmente de forma a permitir o acoplamento das peças por sistemas de rosca ou travas mecânicas.

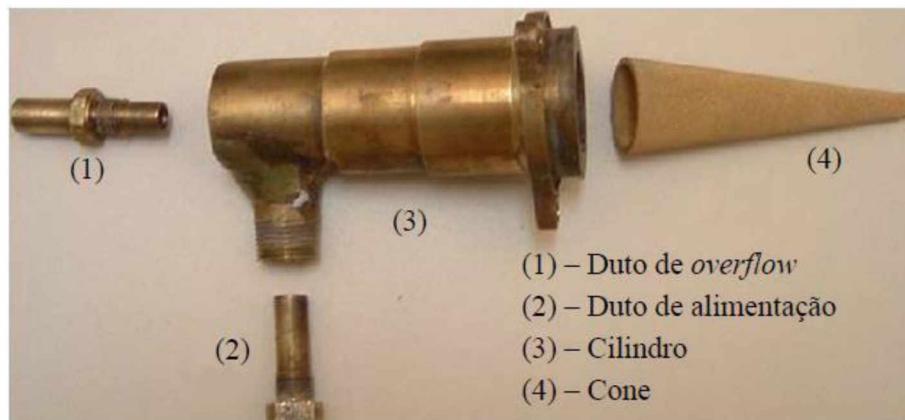


Figura 3.4 – Estrutura modular de montagem dos hidrociclones. Fonte: VIEIRA (2006).

Todos os equipamentos estudados durante o desenvolvimento deste trabalho possuíam o diâmetro da seção cilíndrica (Dc), o comprimento do *vortex finder* (ℓ) e o diâmetro do duto de *underflow* (Du) constantes e iguais a 30, 12 e 5 mm, respectivamente.

A construção dos cilindros e troncos de cone de paredes impermeáveis, dutos de *overflow* e alimentação foi feita com latão ou alumínio devido às facilidades de usinagem e

aos baixos custos de aquisição. As peças de paredes maciças disponíveis para serem utilizadas no presente trabalho foram:

- Cinco dutos de alimentação com diâmetros (Di) de $3,9$ ($-\alpha$); $4,8$ (-1); $6,3$ (0); $7,8$ ($+1$) e $8,7$ ($+\alpha$) mm (Figura 3.5-a);
- Cinco tubos de *overflow* com diâmetros (Do) de $5,7$ ($-\alpha$); $6,6$ (-1); $8,1$ (0); $9,6$ ($+1$) e $10,5$ ($+\alpha$) mm (Figura 3.5-b);
- Sete cilindros com alturas (h) iguais a 15 (h_1), 19 (h_2), 61 (h_3), 76 (h_4), 80 (h_5), 103 (h_6) e 130 (h_7) mm (Figura 3.6);
- Cinco troncos de cone com ângulos (θ) de $9,0^\circ$ ($-\alpha$), $11,2^\circ$ (-1), $14,5^\circ$ (0), $17,8^\circ$ ($+1$) e $20,0^\circ$ ($+\alpha$) (Figura 3.7).

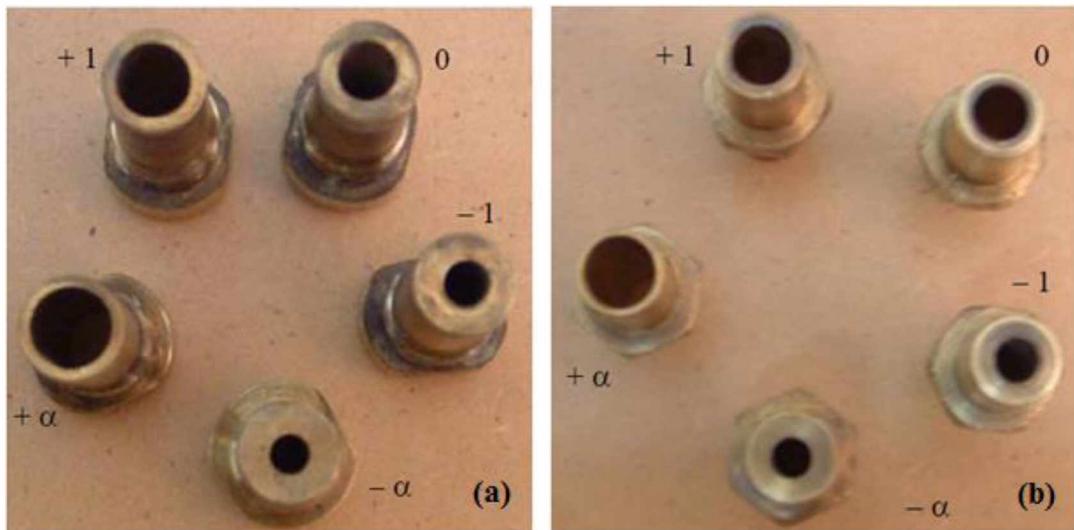


Figura 3.5 – Dutos de alimentação (a) e tubos *overflow* (b). Fonte: VIEIRA (2006).

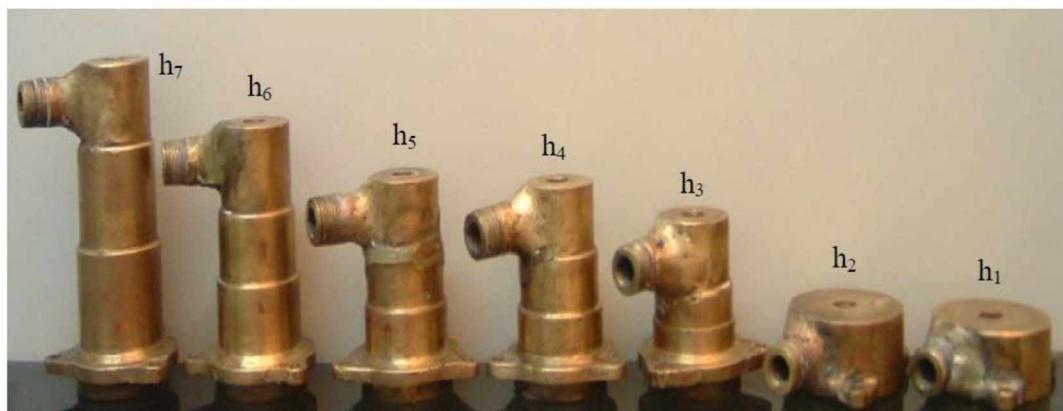


Figura 3.6 – Cilindros dos hidrociclones com as respectivas denominações de altura. Fonte: VIEIRA (2006).

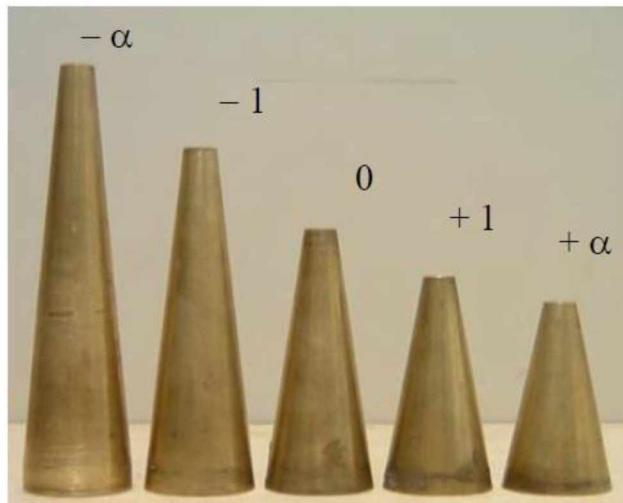


Figura 3.7 – Troncos de cone impermeáveis. Fonte: VIEIRA (2006).

Os cilindros e cones filtrantes foram confeccionados com partículas de bronze sinterizado pela Indústria e Comércio de Filtros e Materiais Sinterizados Ltda. (Metalsinter). As peças filtrantes disponíveis para serem utilizadas neste trabalho foram:

- Cinco troncos de cone com ângulos (θ) de $9,0^\circ$ ($-\alpha$), $11,2^\circ$ (-1), $14,5^\circ$ (0), $17,8^\circ$ ($+1$) e $20,0^\circ$ ($+\alpha$) (Figura 3.8);
- Cinco seções cilíndricas, com alturas (h) iguais a 46 (h_3), 61 (h_4), 65 (h_5), 88 (h_6) e 115 (h_7) mm (Figura 3.9). Devido à necessidade de unir a seção cilíndrica porosa a um cilindro de parede maciça de 15 mm (no qual estava situado o duto de alimentação) para gerar os comprimentos fornecidos pelo PCC ($h_3 = 61$, $h_4 = 76$, $h_5 = 80$, $h_6 = 103$ e $h_7 = 130$ mm), não foi possível a construção dos cilindros filtrantes de 15 e 19 mm, correspondentes a h_1 e h_2 , respectivamente.

As matrizes porosas utilizadas no presente trabalho eram novas e, portanto, antes dos experimentos, foi necessário o procedimento de colmatação, que é caracterizado pela obstrução do meio poroso pelas partículas presentes na suspensão alimentada no hidrociclone; nesse procedimento o meio filtrante perde gradualmente as características iniciais, isto é, ocorre a diminuição na porosidade e na permeabilidade. Após a colmatação, foram realizados testes de filtração conforme Rocha e Vieira (2012) para a determinação da permeabilidade da parede filtrante. A porosidade das matrizes porosas foi obtida segundo a metodologia de Darby (2001). Os valores obtidos para a permeabilidade e para a porosidade foram equivalentes a $(4,19 \pm 0,70) \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ e $5,07 \pm 0,28\%$, respectivamente. Maiores detalhes para os cálculos das propriedades podem ser encontrados no Apêndice A.

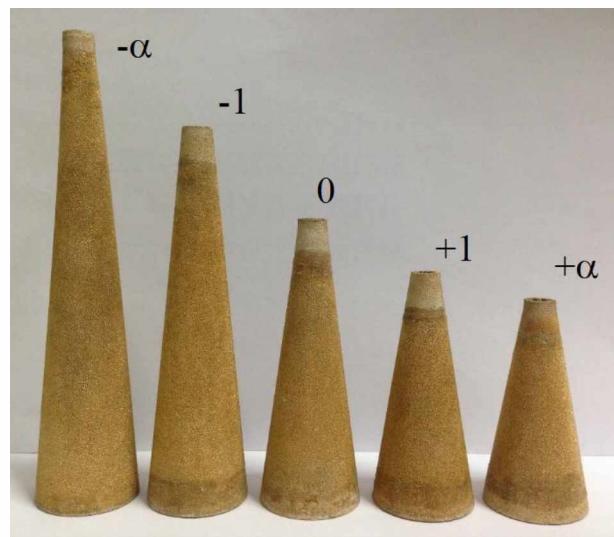


Figura 3.8 – Troncos de cone porosos.

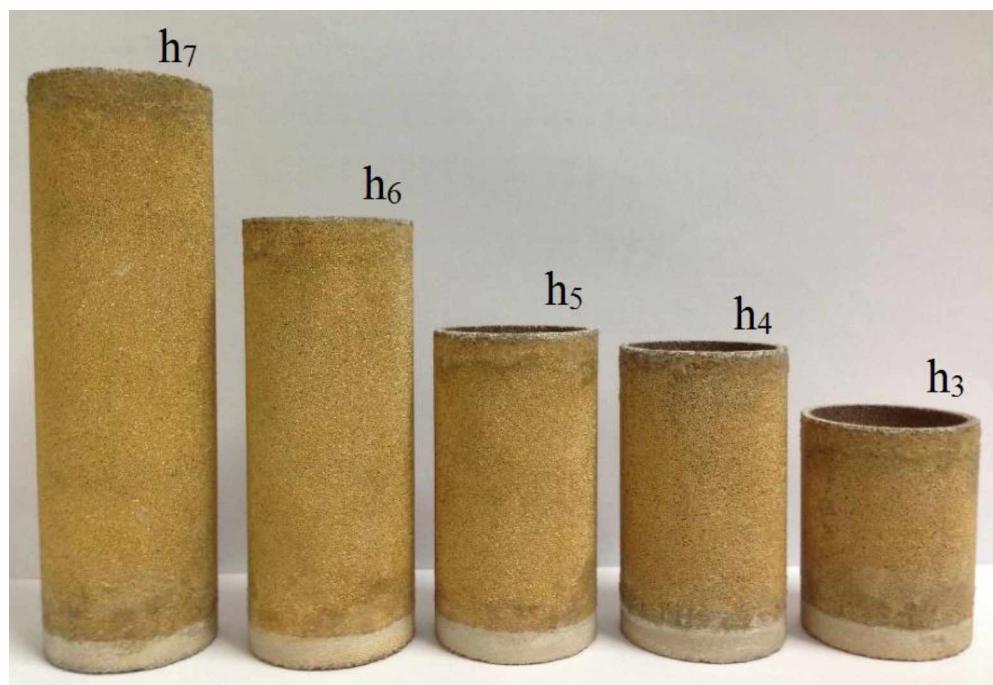


Figura 3.9 – Seções cilíndricas porosas.

Assim, os hidrociclones utilizados experimentalmente nesta tese foram as 25 geometrias apresentadas pelo Planejamento Composto Central nas modalidades **Hidrociclone Convencional (HCON)**, **Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante (HCIF)**, **Hidrociclone Cônico-Filtrante (HCOF)** e **Hidrociclone Cilíndrico-Cônico-Filtrante (HCICOF)**, como mostra o exemplo da Figura 3.10.

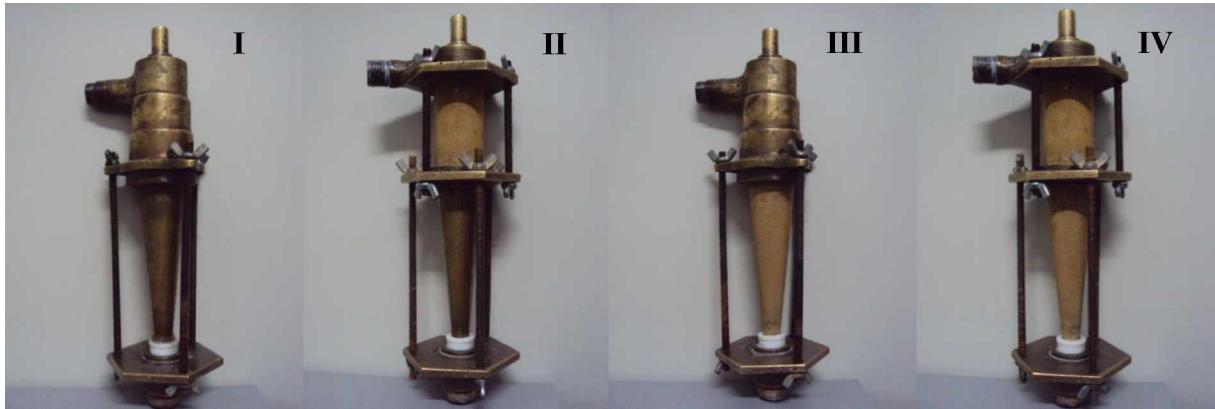


Figura 3.10 – (I) HCON, (II) HCIF, (III) HCOF E (IV) HCICOF.

3.3 - Procedimento Experimental

Inicialmente, definida a configuração de hidrociclone a ser utilizada, o mesmo era montado e acoplado à unidade experimental. Para a coleta dos dados experimentais deste trabalho, a queda de pressão foi mantida fixa em 1,47 bar (147 kPa) para todos os hidrociclos.

O tanque da unidade experimental foi completado com aproximadamente 200 L da suspensão, que foi preparada de modo que a concentração volumétrica de material particulado fosse 1%. A homogeneização da suspensão era feita pela ação do agitador mecânico, que permanecia em funcionamento durante todo o ensaio. Para que a operação da unidade fosse realizada de forma segura, era necessário verificar todas as válvulas presentes nas tubulações e posicioná-las de forma adequada. Após essas etapas, a bomba centrífuga era acionada para o início da operação. Por intermédio de válvulas globo e gaveta, a quantidade de suspensão enviada para a linha do hidrociclone era regulada até que o manômetro digital instalado à montante do hidrociclone indicasse a pressão de operação desejada.

Uma vez que o sistema estivesse em condições estáveis de queda de pressão, iniciavam-se as medidas experimentais. Assim, a temperatura da suspensão no tanque era registrada para posterior determinação da viscosidade e da densidade do fluido. Em seguida, a vazão mássica da alimentação do hidrociclone era lida no *display* do sensor de vazão e devidamente registrada. As vazões mássicas das demais correntes (*underflow*, *overflow* e filtrado) foram determinadas por meio de técnicas gravimétricas, coleta e pesagem de amostras, em balança semi-analítica com precisão de $\pm 0,01$ g.

Em sequência, para a determinação das concentrações mássicas das correntes de alimentação, *overflow* e *underflow*, amostras de cada uma dessas correntes eram coletadas, pesadas e levadas à estufa a 105°C por 24 h, tendo suas massas aferidas novamente para os cálculos das concentrações. Essa análise era realizada em triplicata.

Além das amostras para teste de concentração, eram retiradas ainda alíquotas para a medida da distribuição granulométrica das correntes de alimentação e *underflow*. Essas análises eram realizadas no equipamento Mastersizer Microplus da Malvern, que se baseia na técnica de difração de raios *laser*. Inicialmente, o sistema óptico do equipamento foi calibrado, através da medida do “branco” (água destilada mais dispersante) que foi utilizado como referencial para as demais medidas. O dispersante utilizado era o hexametafosfato de sódio (Calgon) na concentração de 1 g/L. Em seguida, a amostra a ser analisada era transferida para o béquer contendo o “branco” e submetida ao banho ultrassônico por aproximadamente 30 s para romper possíveis aglomerados de partículas existentes na amostra.

Na sequência dos procedimentos descritos anteriormente, as medidas obtidas através do *software* de aquisição de dados do Malvern Mastersizer Microplus eram enviadas a uma planilha eletrônica na forma de diâmetros de partículas e frações cumulativas. Por fim, os parâmetros do modelo RRB eram estimados através de uma regressão não-linear utilizando o *software* Statistica®.

3.4 - Otimização: Aplicação do Algoritmo de Evolução Diferencial

Neste trabalho foram realizados três estudos de caso de otimização para cada uma das quatro modalidades de hidrociclone estudadas (HCICOF, HCIF, HCOF e HCON), totalizando doze casos otimizados:

- Caso 1 - maximização da eficiência total: hidrociclones aplicáveis em processos de separação de partículas finas ou clarificação, pois por apresentarem alta eficiência total, promovem grande recuperação de sólidos;
- Caso 2 - minimização da razão de líquido: hidrociclones empregados em operações de espessamento, pois devido a sua baixa razão de líquido possuem elevada concentração de sólidos na corrente de *underflow*;

- Caso 3 - minimização do número de Euler: hidrociclones com alta capacidade de processamento, portanto, um baixo consumo energético.

A técnica de otimização utilizada foi o uso combinado do algoritmo de Evolução Diferencial apresentado no Capítulo 2 com as equações de regressão obtidas a partir das informações experimentais do PCC para cada modalidade de hidrociclone. Para resolução dos problemas de otimização foi implementado um código no *software* MATLAB®, conforme o desenvolvido por Silva (2012) em seu trabalho, que foi adaptado aos estudos de caso referentes a essa tese.

As principais etapas de um algoritmo de Evolução Diferencial clássico estão apresentadas no fluxograma da Figura 3.11.

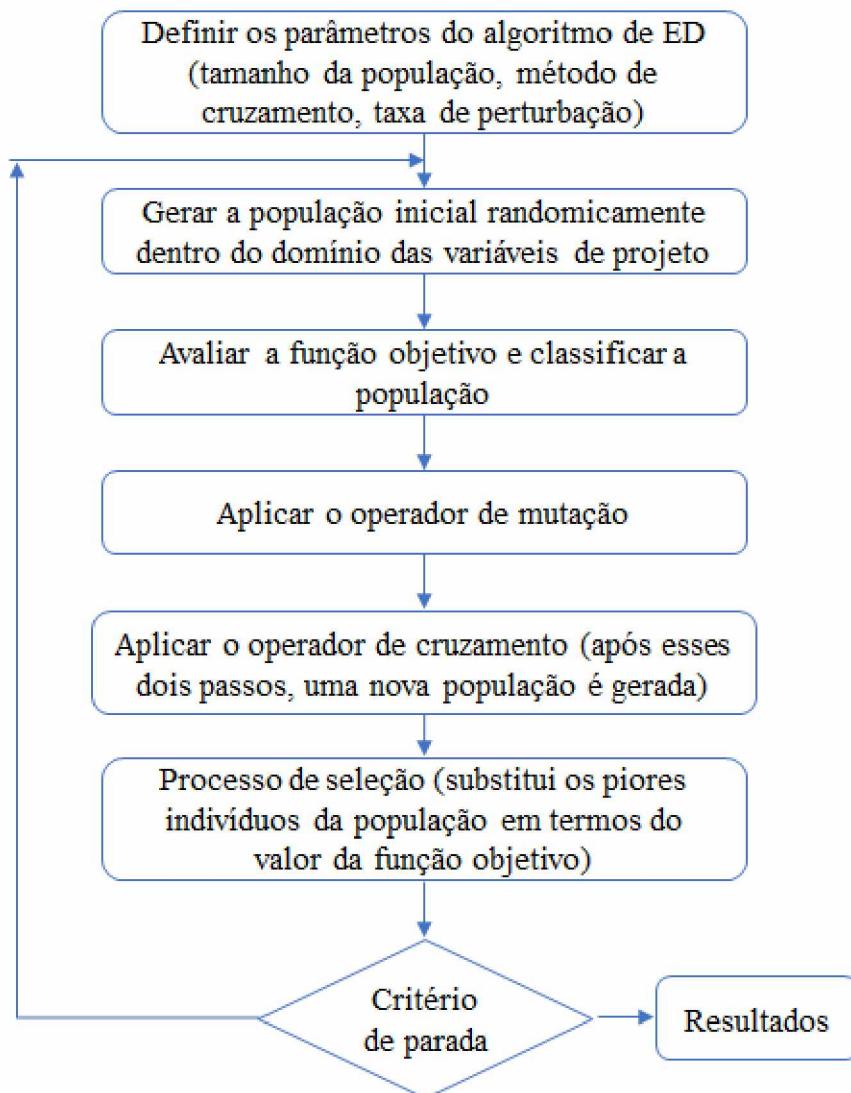


Figura 3.11 – Fluxograma geral de um algoritmo de ED. Fonte: Adaptada de Silva (2012).

Os parâmetros do algoritmo de Evolução Diferencial utilizados na otimização dos hidrociclones são apresentados a seguir (SILVA, 2012):

- Número total de indivíduos da população (N): 50;
- Taxa de perturbação (F): 0,8;
- Probabilidade de cruzamento (Cr): 0,8;
- Estratégia para geração de candidatos potenciais: DE/rand/1/Bin, isto é, rand - o vetor que será perturbado foi escolhido aleatoriamente da população, 1 - um único par de vetores foi considerado durante a perturbação, e, Bin - um cruzamento do tipo Binomial foi utilizado na geração do candidato;
- Critério de parada: um dado número de gerações foi o critério definido para interromper o procedimento. No caso deste trabalho, o número de gerações foi 250.

3.4.1 - Variáveis de Projeto

As variáveis de projeto da otimização foram os quatro fatores do planejamento composto central utilizado neste trabalho:

- Di/Dc : diâmetro de alimentação;
- Do/Dc : diâmetro de *overflow*;
- L/Dc : comprimento total do hidrociclone;
- θ : ângulo do tronco de cone.

Neste trabalho, a técnica de otimização empregada foi do tipo discreta, pois cada variável de busca só podia assumir cinco valores específicos, baseados no PCC de Vieira (2006), que já foram apresentados anteriormente nas Tabelas 3.1 e 3.2. Essa escolha é justificada pela necessidade do hidrociclone otimizado em cada estudo de caso ser construído com peças já fabricadas para a execução das 25 configurações do planejamento experimental.

Para os hidrociclones convencional (HCON) e cônico-filtrante (HCOF) otimizados não houve uma imposição quanto ao tamanho da seção cilíndrica utilizada, uma vez que respeitando o comprimento total e ângulo do tronco do trabalho de Vieira (2006), poderiam

surgir novas combinações entre as seções cônicas e cilíndricas de maneira a manter os mesmos comprimentos totais do PCC.

No entanto, para os hidrociclos com seção cilíndrica filtrante (HCICOF e HCIF), só era possível usar cilindros já confeccionados para o planejamento experimental. Portanto, se a geometria otimizada apresentasse uma configuração com cilindro diferente dos existentes, o ensaio experimental seria realizado com o hidrociclo que tivesse o comprimento total mais próximo do fornecido pela otimização.

3.4.2 - Restrições

A fim de garantir a existência da parte cilíndrica, os problemas de otimização apresentaram uma restrição física comum a todos os casos. De acordo com a Figura 2.1, sabe-se que $L = H + h$; portanto, a restrição consiste na Inequação 3.7.

$$L > H \quad (3.7)$$

Com base em cálculos trigonométricos simples no tronco de cone do hidrociclo, chega-se à Equação 3.8, que relaciona o comprimento do cone, o ângulo e os diâmetros da parte cilíndrica e do *underflow*.

$$H = \frac{D_c - D_u}{2 \operatorname{tg}(\theta/2)} \quad (3.8)$$

Então, substituindo a Equação 3.8 na Inequação 3.7 é possível relacionar o ângulo do tronco de cone com o comprimento total do hidrociclo como mostra a Inequação 3.9.

$$L > \frac{D_c - D_u}{2 \operatorname{tg}(\theta/2)} \quad (3.9)$$

Dividindo os dois lados da Inequação 3.9 pelo diâmetro da parte cilíndrica chega-se à Inequação 3.10.

$$\frac{L}{D_c} > \frac{1 - D_u/D_c}{2 \operatorname{tg}(\theta/2)} \quad (3.10)$$

Como D_c e D_u foram mantidos constantes e iguais a 30 mm e 5 mm respectivamente, a restrição física imposta ao algoritmo de otimização, representada pela

Inequação 3.11, torna-se uma relação entre as variáveis projeto L/Dc e θ que tem como forma codificada X_3 e X_4 , respectivamente.

$$\frac{L}{Dc} > \frac{5}{12 \operatorname{tg}(\theta/2)} \quad (3.11)$$

A fim de uniformizar os estudos de caso realizados neste trabalho, as restrições adotadas para as quatro modalidades de hidrociclone utilizadas foram as mesmas.

Os hidrociclos que geralmente apresentam uma alta eficiência (caso 1) têm um elevado consumo energético, sendo necessária a adoção de uma restrição no número de Euler. Similarmente, no estudo de caso 3, a minimização do número Euler implica em uma redução na eficiência total. Portanto, uma restrição foi imposta para essa diminuição através do diâmetro de corte, que é uma característica do hidrociclone intimamente ligada à eficiência total. A minimização da razão de líquido (caso 2) implica em uma redução na eficiência total, já que a razão de líquido e a eficiência total são respostas diretamente proporcionais, requerendo também uma restrição no diâmetro de corte.

Assim, as restrições adicionais impostas para os três estudos de caso de otimização foram:

- Caso 1: máxima eficiência total com $Eu < 5000$;
- Caso 2: mínima razão de líquido com $d_{50} < 14 \mu\text{m}$;
- Caso 3: mínimo número de Euler com $d_{50} < 14 \mu\text{m}$.

Esses valores foram escolhidos baseados na faixa das respostas obtidas como resultado da execução dos planejamentos experimentais para as quatro modalidades de hidrociclone, onde os maiores números de Euler e diâmetros de corte alcançados foram na faixa de 5000 e 14 μm , respectivamente. Os resultados para todos os ensaios realizados podem ser visualizados no Apêndice B.

3.4.3 - Funções Objetivo

As funções objetivo para cada estudo de caso foram geradas a partir das regressões múltiplas oriundas da execução das Matrizes de Planejamento para os hidrociclos do tipo

HCICOF, HCIF, HCOF e HCON, utilizando o *software* STATISTICA® e serão apresentadas no Capítulo 4.

Para cada modalidade de hidrociclone, foram realizados três estudos de caso e os resultados da otimização geraram 3 novas configurações geométricas de hidrociclos, cujas nomenclaturas encontram-se listadas abaixo:

- HCICOF-OT1 - Hidrociclone Cilíndrico-Cônico-Filtrante Otimizado do Caso 1;
- HCICOF-OT2 - Hidrociclone Cilíndrico-Cônico-Filtrante Otimizado do Caso 2;
- HCICOF-OT3 - Hidrociclone Cilíndrico-Cônico-Filtrante Otimizado do Caso 3;
- HCIF-OT1 - Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante Otimizado do Caso 1;
- HCIF-OT2 - Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante Otimizado do Caso 2;
- HCIF-OT3 - Hidrociclone Cilíndrico-Filtrante Otimizado do Caso 3;
- HCOF-OT1 - Hidrociclone Cônico-Filtrante Otimizado do Caso 1;
- HCOF-OT2 - Hidrociclone Cônico-Filtrante Otimizado do Caso 2;
- HCOF-OT3 - Hidrociclone Cônico-Filtrante Otimizado do Caso 3;
- HCON-OT1 - Hidrociclone Convencional Otimizado do Caso 1;
- HCON-OT2 - Hidrociclone Convencional Otimizado do Caso 2;
- HCON-OT3 - Hidrociclone Convencional Otimizado do Caso 3.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrante (HCICOF), cilíndrico-filtrante (HCIF) e cônico-filtrante (HCOF) segundo o planejamento experimental. Os resultados experimentais para esses hidrociclos filtrantes serão sempre apresentados e comparados com o hidrociclo convencional (HCON), que foi considerado como referência para as discussões realizadas neste capítulo. Em seguida, os hidrociclos otimizados encontrados através da aplicação do algoritmo de Evolução Diferencial e os resultados experimentais para validação dessa metodologia são mostrados. Maiores detalhes a respeito dos resultados experimentais podem ser encontrados no Apêndice B. Vale relembrar que os fatores X_1 , X_2 , X_3 e X_4 representam as codificações das variáveis Di/Dc , Do/Dc , L/Dc e θ , respectivamente.

4.1 - Estudo do Desempenho do Hidrociclo Cilíndrico-Cônico-Filtrante

Primeiramente, serão apresentados os valores para a vazão de filtrado dos hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes, oriundos da Matriz de Planejamento. A Figura 4.1 mostra que as vazões de filtrado variaram de 0,01 a 0,19 cm³/s, porém como fora verificado em outros trabalhos do grupo de pesquisa (VIEIRA, 2006; FAÇANHA, 2012; SALVADOR, 2013), mesmo que essa vazão seja muito pequena comparada à vazão volumétrica de alimentação, a retirada de filtrado foi capaz de modificar o comportamento do hidrociclo HCICOF se comparado ao convencional.

A Figura 4.1 mostra que os hidrociclos HCICOF nas configurações 12, 16, 22 e 24 destacaram-se por apresentarem as maiores vazões de filtrado dentre os hidrociclos da Matriz de Planejamento. Esses equipamentos têm como característica comum seções cilíndricas de 103 ou 130 mm, que são as maiores disponíveis para serem utilizadas. Já para

os hidrociclones HCICOF nas configurações 2, 6 e 17 foram obtidas as menores Q_F , uma vez que esses equipamentos apresentam as menores seções cilíndricas associadas aos menores diâmetros de alimentação do planejamento ($X_1 = -\alpha$ ou $X_1 = -1$). Cabe ainda ressaltar que, dentre todos os casos de hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes estudados, a vazão de filtrado chegou a representar no máximo 0,05% da vazão de alimentação do equipamento.

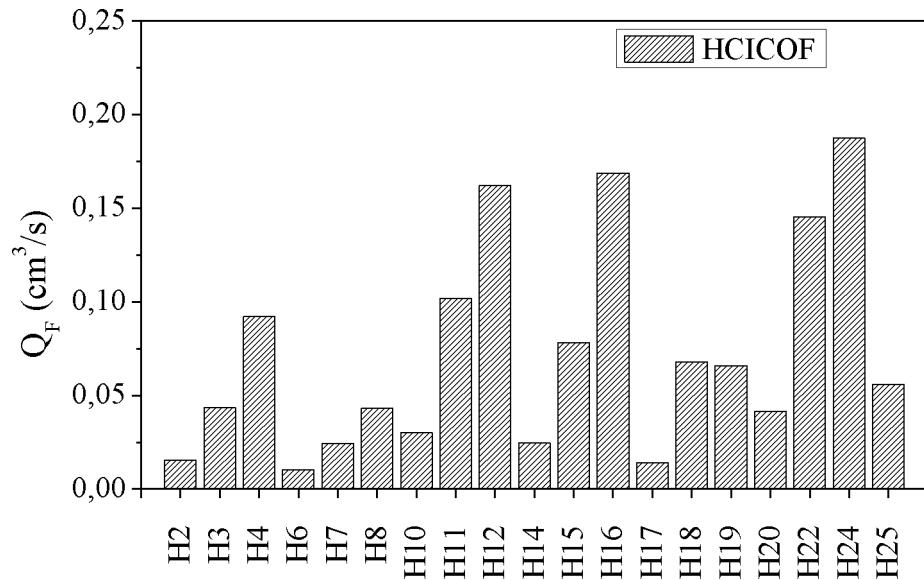


Figura 4.1 – Vazão de filtrado para os hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes.

4.1.1 - Vazão de Alimentação e Número de Euler

A vazão volumétrica de alimentação de um hidrociclone é uma variável importante para a hidrociclonagem, pois reflete diretamente sobre a capacidade de processamento do separador. Em uma queda de pressão específica, é desejável que a vazão de alimentação seja a maior possível, sendo processada uma maior quantidade de suspensão com menor consumo energético.

Na Figura 4.2 são apresentados os valores de vazão de alimentação para os hidrociclones do tipo HCICOF em relação aos observados experimentalmente para os hidrociclones convencionais (HCON).

Observou-se, de maneira geral, que os dois tipos de hidrociclone apresentaram a mesma tendência para a vazão de alimentação em relação às variações geométricas. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se a obtenção de uma faixa relativamente ampla

para a vazão de alimentação, que variou de 170 a 486 cm³/s para os hidrociclos do tipo HCICOF e de 153 a 412 cm³/s para os hidrociclos do tipo HCON.

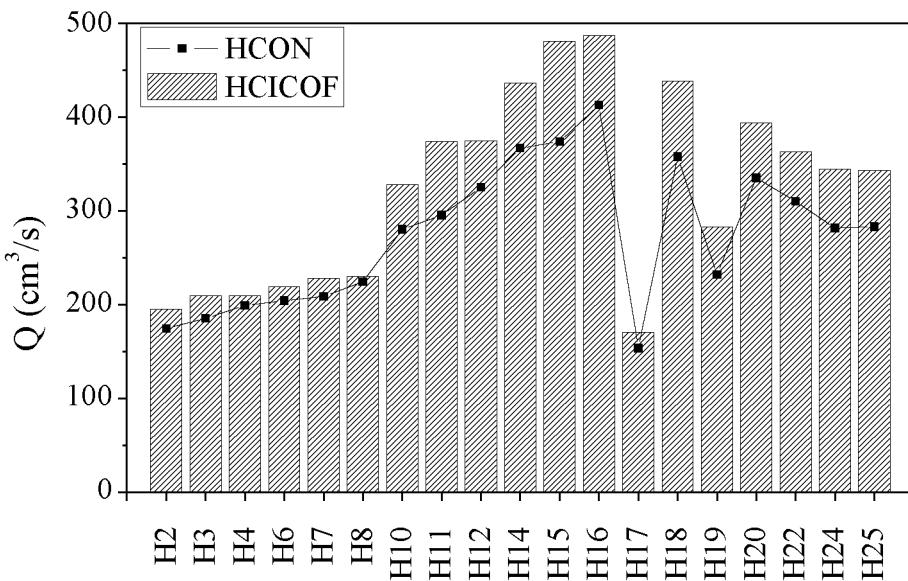


Figura 4.2 – Vazão volumétrica de alimentação para os hidrociclos HCICOF e HCON.

Analizando a Figura 4.2, verificou-se que a vazão de alimentação para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes foi majorada em relação aos hidrociclos convencionais. Provavelmente, as paredes porosas dos hidrociclos HCICOF representaram uma saída alternativa para o fluido, implicando diretamente na diminuição das perdas de carga do sistema (VIEIRA *et al.*, 2007). Nas condições operacionais empregadas, foram observados incrementos médios na vazão de 16%. Porém, em alguns hidrociclos filtrantes, tais como os de configuração 11 e 15, houve incrementos de até 26 e 28%, respectivamente.

Para as duas modalidades de hidrociclo foi constatado que o equipamento na configuração 16 apresentou a maior vazão volumétrica de alimentação. Por outro lado, a menor vazão de alimentação foi observada na configuração 17.

Os extremos de vazão volumétrica observados nas configurações 16 e 17 podem ser explicados pelas particularidades das dimensões geométricas destes separadores. Sabe-se que o aumento do diâmetro de alimentação e do diâmetro de *overflow* faz com que o fluido dentro do hidrociclo geralmente ceda energia sob a forma de pressão mais gradativamente (VIEIRA *et al.*, 2011). Neste aspecto, numa mesma queda de pressão, hidrociclos com maiores *Di* e *Do* conseguiram receber uma maior quantidade de fluido por unidade de tempo.

O efeito positivo provocado pelo aumento do Di na vazão de alimentação pôde ser nitidamente observado nos pares das seguintes configurações: 2-10, 3-11, 4-12, 6-14, 7-15, 8-16 e 17-18. Do mesmo modo, o efeito também positivo do aumento do Do sobre a vazão de alimentação pôde ser explicitamente visualizado nos pares: 2-6, 3-7, 4-8, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20.

A vazão volumétrica de alimentação também se mostrou diretamente proporcional ao comprimento total dos hidrociclos, pois esta resposta foi majorada à medida que maiores L foram utilizados, como pode ser observado nos pares de hidrociclo: 2-4, 6-8, 10-12 e 14-16. Este fato ocorreu devido a um incremento considerável no tamanho da seção cilíndrica, parte intrinsecamente ligada à capacidade de processamento dos hidrociclos.

O ângulo do tronco não exerceu um efeito significativo na vazão de alimentação do hidrociclos do tipo HCICOF, como pode ser verificado através dos pares das configurações 3-4, 7-8, 11-12 e 15-16. Entretanto, para os hidrociclos do tipo HCON, um incremento no ângulo do tronco de cone majorou a vazão de alimentação (3-4, 7-8, 11-12 e 15-16).

De acordo com o explanado anteriormente a configuração 16 pôde reunir as características geométricas mais favoráveis para o aumento de vazão de alimentação ($X_1 = +1$, $X_2 = +1$, $X_3 = +1$ e $X_4 = +1$). Em sentido oposto, a configuração 17 operou com as condições geométricas mais desfavoráveis ($X_1 = -\alpha$, $X_2 = 0$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$), principalmente no que tange ao valor do diâmetro de alimentação, que é a variável que mais interfere na resposta em questão.

É sabido que o número de Euler (Eu) está intrinsecamente relacionado com a razão entre a queda de pressão e a vazão de alimentação do hidrociclo. Logo, é de se esperar que as configurações geométricas detentoras das maiores capacidades volumétricas apresentassem os menores números de Euler, haja vista que a queda de pressão utilizada nos experimentos foi sempre constante (1,47 bar). Nestes termos, são mostrados na Figura 4.3 os números de Euler para os hidrociclos HCICOF e HCON referentes à execução da Matriz de Planejamento. Como esperado, em termos de valores, o número de Euler apresentou tendência oposta à vazão volumétrica.

Os resultados experimentais obtidos para o número de Euler estiveram entre 622 e 5082 para os hidrociclos do tipo HCICOF e entre 867 e 6270 para os hidrociclos do tipo HCON, o que mostra uma ampla faixa para essa resposta. De acordo com a Figura 4.3, os

equipamentos nas configurações 16 e 17 apresentaram o menor e o maior número de Euler, respectivamente.

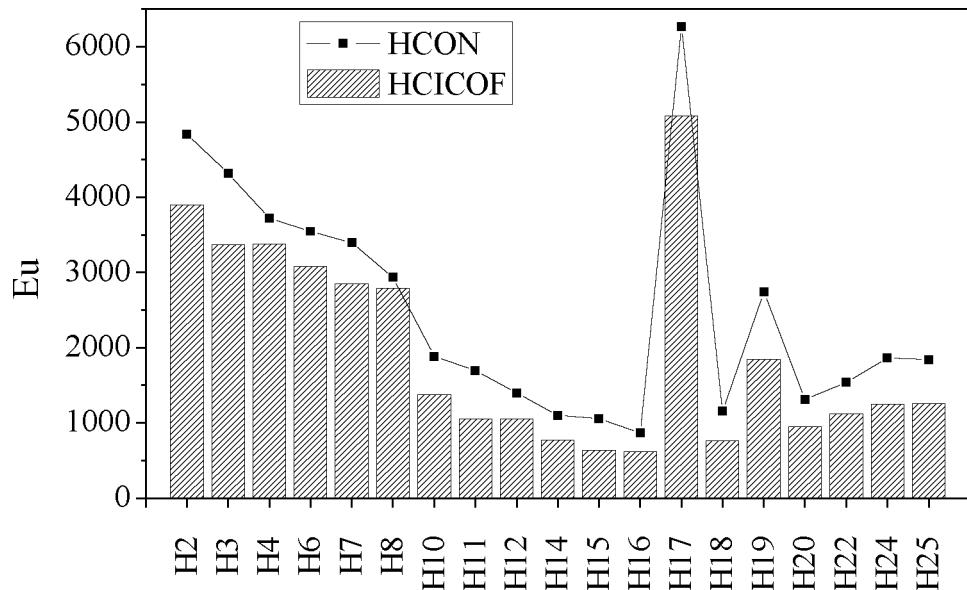


Figura 4.3 – Número de Euler para os hidrociclos HCICOF e HCON.

Assim, a desejada diminuição no número de Euler provocada pelos incrementos nos diâmetros de alimentação e *overflow*, comprimento total do hidrociclo e ângulo do tronco de cone (no caso do hidrociclo convencional), podem ser observados através dos mesmos pares já mencionados para a vazão de alimentação.

Ainda observando a Figura 4.3, verificou-se que o número de Euler para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes diminuiu em relação ao hidrociclos convencionais. Foram observados decréscimos médios de 25% no consumo energético. Em algumas configurações específicas, tais como a 11 e 15, os decréscimos foram de até 37 e 39%, respectivamente. Logo, a filtração foi um fenômeno benéfico para a demanda energética dos hidrociclos HCICOF, justamente por conduzi-los a menores números de Euler.

De posse dos resultados experimentais, foram realizadas regressões múltiplas para o número de Euler dos hidrociclos do tipo HCON e HCICOF, expressas pelas Equações 4.1 e 4.2, respectivamente.

- HCON:

$$Eu = 1907,26 + X'_i b_{1a} + X'_i B_{1a} X_i \quad R^2 = 0,991 \quad (4.1)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{1a} = \begin{bmatrix} -1359,25 \\ -444,36 \\ -346,42 \\ -152,99 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{1a} = \begin{bmatrix} 659,87 & 92,39 & 129,61 & 73,67 \\ 92,39 & 0 & 90,32 & 0 \\ 129,61 & 90,32 & 153,53 & 0 \\ 73,67 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- HCICOF:

$$Eu = 1247,94 + X_i' b_{1b} + X_i' B_{1b} X_i \quad R^2 = 0,993 \quad (4.2)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{1b} = \begin{bmatrix} -1199,09 \\ -276,79 \\ -168,24 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{1b} = \begin{bmatrix} 637,09 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 86,37 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 118,23 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

O comportamento gráfico da regressão estimada para o hidrociclone HCICOF pode ser visto na Figura 4.4, considerando os pares X_1-X_2 e X_1-X_3 , com os demais fatores mantidos no nível central.

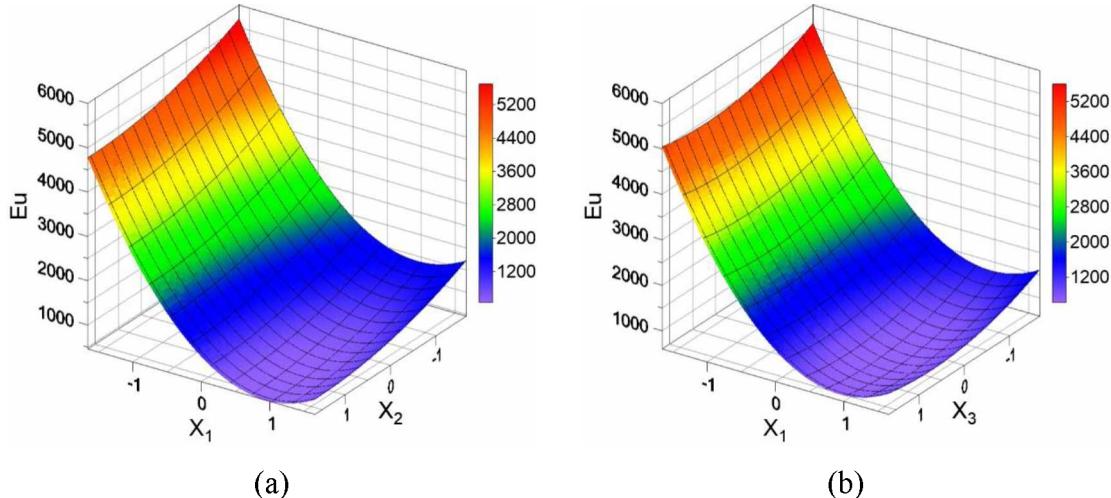


Figura 4.4 – Superfícies de resposta para o número de Euler para os hidrociclos HCICOF segundo os pares X_1-X_2 (a) e X_1-X_3 (b).

Como mostram as equações de regressão e as superfícies de resposta, o diâmetro de alimentação (X_1) do hidrociclone foi o fator que mais influenciou no comportamento do número de Euler, seguido do diâmetro de *overflow* (X_2) e por último, do comprimento total

(X_3). O ângulo do tronco de cone (X_4) exerceu influência no número de Euler apenas para o hidrociclone convencional. Os sinais negativos que acompanham os coeficientes lineares das equações de regressão somente vieram a ratificar aquela constatação já mencionada anteriormente no sentido de que incrementos nos fatores geométricos provocam uma diminuição no número de Euler.

Analizando somente pela óptica do consumo energético, pode-se afirmar que o hidrociclone na configuração 16, tanto o HCICOF quanto o HCON, seria o mais viável economicamente, haja vista que esta geometria proporcionaria o menor número de Euler dentre os separadores do planejamento experimental. Esta configuração 16 tem todas as variáveis no nível codificado +1.

4.1.2 - Razão de Líquido

Na Figura 4.5 são apresentadas as razões de líquido (RL) obtidas experimentalmente para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes em relação aos hidrociclos convencionais, segundo as configurações geométricas especificadas pelo PCC. Pôde-se observar uma tendência semelhante para ambas modalidades de hidrociclone. Verificou-se que foi alcançado um intervalo relativamente amplo para a razão de líquido, variando de 9 a 45% para os hidrociclos HCICOF e de 9 a 42% para os hidrociclos HCON.

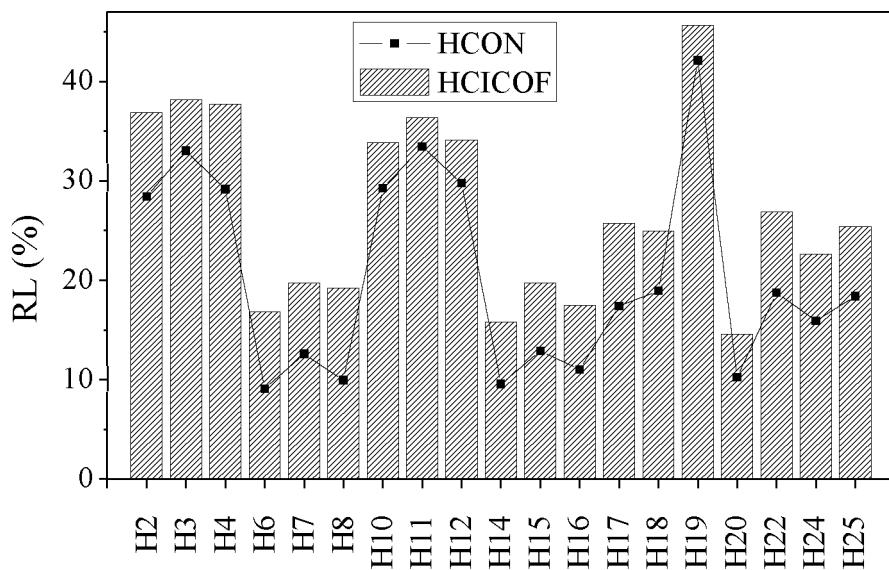


Figura 4.5 – Razão de líquido para os hidrociclos HCICOF e HCON.

A razão de líquido para os hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes foi sempre majorada em relação ao hidrociclones convencionais, como mostra a Figura 4.5. Porém, esse aumento variou de intensidade dependendo da configuração geométrica. O hidrociclone HCICOF de configuração 8 ($X_1 = -1$, $X_2 = +1$, $X_3 = +1$ e $X_4 = +1$), por exemplo, teve uma razão de líquido 93% maior que o convencional de mesma geometria, enquanto que os hidrociclones HCICOF de configurações 11 e 19 apresentaram um aumento de apenas 8% em relação aos respectivos separadores convencionais. Estes hidrociclones 11 e 19 têm em comum baixos níveis de Do . Segundo Vieira (2006), a filtração pode modificar a relação entre os vórtices forçado e livre, fazendo com que parcelas de fluido migrem do vórtice interno (livre) para o externo (forçado) de modo que uma maior quantidade de suspensão seja descarregada na corrente de *underflow*.

Ainda analisando a Figura 4.5, percebeu-se que o diâmetro de alimentação apresentou pouca influência sobre a razão de líquido. Segundo simulações fluidodinâmicas realizadas por Vieira *et al.* (2011), a variação no Di modificava as velocidades axiais do fluido, mas não a relação entre as quantidades de líquido descarregadas no *underflow* e *overflow*. Portanto, nesta tese, constatou-se novamente a pequena variabilidade da razão de líquido com mudanças na dimensão do diâmetro de alimentação, tal como ocorreu nos pares de hidrociclone 2-10, 3-11, 4-12, 6-14, 7-15, 8-16 e 17-18.

Verificou-se que a razão de líquido respondeu significativamente às mudanças nos diâmetros de *overflow* dos hidrociclones. Houve entre eles uma relação inversamente proporcional (efeito negativo). Quando menores diâmetros de *overflow* foram utilizados, maiores foram as restrições impostas ao escoamento do sistema, fazendo com que grande parte do líquido migrasse para a corrente de *underflow*. Esse comportamento pôde ser perfeitamente constatado nos pares: 2-6, 3-7, 4-8, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20.

Observando os pares de hidrociclone 2-4, 6-8, 10-12 e 14-16, verificou-se que uma mudança no comprimento total dos hidrociclones modificou a razão de líquido de acordo com o diâmetro de *overflow* utilizado, devido à existência de uma forte interação entre esses dois fatores. Quando se utilizaram menores valores de Do , um aumento no L praticamente não alterou a razão de líquido, já para maiores dimensões de Do um incremento no L provocou acréscimos na razão de líquido. Este comportamento indica um significativo efeito de interação entre essas variáveis (Equações 4.3 e 4.4).

A razão de líquido variou inversamente às mudanças dos ângulos do tronco de cone dos hidrociclones, cujo efeito é facilmente identificado nos pares de hidrociclone 3-4, 7-8, 11-12 e 15-16. A mudança na variável θ possivelmente interferiu na quantidade de líquido direcionada para as correntes de clarificado e de concentrado (VIEIRA *et al.*, 2011). À medida que o ângulo do tronco de cone foi majorado, menor foi a proporção de líquido direcionada ao orifício de *underflow*. O efeito dessa variável foi mais acentuado para os hidrociclones HCON do que para os HCICOF, como pode ser observado na Figura 4.5.

Foi constatado que o equipamento que apresentou a maior razão de líquido foi o de configuração 19 tanto para o hidrociclone HCICOF quanto para o HCON. Em se tratando da menor razão de líquido, ela foi observada na configuração 20 para o HCICOF e na configuração 6 para o HCON.

Os hidrociclones 6, 19 e 20 do planejamento experimental apresentam as seguintes configurações (Tabela 3.1):

- H6: $X_1 = -1$, $X_2 = +1$, $X_3 = -1$ e $X_4 = +1$
- H19: $X_1 = 0$, $X_2 = -\alpha$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$
- H20: $X_1 = 0$, $X_2 = +\alpha$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$

Os hidrociclones de configuração 19 possuíram o diâmetro de *overflow* no nível mais baixo ($X_2 = -\alpha$) e os demais fatores no nível intermediário, fazendo com que a razão de líquido fosse elevada, uma vez que essa dimensão foi a que mais influenciou na referida resposta. Da mesma forma, o hidrociclone de configuração 20 que possuiu o diâmetro de *overflow* no nível mais alto ($X_2 = +\alpha$) e os demais fatores no nível intermediário, apresentou a menor razão de líquido para os hidrociclones HCICOF. Já o hidrociclone de configuração 6 também reuniu características que fornecem uma baixa razão de líquido: diâmetro de alimentação e comprimento total do hidrociclone no nível baixo e diâmetro de *overflow* e ângulo do tronco de cone no nível alto.

De posse dos dados experimentais, foram realizadas regressões múltiplas, expressas pelas Equações 4.3 e 4.4, para a razão de líquido dos hidrociclones do tipo HCON e HCICOF.

- HCON:

$$RL = 18,21 + X'_i b_{2a} + X'_i B_{2a} X_i \quad R^2 = 0,998 \quad (4.3)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{2a} = \begin{bmatrix} 0,295 \\ -10,029 \\ 1,169 \\ -0,898 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{2a} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,793 & 0,321 & 0,570 \\ 0 & 0,321 & -0,593 & -0,723 \\ 0 & 0,570 & -0,723 & 0 \end{bmatrix}$$

- HCICOF:

$$RL = 25,36 + X_i' b_{2b} + X_i' B_{2b} X_i \quad R^2 = 0,999 \quad (4.4)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{2b} = \begin{bmatrix} -0,522 \\ -9,208 \\ 0 \\ -1,365 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{2b} = \begin{bmatrix} 0 & 0,476 & -0,269 & -0,557 \\ 0,476 & 1,761 & 0,399 & 0 \\ -0,269 & 0,399 & 0,645 & 0,637 \\ -0,557 & 0 & 0,637 & 0 \end{bmatrix}$$

As superfícies de resposta estimadas para a razão de líquido para o hidrociclone HCICOF podem ser vistas na Figura 4.6, considerando os pares X_1 - X_2 , X_2 - X_3 e X_2 - X_4 , com os demais fatores mantidos no nível central.

Observou-se, através das equações de regressão e das superfícies de resposta, e em concordância com a análise anterior, que a dimensão diâmetro de *overflow* (X_2) foi a que mais influenciou no comportamento da RL , seguido pelo ângulo do tronco de cone (X_4). Os fatores X_1 (diâmetro de alimentação) e X_3 (comprimento total do hidrociclone) não tiveram uma grande influência na resposta estudada como pode ser visualizado na Figura 4.6.

Analizando a razão de líquido independente das demais respostas, pôde-se dizer que a configuração a ser escolhida dependerá da finalidade principal da aplicação dos hidrociclos. Assim, se o objetivo for utilizar o hidrociclone em processos que requeiram um poder classificatório satisfatório, o equipamento de configuração 19 seria uma boa opção para ambas modalidades (HCICOF e HCON), pois terá como consequência elevadas eficiências. Porém, se a principal finalidade for utilizá-lo em processos de concentração ou espessamento da suspensão alimentada, a configuração 20 seria a melhor para o hidrociclone HCICOF e a configuração 6 seria a mais indicada para o hidrociclone convencional.

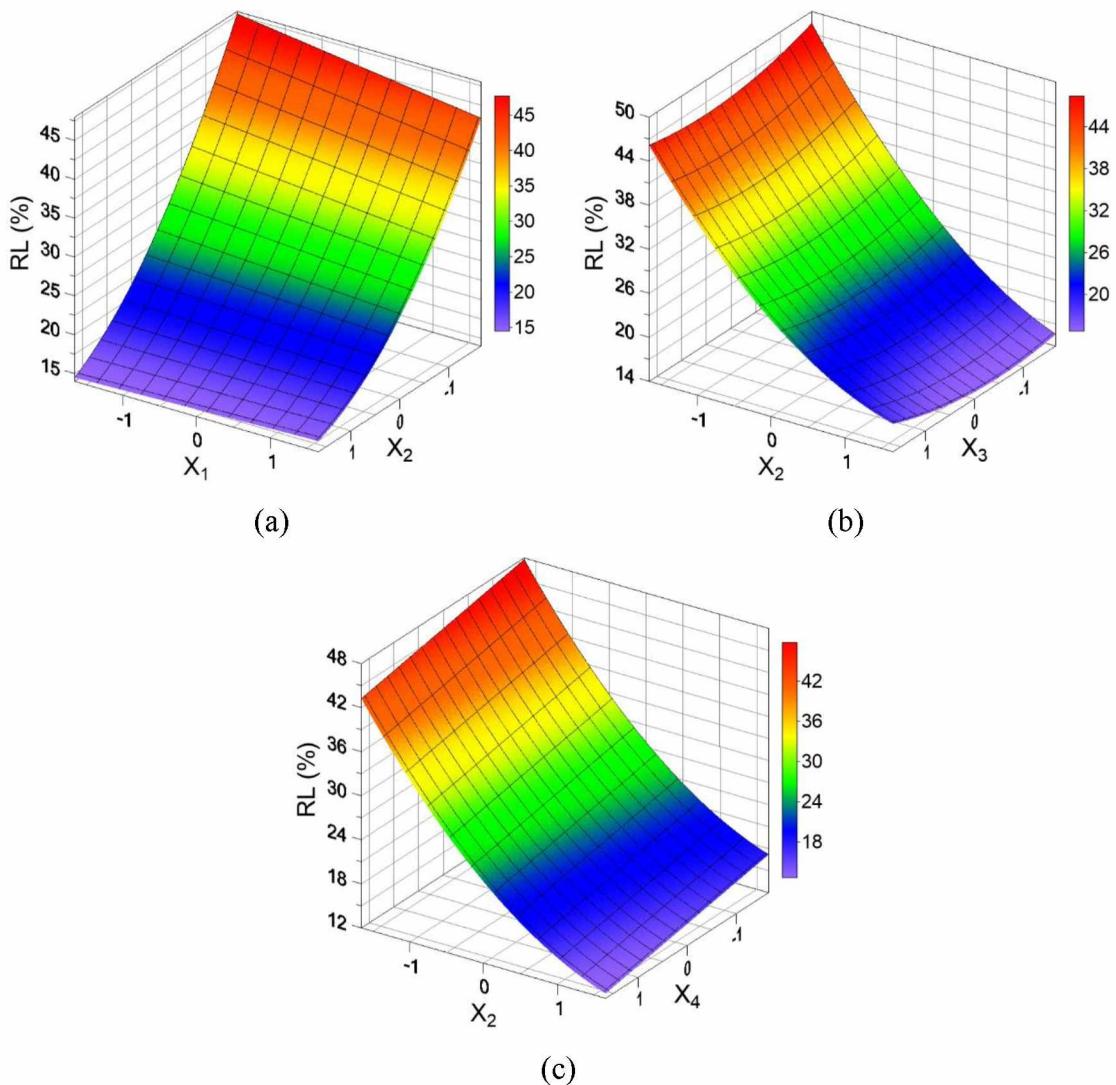


Figura 4.6 – Superfícies de resposta para a razão de líquido para os hidrociclos HCICOF segundo os pares X_1 - X_2 (a) e X_2 - X_3 (b) e X_2 - X_4 (c).

4.1.3 - Eficiência Total e Diâmetro de Corte

As eficiências totais (η) para os hidrociclos HCICOF em relação ao HCON estão apresentadas na Figura 4.7. Os valores experimentais obtidos para a eficiência estiveram na faixa de 65 a 84% para os hidrociclos HCICOF e de 66 a 88% para os hidrociclos HCON.

A eficiência total dos hidrociclos HCICOF estudados através do PCC foi majorada ou minorada em relação à do hidrociclo convencional dependendo da combinação dos fatores geométricos. Por exemplo, nas configurações 7 e 15, a eficiência total dos hidrociclos HCON foi cerca de 10% maior do que para os hidrociclos HCICOF. Já para a configuração 4, o hidrociclo HCICOF apresentou uma eficiência total 6% maior em relação

ao hidrociclone HCON. Em se tratando de valores médios, houve decréscimos de 2% das eficiências totais dos hidrociclone HCICOF em relação aos respectivos convencionais. Ou seja, estas diferenças foram muito pequenas, muito próximas da incerteza da medida.

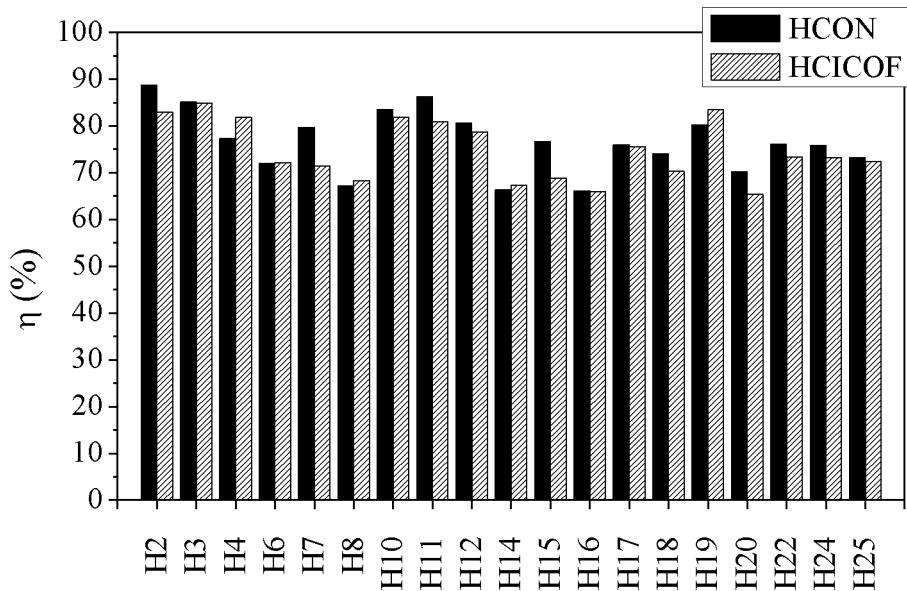


Figura 4.7 – Eficiência total para os hidrociclos HCICOF e HCON.

Apesar da filtração ter aumentado a razão de líquido (condição favorável à separação), fez também com que o movimento espiralado diminuisse no interior do hidrociclone (condição desfavorável à separação), conforme constatação via CFD de Vieira (2006). Efetivamente, houve a neutralização de um efeito pelo outro, por isso, a eficiência total foi mantida praticamente no mesmo patamar nas duas modalidades.

Geometricamente falando, independentemente da modalidade de hidrociclone, se totalmente filtrante ou convencional, verificou-se que, de maneira geral, um incremento no diâmetro de alimentação provocou uma diminuição na eficiência total dos hidrociclos, como pode ser visualizado através dos pares de hidrociclone 2-10, 3-11, 4-12, 6-14, 7-15, 8-16 e 17-18. Os incrementos de Di diminuem a velocidade de alimentação e assim reduzem a intensidade do campo centrífugo, como pode ser observado nas configurações 10, 11, 12, 14, 15, 16 e 18 em comparação aos seus respectivos pares.

A eficiência total também respondeu inversamente às variações nos diâmetros de *overflow* dos hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes e convencionais. A presença de tubos de *overflow* com maiores diâmetros não impôs restrições tão severas e favoreceu o escoamento do líquido por essa fronteira, juntamente com uma parcela maior de partículas.

Essas constatações foram observadas para os seguintes pares de hidrociclone: 3-7, 4-8, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20.

Ainda analisando a Figura 4.7, foi constatado que um aumento no ângulo do tronco de cone provocou uma queda na eficiência total dos hidrociclos HCICOF e HCON. A eficiência total foi favorecida por um menor ângulo, pois, assim, a razão de líquido foi maior e as velocidades radiais foram menores, favorecendo a descargas das partículas pela corrente de *underflow* (VIEIRA, 2006). O efeito provocado pelo ângulo do tronco de cone na eficiência total pode ser evidenciado nos pares de hidrociclo: 3-4, 7-8, 11-12 e 15-16.

O poder de classificação dos hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes e convencionais também foi acompanhado por meio da estimativa dos diâmetros de corte (d_{50}), cujos valores estão apresentados na Figura 4.8. Os resultados experimentais mostraram faixas amplas de diâmetro de corte, variando de 3 a 14 μm para os hidrociclos HCICOF e de 1 a 11 μm para os hidrociclos HCON.

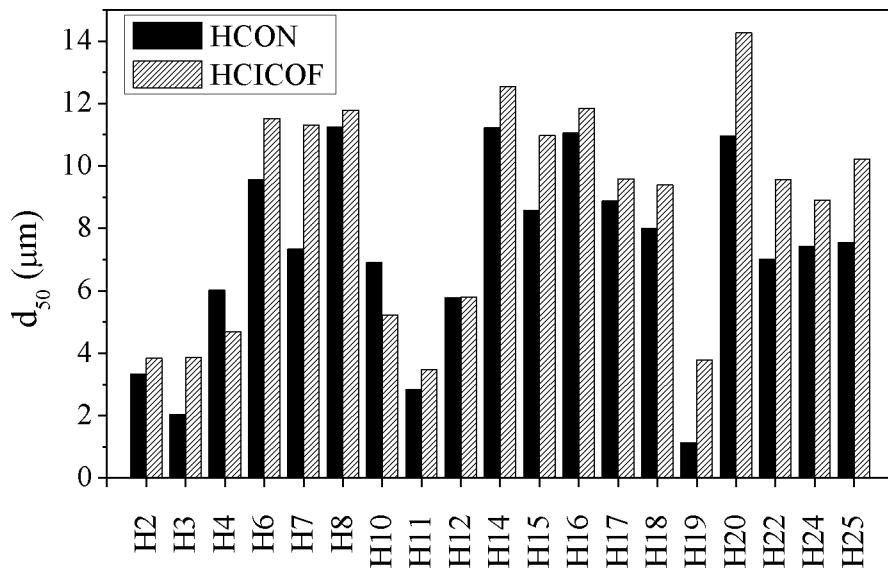


Figura 4.8 – Diâmetro de corte para os hidrociclos HCICOF e HCON.

Analisando a Figura 4.8 observou-se que menores diâmetros de corte estiverem presentes nas configurações que tiveram eficiências totais elevadas, o que está de acordo com o relatado na literatura. Dessa forma, na maioria das configurações geométricas, o diâmetro de corte dos hidrociclos HCICOF foi maior do que os apresentados para o hidrociclo HCON, com incrementos médio de 20%.

Observou-se que as variáveis que mais influenciaram no diâmetro de corte dos hidrociclones HCICOF e HCON foram o diâmetro de *overflow* (pares de hidrociclone: 2-6, 3-7,4-8, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20), seguido do ângulo do tronco de cone (pares de hidrociclone: 3-4, 7-8, 11-12 e 15-16), o que reflete o comportamento discutido para a eficiência total.

Assim, hidrociclones que apresentem em sua configuração baixos valores para o diâmetro de *overflow* e para ângulo do tronco, têm maior possibilidade de alcançar uma elevada eficiência total e, por consequência, um menor diâmetro de corte.

Após obtidos os resultados experimentais, foram realizadas regressões múltiplas para a eficiência total dos hidrociclones do tipo HCON (Equação 4.5) e HCICOF (Equação 4.6).

- HCON:

$$\eta = 74,24 + X_i' b_{3a} + X_i' B_{3a} X_i \quad R^2 = 0,860 \quad (4.5)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{3a} = \begin{bmatrix} 0 \\ -5,049 \\ 0 \\ -2,351 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{3a} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1,550 \\ 0 & 0 & 1,654 & -1,824 \\ 0 & -1,550 & -1,824 & 1,672 \end{bmatrix}$$

- HCICOF:

$$\eta = 72,45 + X_i' b_{3b} + X_i' B_{3b} X_i \quad R^2 = 0,984 \quad (4.6)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{3b} = \begin{bmatrix} -1,528 \\ -6,110 \\ -1,298 \\ -1,518 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{3b} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,848 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,402 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,464 \end{bmatrix}$$

Em sequência, o resultado obtido para as regressões múltiplas realizadas para o diâmetro de corte dos hidrociclones do tipo HCON e HCICOF, está expresso pelas Equações 4.7 e 4.8, respectivamente.

- HCON:

$$d_{50} = 7,06 + X_i' b_{4a} + X_i' B_{4a} X_i \quad R^2 = 0,929 \quad (4.7)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{4a} = \begin{bmatrix} 0,321 \\ 2,937 \\ 0 \\ 0,940 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{4a} = \begin{bmatrix} 0,448 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,424 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,568 \\ 0 & 0 & 0,568 & 0 \end{bmatrix}$$

- HCICOF:

$$d_{50} = 10,21 + X_i' b_{4b} + X_i' B_{4b} X_i \quad R^2 = 0,991 \quad (4.8)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{4b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3,451 \\ 2,894 \\ 3,333 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{4b} = \begin{bmatrix} -0,262 & 0 & 0 & 0,358 \\ 0 & -0,429 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1,973 & -2,771 \\ 0,358 & 0 & -2,771 & -2,474 \end{bmatrix}$$

Na Figura 4.9 estão ilustradas as superfícies de resposta para a eficiência total dos hidrociclos HCICOF.

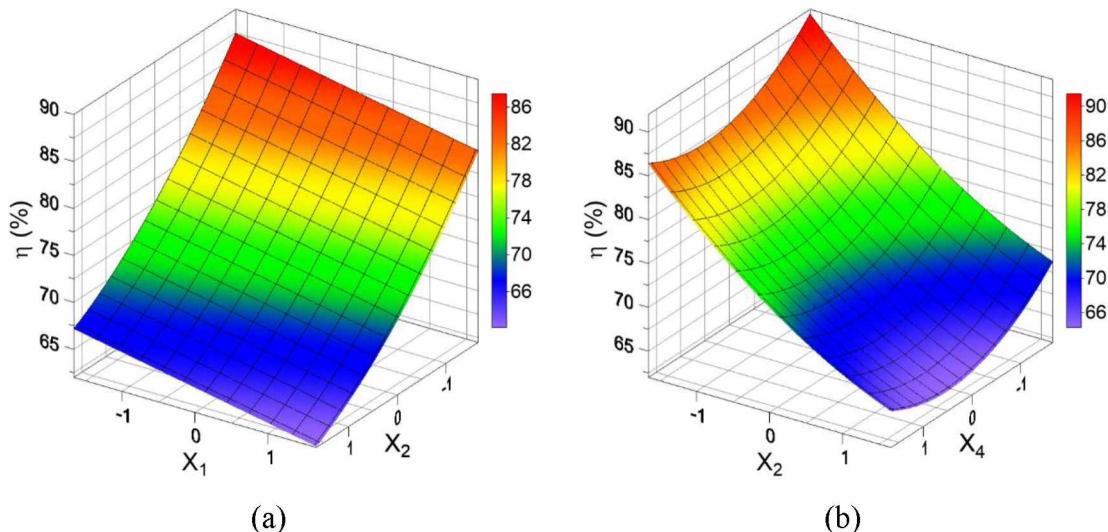


Figura 4.9 – Superfícies de resposta para a eficiência total para os hidrociclos HCICOF segundo os pares X_1 - X_2 (a) e X_2 - X_4 (b).

As equações de regressão e as superfícies de resposta para os hidrociclos HCICOF e HCON mostraram que o diâmetro de *overflow* (X_2) foi a variável que mais exerceu efeito sobre a eficiência total, seguido do ângulo do tronco de cone (X_4) e do diâmetro da

alimentação (X_1). Além disso, as regressões múltiplas mostraram que, para o diâmetro de corte, o fator que mais influenciou foi o diâmetro de *overflow* (X_2).

Diante do que foi exposto, analisando somente a eficiência total de separação, o hidrociclone de configuração 2 na modalidade convencional e 3 na modalidade cilíndrico-cônico-filtrante seriam os mais indicados. Estes hidrociclos têm em comum baixos valores de Di e Do (Tabela 3.1).

4.1.4 - Concentração Volumétrica da Corrente de *Underflow*

Na Figura 4.10 são apresentadas as concentrações volumétricas da corrente de underflow (C_{VU}) obtidas experimentalmente para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes em relação aos hidrociclos convencionais, segundo as configurações geométricas especificadas pelo PCC.

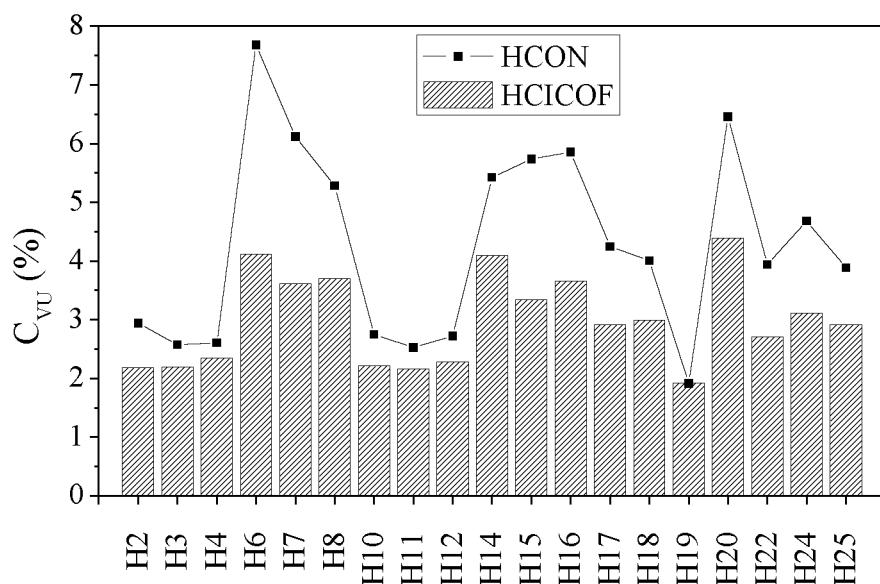


Figura 4.10 – Concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* para os hidrociclos HCICOF e HCON.

Os resultados experimentais obtidos para a concentração de sólidos no *underflow* estiveram entre 1,9 a 4,4% para os hidrociclos HCICOF e entre 1,9 a 7,7% para os hidrociclos HCON. A C_{VU} dos hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes foi sempre menorada em relação aos hidrociclos convencionais de mesma geometria, refletindo o

comportamento apresentado pela razão de líquido. Foram observados decréscimos médios na concentração do *underflow* de 26%, sendo que nas configurações filtrantes 6, 7 e 15 essa diminuição da C_{VU} em relação aos hidrociclos convencionais foi de aproximadamente 40%.

Foi constatado que o equipamento que apresentou a menor concentração volumétrica do *underflow* foi o de configuração 19 ($X_1 = 0$, $X_2 = -\alpha$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$) tanto para o hidrociclo HCICOF quanto para o HCON. Já a maior concentração volumétrica do *underflow*, foi observada na configuração 20 ($X_1 = 0$, $X_2 = +\alpha$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$) para o HCICOF e na configuração 6 ($X_1 = -1$, $X_2 = +1$, $X_3 = -1$ e $X_4 = +1$) para o HCON.

Além disso, analisando a Figura 4.10, verificou-se que o diâmetro de *overflow* foi a principal dimensão a influenciar na concentração volumétrica do *underflow*, como era esperado pela análise anterior feita para a *RL*. Incrementos no *Do* provocaram acréscimos na C_{VU} .

4.2 - Estudo do Desempenho do Hidrociclo Cilíndrico-Filtrante

Na Figura 4.11 são apresentados os resultados de vazão de filtrado (Q_F) obtidos nos ensaios para os hidrociclos cilíndrico-filtrantes (HCIF), segundo o planejamento experimental. Como já foi mencionado na seção anterior, mesmo que em comparação com a vazão volumétrica de alimentação a vazão de filtrado tenha se mostrado muito pequena, essa saída adicional de líquido foi capaz de provocar alterações no comportamento fluidodinâmico do hidrociclo cilíndrico-filtrante em relação ao convencional.

Observando a Figura 4.11, verificou-se que as configurações 4, 12, 16 e 24 dos hidrociclos HCIF apresentaram as maiores vazões de filtrado entre os hidrociclos com seção cilíndrica filtrante. Assim como para os hidrociclos analisados anteriormente (HCICOF), esses equipamentos cilíndrico-filtrantes (HCIF) tiveram como característica comum os maiores cilindros (103 ou 130 mm), o que é coerente, uma vez que os cilindros que são filtrantes. Da mesma forma, as vazões de filtrado mais baixas foram obtidas nas configurações 2, 6 e 17 (menores seções cilíndricas associadas aos menores diâmetros de alimentação do planejamento). As vazões de filtrado, independentemente da configuração geométrica, foram muito pequenas, consistindo no máximo 0,11% da vazão de alimentação do HCIF dentre todos os casos da Matriz de Planejamento.

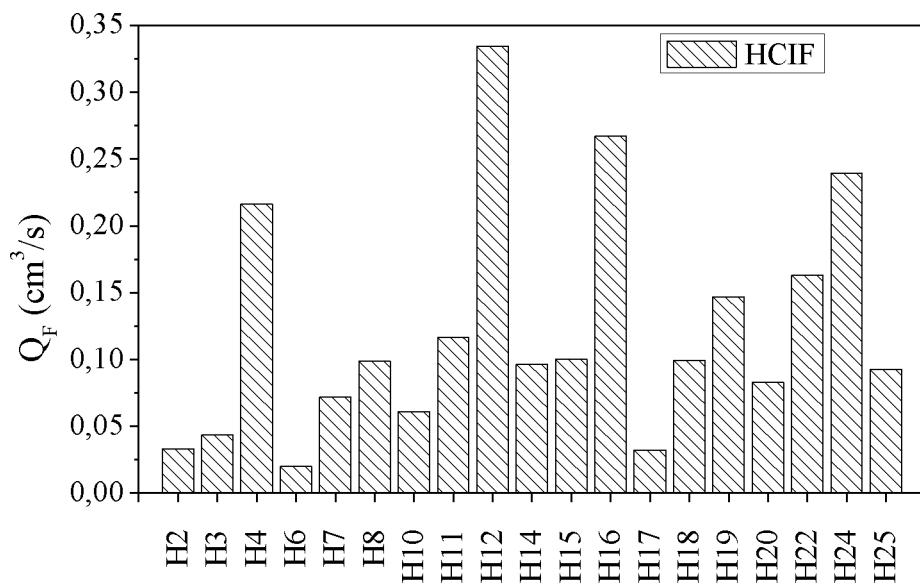


Figura 4.11 – Vazão de filtrado para os hidrociclos cilíndrico-filtrantes.

4.2.1 - Vazão de Alimentação e Número de Euler

A vazão de alimentação (Q) obtida para os hidrociclos cilíndrico-filtrantes em relação ao hidrociclo convencional conforme o planejamento composto central, está apresentada na Figura 4.12.

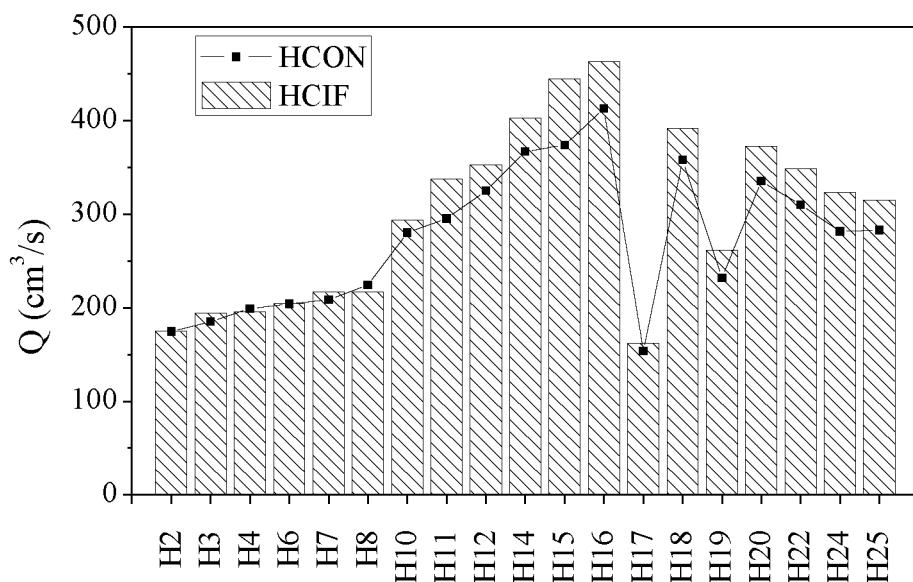


Figura 4.12 – Vazão volumétrica de alimentação para os hidrociclos HCON e HCIF.

Foi observada uma tendência muito semelhante entre as duas modalidades de hidrociclone. Os resultados experimentais apresentaram uma ampla faixa para a vazão de alimentação, entre 161 e 462 cm³/s para os hidrociclos cilíndrico-filtrantes e entre 153 e 412 cm³/s para os hidrociclos convencionais.

A vazão de alimentação para os hidrociclos HCIF foi maior em cerca de 8%, em média, em relação aos hidrociclos convencionais de mesma geometria. As configurações que apresentaram uma variação mais significativa foram a 11 e a 15, com incrementos de 14 e 18%, respectivamente. Esse aumento da vazão de alimentação dos hidrociclos HCIF em relação aos hidrociclos HCON é explicado pelo fato da retirada de filtrado ser uma saída adicional de fluido, demandando, assim, uma maior vazão de alimentação (VIEIRA *et al.*, 2007).

A vazão de alimentação dos hidrociclos HCIF apresentou comportamento análogo ao observado para os hidrociclos do tipo HCICOF e HCON, relatados na seção 4.1.1, diante das variações das dimensões geométricas:

- Incrementos nos diâmetros de alimentação (pares de hidrociclo: 2-10, 3-11, 4-12, 6-14, 7-15, 8-16 e 17-18) e *overflow* (pares de hidrociclo: 2-6, 3-7, 4-8, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20) aumentaram a vazão volumétrica de alimentação;
- Maiores comprimentos totais dos hidrociclos provocaram um aumento na vazão volumétrica, devido ao aumento da seção cilíndrica que está diretamente relacionada com a capacidade de processamento do separador (pares de hidrociclo: 2-4, 6-8, 10-12 e 14-16);
- O ângulo do tronco não exerceu um efeito significativo na vazão de alimentação dos hidrociclos HCIF (pares de hidrociclo: 3-4, 7-8, 11-12 e 15-16).

Similarmente aos hidrociclos HCICOF e HCON, a maior vazão volumétrica de alimentação para o hidrociclo HCIF foi observada na configuração 16 ($X_1 = +1$, $X_2 = +1$, $X_3 = +1$ e $X_4 = +1$), já que essa configuração possui a combinação de níveis altos para todas as variáveis, que são características que levam à obtenção de uma vazão volumétrica alta. Já a configuração 17 ($X_1 = -\alpha$, $X_2 = 0$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$) foi a que apresentou a menor vazão de alimentação, principalmente por apresentar o fator X_1 (Di) no nível mais baixo.

Na Figura 4.13 são mostrados os números de Euler para os hidrociclos do HCIF e HCON. Observou-se que os menores números de Euler foram obtidos em geometrias que apresentaram as maiores vazões de alimentação, uma vez que essas respostas são

inversamente proporcionais. Dessa forma, os decréscimos no número de Euler devido aos incrementos nos diâmetros de alimentação e *overflow*, comprimento total do hidrociclone e ângulo do tronco de cone, foram também verificados pelos mesmos pares de hidrociclos relatados anteriormente para a vazão de alimentação.

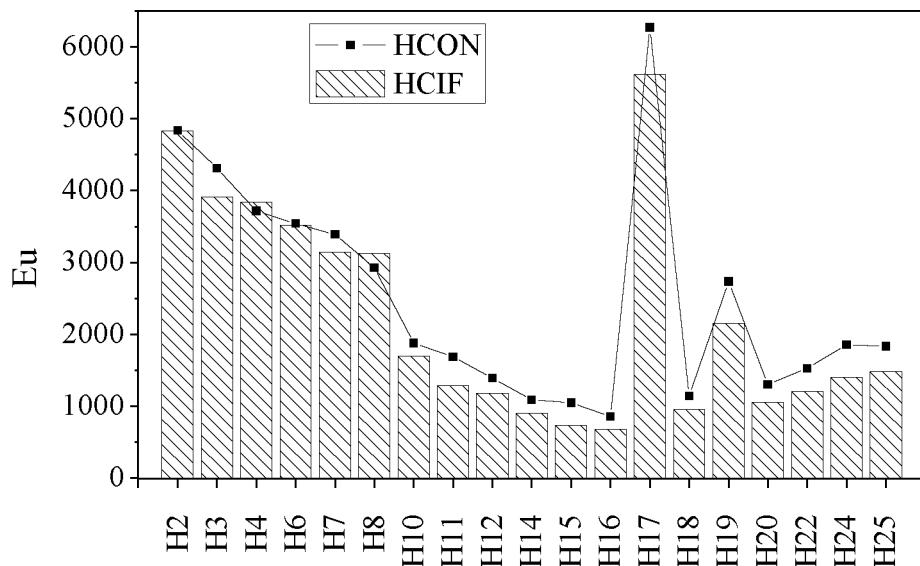


Figura 4.13 – Número de Euler para os hidrociclos HCIF e HCON.

Os números de Euler obtidos para os hidrociclos HCIF estiveram entre 688 e 5619 e para os hidrociclos HCON entre 867 e 6270. De acordo com a Figura 4.13, os equipamentos nas configurações 16 e 17 apresentaram os menores e os maiores números de Euler, respectivamente.

Em relação aos hidrociclos convencionais, verificou-se que, na média, o número de Euler dos hidrociclos cilíndrico-filtrantes foi minorado em cerca de 13%. No entanto, algumas configurações geométricas, tais como a 11 e 15, chegaram a apresentar diminuições no número de Euler de até 23 e 29%, respectivamente.

A Equação 4.9 mostra a regressão múltipla para os resultados experimentais obtidos para o número de Euler do hidrociclo HCIF.

$$Eu = 1463,19 + X'_i b_{1c} + X'_i B_{1c} X_i \quad R^2 = 0,994 \quad (4.9)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{1c} = \begin{bmatrix} -1366,70 \\ -389,58 \\ -268,28 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{1c} = \begin{bmatrix} 707,54 & 78,55 & 90,08 & 0 \\ 78,55 & 101,11 & 95,13 & 0 \\ 90,08 & 95,13 & 167,40 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A Figura 4.14 representa as superfícies de resposta para o número de Euler, geradas a partir equação de regressão acima, conforme os pares X_1 - X_2 e X_1 - X_3 , com os demais fatores mantidos no nível central.

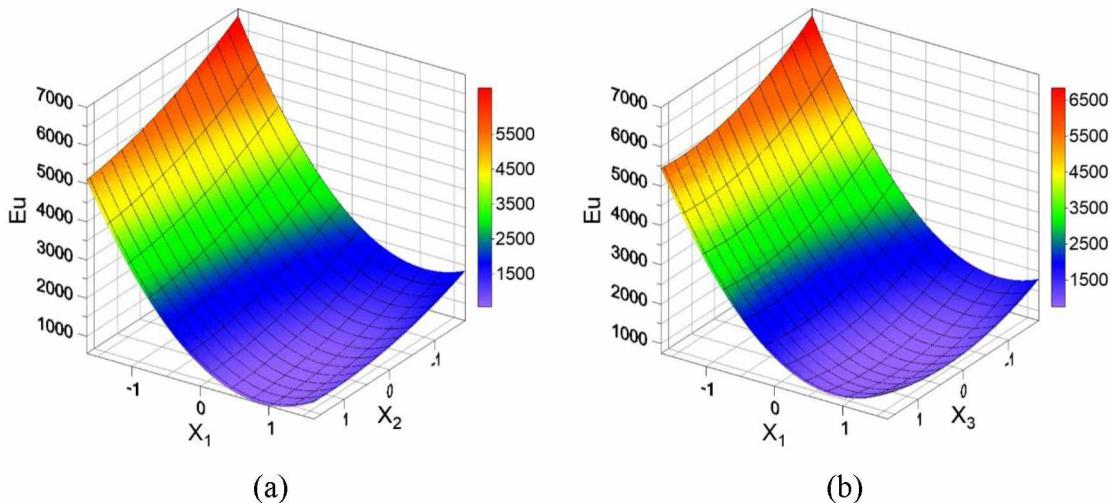


Figura 4.14 – Superfícies de resposta para o número de Euler para os hidrociclones HCIF segundo os pares X_1 - X_2 (a) e X_1 - X_3 (b).

A equação de regressão e as superfícies de resposta evidenciam que o diâmetro de alimentação (X_1) do hidrociclone teve o maior efeito no comportamento do número de Euler, seguido do diâmetro de *overflow* (X_2) e por último, do comprimento total (X_3). O ângulo do tronco de cone (X_4) praticamente não exerceu influência no número de Euler. Os coeficientes negativos desses fatores significam que seu efeito é inversamente proporcional, ou seja, o aumento dessas variáveis provoca decréscimos no número de Euler.

Sabe-se que em um processo industrial, o número de Euler deve ser levado para um valor mínimo, já que a demanda energética está diretamente relacionada a este adimensional. Portanto, neste quesito, a configuração 16 (todas as variáveis no nível codificado +1) seria a mais indicada tanto para o hidrociclone HCIF, quanto para o hidrociclone HCON.

4.2.2 - Razão de Líquido

As razões de líquido obtidas para os hidrociclones cilíndrico-filtrantes em relação aos hidrociclones convencionais estão apresentadas na Figura 4.15. Para os hidrociclones do tipo HCIF, a razão de líquido variou de 9 a 40%, enquanto que para os hidrociclones HCON essa variação foi entre 9 e 42%.

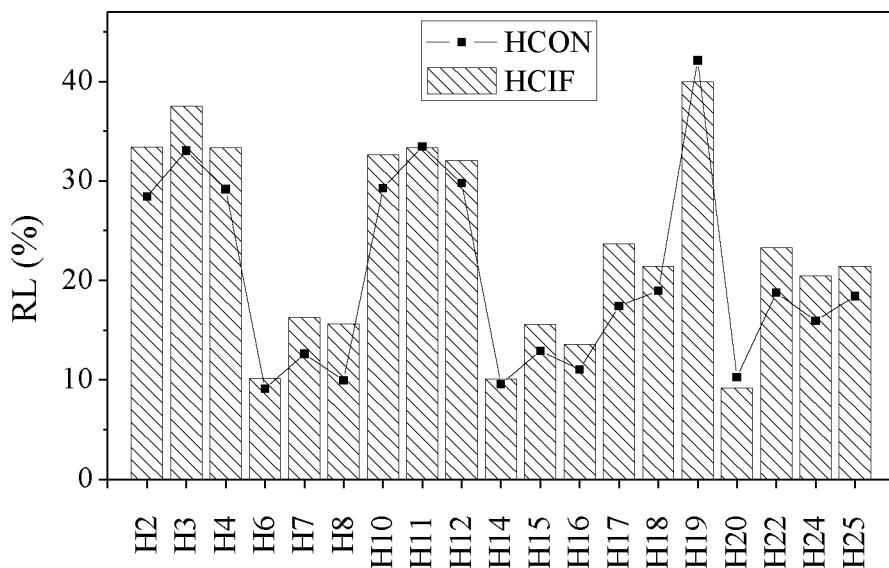


Figura 4.15 – Razão de líquido para os hidrociclones HCIF e HCON.

Como mostra a Figura 4.15, na maior parte das geometrias estudadas, a razão de líquido obtida para os hidrociclones cilíndrico-filtrantes foi maior que as dos seus similares convencionais. A configuração 8 do hidrociclone HCIF, por exemplo, apresentou um acréscimo de 56% na razão de líquido em relação ao respectivo convencional. De acordo com Vieira (2006), a retirada de filtrado seria capaz de modificar a relação entre os vórtices externo e interno, ocasionando uma maior descarga de suspensão na corrente de *underflow*.

A razão de líquido dos hidrociclones cilíndrico-filtrantes foi influenciada, devido variações das dimensões geométricas, de maneira semelhante ao que foi observado para os hidrociclones do tipo HCICOF e HCON, como explicado na seção 4.1.2:

- Incrementos no diâmetro de alimentação (pares de hidrociclone: 2-10, 3-11, 4-12, 6-14, 7-15, 8-16 e 17-18) não alteraram a relação entre as quantidades de líquido

enviadas para o *overflow* e o *underflow*, portanto, o efeito dessa variável sobre a razão de líquido foi praticamente irrelevante (VIEIRA *et al.*, 2011);

- Um aumento no diâmetro de *overflow* (pares de hidrociclone: 2-6, 3-7, 4-8, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20) fez com que menor fosse a restrição ao escoamento através desse orifício, diminuindo, assim, as razões de líquidos obtidas;
- A variação no comprimento total pouco modificou a razão de líquido, e essa variação foi dependente do diâmetro de *overflow* utilizado, devido à interação existente entre os dois fatores. Para menores valores de *Do*, um aumento no *L* manteve a razão de líquido praticamente no mesmo patamar, e para maiores dimensões de *Do* um aumento no *L* provocou acréscimos na razão de líquido (pares de hidrociclone: 2-4, 6-8, 10-12 e 14-16);
- Um incremento no ângulo do tronco (pares de hidrociclone: 3-4, 7-8, 11-12 e 15-16) fez com que uma menor proporção de líquido fosse descarregada no orifício de *underflow*, diminuindo a razão de líquido (VIEIRA *et al.*, 2011).

A maior razão de líquido apresentada pelos hidrociclos HCIF e HCON foi na configuração 19 ($X_1 = 0$, $X_2 = -\alpha$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$), devido ao fato da mesma ter o diâmetro de *overflow* no nível mais baixo. Já as menores razões de líquido foram obtidas na configuração 20 ($X_1 = 0$, $X_2 = +\alpha$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$) para o hidrociclo HCIF, pois a mesma possui o *Do* no nível mais alto, e na configuração 6 ($X_1 = -1$, $X_2 = +1$, $X_3 = -1$ e $X_4 = +1$) para o HCON, que apresenta o diâmetro de *overflow* e o ângulo do tronco de cone no nível alto.

De posse dos resultados experimentais, foi realizada uma regressão múltipla, expressa pela Equação 4.10, e superfícies de resposta para a razão de líquido do hidrociclo HCIF foram estimadas.

$$RL = 21,39 + X'_i b_{2c} + X'_i B_{2c} X_i \quad R^2 = 0,994 \quad (4.10)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{2c} = \begin{bmatrix} -0,718 \\ -10,028 \\ 0 \\ -2,057 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{2c} = \begin{bmatrix} 0,428 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,164 & 0,893 & 0 \\ 0 & 0,893 & 0,721 & 1,027 \\ 0 & 0 & 1,027 & 0,937 \end{bmatrix}$$

Na Figura 4.16 são mostradas as superfícies de resposta estimadas para a razão de líquido para o hidrociclone HCIF, conforme os pares X_1 - X_2 , X_2 - X_3 e X_2 - X_4 , com os demais fatores mantidos no nível central.

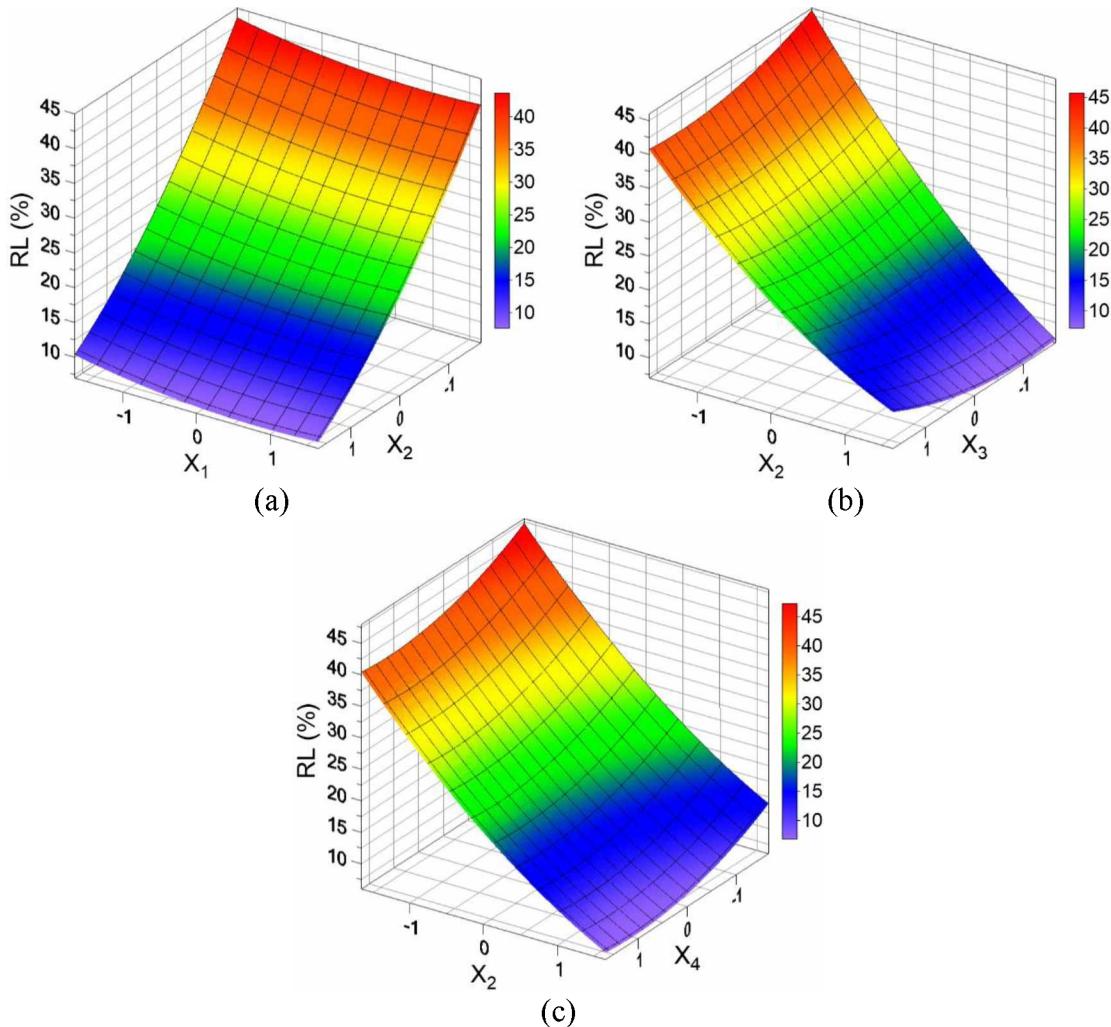


Figura 4.16 – Superfícies de resposta para a razão de líquido para os hidrociclos HCIF segundo os pares X_1 - X_2 (a), X_2 - X_3 (b) e X_2 - X_4 (c).

A equação de regressão (Equação 4.10) e as superfícies de resposta (Figura 4.16) para a razão de líquido mostraram que o diâmetro de *overflow* (X_2) foi a variável que mais influenciou na RL , seguido pelo ângulo do tronco de cone (X_4). Os fatores X_1 (diâmetro de alimentação) e X_3 (comprimento total do hidrociclone) tiveram uma influência menos significativa nessa resposta para os hidrociclos cilíndrico-filtrantes.

Hidrociclos com razão de líquido em um valor máximo ou mínimo depende do interesse do usuário no processo de separação sólido-líquido. Dessa forma, configurações que forneçam uma elevada razão de líquido, como a 19, são indicadas para processos industriais

que necessitem de alto poder classificatório (maiores eficiências). Já as configurações com baixas razões de líquido (20 para o HCIF e 6 para o HCON) podem ser utilizadas em processo de concentração ou espessamento da corrente de alimentação.

4.2.3 - Eficiência Total e Diâmetro de Corte

Os valores obtidos para as eficiências totais dos hidrociclos cilíndrico-filtrantes em relação ao convencional segundo o planejamento experimental podem ser vistos na Figura 4.17. As eficiências totais estiveram entre 61 a 85% para os hidrociclos HCIF e entre 66 a 88% para os hidrociclos HCON.

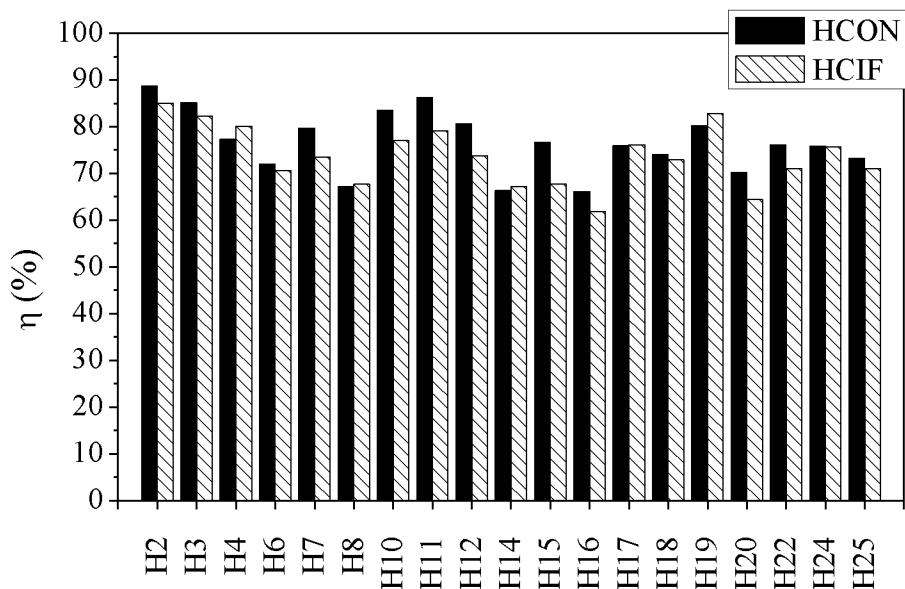


Figura 4.17 – Eficiência total para os hidrociclos HCIF e HCON.

Na Figura 4.17 pode ser visto que a eficiência total dos hidrociclos cilíndrico-filtrantes sofreu acréscimos ou decréscimos em relação à do hidrociclo convencional de acordo com a geometria do PCC. Enquanto na configuração 15 a eficiência total do hidrociclo HCON foi aproximadamente 11% maior do que para o hidrociclo HCIF, nas configurações 4 e 19, os hidrociclos HCIF apresentaram eficiência total cerca de 4% maior em relação aos hidrociclos HCON. Em se tratando de valores médios, houve decréscimos de 3,5% das eficiências totais dos hidrociclo HCIF em relação aos respectivos convencionais. Da mesma forma que foi mencionado anteriormente na análise para o

hidrociclone HCICOF, esta diferença é muito próxima da incerteza da medida, mostrando que os resultados de eficiência foram muito próximos para as duas configurações.

Como foi discutido na seção 4.1.3, apesar da razão de líquido dos hidrociclos cilíndrico-filtrantes ter se mostrado maior do que para o equipamento convencional (condição favorável à separação), a filtração fez também com que o movimento espiralado diminuísse no interior do hidrociclone (condição desfavorável à separação), como mostram os estudos em CFD realizados por Vieira (2006). Efetivamente, houve a compensação de um efeito pelo outro, por isso, as pequenas variações no que tange à separação na modalidade cilíndrico-filtrante.

As variações nas dimensões geométricas estudadas no PCC influenciaram na eficiência total dos hidrociclos cilíndrico-filtrantes de forma parecida com a que foi observada para os hidrociclos do tipo HCICOF e HCON, como relatado na seção 4.1.3:

- Um incremento no diâmetro de alimentação provocou decréscimos na eficiência total dos hidrociclos HCIF (pares de hidrociclone 2-10, 3-11, 4-12, 6-14, 7-15, 8-16 e 17-18), pois menos partículas conseguem atingir a parede do separador devido à diminuição da velocidade tangencial do vórtice externo.
- Quanto maior o diâmetro de *overflow*, menor foi a eficiência total (pares de hidrociclone: 3-7, 4-8, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20), pois as restrições ao escoamento são menos intensas, ocasionando a descarga de grande parte do líquido com as partículas pelo orifício de *overflow*.
- A eficiência total foi mais baixa quando maiores comprimentos totais foram utilizados (pares de hidrociclone: 2-4, 6-8, 10-12 e 14-16).
- Incrementos no ângulo do tronco de cone diminuem a eficiência total (pares de hidrociclone: 3-4, 7-8, 11-12 e 15-16). Menores ângulos favorecem a eficiência total, pois fazem com que as partículas sejam mantidas por mais tempo junto à parede do separador até serem coletadas pela corrente de *underflow*.

Na Figura 4.18 são mostrados os diâmetros de corte (d_{50}) obtidos para os hidrociclos cilíndrico-filtrantes e convencionais segundo o planejamento composto central. Os resultados experimentais mostraram faixas amplas de diâmetro de corte, variando de 1 a 14 μm para os hidrociclos HCIF e de 1 a 11 μm para os hidrociclos HCON.

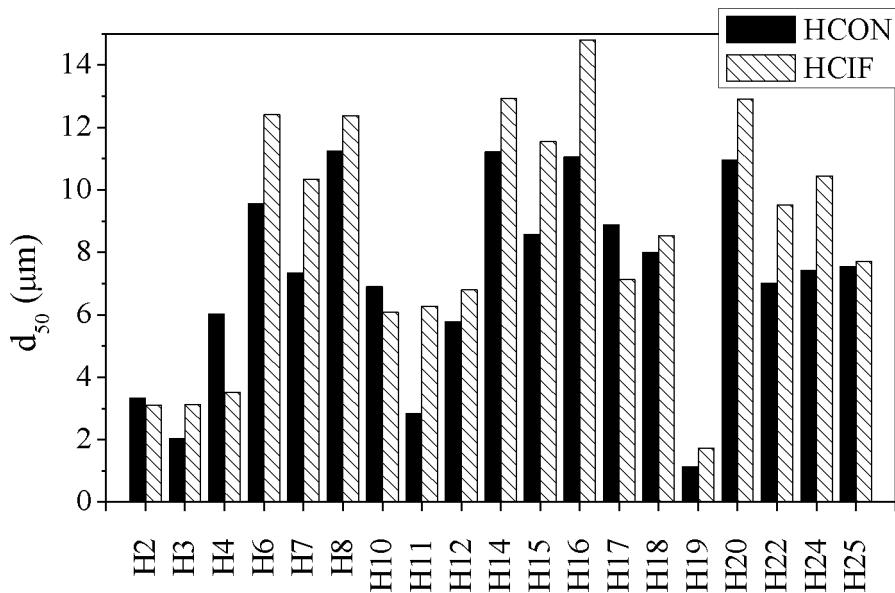


Figura 4.18 – Diâmetro de corte para os hidrociclones HCIF e HCON.

Como o diâmetro de corte é uma grandeza inversamente proporcional à eficiência total, observou-se que os menores diâmetros de corte dos hidrociclones HCIF foram obtidos para as configurações que tiveram as eficiências totais mais altas (configurações 2, 3, 4 e 19). Assim como para a eficiência total, na maioria das configurações o diâmetro de corte dos hidrociclones HCIF foi maior do que os apresentados para o hidrociclone HCON, com incrementos médios de 22%.

De acordo com a Figura 4.18, verificou-se que as variáveis diâmetro de *overflow* (pares de hidrociclone: 2-6, 3-7, 4-8, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20), seguido do ângulo do tronco de cone (pares de hidrociclone: 3-4, 7-8, 11-12 e 15-16), foram as que mais influenciaram no diâmetro de corte dos hidrociclones HCIF e HCON, o que está em concordância com o comportamento discutido para a eficiência total. Portanto, hidrociclones com configurações que tenham diâmetro de *overflow* e ângulo do tronco de cone pequenos, têm mais chance de apresentar alta eficiência total e baixo diâmetro de corte.

Depois de obtidos os resultados experimentais, foram realizadas regressões múltiplas para as respostas: eficiência total (Equação 4.11) e diâmetro de corte (Equação 4.12) do hidrociclone cilíndrico-filtrante.

$$\eta = 71,24 + X'_i b_{3c} + X'_i B_{3c} X_i \quad R^2 = 0,964 \quad (4.11)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{3c} = \begin{bmatrix} -2,158 \\ -5,661 \\ 2,642 \\ 2,269 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{3c} = \begin{bmatrix} 0,978 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,672 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2,032 & -4,607 \\ 0 & 0 & -4,607 & 0 \end{bmatrix}$$

$$d_{50} = 7,61 + X_i' b_{4c} + X_i' B_{4c} X_i \quad R^2 = 0,981 \quad (4.12)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{4c} = \begin{bmatrix} 0,904 \\ 3,534 \\ 1,063 \\ 1,488 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{4c} = \begin{bmatrix} 0 & -0,441 & 0 & 0 \\ -0,441 & 0 & 0 & 0,532 \\ 0 & 0 & 0 & -0,674 \\ 0 & 0,532 & -0,674 & 0 \end{bmatrix}$$

As superfícies de resposta para a eficiência total dos hidrociclones cilíndrico-filtrantes estão ilustradas na Figura 4.19, considerando os pares X_1 - X_2 e X_2 - X_4 , com os demais fatores, quando não mencionados, no nível central.

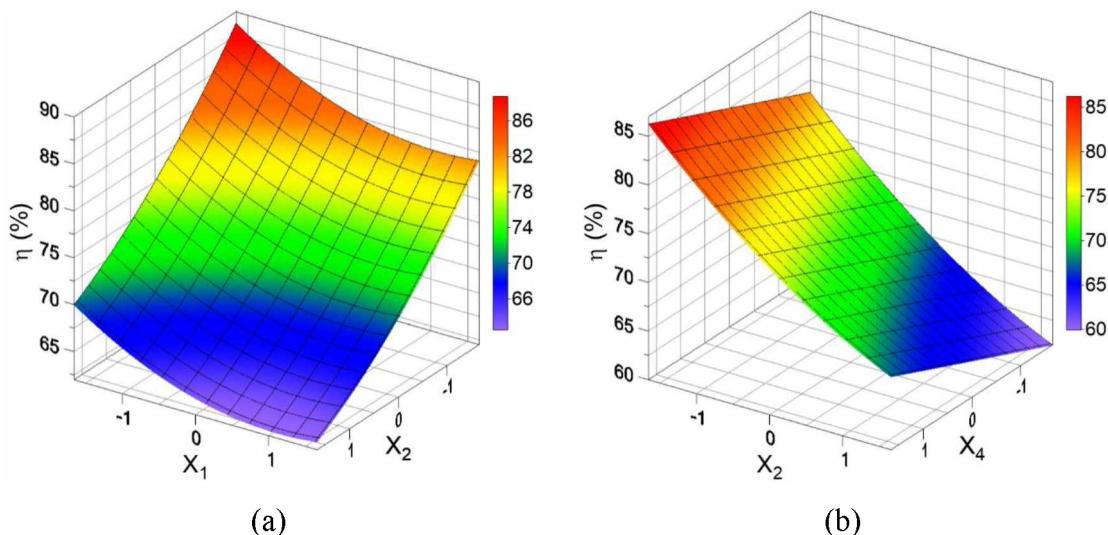


Figura 4.19 – Superfícies de resposta para a eficiência total para os hidrociclones HCIF segundo os pares X_1 - X_2 (a) e X_2 - X_4 (b).

Conforme mostraram as equações de regressão e as superfícies de resposta para os hidrociclones HCIF, o diâmetro de *overflow* (X_2) foi a variável que mais influenciou a eficiência total, seguido do ângulo do tronco de cone (X_4) e do diâmetro da alimentação (X_1). Para o diâmetro de corte, o fator que mais exerceu influência foi o diâmetro de *overflow* (X_2).

É sabido que num processo é ideal que a eficiência total alcance um valor máximo. Portanto, dentre as geometrias estudadas no planejamento, a configuração 2 seria a mais indicada para ambas as modalidades (HCIF e HCON). Esta configuração 2 apresenta níveis baixos para Di , Do e L , e mais alto para θ .

4.2.4 - Concentração Volumétrica da Corrente de *Underflow*

Na Figura 4.20 são mostrados os valores obtidos para as concentrações volumétricas da corrente de *underflow* dos hidrociclos cilíndrico-filtrantes em relação ao convencional conforme a Matriz de Planejamento.

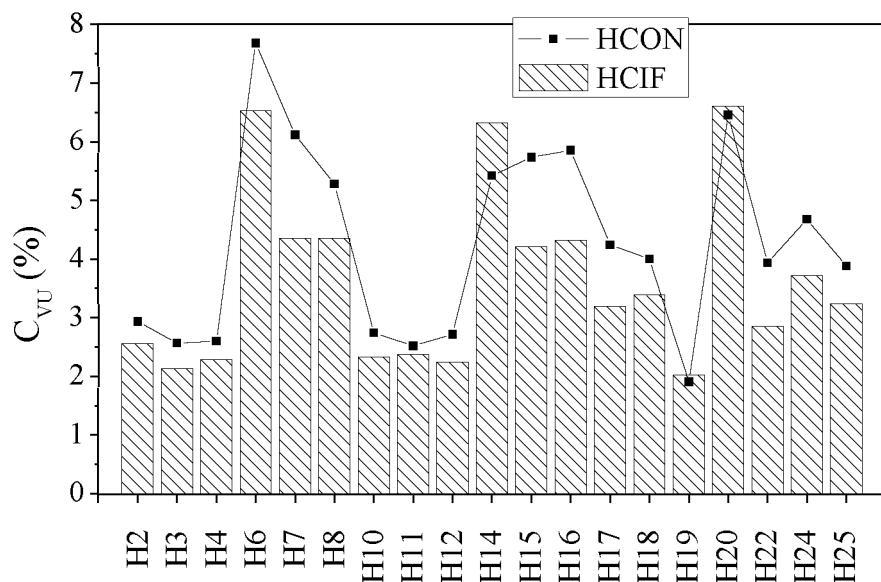


Figura 4.20 – Concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* para os hidrociclos HCIF e HCON.

Os resultados experimentais obtidos para a concentração de sólidos no *underflow* estiveram entre 2,0 a 6,6% para os hidrociclos HCIF e entre 1,9 a 7,7% para os hidrociclos HCON. Na maioria das configurações, a C_{VU} dos hidrociclos cilíndrico-filtrantes foi minorada em relação aos hidrociclos convencionais. Porém, observou-se que para os hidrociclos HCIF nas configurações geométricas 14, 19 e 20 foram observados acréscimos médios na concentração do *underflow* de 16, 6 e 2%, respectivamente, em relação ao HCON.

As razões de líquido obtidas para os hidrociclones HCIF nas configurações 19 e 20 foram menores do que as dos separadores convencionais de mesma geometria, o que explica os acréscimos apresentados para concentração volumétrica do *underflow* dos hidrociclones HCIF nessas configurações.

Já o hidrociclone HCIF na configuração 14 teve a razão de líquido muito próxima a do hidrociclone convencional, entretanto sua eficiência total foi superior, o que explica a maior concentração volumétrica do *underflow* obtida para a modalidade filtrante.

Assim como foi observado para o hidrociclone HCICOF, verificou-se que o diâmetro de *overflow* foi a principal dimensão geométrica a influenciar na concentração volumétrica do *underflow* dos hidrociclones HCIF. Incrementos no *Do* provocaram acréscimos na C_{VU} .

4.3 - Estudo do Desempenho do Hidrociclone Cônico-Filtrante

Analogamente às seções 4.1 e 4.2, serão apresentados os resultados experimentais obtidos para vazão de filtrado, vazão de alimentação, número de Euler, razão de líquido, eficiência total, diâmetro de corte e concentração volumétrica da corrente de *underflow* dos hidrociclones cônico-filtrante e convencional.

Os resultados experimentais para a vazão de filtrado dos hidrociclones cônico-filtrantes segundo o PCC podem ser visualizados na Figura 4.21. Assim como nas outras modalidades de hidrociclones filtrantes estudadas (HCICOF e HCIF), a vazão de filtrado foi muito pequena em relação à vazão volumétrica inicialmente alimentada no hidrociclone cônico-filtrante. Dessa forma, independentemente da configuração geométrica, a vazão de filtrado representou no máximo 0,07% da vazão de alimentação do HCOF.

A Figura 4.21 mostra que as configurações 3, 9, 11, 15, 18 e 23 apresentaram as maiores vazões de filtrado entre os hidrociclones com seção cônica porosa. As configurações 3, 9, 11 e 15 e a configuração 23 têm como característica comum o fato de serem constituídas pelos troncos de cone com os menores ângulos possíveis fornecidos pelo planejamento experimental $X_4 = -\alpha$ e $X_4 = -1$, respectivamente (logo, com a maior área disponível para filtração). Já a configuração 18, apresenta um tronco de cone com ângulo no nível intermediário, porém com diâmetro de alimentação no nível mais alto ($X_1 = +\alpha$).

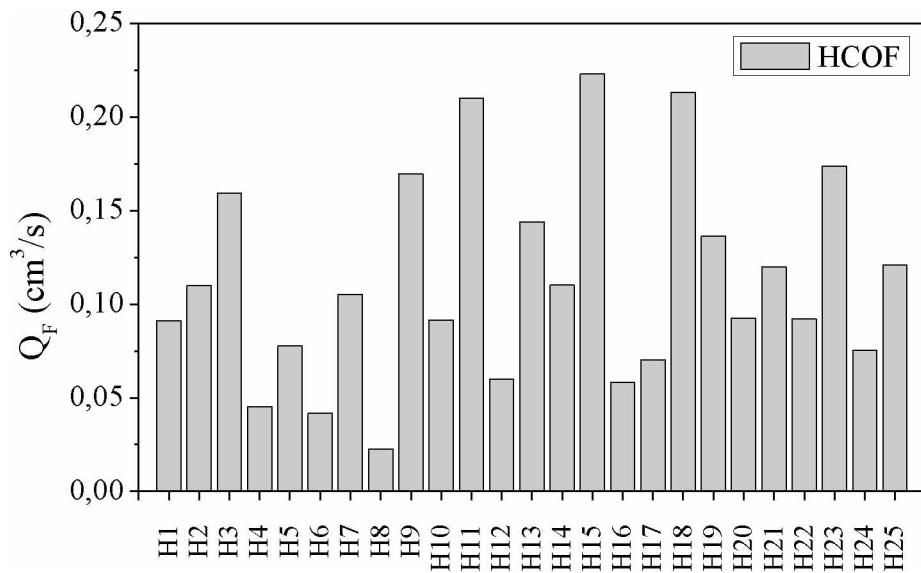


Figura 4.21 – Vazão de filtrado para os hidrociclones cônicos-filtrantes.

No mesmo sentido, as vazões de filtrado mais baixas foram obtidas nas configurações 4, 6 e 8, pois essas geometrias possuem o tronco de cone com ângulo no nível alto ($X_4 = +1$) associadas ao diâmetro de alimentação no nível baixo ($X_1 = -1$).

4.3.1 - Vazão de Alimentação e Número de Euler

Os resultados referentes às vazões de alimentação de cada um dos hidrociclones cônicos-filtrantes (HCOF) em relação aos hidrociclones convencionais (HCON) podem ser vistos na Figura 4.22.

Observando a Figura 4.22, percebeu-se que uma tendência semelhante foi obtida para as duas modalidades. Os resultados experimentais proporcionaram uma ampla faixa para a vazão volumétrica de alimentação, que variou de 163 a 452 cm^3/s para os hidrociclones HCOF e de 153 a 412 cm^3/s para os hidrociclones HCON.

Em relação aos hidrociclones convencionais, a vazão de alimentação dos hidrociclones HCOF aumentou cerca de 14%, em média. As variações mais significativas foram alcançadas pelas configurações 9 e 21, com incrementos de 24 e 29%, respectivamente. Apesar de ser ínfima, a retirada de filtrado interferiu na fluidodinâmica do sistema de modo

que uma maior quantidade de suspensão passou a ser alimentada na configuração cônico-filtrante (VIEIRA *et al.*, 2007).

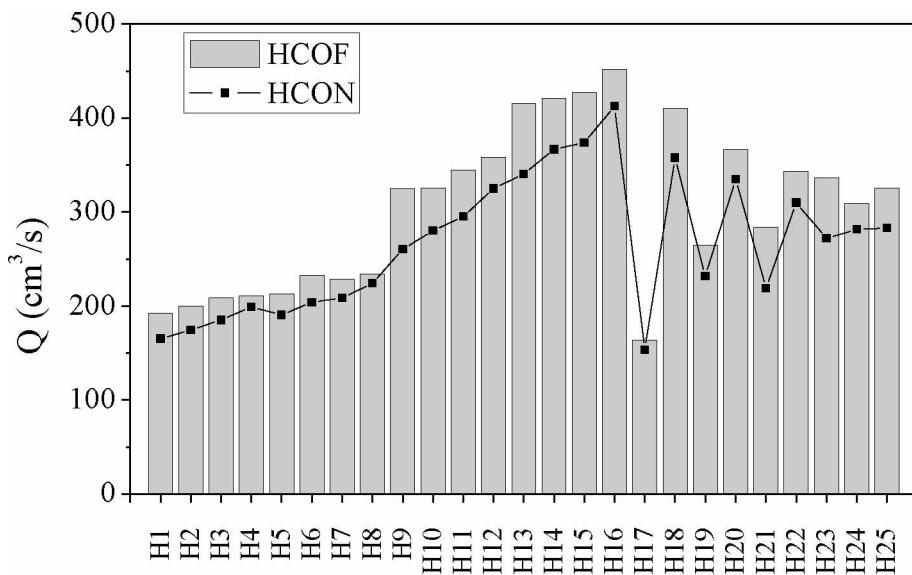


Figura 4.22 – Vazão volumétrica de alimentação para os hidrociclos HCOF e HCON.

A vazão de alimentação dos hidrociclos HCOF apresentou comportamento próximo ao observado para os hidrociclos anteriormente estudados (HCICOF, HCIF e HCON). Sendo assim, aplicam-se as explicações fornecidas para as variações das dimensões geométricas nas seções 4.1.1 e 4.2.1. Recapitulando-as, têm-se:

- A vazão de alimentação aumentou devido a incrementos nos diâmetros de alimentação (pares de hidrociclo: 1-9, 2-10, 3-11, 4-12, 5-13, 6-14, 7-15, 8-16 e 17-18) e de *overflow* (pares de hidrociclo: 1-5, 2-6, 3-7, 4-8, 9-13, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20), pois esses aumentos no *Di* e no *Do* fazem com que o fluido dentro do hidrociclo ceda energia sob forma de pressão mais gradativamente (VIEIRA *et al.*, 2011);
- Incrementos no comprimento total dos hidrociclos provocaram um aumento na vazão volumétrica, pois ao aumentar o *L*, há um aumento do cilindro que está diretamente relacionado com a capacidade de processamento do equipamento (pares de hidrociclo: 1-3, 2-4, 5-7, 6-8, 9-11, 10-12, 13-15, 14-16 e 21-22);
- Um incremento no ângulo do tronco provocou um pequeno acréscimo na vazão de alimentação do hidrociclo HCOF, sendo que em alguns casos o efeito desse

incremento foi desprezível (pares de hidrociclone: 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14, 15-16 e 23-24).

Da mesma forma que foi observado para os hidrociclos do tipo HCICOF, HCIF e HCON, a maior vazão volumétrica de alimentação para o hidrociclone cônico-filtrante foi fornecida pela configuração 16 ($X_1 = +1$, $X_2 = +1$, $X_3 = +1$ e $X_4 = +1$), que possui os fatores no nível alto, que são características que favorecem uma elevada vazão volumétrica de alimentação. Por outro lado, pelo fator X_1 estar no nível mais baixo, a configuração 17 ($X_1 = -\alpha$, $X_2 = 0$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$) foi a que apresentou a menor vazão de alimentação.

Na Figura 4.23 são trazidos os valores dos números de Euler para os hidrociclos do HCOF e HCON. Devido ao número de Euler e à vazão de alimentação serem inversamente proporcionais, os Eu mais baixos foram obtidos em geometrias que tiveram as maiores vazões de alimentação. Assim, os decréscimos no número de Euler devido aos incrementos nos diâmetros de alimentação e *overflow*, comprimento total do hidrociclone e ângulo do tronco de cone, são verificados pelos mesmos pares de hidrociclone relatados para a vazão de alimentação.

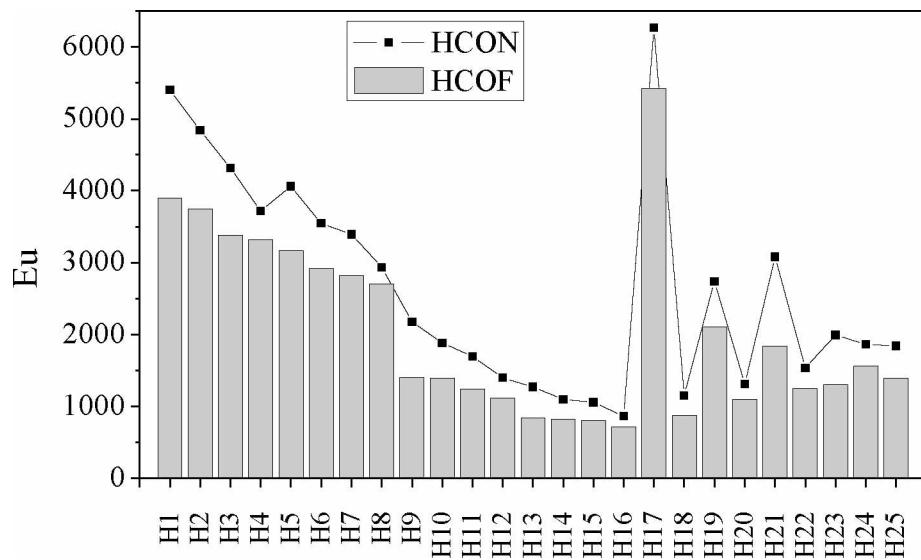


Figura 4.23 – Número de Euler para os hidrociclos HCOF e HCON.

De acordo com a Figura 4.23, foi possível obter um intervalo significativamente amplo para os números de Euler dos hidrociclos HCOF e HCON, os quais variaram entre 715 e 5424 e entre 867 e 6270, respectivamente. Assim como para a vazão de alimentação, os menores Eu foram obtidos para os equipamentos nas configurações 16 ($X_1 = +1$, $X_2 = +1$, X_3

= +1 e $X_4 = +1$) e os maiores números de Euler na configuração 17 ($X_1 = -\alpha$, $X_2 = 0$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$), tanto para o HCOF quanto para o HCON.

O número de Euler para os hidrociclos HCOF teve um decréscimo de 22%, em média, em relação aos hidrociclos convencionais. As configurações 9 e 21 foram as que apresentaram uma redução mais significativa, com decréscimos de 35 e 40%, respectivamente.

A regressão múltipla para os dados experimentais obtidos para o número de Euler do hidrociclo HCOF é expressa pela Equação 4.13.

$$Eu = 1441,33 + X'_i b_{1d} + X'_i B_{1d} X_i \quad R^2 = 0,987 \quad (4.13)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{1d} = \begin{bmatrix} -1168,77 \\ -295,85 \\ -141,92 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{1d} = \begin{bmatrix} 626,18 & 0 & 57,59 & 0 \\ 0 & 67,93 & 0 & 0 \\ 57,59 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Na Figura 4.24 são representadas as superfícies de resposta para o número de Euler, gerada a partir equação de regressão (Equação 4.13), conforme os pares X_1 - X_2 , X_1 - X_3 e X_2 - X_3 , com os demais fatores, quando não mencionados, mantidos no nível central.

Verificou-se através da equação de regressão (Equação 4.13) e das superfícies de resposta (Figura 4.24) que, dentre as variáveis do planejamento experimental, a que mais influenciou no comportamento do número de Euler do hidrociclo HCOF foi o diâmetro de alimentação (X_1), seguido do diâmetro de *overflow* (X_2) e por último, do comprimento total (X_3).

Ao analisar apenas o gasto energético dos hidrociclos, pode-se afirmar que o equipamento na configuração 16 ($X_1 = +1$, $X_2 = +1$, $X_3 = +1$ e $X_4 = +1$) em ambas as modalidades (HCOF e HCON), seria o mais viável economicamente, uma vez que essa geometria proporcionaria o menor número de Euler dentre todos os separadores analisados.

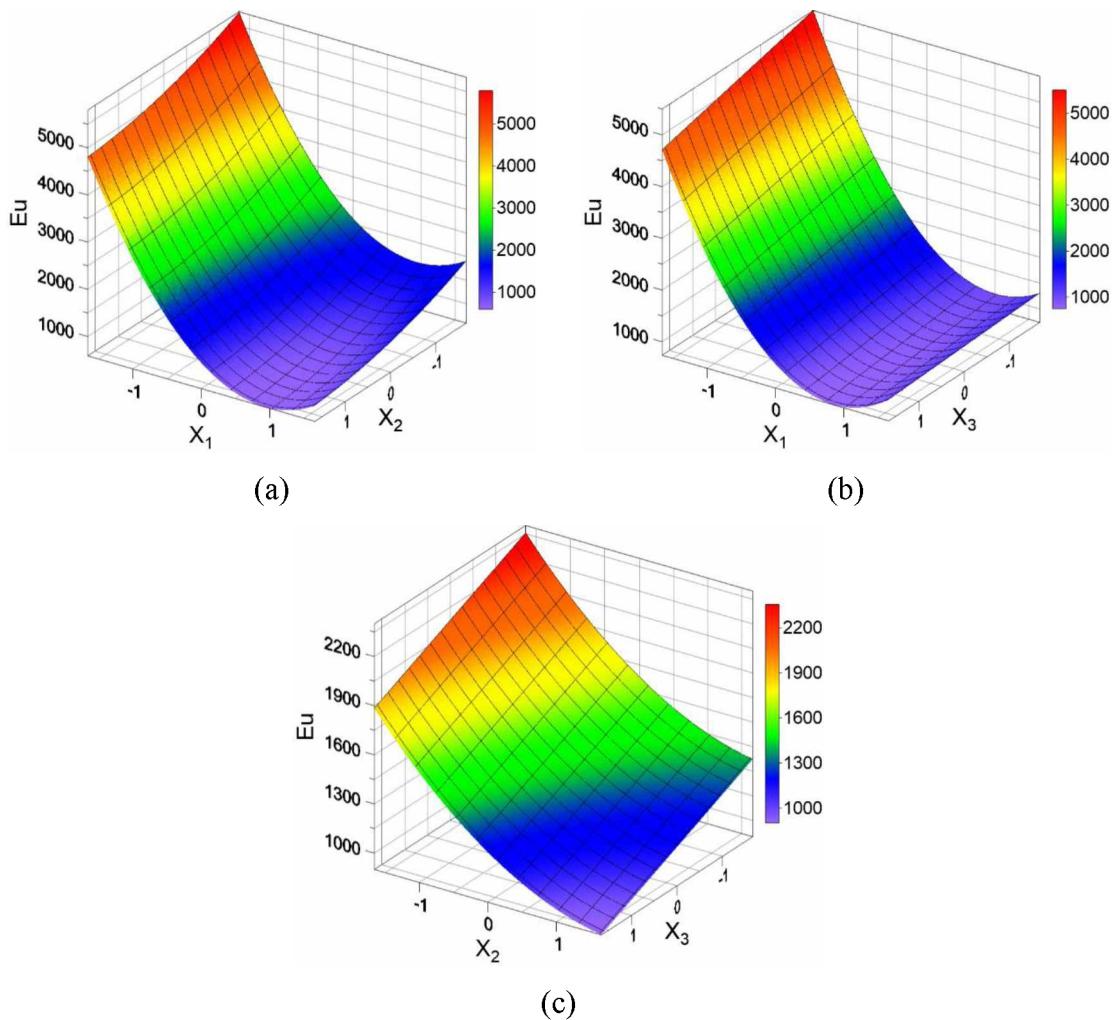


Figura 4.24 – Superfícies de resposta para o número de Euler para os hidrociclones HCOF segundo os pares X_1 - X_2 (a), X_1 - X_3 (b) e X_2 - X_3 (c).

4.3.2 - Razão de Líquido

Os valores das razões de líquido para os hidrociclones cônico-filtrantes em relação aos hidrociclones convencionais podem ser vistos na Figura 4.25. Um intervalo relativamente amplo foi alcançado para a razão de líquido, variando de 13 a 44% para os hidrociclones HCOF e de 7 a 42% para os hidrociclones HCON.

Analizando a Figura 4.25, foi possível visualizar que a razão de líquido para os hidrociclones cônico-filtrantes foi sempre majorada em relação ao hidrociclones convencionais. Os hidrociclones HCOF nas configurações 5 e 13 tiveram acréscimos de 142% e 114% na razão de líquido, respectivamente. Enquanto que os hidrociclones HCOF de configurações 11 e 19 apresentaram um aumento de 6% em relação ao convencional de mesma geometria. Conforme Vieira (2006), esse acréscimo na razão de líquido dos

hidrociclones HCOF ocorre devido à modificação na relação entre os vórtices interno e externo (em função da presença da corrente de filtrado), fazendo com que haja uma maior descarga de suspensão na corrente de *underflow*.

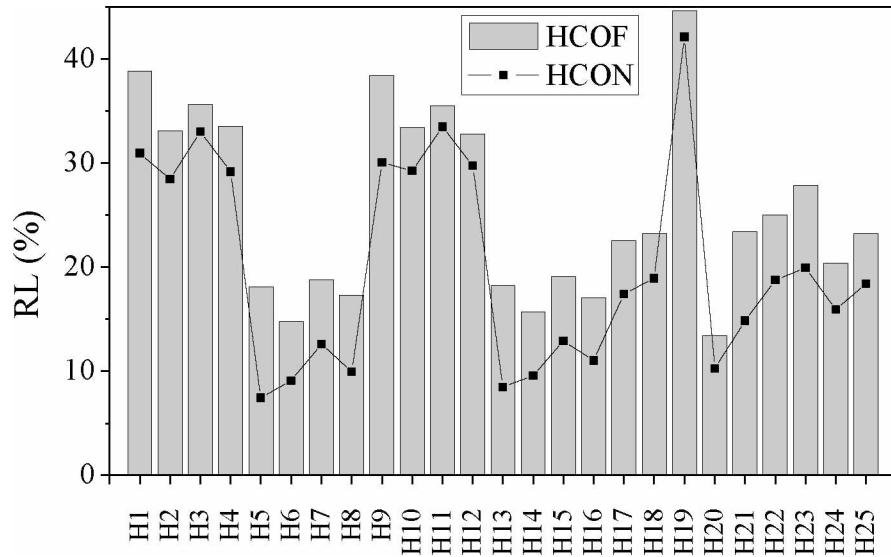


Figura 4.25 – Razão de líquido para os hidrociclones HCOF e HCON.

A razão de líquido dos hidrociclones cônicos-filtrantes foi influenciada da seguinte maneira, devido variações das dimensões geométricas:

- Variações no diâmetro de alimentação (pares de hidrociclone: 1-9, 2-10, 3-11, 4-12, 5-13, 6-14, 7-15, 8-16 e 17-18) não alteraram a razão de líquido dos hidrociclones HCOF;
- Incrementos no diâmetro de *overflow* (pares de hidrociclone: 1-5, 2-6, 3-7, 4-8, 9-13, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20) diminuíram a razão de líquido devido à menor restrição ao escoamento através desse orifício, assim uma menor parte do líquido foi descarregada pela corrente de *underflow*;
- A variação no comprimento total pouco modificou a razão de líquido, e essa variação foi dependente do diâmetro de *overflow* utilizado, devido à interação existente entre os dois fatores. Para menores valores de Do , um aumento no L diminuiu a razão de líquido, e para maiores dimensões de Do um aumento no L provocou acréscimos na razão de líquido (pares de hidrociclone: 1-3, 2-4, 5-7, 6-8, 9-11, 10-12, 13-15, 14-16 e 21-22).

- Incrementos no ângulo do tronco de cone (pares de hidrociclone: 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14, 15-16 e 23-24) fizeram com que uma menor proporção de líquido fosse descarregada no orifício de *underflow*, diminuindo a razão de líquido.

Assim como foi observado para os hidrociclos HCICOF e HCIF, a configuração 19 ($X_1 = 0$, $X_2 = -\alpha$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$) apresentou a maior razão de líquido tanto para o hidrociclo HCOF quanto para o HCON, devido ao fato da mesma ter o diâmetro de *overflow* no nível mais baixo. Já as menores razões de líquido foram obtidas na configuração 20 ($X_1 = 0$, $X_2 = +\alpha$, $X_3 = 0$ e $X_4 = 0$) para o hidrociclo HCOF, pois a mesma possui o *Do* no nível mais alto, e na configuração 5 ($X_1 = -1$, $X_2 = +1$, $X_3 = -1$ e $X_4 = -1$) para o HCON, que reúne características que conduzem a uma *RL* baixa.

Na Equação 4.14 é mostrada a equação regressão múltipla para a razão de líquido do hidrociclo HCOF.

$$RL = 23,12 + X_i' b_{2d} + X_i' B_{2d} X_i \quad R^2 = 0,996 \quad (4.14)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{2d} = \begin{bmatrix} 0 \\ -9,016 \\ 0 \\ -1,731 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{2d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,203 & 0,738 & 0,385 \\ 0 & 0,738 & 0,455 & 0,518 \\ 0 & 0,385 & 0,518 & 0,427 \end{bmatrix}$$

As superfícies de resposta estimadas para a razão de líquido para o hidrociclo HCOF podem ser vistos na Figura 4.26, conforme os pares X_2 - X_3 e X_2 - X_4 (demais fatores no nível central).

Analizando a equação de regressão para a razão de líquido (Equação 4.14) e as superfícies de resposta (Figura 4.26), verificou-se que o diâmetro de *overflow* (X_2) foi o fator que mais influenciou na *RL*, seguido pelo ângulo do tronco de cone (X_4) e pelo comprimento total do hidrociclo (X_3). O fator X_1 (diâmetro de alimentação) não apresentou um efeito significativo sobre a *RL* para os hidrociclos cônico-filtrantes.

Logo, sem entrar no mérito das demais respostas e avaliando apenas a razão de líquido, a configuração escolhida depende do objetivo da aplicação do hidrociclo. A configuração 19 (HCOF e HCON), que fornece elevada razão de líquido, pode ser utilizada para processos que buscam um poder classificatório satisfatório. Enquanto que as

configurações 20 para o HCOF e 5 para o HCON poderiam ser indicadas para operações de concentração ou espessamento da suspensão alimentada.

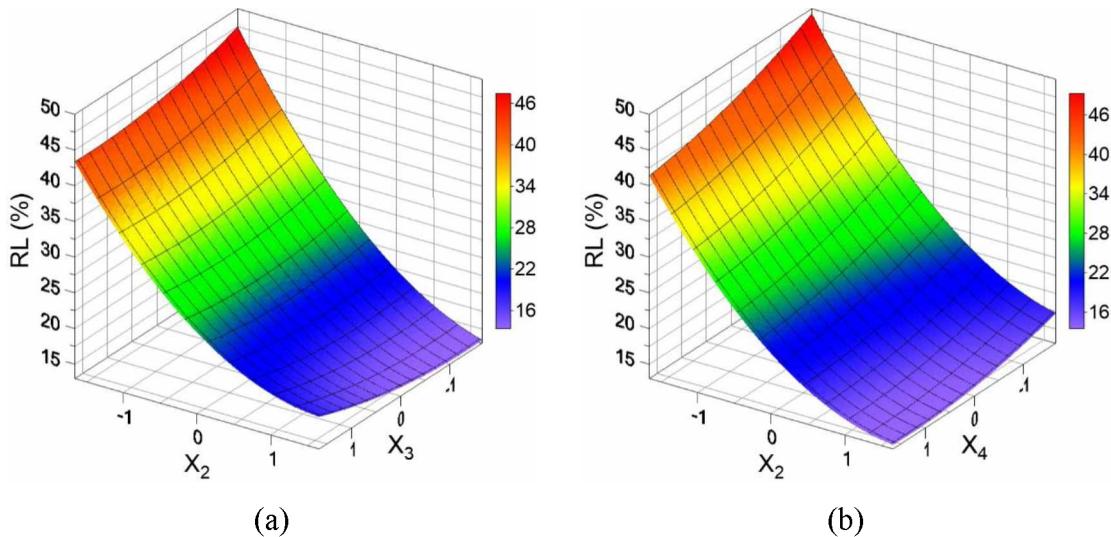


Figura 4.26 – Superfícies de resposta para a razão de líquido para os hidrociclos HCOF segundo os pares X₂-X₃ (a) e X₂-X₄ (b).

4.3.3 - Eficiência Total e Diâmetro de Corte

Na Figura 4.27 são mostradas as eficiências totais dos hidrociclos cônico-filtrantes em relação ao convencional. De acordo com os principais resultados verificou-se que as eficiências totais obtidas estiveram entre 67 a 88% para os hidrociclos HCOF e entre 66 a 88% para os hidrociclos HCON.

A eficiência total dos hidrociclos cônico-filtrantes sofreu acréscimos ou decréscimos em relação à do hidrociclo convencional de acordo com a geometria do PCC, como pode ser visto na Figura 4.27. A configuração 18 na modalidade HCOF teve a eficiência total 10% maior do que para o hidrociclo HCON. Enquanto na configuração 7 a eficiência total do hidrociclo HCOF foi aproximadamente 5% menor em relação ao HCON. Em termos médios, a eficiência total dos hidrociclos HCOF foi 1,7% maior do que as observadas para os hidrociclos HCON.

Apesar da filtração ter aumentado a razão de líquido (condição favorável à separação), fez também com que o movimento espiralado diminuisse no interior do hidrociclo (condição desfavorável à separação), conforme constatação via CFD de Vieira (2006). Efetivamente, houve a neutralização de um efeito pelo outro, por isso, as pequenas

variações no que tange à separação na modalidade filtrante. No entanto, a frequência em que o HCOF teve a eficiência total melhor que o HCON aumentou. Certamente tem a ver com a filtração na região cônica, estrutura intimamente ligada ao poder de separação do hidrociclone.

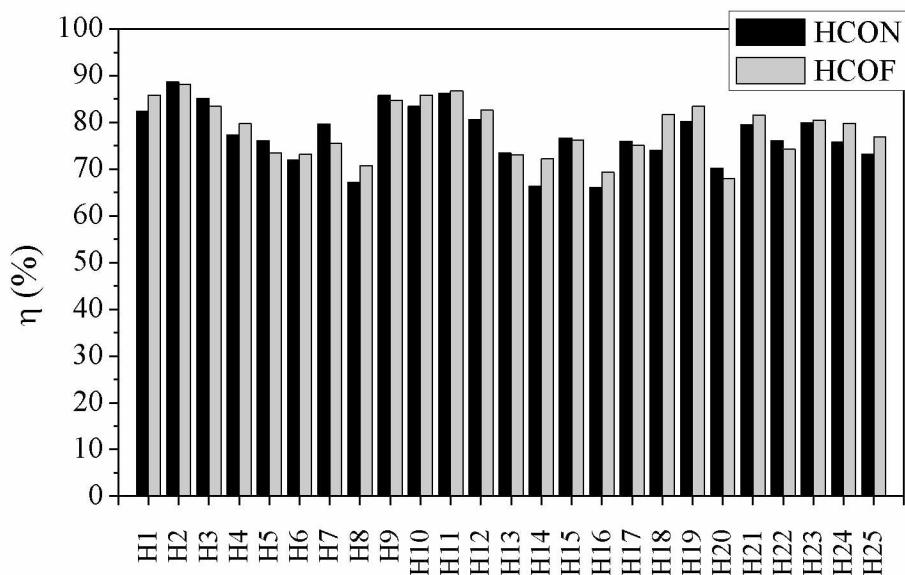


Figura 4.27 – Eficiência total para os hidrociclos HCOF e HCON.

A eficiência total dos hidrociclos cônico-filtrantes foi influenciada da seguinte maneira, devido a variações das dimensões geométricas estudadas no PCC:

- Assim como para a razão de líquido, incrementos no diâmetro de alimentação não provocaram alterações significativas na eficiência total dos hidrociclos HCOF (pares de hidrociclone 1-9, 2-10, 3-11, 4-12, 5-13, 6-14, 7-15, 8-16 e 17-18).
- Incrementos no diâmetro de *overflow* provocam uma queda na eficiência total (pares de hidrociclone: 1-5, 2-6, 3-7, 4-8, 9-13, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20). Diâmetros de *overflow* maiores impõem restrições menos intensas, ocasionando a descarga de grande parte do líquido pelo orifício de *overflow* juntamente com as partículas.
- Um incremento no comprimento total do hidrociclone provocou acréscimos ou decréscimos na eficiência total dependendo do ângulo do tronco de cone utilizado. Para X₄ no nível -1, um incremento no *L* aumentou a eficiência total (pares de hidrociclone: 5-7, 9-11 e 13-15). Nos demais casos um incremento no comprimento

total provocou a queda da eficiência total (pares de hidrociclone: 1-3, 2-4, 6-8, 10-12, 14-16 e 21-22).

- Com exceção dos pares de hidrociclone 1-2 e 9-10, um incremento no ângulo do tronco de cone diminuiu a eficiência total (pares de hidrociclone: 3-4, 5-6, 7-8, 11-12, 13-14, 15-16 e 23-24). Menores ângulos favoreceram a eficiência total, pois aumentaram a razão de líquido e diminuíram a velocidade radial, fazendo com que as partículas fossem mantidas por mais tempo junto à parede cônica até serem coletadas pela corrente de *underflow* (VIEIRA, 2006).

Na Figura 4.28 podem ser observados os diâmetros de corte obtidos para os hidrociclos cônico-filtrantes e convencionais segundo o planejamento composto central. Os resultados experimentais mostraram que diâmetros de corte variaram em um amplo intervalo, de 1 a 12 μm para os hidrociclos HCOF e de 1 a 11 μm para os hidrociclos HCON.

Os menores diâmetros de corte dos hidrociclos HCOF foram obtidos para configurações que tiveram eficiências totais elevadas, haja vista que o diâmetro de corte é inversamente proporcional à eficiência total. Como pode ser observado na Figura 4.28, o diâmetro de corte do hidrociclo HCOF foi maior ou menor do que o do hidrociclo HCON dependendo da geometria estudada.

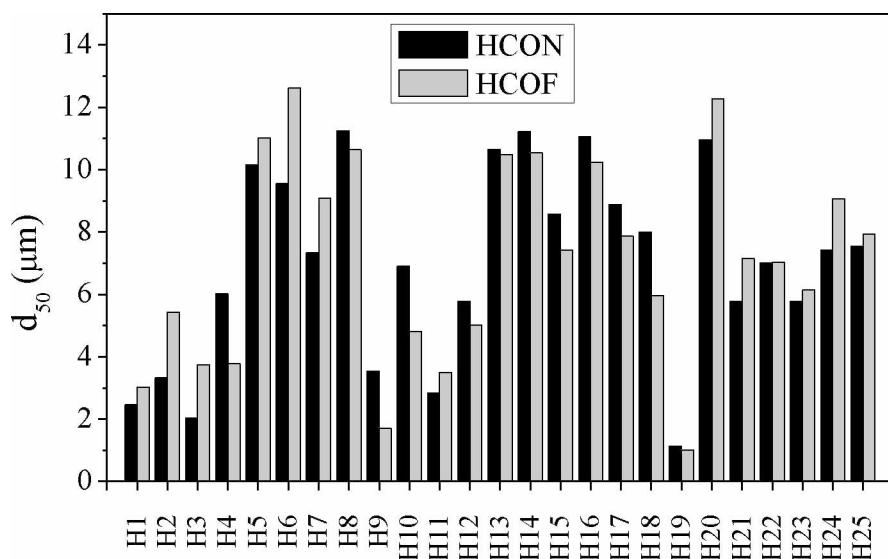


Figura 4.28 – Diâmetro de corte para os hidrociclos HCOF e HCON.

Conforme os resultados apresentados na Figura 4.28 verificou-se que as variáveis diâmetro de *overflow* (pares de hidrociclone: 1-5, 2-6, 3-7, 4-8, 9-13, 10-14, 11-15, 12-16 e 19-20), seguido do ângulo do tronco de cone (pares de hidrociclone: 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14, 15-16, 23-24), foram as que mais influenciaram no diâmetro de corte dos hidrociclos HCOF e HCON. Logo, hidrociclos que tenham diâmetro de *overflow* e ângulo do tronco de cone pequenos, têm mais chance de apresentar alta eficiência total e baixo diâmetro de corte.

De posse dos resultados experimentais, foram realizadas regressões múltiplas para as respostas: eficiência total (Equação 4.15) e diâmetro de corte (Equação 4.16) do hidrociclo cônico-filtrante.

$$\eta = 77,30 + X_i' b_{3d} + X_i' B_{3d} X_i \quad R^2 = 0,907 \quad (4.15)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{3d} = \begin{bmatrix} 0 \\ -5,530 \\ -1,126 \\ -0,856 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{3d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1,355 \\ 0 & 0 & -1,355 & 1,252 \end{bmatrix}$$

$$d_{50} = 7,49 + X_i' b_{4d} + X_i' B_{4d} X_i \quad R^2 = 0,963 \quad (4.16)$$

Em que:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}, \quad b_{4d} = \begin{bmatrix} -0,408 \\ 3,241 \\ -0,299 \\ 0,835 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B_{4d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,364 & -0,522 & 0 \\ 0 & -0,522 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

As superfícies de resposta para a eficiência total dos hidrociclos cônico-filtrantes estão ilustradas na Figura 4.29, considerando os pares X_2 - X_4 e X_3 - X_4 , com os demais fatores, quando não mencionados, no nível central.

A equação de regressão e as superfícies de resposta para os hidrociclos HCOF mostraram que o diâmetro de *overflow* (X_2) foi a variável que mais influenciou a eficiência total, seguido do ângulo do tronco de cone (X_4). Além disso, pode ser observado através da Figura 4.29 (b), que o comprimento total do hidrociclo (X_3) apresentou forte dependência e interação com a variável ângulo do tronco de cone. Se o θ se encontra em um nível elevado,

um incremento no L diminui a eficiência total, porém, se o θ está em um nível baixo, um incremento no L provoca um acréscimo na eficiência total dos hidrociclos HCOF.

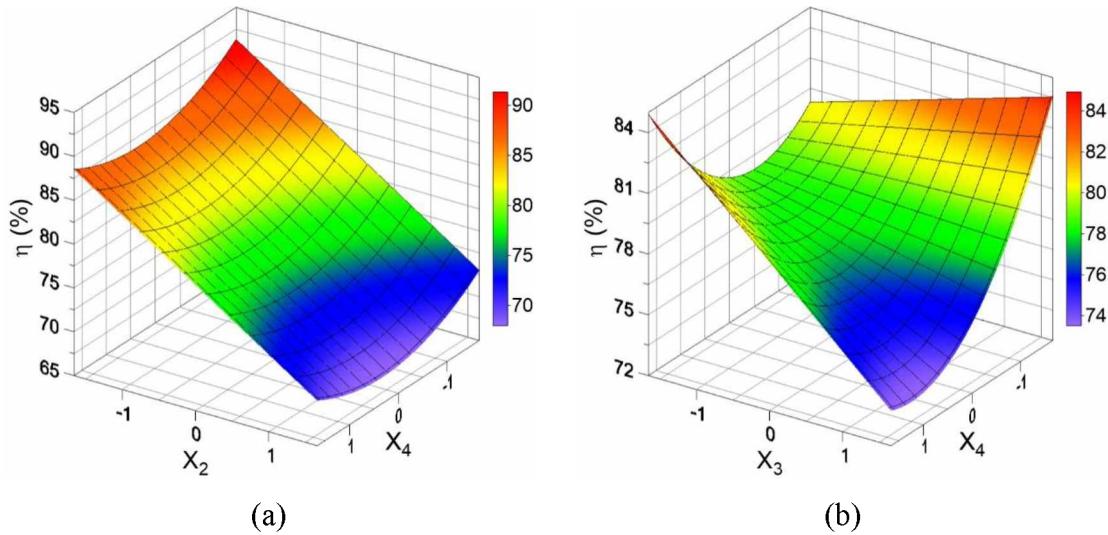


Figura 4.29 – Superfícies de resposta para a eficiência total para os hidrociclos HCOF segundo os pares X_2 - X_4 (a) e X_3 - X_4 (b).

Resumindo as considerações anteriores e analisando apenas a eficiência total, a configuração 2 para os hidrociclos HCOF e HCON seria a mais indicada para maximizar essa resposta. Este resultado foi o mesmo observado para as outras configurações de hidrociclos filtrantes estudadas. Lembrando que esta configuração 2 apresenta níveis baixos para Di , Do e L , e mais alto para θ .

4.3.4 - Concentração Volumétrica da Corrente de *Underflow*

Na Figura 4.30 são apresentadas as concentrações volumétricas da corrente de underflow (C_{VU}) obtidas experimentalmente para os hidrociclos cônico-filtrantes em relação aos hidrociclos convencionais, segundo as configurações geométricas especificadas pela Matriz de Planejamento.

Os valores experimentais obtidos para a concentração de sólidos no *underflow* estiveram na faixa de 1,9 a 5,0% para os hidrociclos HCOF e de 1,9 a 9,5% para os hidrociclos HCON. A C_{VU} dos hidrociclos cônico-filtrantes foi sempre minorada em relação aos hidrociclos convencionais, refletindo o comportamento apresentado pela razão

de líquido. Foram observados decréscimos médios na concentração do *underflow* de 22%, sendo que nas configurações filtrantes 5 e 13 essa diminuição da C_{VU} em relação aos hidrociclos convencionais esteve acima dos 50%.

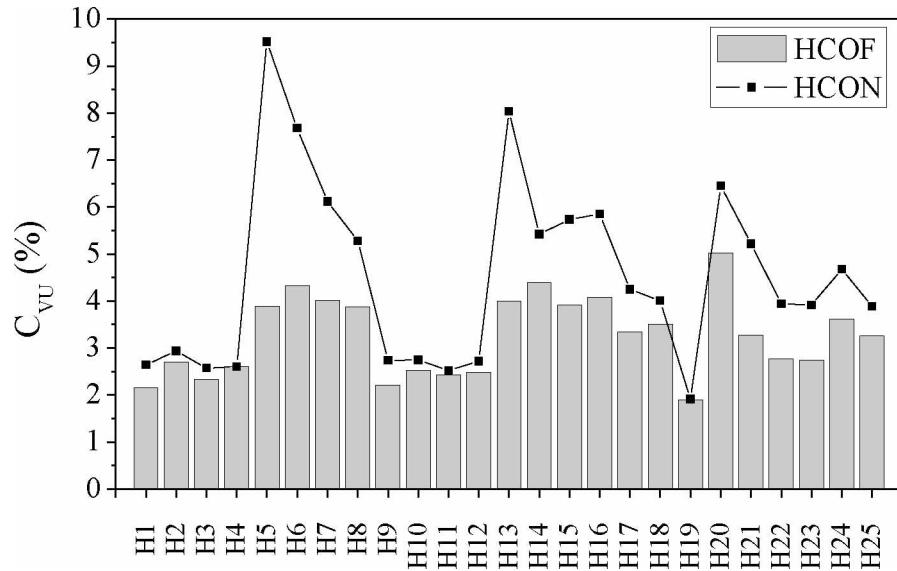


Figura 4.30 – Concentração volumétrica de sólidos na corrente de *underflow* para os hidrociclos HCOF e HCON.

A Figura 4.30 mostrou ainda que o diâmetro de *overflow* foi a principal dimensão a influenciar na concentração volumétrica do *underflow* (incrementos no *Do* provocaram acréscimos na C_{VU}), assim como foi observado para as modalidades HCICOF e HCIF.

Além disso, foi observado ainda, que os pares de hidrociclos convencionais 5-13 e 6-14 apresentaram concentrações volumétricas do *underflow* diferentes apesar de terem valores de razão de líquido próximos. Isso é explicado pelo fato dos hidrociclos nas configurações 5 e 6 apresentarem eficiência total superiores aos 13 e 14, respectivamente. Sendo assim, os equipamentos HCON nas geometrias 5 e 6 tiveram uma maior C_{VU} em relação a seus respectivos pares.

4.4 - Estudos de Caso de Otimização

A seguir serão apresentados os resultados da otimização dos três estudos de caso propostos para cada modalidade de hidrociclo (HCICOF, HCIF, HCOF e HCON). Como já

mencionado na seção 3.4.3, as otimizações foram realizadas utilizando como funções objetivo e como restrições as equações de regressão para o número de Euler (Equações 4.1, 4.2, 4.9 e 4.13), razão de líquido (Equações 4.3, 4.4, 4.10 e 4.14), eficiência total (Equações 4.5, 4.6, 4.11 e 4.15) e diâmetro de corte (Equações 4.7, 4.8, 4.12 e 4.16).

Vale ressaltar que as equações de regressão obtidas nas seções anteriores são válidas para a faixa experimental utilizada no planejamento composto central: $0,13 \leq Di/Dc \leq 0,29$; $0,19 \leq Do/Dc \leq 0,35$; $3,9 \leq L/Dc \leq 7,6$ e $9,0^\circ \leq \theta \leq 20,0^\circ$. Além disso, a análise dos resíduos para as regressões múltiplas indicou que os mesmos eram aleatórios, independentes e que seguiam uma distribuição normal com média zero e variância constante.

No Capítulo 3, foi mencionado que, caso a geometria otimizada para os hidrociclones HCICOF e HCIF apresentasse uma configuração com cilindro diferente dos já confeccionados, o ensaio experimental seria realizado utilizando um cilindro que chegassem mais próximo do comprimento total do hidrociclone fornecido pela otimização. Dessa forma, quando apresentados os resultados obtidos pelo algoritmo de ED, os valores dos comprimentos totais do hidrociclone (L) já estarão corrigidos para a dimensão geométrica na qual foi realizado o teste experimental.

4.4.1 - Caso 1: Maximização da Eficiência Total com $Eu < 5000$

As configurações geométricas obtidas pelo Caso 1 de otimização para os hidrociclones HCICOF, HCIF, HCOF e HCON são mostradas na Tabela 4.1. Além disso, podem ser vistos os valores de eficiência total (η) e de número de Euler (Eu) previstos pelas equações empíricas. Os hidrociclones otimizados do caso 1 apresentam eficiência total máxima para um número de Euler inferior a 5000.

A análise das equações de regressão para a eficiência total (Equações 4.5, 4.6, 4.11 e 4.15) mostrada anteriormente indicou que as principais variáveis a influenciar essa resposta foram o diâmetro de *overflow* e o ângulo do tronco de cone (o aumento do Do e do θ reduz a eficiência). Isso explica o menor nível da faixa experimental obtido para os fatores X_2 e X_4 ($-\alpha$), já que o objetivo da otimização do caso 1 foi maximizar a eficiência total.

Tabela 4.1 – Resultados do algoritmo de Evolução Diferencial para otimização do Caso 1.

Hidrociclone	Variáveis				η (%)	Eu
HCICOF-OT1	$X_1 = -1$ $Di/Dc = 0,16$	$X_2 = -1,66$ $Do/Dc = 0,19$	$X_3 = +1,39$ $L/Dc = 7,3$	$X_4 = -1,66$ $\theta = 9,0^\circ$	93,91	3776
HCIF-OT1	$X_1 = -1$ $Di/Dc = 0,16$	$X_2 = -1,66$ $Do/Dc = 0,19$	$X_3 = +1,39$ $L/Dc = 7,3$	$X_4 = -1,66$ $\theta = 9,0^\circ$	92,23	4199
HCOF-OT1	$X_1 = 0$ $Di/Dc = 0,21$	$X_2 = -1,66$ $Do/Dc = 0,19$	$X_3 = +1,66$ $L/Dc = 7,6$	$X_4 = -1,66$ $\theta = 9,0^\circ$	93,22	1884
HCON-OT1	$X_1 = +1$ $Di/Dc = 0,26$	$X_2 = -1,66$ $Do/Dc = 0,19$	$X_3 = +1,66$ $L/Dc = 7,6$	$X_4 = -1,66$ $\theta = 9,0^\circ$	96,44	2498

4.4.1.1 - Validação Experimental para o Caso 1 do Hidrociclone HCICOF

Na Tabela 4.2 são mostrados os resultados experimentais obtidos para eficiência total e número de Euler do hidrociclone HCICOF-OT1. Além disso, apresenta também os resultados para algumas configurações que tiveram as maiores eficiências do planejamento e seus desvios em relação ao hidrociclone otimizado.

Tabela 4.2 – Resultados experimentais de eficiência total e número de Euler para o caso 1 dos hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes.

Hidrociclone	η (%)	Eu	Comparação η com HCICOF-OT1	Comparação Eu com HCICOF-OT1
HCICOF-OT1	89,59	3335	-	-
HCICOF2	82,91	3897	-7,4%	+16,9%
HCICOF3	84,81	3373	-5,3%	+1,1%
HCICOF4	81,83	3375	-8,7%	+1,2%
HCICOF10	81,82	1373	-8,7%	-58,8%
HCICOF11	80,88	1055	-9,7%	-68,4%
HCICOF19	83,47	1847	-6,8%	-44,6%

Notou-se que a eficiência total do HCICOF-OT1 foi maior do que todas as outras encontradas para os hidrociclos do planejamento experimental. Dentre as geometrias do planejamento, a configuração 3 foi a que forneceu a maior eficiência total, pois tinha o diâmetro de *overflow* e o ângulo do tronco de cone no nível -1, e essa combinação, como já

foi visto, favorece a resposta em questão. Na Tabela 4.2 é mostrado também que o hidrociclone HCICOF3 apresentou eficiência total 5,3% menor do que a geometria otimizada HCICOF-OT1, a um custo energético praticamente igual (1,1% de diferença no número de Euler). Analisando as dimensões geométricas apresentadas pelo HCICOF-OT1 ($X_1 = -1$, $X_2 = -1,66$, $X_3 = +1,39$ e $X_4 = -1,66$) e pelo HCICOF3 ($X_1 = -1$, $X_2 = -1$, $X_3 = +1$ e $X_4 = -1$) pode-se afirmar que a maior eficiência do primeiro se deve aos menores níveis de diâmetro de *overflow* e de ângulo do cone apresentados pela sua configuração, fatores extremamente decisivos no desempenho do equipamento.

Além disso, a Tabela 4.2 mostrou ainda que as geometrias 10, 11 e 19 do planejamento para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes apresentaram eficiências totais 8,7%, 9,7% e 6,8% menores em relação ao HCICOF-OT1, associadas a um número de Euler cerca de 59%, 68% e 45% também menores, respectivamente. Isso ocorreu pois o diâmetro de alimentação afeta o número de Euler maneira inversamente proporcional, e para o HCICOF-OT1 esse fator estava no nível -1 e para os outros hidrociclos estava nos níveis +1 (HCICOF10 e HCICOF11) e 0 (HCICOF19). Uma vez que o objetivo primário desse estudo de caso foi majorar a eficiência total, o aumento do número de Euler ficou em segundo plano.

4.4.1.2 - Validação Experimental para o Caso 1 do Hidrociclone HCIF

Os resultados experimentais para eficiência total e número de Euler do hidrociclone HCIF-OT1 podem ser vistos na Tabela 4.3. As geometrias do planejamento experimental que tiveram as maiores eficiências totais e seus desvios em relação ao hidrociclone otimizado também estão apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados experimentais de eficiência total e número de Euler para o caso 1 dos hidrociclos cilíndrico-filtrantes.

Hidrociclone	η (%)	Eu	Comparação η com HCIF-OT1	Comparação Eu com HCIF-OT1
HCIF-OT1	91,91	4190	-	-
HCIF2	85,02	4832	-7,5%	+15,3%
HCIF3	82,18	3911	-10,6%	-6,7%
HCIF4	80,07	3846	-12,9%	-8,2%
HCIF19	82,83	2161	-9,9%	-48,4%

Observando a Tabela 4.3, pode-se verificar que a eficiência total do HCIF-OT1 foi a maior dentre todas as obtidas para os hidrociclos do planejamento experimental com os hidrociclos cilíndrico-filtrantes. A configuração 2 foi a geometria do PCC que teve a maior eficiência total, entretanto, foi 7,5% menor do que a do hidrociclo otimizado HCIF-OT1, com um gasto energético aproximadamente 15% superior. Diante do que foi discutido na seção 4.3, o fato do hidrociclo HCIF-OT1 ($X_1 = -1$, $X_2 = -1,66$, $X_3 = +1,39$ e $X_4 = -1,66$) apresentar as variáveis Do e θ em níveis mais baixos do que o HCIF2 ($X_1 = -1$, $X_2 = -1$, $X_3 = -1$ e $X_4 = +1$), foi determinante para que sua eficiência total fosse majorada.

A Tabela 4.3 mostrou ainda que dentre as geometrias do planejamento que tiveram as maiores eficiências totais, a HCIF19 foi a que apresentou o menor número de Euler em relação ao hidrociclo otimizado HCIF-OT1 (48,4% menor), o que pode ser explicado pelo fato do HCIF19 possuir o diâmetro de alimentação no nível 0 enquanto que para o HCIF-OT1 estava no nível -1, e esse fator influencia significativamente no número de Euler.

4.4.1.3 - Validação Experimental para o Caso 1 do Hidrociclo HCOF

Na Tabela 4.4 podem ser vistos os resultados experimentais obtidos para eficiência total e número de Euler do hidrociclo otimizado HCOF-OT1 e também para as configurações que tiveram as maiores eficiências totais do planejamento dos hidrociclos cônico-filtrantes e seus desvios em relação à geometria otimizada.

Tabela 4.4 – Resultados experimentais de eficiência total e número de Euler para o caso 1 dos hidrociclos cônico-filtrantes.

Hidrociclo	η (%)	Eu	Comparação η com HCOF-OT1	Comparação Eu com HCOF-OT1
HCOF-OT1	90,31	1715	-	-
HCOF1	85,85	3893	-4,9%	+127,0%
HCOF2	88,12	3747	-2,4%	+118,5%
HCOF9	84,66	1407	-6,3%	-18,0%
HCOF10	85,79	1396	-5,0%	-18,6%
HCOF11	86,74	1238	-4,0%	-27,8%

A eficiência total obtida para o hidrociclo HCOF-OT1 foi de 90,31%, sendo que esse valor foi superior ao do HCOF2, que foi maior dentre as encontradas para os

hidrociclones do planejamento experimental. A configuração 2 teve a eficiência total apenas 2,4% menor do que a do hidrociclone otimizado HCOF-OT1, no entanto, apresentou um número de Euler 118,5% superior. A maior eficiência da geometria otimizada deve-se aos menores níveis de diâmetro de *overflow* e de ângulo do cone apresentados pela sua configuração (HCOF-OT1: $X_1 = 0$, $X_2 = -1,66$, $X_3 = +1,66$ e $X_4 = -1,66$; e HCOF2: $X_1 = -1$, $X_2 = -1$, $X_3 = -1$ e $X_4 = +1$). Já o gasto energético significativamente menor do HCOF-OT1, é explicado principalmente, pelo fato dos fatores X_1 e X_3 estarem em níveis mais altos para essa geometria, o que favorece a obtenção de Eu mais baixos.

Analizando os resultados da Tabela 4.4, constatou-se que as geometrias 9, 10 e 11 do planejamento para os hidrociclones cônico-filtrantes apresentaram eficiências totais um pouco menores em relação ao HCOF-OT1 (6,3%, 5,0% e 4,0%), a um custo energético cerca de 18%, 19% e 28% também menores, respectivamente. Como já foi explicado, o diâmetro de alimentação afeta o número de Euler maneira inversamente proporcional, e para o HCOF-OT1 esse fator estava no nível -1 e para as demais geometrias citadas estava no nível +1.

4.4.1.4 - Validação Experimental para o Caso 1 do Hidrociclone HCON

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados experimentais para eficiência total e número de Euler do hidrociclone HCON-OT1 e ainda, as configurações geométricas do planejamento experimental que tiveram as maiores eficiências totais e seus desvios em relação ao hidrociclone convencional otimizado.

Tabela 4.5 – Resultados experimentais de eficiência total e número de Euler para o caso 1 dos hidrociclones convencionais.

Hidrociclone	η (%)	Eu	Comparação η com HCON-OT1	Comparação Eu com HCON-OT1
HCON-OT1	95,47	2547	-	-
HCON1	82,36	5402	-13,7%	+112,1%
HCON2	88,63	4839	-7,2%	+90,0%
HCON3	85,11	4315	-10,9%	+69,4%
HCON9	85,76	2176	-10,2%	-14,6%
HCON10	83,44	1884	-12,6%	-26,0%
HCON11	86,20	1696	-9,7%	-33,4%

Pôde-se verificar que a eficiência total do HCON-OT1 foi significativamente maior que as obtidas para demais os hidrociclos do planejamento experimental como mostra a Tabela 4.5. Dentre os hidrociclos do PCC que tiveram as maiores eficiências se destacou a configuração 2, porém, com um decréscimo em relação ao HCON-OT1 de 7,2% combinado a um consumo energético aproximadamente 90% superior, logo, a geometria obtida para o HCON-OT1 é extremamente vantajosa. Assim como aconteceu para os hidrociclos cônico-filtrantes, a maior eficiência da geometria otimizada é entendida pelos menores níveis de diâmetro de *overflow* e de ângulo do cone apresentados pela sua configuração em relação ao HCON2. Por outro lado, o fato dos fatores X_1 e X_3 estarem em níveis mais altos para o HCON-OT1 explica o menor número de Euler do HCON-OT1 obtido para essa geometria.

Da mesma forma que foi mostrado para as modalidades HCICOF e HCOF, os hidrociclos nas configurações 10, 11 e 19 do planejamento apresentaram eficiências totais altas, porém menores em relação ao hidrociclo otimizado associadas a um número de Euler também mais baixo. Apesar do diâmetro de alimentação do HCON-OT1 estar no mesmo nível das configurações citadas, o diâmetro de *overflow* está em um nível mais baixo e essa variável tem grande influência no número de Euler para os hidrociclos convencionais.

4.4.2 - Caso 2: Minimização da Razão de Líquido com $d_{50} < 14 \mu\text{m}$

As geometrias dos hidrociclos obtidos através do algoritmo de ED para o segundo estudo de caso são mostradas na Tabela 4.6, na qual constam ainda a razão de líquido e o diâmetro de corte previstos pelas equações empíricas. Esses hidrociclos fornecem razão de líquido mínima a um diâmetro de corte inferior a $14 \mu\text{m}$.

A variável que mais influenciou a razão de líquido segundo as equações de regressão foi o diâmetro de *overflow*. Assim, para minimizar a razão de líquido, o diâmetro de *overflow* encontrado pelo algoritmo deveria ser o maior valor disponível, como mostra a Tabela 4.6.

Em relação ao ângulo do tronco de cone, os resultados experimentais indicaram que um equipamento com maior ângulo levou a razões de líquido mais baixas, mantidas constantes as demais variáveis. Portanto, desconsiderando as interações entre as variáveis, era esperado que o algoritmo retornasse valores maiores para o ângulo do tronco de cone, o que ocorreu somente para os hidrociclos HCICOF e HCOF, como pode ser visto na Tabela 4.6. Para os hidrociclos HCIF e HCON o algoritmo forneceu θ no nível intermediário a fim de

minimizar a razão de líquido. Dessa forma, como já foi explicado anteriormente, ficou claro que o maior efeito sobre a razão de líquido foi causado pelo Do e acredita-se que as demais variáveis tenham sido obtidas por meio do algoritmo devido à interação entre elas.

Tabela 4.6 – Resultados do algoritmo de Evolução Diferencial para as otimizações do Caso 2.

Hidrociclone	Variáveis				RL (%)	d_{50} (μm)
HCICOF-OT2	$X_1 = +1,66$ $Di/Dc = 0,29$	$X_2 = +1,66$ $Do/Dc = 0,35$	$X_3 = -0,82$ $L/Dc = 4,9$	$X_4 = +1,66$ $\theta = 20,0^\circ$	10,96	13,81
HCIF-OT2	$X_1 = +1$ $Di/Dc = 0,26$	$X_2 = +1,66$ $Do/Dc = 0,35$	$X_3 = -0,45$ $L/Dc = 5,3$	$X_4 = 0$ $\theta = 14,5^\circ$	7,14	13,16
HCOF-OT2	$X_1 = +1,66$ $Di/Dc = 0,29$	$X_2 = +1,66$ $Do/Dc = 0,35$	$X_3 = -1$ $L/Dc = 4,7$	$X_4 = +1,66$ $\theta = 20,0^\circ$	11,96	13,74
HCON-OT2	$X_1 = -1,66$ $Di/Dc = 0,13$	$X_2 = +1,66$ $Do/Dc = 0,35$	$X_3 = -1,66$ $L/Dc = 3,9$	$X_4 = 0$ $\theta = 14,5^\circ$	4,31	11,49

4.4.2.1 - Validação Experimental para o Caso 2 do Hidrociclone HCICOF

A Tabela 4.7 mostra os dados experimentais obtidos para o hidrociclone HCICOF-OT2. Além disso, algumas configurações que tiveram as menores razões de líquido do planejamento foram selecionados para comparação de desempenho com o HCICOF-OT2.

Tabela 4.7 – Resultados experimentais para o HCICOF-OT2 e para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes com menores razões de líquido.

HCICOF-OT2	HCICOF6	HCICOF14	HCICOF20	Comparação em relação ao HCICOF-OT2		
				HCICOF6	HCICOF14	HCICOF20
RL (%)	12,42	16,83	15,84	14,58	+35,5%	+27,5%
η (%)	63,24	72,17	67,28	65,35	+14,1%	+6,4%
Eu	561	3083	775	952	+449,9%	+38,3%
d_{50} (μm)	13,49	11,51	12,55	14,26	-14,6%	-7,0%
						+5,7%

O hidrociclone HCICOF-OT2 teve razão de líquido igual a 12,42%, sendo que esse valor foi o menor do que todos os outros encontrados para os hidrociclos do planejamento experimental. Além disso, a Tabela 4.7 mostrou que as geometrias 6, 14 e 20 do planejamento para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes foram as que apresentaram as menores razões de líquido, entretanto, os valores obtidos para essas configurações estiveram 35,5%, 27,5% e 17,4%, respectivamente, acima do relacionado ao HCICOF-OT2.

Os resultados experimentais do hidrociclone HCICOF-OT2, mostraram ainda que a eficiência total obtida para esse equipamento foi a mais baixa dentre todos os hidrociclos da mesma categoria. O que contribuiu para isso, foi o fato da geometria otimizada apresentar as variáveis Do e θ no nível mais alto ($X_2 = +1,66$ e $X_4 = +1,66$), o que é extremamente desfavorável para a eficiência total. Em relação aos equipamentos de baixa razão de líquido, a eficiência total dos hidrociclos HCICOF6, HCICOF14 e HCICOF20 foi superior à do HCICOF-OT2 em 14,1%, 6,4% e 3,3%, respectivamente.

Adicionalmente, outro dado relevante é que o consumo energético da nova configuração geométrica foi o menor dentre todos valores observados para o planejamento experimental. Isso pode ser explicado pela geometria otimizada ser constituída do diâmetro de alimentação no nível mais alto ($X_1 = +1,66$), conseguindo receber uma maior quantidade de fluido por tempo e apresentando um número de Euler pequeno. Em comparação com as configurações que tiveram baixo RL , o número de Euler dos hidrociclos HCICOF6, HCICOF14 e HCICOF20 foi superior ao do HCICOF-OT2 em 449,9%, 38,3% e 69,8%, respectivamente.

4.4.2.2 - Validação Experimental para o Caso 2 do Hidrociclone HCIF

Na Tabela 4.8 podem ser vistos os dados experimentais obtidos para o hidrociclone HCIF-OT2. Uma comparação com as geometrias do planejamento experimental que tiveram as menores razões de líquido em relação ao hidrociclo otimizado também está apresentada.

Analizando a Tabela 4.8 constatou-se que a razão de líquido do hidrociclone HCIF-OT2 (7,89%) foi a menor dentre todas as obtidas para os hidrociclos do planejamento experimental. Além do mais, os resultados experimentais da geometria otimizada apresentaram baixo número de Euler associado a uma eficiência total razoável, o que é explicado pelas dimensões apresentadas pela geometria otimizada ($X_1 = +1$, $X_2 = +1,66$, $X_3 =$

-0,45 e $X_4 = 0$): Di e Do em níveis altos favorecem baixo gasto energético, e Do no nível alto e θ no nível intermediário não conduzem a um alto desempenho na separação.

Tabela 4.8 – Resultados experimentais para o HCIF-OT2 e para os hidrociclos cilíndrico-filtrantes com menores razões de líquido.

	HCIF-OT2	HCIF6	HCIF14	HCIF20	Comparação em relação ao HCIF-OT2		
					HCIF6	HCIF14	HCIF20
RL (%)	7,89	10,13	10,10	9,18	+28,4%	+28,1%	+16,4%
η (%)	64,79	70,63	67,13	64,41	+9,0%	+3,6%	-0,6%
Eu	780	3525	912	1061	+351,7%	+16,8%	+36,0%
d_{50} (μm)	13,28	12,41	12,93	12,91	-6,6%	-2,7%	-2,8%

Assim como foi discutido para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes as geometrias 6, 14 e 20 do planejamento para os HCIF foram as que apresentaram as menores razões de líquido, sendo que os valores obtidos estiveram 28,4%, 28,1% e 16,4%, respectivamente, acima do encontrado para o HCIF-OT2. Foi observado ainda que essas configurações tiveram eficiência total um pouco maior do que a geometria otimizada, a um custo da elevação do consumo energético. O número de Euler dos hidrociclos HCIF6, HCIF14 e HCIF20 foi superior ao do HCIF-OT2 em 351,7%, 16,8% e 36,0%, respectivamente, como mostra a Tabela 4.8.

4.4.2.3 - Validação Experimental para o Caso 2 do Hidrociclo HCOF

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados experimentais obtidos para o hidrociclo otimizado HCOF-OT2, bem como para as configurações do planejamento composto central que tiveram os menores valores de razão de líquido.

O hidrociclo HCOF-OT2 teve razão de líquido igual a 9,59%, valor esse significativamente menor que todos os outros obtidos para os hidrociclos do planejamento experimental. As geometrias 6, 14 e 20 do planejamento, assim como para os hidrociclos HCICOF e HCIF, foram as que apresentaram as menores razões de líquido. As RL para essas configurações estiveram 54,1%, 63,6% e 40,0%, respectivamente, acima da encontrada para o HCOF-OT2. Isso é explicado por a geometria otimizada apresentar as variáveis Do e θ no nível mais alto ($X_2 = +1,66$ e $X_4 = +1,66$), o que conduz à razão de líquido elevada.

Tabela 4.9 – Resultados experimentais para o HCOF-OT2 e para os hidrociclos cônico-filtrantes com menores razões de líquido.

	HCOF-OT2	HCOF6	HCOF14	HCOF20	Comparação em relação ao		
					HCOF6	HCOF14	HCOF20
<i>RL (%)</i>	9,59	14,79	15,69	13,43	+54,1%	+63,6%	+40,0%
<i>η (%)</i>	70,42	73,13	72,21	67,94	+3,8%	+2,5%	-3,5%
<i>Eu</i>	665	2921	818	1099	+339,4%	+23,1%	+65,4%
<i>d₅₀ (μm)</i>	11,76	12,62	10,55	12,27	+7,3%	-10,3%	+4,4%

Ainda analisando a Tabela 4.9, os resultados experimentais do hidrociclo HCOF-OT2 mostraram que a eficiência total desse equipamento foi muito próximo às obtidas para separadores com baixa *RL*, (HCOF6, HCOF14 e HCOF20) apresentando variações em módulo de, no máximo, 3,8%.

Além disso, a geometria otimizada para minimizar a *RL* se destacou por apresentar o menor consumo energético dentre todos valores observados para os hidrociclos cônico-filtrantes estudados. Isso pode ser explicado pela geometria otimizada ser constituída do diâmetro de alimentação no nível mais alto ($X_1 = +1,66$), conseguindo receber uma maior quantidade de fluido por tempo e apresentando um número de Euler pequeno. Comparando o HCOF-OT2 com as configurações que tiveram baixa razão de líquido, observou-se que o número de Euler dos hidrociclos HCOF6, HCOF14 e HCOF20 teve um acréscimo de 339,4%, 23,1% e 65,4%, respectivamente, em relação ao da configuração ótima.

4.4.2.4 - Validação Experimental para o Caso 2 do Hidrociclo HCON

Na Tabela 4.10 podem ser vistos os resultados experimentais obtidos para o hidrociclo otimizado HCON-OT2 e também para as configurações que tiveram as menores razões de líquido do planejamento dos hidrociclos convencionais e seus desvios em relação à geometria otimizada.

A razão de líquido obtida experimentalmente para o hidrociclo HCON-OT2 foi igual a 5,53%, sendo esse valor relativamente menor do que os apresentados para os hidrociclos convencionais do planejamento. As geometrias 5, 6 e 13 foram as que apresentaram as menores razões de líquido e, no entanto, as *RL* para essas configurações foram 34,7%, 64,7% e 53,4% maiores do que do HCON-OT2, respectivamente.

Tabela 4.10 – Resultados experimentais para o HCON-OT2 e para os hidrociclos convencionais com menores razões de líquido.

	HCON-OT2	HCON5	HCON6	HCON13	Comparação em relação ao HCON-OT2		
					HCON5	HCON6	HCON13
<i>RL (%)</i>	5,53	7,45	9,10	8,48	+34,7%	+64,7%	+53,4%
<i>η (%)</i>	70,88	76,08	71,91	73,40	+7,3%	+1,5%	+3,6%
<i>Eu</i>	6100	4060	3548	1272	-33,4%	-41,8%	-79,1%
<i>d₅₀ (μm)</i>	12,38	10,15	9,56	10,65	-18,0%	-22,8%	-14,0%

Pela Tabela 4.10, constatou-se ainda que a eficiência total do hidrociclo HCON-OT2 esteve próxima das obtidas para os separadores com baixa *RL*, porém foi minorada. A eficiência total dos hidrociclos HCON5, HCON6 e HCON13 foi superior à do HCON-OT2 em 7,3%, 1,5% e 3,6%, respectivamente.

Outro fato que pode ser observado através da Tabela 4.10, foi o elevado número de Euler obtido pela geometria otimizada (6100). Isso pode ser explicado pelo hidrociclo HCON-OT2 ser constituído do diâmetro de alimentação e do comprimento total no menor nível ($X_1 = -1,66$ e $X_3 = -1,66$), o que é muito desfavorável e faz com o hidrociclo apresente um grande consumo energético. Verificou-se que o número de Euler dos hidrociclos HCON5, HCON6 e HCON13 tiveram decréscimos de 33,4%, 41,8% e 79,1%, respectivamente, em relação ao hidrociclo HCON-OT2.

4.4.3 - Caso 3: Minimização do Número de Euler com $d_{50} < 14 \mu\text{m}$

As configurações geométricas obtidas através do algoritmo de ED para os hidrociclos HCICOF, HCIF, HCOF e HCON, bem como os valores de número de Euler e do diâmetro de corte previstos pelas equações empíricas para os hidrociclos do caso 3 de otimização encontram-se na Tabela 4.11. Esses hidrociclos apresentam o menor número de Euler para um diâmetro de corte inferior a 14 μm .

Segundo os resultados experimentais e as equações de regressão obtidas para o número de Euler (Equações 4.1, 4.2, 4.9 e 4.13) observou-se que as variáveis que mais impactaram essa resposta foram o diâmetro de alimentação e o diâmetro de *overflow*. Mantidas constantes as demais variáveis, para obter o menor número de Euler, seria esperado que o diâmetro de alimentação encontrado pelo algoritmo fosse o maior nível disponível (X_1

= +1,66). Porém, devido às interações existentes entre as variáveis e à não linearidade da resposta, o algoritmo forneceu o segundo maior nível possível para o diâmetro de alimentação ($X_1 = +1$).

Tabela 4.11 – Resultados do algoritmo de Evolução Diferencial para as otimizações do Caso 3.

Hidrociclone	Variáveis				Eu	d_{50} (μm)
HCICOF-OT3	$X_1 = +1$ $Di/Dc = 0,26$	$X_2 = +1,66$ $Do/Dc = 0,35$	$X_3 = +0,82$ $L/Dc = 6,7$	$X_4 = +1,66$ $\theta = 20,0^\circ$	406	11,08
HCIF-OT3	$X_1 = +1$ $Di/Dc = 0,26$	$X_2 = +1,66$ $Do/Dc = 0,35$	$X_3 = 0$ $L/Dc = 5,8$	$X_4 = 0$ $\theta = 14,5^\circ$	566	13,64
HCOF-OT3	$X_1 = +1$ $Di/Dc = 0,26$	$X_2 = +1,66$ $Do/Dc = 0,35$	$X_3 = +1,66$ $L/Dc = 7,6$	$X_4 = -1$ $\theta = 11,2^\circ$	455	8,68
HCON-OT3	$X_1 = +1$ $Di/Dc = 0,26$	$X_2 = +1,66$ $Do/Dc = 0,35$	$X_3 = 0$ $L/Dc = 5,8$	$X_4 = +1,66$ $\theta = 20,0^\circ$	492	13,12

Em relação ao diâmetro de *overflow*, os resultados experimentais do planejamento sugerem que valores maiores de Do provocam uma queda no número de Euler. Portanto, sem considerar as interações entre as variáveis, o algoritmo deveria retornar valores maiores para o diâmetro de *overflow* para minimizar o número de Euler, o que ocorreu para as quatro modalidades de hidrociclone, como pode ser visto na Tabela 4.11.

A análise dos dados experimentais mostrou que o comprimento total do hidrociclone exerceu menor efeito sobre o número de Euler e o ângulo do tronco de cone só influenciou o Eu da modalidade convencional (quanto maior o θ menor o consumo energético).

4.4.3.1 - Validação Experimental para o Caso 3 do Hidrociclone HCICOF

A Tabela 4.12 expõe os resultados experimentais obtidos para o HCICOF-OT3 e para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrantes do planejamento que apresentaram os menores números de Euler e seus desvios em relação à geometria otimizada.

Tabela 4.12 – Resultados experimentais para o HCICOF-OT3 e para os hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes com menores números de Euler.

HCICOF-OT3	HCICOF15	HCICOF16	HCICOF18	Comparação em relação ao HCICOF-OT3		
				HCICOF15	HCICOF16	HCICOF18
<i>Eu</i>	582	639	623	768	+9,8%	+7,1%
η (%)	62,49	68,89	65,88	70,30	+10,2%	+5,4%
RL (%)	14,36	19,74	17,49	24,96	+37,5%	+21,8%
d_{50} (μm)	13,29	10,97	11,85	9,39	-17,5%	-10,9%
						-29,4%

A Tabela 4.12 mostrou que as geometrias 15, 16 e 18 do planejamento experimental foram as que apresentaram os menores números de Euler, e os valores obtidos para essas configurações foram 9,8%, 7,1% e 32,0%, respectivamente, superiores ao HCICOF-OT3. Simultaneamente houve um decréscimo na eficiência total do hidrociclone otimizado em relação às geometrias que apresentaram os menores números de Euler: as configurações 15, 16 e 18 tiveram eficiências totais 10,2%, 5,4% e 12,5% maiores que o HCICOF-OT3, respectivamente.

Sabe-se que hidrociclones que apresentam baixo gasto energético geralmente são menos eficientes. Os resultados da Tabela 4.12 comprovam essa informação mostrando que a geometria otimizada teve a eficiência total mais baixa dentre as obtidas para os hidrociclones cilíndrico-cônico-filtrantes estudados.

Outro fato que pode ser observado pela Tabela 4.12 é que o hidrociclone HCICOF-OT3 apresentou razão de líquido baixa. Essa resposta só não foi menor do que a apresentada pelo HCICOF-OT2 (12,42%). Essa pequena RL ajuda a explicar a baixa eficiência total, visto que uma menor quantidade total de partículas é arrastada para o orifício de *underflow*, diminuindo a eficiência.

Além disso, foi observado que o número de Euler obtido para o hidrociclone cilíndrico-cônico-filtrante otimizado do estudo de caso 2 (561) foi menor do que o obtido para o HCICOF-OT3 (582). As equações de regressão obtidas a partir do planejamento não abrangem simultaneamente mais de uma variável no nível extremo, e esse foi o caso obtido para os hidrociclones HCICOF-OT2 ($X_1 = +1,66$, $X_2 = +1,66$, $X_3 = -0,82$ e $X_4 = +1,66$) e HCICOF-OT3 ($X_1 = +1$, $X_2 = +1,66$, $X_3 = +0,82$ e $X_4 = +1,66$). Portanto, a substituição das variáveis codificadas obtidas pelo algoritmo para o caso 3 fornece uma previsão para o número de Euler de 406, que é muito menor que a previsão para o caso 2, que foi 1009.

4.4.3.2 - Validação Experimental para o Caso 3 do Hidrociclone HCIF

A Tabela 4.13 apresenta os resultados experimentais obtidos para o hidrociclone cilíndrico-filtrante otimizado do caso 3. Além disso, mostra também as três configurações do planejamento composto central que tiveram os menores valores de número de Euler e seus respectivos desvios em relação à geometria otimizada.

Tabela 4.13 – Resultados experimentais para o HCIF-OT3 e para os hidrociclos cilíndrico-filtrantes com menores números de Euler.

	HCIF-OT3	HCIF14	HCIF15	HCIF16	Comparação em relação ao HCIF-OT3		
					HCIF14	HCIF15	HCIF16
<i>Eu</i>	665	912	746	689	+37,1%	+12,2%	+3,5%
η (%)	62,13	67,13	67,75	61,81	+8,0%	+9,0%	-0,5%
<i>RL</i> (%)	9,58	10,10	15,58	13,58	+5,5%	+62,7%	+41,7%
<i>d</i> ₅₀ (μm)	13,88	12,93	11,54	14,80	-6,9%	-16,9%	+6,6%

Notou-se que o número de Euler do HCIF-OT3 foi menor do que todos os outros encontrados para os hidrociclos do planejamento experimental. Dentre as geometrias do planejamento, as configurações 14, 15 e 16 foram as que forneceram os menores *Eu*, pois tinham uma combinação das dimensões que favoreciam a resposta em questão. A Tabela 4.13 mostra que os hidrociclos HCIF14, HCIF15 e HCIF16 apresentaram números de Euler 37,1%, 12,2% e 3,5% maiores do que a geometria otimizada HCIF-OT3, respectivamente.

Essa diminuição do *Eu* da geometria otimizada esteve associada à menor eficiência total obtida para esse equipamento. O valor obtido para essa resposta, 62,13%, foi muito próximo à menor eficiência apresentada entre todos os separadores do planejamento que foi o HCIF16 (61,81%). Entretanto, analisando a eficiência total reduzida, que considera apenas os sólidos coletados no *underflow* pelo efeito exclusivo do campo centrífugo, verificou-se que o resultado para HCIF-OT3 (61,77%) foi maior do que os obtidos para as configurações 8, 12, 16 e 20.

Além disso, pode ser visualizado na Tabela 4.13 que o hidrociclone HCIF-OT3 apresentou uma pequena razão de líquido. Essa resposta foi praticamente igual à obtida para o HCIF20, que teve a menor *RL* do planejamento experimental, 9,18%. E como foi comentado

na seção anterior, essa baixa razão de líquido explica a menor eficiência total, pois menos partículas são arrastadas para o orifício de *underflow*, diminuindo a eficiência.

4.4.3.3 - Validação Experimental para o Caso 3 do Hidrociclone HCOF

Os resultados experimentais para o hidrociclone HCOF-OT3 podem ser vistos na Tabela 4.14. As geometrias do planejamento experimental que tiveram os menores números de Euler e seus desvios em relação ao hidrociclone otimizado também estão apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resultados experimentais para o HCOF-OT3 e para os hidrociclos cônico-filtrantes com menores números de Euler.

	HCOF-OT3	HCOF14	HCOF15	HCOF16	Comparação em relação ao HCOF-OT3		
					HCOF14	HCOF15	HCOF16
<i>Eu</i>	648	818	810	716	+26,3%	+25,0%	+10,4%
η (%)	71,44	72,21	76,13	69,30	+1,1%	+6,6%	-3,0%
<i>RL</i> (%)	15,49	15,69	19,08	17,08	+1,3%	+23,2%	+10,3%
<i>d</i> ₅₀ (μm)	9,80	10,55	7,42	10,23	+7,6%	-24,3%	+4,4%

O hidrociclone HCOF-OT3 teve o número de Euler igual a 648, sendo que esse valor foi o menor do que todos os outros encontrados para os hidrociclos do PCC. Além disso, a Tabela 4.14 mostrou que as geometrias 14, 15 e 16 do planejamento para os hidrociclos cônico-filtrantes foram as que apresentaram os menores *Eu*. Os valores obtidos para essas configurações tiveram acréscimos de 26,3%, 25,0% e 10,4%, respectivamente, em relação ao HCOF-OT3.

Analizando a Tabela 4.14, verificou-se que a eficiência total obtida para o HCOF-OT3 estava relativamente próxima as obtidas para os hidrociclos que tiveram os menores *Eu*. As configurações HCOF14 e HCOF15 apresentaram eficiências totais 1,1% e 6,6% superiores em relação ao HCOF-OT3, e a geometria HCOF16 teve um decréscimo de 3,0% na eficiência em comparação com a geometria otimizada.

4.4.3.4 - Validação Experimental para o Caso 3 do Hidrociclone HCON

Na Tabela 4.15 podem ser vistos os resultados experimentais obtidos para o hidrociclone otimizado HCON-OT3 e também para as configurações que tiveram os menores números de Euler do planejamento dos hidrociclos convencionais e seus desvios em relação à geometria otimizada.

Tabela 4.15 – Resultados experimentais para o HCON-OT3 e para os hidrociclos convencionais com menores números de Euler.

	HCON-OT3	HCON14	HCON15	HCON16	Comparação em relação ao HCON-OT3		
					HCON14	HCON15	HCON16
<i>Eu</i>	845	1099	1056	868	+30,1%	+25,1%	+2,7%
η (%)	66,56	66,32	76,66	66,10	-0,4%	+15,2%	-0,7%
<i>RL</i> (%)	6,31	9,58	12,92	11,04	+51,9%	+104,8%	+75,0%
<i>d</i> ₅₀ (μm)	13,12	11,21	8,58	11,05	-14,6%	-34,6%	-15,8%

O número de Euler obtido para o hidrociclone convencional otimizado do caso 3 foi equivalente a 845, sendo o menor valor dentre os observados para os hidrociclos do PCC. As geometrias 14, 15 e 16 do planejamento foram as que apresentaram os menores *Eu*, no entanto, os valores obtidos para essas configurações tiveram acréscimos de 30,1%, 25,1% e 2,7%, respectivamente, em relação ao HCON-OT3.

Verificou-se que a eficiência total obtida para o HCON-OT3 estava relativamente próxima às obtidas para os hidrociclos que tiveram os menores *Eu*. O HCON15 teve sua eficiência total cerca de 15% maior do que o HCON-OT3. Além disso, os dados experimentais mostraram que a eficiência total da geometria otimizada esteve no mesmo patamar, ou foi superior a vários hidrociclos do planejamento, tais como as configurações 4, 8, 14, 16, 18, 19, 20 e 25.

A Tabela 4.15 mostra ainda que o hidrociclone HCON-OT3 obteve uma baixa razão de líquido, igual a 6,31%. Essa resposta só não foi menor do que a apresentada pelo HCON-OT2 (5,53%). Como já foi explicado anteriormente, razões de líquido baixas ajudam a explicar as menores eficiências totais obtidas, pois uma menor quantidade total de partículas é arrastada para o orifício de *underflow*.

Além disso, comparando as geometrias otimizadas dos casos 2 e 3 para os hidrociclos convencionais, observou-se que as duas tiveram razões de líquido e eficiências totais próximas, com uma diferença muito grande no número de Euler: HCON-OT2 ($RL = 5,53\%$, $\eta = 70,88\%$ e $Eu = 6100$) e HCON-OT3 ($RL = 6,31\%$, $\eta = 66,56\%$ e $Eu = 845$). Portanto, dependendo da aplicação, o hidrociclo HCON-OT3 pode ser melhor que o HCON-OT2, pois as razões de líquido foram muito próximas, com o número de Euler significativamente menor, associados a uma redução de aproximadamente quatro pontos percentuais na eficiência total.

4.4.4 - Análise Comparativa dos Hidrociclos Otimizados

Resumindo as informações apresentadas nas seções anteriores, será realizada a seguir uma análise comparativa entre as modalidades de hidrociclo para cada estudo de caso. Ressalta-se que a técnica de otimização utilizada e as restrições dos estudos de caso foram sempre as mesmas para cada categoria de hidrociclo (HCICOF, HCIF, HCOF e HCON).

Na Tabela 4.16 são trazidos os resultados experimentais para o número de Euler, razão de líquido e eficiência total dos hidrociclos HCICOF, HCIF, HCOF e HCON obtidos para o estudo de caso 1.

Tabela 4.16 – Resultados experimentais do estudo de caso 1 para os hidrociclos HCICOF, HCIF, HCOF e HCON.

Hidrociclos	η (%)	RL (%)	Eu
HCICOF-OT1	89,59	43,86	3335
HCIF-OT1	91,91	41,19	4190
HCOF-OT1	90,31	48,33	1715
HCON-OT1	95,47	44,63	2547

Diante dos resultados apresentados, observou-se que as eficiências totais obtidas para as quatro modalidades tiveram valores elevados, sendo que o HCON-OT1 foi o que teve a maior eficiência total (95,47%). Todas as modalidades apresentaram ainda razão de líquido alta, evidenciando a relação proporcional entre essas duas respostas.

Além disso, foi verificado uma diferença mais significativa entre os valores obtidos para os números de Euler das modalidades estudadas. O hidrociclo HCOF-OT1 apresentou

um Eu aproximadamente 49%, 59% e 33% inferior aos equipamentos HCICOF-OT1, HCIF-OT1 e HCON-OT1, respectivamente. Dessa forma, a geometria otimizada na modalidade cônico-filtrante (HCOF-OT1) pode ser uma boa alternativa, pois teve simultaneamente um baixo consumo energético e uma alta eficiência total.

Na Tabela 4.17 podem ser vistos os principais resultados experimentais dos hidrociclos HCICOF, HCIF, HCOF e HCON obtidos para o estudo de caso 2.

Tabela 4.17 – Resultados experimentais do estudo de caso 2 para os hidrociclos HCICOF, HCIF, HCOF e HCON.

Hidrociclos	RL (%)	Eu	η (%)	d_{50} (μm)
HCICOF-OT2	12,42	561	63,24	13,49
HCIF-OT2	7,89	780	64,79	13,28
HCOF-OT2	9,59	665	70,42	11,76
HCON-OT2	5,53	6100	70,88	12,38

Os resultados experimentais obtidos para os hidrociclos otimizados para o caso de minimização da razão de líquido mostraram que o algoritmo de ED conduziu a valores realmente baixos para essa resposta, sendo que a menor RL foi 5,53%, do HCON-OT2, associado à maior eficiência total obtida dentre as quatro modalidades (70,88%).

Entretanto, o hidrociclo convencional otimizado do caso 2 (HCON-OT2) apresentou consumo energético extremamente superior às demais categorias. O número de Euler do hidrociclo HCON-OT2 foi cerca de 988%, 682% e 818% superior aos equipamentos HCICOF-OT2, HCIF-OT2 e HCOF-OT2, respectivamente. Portanto, a modalidade escolhida para fornecer correntes de *underflow* concentradas dependeria da necessidade primordial da operação em que seria aplicado o equipamento: ter a razão de líquido mais baixa dentre todas, apesar do elevado gasto energético (HCON-OT2), ou ter uma razão de líquido relativamente baixa, mas um número de Euler baixo (hidrociclos HCICOF-OT2, HCIF-OT2 e HCOF-OT2). Compatibilizando as duas questões mostradas anteriormente, tudo leva a crer que o hidrociclo HCIF-OT2 poderia ser a modalidade mais interessante no que tange à minimização das razões de líquido.

Na Tabela 4.18 são mostrados os principais resultados experimentais dos hidrociclos HCICOF, HCIF, HCOF e HCON obtidos para o estudo de caso 3.

Tabela 4.18 – Resultados experimentais do estudo de caso 3 para os hidrociclos HCICOF, HCIF, HCOF e HCON.

Hidrociclos	<i>Eu</i>	<i>RL (%)</i>	<i>η (%)</i>	<i>d₅₀ (μm)</i>
HCICOF-OT3	582	14,36	62,49	13,29
HCIF-OT3	665	9,58	62,13	13,88
HCOF-OT3	648	15,49	71,44	9,80
HCON-OT3	845	6,31	66,56	13,12

Os resultados apresentados na Tabela 4.18 para os hidrociclos otimizados do caso 3 (minimização do número de Euler) mostraram que todas as modalidades conseguiram atingir valores baixos para essa resposta. A geometria HCICOF-OT3 destacou-se por apresentar a menor resposta (*Eu* = 582). Esse valor foi cerca de 13%, 10% e 31% menor do que os obtidos para os hidrociclos HCIF-OT3, HCOF-OT3 e HCON-OT3, respectivamente.

Analizando a Tabela 4.18, observou-se ainda que as razões de líquido obtidas para todas as modalidades dos separadores do caso 3 de otimização são consideradas baixas em relação à razão de líquido dos hidrociclos do planejamento composto central.

Entre os hidrociclos de mínimo Euler do caso 3, o HCOF-OT3 foi o que apresentou a maior eficiência total (71,44%). Portanto, dependendo do interesse do usuário, a configuração otimizada na modalidade cônico-filtrante pode ser uma boa opção, pois apresentou ao mesmo tempo, um baixo consumo energético e eficiência total de separação razoável.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta uma síntese das principais conclusões obtidas nesse trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros que possam aprimorar os conhecimentos sobre os hidrociclones filtrantes.

5.1 - Conclusões

De acordo com as condições operacionais e os principais resultados experimentais deste trabalho, foi possível concluir que a filtração aplicada simultaneamente à separação centrífuga modificou o desempenho do hidrociclone convencional. A principal diferença entre os hidrociclones filtrantes e o convencional está no número de Euler; os separadores constituídos de parede porosa, independentemente se a filtração ocorreu na seção cônica, cilíndrica, ou em ambas, tiveram um consumo energético significativamente menor do que o hidrociclone de paredes maciças de mesma geometria.

Em relação aos resultados experimentais obtidos para os hidrociclones do planejamento composto central, foi possível concluir quanto à influência das variáveis geométricas:

- O número de Euler sofreu interferência do diâmetro de alimentação, diâmetro de *overflow* e comprimento total do hidrociclone, nesta ordem. Incrementos no Di , Do e L propiciaram um acréscimo na capacidade volumétrica de alimentação, requerendo uma menor energia de bombeamento da suspensão;
- A razão de líquido foi influenciada principalmente pelo diâmetro de alimentação, ângulo do tronco de cone e comprimento total do hidrociclone, nesta ordem. Incrementos no Do e θ provocaram uma diminuição na RL , enquanto que uma

variação no L , majorou ou minorou a RL dependendo do Do utilizado, devido à interação entre essas duas variáveis;

- A eficiência total sofreu maior efeito das variáveis diâmetro de *overflow*, comprimento total e ângulo do tronco de cone. O diâmetro de alimentação influenciou apenas os hidrociclos das modalidades HCICOF e HCIF. Incrementos no Di , Do e θ provocaram uma diminuição na η , enquanto que uma variação no L , majorou ou minorou a η dependendo do θ utilizado, devido à interação entre essas duas variáveis;
- O diâmetro de corte foi afetado principalmente pelo diâmetro de *overflow* e pelo ângulo do tronco de cone, nessa ordem. Incrementos no Do e θ fizeram com que o valor do d_{50} fosse majorado.

Os resultados experimentais das 25 configurações de hidrociclos do planejamento composto central permitiram a obtenção de equações de regressão para previsão de número de Euler, razão de líquido, eficiência total e diâmetro de corte como funções das dimensões geométricas codificadas (diâmetro de alimentação, diâmetro de *overflow*, comprimento total e ângulo do tronco de cone). A utilização destas equações associadas ao algoritmo de ED permitiu estudar três casos de otimização para cada categoria de hidrociclo, que levaram às seguintes conclusões:

Estudo de otimização para o HCICOF:

- **HCICOF-OT1:** equipamento de máxima eficiência total de separação ($\eta=89,59\%$) com número de Euler = 3335. Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,16; 0,19; 7,3; 9,0^\circ\}$. Essa geometria apresentou eficiência total superior a todas configurações do PCC para os hidrociclos HCICOF, sendo que seu valor foi cerca 6% maior que o obtido para o HCICOF3 (84,81%), que teve a maior eficiência do planejamento;
- **HCICOF-OT2:** equipamento com baixa razão de líquido ($RL=12,42\%$). Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,29; 0,35; 4,9; 20,0^\circ\}$. Essa geometria apresentou razão de líquido menor que todas as configurações do PCC para os hidrociclos HCICOF, sendo que seu valor foi cerca 15% menor que o obtido para o HCICOF20 (14,58%), que teve a menor RL do planejamento. Além disso o HCICOF-OT2 apresentou um baixo número de Euler (561), sendo inclusive menor do que o obtido para o hidrociclo HCICOF do caso 3 (mínimo Euler);

- **HCICOF-OT3:** equipamento com o menor consumo energético ($Eu=582$). Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,26; 0,35; 6,7; 20,0^\circ\}$. Essa geometria apresentou o número de Euler inferior a todas as configurações do PCC para os hidrociclos HCICOF, sendo que seu valor foi aproximadamente 7% menor que o obtido para o HCICOF16 (623), que teve o menor Eu do planejamento. Entretanto, o número de Euler do HCICOF-OT3 foi cerca de 4% maior do que o obtido para o HCICOF-OT2. Levando em consideração que as duas configurações apresentaram razão de líquido e eficiência total muito próximas, o HCICOF-OT2 pode ser uma das configurações geométricas mais viável.

Estudo de otimização para o HCIF:

- **HCIF-OT1:** equipamento de máxima eficiência total de separação ($\eta=91,91\%$) com número de Euler = 4190. Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,16; 0,19; 7,3; 9,0^\circ\}$. Essa geometria apresentou eficiência total superior a todas configurações do PCC para os hidrociclos HCIF, sendo que seu valor foi cerca 8% maior que o obtido para o HCIF2 (85,02%), que teve a maior eficiência do planejamento;
- **HCIF-OT2:** equipamento com baixa razão de líquido ($RL=7,89\%$). Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,26; 0,35; 5,3; 14,5^\circ\}$. Essa geometria apresentou razão de líquido menor que todas as configurações do PCC para os hidrociclos HCIF, sendo que seu valor foi cerca 14% menor que o obtido para o HCIF20 (9,18%), que teve a menor RL do planejamento;
- **HCIF-OT3:** equipamento com o menor consumo energético ($Eu=665$). Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,26; 0,35; 5,8; 14,5^\circ\}$. Essa geometria apresentou o número de Euler inferior a todas as configurações do PCC para os hidrociclos HCIF, sendo que seu valor foi aproximadamente 3% menor que o obtido para o HCIF16 (689), que teve o menor Eu do planejamento. O hidrociclo HCIF-OT3 apresentou uma pequena razão de líquido (9,58%), que foi praticamente igual à obtida para o HCIF20 (9,18%), com a menor RL do planejamento experimental.

Estudo de otimização para o HCOF:

- **HCOF-OT1:** equipamento de máxima eficiência total de separação ($\eta=90,31\%$) com número de Euler = 1715. Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,21;$

0,19; 7,6; 9,0°}. Essa geometria apresentou eficiência total superior a todas configurações do PCC para os hidrociclos HCOF, sendo que seu valor foi cerca 2% maior que o obtido para o HCOF2 (88,12%), que teve a maior eficiência do planejamento. Essa modalidade foi a que obteve o menor número de Euler dentre as geometrias otimizadas do caso 1, mostrando-se uma excelente opção quando se necessitam hidrociclos com alto poder de separação;

- **HCOF-OT2:** equipamento com baixa razão de líquido ($RL=9,59\%$). Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,29; 0,35; 4,7; 20,0^\circ\}$. Essa geometria apresentou razão de líquido menor que todas as configurações do PCC para os hidrociclos HCOF, sendo que seu valor foi cerca 41% menor que o obtido para o HCOF20 (13,43%), que teve a menor RL do planejamento. Além disso, o HCOF-OT2 se destacou por apresentar um baixo número de Euler (665), sendo inclusive menor do que os obtidos para as 25 configurações do PCC para os hidrociclos HCOF;
- **HCOF-OT3:** equipamento com o menor consumo energético ($Eu=648$). Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,26; 0,35; 7,6; 11,2^\circ\}$. Essa geometria apresentou o número de Euler inferior a todas as configurações do PCC para os hidrociclos HCOF, sendo que seu valor foi aproximadamente 9% menor que o obtido para o HCOF16 (716), que teve o menor Eu do planejamento. Levando em consideração os resultados obtidos para os hidrociclos do caso 2 e 3, pode-se dizer que, dependendo do interesse do usuário, o HCOF-OT2 seria uma melhor alternativa, já que essa geometria teve uma razão de líquido bem menor (9,59% para o HCOF-OT2 e 15,49% para o HCOF-OT3) e as duas configurações apresentaram valores muito próximos para Eu e η .

Estudo de otimização para o HCON:

- **HCON-OT1:** equipamento de máxima eficiência total de separação ($\eta=95,47\%$) com número de Euler = 2547. Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,21; 0,19; 7,6; 9,0^\circ\}$. Essa geometria apresentou eficiência total superior a todas configurações do PCC para os hidrociclos convencionais, sendo que seu valor foi aproximadamente 8% maior que o obtido para o HCON2 (88,63%), que teve a maior eficiência do planejamento. Além disso, foi o separador mais eficiente dentre os otimizados do caso 1;

- **HCON-OT2:** equipamento com baixa razão de líquido ($RL=5,53\%$). Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,13; 0,35; 3,9; 14,5^\circ\}$. Essa geometria apresentou razão de líquido menor que todas as configurações do PCC para os hidrociclos HCON, sendo que seu valor foi cerca 26% menor que o obtido para o HCON5 (7,45%), que teve a menor RL do planejamento;
- **HCON-OT3:** equipamento com o menor consumo energético ($Eu=845$). Configuração geométrica: $\{Di/Dc; Do/Dc; L/Dc; \theta\} = \{0,26; 0,35; 5,8; 20^\circ\}$. Essa geometria apresentou o número de Euler inferior a todas as configurações do PCC para os hidrociclos HCON, sendo que seu valor foi aproximadamente 3% menor que o obtido para o HCON16 (868), que teve o menor Eu do planejamento. Considerando os resultados obtidos para os hidrociclos do caso 2 e 3, pode-se dizer que o HCON-OT3 seria uma das modalidades mais viáveis, já que essa configuração teve um consumo energético bem menor, com valores de RL e η semelhantes (HCON-OT2: $RL=5,53\%$, $\eta=70,88\%$ e $Eu=6100$; e HCON-OT3: $RL=6,31\%$, $\eta=66,56\%$ e $Eu=845$).

5.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, fazem-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Utilizar técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) para auxiliar na análise e compreensão do escoamento interno em hidrociclos filtrantes.
- Realizar planejamentos fatoriais das principais relações geométricas de um hidrociclo filtrante, incluindo as variáveis comprimento do *vortex finder* e diâmetro de *underflow*, como subsídio do processo de otimização.
- Realizar otimizações multi-objetivo, por exemplo: maximizar a eficiência e minimizar o número de Euler; ou ainda, minimizar a razão de líquido e minimizar o diâmetro de corte.
- Conduzir estudos com hidrociclos utilizando fluidos não-newtonianos.
- Avaliar o efeito da concentração de sólidos da alimentação no desempenho dos hidrociclos otimizados.

- Avaliar cada uma das doze configurações otimizadas obtidas nas outras modalidades de hidrociclones.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDRICH, C. *Hydrocyclones. Progress in Filtration and Separation.* 1st ed. London, UK: Elsevier, 2014. 684 p.
- ALMEIDA, C. A. K. *Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder.* 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFU, Uberlândia, 2008.
- ARRUDA, E. B.; KOBOLDT, C. A.; VIEIRA, L. G. M.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Avaliação do comportamento de hidrociclos filtrantes de Krebs. *XXX Encontro nacional sobre escoamento em meios porosos*, São Carlos. [S.l.: s.n.], 2002.
- ARRUDA, E. B. *Performance de hidrociclos filtrantes com geometria Demco.* 2003. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFU, Uberlândia, 2003.
- BERGSTRÖM, J. *Flow Field and Fibre Fractionation Studies in Hydrocyclones.* 2006. 59 f. Thesis (Doctoral) - Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2006.
- BRADLEY, D. *The Hydrocyclone.* 1. ed. Oxford: Pergamon, 1965.
- COELHO, M. A. Z.; MEDRONHO, R. A. A model for performance prediction of hydrocyclones. *Chemical Engineering Journal*, v. 84, n. 1, p. 7–14, 2001.
- COSTA, R. A. L. *Uma Implementação Paralela do Algoritmo de Evolução Diferencial Autoadaptativo.* 2010. 53 f. (Trabalho de conclusão em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- COUPER, J. R.; PENNEY, W. R.; FAIR, J. R.; WALAS, S. M. *Chemical Process Equipment: Selection and Design.* 2nd ed. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2010.

- DAMASCENO, J. J. R.; MASSARANI, G. Estudo de um sedimentador contínuo com fundo filtrante. *XIV Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos*. Campinas, p. 283-290, 1986.
- DARBY, R. *Chemical Engineering Fluid Mechanics*. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2001. 559 p.
- FAÇANHA, J. M. F. *Incorporação de um cilindro filtrante na separação sólido-líquido em hidrociclones*. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFU, Uberlândia, 2012.
- FEOKTISTOV, V. *Differential Evolution: In Search of Solutions*. Optimizations and its applications, v.5, Boston, MA: Springer US, 2006.
- GONÇALVES, S. M. *Efeito da Concentração de Sólidos e de Variáveis Operacionais no Desempenho de um Hidrociclone Concentrador*. 2016. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFU, Uberlândia, 2016.
- LANNA, A. E.; BARROZO, M. A. S.; DAMASCENO, J. J. R. Estudo de desempenho de um hidrociclone filtrante. *Revista Ciência & Engenharia*, p. 175-186, 1992.
- LOBATO, F. S. *Otimização multi-objetivo para o projeto de sistemas de engenharia*. 2008. 402 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - UFU, Uberlândia, 2008.
- MASSARANI, G. Projeto e análise do desempenho de ciclones e hidrociclones ii. In: Anais do *XVII Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos*, São Carlos. [S.l.: s.n.], 1989. p. 125-136.
- MORGAN, M. C. *Hydrocyclones. Drilling Fluids Processing Handbook*. 1st ed. Boston: Elsevier, 2005. 666 p.
- PRICE, K. V.; STORN, R. M.; LAMPINEN, J. A. *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Natural Computing Series, 1st ed. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- RAO, S. S. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

- RAVINDRAN, A.; RAGSDELL, K. M.; REKLAITIS, G. V. *Engineering Optimization: Methods and Applications*. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H.; BACKHURST, J. R. *Coulson & Richardson's Chemical Engineering*. v.2, 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- ROCHA, S. M. S.; VIEIRA, L. G. M. Experimental Determination of the Permeability of Non-Porous Planar Structures during Operation of Equipment in Own Industrial Unit. *Materials Science Forum*, v. 727-728, p. 1836–1841, 2012.
- RUSHTON, A.; WARD, A. S.; HOLDICH, R. G. *Solid-Liquid Filtration and Separation Technology*. 2nd ed. New York: Wiley-VCH, 2000.
- SAHAB, M. G.; TOROPOV, V. V.; GANDOMI, A. H. A Review on Traditional and Modern Structural Optimization: Problems and Techniques. *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures*. 1st ed. London, UK: Elsevier, 2013. 556 p.
- SALVADOR, F. F. *Estudo Experimental do Comportamento de um Hidrociclone com Cone e Cilindro Filtrantes*. 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFU, Uberlândia, 2013.
- SANTOS, D. A.; GURGEL, M. T.; MOTA, A. F.; PAIVA, F. I. G. Extração Mineral de Quartzito e sua Aplicabilidade na Construção Civil na Cidade de Várzea - PB. *HOLOS*, v. 4, p. 89-100, 2014.
- SARAMAGO, S. F. P. *Métodos de Otimização Randômica: Algoritmos Genéticos e Simulated Annealing*. Notas em Matemática Aplicada, v. 6, São Carlos, SP: SBMAC, 2003. 37 p.
- SCHAPEL, S. C.; CHASE, G. G. Modeling of hydrocyclone flow with permeable walls. *Advances in Filtration and Separation Technology*, v. 11, p. 33-36, 1998.
- SECCHI, A. R. *Otimização de Processos*. Apostila: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: [s.n.], 2015.
- SILVA, D. O. *Otimização da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclores Mediante Modificações Geométricas*. 2012. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - UFU, Uberlândia, 2012.

- SILVA, N. K. G. *Estudo de Otimização da Configuração do Hidrociclone Filtrante*. 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFU, Uberlândia, 2014.
- SOUZA, F. J. *Análise da Influência do Meio Filtrante no Comportamento do Hidrociclone Filtrante*. 1999. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFU, Uberlândia, 1999.
- SVAROVSKY, L. *Hydrocyclones*. Eastbourne, UK: Holt, Rinehart & Winston, 1984. 198 p.
- SVAROVSKY, L. *Solid-Liquid Separation*. 4th ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. 554 p.
- VAKAMALLA, T. R.; KORUPROLU, V. B. R.; ARUGONDA, R.; MANGADODDY, N. Development of novel hydrocyclone designs for improved fines classification using multiphase CFD model. *Separation and Purification Technology*, v.175, p.481-497, 2017.
- VIEIRA, L. G. M. *Análise da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclone Filtrante*. Uberlândia: [s.n.], 1997.
- VIEIRA, L. G. M. *Estudo da Performance de Hidrociclos Filtrantes de Rietema*. 2001. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFU, Uberlândia, 2001.
- VIEIRA, L. G. M. *Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclos Filtrantes*. 2006. 297 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - UFU, Uberlândia, 2006.
- VIEIRA, L. G. M.; SILVA JR., C. A.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. A study of the fluid dynamic behaviour of filtering hydrocyclones. *Separation and Purification Technology*, v.58, n.2, p.282-287, 2007.
- VIEIRA, L. G. M.; SILVÉRIO, B. C.; DAMASCENO, J. J. R.; BARROZO, M. A. S. Performance of hydrocyclones with different geometries. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.89, n.4, p.655-662, 2011.
- WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7th ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2006.
- YANG, X.-S. *Nature Inspired Optimization Algorithms*. 1st ed. London, UK: Elsevier, 2014.

APÊNDICE A

DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE E DA POROSIDADE DOS CILINDROS E CONES POROSOS

A.1 - Determinação da Permeabilidade dos Cilindros e Cones Porosos

A permeabilidade dos cilindros e cones permeáveis utilizados no presente trabalho, foi determinada utilizando a metodologia desenvolvida por Rocha e Vieira (2012), que consistia na caracterização dos cilindros e cones porosos durante a própria operação do equipamento. Utilizando a água como fluido, foi considerado que este era incompressível e newtoniano. Nos hidrociclos filtrantes, o escoamento através da estrutura porosa obedece a Lei de Darcy, descrita pela Equação A.1.

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu}{k_m} q = \frac{\mu}{k_m} \frac{Q_F}{A_{lateral}} \quad (\text{A.1})$$

Sendo que a área lateral poderá ser a área do cilindro ou a área do cone.

- Área lateral do cilindro:

$$A_{lateral} = 2\pi H_c r \quad (\text{A.2})$$

- Área lateral do cone:

$$A_{lateral} = 2\pi H r + \frac{\pi}{2} H (D_c - D_u) \quad (\text{A.3})$$

Substituindo as Equações A.2 e A.3 na Equação A.1 e integrando, obtém-se as Equações A.4 e A.5, respectivamente, que permitem relacionar a vazão de filtrado com a queda de pressão. Vale ressaltar que Rocha e Vieira (2012) aplicaram um fator de correção para a queda de pressão quando se tratava da seção cônica como o meio poroso.

$$-\Delta P = \frac{\mu}{2\pi H_c k_m} \ln\left(\frac{D_c + 2\xi}{D_c}\right) Q_F \quad (\text{A.4})$$

$$-\Delta P = \frac{\mu}{2\pi H \cdot k_m} \ln \left(\frac{Du + Dc + 4\xi}{Du + Dc} \right) Q_F \quad (A.5)$$

Reorganizado as equações, é possível obter uma constante ψ que relaciona a vazão de filtrado com a queda de pressão (Equação A.6).

$$Q_F = \psi(-\Delta P) \quad (A.6)$$

- Constante para o cilindro poroso (Equação A.7):

$$\frac{1}{\psi} = \frac{\mu}{2\pi H_c \cdot k_m} \ln \left(\frac{Dc + 2\xi}{Dc} \right) \quad (A.7)$$

- Constante para o cone poroso (Equação A.8):

$$\frac{1}{\psi} = \frac{\mu}{2\pi H \cdot k_m} \ln \left(\frac{Du + Dc + 4\xi}{Du + Dc} \right) \quad (A.8)$$

Dessa forma, a partir das equações anteriores e das medidas experimentais de queda de pressão e vazão volumétrica de filtrado, pode-se estimar a constante ψ e, em seguida, obter o valor da permeabilidade dos cilindros e cones porosos. Esses valores estão apresentados nas Tabelas A.1 e A.2, respectivamente.

Tabela A.1 – Valores experimentais de vazão volumétrica de filtrado para os cilindros porosos em função da queda de pressão após o procedimento de colmatação.

Pressão (kPa)	Q _F (cm ³ /s)				
	Cilindro h3	Cilindro h4	Cilindro h5	Cilindro h6	Cilindro h7
177	0,180	0,223	0,317	0,376	0,456
177	0,181	0,230	0,319	0,371	0,454
177	0,179	0,222	0,315	0,374	0,457
177	0,204	0,222	0,315	0,380	0,464
177	0,185	0,207	0,310	0,375	0,454
177	0,178	0,213	0,308	0,376	0,461
177	0,186	0,212	0,312	0,382	0,461
177	0,177	0,229	0,312	0,375	0,458
177	0,203	0,206	0,314	0,374	0,458
177	0,175	0,221	0,303	0,378	0,457
147	0,171	0,185	0,261	0,307	0,386
147	0,180	0,175	0,256	0,310	0,381
147	0,153	0,180	0,256	0,313	0,376
147	0,157	0,200	0,253	0,316	0,382
147	0,181	0,173	0,250	0,320	0,377
147	0,180	0,178	0,252	0,316	0,376
147	0,179	0,179	0,246	0,309	0,383
147	0,179	0,182	0,260	0,313	0,386

(continua)

(continuação)

Pressão (kPa)	Q _F (cm ³ /s)				
	Cilindro h3	Cilindro h4	Cilindro h5	Cilindro h6	Cilindro h7
147	0,174	0,190	0,261	0,310	0,378
147	0,153	0,173	0,257	0,311	0,377
118	0,127	0,141	0,202	0,246	0,302
118	0,127	0,141	0,202	0,256	0,303
118	0,150	0,140	0,204	0,249	0,303
118	0,122	0,141	0,200	0,247	0,303
118	0,129	0,139	0,201	0,258	0,306
118	0,129	0,144	0,201	0,254	0,304
118	0,129	0,142	0,202	0,251	0,305
118	0,158	0,142	0,205	0,257	0,302
118	0,131	0,138	0,204	0,253	0,306
118	0,134	0,143	0,207	0,251	0,305
88	0,112	0,109	0,152	0,188	0,225
88	0,104	0,107	0,154	0,191	0,225
88	0,105	0,105	0,154	0,188	0,230
88	0,110	0,107	0,154	0,195	0,225
88	0,107	0,106	0,160	0,193	0,226
88	0,106	0,105	0,157	0,195	0,222
88	0,082	0,106	0,157	0,194	0,231
88	0,086	0,105	0,158	0,194	0,223
88	0,113	0,104	0,157	0,192	0,228
88	0,116	0,107	0,160	0,191	0,226
59	0,085	0,077	0,107	0,130	0,156
59	0,084	0,075	0,111	0,130	0,155
59	0,054	0,071	0,107	0,129	0,149
59	0,078	0,074	0,105	0,137	0,160
59	0,084	0,076	0,104	0,133	0,156
59	0,059	0,073	0,111	0,129	0,156
59	0,084	0,074	0,101	0,131	0,156
59	0,089	0,073	0,102	0,131	0,162
59	0,092	0,072	0,100	0,130	0,158
59	0,089	0,072	0,104	0,129	0,155
29	0,032	0,036	0,057	0,068	0,075
29	0,026	0,036	0,049	0,067	0,078
29	0,035	0,039	0,051	0,065	0,075
29	0,024	0,035	0,046	0,063	0,083
29	0,040	0,037	0,050	0,070	0,082
29	0,058	0,035	0,046	0,067	0,079
29	0,032	0,038	0,052	0,064	0,080
29	0,025	0,039	0,047	0,063	0,075
29	0,050	0,036	0,048	0,069	0,082
29	0,027	0,037	0,051	0,065	0,081

Tabela A.2 – Valores experimentais de vazão volumétrica de filtrado para os cones porosos em função da queda de pressão após o procedimento de colmatação.

Pressão (kPa)	Q _F (cm ³ /s)				
	Cone - α	Cone -1	Cone 0	Cone +1	Cone + α
115,05	0,273	0,334	0,174	0,083	0,097
115,05	0,270	0,321	0,172	0,082	0,099
115,05	0,268	0,332	0,180	0,080	0,095
115,05	0,278	0,333	0,175	0,079	0,094
115,05	0,273	0,334	0,173	0,079	0,096
115,05	0,274	0,334	0,180	0,077	0,096
115,05	0,275	0,337	0,174	0,076	0,097
115,05	0,273	0,331	0,180	0,077	0,093
115,05	0,268	0,336	0,176	0,083	0,094
115,05	0,273	0,333	0,173	0,084	0,097
95,55	0,224	0,266	0,139	0,064	0,081
95,55	0,227	0,261	0,142	0,065	0,080
95,55	0,232	0,265	0,142	0,067	0,078
95,55	0,226	0,267	0,143	0,064	0,078
95,55	0,229	0,259	0,142	0,063	0,080
95,55	0,231	0,272	0,144	0,067	0,079
95,55	0,229	0,274	0,140	0,066	0,080
95,55	0,225	0,264	0,138	0,068	0,080
95,55	0,231	0,263	0,144	0,062	0,078
95,55	0,226	0,260	0,142	0,063	0,078
76,70	0,183	0,218	0,115	0,049	0,065
76,70	0,183	0,215	0,108	0,051	0,062
76,70	0,186	0,215	0,113	0,049	0,062
76,70	0,184	0,220	0,114	0,052	0,064
76,70	0,185	0,222	0,115	0,051	0,063
76,70	0,183	0,217	0,114	0,048	0,063
76,70	0,185	0,217	0,109	0,055	0,064
76,70	0,184	0,216	0,115	0,051	0,063
76,70	0,182	0,216	0,118	0,050	0,065
76,70	0,183	0,214	0,116	0,052	0,063
57,20	0,146	0,165	0,089	0,044	0,049
57,20	0,142	0,162	0,087	0,042	0,049
57,20	0,147	0,160	0,084	0,036	0,048
57,20	0,146	0,161	0,091	0,040	0,047
57,20	0,143	0,163	0,090	0,038	0,047
57,20	0,147	0,164	0,089	0,039	0,048
57,20	0,140	0,162	0,087	0,038	0,047
57,20	0,143	0,157	0,087	0,038	0,049
57,20	0,143	0,169	0,092	0,039	0,048
57,20	0,141	0,161	0,092	0,038	0,049
38,35	0,094	0,111	0,059	0,027	0,034
38,35	0,098	0,112	0,062	0,027	0,033
38,35	0,100	0,112	0,057	0,025	0,034
38,35	0,098	0,108	0,061	0,030	0,034
38,35	0,095	0,103	0,059	0,025	0,032

(continua)

(continuação)

Pressão (kPa)	Q _F (cm ³ /s)				
	Cone -α	Cone -1	Cone 0	Cone +1	Cone +α
38,35	0,099	0,117	0,057	0,028	0,033
38,35	0,094	0,105	0,061	0,028	0,034
38,35	0,095	0,121	0,059	0,028	0,033
38,35	0,095	0,112	0,062	0,028	0,034
38,35	0,099	0,104	0,061	0,028	0,034
18,85	0,044	0,052	0,034	0,014	0,017
18,85	0,046	0,056	0,027	0,011	0,016
18,85	0,048	0,056	0,034	0,013	0,020
18,85	0,048	0,062	0,033	0,014	0,016
18,85	0,044	0,057	0,032	0,014	0,018
18,85	0,045	0,053	0,034	0,013	0,019
18,85	0,049	0,055	0,030	0,013	0,015
18,85	0,047	0,062	0,030	0,014	0,016
18,85	0,047	0,060	0,032	0,013	0,017
18,85	0,043	0,053	0,031	0,014	0,017

A partir das Tabelas A.1 e A.2 os valores da constante ψ e da permeabilidade (k_m) são apresentados na Tabela A.3.

Tabela A.3 – Valores para ψ e k_m para os cilindros e cones porosos.

Seção porosa	ψ (m ³ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)	k_m (m ²)
Cilindro h3	1,12.10 ⁻¹²	3,89.10 ⁻¹⁶
Cilindro h4	1,23.10 ⁻¹²	3,65.10 ⁻¹⁶
Cilindro h5	1,75.10 ⁻¹²	4,62.10 ⁻¹⁶
Cilindro h6	2,14.10 ⁻¹²	4,50.10 ⁻¹⁶
Cilindro h7	2,59.10 ⁻¹²	3,99.10 ⁻¹⁶
Cone -α	2,40.10 ⁻¹²	5,09.10 ⁻¹⁶
Cone -1	2,84.10 ⁻¹²	5,57.10 ⁻¹⁶
Cone 0	1,51.10 ⁻¹²	4,66.10 ⁻¹⁶
Cone +1	6,84.10 ⁻¹³	2,37.10 ⁻¹⁶
Cone +α	8,34.10 ⁻¹³	3,55.10 ⁻¹⁶

Logo, foi tomada uma permeabilidade média cujo valor foi equivalente a $(4,19 \pm 0,70) \cdot 10^{-16}$ m².

A.2 - Determinação da Porosidade dos Cilindros e Cones Permeáveis

Nesta seção é apresentada a metodologia que foi utilizada para a determinação das porosidades dos meios filtrantes utilizados no presente trabalho. Segundo Darby (2001), a permeabilidade da matriz porosa está relacionada com o diâmetro de partícula e com a porosidade do meio filtrante de acordo com a Equação A.9.

$$k_m = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{180(1-\varepsilon)^2} \quad (\text{A.9})$$

Assim, utilizando os valores de permeabilidade apresentados na seção anterior foi possível encontrar a porosidade dos cilindros e cone filtrantes estudados neste trabalho. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela A.4.

Tabela A.4 – Valores de porosidade dos cilindros e cones filtrantes após o processo de colmatação.

Seção porosa	ε (%)
Cilindro h3	4,98
Cilindro h4	4,87
Cilindro h5	5,26
Cilindro h6	5,22
Cilindro h7	5,02
Cone - α	5,43
Cone -1	5,59
Cone 0	5,28
Cone +1	4,24
Cone + α	4,83

Logo, foi tomada uma porosidade média cujo valor foi equivalente a $5,07 \pm 0,28\%$.

APÊNDICE B

RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA OS HIDROCICLONES FILTRANTES E CONVENCIONAL

B.1 - Resultados do PCC para os Hidrociclos HCICOF, HCIF, HCOF e HCON

Tabela B.1 – Resultados experimentais para os hidrociclos HCICOF do PCC a 1,47 bar.

Hidrociclo	Q (cm ³ /s)	Eu	RL (%)	η (%)	η' (%)	d_{50} (μm)	d'_{50} (μm)	C_{VU} (%)	Q_F (cm ³ /s)
HCICOF2	194,68	3897	36,90	82,91	73,45	3,84	10,93	2,18	0,016
HCICOF3	209,10	3373	38,16	84,81	75,56	3,86	11,05	2,20	0,043
HCICOF4	209,09	3375	37,71	81,83	70,84	4,69	11,83	2,34	0,092
HCICOF6	218,85	3083	16,83	72,17	66,75	11,51	14,30	4,12	0,010
HCICOF7	227,69	2846	19,71	71,37	65,01	11,31	14,88	3,61	0,024
HCICOF8	229,80	2795	19,26	68,32	60,99	11,78	15,28	3,70	0,043
HCICOF10	327,85	1373	33,85	81,82	72,23	5,23	12,92	2,21	0,030
HCICOF11	374,15	1055	36,39	80,88	69,31	3,48	10,66	2,16	0,102
HCICOF12	374,34	1054	34,08	78,64	66,89	5,79	13,60	2,28	0,162
HCICOF14	436,30	775	15,84	67,28	61,84	12,55	15,48	4,09	0,025
HCICOF15	480,76	639	19,74	68,89	61,23	10,97	15,63	3,34	0,078
HCICOF16	486,86	623	17,49	65,88	58,73	11,85	15,77	3,66	0,169
HCICOF17	170,42	5082	25,74	75,57	67,57	9,58	12,47	2,92	0,014
HCICOF18	438,45	768	24,96	70,30	63,69	9,39	13,16	2,99	0,068
HCICOF19	282,76	1847	45,63	83,47	75,89	3,78	10,45	1,92	0,066
HCICOF20	393,77	952	14,58	65,35	60,34	14,26	15,74	4,39	0,041
HCICOF22	363,16	1120	26,88	73,39	67,09	9,56	13,48	2,71	0,145
HCICOF24	343,95	1247	22,67	73,20	66,29	8,90	13,30	3,11	0,187
HCICOF25a	342,39	1259	25,42	72,61	66,09	10,12	13,75	2,90	0,066
HCICOF25b	342,43	1258	25,52	72,78	66,45	10,40	13,88	2,88	0,051
HCICOF25c	342,92	1255	25,47	72,65	66,35	10,07	13,55	2,91	0,060
HCICOF25d	343,34	1251	25,31	72,01	65,50	10,02	13,44	2,93	0,055
HCICOF25e	342,60	1257	25,34	71,39	64,76	10,45	13,42	2,93	0,048

Tabela B.2 – Resultados experimentais para os hidrociclones HCIF do PCC a 1,47 bar.

Hidrociclone	Q (cm ³ /s)	Eu	RL (%)	η (%)	η' (%)	d_{50} (μm)	d'_{50} (μm)	C_{VU} (%)	Q_F (cm ³ /s)
HCIF2	174,66	4832	33,41	85,02	78,29	3,10	8,47	2,57	0,033
HCIF3	194,20	3911	37,50	82,18	71,52	3,12	9,62	2,14	0,044
HCIF4	195,87	3846	33,32	80,07	68,73	3,52	11,53	2,29	0,216
HCIF6	204,59	3525	10,13	70,63	67,37	12,41	13,87	6,53	0,020
HCIF7	216,48	3149	16,27	73,42	69,28	10,35	13,08	4,36	0,072
HCIF8	216,96	3133	15,60	67,66	61,54	12,38	15,71	4,36	0,099
HCIF10	293,86	1707	32,66	77,00	66,93	6,08	13,28	2,34	0,061
HCIF11	337,33	1295	33,38	79,14	69,04	6,28	14,46	2,38	0,117
HCIF12	352,81	1184	32,06	73,65	60,98	6,80	16,03	2,25	0,334
HCIF14	402,21	912	10,10	67,13	63,79	12,93	14,63	6,32	0,096
HCIF15	444,39	746	15,58	67,75	62,69	11,54	14,71	4,21	0,100
HCIF16	462,80	689	13,58	61,81	55,72	14,80	18,05	4,32	0,267
HCIF17	161,95	5619	23,66	76,08	69,34	7,13	11,38	3,19	0,032
HCIF18	391,20	963	21,42	72,86	65,55	8,53	13,23	3,39	0,099
HCIF19	261,30	2161	39,98	82,83	71,78	1,73	9,39	2,03	0,147
HCIF20	372,78	1061	9,18	64,41	61,14	12,91	14,49	6,61	0,083
HCIF22	348,25	1216	23,31	71,05	63,28	9,53	15,22	2,86	0,163
HCIF24	323,38	1409	20,49	75,71	70,12	10,45	14,38	3,72	0,240
HCIF25a	313,07	1505	21,56	71,39	63,52	7,33	11,36	3,32	0,087
HCIF25b	315,38	1484	21,45	70,86	62,91	7,48	12,03	3,20	0,105
HCIF25c	315,08	1484	21,54	71,45	63,61	7,07	11,01	3,20	0,091
HCIF25d	315,55	1481	21,35	70,79	62,86	8,13	12,52	3,24	0,082
HCIF25e	316,14	1477	21,16	70,77	62,93	8,50	13,25	3,23	0,097

Tabela B.3 – Resultados experimentais para os hidrociclos HCOF do PCC a 1,47 bar.

Hidrociclo	Q (cm ³ /s)	Eu	RL (%)	η (%)	η' (%)	d_{50} (μm)	d'_{50} (μm)	C_{VU} (%)	Q_F (cm ³ /s)
HCOF1	192,24	3893	38,85	85,85	76,88	3,02	11,41	2,16	0,091
HCOF2	199,56	3747	33,11	88,12	82,51	5,43	10,65	2,70	0,110
HCOF3	208,88	3383	35,62	83,39	74,30	3,75	9,50	2,34	0,160
HCOF4	210,73	3316	33,54	79,75	69,48	3,78	9,43	2,60	0,045
HCOF5	213,00	3171	18,09	73,42	67,51	11,02	14,08	3,89	0,078
HCOF6	232,66	2921	14,79	73,13	68,35	12,62	15,24	4,32	0,042
HCOF7	228,95	2820	18,79	75,54	70,95	9,09	12,75	4,01	0,105
HCOF8	233,92	2706	17,27	70,72	65,70	10,64	13,86	3,88	0,023
HCOF9	324,92	1407	38,42	84,66	75,08	1,70	6,93	2,20	0,170
HCOF10	325,10	1396	33,40	85,79	78,62	4,82	10,46	2,52	0,092
HCOF11	344,90	1238	35,48	86,74	80,57	3,49	9,34	2,43	0,210
HCOF12	358,37	1117	32,79	82,56	76,08	5,02	11,18	2,48	0,060
HCOF13	416,00	845	18,22	73,09	67,42	10,49	13,67	3,99	0,144
HCOF14	420,93	818	15,69	72,21	67,09	10,55	13,29	4,40	0,110
HCOF15	427,45	810	19,08	76,13	71,03	7,42	10,69	3,92	0,223
HCOF16	452,05	716	17,08	69,30	63,75	10,23	13,56	4,08	0,058
HCOF17	163,87	5424	22,54	75,04	67,78	7,87	12,38	3,34	0,070
HCOF18	409,91	878	23,24	81,64	76,04	5,96	9,92	3,51	0,213
HCOF19	264,51	2109	44,67	83,46	71,14	1,00	9,53	1,90	0,136
HCOF20	366,30	1099	13,43	67,94	64,99	12,27	14,72	5,02	0,093
HCOF21	283,73	1834	23,40	81,56	76,80	7,15	11,23	3,27	0,120
HCOF22	343,04	1254	25,01	74,28	66,13	7,04	12,69	2,77	0,092
HCOF23	336,05	1306	27,85	80,50	73,28	6,14	11,62	2,75	0,174
HCOF24	309,17	1563	20,40	79,78	75,22	9,07	12,44	3,61	0,076
HCOF25a	325,04	1397	23,45	77,05	70,02	7,77	12,11	3,21	0,128
HCOF25b	324,98	1398	23,28	76,86	69,85	7,87	12,31	3,28	0,119
HCOF25c	324,92	1397	23,11	76,35	69,24	8,00	12,17	3,26	0,108
HCOF25d	325,29	1394	23,05	76,67	69,69	8,11	12,31	3,29	0,112
HCOF25e	325,95	1390	23,25	77,24	70,35	7,91	12,00	3,23	0,117

Tabela B.4 – Resultados experimentais para os hidrociclos HCON do PCC a 1,47 bar.

Hidrociclo	Q (cm ³ /s)	Eu	RL (%)	η (%)	η' (%)	d_{50} (μm)	d'_{50} (μm)	C_{VU} (%)
HCON1	165,22	5402	30,95	82,36	74,46	2,45	8,76	2,64
HCON2	174,58	4839	28,43	88,63	84,12	3,33	8,06	2,94
HCON3	185,04	4315	33,04	85,11	77,76	2,04	7,50	2,57
HCON4	199,14	3719	29,17	77,28	67,92	6,01	11,61	2,61
HCON5	190,62	4060	7,45	76,08	74,16	10,15	11,17	9,52
HCON6	203,95	3548	9,10	71,91	69,92	9,56	10,89	7,68
HCON7	208,69	3394	12,61	79,61	76,66	7,33	9,16	6,12
HCON8	224,20	2936	9,95	67,13	62,47	11,25	13,68	5,28
HCON9	260,60	2176	30,06	85,76	78,89	3,53	9,51	2,74
HCON10	280,17	1884	29,26	83,44	76,43	6,90	12,33	2,75
HCON11	295,08	1696	33,48	86,20	79,25	2,83	7,18	2,53
HCON12	324,90	1400	29,77	80,59	72,36	5,77	12,61	2,72
HCON13	340,63	1272	8,48	73,40	70,94	10,65	11,98	8,04
HCON14	366,77	1099	9,58	66,32	61,89	11,21	13,49	5,42
HCON15	373,84	1056	12,92	76,66	73,20	8,58	10,68	5,74
HCON16	412,59	868	11,04	66,10	61,90	11,05	13,27	5,85
HCON17	153,35	6270	17,44	75,92	70,83	8,88	11,83	4,25
HCON18	357,65	1153	18,93	73,98	67,90	8,00	11,43	4,01
HCON19	231,87	2741	42,12	80,21	65,81	1,14	11,05	1,91
HCON20	334,94	1314	10,26	70,24	66,84	10,97	12,82	6,46
HCON21	219,03	3080	14,86	79,54	75,97	5,76	8,31	5,21
HCON22	309,97	1538	18,76	76,10	70,59	7,01	10,95	3,94
HCON23	271,94	1994	19,93	79,93	74,94	5,78	8,84	3,92
HCON24	281,53	1864	15,93	75,81	71,23	7,43	10,22	4,68
HCON25a	283,46	1835	18,43	74,87	69,19	7,20	10,63	3,94
HCON25b	282,54	1847	18,29	73,52	67,59	7,65	11,25	3,93
HCON25c	282,61	1848	18,29	74,41	68,69	7,40	11,12	3,95
HCON25d	282,76	1845	18,56	71,75	65,31	7,81	11,95	3,78
HCON25e	283,22	1840	18,49	71,73	65,32	7,68	11,68	3,84

B.2 - Resultados dos Hidrociclos Otimizados dos Casos de Estudo 1, 2 e 3

Nas Tabelas B.5, B.6 e B.7 são apresentados os resultados experimentais obtidos para os hidrociclos cilíndrico-cônico-filtrante (HCICOF), cilíndrico-filtrante (HCIF), cônico-filtrante (HCOF) e convencional (HCON) para os estudos de caso de otimização 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela B.5 – Resultados experimentais para os hidrociclos otimizados do caso 1.

Hidrociclo	Q (cm ³ /s)	Eu	RL (%)	η (%)	η' (%)	d_{50} (μm)	d'_{50} (μm)	C_{VU} (%)	Q_F (cm ³ /s)
HCICOF-OT1	210,39	3335	43,86	89,59	81,45	1,72	8,99	2,03	0,104
HCIF-OT1	187,70	4190	41,19	91,91	86,24	0,85	7,01	2,21	0,001
HCOF-OT1	293,31	1715	48,33	90,31	81,25	0,84	6,84	1,85	0,216
HCON-OT1	240,63	2547	44,63	95,47	91,83	0,36	5,15	2,16	-

Tabela B.6 – Resultados experimentais para os hidrociclos otimizados do caso 2.

Hidrociclo	Q (cm ³ /s)	Eu	RL (%)	η (%)	η' (%)	d_{50} (μm)	d'_{50} (μm)	C_{VU} (%)	Q_F (cm ³ /s)
HCICOF-OT2	512,86	561	12,42	63,24	58,02	13,49	15,89	4,91	0,051
HCIF-OT2	434,71	780	7,89	64,79	61,77	13,28	14,66	7,56	0,023
HCOF-OT2	471,21	665	9,59	70,42	67,28	11,76	13,28	6,87	0,092
HCON-OT2	155,51	6100	5,53	70,88	69,18	12,38	13,13	11,35	-

Tabela B.7 – Resultados experimentais para os hidrociclos otimizados do caso 3.

Hidrociclo	Q (cm ³ /s)	Eu	RL (%)	η (%)	η' (%)	d_{50} (μm)	d'_{50} (μm)	C_{VU} (%)	Q_F (cm ³ /s)
HCICOF-OT3	503,63	582	14,36	62,49	56,20	13,29	16,45	4,17	0,216
HCIF-OT3	470,93	665	9,58	62,13	58,12	13,88	15,71	6,11	0,098
HCOF-OT3	477,06	648	15,49	71,44	66,21	9,80	12,69	4,40	0,113
HCON-OT3	417,94	845	6,31	66,56	64,31	13,12	14,15	9,56	-

B.3 - Valores dos Desvios Experimentais das Grandezas Analisadas

Na Tabela B.8 são apresentados os desvios experimentais das grandezas analisadas em relação aos hidrociclos 25 da matriz de planejamento (cinco réplicas no ponto central) para as quatro modalidades de separadores estudadas nesta tese.

Tabela B.8 – Valores dos desvios experimentais das grandezas analisadas em relação aos hidrociclos 25 da matriz de planejamento (ponto central).

Hidrociclos	Q (cm ³ /s)	Eu	RL (%)	η (%)	η' (%)	d_{50} (μm)	d'_{50} (μm)	C_{IV} (%)	Q_F (cm ³ /s)
HCICOF25	0,314	2,427	0,069	0,472	0,560	0,172	0,166	0,016	0,006
HCIF25	0,790	7,462	0,125	0,294	0,320	0,488	0,681	0,034	0,007
HCOF25	0,305	2,492	0,120	0,259	0,292	0,097	0,104	0,027	0,005
HCON25	0,337	4,440	0,098	1,213	1,524	0,197	0,390	0,064	-