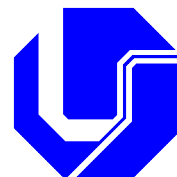




**UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**MINI-HIDROCICLONES APLICADOS AO SISTEMA DE CONTROLE  
DE SÓLIDOS NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

**JOSÉ LUCAS MOGNON**

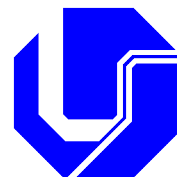
Uberlândia – MG

2015





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



**MINI-HIDROCICLONES APLICADOS AO SISTEMA DE CONTROLE DE  
SÓLIDOS NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

José Lucas Mognon

Orientadores: Carlos Henrique Ataíde  
Claudio Roberto Duarte

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

Uberlândia – MG

2015

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

---

M696m     Mognon, José Lucas, 1990-  
2015        Mini-hidrociclones aplicados ao sistema de controle de sólidos na  
             perfuração de poços de petróleo / José Lucas Mognon. - 2015.  
             91 f. : il.

Orientador: Carlos Henrique Ataíde.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Hidrociclone - Teses. 3. Fluidos -  
Teses. 4. Perfuração estratigráfica - Teses. I. Ataíde, Carlos Henrique, .  
II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.0

---

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 27 DE MARÇO DE 2015

BANCA EXAMINADORA



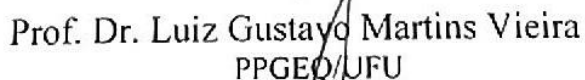
Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde  
Orientador - PPGEQ/UFU



Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte  
Orientador - PPGEQ/UFU



Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo  
PPGEQ/UFU



Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira  
PPGEQ/UFU



Dr. Curt Max de Ávila Panisset  
PETROBRAS



## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente aos meus pais, Solange Ferneda e Valentin Mognon, que sempre me apoiaram e incentivaram na busca de conhecimento, na mudança de estado para seguir meu sonho de cursar Engenharia Química e por me fornecerem condições de me empenhar exclusivamente aos meus estudos.

Aos meus irmãos, Alessandro e Daiane, e a minha cunhada Silvana e sobrinhos, pelo apoio, carinho e incentivo.

Agradeço imensamente à minha noiva Juliana Shimoyama, por todo o apoio e carinho, e por ser o pilar que me ajudou a vencer as dificuldades e me manter feliz e motivado, apesar da grande distância de toda minha família.

Ao meu Amigo Joaquim Moroni, em especial, pela amizade, companheirismo e auxílio na concretização desse trabalho.

Aos colegas e amigos Irineu Petri, Dyrney Araújo, Fernando Guerreiro, Curt Max e Isabele Cristina pelo apoio e companhia durante o período que estive em Uberlândia.

Aos meus orientadores, Carlos Henrique e Claudio Roberto, pela amizade e sabedoria passada durante todo o período a graduação e mestrado. E também pela confiança dada a mim e minhas ideias, ao qual sem ela, esse trabalho não teria se tornado o que é hoje.

A todos os meus professores da graduação e mestrado, em especial ao Marquinhos e Luiz Gustavo, pela amizade e conhecimento repassado durante todos esses anos.

A todos aqueles que torceram por mim e que me auxiliaram de alguma forma na realização desse sonho.

Por fim, agradeço a PETROBRAS e a CAPES pelo apoio financeiro dada a este trabalho.





# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	x
RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvii
CAPÍTULO 1 - Introdução .....	1
1.1 - Objetivos .....	5
CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica.....	6
2.1 - Fluidos de perfuração .....	6
2.2 - Hidrociclones .....	7
2.2.1 - Características do escoamento em hidrociclones .....	10
2.2.2 - Famílias de hidrociclones.....	15
2.2.3 - Variáveis de interesse no projeto de hidrociclones .....	15
2.2.3.1 - Concentrações mássicas .....	16
2.2.3.2 - Vazões volumétricas .....	16
2.2.3.3 - Eficiência total.....	17
2.2.3.4 - Razão de líquido.....	17
2.2.3.5 - Eficiência total reduzida.....	17
2.2.3.6 - Capacidade concentradora.....	18
2.2.3.7 - Divisão de fluxo .....	18
2.2.3.8 - Número de Euler .....	19
2.2.3.9 - Curva de eficiência granulométrica.....	19
2.2.3.10 - Diâmetro de corte .....	22
2.2.3.11 - Limite de separação.....	22
2.3 - Estudos publicados na literatura acerca de hidrociclones .....	23
2.3.1 - Condições operacionais e aplicações de hidrociclones .....	23

2.3.2 - Otimização de hidrociclones convencionais .....	24
2.3.3 - Modificações estruturais e não-convencionais .....	26
2.3.4 - Hidrociclones operando com fluidos pseudoplásticos .....	35
<b>CAPÍTULO 3 - Materiais e Métodos.....</b>	<b>37</b>
3.1 - Unidade experimental .....	37
3.2 - Hidrociclones .....	38
3.3 - Material particulado .....	40
3.4 - Preparação do fluido pseudoplástico.....	41
3.5 - Planejamento experimental para obtenção da geometria ótima .....	42
3.6 - Seleção da geometria ótima.....	44
3.7 - Planejamento experimental para avaliação em condições de campo.....	45
3.8 - Implementação do <i>software</i> para simulação de sistemas de controle de sólidos .....	48
3.9 - Estudo de operação do hidrociclone ótimo em série.....	48
3.10 - Procedimentos experimentais.....	52
3.10.1 - Medição da concentração de sólidos.....	52
3.10.2 - Análises granulométricas .....	53
3.10.3 - Procedimentos adotados nos ensaios com hidrociclones .....	53
3.10.3.1 - Procedimento para otimização dos hidrociclones .....	54
3.10.3.2 - Procedimento para testes em condições de campo.....	54
<b>CAPÍTULO 4 - Resultados e Discussões .....</b>	<b>56</b>
4.1 - Resultados para o estudo de otimização.....	56
4.1.1 - Relação entre razão de líquido e eficiência total.....	59
4.1.2 - Determinação do hidrociclone ótimo .....	60
4.1.3 - Avaliação do hidrociclone ótimo .....	65
4.1.4 - Verificação dos modelos propostos.....	66
4.2 - Resultados para operação com fluido pseudoplástico.....	67
4.2.1 - Curvas de eficiência granulométrica .....	70
4.3 - Implementação do <i>software</i> HydroSIM .....	72
4.3.1 - Interface gráfica.....	73
4.3.2 - Componentes.....	74
4.3.2.1 - Hidrociclones .....	75

4.3.2.2 - Junções e divisores de fluxo.....	77
4.3.2.3 - Correntes .....	77
4.3.3 - Sistema de conexões.....	78
4.3.4 - Resolvedor.....	78
4.4 - Estudo da operação do hidrociclone ótimo em série.....	80
<b>CAPÍTULO 5 - Conclusões .....</b>	<b>83</b>
5.1 - Estudo dos efeitos de variáveis geométricas e operacionais .....	83
5.2 - Estudo de otimização .....	83
5.3 - Estudo com fluido pseudoplástico.....	84
5.4 - Implementação do <i>software</i> HydroSIM .....	85
5.5 - Estudo de operação em série .....	85
5.6 - Sugestões para trabalhos futuros .....	86
<b>CAPÍTULO 6 - Referências bibliográficas.....</b>	<b>87</b>
APÊNDICE A – Interface gráfica e diagrama de blocos do sistema de controle utilizado .....	91
APÊNDICE B - Distribuição granulométrica da rocha fosfática utilizada. ....	92
APÊNDICE C – Distribuição granulométrica do cascalho. ....	93
APÊNDICE D – Resultados obtidos nos experimentos de otimização .....	94
APÊNDICE E – Resultados para configuração ótima operando com fluido pseudoplástico .....	95
APÊNDICE F – Curvas de eficiência granulométrica para testes com fluido pseudoplástico. ....	96



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema de um sistema de controle de sólidos. ....	3
Figura 1.2 – Esquema e condições de operação usual de centrífugas decantadoras (valores fornecidos pela empresa Petróleo Brasileiro S.A.).....	4
Figura 2.1 – Esquema básico de um hidrociclone. ....	8
Figura 2.2 – Exemplos típicos de hidrociclones clarificadores (a) e concentradores (b) (SVAROVSKY. 2000). ....	9
Figura 2.3 – Dinâmica das forças atuantes sobre uma partícula em um hidrociclone. ....	11
Figura 2.4 – Linhas de escoamento durante o curto circuito. Adaptado de Bradley (1965). ...	12
Figura 2.5 – Escoamento em um hidrociclone com destaque para a região do manto. Adaptado de Svarovsky (1984). ....	12
Figura 2.6 – Mecanismo de formação do <i>air core</i> . Adaptado de Hararah <i>et al.</i> (2010). ....	13
Figura 2.7 – Ilustração do efeito <i>fish-hook</i> na curva de eficiência granulométrica. ....	14
Figura 2.8 – Exemplificação dos diâmetros de corte e limite de separação. Adaptado de Svarovsky (2000). ....	22
Figura 2.9 – Hidrociclone de cone-interno proposto por Zhao <i>et al.</i> ....	26
Figura 2.10 – Modificação proposta por Hwang <i>et al.</i> (2012). ....	27
Figura 2.11 – Modificações estudadas no trabalho de Hwang <i>et al.</i> (2013). ....	29
Figura 2.12 – Haste e apoio interno utilizado no trabalho de Lee e Willians (1993). ....	29
Figura 2.13 – Hidrociclone convencional e a modificação proposta por Chu <i>et al.</i> (2002). ....	31
Figura 2.14 – Modificações propostas por Chu <i>et al.</i> (2004). ....	32
Figura 2.15 – Geometrias analisadas por Ghodrat <i>et al.</i> (2013). ....	33
Figura 2.16 – Alterações propostas por Yamamoto e Jiao (1997). ....	34
Figura 3.1 - Unidade experimental utilizada para os testes propostos. ....	37
Figura 3.2 – Esquema do hidrociclone utilizado nos ensaios. ....	38
Figura 3.3 - Esquema do hidrociclone modular utilizado nos testes. ....	39

Figura 3.4 - Distribuição de frequência para rocha fosfática utilizada.....	41
Figura 3.5 – Reogramas dos fluidos de perfuração e da mistura aquosa de CMC.....	42
Figura 3.6 – Arranjo de hidrociclones utilizado nas simulações.....	48
Figura 3.7 – Representação do posicionamento da bateria de hidrociclones funcionando em apoio as centrífugas decantadoras. ....	50
Figura 3.8 – Distribuição de frequência do cascalho recuperado nas centrífugas e da rocha fosfática utilizada.....	52
Figura 4.1 – Eficiência total em função da razão de líquido. ....	60
Figura 4.2 – Superfícies correlacionando a função objetivo às diferentes combinações de variáveis independentes.....	61
Figura 4.3 – Resultados obtidos pela otimização da função objetivo ( <i>FO</i> ), a configuração ótima é ilustrada pela linha pontilhada vermelha. ....	62
Figura 4.4 – Estudo do efeito do comprimento do <i>vortex finder</i> .....	64
Figura 4.5 – Resultados de eficiência total em função da razão de líquido da geometria ótima.....	65
Figura 4.6 – Valores previstos e observados para eficiência total do hidrociclone ótimo. ....	66
Figura 4.7 – Valores previstos e observados para razão de líquido do hidrociclone ótimo. ....	67
Figura 4.8- Superfície de resposta para eficiência total.....	69
Figura 4.9 - Superfície de resposta para razão de líquido. ....	70
Figura 4.10 – Curvas de eficiência granulométrica nas condições selecionados para o estudo de operação seriada.....	71
Figura 4.11 – Ambiente principal de trabalho do <i>software</i> HydroSIM.....	73
Figura 4.12 – Componentes disponíveis para utilização no ambiente do HydroSIM. ....	74
Figura 4.13 – Guia de propriedades dos componentes do <i>software</i> HydroSIM.....	75
Figura 4.14 – Fluxograma de funcionamento do <i>software</i> HydroSIM. ....	80
Figura 4.15 – Resultados obtidos para as diferentes configurações de hidrociclones.....	81



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relações geométricas referentes a algumas das famílias clássicas de hidrociclones (SVAROVSKY, 1984; VIEIRA, 2006; CRUZ, 2008). .....	15
Tabela 3.1 – Níveis dos fatores que compõem o planejamento composto central utilizado....	43
Tabela 3.2 – Planejamento composto central proposto. ....	44
Tabela 3.3 – Níveis do planejamento para análise do hidrociclone ótimo operando com fluido pseudoplástico. ....	46
Tabela 3.4 – Planejamento experimental para análise da operação com fluido pseudoplástico	47
Tabela 3.5 – Configurações em série analisadas. ....	50
Tabela 4.1 – Resultados obtidos para estudo da influência do <i>vortex finder</i> . ....	63
Tabela 4.2 – Configuração da geometria ótima.....	64
Tabela 4.3 – Resultados de $\eta$ , $R_L$ e $W_a$ para a geometria ótima.....	65
Tabela 4.4 – Parâmetros e coeficientes de determinação obtidos nos ajustes das curvas de eficiência granulométrica. ....	72
Tabela 4.5 – Parâmetros para modelagem dos hidrociclones das famílias Rietema e Bradley (Massarani, 2001). ....	76
Tabela 4.6 – Resultados obtidos para as configurações em série.....	80





## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos latinos

$B_p$	<i>by-pass</i> (parâmetro do modelo de Pasquier e Cilliers)	[ - ]
$c_v$	concentração volumétrica	[ - ]
$cw_a$	concentração mássica de sólidos na alimentação	[ - ]
$cw_u$	concentração mássica de sólidos no <i>underflow</i>	[ - ]
$C_c$	capacidade concentradora	[ - ]
$C_{cmc}$	concentração mássica de CMC	[ - ]
$\overline{C}_{cmc}$	concentração mássica de CMC na forma codificada	[ - ]
$C_{sól}$	concentração mássica de sólidos	[ - ]
$\overline{C}_{sól}$	concentração mássica de sólidos na forma codificada	[ - ]
$d$	diâmetro médio	[L]
$d_{50}$	diâmetro de corte	[L]
$d'_{50}$	diâmetro de corte reduzido	[L]
$d_{class}$	diâmetro de classificação (parâmetro do modelo de Pasquier e Cilliers)	[L]
$d_{disp}$	diâmetro de dispersão (parâmetro do modelo de Pasquier e Cilliers)	[L]
$D_c$	diâmetro da região cilíndrica	[L]
$D_o$	diâmetro do <i>overflow</i>	[L]
$D_u$	diâmetro do orifício de <i>underflow</i>	[L]
$\overline{D}_u$	diâmetro do orifício de <i>underflow</i> na forma codificada	[ - ]
$FO$	função objetivo da otimização	[ - ]

$F_{\eta}$	função auxiliar para eficiência total	[ - ]
$F_{RL}$	função auxiliar para razão de líquido	[ - ]
$G(d)$	eficiência granulométrica individual da partícula de diâmetro $d$	[ - ]
$k$	subscrito definidor de correntes ativas (HydroSIM)	[ - ]
$K_c$	constante de proporcionalidade do controlador	[M <sup>-1</sup> L <sup>4</sup> T <sup>-1</sup> ]
$\ell$	comprimento do tubo <i>vortex finder</i>	[L]
$L$	comprimento total do hidrociclone	[L]
$L_c$	comprimento da região cilíndrica	[L]
$\overline{L_c}$	comprimento da região cilíndrica na forma codificada	[ - ]
$L_v$	distância característica do <i>vortex finder</i>	[L]
$\overline{L_v}$	distância característica do <i>vortex finder</i> na forma codificada	[ - ]
$m_{class}$	parâmetro de classificação do modelo de Pasquier e Cilliers	[ - ]
$m_{disp}$	parâmetro de dispersão do modelo de Pasquier e Cilliers	[ - ]
$N$	número de hidrociclones	[ - ]
$n_c$	número de correntes ativas (HydroSIM)	[ - ]
$n_t$	número de faixas de diâmetro da distribuição granulométrica (HydroSIM)	[ - ]
$P$	pressão de alimentação	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\overline{P}$	pressão de alimentação na forma codificada	[ - ]
$Q_a$	vazão volumétrica na alimentação	[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
$Q_u$	vazão volumétrica no <i>underflow</i>	[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
$R$	resposta do controlador para inversor de frequência	[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
$R_c$	redução percentual na concentração da corrente de <i>overflow</i>	[ - ]
$R_L$	razão de líquido	[ - ]

$S$	divisão de fluxo ou <i>split ratio</i>	[ - ]
$v_c$	velocidade na região cilíndrica	[LT <sup>-1</sup> ]
$W_a$	vazão mássica de alimentação	[MT <sup>-1</sup> ]
$W_u$	vazão mássica do <i>underflow</i>	[MT <sup>-1</sup> ]
$Ws_a$	vazão mássica de sólidos na alimentação	[MT <sup>-1</sup> ]
$Ws_u$	vazão mássica de sólidos no <i>underflow</i>	[MT <sup>-1</sup> ]

## Símbolos Gregos

$\beta$	parâmetro de perda de carga	[ - ]
$\Delta c$	critério de convergência para concentração (HydroSIM)	[ - ]
$\Delta P_m$	pressão medida na alimentação do hidrociclone	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\Delta P_{sp}$	pressão de <i>set point</i>	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\Delta X_a(d)$	fração de sólidos com diâmetro $d$ na corrente de alimentação	[ - ]
$\Delta X_u(d)$	fração de sólidos com diâmetro $d$ na corrente de <i>underflow</i>	[ - ]
$\gamma$	taxa de cisalhamento	[T <sup>-1</sup> ]
$\eta$	eficiência total	[ - ]
$\eta'$	eficiência total reduzida	[ - ]
$\mu$	viscosidade dinâmica	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> ]
$\theta$	ângulo da região cônica	[ - ]
$\bar{\theta}$	ângulo da região cônica na forma codificada	[ - ]
$\rho_a$	densidade da mistura sólido-líquido na alimentação	[ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_{liq}$	densidade da fase líquida	[ML <sup>-3</sup> ]

$\rho_{sol}$	densidade da fase sólida	[ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_u$	densidade da mistura sólido-líquido no <i>underflow</i>	[ML <sup>-3</sup> ]



## RESUMO

O processo de perfuração de poços consiste em uma das fases mais onerosa e poluidora da produção do petróleo. Nessa fase, grande quantidade de fluido de perfuração é utilizada na remoção dos sólidos perfurados no fundo do poço, devendo ser constantemente tratado, através da remoção destes sólidos, para que ele possa ser reutilizado. Esse tratamento é geralmente realizado por um sistema que envolve a utilização de peneiras, hidrociclones, centrífugas decantadoras e secadores rotatórios. As centrífugas, responsáveis principalmente pela recuperação de sólidos finos, tem sua utilização limitada, tanto por conta dos custos envolvidos quanto espaço em sonda, não podendo assim processar todo o volume de fluido circulante no sistema de perfuração. Dessa forma, o presente trabalho vem propor a utilização de mini-hidrociclones ( $D_c = 30\text{ mm}$ ) no apoio das centrífugas decantadoras, de modo a uma maior remoção de material fino do fluido reinjetado. Para isso, estudos de otimização de parâmetros operacionais e geométricos foram realizados, seguidos de otimização, a fim de obter uma geometria com alta eficiência e baixa razão de líquido. Essa geometria, denominada geometria ótima, foi então testada fazendo-se uso de diferentes fluidos (água+carboximetilcelulose) com características reológicas (pseudoplasticidade) similares ao utilizado em perfurações. Por fim, os resultados obtidos foram utilizados em uma simulação do hidrociclone ótimo operando com sólidos advindos de centrífugas reais (borra) e operando em série. Os resultados obtidos para a geometria ótima mostraram altos níveis de eficiência total (81-89%) mantendo-se, no entanto, razões de líquido reduzidas. Foram obtidas expressões empíricas para a operação com fluido pseudoplástico, sendo que essas apresentaram valores de  $R^2$  superiores a 0,986. Por fim, os resultados da simulação da operação em série mostraram que os hidrociclones testados podem promover uma redução de até 24% no teor de sólidos do fluido reinjetado, permitindo também alta flexibilidade durante as diferentes fases da perfuração.

**Palavras chave:** hidrociclones, otimização, fluido de perfuração, pseudoplasticidade, HydroSIM.





## ABSTRACT

The drilling process is one of the most costly and polluting phases in oil production. In that stage, large amounts of drilling fluid are used for removing the drilled cuttings of the well. This fluid requires constant treatment, in the form of solid removal, so it can be properly reused for injection. This treatment is usually performed by a system that involves the use of hydrocyclones, sieves, rotational dryers and decanter centrifuges. The centrifuges, mainly responsible for fine solids recovery, has its application limited by the high installation and maintenance costs involved and platform space restrictions, and thus not being able to process the entire volume of circulating fluid in the drilling system. Thereby, the present work propose the use of mini hydrocyclones ( $D_c = 30\text{ mm}$ ) in support of decanter centrifuges, aiming a higher fine cuttings removal of drilling fluid. To this end, an operational and geometric parameters effects study were performed, followed by optimization, in order to obtain a geometry with high efficiency and low liquid ratio. This geometry, referred as optimal geometry, was then tested on the operation with different fluids (water+carboxymethylcellulose) having rheological characteristics (pseudoplastic fluid) similar to the one commonly used in drilling process. Finally, the obtained results were implemented in a simulation of the optimum hydrocyclone, using for that, a granulometric size distribution from a centrifuge drilled cuttings sample and also analyzing the serial operation of the equipment. The results obtained for the optimal geometry showed high levels of total efficiency (81-89%) while maintaining reasonable values of underflow-to-throughput ratios. In sequence, empirical expressions for the pseudoplastic fluid operation were obtained for total efficiency, underflow-to-throughput ratio, cut diameter and flowrate, with coefficients of determination above 0.986. Finally, simulation results of serial operation showed that the tested hydrocyclones may promote a reduction of up to 24% on the fluid solid content, while also allowing high flexibility during the different phases of drilling.

Keywords: hydrocyclones, optimization, drilling fluid, pseudoplastic.



---

## CAPÍTULO 1 - Introdução

---

Nas últimas décadas, a crescente demanda de combustíveis fósseis, intimamente ligada ao constante crescimento populacional e ao surgimento de grandes potências emergentes como a China, torna a necessidade de autossuficiência na produção de petróleo cada vez mais urgente. À medida que os preços internacionais de óleo cru, combustíveis e derivados sofrem forte influência dos grandes produtores mundiais (OPEP), países com reservas menores buscam alternativas de produção e exploração, muitas vezes tomadas como não convencionais, para obtenção do chamado ouro negro. Essas alternativas recebem essa denominação pelo fato de possuírem um alto custo envolvido, tanto no processo de perfuração dos poços, quanto na produção do óleo e gás. Dentre elas pode-se destacar o petróleo encontrado abaixo da camada salina em regiões *offshore*, o denominado pré-sal, que vem sendo alvo de grande interesse econômico e científico no Brasil e também no mundo.

Tendo isso em vista, fica clara a necessidade, que é sempre presente, mas que nesse caso se ressalta tendo em vista o cenário econômico, da otimização no processo de perfuração dos poços de petróleo, visando tanto à redução de custos quanto à adequação a resoluções ambientais que são cada vez mais rigorosas. Tendo em vista a complexidade e ao grande número de processos envolvidos na indústria do petróleo, tornando estudos mais abrangentes proibitivos do ponto de vista técnico e econômico, esse trabalho irá se restringir a área que abrange os processos conduzidos em plataformas e sondas durante a fase de perfuração de novos poços.

Sabe-se que durante o processo de perfuração de um poço de petróleo, cascalho é constantemente produzido à medida que a broca de perfuração avança em direção aos reservatórios de óleo. Esse cascalho deve ser prontamente retirado do fundo do poço, de modo a permitir a continuidade da perfuração do mesmo. Para isso, faz-se uso do denominado fluido de perfuração, que consiste de uma mistura de diversos componentes, dentre eles

sólidos, líquidos e aditivos químicos, sendo este injetado diretamente pelo interior da coluna de perfuração e recuperado a superfície através da região anular.

O retorno do fluido à superfície permite a ascensão do sólido perfurado presente no fundo deste. Analisando-se pelo ponto de vista econômico-operacional, fica clara a necessidade de que este fluido apresente fácil bombeamento, o que requer que o mesmo não se constitua de componentes muito viscosos. No entanto, devido à inconstância característica do processo de perfuração, que demanda uma série de paradas, tanto programadas quanto emergenciais, surge a necessidade de que esse cascalho em ascensão não sofra sedimentação durante as interrupções de escoamento. Para isso, de modo antagônico ao anterior, requer-se que o fluido de perfuração apresente alta resistência à sedimentação dos sólidos dispersos nele, ou seja, alto nível de viscosidade.

A partir dos fatos expostos, surge a justificativa para a propriedade mais característica dos fluidos de perfuração: a pseudoplasticidade. Fluidos pseudoplásticos consistem em líquidos não-Newtonianos caracterizados por apresentar viscosidade reduzida quando em escoamento (alto cisalhamento), enquanto possuem viscosidade elevada em condições de repouso (cisalhamento baixo ou nulo).

Como citado anteriormente, a remoção de cascalhos perfurados do interior do poço trata-se da função primordial dos fluidos de perfuração. A partir desse fato surge então a necessidade de que esses sólidos recuperados sejam devidamente removidos do referido fluido assim que esse emerge à superfície, para que só assim possa ser rebombeado no poço. Essa necessidade de tratamento é então realizada através de um conjunto de equipamentos e processos, sendo estes integrantes do comumente denominado sistema de controle de sólidos.

Um sistema de controle de sólidos eficiente permite a manutenção das propriedades do fluido de perfuração, sejam elas viscosidade, densidade e baixa abrasividade, dentro de valores desejáveis ao processo de perfuração. Isso resulta em um aumento na durabilidade da broca de perfuração e de todos os equipamentos envolvidos no bombeamento do fluido, além de promover maiores taxas de penetração. Todas essas melhorias citadas são capazes de reduzir tanto o tempo quanto o custo empregado na perfuração de poços.

Já um sistema de controle de sólido mal projetado causa, no decorrer do processo de perfuração, o acúmulo de sólidos, reduzindo a taxa de penetração da broca e provocando a deposição de material particulado. Os sólidos sedimentados (em perfurações inclinadas,

principalmente aquelas entre 35° e 70°) tendem a se concentrar na região inferior do poço em zonas denominadas “dunas” (Njobuenwu e Wobo, 2007). A superposição dessas dunas impede a limpeza eficiente do poço, levando a uma série de problemas, incluindo o aprisionamento da coluna, geração de torque e arraste excessivo, estrangulamento da região anular, perda de circulação e aumento de viscosidade, elevação dos custos com reposição do fluido de perfuração, baixa qualidade de revestimento e cimentação e baixas taxas de perfuração (Njobuenwu e Nna, 2005).

Pelo fato do tamanho dos sólidos provenientes da perfuração do poço apresentar grande variabilidade, contendo partículas que se enquadram nas categorias de areia (0,1-2 mm), silte (0,01-0,1 mm) e argilas (<10 µm), são necessários diferentes tipos de equipamentos para que, de forma eficiente, estes sejam removidos do fluido de perfuração. Objetivando assim a máxima remoção de material perfurado e associada à minimização da perda de fluido durante o processo.

Os equipamentos comumente empregados nesses sistemas incluem desde peneiras vibratórias, hidrociclones desareiaadores e dessiltadores até centrífugas decantadoras de alta velocidade (Figura 1.1). As centrífugas decantadoras, em especial, são as responsáveis pela remoção dos sólidos ultrafinos presentes no fluido de perfuração, consistindo na linha de retenção final em um sistema de controle de sólidos.

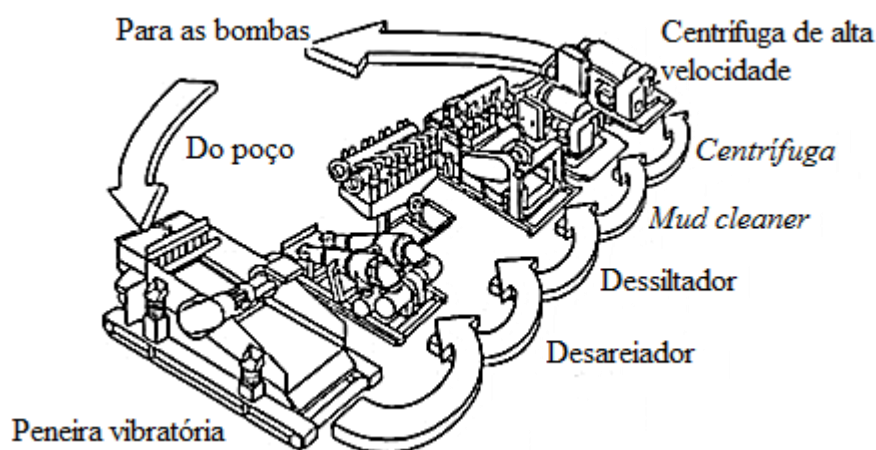


Figura 1.1 – Esquema de um sistema de controle de sólidos.

Esses equipamentos, apesar de extremamente eficientes na remoção de partículas finas, apresentam uma série de desvantagens, dentre elas pode-se destacar:

- Capacidade de processamento relativamente baixa, principalmente quando comparadas a outros equipamentos utilizados no controle de sólidos e se considerado o grande volume de fluido circulante no sistema de perfuração;
- Alto custo de instalação, operação e manutenção;
- Necessidade de grande espaço para instalação, o que limita sua utilização em sondas *offshore*.

A capacidade de processamento relativamente baixa desses equipamentos torna-se um problema nas fases iniciais de perfuração do poço. Nessas fases a elevado diâmetro do poço exige um aumento na vazão de fluido de perfuração, e conseqüentemente sobrecarrega o sistema de controle de sólidos. A Figura 1.2 esquematiza o funcionamento usual desses equipamentos em uma sonda de perfuração.

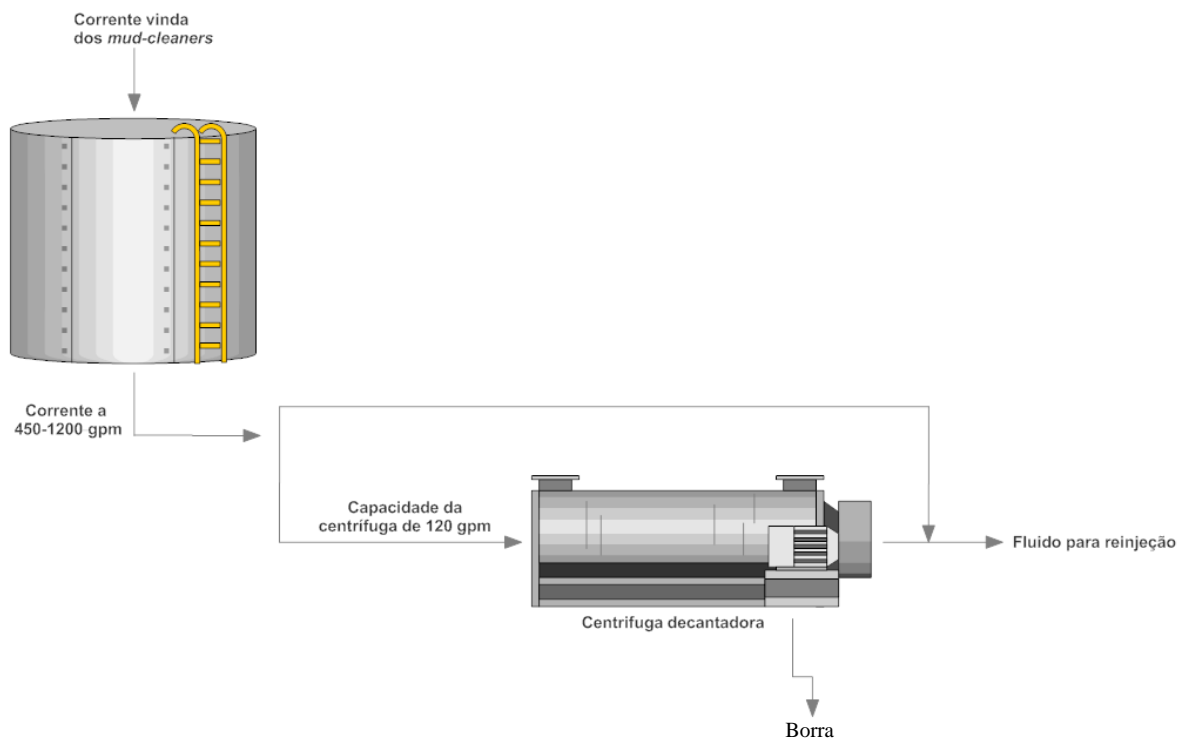


Figura 1.2 – Esquema e condições de operação usual de centrífugas decantadoras (valores fornecidos pela empresa Petróleo Brasileiro S.A.)

Fica claro a partir da Figura 1.2 que a maior parte do fluido de perfuração acaba por não receber tratamento nas centrífugas. Isso ocasiona o acúmulo de partículas finas no mesmo, trazendo toda a gama de problemas descritos anteriormente, à medida que o fluido é recirculado entre o sistema de controle de sólidos e o poço perfurado.

Quantitativamente pode-se afirmar que em condições críticas de operação, apenas cerca de 10% do fluido circulante é direcionado às centrífugas decantadoras, sendo o restante redirecionado por *by-pass*, misturado à corrente já tratada e, então, reinjetado no poço.

Tendo em vista a problemática apresentada, surge a necessidade de alternativas que venham tratar o volume não processado pelas centrífugas, reduzindo de forma considerável a quantidade de material particulado fino disperso no fluido recirculado para dentro do poço.

Os hidrociclones surgem a partir dessa necessidade como uma alternativa que apresenta baixos custos de instalação, operação e manutenção, além de ocuparem pouco espaço físico para seu funcionamento. Hidrociclones já são utilizados para remoção de areia e silte para controle de sólidos em fluidos de perfuração, no entanto devido ao fato de possuírem diâmetro característico superior a 4 in, estes acabam não sendo eficazes na retenção de partículas finamente divididas (SVAROVSKY, 2000).

## 1.1 - Objetivos

Dessa forma, o presente trabalho propõe um estudo de melhoria de desempenho e aplicabilidade em sistemas de controle de sólidos (especialmente sólidos ultrafinos) de hidrociclones de pequeno diâmetro, também denominados mini-hidrociclones. Visando isso, este trabalho teve como principais objetivos específicos:

- determinar, a partir de um estudo experimental e estatístico, as melhores configurações operacionais e geométricas de um hidrociclone com  $D_c = 30\text{ mm}$ . Nessa etapa, devido à grande quantidade de testes envolvidos, utilizou-se água pura como meio contínuo;
- realizar, utilizando-se das geometrias de melhor desempenho obtidas do item acima, um novo estudo, em condições próximas as encontradas em campo, fazendo-se uso para isso de fluido com característica pseudoplástica.
- desenvolver um *software* para auxílio no projeto e otimização de sistemas de controle de sólidos, permitindo a utilização dos resultados obtidos nos itens anteriores de maneira prática e didática;
- realizar, através da caracterização empírica do equipamento de melhor desempenho em condições similares as observadas em campo, um estudo teórico a fim de determinar o desempenho do equipamento operando em série e fazendo uso de material particulado similar ao encontrado em campo.

---

## **CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica**

---

A seção apresentada a seguir contém uma revisão atualizada, ou estado da arte, dos trabalhos publicados nas áreas de interesse deste trabalho.

### **2.1 - Fluidos de perfuração**

Fluidos de perfuração consistem em uma mistura de diversos componentes, dentre eles pode-se encontrar sólidos, líquidos, aditivos químicos e por vezes gases (fluidos aerados). Sua estrutura química varia dependendo do tipo de fluido em questão, sendo produzidos nas formas de suspensão, dispersão coloidal ou emulsões (THOMAS, 2001).

Esse fluido tem o objetivo de assegurar que a perfuração dos poços de petróleo e gás seja realizada de forma segura e rápida, reduzindo assim os custos que envolvem todo o processo propriamente dito. Dessa forma, é desejável que esses fluidos possuam algumas características específicas (THOMAS, 2001):

- ser estável quimicamente;
- estabilizar as paredes do poço, mecânica e quimicamente;
- facilitar a separação dos cascalhos na superfície;
- manter os sólidos em suspensão quando estiver em repouso;
- ser inerte em relação a danos às rochas produtoras;
- aceitar qualquer tratamento, físico e químico;
- ser bombeável;
- apresentar baixo grau de corrosão e de abrasão em relação à coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação;
- facilitar as interpretações geológicas do material retirado do poço;
- apresentar custo compatível com a operação.



Enquanto que suas funções primordiais no processo de perfurações podem ser assim enumeradas (THOMAS, 2001; ASTM, 2005):

- promover a limpeza do interior do poço, removendo os cascalhos provenientes da perfuração e transportando-os até a superfície;
- exercer pressão hidrostática sobre as formações do poço, evitando o influxo de gás ou produtos indesejáveis (*kick*), o que pode acarretar em sérios acidentes (*blowout*), todavia, para manter a integridade do poço ela deve ser baixa o suficiente para evitar fraturar as paredes do poço;
- selar formações com características porosas e permeáveis;
- lubrificar a coluna e resfriar a broca de perfuração;
- transmitir energia hidráulica a broca de perfuração.

## **2.2 - Hidrociclones**

Hidrociclones, também denominados ciclones hidráulicos, consistem em dispositivos amplamente utilizados na indústria, com destaque para o setor da mineração, como sistemas extremamente versáteis de separação (sólido-líquido e líquido-líquido) a mais de 100 anos (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006).

Suas aplicações gerais consistem na classificação, deslamagem, clarificação, desgaseificação e descontaminação de sólidos (KELLY *et al.*, 1982) dos mais diversos tipos de misturas sólido-líquido ou líquido-líquido. Compreendendo operações que vão desde o controle de sólidos e contaminantes durante a perfuração de poços de óleo e gás, até a separação da massa proteica dos grânulos de amido na indústria alimentícia.

Grande parte da sua extensa aplicabilidade industrial pode ser explicada pelas vantagens inerentes do uso desse equipamento, que são listadas a seguir (SVAROVSKY, 2000):

- Grande versatilidade, sendo usados nos mais diversos setores industriais e desempenhando os mais diversos tipos de funções relacionadas a separação.
- Tem tamanho reduzido quando comparados a outros equipamentos de operação similar, requerendo pouco espaço para instalação. Facilitando a troca, manutenção e inspeção dos mesmos.
- Possuem fácil construção, instalação, operação, manutenção e limpeza.

- Além de ser uma opção mais econômica quando comparado a mecanismos similares de separação (centrífugas e filtros).

No entanto hidrociclones possuem algumas desvantagens em sua operação:

- São de certa forma inflexíveis depois de instalados e operados, devido a sua grande sensibilidade a vazão e concentração de alimentação;
- Existem limitações físicas quanto às capacidades de concentração e clarificação do equipamento, sendo isso revertido através da operação em multiestágios o que aumenta os custos e espaço requerido para a operação;
- São suscetíveis à abrasão na separação sólido-líquido;
- As altas taxas de cisalhamento impedem a floculação de certos tipos de sólidos, o que dificulta o processo de separação. Além disso, em certas aplicações, como a recuperação de microrganismos (leveduras), o cisalhamento pode causar o rompimento da parede celular das células.

A Figura 2.1 apresenta a construção básica de um hidrociclone. Sua geometria convencional consiste em uma região cilíndrica, dotada de um duto (de seção cilíndrica ou retangular) que se insere no seu topo de forma tangencial. Como extensão a região cilíndrica tem-se uma região em formato de tronco de cone convergente em um orifício inferior denominado *underflow* ou também *apex*. Diretamente na seção superior do equipamento observa-se um duto inserido na região cilindra, esse duto recebe a denominação de *vortex finder*, enquanto a saída superior recebe a denominação de *overflow*.

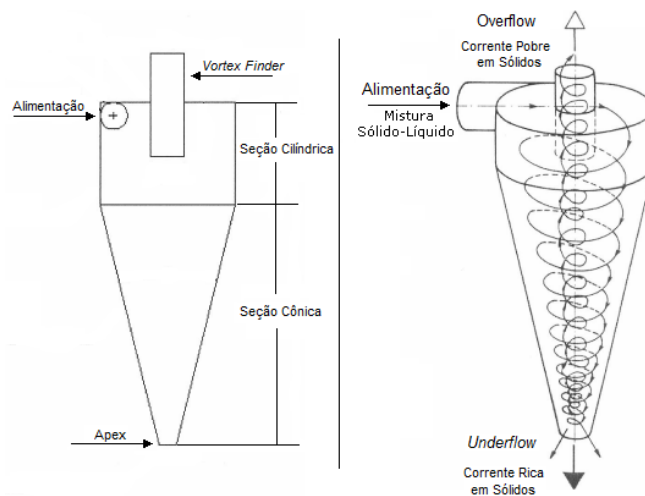


Figura 2.1 – Esquema básico de um hidrociclone.

Dada a grande versatilidade dos hidrociclones, sua construção pode ser realizada objetivando uma série de diferentes funções dependendo de sua aplicação final. Genericamente podem-se dividir os hidrociclones em duas categorias: hidrociclones concentradores e hidrociclones clarificadores (SVAROVSKY, 2000), sendo que a construção de um equipamento com ambas as características seria de grande interesse, assim como de igual dificuldade.

Hidrociclones concentradores tratam-se de equipamentos desenvolvidos a fim de eliminar a maior quantidade de líquido (fase contínua) da corrente concentrada (*underflow*). Dessa forma é um equipamento que apresenta eficiências de separação total não tão altas, o que consequentemente traz uma maior quantidade de sólidos na corrente clarificada (*overflow*). Segundo Svarovsky (2000), hidrociclones com uma região cônica larga (grandes ângulos de inclinação) apresentam um escoamento circulatório em seu interior, além disso, o choque do fluido com as paredes em grande inclinação propiciam um acúmulo rápido de sólidos nas paredes, favorecendo o processo de concentração.

Por outro lado, os hidrociclones clarificadores são construídos de modo a produzir correntes de *overflow* o mais límpidas possível. Dessa forma faz-se necessária um maior redirecionamento de fluxo para a corrente de *underflow*, o que reduz sua capacidade concentradora. De forma geral, hidrociclones com pequenos ângulos na região cônica não apresentam a zona de recirculação citada anteriormente e dessa forma favorecem a coleta de partículas finas, que geralmente são os maiores resíduos presentes na corrente clarificada. A Figura 2.2 apresenta uma ilustração dos dois tipos de hidrociclones citados a pouco.

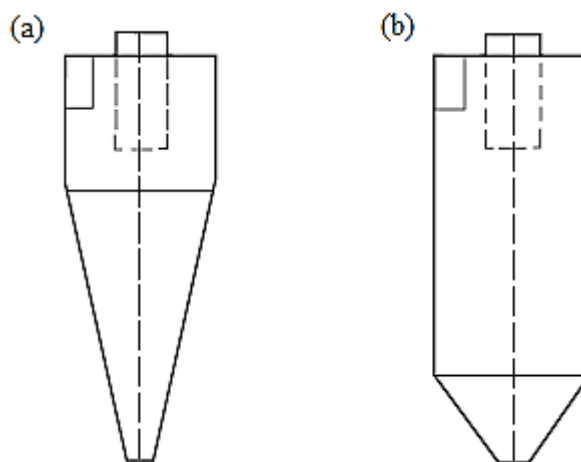


Figura 2.2 – Exemplos típicos de hidrociclones clarificadores (a) e concentradores (b) (SVAROVSKY, 2000).

Cabe ressaltar que o efeito circulatório no interior dos hidrociclones concentradores traz consigo uma grande vantagem: a remoção de partículas finas da corrente de *underflow*, pois essas são mais facilmente suspensas pelos fluxos radiais e axiais, resultando dessa forma em uma melhor classificação do material. Dessa forma, partículas com diferentes densidades, tamanhos ou mesmo formatos podem ser classificadas e separadas, capacidade essa de grande interesse para a indústria de mineração.

### **2.2.1 - Características do escoamento em hidrociclones**

Apesar de sua construção simples, o escoamento dentro de um hidrociclone é bastante complexo e os modelos reportados até a presente data ainda não estão completamente desenvolvidos (SCHUBERT, 2010). Especialmente quando a modelagem envolve os efeitos de forma e tamanho das partículas separadas (KASHIWAYA *et al.*, 2012).

Diversos autores têm tentado descrever, de forma qualitativa, o escoamento no interior de hidrociclones, com destaque para os trabalhos de Bradley (1965) e Svarovsky (1984). Nos dias atuais, com a evolução tecnológica e principalmente devido à difusão do uso dos métodos ópticos para determinação dos campos de velocidade no escoamento de fluidos, diversos pesquisadores têm investigado esses campos, a fim de obter correlações entre as características de escoamento e a eficiência de separação do equipamento (KELSALL; DABIR e PETTY).

A força motriz da separação das partículas em um separador ciclônico consiste na formação de um forte campo centrífugo gerado a partir do escoamento helicoidal turbulento no interior do hidrociclone (MURTHY, 2012). Esse tipo de escoamento surge a partir da injeção da mistura sólido-partículas através de uma entrada tangencial que impacta nas paredes da câmara cilíndrica do equipamento. Dessa forma, o fluido desenvolve uma velocidade rotacional e descendente até o ponto onde o estrangulamento da seção circular, devido ao formato cônico na zona inferior, força parte do fluxo a se direcionar de forma ascendente. Essa corrente ascendente é então coletada através do tubo do *vortex finder*, sendo apenas parte do fluxo total descarregado pelo *apex*.

Dessa forma, tem-se em síntese que o escoamento no interior de um hidrociclone pode ser descrito como a combinação entre um escoamento helicoidal externo descendente e um escoamento helicoidal interno ascendente. Naturalmente, para que haja a inversão do escoamento para o sentido ascendente, é necessário que haja deslocamento de parte do

fluido no sentido radial (em direção ao eixo do equipamento), que ocorre, segundo alguns autores (SVAROVSKY, 1984; WILLS, 1997) ao longo de toda a extensão do hidrociclone.

No que tange a dinâmica das partículas injetadas juntamente com o fluido através da alimentação tangencial do equipamento, tem-se que estas, após serem aceleradas e atingirem o seio do escoamento helicoidal, estão sujeitas a duas forças opostas: a força centrífuga direcionada para o exterior e a força de arraste direcionada para o interior do hidrociclone (Figura 2.3). A força centrífuga desenvolvida pelo escoamento helicoidal acelera a taxa de sedimentação das partículas na direção radial, separando e classificando as mesmas de acordo com seu tamanho, formato e densidade (Murthy e Bhaskar, 2012). Dessa forma, partículas maiores e mais densas são direcionadas as paredes do equipamento em escoamento descendente até serem coletas pelo orifício de *underflow*. Enquanto isso o escoamento axial desenvolvido ao longo do equipamento arrasta as partículas menores e menos densas para dentro do *vortex* central ascendente, sendo assim coletadas através do *vortex finder* pela corrente de *overflow*.

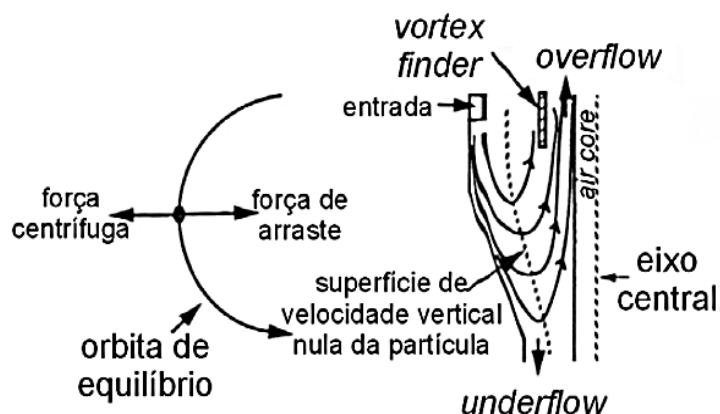


Figura 2.3 – Dinâmica das forças atuantes sobre uma partícula em um hidrociclone.

Um fenômeno importante no escoamento em hidrociclones são os efeitos de fricção causados pelas paredes. Segundo Bergström e Vomhoff (2007) os efeitos de fricção na parede superior do equipamento, associada à alta pressão presente nessa região e baixas velocidades tangenciais causam o denominado “curto-circuito” do fluido. Esse fenômeno é caracterizado pela passagem direta do fluido da corrente de alimentação para a corrente do *overflow* sem que o mesmo tenha sofrido ação do campo centrífugo das zonas inferiores do equipamento, como pode ser visualizado na Figura 2.4. Esse efeito é obviamente indesejado na separação

das partículas e é também uma das razões pela qual o *vortex finder* é inserido ao longo de grande parte da seção cilíndrica.

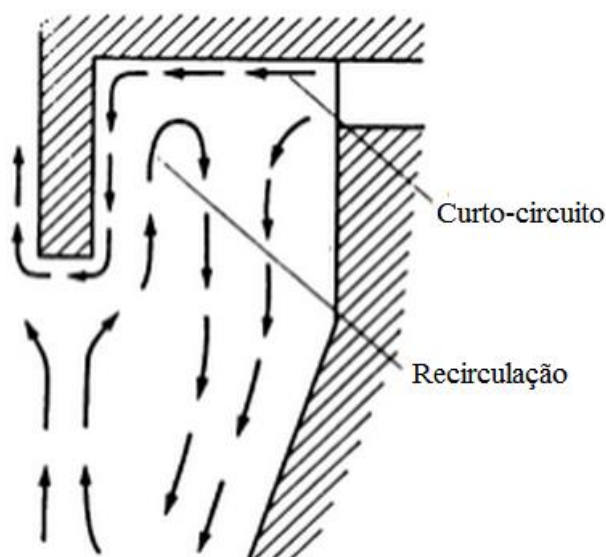


Figura 2.4 – Linhas de escoamento durante o curto circuito. Adaptado de Bradley (1965).

Outra característica interessante do escoamento no interior de hidrociclones consiste na formação de uma área caracterizada por velocidades axiais praticamente nulas. Essa região, denominada “manto”, situa-se diretamente no entorno das paredes externas do *vortex finder* no centro de uma zona de recirculação que pode ser visualizada na Figura 2.5. Bradley (1965) relatou a ocorrência dessa região pela primeira vez ao observar que pequenas quantidades de traçador ficavam presas em zonas de recirculação próximas ao *vortex finder*. Essa região tem efeito negativo na separação sólido-líquido, pois é responsável pela suspensão de material particulado, além de contribuir para a ocorrência do curto-circuito do escoamento.

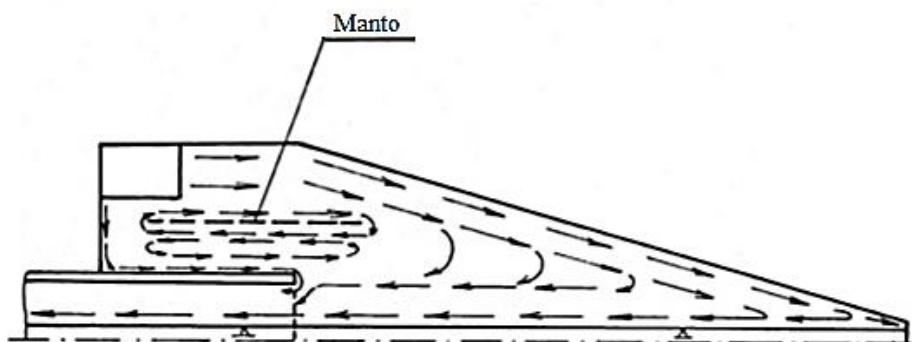


Figura 2.5 – Escoamento em um hidrociclone com destaque para a região do manto. Adaptado de Svarovsky (1984).

As altas velocidades tangenciais, associadas ao movimento helicoidal do fluido ao longo do hidrociclone criam um gradiente de pressão em direção as paredes do equipamento, resultado assim em um núcleo de baixa pressão alinhado ao eixo central deste. Nessa região, devido à própria dinâmica de separação entre componentes de diferentes densidades e ao fato de apresentar pressões inferiores à atmosférica, forma-se um núcleo gasoso comumente denominado *air core* (Figura 2.6). Segundo Neesse e Dueck (2007), o ar presente nesse núcleo provém tanto de bolhas presentes na corrente de alimentação quanto da sucção de gás pelo duto de *underflow*.

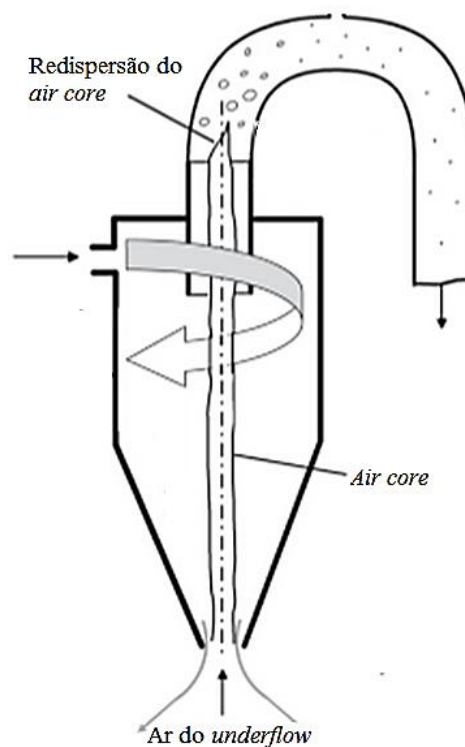


Figura 2.6 – Mecanismo de formação do *air core*. Adaptado de Hararah *et al.* (2010).

Outro ponto de grande interesse e também alvo de grande discussão no meio científico tem sido o denominado efeito *fish-hook*. A curva de eficiência granulométrica ou curva de partição de separação, que relaciona a eficiência de coleta ao diâmetro de determinada partícula, é normalmente bem representada por modelos do tipo Rosin-Rammler e Sigmóide, ou seja, tratam-se de curvas do tipo “S”, onde quanto menores os diâmetros de partícula menores suas eficiências de coleta. No entanto essa curva nem sempre segue esse

formato, apresentando um aumento de eficiência anormal para partículas ultrafinas (Figura 2.7).

Mesmo tendo sido reportado por diversos estudiosos ao longo de muito tempo, o efeito *fish-hook* continua sendo um assunto controverso entre pesquisadores e especialistas em separação sólido-líquido. Havendo assim um grupo que defende a ideia de que esse efeito é um fenômeno físico real, enquanto outro afirma que ele não passa de um desvio decorrente de erros experimentais.

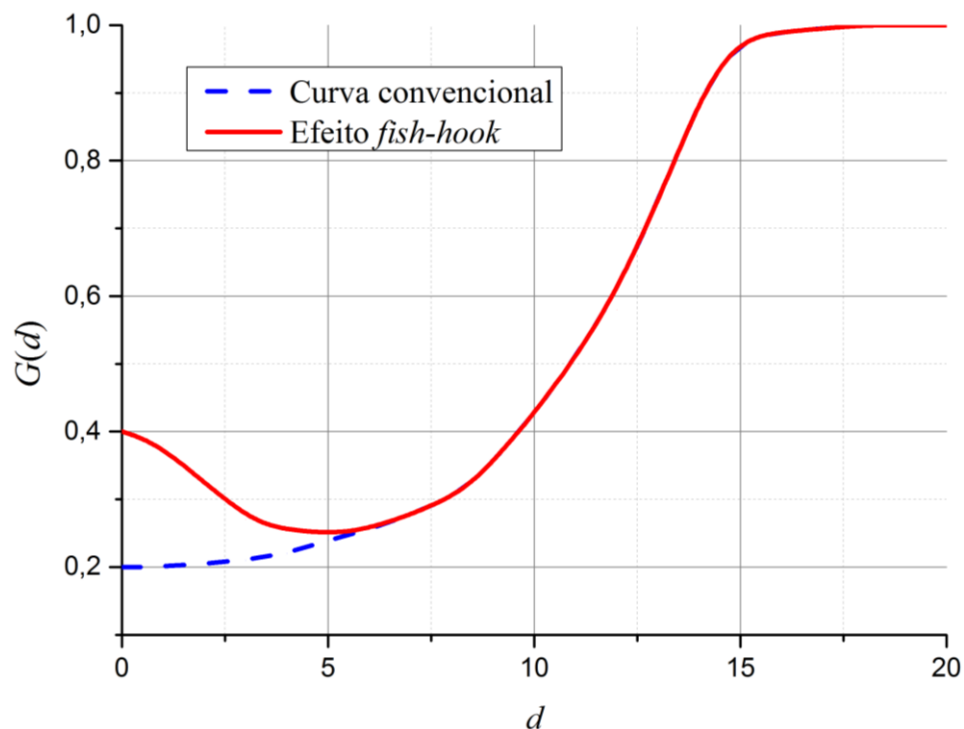


Figura 2.7 – Ilustração do efeito *fish-hook* na curva de eficiência granulométrica.

Flitoff *et al.* (1987) atribui a ocorrência desse efeito a metodologia experimental mal conduzida e/ou aglomeração de partículas finas em torno das mais grossas. Nageswararao (2000) sugere que o efeito seja randômico e esporádico, sendo causado por erros de medida e que este não afetaria significativamente o desempenho do equipamento. Borgeois e Majumder (2013) analisaram os efeitos da variabilidade das análises granulométricas na obtenção das curvas de eficiência e concluíram que o efeito *fish-hook* pode sim se tratar de um fenômeno físico.

Já Dueck *et al.* (2013) realizaram ensaios experimentais e comprovaram que existe uma correlação entre a distribuição de partículas alimentada ao equipamento e a magnitude do



efeito *fish-hook* observado. Afirmaram também que a existência de um fração maior de partículas grossas alimentadas causa um efeito positivo na separação de partículas finas ou ultra finas somente. Esse fato pode ser explicado pela aglomeração de partículas menores entorno das maiores ou mesmo ao aprisionamento de partículas finas nos turbilhões gerados pelo deslocamento das grossas (KRAIPECH *et al.*, 2002).

## 2.2.2 - Famílias de hidrociclones

Ao longo dos 100 anos nos quais os hidrociclones tem sido utilizados na indústria, diversos pesquisadores realizaram estudos de modo a obter geometrias otimizadas para funções específicas. A partir de alguns desses estudos surgiram geometrias que ganharam grande respaldo no meio científico. Esses grupos de hidrociclones, com relações geométricas ou proporções fixas, recebem a denominação de “família” e são comumente utilizados como referências em novos projetos e otimizações para funções mais específicas. Algumas das famílias mais conhecidas são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Relações geométricas referentes a algumas das famílias clássicas de hidrociclones (SVAROVSKY, 1984; VIEIRA, 2006; CRUZ, 2008).

Família	Proporções Geométricas				
	$D_i/D_c$	$D_o/D_c$	$L_c/D_c$	$L/D_c$	$\theta$
Rietema	0,280	0,340	0,400	5,00	20°
Bradley	0,133	0,200	0,330	6,85	9°
Mozley I	0,154	0,214	0,570	7,43	6°
Mozley II	0,160	0,250	0,570	7,71	6°
Warman	0,290	0,200	0,310	4,00	15°
Klone	0,175	0,250	0,920	5,60	10°
AKW	0,200	0,320	0,800	6,24	15°
Demco I	0,217	0,500	1,00	4,70	25°
Demco II	0,244	0,313	0,833	3,90	20°
RW 2515	0,200	0,320	0,800	6,24	15°
Krebs	0,267	0,159	-	5,87	12,7°
Derrick	0,242	0,353	1,09	5,76	28° e 17°

## 2.2.3 - Variáveis de interesse no projeto de hidrociclones

No processo de desenvolvimento e otimização de novas geometrias de hidrociclones, faz necessária a utilização de uma série de variáveis associadas ao equipamento, de modo a uma análise mais precisa da sua eficiência frente a determinado objetivo. Dessa forma, são apresentados a seguir alguns dos parâmetros usualmente utilizados na prática industrial e também reportados na literatura:

### 2.2.3.1 - Concentrações mássicas

As concentrações mássicas das correntes de *underflow* e alimentação consistem nas variáveis base para o estimativa da eficiência de um hidrociclone. Seus valores podem ser facilmente obtidos por métodos gravimétricos e seu cálculo pode ser realizado pelas seguintes expressões:

$$cw_u = \frac{Ws_u}{W_u} \quad (2.1)$$

$$cw_a = \frac{Ws_a}{W_a} \quad (2.2)$$

Em que:

- os subscritos “a” e “u” fazem referência as correntes de alimentação e *underflow*.
- $W$  é a taxa mássica total da mistura sólido-líquido;
- $cw$  é a concentração mássica de sólidos;
- $Ws$  é a taxa mássica de sólido.

### 2.2.3.2 - Vazões volumétricas

As vazões volumétricas das correntes de alimentação ( $Q_a$ ) e *underflow* ( $Q_u$ ) podem ser calculadas através das seguintes expressões:

$$Q_u = \frac{W_u}{\rho_u} \quad (2.3)$$

$$Q_a = \frac{W_a}{\rho_a} \quad (2.4)$$

Em que  $\rho_u$  e  $\rho_a$  indicam as densidades da mistura sólido-líquido nas correntes de *underflow* e alimentação, respectivamente. Essas densidades podem ser obtidas pelas seguintes expressões:

$$\rho_u = \frac{\rho_{liq}}{1 - cw_u \left( 1 - \frac{\rho_{liq}}{\rho_{sól}} \right)} \quad (2.5)$$

$$\rho_a = \frac{\rho_{liq}}{1 - cw_a \left( 1 - \frac{\rho_{liq}}{\rho_{sol}} \right)} \quad (2.6)$$

#### 2.2.3.3 - Eficiência total

A eficiência total ( $\eta$ ) é definida como a razão entre a quantidade mássica de sólidos coletados pelo duto de *underflow* e a quantidade mássica de sólidos alimentados no equipamento. Da mesma forma, a eficiência total pode ser definida da seguinte forma:

$$\eta = \frac{cw_u W_u}{cw_a W_a} \quad (2.7)$$

A eficiência total é um parâmetro importante na análise da aplicabilidade de determinado hidrociclone. Geralmente sua maximização é de grande interesse, no entanto em operações de classificação ou concentração de sólidos, esse parâmetro se torna secundário no processo de otimização.

#### 2.2.3.4 - Razão de líquido

A razão de líquido ( $R_L$ ) é definida como a razão entre a quantidade líquido direcionada ao *underflow* e quantidade total de líquido alimentada ao equipamento. Pode ser expressa também pela seguinte equação:

$$R_L = \frac{W_u (1 - cw_u)}{W_a (1 - cw_a)} \quad (2.8)$$

A razão de líquido faz-se importante na análise de processos de concentração. Na maioria dos casos sua minimização é desejada, sendo que baixos valores associados a altas eficiências totais caracterizam equipamentos desejáveis a maioria das aplicações. No entanto, as operações de clarificação em geral não conseguem operar com razões de líquidos baixas, pelo fato de exigir baixas concentrações de sólidos no clarificado. Efeito esse que dificilmente é atingido quando se opera a razões de líquido reduzidas.

#### 2.2.3.5 - Eficiência total reduzida

Em determinadas configurações de hidrociclones, onde os valores de razão de líquido são expressivamente grandes, e a eficiência total não é capaz de quantificar adequadamente a capacidade de separação pelo campo centrífugo do equipamento, faz-se

necessária a definição da eficiência reduzida ( $\eta'$ ). Pode-se definir essa eficiência como uma correção a eficiência total, de modo a descontar o efeito de divisão de fluxo que ocorre no equipamento (quantificado pela razão de líquido), comumente denominado efeito “T”. A expressão que permite essa correção e que culmina na definição de eficiência total reduzida é apresentada abaixo:

$$\eta' = \frac{\eta - R_L}{1 - R_L} \quad (2.9)$$

#### 2.2.3.6 - Capacidade concentradora

A capacidade concentradora consiste na razão entre as concentrações de sólidos presentes no underflow e na alimentação, pode ser expressa pela seguinte expressão:

$$C_c = \frac{cw_u}{cw_a} \quad (2.10)$$

A capacidade concentradora, como a própria nomenclatura denota, é de interesse em operações onde são requeridas altas concentrações na corrente de grossos (*underflow*). Esse parâmetro está diretamente atrelado à razão de líquido, sendo as duas inversamente proporcionais.

#### 2.2.3.7 - Divisão de fluxo

A divisão de fluxo ( $S$ ) mensura o percentual volumétrico total de material (sólido e líquido) coletada no duto de *underflow* em relação ao total alimentado. Podendo ser expressa pela seguinte fórmula:

$$S = 100\% \frac{Q_u}{Q_a} \quad (2.11)$$

Em que  $Q_u$  e  $Q_a$  são as taxas volumétricas totais das correntes de *underflow* e alimentação, respectivamente.

A divisão de fluxo consiste em um parâmetro importante na aplicação e operação dos hidrociclones, sendo de interesse no projeto de sistemas de controle desses equipamentos. A divisão de fluxo, mesmo tendo relação direta com a razão de líquido, possui valor superior a esta, sendo que ambas se igualam quando atingem valores elevados.

### 2.2.3.8 - Número de Euler

A quantidade de energia necessária para a operação de um hidrociclone, consumida a partir do bombeamento do fluido através do equipamento, é uma das variáveis interesse no projeto e otimização deste. Dessa forma surge a necessidade de um parâmetro que represente a quantidade de energia, representada pela queda de pressão do hidrociclone ( $\Delta P$ ), necessária para impelir o fluido a determinada vazão ou velocidade através do mesmo. O número de Euler ( $Eu$ ) é um adimensional que expressa essa relação, podendo ser calculado através da Equação 2.12.

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\rho_{liq} v_c / 2} \quad (2.12)$$

Sendo  $\rho_{liq}$  a densidade do fluido, ou de modo geral a densidade da fase contínua,  $\Delta P$  a queda de pressão no hidrociclone e  $v_c$  a velocidade superficial na câmara cilíndrica de entrada dada pela Equação 2.13.

$$v_c = \frac{4Q_a}{\pi D_c^2} \quad (2.13)$$

### 2.2.3.9 - Curva de eficiência granulométrica

Na análise e otimização de processos de controle de sólidos, faz-se necessária a determinação das eficiências individuais para cada diâmetro específico de partícula. Esses dados são geralmente expressos de forma gráfica pela curva de eficiência granulométrica (também denominada curva de partição, curva de desempenho ou curva de Tromp). Essa curva geralmente relaciona a fração de material alimentado ao sistema de separação com um determinado diâmetro ( $d$ ), que é direcionada a corrente de grossos. No caso dos hidrociclones a corrente de *underflow*. O gráfico é geralmente apresentado em escala log-linear de modo a enfatizar a corrente de finos.

A eficiência granulométrica para um determinado diâmetro de partícula  $d$ , denominada por  $G(d)$ , pode ser expressa pela razão entre a quantidade de material com diâmetro  $d$  recuperada no *underflow* e a quantidade alimentada no hidrociclone. Podendo ser expressa pela Equação 2.14.

$$G(d) = \frac{Ws_u \cdot \Delta X_u(d)}{Ws_a \cdot \Delta X_a(d)} \quad (2.14)$$

Em que os termos  $\Delta X_u(d)$  e  $\Delta X_a(d)$  são as frações de sólido com diâmetro característico  $d$  nas correntes de *underflow* e alimentação, respectivamente.

Cabe ressaltar que os termos  $\Delta X_u(d)$  e  $\Delta X_a(d)$  são facilmente obtidos através da análise granulométrica das correntes de *underflow* e alimentação do equipamento. Correspondendo dessa forma a distribuição diferencial (ou discreta) dos tamanhos de partículas nessas correntes.

A Equação 2.14 pode ser simplificada pela inserção do conceito de eficiência total de coleta ( $\eta$ ) obtendo-se então a Equação 2.15.

$$G(d) = \eta \frac{\Delta X_u(d)}{\Delta X_a(d)} \quad (2.15)$$

Pelo fato da separação em hidrociclones produzir correntes de grossos que contém uma carga de líquido considerável, tem-se que os valores de eficiência para partículas com diâmetro próximo de zero não será nula. Dessa forma a curva  $G(d)$  forma uma assíntota na região de menor diâmetro em um valor específico, usualmente referido (Pasquier e Cilliers, 2000) como *by-pass* ( $B_p$ ). Esse parâmetro mensura diretamente a fração de partículas que transpassam o efeito de separação do hidrociclone.

Dessa forma faz-se necessário a quantificação desse valor de modo a corrigir a curva granulométrica, e com isso reduzir a assíntota para zero na região das partículas finas. Diversos autores (Flinthoff *et al.*, 1987; Cilliers *et al.*, 1997) consideram que o *by-pass* é igual ao valor da razão de líquido ( $R_L$ ) observada. No entanto essa consideração é criticada no trabalho de Austin e Klimpel (1981), onde é relatado que não existe relação alguma entre as grandezas citadas, comprovando experimentalmente esse fato.

Por fim, a quantificação do *by-pass* é mais precisamente feita através de uma análise para a própria curva de eficiência granulométrica, seguida da determinação do valor no qual a assíntota se faz presente. Através da obtenção desse parâmetro é então possível a correção da curva propriamente dita e obtenção da denominada curva de eficiência granulométrica corrigida (ou reduzida), definida pelo termo  $G'(d)$ , e que pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$G'(d) = \frac{G(d) - B_p}{1 - B_p} \quad (2.16)$$

A curva de eficiência corrigida é geralmente bem ajustada por modelos de curva do tipo sigmoidal. Um dos modelos que melhor ajustam esse tipo de curva é o modelo de Rosin-Rammler (RRB), dado pela seguinte expressão:

$$G'(d) = 1 - \exp \left[ -0,693 \left( \frac{d}{d'_{50}} \right)^m \right] \quad (2.17)$$

O modelo de Rosin-Rammler apresenta bom ajuste dos dados para curvas de separação com comportamento monomodal. No entanto quando a presença do efeito *fish-hook* é observada a Equação 2.17 não é capaz de prever os desvios e inversões característicos desse efeito para partículas menores.

Dessa forma faz-se necessária a escolha de um modelo adequado para a melhor descrição das curvas de eficiência granulométrica que sejam capazes de compreender o efeito *fish-hook*. Pasquier e Cilliers (2000) descrevem um modelo generalizado, originado através de diversos outros estudos (Cilliers e Harrison, 1997; Villar e Finch, 1992; Hodouin *et al*, 1986) que consegue descrever com grande eficiência o efeito citado. O modelo referido é representado pela Equação 2.18.

$$G(d) = C(d) + B_p (1 - E(d)) \quad (2.18)$$

Como observado, o modelo apresentado faz a combinação de duas curvas: uma no formato usual de uma curva de classificação  $[C(d)]$  e outra, denominada curva de dispersão, que afeta apenas a fração  $B_p$  das partículas. Os autores também afirmam que é conveniente que os modelos utilizados para descrever tanto a curva de classificação quanto a de dispersão sejam similares, sugerindo desse modo o modelo de Rosin-Rammler. A Equação 2.18 toma então a seguinte forma:

$$G(d) = 1 - \exp \left[ -0,693 \left( \frac{d}{d_{class}} \right)^{m_{class}} \right] + B_p \exp \left[ -0,693 \left( \frac{d}{d_{disp}} \right)^{m_{disp}} \right] \quad (2.19)$$

A partir do equacionamento acima apresentado, é possível então a determinação das eficiências de coleta global ( $\eta$ ) para diferentes distribuições granulométricas do material particulado alimentado. Para isso a seguinte expressão pode ser utilizada:

$$\eta = \sum \Delta X_a(d) \cdot G(d) \quad (2.20)$$

Em que  $\Delta X_a(d)$  consiste na distribuição granulométrica diferencial do material particulado alimentado ao hidrociclone.

#### 2.2.3.10 - Diâmetro de corte

Como apresentado anteriormente, a curva de eficiência granulométrica ou curva de probabilidade de partição define a probabilidade de uma partícula de determinado tamanho ser coletada ou não. O diâmetro de partícula que possui uma probabilidade de 50% de ser coletada (equiprobabilidade) recebe a denominação de diâmetro de corte ( $d_{50}$ ). Para a curva de eficiência corrigida, após o desconto do efeito do *by-pass*, o diâmetro com equiprobabilidade de coleta denomina-se diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ) (vide Figura 2.8).

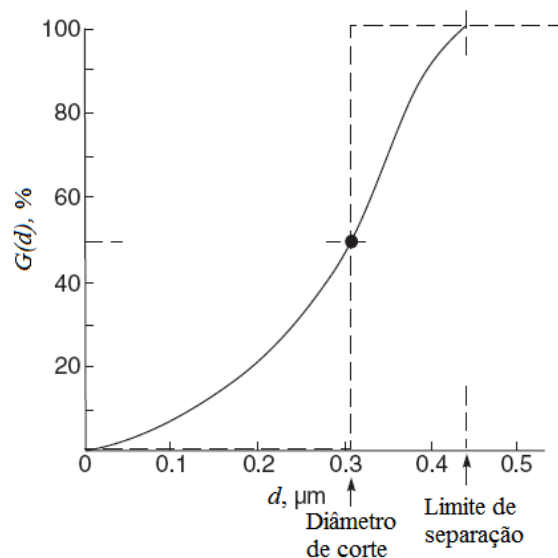


Figura 2.8 – Exemplificação dos diâmetros de corte e limite de separação. Adaptado de Svarovsky (2000).

#### 2.2.3.11 - Limite de separação

O limite de separação consiste no menor diâmetro de partícula que pode ser coletado com 100% de eficiência (Figura 2.8). Esse diâmetro consiste na maior partícula presente na corrente de *overflow* após a separação (SVAROVSKY, 2000).

Geralmente o limite de separação real é de difícil determinação, dessa forma é comum a utilização do tamanho correspondente a 98% de eficiência de coleta, sendo parâmetro com a mesma representatividade e com uma medição mais direta. Esse diâmetro,



geralmente denominado “limite de separação aproximado” é amplamente utilizado, principalmente na classificação de filtros.

## **2.3 - Estudos publicados na literatura acerca de hidrociclones**

### **2.3.1 - Condições operacionais e aplicações de hidrociclones**

Yang *et al.* (2013) avaliaram a eficiência de separação de partículas de catalisador em um mini-hidrociclone com diâmetro de 25 mm. O catalisador utilizado tratava-se de um material poroso com densidade aparente de  $2,23 \text{ g/cm}^3$  e diâmetro médio de  $3 \text{ }\mu\text{m}$  (sendo que 100% do material era menor que  $7 \text{ }\mu\text{m}$ ). As proporções do hidrociclone utilizado foram as seguintes:  $D_o / D_c = 0,24$ ,  $L_c / D_c = 1,48$  e  $\theta = 6^\circ$ , em que  $L_c$  consiste no comprimento da região cilíndrica. Uma alimentação de formato retangular ( $4 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ) foi utilizada. Os autores reportaram eficiências totais máximas de aproximadamente 88% e diâmetros de corte de aproximadamente  $1,7 \text{ }\mu\text{m}$  para uma vazão de cerca de  $0,85 \text{ m}^3 / \text{h}$  e uma razão de líquido de 7,5%. Sendo que a eficiência de remoção de partículas menores que  $3 \text{ }\mu\text{m}$  foram superiores a 85%. Uma validação com resultados em campo também foi realizada e mostrou excelente correspondência com os resultados laboratoriais.

Kawatra *et al.* (1996) analisaram o efeito da viscosidade (através da variação da temperatura do fluido) da mistura sólido-líquido na eficiência de separação e diâmetro de corte de um hidrociclone de 10 cm de diâmetro. Os autores observaram uma redução da eficiência e aumento do diâmetro de corte com o aumento da viscosidade, efeito esse já esperado devido à redução na velocidade de sedimentação das partículas frente a esse efeito. Além disso, foi possível ajustar o diâmetro de corte como uma função da viscosidade elevada a um fator de 0,35. Um aumento da razão de líquido foi observado com o incremento da viscosidade, o que, segundo os autores, se deve ao aumento do arraste de fluido no hidrociclone.

Em um estudo experimental Kashiwaya *et al.* (2012) avaliaram o efeito do formato de diferentes partículas achatadas de quartzo e esféricas de vidro na separação em hidrociclones. Foi observada uma redução na eficiência de coleta de partículas grossas com o aumento do Reynolds da alimentação. Os autores realizaram também análises de velocidade de sedimentação em um analisador de partículas *ciclosizer*, observando que a coeficiente de arraste de ambos os tipos de partículas são praticamente iguais para Re inferiores a 50. A

partir desse valor as partículas achatadas possuem um coeficiente maior que as esféricas, no entanto, o aumento do coeficiente de arraste com o número de Reynolds se torna cada vez menos significativo com o aumento deste.

Endres *et al.* (2012) analisaram a eficiência de classificação de partículas na faixa micrométrica através de um modo de operação em batelada. Os autores instalaram uma espécie de caixa retentora diretamente após o duto de *underflow*, a corrente de *overflow* foi então recirculada para a alimentação do equipamento durante determinado tempo de batelada. Os resultados obtidos mostraram que em cerca de 60 min de separação partículas com diâmetro menor que  $1\mu\text{m}$  foram pouco coletadas, resultando dessa forma em uma melhor classificação dos sólidos. Os autores relataram, no entanto, que os custos de processamento aumentam significativamente nesse modo de operação, sendo assim indicado apenas para pequenas bateladas de materiais com grande valor agregado.

Zhao *et al.* (2008) em estudo similar ao citado acima, realizaram testes de otimização de um hidrociclone operando sob condições cíclicas de alimentação, visando à melhora na separação de partículas finas. Para isso foram analisados os efeitos do período e amplitude da oscilação da vazão, número de Reynolds e razão gás-líquido. O hidrociclone foi projetado com uma caixa retentora acoplada ao seu duto de *underflow*, e a corrente de *overflow* foi continuamente enviada para realimentação do equipamento. Os autores observaram um aumento considerável na eficiência de separação do hidrociclone quando este foi operado de forma cíclica, sendo que os valores ótimos para a razão de período e para a razão de amplitude de oscilação da vazão obtidos foram de respectivamente 0,68 e 2%.

### 2.3.2 - Otimização de hidrociclones convencionais

Vieira *et al.* (2010) propuseram a substituição da região cônica convencional presente nos hidrociclones por um meio poroso, de mesmo formato, de modo a coleta de líquido filtrado e possível melhoria de eficiência do equipamento. Os autores analisaram, além do efeito da geometria filtrante, o efeito de diversas variáveis de projeto que incluem: diâmetro do *overflow* ( $D_o / D_c$ ), diâmetro de alimentação ( $D_i / D_c$ ), comprimento total do equipamento ( $L / D_c$ ) e ângulo da região cônica ( $\theta$ ). Além das análises experimentais, os autores realizaram uma série de simulações em CFD de modo a validar os resultados e também a fim melhor entender o comportamento do hidrociclone filtrante. Os resultados obtidos mostraram uma redução nas velocidades radiais no interior do equipamento após a

adição do meio filtrante, o que poderia ser um forte indício para o aumento da eficiência observado. Além disso, uma otimização dos resultados experimentais obtidos levou a uma geometria ótima com as seguintes características:  $D_o / D_c = 0,22$  ,  $D_i / D_c = 0,26$  ,  $L / D_c = 6,9$  e  $\theta = 11,2^\circ$  .

Bicalho *et al.* (2012) utilizaram um mini-hidrociclone modular de 15 mm de diâmetro característico com o intuito de separar microrganismos (*Saccharomyces cerevisiae*) de água. Um planejamento fatorial a três níveis foi utilizando, avaliando os efeitos do diâmetro do *overflow*, diâmetro de alimentação, ângulo de cone e pressão de alimentação. Os autores obtiveram correlações empíricas entre os parâmetros analisados e as variáveis de interesse no projeto de hidrociclones, a partir destes modelos as seguintes conclusões foram feitas:

- A capacidade do hidrociclone foi aumentada pelo aumento da pressão de alimentação e dos diâmetros de *overflow* e alimentação, assim como pela redução do ângulo do cone.
- A eficiência total de separação do maximizada através da redução do ângulos do cone e dos diâmetros de *overflow* e alimentação combinada com o aumento da pressão de alimentação.
- Foi observado um aumento na razão de líquido com a redução de todas as variáveis estudadas.

Murthy e Bhaskar (2012) realizaram um extenso estudo paramétrico com auxílio de CFD de modo a otimizar uma série de parâmetros geométricos e operacionais em hidrociclones. Os autores utilizaram o modelo de turbulência RSM associado a injeção de partículas pelo modelo de fase discreta. Os resultados das simulações foram também validados através de ensaios experimentais utilizando *flyash* como material particulado, sendo que ambos apresentaram correspondência razoável. Com relação aos efeitos das diferentes variáveis estudadas um resumo é listado abaixo:

- O aumento do diâmetro do *vortex finder* resultou em um diminuição da queda de pressão do equipamento e da velocidade tangencial máxima na região entre o *vortex* livre e o forçado, além de aumentar a velocidade axial na porção cilíndrica do hidrociclone. A soma desses efeitos resultou então, em um aumento do diâmetro de corte.

- Um aumento no diâmetro de *underflow* resultou, embora em menor escala, em uma redução na queda de pressão e nas velocidades tangenciais máximas no interior do hidrociclone, levando assim a menores diâmetros de corte.
- O aumento da velocidade de alimentação da mistura resultou no incremento das velocidades radiais, tangenciais e axiais do equipamento assim como ajudou a redução do diâmetro de corte. Além disso pode perceber uma pequena redução nos valores de razão de líquido.
- Um aumento na viscosidade do fluido reduziu significativamente a queda de pressão do equipamento e velocidades tangenciais, o que provavelmente se deve a redução do nível de turbulência.

### 2.3.3 - Modificações estruturais e não-convencionais

Zhao *et al.* (2012) desenvolveram um novo tipo de hidrociclone, denominado hidrociclone de cone-interno (*inner-cone hydrocyclone* ou ICH), para separação gás-líquido (ar-água). O novo *design* consistiu na inversão do hidrociclone convencional, sendo assim a região cônica inserida na zona interna do equipamento conforme a Figura 2.9. Segundo os autores, a estrutura de cone interno funciona como uma espécie de direcionadora para o gás separado, facilitando a coalescência das bolhas, e sua consequente coleta pelo *overflow*. Além disso as quedas de pressão no ICH foram aproximadamente 30% menores do que na configuração convencional. Por fim, o ICH mostrou um aumento de eficiência tanto na análise teórica quanto experimental de seu funcionamento. Além disso, apresentou maior flexibilidade para operar a diferentes *split ratios* ou razões gás-líquido.

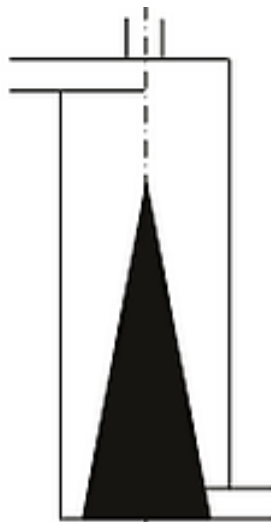


Figura 2.9 – Hidrociclone de cone-interno proposto por Zhao *et al.*

Nenu e Yoshida (2009) realizaram testes experimentais com o intuito de avaliar o desempenho de separação em hidrociclones operando com um (configuração A) ou dois dutos de alimentação (configuração B). A área da seção de alimentação foi mantida constante para as duas configurações. Um hidrociclone de 20 mm de diâmetro característico foi utilizado e o material particulado constituía-se de partículas de sílica (0,5% em peso com diâmetro médio de 2,1  $\mu\text{m}$ ). Foi observado que a taxa de alimentação ótima obtida para a configuração A foi a mesma que para a configuração B. A utilização da configuração B apresentou menores diâmetros de corte e uma maior eficiência de coleta de partículas quando comparada a configuração A, operando sob as mesmas condições de pressão e vazão de alimentação.

Hwang *et al.* (2012) propuseram a instalação de uma superfície cônica no topo da região cilíndrica do hidrociclone (Figura 2.10). Os autores utilizaram um hidrociclone de 20 mm de diâmetro e fizeram uso de técnicas de CFD para a análise de diferentes ângulos da superfície cônica de modo a analisar seus efeitos sobre a fluidodinâmica e trajetória das partículas. Em teoria, o efeito da superfície cônica seria direcionar as partículas sólidas com maior eficiência para as paredes do hidrociclone. No entanto os autores observaram que esse efeito também facilita a entrada das partículas no vortex secundário, o que diminuiria a eficiência do equipamento. Uma pequena redução do consumo energético foi observada com a instalação da modificação, principalmente devido a eliminação do escoamento irregular na região em questão. Por fim, observou-se uma redução de 4%-12% no diâmetro de corte, sendo esse efeito mais notável para um ângulo do cone ( $\alpha$ ) de 30°.

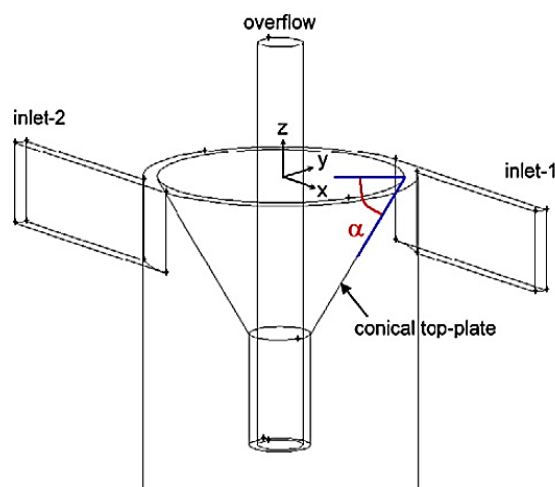


Figura 2.10 – Modificação proposta por Hwang *et al.* (2012).

Noroozi e Hashemabadi (2011) estudaram os efeitos do formato da câmara de alimentação de um hidrociclone para recuperação de óleo em água (*de-oiling*). Para isso, os autores fizeram uso da simulação computacional (CFD) de quatro diferentes geometrias de câmara de alimentação: formato exponencial, cônico, polinômio quadrático e *design* padrão. Os resultados obtidos nas simulações mostraram grande similaridade com os experimentais apresentados na literatura, além disso, foi possível notar um aumento de cerca de 8% na eficiência de separação para a câmara de formato exponencial. Os autores relataram uma forte correlação entre o aumento da recirculação de fluido no interior da câmara superior e uma redução na eficiência de separação. Dessa forma, a geometria que promoveu maior recirculação, nesse caso o formato parabólico (polinômio quadrático) apresentou as piores taxas de recuperação de óleo.

Em continuidade ao estudo citado acima, Hwang *et al.* (2013) avaliaram novamente o efeito da instalação da superfície cônica no topo do hidrociclone, e em adição analisou a influência de múltiplas alimentações e de um sistema de guias de modo a amortizar os efeitos de entrada no equipamento (Figura 2.11). Os resultados obtidos a respeito do número e tipo de alimentações indicaram que o modelo com 4 entradas tangenciais (modelo C) apresentou as melhores eficiências, enquanto o modelo com 2 entradas extensas apresentou os piores resultados. Esse efeito foi correlacionado a maior velocidade de entrada do fluido no hidrociclone e maior simetria no ponto de alimentação, o que teoricamente reduziria os efeitos turbulentos. A inserção das guias para a alimentação de líquido se mostrou eficaz no aumento de eficiência de separação para partículas finas, no entanto reduziu a eficiência para partículas maiores de 3  $\mu\text{m}$ , piorando assim a qualidade de classificação do equipamento. Além disso, reafirmando resultados anteriores, os autores constaram aumento significativo na eficiência de separação para partículas finas através do uso da superfície cônica, no entanto o aumento no ângulo desta região cria um efeito contrário ao citado.

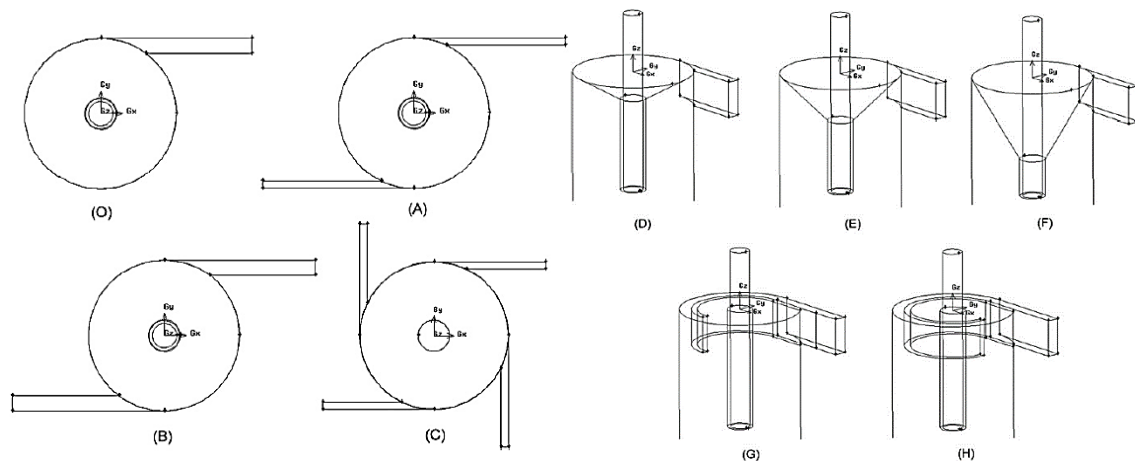


Figura 2.11 – Modificações estudadas no trabalho de Hwang *et al.* (2013).

Lee e Willians (1993) realizaram um trabalho pioneiro no que tange à inserção de hastes e supressão do *air core* em hidrociclones. Foi também um dos únicos autores (como será visto a seguir) que obteve resultados negativos em tal tipo de estudo. Os autores utilizaram hastes de 3 mm em um hidrociclone com 377 mm de comprimento, 8 mm de *overflow* e 5 mm de *underflow*. Os autores reportaram aumento de cerca de 44% na capacidade de processamento do equipamento após a inserção das hastes, no entanto isso acarretou em uma redução da qualidade de classificação e eficiência de separação do hidrociclone. Chu *et al.* (2004) afirmaram que os efeitos negativos obtidos por Lee e Willians poderiam estar relacionados ao modo com que as hastes foram fixadas no equipamento (Figura 2.12), utilizando-se de apoios internos que viriam a alterar a fluidodinâmica interna e assim causar perturbações que afetariam a eficiência do hidrociclone.

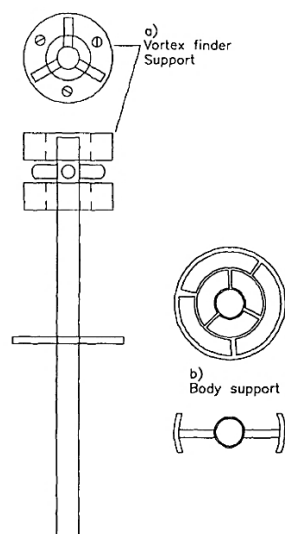


Figura 2.12 – Haste e apoio interno utilizado no trabalho de Lee e Willians (1993).

Sripriya *et al.* (2013) analisaram os efeitos da inserção de hastes com diferentes razões de bloqueio do *underflow* (dado pela razão entre a área de seção da haste e a área do *underflow*) e diferentes percentuais de distanciamento do *vortex finder* (dados pelo percentual do comprimento da haste em relação distância total entre o início do *vortex finder* e o orifício de *underflow*). Os testes foram realizados em um hidrociclone DMC (*dense medium hydrocyclone*) comumente utilizado na lavagem de carvão na indústria de minérios. Estudos numéricos empregando CFD mostraram que a inserção das hastes reduziu consideravelmente as velocidades radiais e axiais no interior do equipamento, ao mesmo tempo em que propiciou o aumento das velocidades tangenciais, efeitos esses que favorecem a separação e evitam a suspensão de partículas finas já separadas, e presentes das paredes do equipamento. Também foi possível observar um melhor desempenho de separação (maiores eficiências totais e menores razões de líquido) para uma razão de bloqueio do *underflow* de 0,6 e um percentual de distanciamento do *vortex finder* de 60%.

Um estudo realizado por Chu *et al.* (2000), os autores avaliaram os efeitos de diversas não-convencionalidades no *design* dos hidrociclones além de um estudo avaliando os efeitos do comprimento da região cilíndrica sobre a eficiência do equipamento. O hidrociclone padrão utilizado tratou-se da geometria otimizada por Rietema (1961). As não-convencionalidades estudadas no trabalho são listadas a seguir:

- formato do duto de alimentação (circular convencional, retangular involuto, retangular arqueado, retangular convencional e circular inclinado);
- formato da seção cônica (cônica convencional, convencional com anéis e com espiral, parabólica e hiperbólica);
- tipo de *vortex finder* (convencional com parede fina e espessa, convencional com inserção de difusor de 30° e 20° e um novo *design* dotado de sifão);
- formato da haste para inserção longitudinal (foram testados modelos de haste lisa, haste com cone central, um modelo com difusor interno e também um modelo dotado de 4 aletas denominado pelo autor como *winged core*);

Com relação à capacidade de processamento dos hidrociclones observou-se que a utilização de uma alimentação convencional, presença de inserção da haste (exceto para a haste com cone), utilização de qualquer uma das modificações da região cônica (com base na



geometria convencional), seções cilíndricas mais compridas e um *vortex finder* com a presença de difusor (de 20° ou 30°) foram favoráveis ao aumento dessa variável.

Já com relação à eficiência total reduzida de separação observou-se que a utilização de uma alimentação convencional, presença de inserção da haste (exceto para a haste com cone), utilização dos cones em formato parabólico ou convencional com espirais, seções cilíndricas mais compridas e um *vortex finder* com a presença de sifão foram favoráveis ao aumento desse parâmetro.

Chu *et al.* (2002) estudou o efeito da inserção de uma haste sólida modificada no interior de um hidrociclone Rietema (1961), a fim de reduzir a turbulência produzida pelo *vortex* central. Essa haste, denominada pelo autor como *winged core* (Figura 2.13), possuía um total de quatro aletas ao longo de sua extensão, e era inserida de modo que estas se posicionassem diretamente no fim da extensão do *vortex finder*. Segundo seus resultados a inserção da haste modificada resultou em alterações significativas nas características da pressão, flutuações na pressão e nas características da distribuição de densidade no interior do hidrociclone modificado quando comparado a geometria convencional. Além disso, foi possível observar-se uma redução considerável no número de Euler, aumento da eficiência reduzida de separação e capacidade de processamento do equipamento.

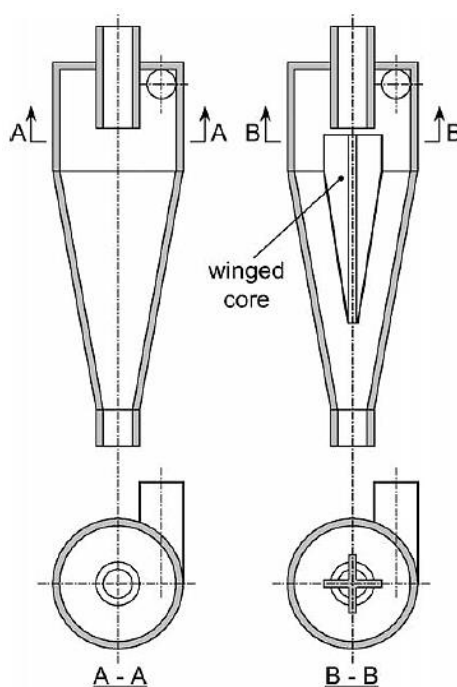


Figura 2.13 – Hidrociclone convencional e a modificação proposta por Chu *et al.* (2002).

No trabalho de Chu *et al.* (2004), os autores investigaram os efeitos da supressão do *air core* em hidrociclones com diferentes formatos da seção inferior (que para o caso convencional tem geometria cônica), sendo isso realizado através da inserção de uma haste sólida e lisa no sentido longitudinal do equipamento. O hidrociclone tomado como padrão para os experimentos tratou-se de uma geometria otimizada por Rietema (1961). As seções inferiores testadas com e sem a inserção da haste sólida foram confeccionadas no formato cônico (convencional de 20°), hiperbólico e parabólico (Figura 2.14), desenhados de forma que os comprimentos totais dos três equipamentos fossem mantidos constantes. Os resultados obtidos pelos autores nos testes das três geometrias indicaram um aumento substancial nas eficiências totais e totais reduzidas para todos os casos com inserção da haste, com destaque para a geometria parabólica que apresentou aumento expressivo de eficiência e redução da razão de líquido (tanto com e sem a inserção da haste) quando comparada aos outros dois formatos de cone. Além disso, os autores relatam uma redução das velocidades axial e radial nas regiões abaixo do *vortex finder*, assim como uma redução nas componentes turbulentas nessas mesmas direções.

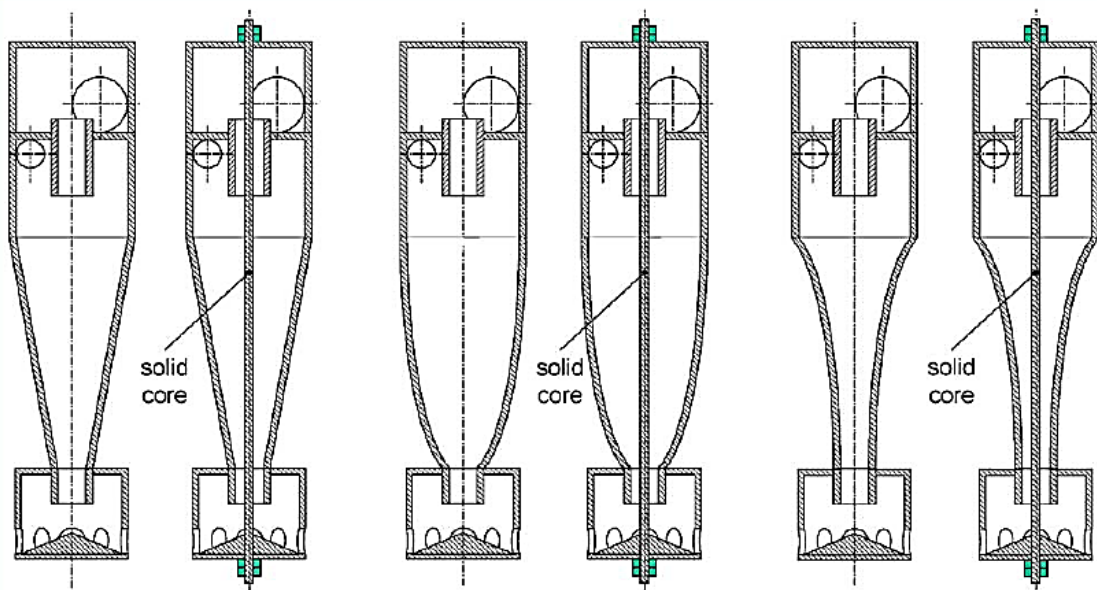


Figura 2.14 – Modificações propostas por Chu *et al.* (2004).

Em estudo semelhante ao apresentado por Chu *et al.* (2004), Ghodrati *et al.* (2013) realizaram uma série de simulações numéricas com intuito de analisar os efeitos do comprimento e formato da seção cônica sobre a eficiência de um hidrociclone. Os autores utilizaram altas concentrações de sólidos (até 30% em volume) e três diferentes formatos da

região cônica: côncavo, convexo e convencional, como pode ser visualizado na Figura 2.15. Constatou-se que, maiores comprimentos da região cônica promoveram uma redução na queda de pressão e diâmetro de corte e um aumento da eficiência total e razão de líquido. Uma análise dos efeitos do formato do cone sobre o hidrociclone mostraram que seu desempenho foi otimizado pela geometria convexa em todas as concentrações de alimentação, resultado em uma pequena redução da queda de pressão e razão de líquido e um aumento de eficiência total.

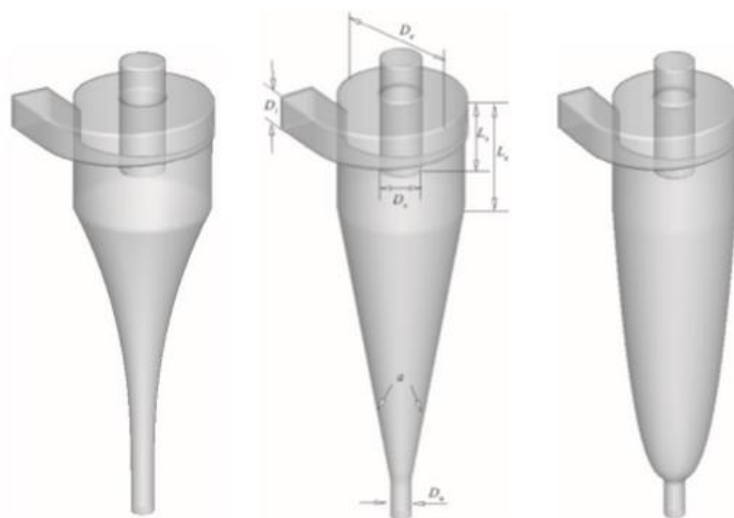


Figura 2.15 – Geometrias analisadas por Ghodrat *et al.* (2013).

Evans (2008) estudou, através da fluidodinâmica computacional, os efeitos da inserção de hastes sólidas de diferentes diâmetros (4 e 6 mm) no interior de hidrociclones. A metodologia numérica empregada fez uso do modelo de volumes finitos com auxílio do modelo *Reynolds Stress* (RSM) para a previsão dos fenômenos turbulentos. As simulações na ausência da haste contemplaram a formação completa do *air core*, através do modelo de volume de fluido (*Volume of Fluid*, ou VOF). Os resultados apontaram uma redução nas velocidades axiais e radiais do fluido após a inserção das hastes, o que teoricamente beneficiaria o processo de separação, principalmente quando se tratam de partículas finas. Além disso pode-se notar uma redução no consumo energético do equipamento, efeito esse explicado pela redução dos níveis de turbulência internos. No entanto os autores relatam que uma real melhora nos índices de eficiência é obtido apenas com determinados diâmetros de haste, nesse caso, apenas a haste de 4 mm apresentou aumento na separação de sólidos, o que não foi observado para a haste de 6 mm. Cabe ressaltar que os autores não definiram o

diâmetro do duto de *underflow* utilizado nos experimentos, tornando assim difícil a aplicação dos resultados apresentados em diferentes equipamentos.

Yamamoto e Jiao (1997) propuseram uma modificação estrutural no *vortex finder* que consiste no prolongamento do mesmo, de formato cilíndrico, terminado pelo afunilamento do mesmo, criando assim uma pequena região cônica (Figura 2.16). Essa região possui o mesmo ângulo utilizado na confecção da seção cônica do equipamento. De modo a permitir o escoamento de líquido para o duto de *overflow*, essa região citada foi completamente perfurada, sendo que a relação entre a área das perfuração foi também estudada (31% e 67% de área perfurada). Os autores obtiveram resultados positivos, tanto no aumento de eficiência quanto no aumento de capacidade, quando o hidrociclone foi operado com a modificação em questão. Além disso, observou-se que uma maior área perfurada no *vortex finder* modificado, maior foi a eficiência de separação.

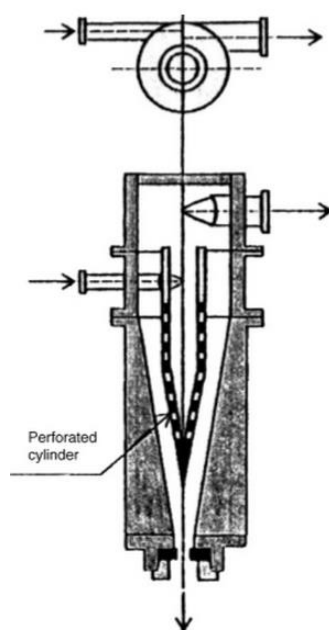


Figura 2.16 – Alterações propostas por Yamamoto e Jiao (1997).

No trabalho de Martínez *et al.* (2008) investigou-se os efeitos de comprimento do duto de *vortex finder* na eficiência de operação de hidrociclones de 5 e 10 cm de diâmetro característico. A razão entre o comprimento do *vortex finder* e o comprimento total do hidrociclone ( $\ell / L$ ) foi otimizada de modo a maximização da eficiência total de coleta. Os autores noticiaram uma máxima eficiência para  $\ell / L = 0,1$ , o que corresponde a uma razão *vortex finder* e comprimento da região cilíndrica ( $\ell / L_c$ ) de aproximadamente 0,625. O

decréscimo da eficiência com redução do *vortex finder* foi relatada a ocorrência do fenômeno de curto-circuito, enquanto que a ineficiência observada a partir do ponto onde o *vortex finder* adentra a região cônica do equipamento, foi explicada pela associação da turbulência gerada pelo próprio duto do *vortex finder* com aquela gerada pela transição do escoamento da região cilíndrica para a cônica.

De forma geral, a modificação da geometria convencional dos hidrociclones tem apresentado poucos benefícios quando posta de frente com a perda de robustez e aumento de complexidade do equipamento, fato esse que tornou os hidrociclones equipamentos amplamente empregados em práticas industriais.

No entanto cabe ressaltar que modificações menos radicais a geometria convencional, como é o caso dos cones parabólicos (ou convexos), apresentam benefícios comprovados por mais de um autor, e não tornam a confecção e operação do equipamento mais complexa e/ou onerosa. Sendo dessa forma uma alternativa viável ao *design* convencional e que merece futuras investigações.

#### **2.3.4 - Hidrociclones operando com fluidos pseudoplásticos**

De forma geral, a literatura atual contém poucos estudos relatados a operação de hidrociclones operando com fluidos com características pseudoplásticas. Em sua maioria tratam-se de estudos unicamente teóricos (REN *et al*, 2012) ou que envolvam simulações de fluidodinâmica computacional (CFD). Esses tipos de estudo, ainda que forneçam resultados com baixos custos e quase nenhum trabalho experimental, esbaram na ausência de modelos confiáveis para a correta modelagem da turbulência em meios não-Newtonianos.

Destaque deve ser dado ao recente trabalho publicado por Scheid *et al* (2013), onde tentou-se pela primeira vez correlacionar o desempenho de hidrociclones a um parâmetro ligado a característica reológica do fluido utilizado na operação do mesmo. Os autores utilizaram para isso o conceito de viscosidade aparente, atrelado a uma taxa de cisalhamento característica ao equipamento analisado. No entanto chegou-se a conclusão de que o desempenho de um hidrociclone não pode ser completamente caracterizada por um único parâmetro associado a reologia do fluido.

Desse modo, o campo alvo desse trabalho se mostra promissor devido a sua necessidade prática e de importante relevância científica dada a quase ausência de estudos correlatados a essa área.



---

## CAPÍTULO 3 - Materiais e Métodos

---

### 3.1 - Unidade experimental

Um esquema da unidade experimental utilizada neste trabalho, montada no Laboratório da Unidade Avançada de Pesquisa da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, encontra-se na Figura 3.1.

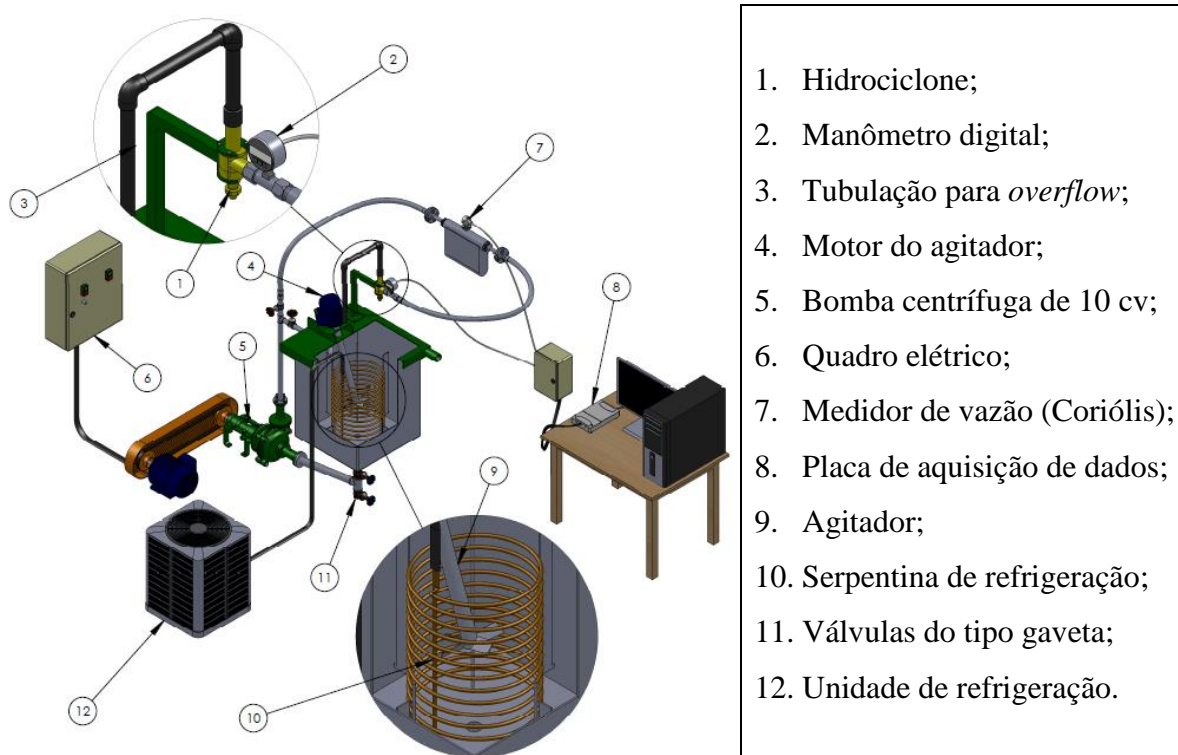


Figura 3.1 - Unidade experimental utilizada para os testes propostos.

A unidade experimental foi também equipada com um sistema controle proporcional, de modo a proporcionar estabilidade na manutenção da pressão e vazão na alimentação do equipamento. Para isso o controlador, programado através do *software* LabVIEW 10, atuava

diretamente (com auxílio de uma placa de controle/aquisição da National Instruments NI-6008) sobre um inversor de frequência acoplado à bomba centrífuga, promovendo assim, através de diferentes níveis de rotação o controle da pressão e vazão do fluido alimentado ao equipamento. A função de atuação do controlador implementada é representada pela Equação 3.1.

$$R = K_c (\Delta P_{sp} - \Delta P_m) \quad (3.1)$$

Em que  $R$  é a resposta do controlador sobre o inversor de frequência da bomba,  $K_c$  é a constante de proporcionalidade do controlador (especificada pelo usuário) e  $\Delta P_{sp}$  e  $\Delta P_m$  são respectivamente as pressões de *set point* e a medida pelo sensor acoplado a alimentação do hidrociclone. Uma visualização da interface gráfica e diagrama de blocos do sistema de controle implementados está disponível no APÊNDICE A.

### 3.2 - Hidrociclones

O hidrociclone utilizado nos experimentos consiste em dispositivo modular como pode ser visualizado na Figura 3.2, possibilitando assim a variação de suas proporções geométricas. Sua câmara de alimentação teve como referência o hidrociclone comercial Derrick (atualmente utilizado como hidrociclone dessiltador no controle de sólidos da perfuração de poços de petróleo e gás) e fabricada em poliuretano em uma escala reduzida (1:3), resultando em um equipamento com diâmetro característico ( $D_c$ ) de 30 mm.

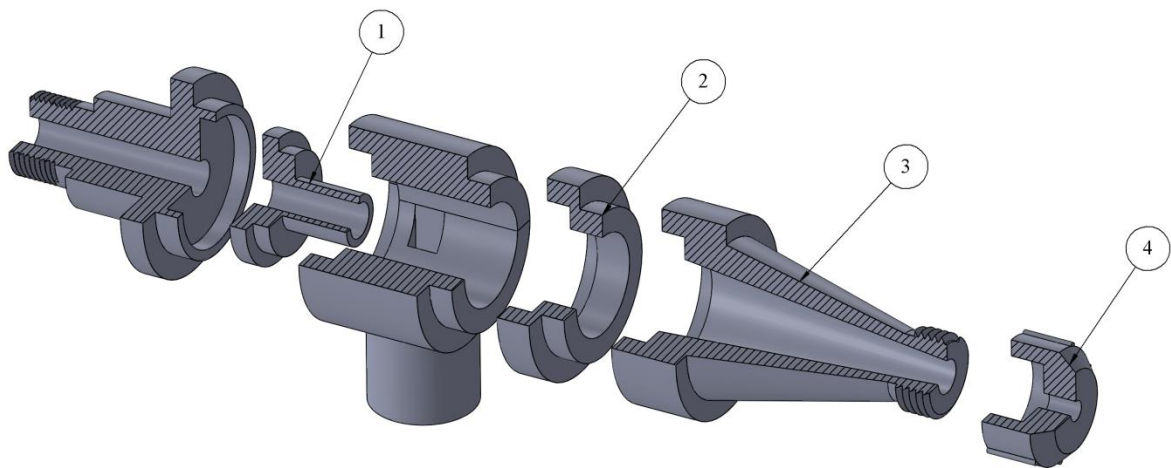


Figura 3.2 – Esquema do hidrociclone utilizado nos ensaios.



Os demais módulos intercambiáveis foram construídos em poliacetal usinado. Cada um destes, assim como as variáveis geométricas a eles associadas são enumerados a seguir, de acordo com a Figura 3.2:

1. *Vortex finder*: permite a alteração da distância entre o limite inferior da seção cilíndrica e o início do duto de *vortex finder*, essa dimensão será representada nesse estudo pela variável  $L_v$ .
2. Região cilíndrica: permite a alteração do comprimento da região cilíndrica, essa dimensão será representada nesse estudo pela variável  $L_c$ .
3. Região cônica: permite a alteração do ângulo da região cônica, essa dimensão será representada nesse estudo pela variável  $\theta$ .
4. Orifício de *underflow*: permite a alteração do diâmetro do orifício de *underflow*, essa dimensão será representada nesse estudo pela variável  $D_u$ .

As demais dimensões do hidrociclone que foram mantidas fixas durante os experimentos, assim como o esquema de posicionamento dos módulos, são apresentadas na Figura 3.3.

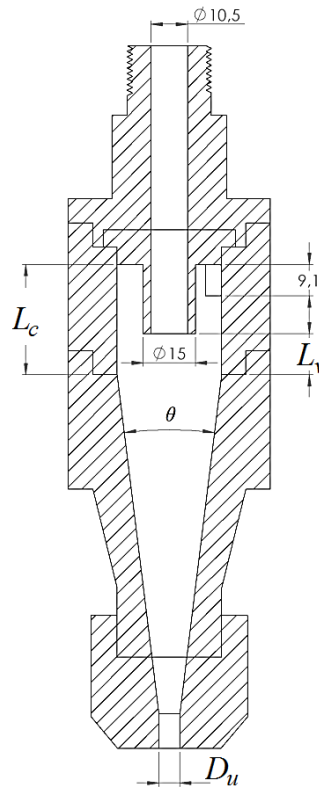


Figura 3.3 - Esquema do hidrociclone modular utilizado nos testes.

### 3.3 - Material particulado

Sabe-se que o cascalho perfurado em poços de óleo de gás apresenta-se em faixas granulométricas e com propriedades físicas que variam amplamente conforme as condições do local e profundidade do poço perfurado. Dessa forma a seleção de um material particulado que represente com fidelidade o cascalho de perfuração torna-se complicada.

Tendo-se isso em vista, a seleção do material particulado utilizado nesse trabalho levou em conta características desejáveis para a realização de ensaios e análises com maior precisão e exatidão, sendo assim as seguintes características consideradas cruciais:

- Facilidade de dispersão: a capacidade do material de se dispersar em solução aquosa é necessária de modo a evitar a formação de grumos ou aglomerações, o que poderia vir a intervir nos resultados obtidos nos equipamentos utilizados;
- Resistência à quebra por cisalhamento ou impacto: essa característica é essencial de modo a garantir uma distribuição de tamanhos constante ao longo dos experimentos. Como dito anteriormente, hidrociclones possuem forças cisalhantes e turbulentas bastante elevadas, além é claro dos efeitos de impactação gerados no interior da bomba centrífuga.

A partir desses pontos levantados, optou-se pela utilização de um concentrado de rocha fosfática fina, proveniente do processo de produção de fertilizantes fosfatados. O material apresentou densidade real de aproximadamente  $3,17 \text{ g/cm}^3$  (mensurado por picnometria gasosa) e uma distribuição granulométrica ampla, situando-se na faixa de 0,2 a 200  $\mu\text{m}$ .

Optou-se também pela utilização de concentrações reduzidas de sólido durante os testes de otimização ( $\sim 0,5\%$  em volume), tendo-se como objetivo evitar a influência de possíveis oscilações de concentração de sólidos nos resultados de eficiência, o que ocorre com muito menos intensidade em meios diluídos (SVAROVSKY, 2000).

A granulometria do material em questão foi obtida através do método de difração de raio *laser* (*Mastersizer* 2000) e é apresentada na Figura 3.4. Os dados detalhados a respeito da granulometria do material podem ser conferidos através do APÊNDICE B.

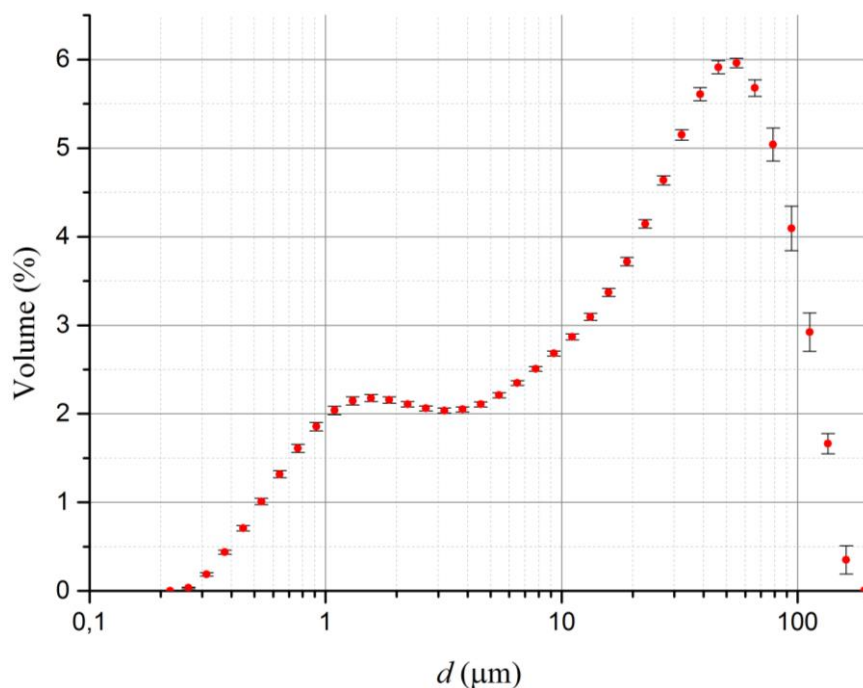


Figura 3.4 - Distribuição de frequência para rocha fosfática utilizada.

### 3.4 - Preparação do fluido pseudoplástico

De modo a obter uma mistura similar ao fluido de perfuração utilizado em campo optou-se pela utilização de carboximetilcelulose (CMC) em solução aquosa para a preparação de um fluido de laboratório. A carboximetilcelulose consiste em um polímero derivado da celulose, usualmente utilizado na formulação de fluidos de perfuração de base aquosa, sendo utilizado como agente viscosificante e conferindo propriedade pseudoplástica quando em meio aquoso. Sua dispersão e homogeneização mostraram-se relativamente fácil, diferenciando-o assim de outras opções de produtos com função similar, como é o caso da goma Xantana.

A partir da seleção do componente viscosificante (CMC) realizou-se um estudo reológico do mesmo em solução aquosa. Para isso foram preparadas três diferentes misturas de água/CMC nas concentrações de 0,3%, 0,6% e 1% (em massa). O processo de dispersão nas amostras foi realizado através de um dispersor ULTRATURRAX® IKA a 25000 rpm por um período de 30 min.

As análises reológicas destes três fluidos, realizadas com auxílio de um reômetro Brookfield R/S Plus, são apresentadas na Figura 3.5. As viscosidades dinâmicas ( $\mu$ ) dos

fluidos foram obtidas no modo de taxa de cisalhamento ( $\gamma$ ) controlada, sendo utilizada uma faixa pra esta de 50 a 900  $\text{s}^{-1}$ .

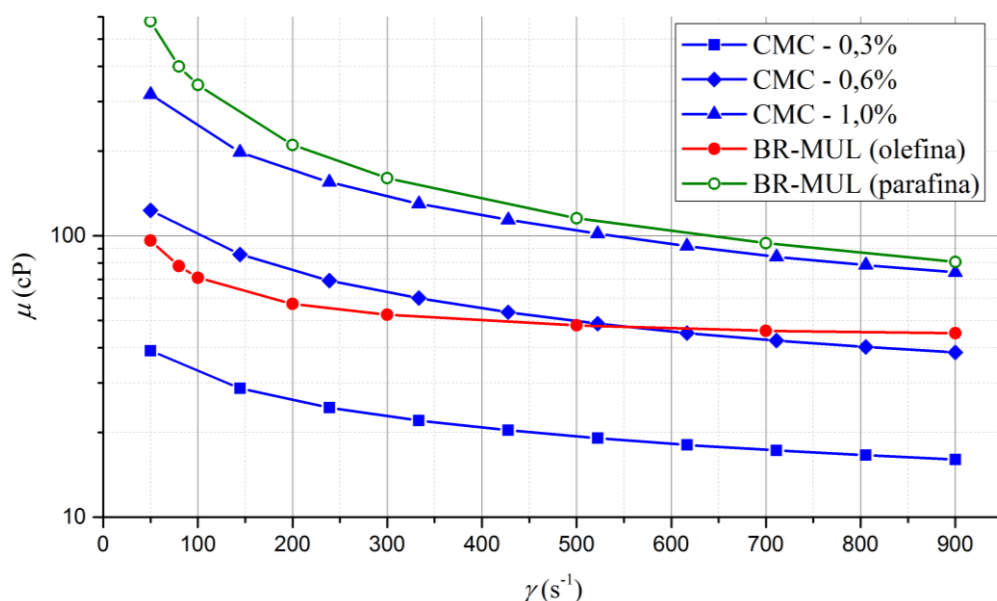


Figura 3.5 – Reogramas dos fluidos de perfuração e da mistura aquosa de CMC.

Ainda na Figura 3.5 são apresentadas as análises reológicas de dois diferentes fluidos de perfuração de base orgânica: BR-MUL (base parafínica) e BR-MUL (base olefínica), ambos fornecidos pela empresa Petróleo Brasileiro S.A., sendo estes comumente utilizados em campos de perfuração de poços.

Pode-se perceber através da Figura 3.5, que os fluidos reais e laboratoriais apresentam grande similaridade tanto em escala quanto em seus respectivos comportamentos frente ao incremento do cisalhamento empregado (pseudoplasticidade), fato esse que reforça a justificativa de utilização da mistura CMC/água nos ensaios deste estudo.

Cabe ressaltar que concentrações superiores a 0,6% de CMC não foram utilizadas nos ensaios experimentais, isso se deveu a uma série de razões técnicas, onde se destacam as seguintes: baixa pressão e vazão de escoamento através dos hidrociclones e grande dificuldade na dispersão de sólidos na mistura CMC/água.

### 3.5 - Planejamento experimental para obtenção da geometria ótima

De modo a analisar e quantificar os efeitos das variáveis selecionadas para o presente estudo, realizou-se um Planejamento Composto Central (PCC) e utilizou-se da Técnica da

Superfície de Resposta para a obtenção dos pontos ótimos (MYERS, 1976; ASLAN *et al.*, 2008). A Tabela 3.1 apresenta os níveis utilizados para cada uma das variáveis selecionadas segundo o planejamento proposto.

Tabela 3.1 – Níveis dos fatores que compõem o planejamento composto central utilizado.

Nível	$\theta$ (°)	$L_c$ (mm)	$D_u$ (mm)	$L_v$ (mm)	$P$ (psi)
$-\alpha = -2$	6	32	4	6	35
-1	8	42	5	9	40
0	10	52	6	12	45
1	12	62	7	15	50
$\alpha = 2$	14	72	8	18	55

O planejamento é composto também de 8 réplicas independentes no ponto central, totalizando assim 50 experimentos individuais. Cabe ressaltar que o número de réplicas e valor para o parâmetro  $\alpha$  foram selecionados a fim de se obter a ortogonalidade do planejamento proposto.

Os resultados obtidos nesse estudo foram tratados pelo *software* STATISTICA 10.0, e a partir desse tratamento, obtiveram-se correlações empíricas para a determinação da eficiência total ( $\eta$ ), razão de líquido ( $R_L$ ) e vazão mássica ( $W_a$ ).

De acordo com a metodologia utilizada para o planejamento apresentado, as variáveis de interesse serão comumente apresentadas em suas formas codificadas, denotadas por  $\bar{\theta}$ ,  $\bar{D}_u$ ,  $\bar{L}_c$ ,  $\bar{L}_v$  e  $\bar{P}$ . Essas variáveis representam os valores dos níveis apresentados pela Tabela 3.1, sendo facilmente obtidas através das seguintes expressões:

$$\bar{\theta} = \frac{\theta[^\circ] - 10}{2} \quad (3.2)$$

$$\bar{D}_u = \frac{D_u[mm] - 6}{1} \quad (3.3)$$

$$\bar{L}_c = \frac{L_c[mm] - 52}{10} \quad (3.4)$$

$$\bar{L}_v = \frac{L_v [mm] - 12}{3} \quad (3.5)$$

$$\bar{P} = \frac{P [psi] - 45}{5} \quad (3.6)$$

Por fim, com base nos níveis apresentados na Tabela 3.1, o conjunto completo dos 50 experimentos executados nesse planejamento é apresentado através da Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Planejamento composto central proposto.

$\bar{\theta}$	$\bar{D}_u$	$\bar{L}_c$	$\bar{L}_v$	$\bar{P}$	$\bar{\theta}$	$\bar{D}_u$	$\bar{L}_c$	$\bar{L}_v$	$\bar{P}$
-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1
-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1
-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1
-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1
-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1
-1	-1	1	1	1	-2	0	0	0	0
-1	1	-1	-1	-1	2	0	0	0	0
-1	1	-1	-1	1	0	-2	0	0	0
-1	1	-1	1	-1	0	2	0	0	0
-1	1	-1	1	1	0	0	-2	0	0
-1	1	1	-1	-1	0	0	2	0	0
-1	1	1	-1	1	0	0	0	-2	0
-1	1	1	1	-1	0	0	0	2	0
-1	1	1	1	1	0	0	0	0	-2
1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	2
1	-1	-1	-1	1	0	0	0	0	0
1	-1	-1	1	-1	0	0	0	0	0
1	-1	-1	1	1	0	0	0	0	0
1	-1	1	-1	-1	0	0	0	0	0
1	-1	1	-1	1	0	0	0	0	0
1	-1	1	1	-1	0	0	0	0	0
1	-1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0
1	1	-1	-1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	-1	-1	0	0	0	0	0
1	1	1	-1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	-1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

### 3.6 - Seleção da geometria ótima

A fim de selecionar a geometria de melhor desempenho, apresentando para isso, tanto uma elevada taxa de coleta de sólidos quanto uma reduzida perda de líquido pelo *underflow*, realizou-se um estudo de otimização a partir do tratamento dos dados obtidos através do planejamento proposto pela Tabela 3.2. Para isso as superfícies de resposta obtidas foram avaliadas de forma iterativa com auxílio do *software* STATISTICA 10.0, de modo à

maximizar uma função objetivo, definida por  $FO$ , e que pode ser representada pela Equação 3.7.

$$FO = F_{RL} \cdot F_{\eta} \quad (3.7)$$

Em que as funções auxiliares  $F_{RL}$  e  $F_{\eta}$  consistem na normalização dos valores de  $R_L$  e  $\eta$  obtidos nos experimentos. Essas funções podem ser expressas através das Equações 3.8 e 3.9, respectivamente.

$$F_{RL} = \frac{R_L^{\max} - R_L}{R_L^{\max} - R_L^{\min}} \quad (3.8)$$

$$F_{\eta} = \frac{\eta - \eta^{\min}}{\eta^{\max} - \eta^{\min}} \quad (3.9)$$

Em que os subscritos min e max denominam os valores mínimo e máximo, tanto de  $\eta$  quanto de  $R_L$ , obtidos nos experimentos do planejamento anteriormente proposto.

Observando-se as Equações 3.8 e 3.9 percebe-se que a função  $FO$  é maximizada através de valores mínimos de  $R_L$  ao mesmo tempo em que  $\eta$  assume valores máximos. A relação entre essas expressões pode ser mais bem entendida através da Equação 3.10.

$$\lim_{\substack{R_L \rightarrow R_L^{\min} \\ \eta \rightarrow \eta^{\max}}} (FO) = 1 \quad (3.10)$$

Obviamente a função  $FO$  poderá assumir valores superiores a unidade, dependendo para isso, da forma com que a  $R_L$  e  $\eta$  excedam os valores mínimos e máximos obtidos dentro do planejamento experimental.

Cabe ressaltar que a escolha da função objetivo expressa pela Equação 3.7 foi feita de modo a balancear, de forma igualitária, os efeitos observados para a eficiência total e razão de líquido.

### 3.7 - Planejamento experimental para avaliação em condições de campo

A partir da obtenção de uma geometria ótima, através do procedimento descrito nos itens anteriores, realizou-se um estudo a fim de avaliar os efeitos considerados primordiais na operação do referido equipamento em campo. Estes podem se resumir aos seguintes pontos:

- Utilização de fluidos de caráter não-Newtoniano: como citado anteriormente fluidos de perfuração possuem características reológicas pseudoplásticas. Dessa forma faz-se necessária a avaliação desses efeitos no desempenho do equipamento. Para isso, fluidos de base aquosa contendo diferentes concentrações de carboximetilcelulose ( $C_{cmc}$ ) foram preparados e utilizados na operação do hidrociclone ótimo;
- Oscilação de concentração de sólidos: como dito anteriormente, o processo de perfuração de poços passa por uma série de fases que se diferenciam principalmente na taxa volumétrica de rocha perfurada (ou, de outra forma, na taxa de penetração). Dessa forma, a concentração de sólidos ( $C_{sol}$ ) dispersa no fluido foi também alvo desse estudo.

Com base nos pontos apresentados, construiu-se um planejamento experimental  $3^k$  (com um total de três réplicas no ponto central), de acordo com os níveis apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Níveis do planejamento para análise do hidrociclone ótimo operando com fluido pseudoplástico.

Nível	$D_u$ (mm)	$C_{cmc}$ (%)	$C_{sol}$ (% mássica)
1	4	0,6	6,0
0	6	0,4	3,5
-1	8	0,2	1,0

De acordo com a metodologia utilizada para o planejamento apresentado, as variáveis de interesse serão comumente apresentadas em suas formas codificadas, denotadas por  $\bar{D}_u$ ,  $\bar{C}_{cmc}$  e  $\bar{C}_{sol}$ . Essas variáveis representam os valores dos níveis apresentados pela Tabela 3.3, sendo facilmente obtidas através das seguintes expressões:

$$\bar{D}_u = \frac{D_u [mm] - 6}{2} \quad (3.11)$$

$$\bar{C}_{cmc} = \frac{C_{cmc} [\% \text{ mássico}] - 0,4}{0,2} \quad (3.12)$$



$$\bar{C}_{sól} = \frac{C_{sól} [\% \text{ mássico}] - 3,5}{2,5} \quad (3.13)$$

Por fim, com base nos níveis apresentados na Tabela 3.3, o conjunto completo dos 27 experimentos executados nesse planejamento é apresentado através da Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Planejamento experimental para análise da operação com fluido pseudoplástico

$\bar{C}_{cmc}$	$\bar{C}_{sól}$	$\bar{D}_u$	$\bar{C}_{cmc}$	$\bar{C}_{sól}$	$\bar{D}_u$
1	-1	-1	0	0	0
1	-1	0	0	0	0
1	-1	1	0	0	1
1	0	-1	0	1	-1
1	0	0	0	1	0
1	0	1	0	1	1
1	1	-1	-1	-1	-1
1	1	0	-1	-1	0
1	1	1	-1	-1	1
0	-1	-1	-1	0	-1
0	-1	0	-1	0	0
0	-1	1	-1	0	1
0	0	-1	-1	1	-1
0	0	0			

Cabe ressaltar que se optou pela utilização de concentrações de CMC inferiores a 0,6%, possibilitando dessa forma, a manutenção de vazões elevadas em condições estáveis e a preservação do sistema de bombeamento. Por essas mesmas razões, optou-se pela utilização de uma pressão de operação constante em aproximadamente 40 psi durante os referidos ensaios.

Outro ponto a se comentar consiste na manutenção do diâmetro de *underflow* como variável de estudo. Essa escolha será fundamentada com detalhes na seção de resultados, estando ela diretamente ligada ao fato da grande influência dessa variável sobre o desempenho do equipamento e por esta poder ser considerada uma variável operacional ao invés de uma variável de projeto.

Os resultados obtidos nesse estudo foram tratados pelo *software* STATISTICA 10.0, e a partir desse tratamento, obtiveram-se correlações empíricas para a determinação da eficiência total ( $\eta$ ), razão de líquido ( $R_L$ ) e diâmetro de corte ( $d_{50}$ ).

### 3.8 - Implementação do *software* para simulação de sistemas de controle de sólidos

Com o intuito de criar uma ferramenta para auxílio na simulação de sistemas de controle de sólidos, não só com foco nesse trabalho, mas visando uma aplicação prática generalizada, realizou-se o desenvolvimento e implementação de um *software* em código C#, utilizando-se para isso o ambiente de programação Visual Studio® 2013 produzido pela Microsoft Corporation.

Os principais objetivos almejados no projeto desse *software*, inicialmente batizado com o nome HydroSIM, incluíram a construção de uma interface intuitiva e de fácil adaptação para seus usuários, assim como a implementação de uma ferramenta flexível para o projeto e otimização de sistemas envolvendo a separação de sólidos.

### 3.9 - Estudo de operação do hidrociclone ótimo em série

De modo a avaliar a viabilidade de utilização do hidrociclone otimizado em condições mais similares a de campo, realizou-se um estudo de simulação, fazendo-se uso para isso dos resultados obtidos pelo planejamento proposto na Tabela 3.4.

Além da operação individual dos equipamentos, avaliou-se também a operação destes operando em série. O arranjo básico dos equipamentos escolhido para esse estudo consiste em um modelo utilizado em sistemas concentradores (SVAROVSKY, 2000), permitindo desse modo um maior controle sobre as razões de líquido do conjunto. Esse arranjo pode ser observado através da Figura 3.6.

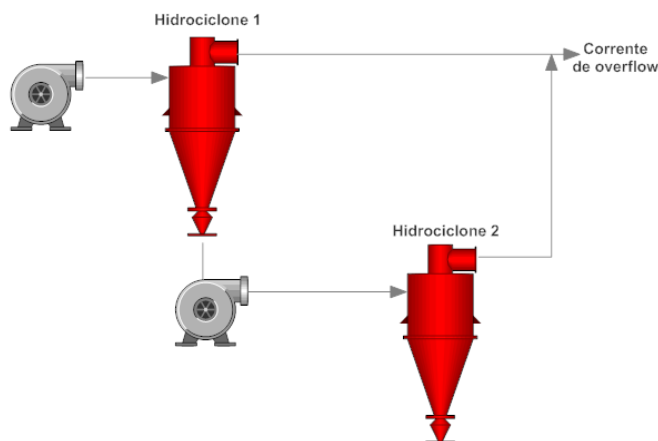


Figura 3.6 – Arranjo de hidrociclones utilizado nas simulações.

A pressão de alimentação de ambos os equipamentos em série foi fixada em 40 psi, de modo a permitir a utilização dos resultados obtidos durante os experimentos com fluido pseudoplástico.

A concentração de CMC do estudo foi fixada em 0,6% (em peso), de modo a permitir maior similaridade aos resultados reológicos obtidos para o fluido de perfuração BR-MUL com base olefínica, como se pode observar na Figura 3.5.

No que diz respeito ao diâmetro de *underflow* do hidrociclone avaliado, optou-se novamente pela utilização deste como fator de análise. Essa escolha foi tomada com base na facilidade com que o orifício do *underflow* (convencionalmente tratado como uma variável geométrica) pode ser trocado durante uma operação real em campo. Dessa forma, o diâmetro de *underflow* assume um caráter de variável operacional, mostrando-se de grande importância para um melhor controle da razão de líquido e flexibilização na operação do equipamento.

Os hidrociclones otimizados com  $D_u$  de 4, 6 e 8 mm (denominados para fins de simplificação como OT4, OT6 e OT8) foram avaliados de forma individual e operando em série (no arranjo ilustrado pela Figura 3.6). As diferentes configurações obtidas através da combinação seriada das 3 diferentes geometrias citadas são apresentadas na Tabela 3.5.

Cabe ressaltar que devido ao posicionamento dos equipamentos em série e ao fato dos efeitos de concentração não serem levados em conta, a ordem dos hidrociclones nas configurações não afetará a eficiência do conjunto como um todo, dessa forma, optou-se por omitir essas configurações (OT6→OT8, OT4→OT8 e OT4→OT6).

As configurações estudadas foram avaliadas de modo a operar como equipamentos de apoio as centrífugas decantadoras. A representação do posicionamento da bateria de hidrociclones proposta pode ser visualizada pela Figura 3.7, onde se tem como referência o funcionamento atualmente utilizado e já apresentado na Figura 1.2.

Nesse estudo, optou-se pela utilização de duas variáveis de modo a avaliar o desempenho dos hidrociclones: a redução da concentração na corrente clarificada (*overflow*), representada pela variável  $R_c$  e a divisão de fluxo (*split ratio*), representada pela variável  $S$ .

Tabela 3.5 – Configurações em série analisadas.

Configuração	Hidrociclone 1	Hidrociclone 2
1	OT8	-
2	OT6	-
3	OT4	-
4	OT8	OT8
5	OT8	OT6
6	OT8	OT4
7	OT6	OT6
8	OT6	OT4
9	OT4	OT4

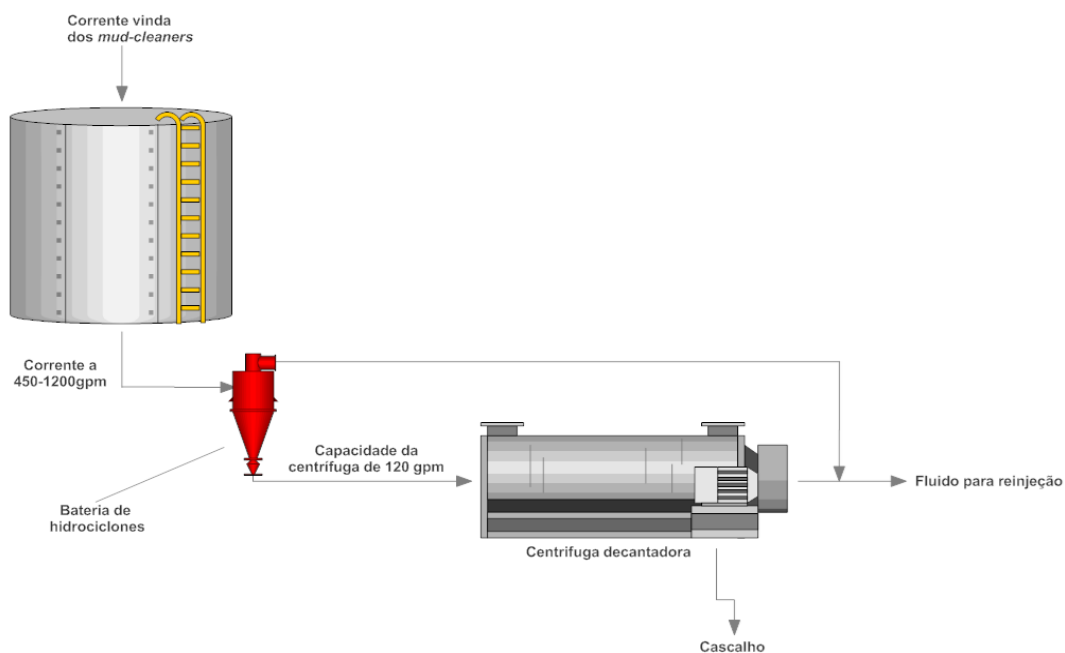


Figura 3.7 – Representação do posicionamento da bateria de hidrociclones funcionando em apoio as centrífugas decantadoras.

A variável  $R_c$  consiste em uma medida direta da eficácia do novo sistema de tratamento proposto, pois determina o percentual de redução no teor de sólidos na corrente

clarificada em relação ao sistema original, onde esta carecia de tratamento. Sua obtenção foi realizada através do uso da Equação 3.14.

$$R_c = 100\% \left( 1 - \frac{cw_o}{cw_a} \right) \quad (3.14)$$

Em que  $cw_o$  e  $cw_a$  são as concentrações mássicas das correntes de *overflow* (segundo a Figura 3.6) e de alimentação, respectivamente, do novo sistema proposto. Esses valores podem ser diretamente determinados após a obtenção das eficiências de separação dos hidrociclones 1 e 2 ( $\eta_{HC1}$  e  $\eta_{HC2}$  respectivamente) através das seguintes equações derivadas da Equação 2.20.

$$\eta_{HC1} = \sum \Delta X_a(d) \cdot G_{OT}(d) \quad (3.15)$$

$$\eta_{HC2} = \sum \Delta X_u(d) \cdot G_{OT}(d) \quad (3.16)$$

Em que o termo  $G_{OT}(d)$  consiste na curva de eficiência granulométrica obtida através dos resultados dos testes nas condições de campo ( $P = 40 \text{ psi}$ ,  $C_{CMC} = 0,6\%$  e  $C_{sol} = 6\%$ ). O termo  $\Delta X_u(d)$  consiste na distribuição granulométrica diferencial do material particulado recuperado no *underflow* do Hidrociclone 1 e  $\Delta X_a(d)$  a distribuição granulométrica diferencial do material particulado alimentado ao sistema. Para isso, visando melhor alinhamento com condições operacionais, utilizou-se uma distribuição referente à amostra de cascalho advinda de centrífugas decantadoras. Essa amostra foi fornecida pela empresa PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., sendo que sua distribuição pode ser visualizada na Figura 3.8 e conferida com detalhes através do APÊNDICE C.

Como pode se observar pela Figura 3.8, as faixas de tamanho dos materiais utilizados nos ensaios experimentais e daquele recuperado em campo apresentam grande similaridade. Esse fato permite que as curvas de eficiência granulométrica obtidas forneçam resultados mais precisos quando aplicadas nos cálculos para o material particulado de campo.

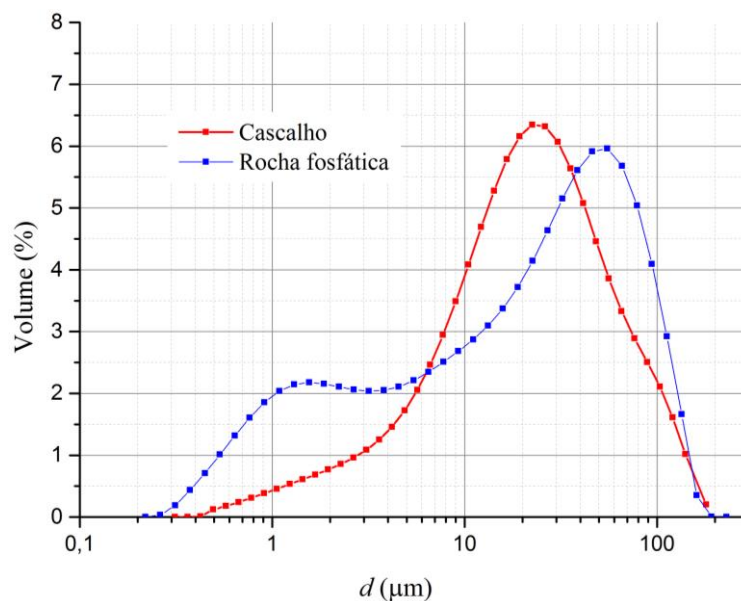


Figura 3.8 – Distribuição de frequência do cascalho recuperado nas centrifugas e da rocha fosfática utilizada.

### 3.10 - Procedimentos experimentais

A seguir serão descritos com detalhes os procedimentos adotados para obtenção dos resultados apresentados ao longo desta dissertação.

#### 3.10.1 - Medição da concentração de sólidos

De modo a mensurar os teores de sólidos das correntes de interesse durante os testes com os hidrociclones selecionados optou-se pela utilização do método gravimétrico. Para isso todas as amostras coletadas com intuito de se determinar suas concentrações mássicas foram submetidas ao seguinte procedimento experimental:

- Pesagem das amostras úmidas após a coleta;
- Acondicionamento das amostras em bandejas de alumínio e secagem em estufas a  $107^{\circ}\text{C}$  por um período de 24 h;
- Retirada das amostras da estufa, permanecendo estas durante 15 min à temperatura ambiente para resfriamento;
- Pesagem das amostras secas.

### 3.10.2 - Análises granulométricas

As análises granulométricas apresentadas nesse trabalho foram obtidas através da metodologia da difração de raio *laser*, utilizando-se para isso o equipamento *MasterSizer® 2000*. Para a realização das análises, optou-se pela utilização do modelo de Fraunhofer para determinação da distribuição de tamanhos das partículas, essa escolha se deve a dificuldade na obtenção dos parâmetros ópticos (índice de refração e absorção) do material particulado utilizado.

O procedimento adotado de modo a obtenção das análises granulométricas através do equipamento citado é descrito a seguir:

- Adição de aproximadamente 500 mL de água industrial em um béquer plástico;
- O béquer era então inserido na unidade de dispersão do *MasterSizer® 2000*;
- A velocidade de bombeamento era ajustada garantindo a ausência de bolhas no béquer;
- Realizava-se o “branco” do equipamento, a fim de eliminar interferências de material particulado contaminante presente na água pura;
- Adicionava-se a amostra (sólido e fluido) coletada durante os ensaios, estando essa já devidamente homogeneizada;
- Adicionava-se uma quantidade de aproximadamente 0,5 g de hexametáfosfato de sódio a fim de auxiliar na dispersão dos sólidos;
- A mistura era então deixada sob constante bombeamento ao passo que o sistema de banho ultrassônico do equipamento era ativado e mantido por cerca de 1 min;
- Ao fim desse período eram realizadas as leituras de distribuição de tamanhos por um período de 30 s e em triplicata;
- Por fim, os dados eram armazenados e posteriormente tratados.

### 3.10.3 - Procedimentos adotados nos ensaios com hidrociclones

A seguir serão descritos os procedimentos utilizados no que tange a realização dos ensaios em unidade experimental, assim como o processo de coleta de amostras e preparação das misturas utilizadas em cada planejamento apresentado.

### 3.10.3.1 - Procedimento para otimização dos hidrociclones

Os procedimentos utilizados para realização do planejamento experimental apresentado na Tabela 3.1, referente à otimização geométrica e operacional, são listados a seguir:

- Preenchia-se o tanque da unidade experimental com aproximadamente 160 L de água da rede de abastecimento;
- Ligava-se o sistema de agitação e de resfriamento;
- Adicionava-se uma quantidade de aproximadamente 2,56 kg de rocha fosfática (0,5% em volume) ao fluido no tanque;
- O fluido era então deixado sobre agitação até a estabilização da temperatura (entre 24 e 25°C), a mesma era então controlada manualmente através do ligamento/desligamento do sistema de refrigeração;
- Montava-se a geometria de hidrociclone desejada para o ensaio segundo o planejamento adotado;
- A bomba centrífuga era ligada e o sistema de controle era ajustado para a pressão desejada;
- Assim que vazão e pressão se estabilizassem, as vazões das correntes de *underflow* e *overflow* eram mensuradas através da coleta de amostras cronometradas das mesmas;
- Em seguida coletavam-se alíquotas de aproximadamente 50 mL (em béqueres de 100 mL) das correntes de alimentação e *underflow* (ambas em triplicata). Essas amostras eram então levadas para análise de concentração segundo procedimento já descrito acima;
- O fluxo advindo da bomba era então redirecionado diretamente para o tanque através das válvulas do sistema. Permitindo dessa forma a troca dos módulos do equipamento e reinício dos testes conforme o planejamento proposto;

### 3.10.3.2 - Procedimento para testes em condições de campo

Os procedimentos utilizados para realização do planejamento experimental apresentado na Tabela 3.3, referente ao estudo do equipamento ótimo em condições de campo, são listados a seguir:

- Preenchia-se o tanque da unidade experimental com aproximadamente 160 L de água da rede de abastecimento;



- Ligava-se o sistema de agitação e de resfriamento;
- Adicionava-se uma quantidade de CMC correspondente ao nível utilizado no planejamento proposto;
- O sistema era então deixado sobre agitação constante por um período de 30 min até a completa dispersão da CMC adicionada;
- Em seguida, adicionava-se uma quantidade de rocha fosfática correspondente ao nível utilizado no planejamento proposto;
- O sistema era então novamente deixado sobre agitação constante por um período de 15 min até a completa dispersão da rocha fosfática adicionada e estabilização da temperatura (entre 24 e 25°C), a mesma era então controlada manualmente através do ligamento/desligamento do sistema de refrigeração;
- Montava-se a o duto de *underflow* segundo o nível utilizado no planejamento proposto;
- A bomba centrífuga era ligada e o sistema de controle era ajustado para a pressão de 40 psi;
- Assim que vazão e pressão se estabilizassem, as vazões das correntes de *underflow* e *overflow* eram mensuradas através da coleta de amostras cronometradas das mesmas;
- Em seguida, coletavam-se alíquotas de aproximadamente 50 mL (em béqueres de 100 mL) das correntes de alimentação e *underflow* (ambas em triplicata). Essas amostras eram então levadas para análise de concentração segundo procedimento já descrito acima;
- Por fim, eram coletadas amostras de aproximadamente 10 mL (em frascos vedados) das correntes de alimentação e *underflow* (ambas em duplicata). Essas amostras eram então levadas para análise granulométrica segundo procedimento já descrito acima;
- O fluxo advindo da bomba era então redirecionado diretamente para o tanque através das válvulas do sistema. Permitindo dessa forma a troca dos módulos de *underflow*, readição de material particulado ou readição de CMC, conforme os níveis do planejamento apresentado.

---

## CAPÍTULO 4 - Resultados e Discussões

---

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos através dos planejamentos, estudos e procedimentos descritos no Capítulo 3, assim como as discussões pertinentes a cada um dos tópicos.

### 4.1 - Resultados para o estudo de otimização

O conjunto de resultados completo obtido através dos ensaios referentes ao planejamento apresentado anteriormente por meio da Tabela 3.2, pode ser conferido no APÊNDICE D.

O tratamento estatístico desses resultados, mais especificamente aqueles obtidos para a eficiência total ( $\eta$ ), razão de líquido ( $R_L$ ) e capacidade de processamento ( $W_a$ ), possibilitou a obtenção de expressões empíricas que correlacionam as variáveis independentes selecionadas. Essas expressões são apresentadas na forma das Equações 4.1, 4.2 e 4.3.

Cabe ressaltar que as equações supracitadas encontram-se na forma matricial e contém apenas os parâmetros que influenciaram significativamente as respostas (95% de confiança).

$$\eta(\%) = 82,207 + \begin{bmatrix} 0 \\ -0,27 \\ 0,19 \\ 2,08 \\ 0,42 \end{bmatrix} X^T + X^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0,07 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,07 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,16 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,19 \end{bmatrix} X \quad (4.1)$$

$$R_L(\%) = 18,145 + \begin{bmatrix} 0,59 \\ -0,71 \\ -0,35 \\ 6,40 \\ 0 \end{bmatrix} X^T + X^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0,14 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,21 & 0 \\ -0,14 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,21 & 0 & 0,50 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.2)$$

$$W_a\left(\frac{g}{s}\right) = 459,6 + \begin{bmatrix} 12,9 \\ -13,74 \\ -5 \\ 5,42 \\ 49,71 \end{bmatrix} X^T + X^T \begin{bmatrix} 0 & -4,38 & 0 & 0 & 0 \\ -4,38 & 8,69 & -2,89 & 0 & 0 \\ 0 & -2,89 & 5,58 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X \quad (4.3)$$

O vetor de variáveis  $X$  é dado pela Equação 4.4:

$$X = \begin{bmatrix} \overline{L_c} \\ \overline{\theta} \\ \overline{L_v} \\ \overline{D_u} \\ \overline{P} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Em que as variáveis  $\overline{\theta}$ ,  $\overline{D_u}$ ,  $\overline{L_c}$ ,  $\overline{L_v}$  e  $\overline{P}$  se encontram em suas formas codificadas (níveis do planejamento experimental) de acordo com a Tabela 3.1.

Através das Equações 4.1, 4.2 e 4.3 pode-se observar que todas as variáveis estudadas afetaram significativamente à pelo menos uma das respostas de interesse. Os valores de  $R^2$  para as equações em questão foram de 0,98, 0,95 e 0,98, respectivamente, mostrando-se assim que os modelos propostos conseguem explicar de modo satisfatório a variabilidade dos dados obtidos.

Em se tratando da eficiência total pode-se, através da Equação 4.1, perceber que esta foi afetada por todas as variáveis independentes selecionadas, considerando para isso tanto suas formas individuais quanto combinadas.

Dentre estes efeitos, aquele propiciado pelo aumento do diâmetro de *underflow* é claramente o mais notável. Isso pode ser facilmente explicado pela redução na restrição do escoamento para corrente concentrada e consequentemente ao aumento da divisão de fluxo e volume de sólidos coletados pelo orifício de *underflow* do equipamento.

O segundo efeito mais expressivo sobre  $\eta$ , representado pela pressão de alimentação ( $\bar{P}$ ), apresentou um efeito individual positivo sobre a mesma, isso porque essa variável está intimamente correlacionada aos níveis de velocidade tangenciais e forças centrífugas encontradas no interior do hidrociclone. Cabe ressaltar que esse efeito positivo, conhecidamente tende a se atenuar a medida que  $\bar{P}$  aumenta. Isso está diretamente ligado ao constante aumento nos níveis de turbulência somado a redução no tempo de residência no interior do equipamento. Esse fenômeno explicaria a existência do termo quadrático para  $\bar{P}$  na expressão em questão.

Com relação a variável  $\bar{L}_v$ , pode-se notar, através de seu efeito individual, que a mesma afeta positivamente  $\eta$ . Com relação ao efeito propiciado por  $\bar{L}_v$ , pode-se associá-lo ao distanciamento do *vortex finder* da intersecção entre a região cilíndrica e cônica, o que pode acarretar em menores perturbações na transição do escoamento entre as regiões citadas. Cabe ressaltar que a extrapolação do valor de  $\bar{L}_v$ , e consequentemente a minimização do *vortex finder*, resultaria em uma perda de desempenho do hidrociclone, diretamente relacionada ao redirecionamento das partículas recém-alimentadas à corrente de *overflow*, fenômeno esse comumente denominado “curto-circuito”. Complementarmente, tem-se que esse mesmo efeito é potencializado quando a variável  $\bar{L}_c$  assume valores reduzidos. Esse fenômeno pode ser associado à produção de uma zona de *vortex* mais limitada e estável na região cilíndrica, resultado da redução das escalas e consequentemente da turbulência produzida na região em questão.

Por fim, a variável  $\bar{\theta}$  apresentou um efeito inversamente proporcional sobre  $\eta$ . A explicação para isso reside no fato de que, uma redução do ângulo de cone trás consigo um aumento no tempo de residência do fluido no equipamento, além do que, torna mais suave o escoamento descendente do fluido ao longo do mesmo, permitindo também uma transição controlada entre o vórtice externo descende e o interno ascendente. Isso acaba por resultar em

menor geração de turbulência e menor ressuspensão de partículas das paredes do equipamento.

Com relação a razão de líquido, pôde-se observar que todas as variáveis, com exceção da pressão de alimentação, afetaram, tanto na forma individual como combinada, a resposta em questão. De modo similar à eficiência total, o efeito do diâmetro do *underflow* foi o mais expressivo dentre os demais, e como esperado, um aumento dessa variável geométrica resultou em um aumento da razão de líquido do equipamento. De maneira similar, o aumento de  $\bar{L}_c$  e redução no ângulo  $\bar{\theta}$  propiciaram um incremento da  $R_L$ , muito provavelmente pela redução das restrições aplicadas ao fluxo descendente de fluido no interior do equipamento. Já o aumento da variável  $\bar{L}_v$ , o que significa um menor comprimento de *vortex finder*, resulta em uma maior facilidade de escoamento para a corrente de *overflow* e consequentemente um menor  $R_L$ .

No que diz respeito a vazão de alimentação, a variável que maior lhe afetou foi a pressão de alimentação. Isso já era esperado tendo em vista que a mesma consiste na força motriz responsável pelo escoamento no interior do hidrociclone. Com relação às demais variáveis geométricas, pode-se, de forma generalizada, correlacionar o aumento de  $W_a$  com a redução das restrições físicas impostas por cada uma das variáveis. Dessa forma, um incremento de  $\bar{L}_c$  e  $\bar{D}_u$  propiciam o aumento do fluxo no equipamento. Já com relação aos efeitos das variáveis  $\bar{\theta}$  e  $\bar{L}_v$ , pouco se pode concluir pela simples análise da Equação 4.3, tendo-se em vista a existência de efeitos quadráticos e combinados com escalas similares aos efeitos individuais.

#### 4.1.1 - Relação entre razão de líquido e eficiência total

A Figura 4.1 apresenta, de forma geral, os resultados obtidos no planejamento composto central, relacionando os valores de eficiência total com os valores de razão de líquido obtidos para cada uma das condições analisadas. Pode-se observar claramente a presença de uma tendência linear, onde a eficiência total responde de forma diretamente proporcional às alterações na razão de líquido. Esse fenômeno, já esperado na operação de hidrociclones, é comumente denominado efeito “T”.

O efeito “T” pode ser explicado como sendo o direcionamento de uma fração dos sólidos alimentados para a corrente de *underflow*, ocorrendo tão somente pela divisão de fluxo proporcionada pelo equipamento e não pela ação do campo centrífugo gerado no interior do equipamento.

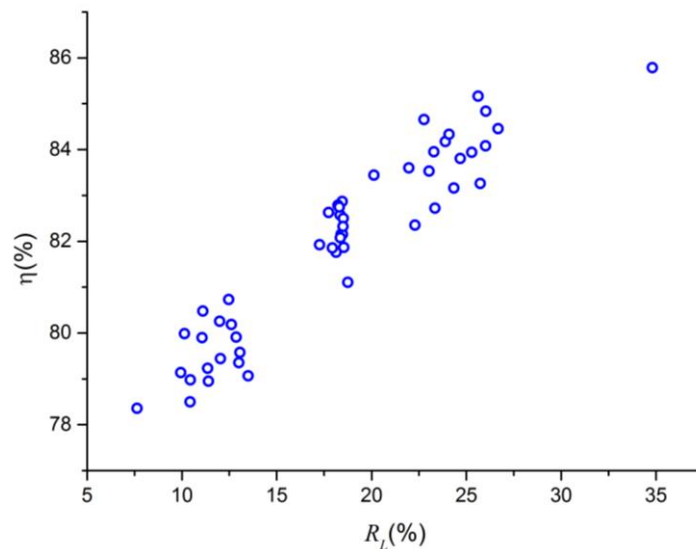


Figura 4.1 – Eficiência total em função da razão de líquido.

Dessa forma, um aumento na eficiência total obtido exclusivamente por um incremento na razão de líquido, não representa uma melhora real no desempenho do equipamento. Mostrando assim, que uma análise conjunta das duas grandezas provém resultados mais coerentes no processo de otimização dos hidrociclones.

#### 4.1.2 - Determinação do hidrociclone ótimo

Através do processo de otimização realizado com auxílio do *software* STATISTICA 10.0, e tendo como base as Equações 4.1 e 4.2, cada uma das diferentes variáveis independentes foi combinada com as demais, permitindo assim, a avaliação completa do espectro de possíveis combinações de condições geométricas e operacionais. As superfícies, contendo os valores da função objetivo para cada uma dessas combinações, são apresentadas por meio da Figura 4.2.

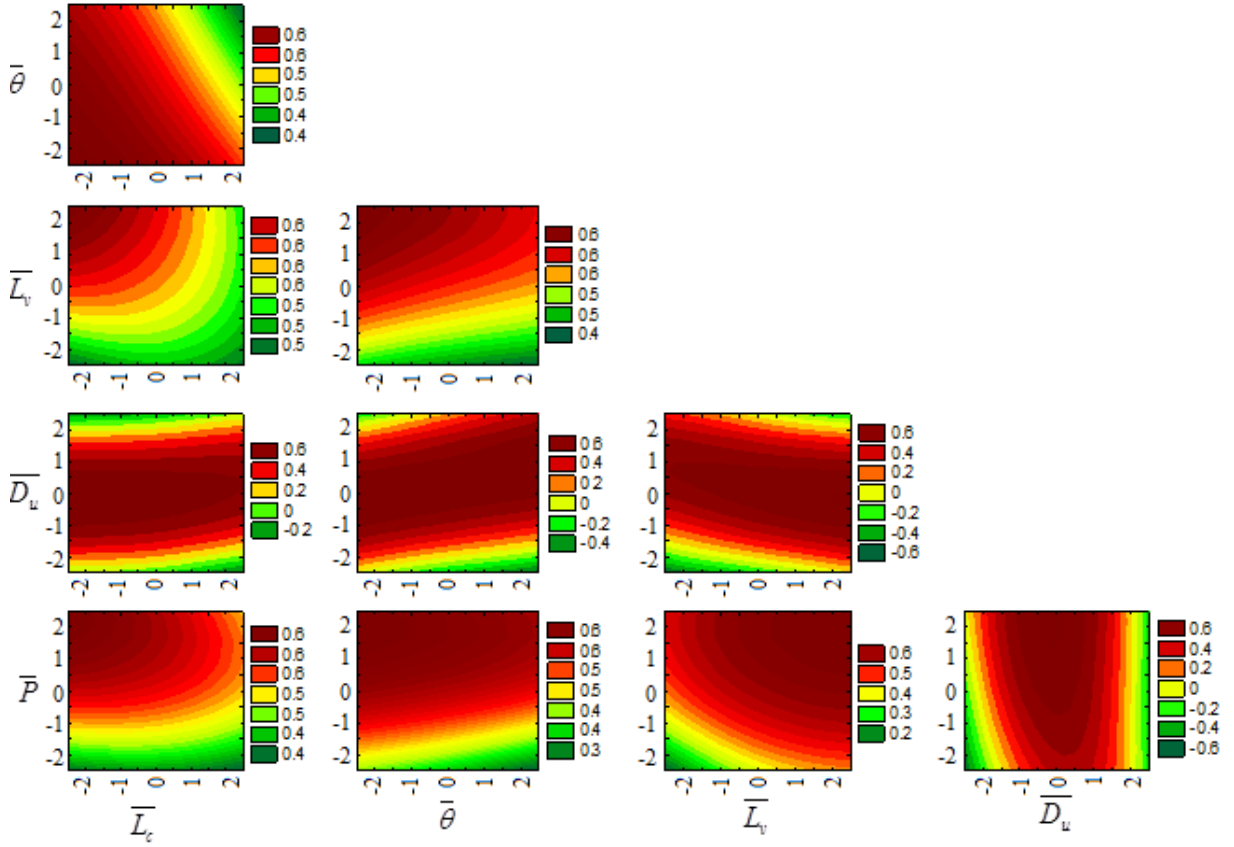


Figura 4.2 – Superfícies correlacionando a função objetivo às diferentes combinações de variáveis independentes.

Pode-se observar por meio da Figura 4.2, que a função objetivo apresentou valores máximos para as seguintes condições:

- Minimização do ângulo da região cônica ( $\bar{\theta} = -2$ );
- Minimização do comprimento da região cilíndrica ( $\bar{L}_c = -2$ );
- Maximização de  $\bar{L}_v$ , ou seja, minimização do *vortex finder* ( $\bar{L}_v = +2$ );
- Maximização da pressão de alimentação ( $\bar{P} = +2$ );

Com relação ao diâmetro do *underflow*, pôde-se observar que este, além de apresentar o maior dos efeitos sobre a função objetivo, não apresentou um ponto único, mas sim uma faixa, que resultasse na maximização de *FO*. Dessa forma, para melhor observar esse efeito isoladamente, a Figura 4.3 apresenta uma análise independente de cada uma das variáveis, mantendo-se os demais fatores fixos em seus pontos centrais.

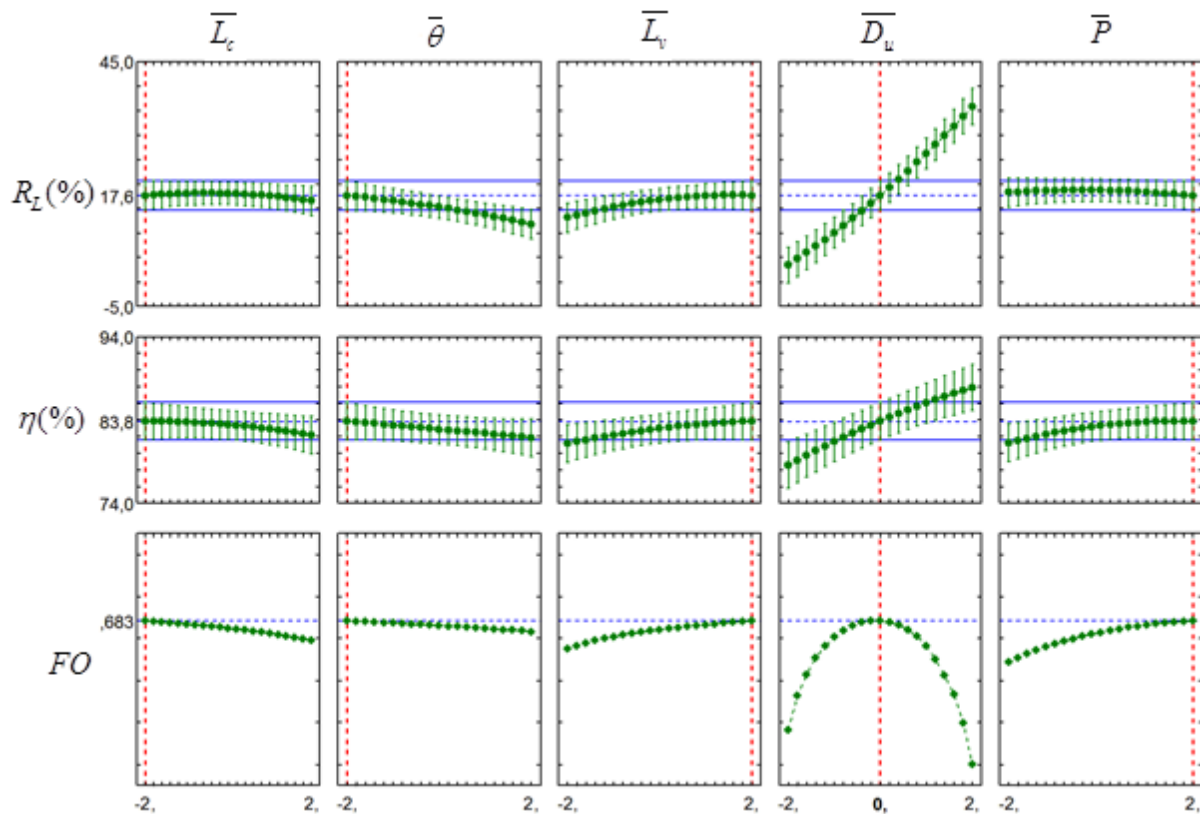


Figura 4.3 – Resultados obtidos pela otimização da função objetivo ( $FO$ ), a configuração ótima é ilustrada pela linha pontilhada vermelha.

Através da Figura 4.3 é possível constatar que, no efeito da pressão de alimentação sobre  $FO$ , observa-se uma estabilização à medida que esta tem seu valor incrementado. Isso se deve ao contrabalanceamento do aumento das velocidades tangenciais e forças centrífugas pelo aumento da turbulência e redução do tempo de residência. Tem-se dessa forma que, valores de pressão superiores a 55 psi, não apresentariam benefícios sobre a eficiência total suficiente para justificar o aumento nos custos operacionais de bombeamento incorridos no processo.

Em se tratando do diâmetro do *underflow*, como dito anteriormente, observa-se que esta variável que mais influenciou tanto  $\eta$  quanto  $R_L$ , sendo que seu nível central ( $\overline{D_u} = 0$ ) resultou na maximização da  $FO$ . É interessante ressaltar que esse resultado está intimamente ligado à escolha da função objetivo, que balanceia os efeitos de  $R_L$  e  $\eta$ . Pode-se concluir através disso que, o  $D_u$  consiste na melhor ferramenta de controle da divisão de fluxo, e consequentemente, da eficiência total na operação de um hidrociclone.



Somando-se isso ao fato de que  $D_u$  pode ser facilmente alterado em campo, o mesmo não será fixado nos futuros testes envolvendo a geometria ótima, sendo assim tratado como uma variável operacional do processo.

Outro fato importante de se ressaltar consiste na maximização de  $FO$  através da minimização do comprimento do *vortex finder* (máximo  $L_v$ ). Isso resultaria, considerando-se uma extrapolação dos pontos ótimos, no desaparecimento do *vortex finder*, o que acarretaria na passagem direta dos sólidos alimentados para a corrente de *overflow* (BERGSTRÖM e VOMHOFF, 2007). Tentando-se contornar esse efeito indesejado, realizou-se um estudo independente, envolvendo exclusivamente o efeito do comprimento do *vortex finder* sobre a eficiência de separação, mantendo-se para isso as demais variáveis fixas nos pontos ótimos ( $\overline{D_u} = 0$ ,  $\overline{L_c} = -2$ ,  $\overline{\theta} = -2$  e  $\overline{P} = 2$ ). Os resultados para esse estudo, onde foram analisados *vortex finders* com diferentes comprimentos (13, 17, 20, 27, 33 mm), são apresentados pela Tabela 4.1 e Figura 4.4.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos para estudo da influência do *vortex finder*.

Comprimento do <i>vortex finder</i> (mm)	$\eta$ (%)	$R_L$ (%)
33	84,84	20,32
27	84,99	20,45
20	85,01	20,12
17	84,85	20,03
13	84,42	20,29

A Figura 4.4 mostra que a eficiência total pode ser maximizada utilizando-se de um *vortex finder* com cerca de 20 mm. Nesse ponto tem-se uma razão  $L_v / D_c = 0,375$ , valor esse de acordo com outros estudos similares presentes na literatura (MARTÍNEZ *et al.*, 2008). Cabe ressaltar que as variações nas razões de líquido foram praticamente nulas, apresentado comportamento consideravelmente aleatório, sendo dessa forma desconsiderado na seleção do ponto ótimo.

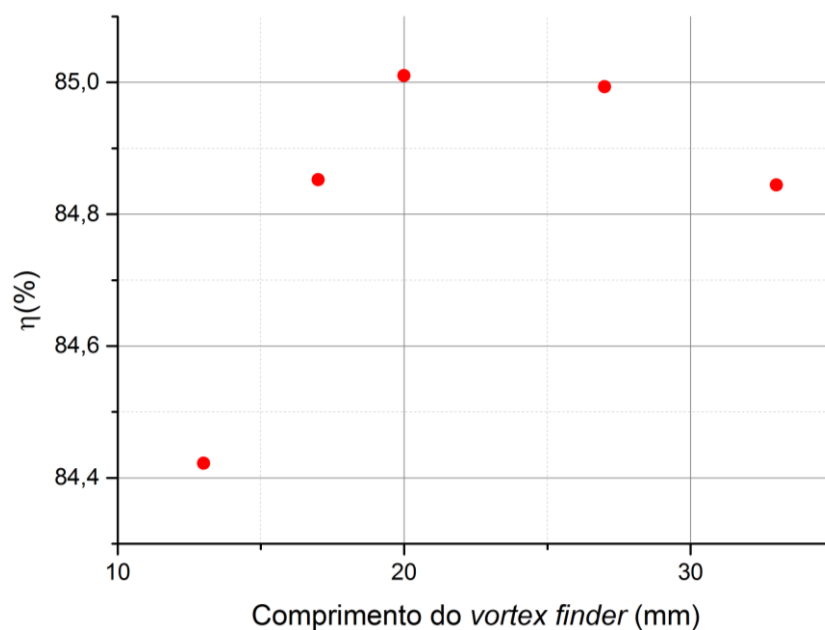


Figura 4.4 – Estudo do efeito do comprimento do *vortex finder*.

De modo geral, quando comparada as outras variáveis independentes selecionadas, o comprimento do *vortex finder* pouco influenciou o desempenho do hidrociclone. No entanto, fica claro, pelo simples entendimento das correntes de fluxo e dinâmica das partículas no interior de um hidrociclone, que a presença do *vortex finder* é imprescindível na manutenção de um vórtice estável e prevenção na ocorrência de curto-circuito.

Por fim, levando-se em consideração todos os pontos acima discutidos, selecionou-se um equipamento de melhor desempenho, também denominado hidrociclone ótimo, com suas configurações expressas por meio da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Configuração da geometria ótima.

Variável	Valor ótimo
$\theta$	6°
$L_c / D_c$	1,07
$L_v / D_c$	0,375
$D_u / D_c$	0,2
$P$	55 psi

#### 4.1.3 - Avaliação do hidrociclone ótimo

A seguir, a fim de validar e analisar o desempenho do referido hidrociclone ótimo, foram realizados testes experimentais do mesmo, em condições similares as utilizadas durante o estudo de otimização.

Tabela 4.3 – Resultados de  $\eta$ ,  $R_L$  e  $W_a$  para a geometria ótima

$\overline{D_u}$	$\eta$ (%)	$R_L$ (%)	$W_a$ (g/s)
-2	81,23	7,35	505
-1	82,52	11,76	508
0	85,08	20,86	511
1	86,49	26,32	514
2	89,33	37,82	523

Como pode-se observar, a configuração ótima forneceu eficiências na faixa de 81-89%, ao mesmo tempo que a razão de líquido oscilou entre 7-38%. A capacidade do equipamento foi pouco afetada pela variação do diâmetro de *underflow*, situando-se na faixa de 505-523 g/s. A Figura 4.5 apresenta os resultados de  $\eta$  e  $R_L$  para esses testes juntamente com aqueles resultantes do estudo realizado para obtenção da geometria ótima.

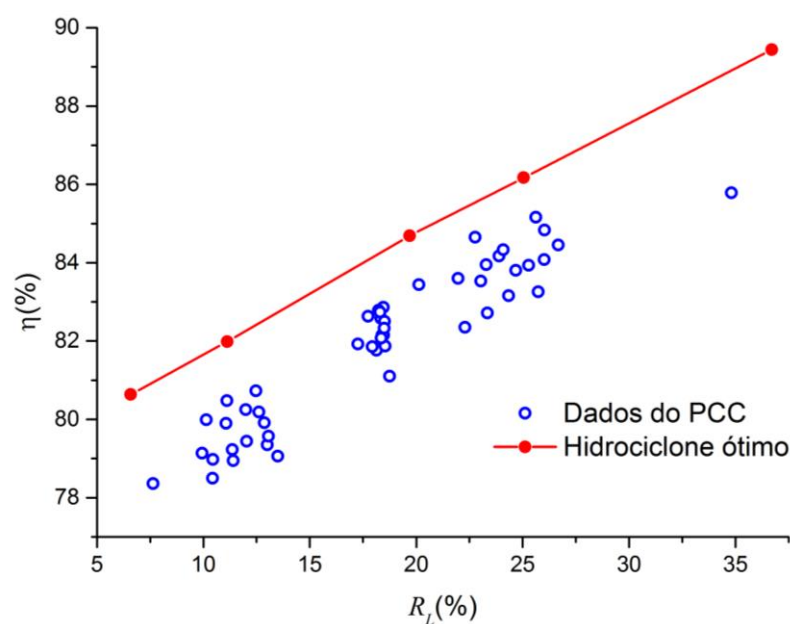


Figura 4.5 – Resultados de eficiência total em função da razão de líquido da geometria ótima.

Pôde-se observar nitidamente um aumento de eficiência, sem com que houvesse, no entanto, um aumento da razão de líquido para a configuração ótima. Isso mostra que foi possível a obtenção de ganhos reais de desempenho com a utilização do equipamento otimizado.

#### 4.1.4 - Verificação dos modelos propostos

Por fim, de modo a de avaliar a precisão e exatidão das correlações empíricas propostas anteriormente, realizou-se uma análise dos valores previstos de  $\eta$  e  $R_L$  para o hidrociclone ótimo, através das Equações 4.1 e 4.2. Esses valores, dentro de suas devidas faixas de confiança (95%), foram contrastados com os valores observados experimentalmente para a geometria ótima. A Figura 4.6 e Figura 4.7 ilustram essas análises para as variáveis de interesse estudadas.

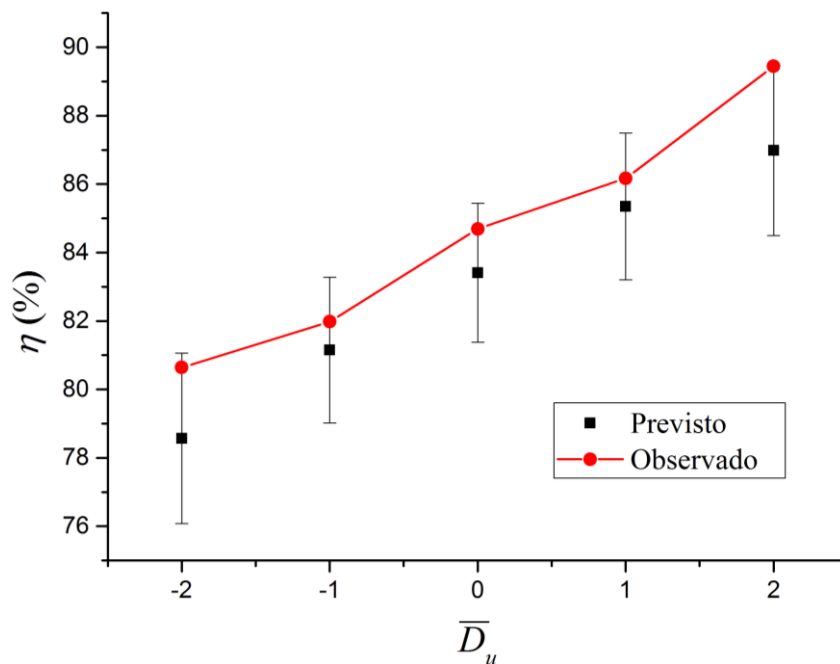


Figura 4.6 – Valores previstos e observados para eficiência total do hidrociclone ótimo.

Pôde-se observar que de modo geral as correlações propostas pelas Equações 4.1 e 4.2, para previsão da eficiência total e razão de líquido respectivamente, mostram-se coerentes, tanto qualitativamente quanto quantitativamente com os resultados observados para o

hidrociclone ótimo. Também é interessante ressaltar o fato de que os maiores desvio entre os valores observados e previstos se situam nos pontos externos do PCC ( $\bar{D}_u = 2$  e  $\bar{D}_u = -2$ ). Isso pode ser explicado através da própria construção do planejamento composto central, que apresenta uma densidade de pontos superior nas regiões central e intermediária, quando comparada a região externa do planejamento.

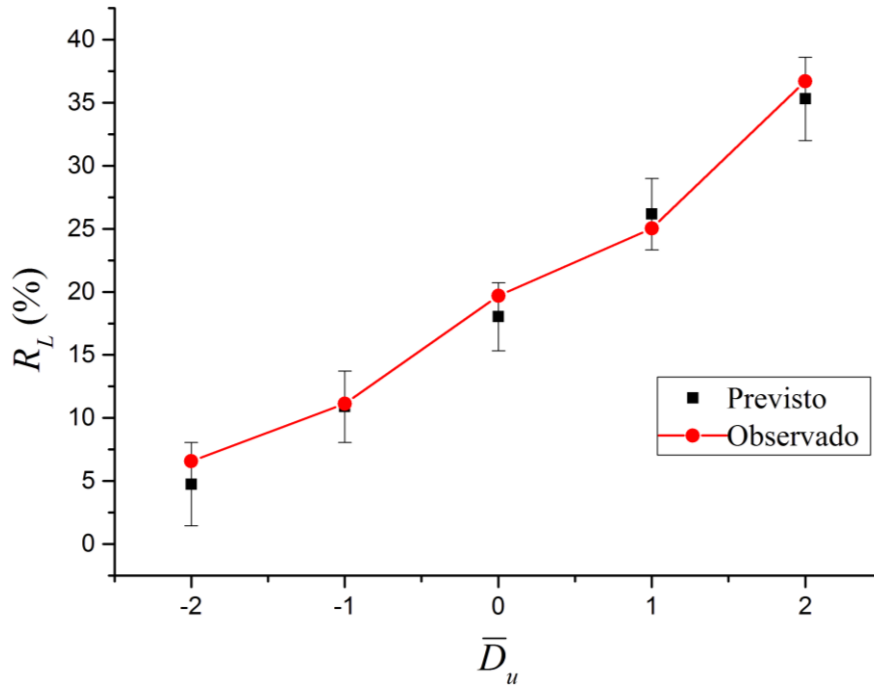


Figura 4.7 – Valores previstos e observados para razão de líquido do hidrociclone ótimo.

## 4.2 - Resultados para operação com fluido pseudoplástico

O conjunto completo de resultados obtidos através dos ensaios referentes ao planejamento apresentado por meio da Tabela 3.4, pode ser conferido no APÊNDICE E.

O tratamento estatístico desses resultados, mais especificamente aqueles obtidos para a eficiência total ( $\eta$ ), razão de líquido ( $R_L$ ), vazão de alimentação ( $W_a$ ) e diâmetro de corte ( $d_{50}$ ), possibilitou a obtenção de expressões empíricas correlacionando-as as variáveis independentes selecionadas. Essas expressões são apresentadas na forma das Equações 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

Cabe ressaltar que as equações supracitadas contêm apenas os parâmetros que influenciaram significativamente as respostas (com 95% de confiança).

$$\eta(\%) = 53,60 + \begin{bmatrix} -8,94 \\ 0 \\ 10,36 \end{bmatrix} Y^T + Y^T \begin{bmatrix} -1,43 & 0 & 0,74 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,74 & 0 & 1,12 \end{bmatrix} Y \quad (4.5)$$

$$R_L(\%) = 25,05 + \begin{bmatrix} -5,68 \\ 0 \\ 13,54 \end{bmatrix} Y^T + Y^T \begin{bmatrix} -1,18 & 0 & -0,61 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0,61 & 0 & 0 \end{bmatrix} Y \quad (4.6)$$

$$W_a(g/s) = 445,0 + \begin{bmatrix} 33,32 \\ 7,67 \\ 3,30 \end{bmatrix} Y^T + Y^T \begin{bmatrix} -1,83 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} Y \quad (4.7)$$

$$d_{50}(\mu m) = 26,10 + \begin{bmatrix} 13,66 \\ 1,23 \\ -9,12 \end{bmatrix} Y^T + Y^T \begin{bmatrix} -0,62 & 0 & -2,78 \\ 0 & 0 & 0 \\ -2,78 & 0 & 0 \end{bmatrix} Y \quad (4.8)$$

Em que vetor de variáveis  $Y$  é dado pela Equação 4.9:

$$Y = \begin{bmatrix} \overline{C}_{cmc} \\ \overline{C}_{sól} \\ \overline{D}_u \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Em que as variáveis  $\overline{C}_{cmc}$ ,  $\overline{D}_u$  e  $\overline{C}_{sól}$  encontram-se em suas formas codificadas (níveis do planejamento experimental).

Através das Equações 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 pôde-se observar que todas as variáveis estudadas afetaram significativamente a pelo menos uma das respostas de interesse. Os valores de  $R^2$  para as equações em questão foram de 0,992, 0,986, 0,982 e 0,988, respectivamente, mostrando-se assim que os ajustes efetuados conseguem explicar de modo satisfatório a variabilidade dos dados obtidos.

Através de uma análise da Equação 4.5, pode-se observar que a eficiência total não foi significativamente afetada pela concentração de sólidos da alimentação. Isso pode ser explicado pelos baixos valores de  $\overline{C}_{sól}$  empregados no estudo, nessa condição não são significativos os efeitos de interação partícula-partícula, o que tende a reduzir as velocidades de sedimentação destas através do campo centrífugo.

Em se tratando das variáveis  $\bar{C}_{cmc}$  e  $\bar{D}_u$ , pôde-se observar que estas tiveram efeitos significativos sobre a eficiência total, tanto em suas formas individuais quanto quadrática e combinada. Esses efeitos podem ser mais bem observados através da superfície de resposta ilustrada pela Figura 4.8.

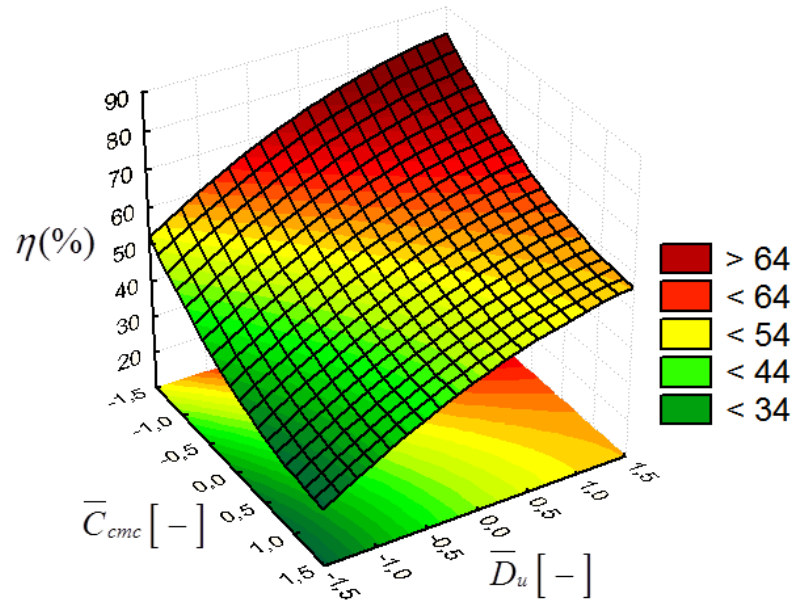


Figura 4.8- Superfície de resposta para eficiência total.

Através da Figura 4.8 fica claro o efeito negativo da concentração de CMC sobre a eficiência total, o que está diretamente ligado ao aumento de viscosidade do fluido e consequentemente ao aumento na resistência de descolamento das partículas através do campo centrífugo em direção as paredes do equipamento. O efeito positivo do diâmetro do *underflow* está novamente ligado aos efeitos de redução das contrações da corrente de *underflow*, e consequentemente a maior divisão de fluxo proporcionada por esta.

Em relação à razão de líquido, representada pela Equação 4.6, observa-se novamente a ausência de influência pela concentração de sólidos, obviamente por motivos similares àqueles apresentados para a eficiência total.

Por outro lado, a concentração de CMC teve forte influência positiva sobre a razão de líquido, o que pode estar ligado maior dificuldade de inversão do fluxo helicoidal descendente para a direção do duto de *overflow*, levando consequentemente, a uma maior descarga de fluido pela corrente inferior. É interessante ressaltar também o fato do aumento de  $\bar{C}_{cmc}$  ter influenciado negativamente o desempenho do equipamento em dois sentidos: tanto em relação

ao aumento do  $R_L$  quanto à redução  $\eta$ . Ambos esses efeitos podem ser mais bem observados através da Figura 4.9.

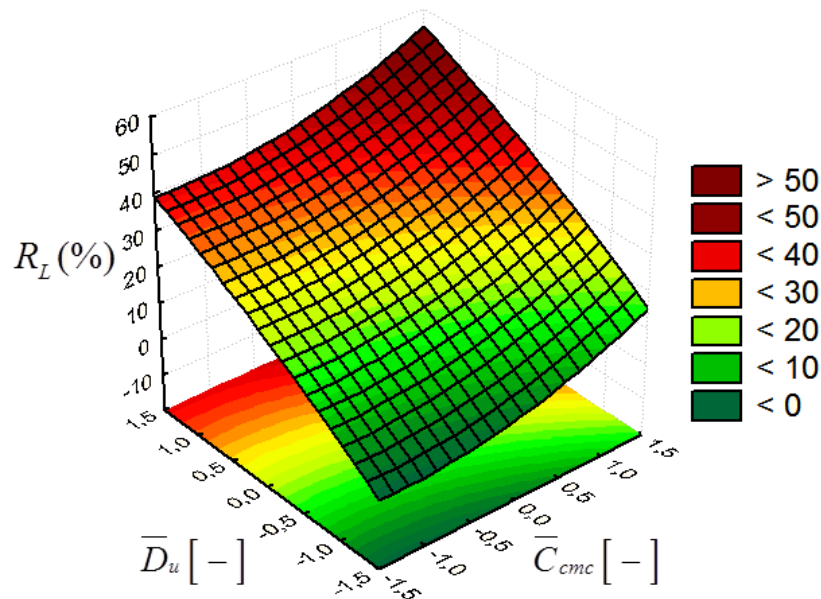


Figura 4.9 - Superfície de resposta para razão de líquido.

No que tange o diâmetro de corte, observam-se efeitos correlacionados àqueles vistos na eficiência total, isso pelo fato de ambas as variáveis estarem intimamente ligadas, ou seja, aumentos em  $\eta$  resultam, na maioria dos casos, em reduções nos valores obtidos para  $d_{50}$ . Por outro lado, percebe-se que a variável  $\bar{C}_{sol}$ , diferentemente do observado para eficiência total, afetou significativamente a resposta do diâmetro de corte, mesmo que em menor proporção quando comparada às demais variáveis. Isso pode ser explicado devido a maior imprecisão dos resultados obtidos através das análises granulométricas. Sendo estas altamente sensíveis frente aos métodos de coleta, homogeneização e análise das amostras, sensibilidade essa não tão expressiva na determinação da eficiência total.

#### 4.2.1 - Curvas de eficiência granulométrica

As curvas de eficiência granulométrica obtidas através das análises dos hidrociclone operando com fluido pseudoplástico são apresentadas em detalhes no APÊNDICE F. Através destas fica possível a determinação das eficiências totais de separação para sólidos alimentados com diferentes distribuições de tamanho, tarefa essa que será necessária no



estudo de determinação do desempenho dos equipamentos operando com cascalho advindo das centrífugas decantadoras.

Voltando-se ao foco para os resultados referentes às condições selecionadas para o estudo de operação em série, a Figura 4.10 apresenta as curvas de eficiência granulométrica obtidas para essas condições. Essas curvas foram, posteriormente, utilizadas como ferramentas para análise das eficiências de separação dos equipamentos ótimos operando com material particulado (borra) diferente daquele utilizado nos experimentos (rocha fosfática).

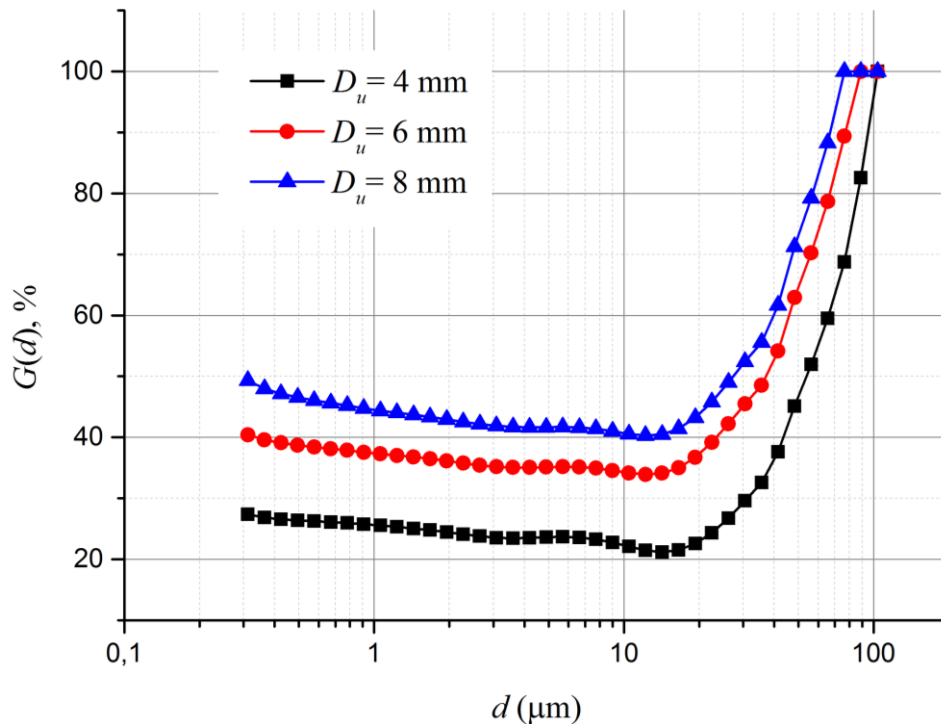


Figura 4.10 – Curvas de eficiência granulométrica nas condições selecionadas para o estudo de operação seriada.

Através da Figura 4.10, pôde-se observar claramente a ocorrência do efeito *fish-hook*, mesmo que não muito acentuado, o que se pode correlacionar ao fato da baixa turbulência gerada devido a alta viscosidade do meio fluido. Cabe também ressaltar que esse comportamento, caracterizado pelo aumento da eficiência com a redução no tamanho das partículas, foi observado em todas as condições utilizadas nesse estudo.

A ocorrência desse fenômeno pode ser vista como prejudicial na operação de recuperação de sólidos em fluidos de perfuração. Isso porque o aditivo adensante (geralmente barita) presente no fluido, se apresenta na forma de dispersão de partículas ultrafinas com elevada densidade ( $\sim 4 \text{ g/cm}^3$ ).

Dessa forma, somando-se o fato desse aditivo apresentar densidade superior a observada no cascalho perfurado e a presença do efeito *fish-hook*, tem-se como resultado a recuperação indesejada deste nas correntes concentradas. O que acaba por reduzir a densidade do fluido de perfuração e perturbar o perfil de pressão ao longo da coluna, fatos esse que podem desencadear um *kick* ou *blow-out*.

Fica claro, a partir da discussão acima apresentada, que o ajuste das curvas de eficiência granulométrica através dos modelos tradicionais, como o de Rosin-Rammler-Bennet, não apresentariam resultados coerentes, pois estes atenuariam a ocorrência do efeito *fish-hook*.

Dessa forma, para a obtenção de parâmetros que descrevessem plenamente o comportamento das curvas de eficiência apresentadas na Figura 4.10, utilizou-se de um processo de regressão não linear (método de Gauss-Newton) através do *software* STATISTICA 10.0, fazendo-se uso para isso, do modelo de distribuição descrito pela Equação 2.19. Os parâmetros e coeficientes de determinação obtidos para as regressões das três curvas são apresentados por meio da Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros e coeficientes de determinação obtidos nos ajustes das curvas de eficiência granulométrica.

$D_u$ (mm)	$d_{class}$ ( $\mu\text{m}$ )	$m_{class}$	$B_p$	$d_{disp}$ ( $\mu\text{m}$ )	$m_{disp}$	$R^2$
6	63,37	2,21	0,26	40,04	0,82	0,9979
8	49,09	1,98	0,38	33,70	1,00	0,9986
10	43,22	1,97	0,46	28,85	1,02	0,9977

### 4.3 - Implementação do *software* HydroSIM

A seguir serão apresentados os principais elementos no desenvolvimento do *software* HydroSIM, assim como uma breve explicação de seu funcionamento e de como o sistema interage com o usuário final.

Cabe ressaltar que, mesmo tendo todas as suas funções principais plenamente operantes, algumas funções auxiliares (como exemplo as funções de arquivamento e recuperação de sistemas) não foram implementadas e serão objeto de estudos futuros.

#### 4.3.1 - Interface gráfica

A interface gráfica do *software* HydroSIM foi desenhada a fim de permitir a fácil adaptação e entendimento dos processos modelados pelo usuário final. Para isso um *design* padrão, baseado na arquitetura do sistema operacional Windows, foi adotado na construção do ambiente principal de trabalho. Uma visualização desse ambiente, enumerando-se os principais componentes, pode ser conferida através da Figura 4.11.

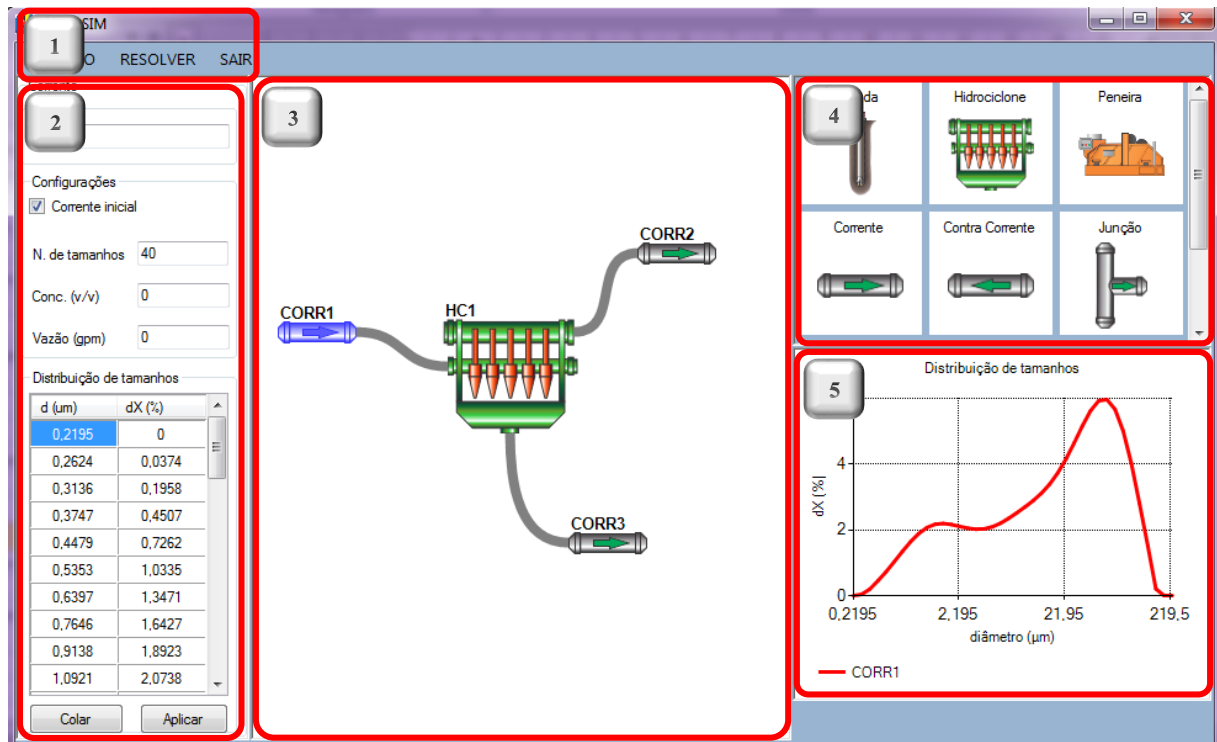


Figura 4.11 – Ambiente principal de trabalho do *software* HydroSIM.

Em que os elementos enumerados na Figura 4.11 são assim definidos:

1. Menu principal: constituído pelas seguintes opções:
  - a. Arquivo: guia contendo as opções “Abrir” e “Salvar” (não implementado);
  - b. Resolver: realiza a solução do sistema construído;
  - c. Sair: fecha o programa.
2. Gerenciador de propriedades: permite o gerenciamento das propriedades referentes ao componente selecionado, caso não haja seleção ativa, permite a configuração das propriedades gerais do sistema.
3. Área de trabalho: permite o posicionamento, seleção e visualização do sistema. Possui também funções de *zoom* e *panning* da tela.

4. Guia de adição de componentes: permite a seleção e posterior adição de novos componentes na área de trabalho.
5. Área de exibição de gráficos: apresenta os gráficos referentes aos componentes selecionados. Apresenta dois modos de exibição:
  - a. Curva de eficiência granulométrica: exibida quando um equipamento de separação (hidrociclones ou centrífugas) é selecionado na área de trabalho.
  - b. Distribuição granulométrica (frequência): exibida quando uma ou mais correntes do sistema são selecionadas na área de trabalho.

#### 4.3.2 - Componentes

Dentro do ambiente de simulação do *software* HydroSIM os componentes disponíveis para utilização podem ser agrupados em três diferentes classes: equipamentos (hidrociclones e peneiras), elementos de conexão (junções e divisores) e correntes. As representações gráficas destes componentes no ambiente do *software* podem ser visualizadas através da Figura 4.12.

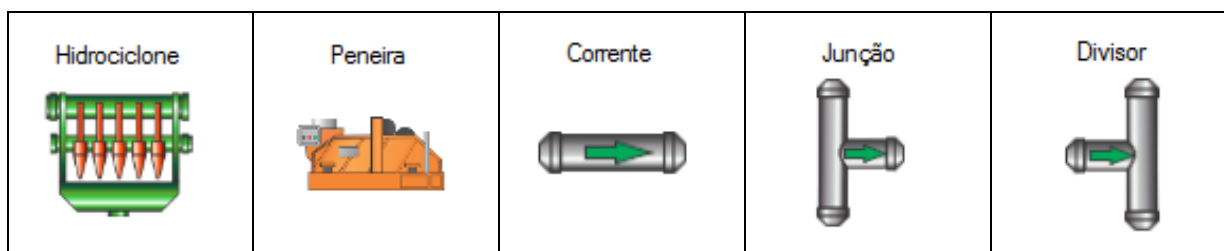


Figura 4.12 – Componentes disponíveis para utilização no ambiente do HydroSIM.

Cabe ressaltar que o componente “peneira” não se encontra completamente implementado no código de resolução, sendo assim omitido nas discussões que se seguem. Os demais componentes, assim que devidamente inseridos na área de trabalho e estando em modo de seleção ativa, apresentam, dentro da guia de propriedades, opções de configuração específicas a cada um destes. Essas opções, dentro de suas respectivas guias de propriedades, podem ser visualizadas através da Figura 4.13.

The image displays four panels from the HydroSIM software interface, each representing a different component's configuration options.

- Hidrociclone Panel:**
  - Nome:** HC1
  - Conexões:** Entrada, Underflow, Overflow (dropdown menus).
  - Configurações:**
    - Família:** Rietema (dropdown)
    - Dc (cm):** 5, **Du (cm):** 1, **dP (psi):** 50
    - Q (gpm):** 0.3, **Split Ratio:** 0.3, **Bp:** 0.4
    - dclass (um):** 50, **mclass:** 2
    - ddisp (um):** 5, **mdisp:** 1
    - Aplicar** button
  - Dados:**
    - d50':** 0  $\mu\text{m}$
    - Ef. T.:** 0 %
    - Nº Hid.:** 0
- Corrente Panel:**
  - Nome:** CORR1
  - Configurações:**
    - ☐ Corrente inicial
    - N. de tamanhos:** (input field)
    - Conc. (v/v):** 0
    - Vazão (gpm):** 0
  - Distribuição de tamanhos:**

d (um)	dX (%)
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

    - Colar** and **Aplicar** buttons
- Divisor Panel:**
  - Nome:** DIVISOR1
  - Conexões:** Entrada, Saida Sup, Saida Inf (dropdown menus)
  - Parâmetro de divisão:**
    - ☒ Fração de divisão: Sup/Entr 0.5
    - ☐ Razão de divisão: Sup/Inf 2
- Junção Panel:**
  - Nome:** JUNÇÃO1
  - Conexões:** Entrada Sup, Entrada Inf, Saida (dropdown menus)

Figura 4.13 – Guia de propriedades dos componentes do *software* HydroSIM.

As funcionalidades de cada uma das opções apresentadas na Figura 4.13, com exceção do sistema de conexões (que se será apresentado mais adiante), são apresentadas nos tópicos que se seguem, subdivididas conforme o componente a que fazem referência:

#### 4.3.2.1 - Hidrociclones

Dentro do ambiente do HydroSIM, os hidrociclones constituem-se na unidade básica de separação sólido-líquido. A metodologia implementada para determinação das curvas de eficiência desses equipamentos se fundamenta na modelagem proposta por Massarani (2001), estando disponíveis as famílias Rietema e Bradley para utilização.

A seleção de uma das opções de família de hidrociclone, tanto Rietema quanto Bradley, permite ao usuário a especificação dos parâmetros diâmetro de *underflow* ( $D_u$ ), diâmetro da região cilíndrica ( $D_c$ ) e queda de pressão ( $-\Delta P$ ).

Especificados esses parâmetros, a sequência de cálculos para a obtenção da curva de eficiência granulométrica do equipamento se faz através das Equações 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13.

$$v_c = \left[ 2 \frac{(-\Delta P)}{\rho \cdot \beta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

$$R_L = A \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^B \quad (4.11)$$

$$\frac{d'_{50}}{D_c} = K \left( \frac{\mu D_c}{Q(\rho_{sol} - \rho_{liq})} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{(1 + 1,73 R_L)} \exp(4,5 c_{v,e}) \quad (4.12)$$

$$G'(d) = 1 - \exp \left[ - \left( 0,88 \frac{d}{d'_{50}} \right)^{2,35} \right] \quad (4.13)$$

Em que o termo  $c_{v,e}$  representa a concentração volumétrica de sólidos na alimentação do hidrociclone “e”. Os termos  $A$ ,  $B$ ,  $K$  e  $\beta$  diferem entre as famílias Rietema e Bradley, sendo seus valores apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Parâmetros para modelagem dos hidrociclones das famílias Rietema e Bradley (Massarani, 2001).

Família	$A$	$B$	$K$	$\beta$
Rietema	145	4,75	0,039	1200
Bradley	54,6	2,61	0,016	7000

Além da opção de seleção da família específica ao qual o hidrociclone faz parte, o *software* HydroSIM permite a utilização de um modelo personalizado de curva de eficiência granulométrica. Nesse modo, a guia de propriedades permite que sejam especificadas a vazão de alimentação do equipamento, o *split ratio*, e os parâmetros para ajuste da curva de eficiência granulométrica ( $d_{class}$ ,  $m_{class}$ ,  $d_{disp}$ ,  $m_{disp}$  e  $B_p$ ), de acordo com a Equação 2.19.

#### 4.3.2.2 - Junções e divisores de fluxo

Esses elementos consistem de simples auxiliares na montagem dos sistemas de escoamento, permitindo tanto a união quanto separação de correntes existentes. As junções, pela sua própria natureza, não exigem nenhuma configuração além da definição das conexões presentes na mesma. Já o elemento de divisão de fluxo, permite que seja fixada a fração volumétrica de fluido direcionada a cada uma de suas correntes saídas.

#### 4.3.2.3 - Correntes

Correntes consistem no elemento básico de conexão dentre diferentes equipamentos ou elementos de conexão. Elas representam, dentro do ambiente de resolução do HydroSIM, o componente que comporta os principais resultados obtidos pela simulação, sendo a base para montagem das matrizes do resolvidor linear atualmente implementado.

O componente corrente, ao ser adicionado ao ambiente de trabalho, permite inicialmente apenas uma única opção: a marcação da mesma como corrente inicial. Essa opção permite a definição de uma, e tão somente uma corrente base para os cálculos do sistema construído.

A corrente definida como corrente inicial, assim que criada, permite a personalização das seguintes características (definidas pelo subscrito *in*) e apresentadas através da Figura 4.13:

- Número de tamanhos ( $n_t$ ): define o número de faixas de tamanho da distribuição diferencial granulométrica dos sólidos presentes na referida corrente. Essa opção é automaticamente preenchida quando uma distribuição é importada para o *software*;
- Concentração de sólidos ( $c_{v,in}$ ): permite a definição da concentração volumétrica de alimentação da corrente;
- Vazão volumétrica ( $Q_{in}$ ): define a vazão volumétrica da corrente em galões por minuto;
- Guia de distribuição granulométrica: permite a configuração da distribuição granulométrica de frequência dos sólidos [ $\Delta X_{in}(d)$ ] presente na corrente inicial. A definição manual da distribuição requer a prévia definição do número de diâmetros presente na mesma. Os valores podem também ser importados da área de transferência

por meio do botão “Colar”. Por fim, o botão “Aplicar” permite a aplicação da distribuição à corrente selecionada.

#### 4.3.3 - Sistema de conexões

O sistema de conexões implementado no *software* HydroSIM permite, de modo fácil e didático, a união de todos os componentes adicionados na área de trabalho. A definição de uma conexão é realizada através da guia de propriedades do componente (equipamento, divisor ou junção), onde é possível a especificação das correntes conectadas a cada uma das entradas/saídas do referido componente.

A Figura 4.13 apresenta as possibilidades de conexão para cada um dos componentes disponíveis no ambiente do HydroSIM.

#### 4.3.4 - Resolvedor

A resolução dos sistemas construídos dentro do ambiente do *software* HydroSIM se baseia na resolução do conjunto de equações, obtido com base nas características e conexões especificadas para cada um dos equipamentos ativos no sistema.

As variáveis contidas nesse conjunto de equações, definidas para cada uma das correntes presentes no sistema (enumeradas pelo subscrito  $k$ , onde  $k = 1 \dots (n_c - 1)$ ), são listadas a seguir.

- $\Delta Q_k(d)$  : define a vazão de sólidos na corrente  $k$  que possuem um diâmetro médio de partícula igual a  $d$  ;
- $Q_k$  : vazão volumétrica da corrente  $k$  ;
- $c_{v,k}$  : define a concentração volumétrica de sólidos presentes na corrente  $k$  . Depende diretamente das duas variáveis apresentadas acima, de acordo com a Equação 4.14.

$$c_{v,k} = \frac{\sum_d \Delta Q_k(d)}{Q_k} \quad (4.14)$$

O número total de variáveis, e consequentemente equações a serem resolvidas, pode ser enfim definido pela Equação 4.15.



$$\text{Número de equações} = (2 + n_t)(n_c - 1) \quad (4.15)$$

Como apresentado anteriormente, a determinação da curva de eficiência de um hidrociclone depende diretamente da concentração de sólidos da corrente de alimentação do mesmo. Dessa forma, quando realizada a análise de sistemas contendo um ou mais ciclos de correntes, obtém-se um sistema de equações não-lineares, o que exige, para sua devida resolução, uma metodologia mais complexa do que aquelas tradicionalmente empregados em sistemas lineares.

Para contornar esse problema, optou-se pelo desacoplamento entre a concentração de sólidos das correntes que alimentam os hidrociclones ( $c_{v,k,e}$ ) e a concentração utilizada para a determinação das curvas de eficiência dos mesmos ( $c_{v,e}$ ). Dessa forma, fixou-se o valor das concentrações  $c_{v,e}$  para cada um dos equipamentos, possibilitando assim, a obtenção de um sistema de equações lineares, facilmente resolvidas por inversão matricial.

Após a resolução do sistema linear, as concentrações das correntes de alimentação ( $c_{v,k,e}$ ) são comparadas às concentrações dos equipamentos ( $c_{v,e}$ ) de acordo com a Equação 4.16.

$$\Delta c > |c_{v,e} - c_{v,k,e}| \quad (4.16)$$

Em que  $\Delta c$  consiste na tolerância para variação de concentração, definida por padrão como  $10^{-4}$ .

O não atendimento da condição imposta pela Equação 4.16 para todos os equipamentos de separação ativos no sistema, resulta na atualização das concentrações dos equipamentos ( $c_{v,e} = c_{v,k,e}$ ) e conseqüentemente das curvas de eficiência destes. O resolvidor entra então, em um ciclo, que só se interrompe quando todos os equipamentos atendam a condição imposta pela Equação 4.16.

O funcionamento do resolvidor acima descrito, pode ser melhor elucidado através do fluxograma contido na Figura 4.14.

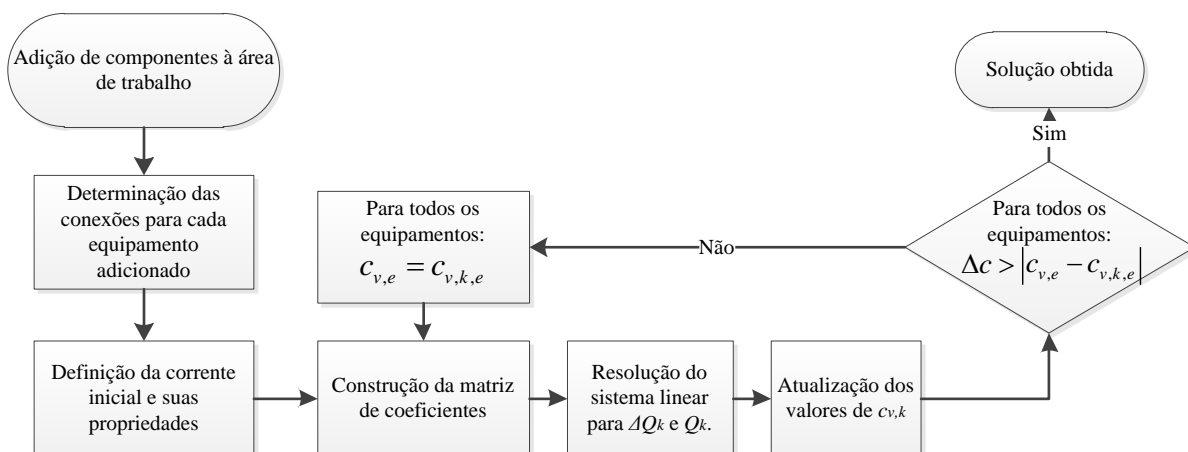


Figura 4.14 – Fluxograma de funcionamento do *software* HydroSIM.

Assim que uma solução é obtida pelo resolvidor, todos os resultados ficam disponíveis para visualização através das guias de propriedades de cada uma das correntes do sistema. Além disso, as guias de propriedades dos hidrociclones passam a exibir os resultados de eficiência, *split ratio* e diâmetro de corte obtidos para cada um destes.

#### 4.4 - Estudo da operação do hidrociclone ótimo em série

Os resultados obtidos com auxílio do *software* HydroSIM para as 9 configurações selecionadas no estudo de operação seriada, são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados obtidos para as configurações em série.

Configuração	Hidrociclone 1	Hidrociclone 2	$S$ (%)	$R_c$ (%)	$\eta$ (%)	$N$
1	OT8	-	40,47	24,42	55,01	154
2	OT6	-	32,17	23,98	48,44	156
3	OT4	-	18,49	19,77	34,61	158
4	OT8	OT8	16,38	21,14	34,06	216
5	OT8	OT6	13,02	20,12	30,52	204
6	OT8	OT4	7,48	16,61	22,85	183
7	OT6	OT6	10,35	19,09	27,46	206
8	OT6	OT4	5,95	15,75	20,76	185
9	OT4	OT4	3,42	13,17	16,14	187

Em que  $N$  consiste no número total de equipamentos necessários para processar um total de 1200 gpm de fluido, vazão essa necessária durante o ápice do processo de perfuração, de acordo com o esquema apresentado na Figura 3.7.

Os resultados de redução na concentração de sólidos no *overflow* ( $R_c$ ) e *split ratio* ( $S$ ) apresentados na tabela acima estão representados graficamente através da Figura 4.15.

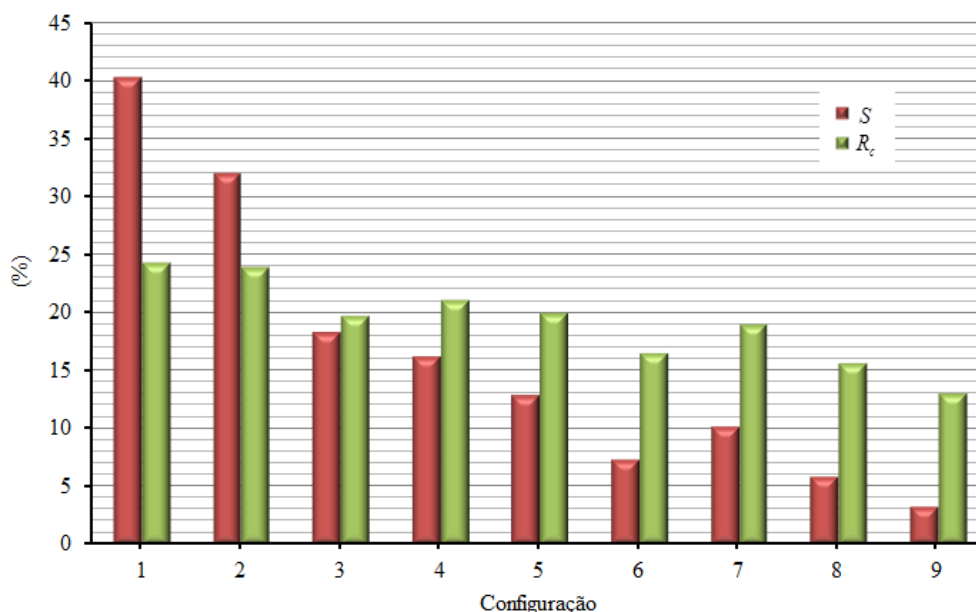


Figura 4.15 – Resultados obtidos para as diferentes configurações de hidrociclones.

A Figura 4.15 mostra que a operação individual dos hidrociclones (configurações 1, 2 e 3) conseguiu proporcionar uma maior redução no teor de sólidos da corrente clarificada. No entanto, essa eficiência é seguida diretamente por elevadas taxas de perda de líquido.

Com relação às configurações seriadas, pôde-se observar uma redução expressiva no *split ratio*, sem com que, no entanto, houvesse uma redução na eficiência do processo. Essa melhoria da relação eficiência/*split ratio* foi claramente contrabalanceada pelo custo de operação das baterias em série. Segundo os dados apresentados na Tabela 4.6, a operação dos hidrociclones em série necessita de um número total de equipamentos cerca de 30% superior à operação individual. Esse aumento impacta diretamente sobre os custos de bombeamento de fluido e alocação de espaço na sonda, além de exigir a instalação de no mínimo um par de bombas para o funcionamento das 2 baterias.

É importante ressaltar que o diâmetro do *underflow*, mesmo sendo uma variável de construção do hidrociclone, pode ser facilmente trocado durante a operação em campo,

tornando-o assim, uma variável de operação extremamente importante na flexibilização da operação do equipamento.

Essa flexibilidade, claramente observada através da Figura 4.15, permite a operação dos equipamentos nas mais diversas fases de perfuração, servindo de apoio ao funcionamento das centrífugas decantadoras.

Observando-se novamente a Figura 3.7 pode-se perceber a necessidade de que a bateria de hidrociclones empregada apresente um *split ratio* que oscile na faixa de 10% a 27%, sendo assim possível a operação a vazões de alimentação entre 450-1200 gpm ao mesmo tempo em que a centrífuga tem 100% de sua capacidade aproveitada.

Essa necessidade é claramente atendida pelas configurações 7, 5, 4, 3 e 2, onde nessa ordem fornecem divisões de fluxo na faixa de 10-32%, o que atende plenamente a demanda observada, possibilitando ao mesmo tempo uma redução na concentração de sólidos do fluido tratado na faixa de 19-24%.

Obviamente a utilização de diâmetros de *underflow* diferentes daqueles empregados nesse estudo é completamente possível, permitindo dessa forma um conjunto de combinações de *split ratio* e recuperação de sólidos mais adequado as peculiaridades de cada processo. No entanto, deve-se ter cuidado na utilização de diâmetros de *underflow* reduzidos devido ao risco de entupimento deste orifício (*plugging*), principalmente em operações que envolvam altas concentrações de sólido.

---

## CAPÍTULO 5 - Conclusões

---

A seguir são apresentadas as conclusões obtidas através dos resultados apresentados nesse trabalho, incluindo os estudos de otimização, análise do hidrociclone ótimo em condições de campo e, por fim, a simulação de seu funcionamento em série.

### 5.1 - Estudo dos efeitos de variáveis geométricas e operacionais

- Através do estudo paramétrico do hidrociclone foi possível a obtenção de expressões empíricas correlacionando as respostas de interesse ( $\eta$ ,  $R_L$  e  $W_a$ ) com as variáveis geométricas e operacionais selecionadas para o estudo ( $L_c$ ,  $L_v$ ,  $\theta$ ,  $D_u$  e  $P$ );
- Essas mesmas expressões, apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,95, indicando que as mesmas descrevem com exatidão os efeitos das variáveis nelas contidas;
- Os resultados mostraram que, mesmo que em menor proporção, todas as variáveis tiveram efeito significativo sobre as respostas selecionadas. Nesse cenário, o diâmetro do *underflow* foi sem dúvida a variável com efeito mais significativo, e por esse motivo, aliado ao fato de ser uma condição geométrica de fácil alteração durante a operação, que optou-se por tratá-lo como uma variável de operação, sendo seu efeito analisado nos estudos que se seguiram.

### 5.2 - Estudo de otimização

- A partir das correlações obtidas no estudo dos efeitos das variáveis geométricas e operacionais, foi possível, através de um algoritmo iterativo de otimização, a obtenção de uma geometria ótima. Os seguintes valores foram obtidos para as variáveis

operacionais e geométricas na condição ótima:  $\theta = 6^\circ$ ,  $L_v / D_c = 0,375$ ,  $L_c / D_c = 1,07$ , e  $P = 55 \text{ psi}$ ;

- Essa configuração geométrica, além de apresentar alto nível de eficiência (81-89%), apresentou valores reduzidos de *split ratio* (7-38%). Essas características mostram que o equipamento possui desempenho realmente superior às demais configurações estudadas;
- A avaliação dos resultados obtidos para o hidrociclone ótimo frente àqueles previstos pelas expressões empíricas obtidos mostrou que as correlações propostas foram capazes de descrever e prever com exatidão (dentro de suas faixas de confiança) os resultados dos testes experimentais;

### 5.3 - Estudo com fluido pseudoplástico

- Os resultados obtidos no estudo do hidrociclone ótimo operando com fluido pseudoplástico possibilitou a obtenção de expressões empíricas correlacionando as variáveis de interesse ( $\eta$ ,  $R_L$ ,  $W_a$  e  $d_{50}$ ) com as variáveis geométricas e operacionais selecionadas para o estudo ( $C_{cmc}$ ,  $C_{sól}$  e  $D_u$ );
  - Essas mesmas expressões, apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,99, indicando que as mesmas descreveram com exatidão os efeitos das variáveis nelas contidas;
  - Pôde-se perceber através dessas correlações que a concentração de sólidos pouco afetou as variáveis de resposta estudadas. De outra forma, as características reológicas do fluido (dada pela concentração de CMC) e o diâmetro do *underflow*, mostraram-se altamente significativas às respostas selecionadas;
  - As curvas de eficiência granulométrica foram levantadas para todas as condições avaliadas no presente estudo. Essas curvas foram ferramentas importantes na determinação do desempenho do hidrociclone ótimo operando com material sólido diferente daquele utilizado nos testes experimentais (borra de centrífuga);
- As grades de eficiência obtidas evidenciaram a existência do efeito *fish-hook* nos resultados obtidos.

## 5.4 - Implementação do *software* HydroSIM

- O *software* HydroSIM foi devidamente implementado, permitindo ao usuário a construção de sistemas de controle de sólidos de forma customizada;
- Foram implementadas a modelagem das famílias de hidrociclones Rietema e Bradley, além da opção de inserção de um modelo personalizado, que permite inclusive a simulação utilização de curvas de eficiência granulométrica com a existência do efeito *fish-hook*;
- Um resolvidor híbrido foi desenvolvido para utilização em sistemas não-lineares. Para isso um método envolvendo a solução de sistemas lineares por inversão matricial foi acoplado a um processo iterativo para solução da concentração nos hidrociclones.

## 5.5 - Estudo de operação em série

- O estudo da operação dos equipamentos com material advindo da alimentação das centrífugas decantadoras ao mesmo tempo em que operavam em baterias seriadas, permitiu uma visão mais próxima do que aconteceria se esses equipamentos fossem empregados em campo;
- Os resultados obtidos mostraram que a utilização dos equipamentos em série permite grande flexibilidade de operação, podendo-se trabalhar com divisões de fluxo que variam na faixa de 13-40%, enquanto que o nível de redução de sólidos na corrente clarificada oscila entre 13-24%;
- As configurações de hidrociclones 7, 5, 4, 3 e 1 (OT6→OT6, OT8→OT6, OT8→OT8, OT4 e OT8) foram selecionadas como ideais para a operação na situação proposta, onde obteve-se divisões de fluxo de 10-32%, ao mesmo tempo em que promovem uma redução na concentração de sólidos do fluido tratado na faixa de 19-24%.
- Os resultados citados anteriormente mostraram ser tecnicamente possível a utilização dos hidrociclones em série ou individualmente no apoio das centrífugas decantadoras, sendo estes capazes de atender as necessidades de capacidade e divisão de fluxo durante todo o processo de perfuração, promovendo uma redução de em média 22% na concentração de sólidos do fluido reinjetado ao poço.

## 5.6 - Sugestões para trabalhos futuros

A partir da experiência obtida durante a realização dos estudos nesse trabalho, são apresentadas a seguir uma série de sugestões para estudos futuros no campo que tange o presente trabalho:

- Tendo em vista que diversas variáveis geométricas tiveram efeitos reduzidos sobre o desempenho dos hidrociclones testados, seria interessante a substituição destas por outras que apresentassem efeitos mais significativos. Dentre elas pode-se sugerir o diâmetro do duto de alimentação e/ou *overflow*, além também do diâmetro característico do equipamento, o que possibilitaria o *scale-up* de acordo com a aplicação desejada.
- Os resultados com fluido pseudoplástico, mesmo que obtidos de modo reproduzir fielmente as condições de campo, podem não representar com exatidão o que ocorre em um sistema de controle de sólidos real. Dessa forma, sugere-se a realização de um estudo em campo com os equipamentos otimizados, a fim não só de validar os resultados obtidos nesse estudo, como também averiguar a viabilidade para utilização dos mesmos em campo.



---

## CAPÍTULO 6 - Referências bibliográficas

---

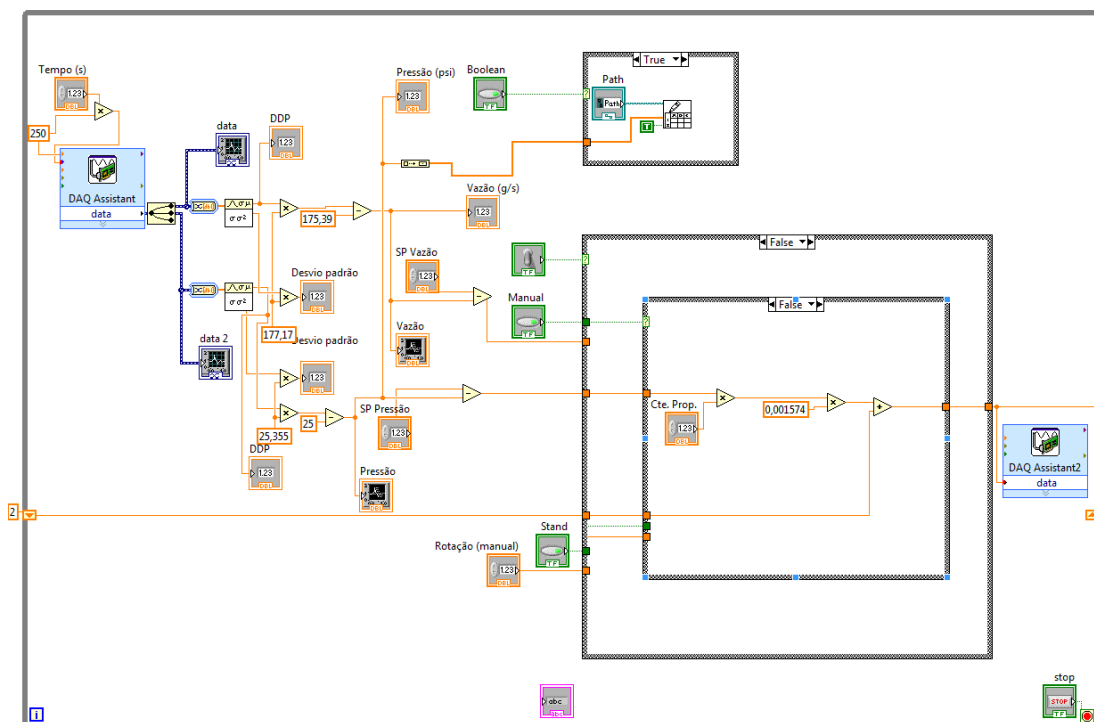
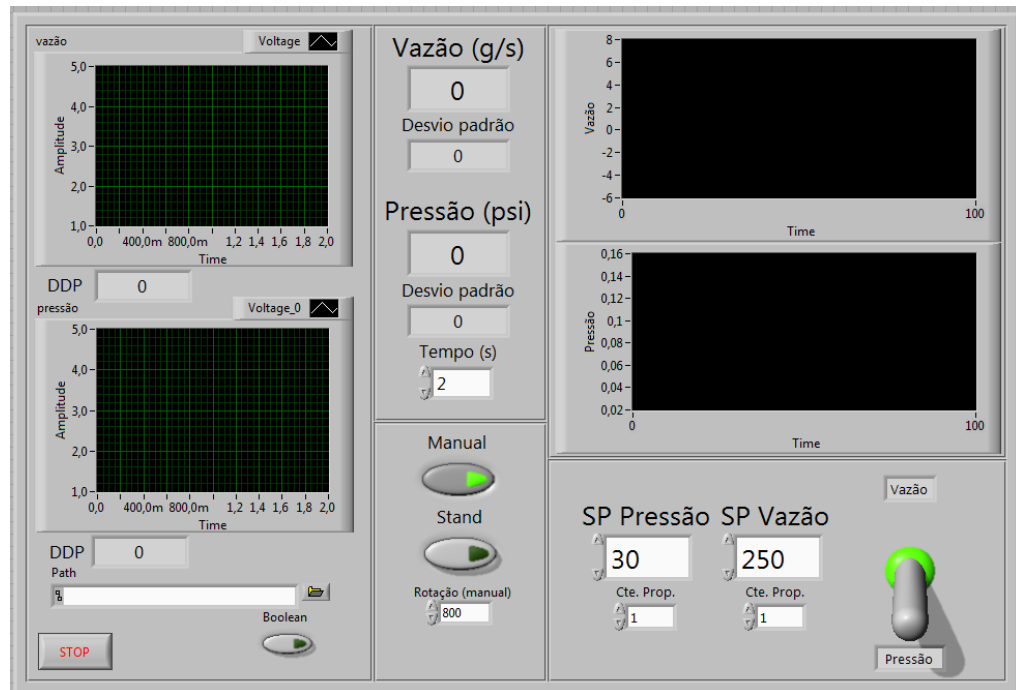
- AUSTIN, L. G.; KLIMPEL, R. R.; LUCKIE, P. T. Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling, SME of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, 1984.
- BERGSTROM, J., VOMHOFF, H. Experimental hydrocyclone flow field studies. Separation and Purification Technology 53, 2007, 8–20.
- BICALHO, I. C., MOGNON, J. L., SHIMOYAMA, J., ATAÍDE, C. H., DUARTE, C. R. Separation of yeast from alcoholic fermentation in small hydrocyclones. Separation and Purification Technology 87, 2012, 62–70.
- BOURGEOIS, F., MAJUMDER, A. K. Is the fish-hook effect in hydrocyclones a real phenomenon?, Powder Technology 237, 2013, 367-375.
- BRADLEY, D. The Hydrocyclone, Pergamon, Oxford, 1965.
- CHU, L. Y., CHEN, W. M., LEE, X. Effect of structural modification on hydrocyclone performance. Separation and Purification Technology 21, 2000, 71-86.
- CHU, L. Y., CHEN, W.M., LEE, X. Enhancement of hydrocyclone performance by controlling the inside turbulence structure. Chemical Engineering Science 57, 2002, 207-212.
- CHU, L. Y., CHEN, W. M., YU, W., WANG, G. J., ZHOU, X. T., DAI, G. Q. Enhancement of hydrocyclone separation performance by eliminating the air core. Chemical Engineering and Process 43, 2004, 1441-1448.
- CILLIERS, J. J.; HARRISON, S. T. L. The application of mini-hydrocyclones in the concentration of yeast suspensions, Chem. Eng. J. 65 (1997) 21–26.
- CRUZ, O. C. Desempenho de um hidrociclone de geometria Rietema como pré-filtro para sistemas de irrigação. Tese de Doutorado em Agronomia – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal, SP, 2008.
- DEL VILLAR, R.; FINCH, J. A. Modelling the cyclone performance with a size dependent entrainment factor, Miner. Eng. 5 (1992) 661–669.
- DUECK, J., FARGHALY, M., NEESSE, T. The theoretical partition curve of the hydrocyclone, Minerals Engineering (Article in Press).

- ENDRES, E., DUECK, J., NEESSE T. Hydrocyclone classification of particles in the micron range. *Minerals Engineering* 31, 2012, 42-45.
- EVANS W. K., SUKSANGPANOMRUNG A., NOWAKOWSKI A. F. The simulation of the flow within a hydrocyclone operating with an air core and with an inserted metal rod, *Chemical Engineering Journal* 143 , 2008, 51–61.
- FLINTHOFF, B. C.; PLITT, L. R.; TURAK, A. A. Cyclone modelling a review of present technologies. *CIM Bull.* September, 1987, 39–50 e 114-123.
- GHODRAT, M., KUANG, S. B., YU, A. B., VINCE, A., BARNETT, G. D., BARNETT, P. J. Numerical analysis of hycrocyclones with different conical section designs. *Minerals Engineering* (Article in Press).
- HARARAH, M. A., ENDRES, E., DUECK, J., MINKOV, L., NEESSE, T. Flow conditions in the air core of the hydrocyclone, *Minerals Engineering* 23, 2010, 295–300
- HODOUIN, D.; CARON, S.; GRAND, J. J. Modelling and simulation of a hydrocyclone desliming unit. 1st World Congress on Particle Technology, Nurnberg, Part IV, 1986, pp. 507–522.
- HWANG, K. J., HWANG, Y. W., YOSHIDA, H., SHIGEMORI, K. Improvement of particle separation efficiency by installing conical top-plate in hydrocyclone. *Powder Technology* 232, 2012, 41-48.
- HWANG, K. J., HWANG, Y. W., YOSHIDA, H. Design of novel hydrocyclone for improving fine particle separation using computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Science* 85, 2013, 62-68.
- LEE, M. S., WILLIAMS, R.A. Performance characteristics within a modified hydrocyclone. *Minerals Engineering*, Vol. 6, No 7, 1993, 743-751.
- KAWATRA, S.K., BAKSHI, A.K., RUSESKEY, M.T. Effect of viscosity on the cut size oh hydrocyclone classifiers. *Minerals Engineering*, Vol. 9, No. 9, 1996, 881-891.
- KASHIWAYA, K., NOUMACHI, T., HIROYOSHI, N., ITO, M., TSUNEKAWA, M. Effect of particle shape on hydrocyclone classification. *Powder Technology* 226, 2012, 147-156.
- KELLY, E. G., SPOTTISWOOD, D. J. *Introduction to Mineral Processing*, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- KELSALL, D. F. A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone, *Trans. Inst. Chem. Eng.* 30, 1952, 87–108.
- KRAIPECH, W., CHEN, W., PARMA, F. J., DYAKOWSKI, T. Modelling the fish-hook effect of the flow within hydrocyclones. *International Journal of Mineral Processing* 66, 2002, 49-65.

- MARTÍNEZ, L. F., LAVÍN, A. G., MAHAMUD, M. M., BUENO, J. L. Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation. *Chemical Engineering and Processing* 47, 2008, 192–199.
- MASSARANI, G., *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. 2ª Edição. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.
- MURTHY, Y. R., BHASKAR, K. U. Parametric CFD studies on hydrocyclone. *Powder Technology* 230, 2012, 36-47.
- NAGESWARARAO, K. A critical analysis of the fish hook effect in hydrocyclone classifiers, *Chemical Engineering Journal* 80, 2000, 251–256.
- NEESSE, T., DUECK, J. Air core formation in the hydrocyclone. *Journal of Minerals Engineering* 20, 2007, 349–354.
- NENU, R. K. T., YOSHIDA, H., Comparison of separation performance between single and two inlets hydrocyclones. *Advanced Powder Technology* 20, 2009, 195–202.
- NJOBUNWU, D. O., NNA, E. The effect of critical wetting agent concentration on drilling fluids performance. *Journal of Science and Technology Research* 4 (1), 2005, 65–71.
- NJOBUNWU, D. O., WOBO, C. A. Effect of drilled solids on drilling rate and performance. *Journal of Science and Technology Research* 55, 2007, 271-276.
- NOROOZI, S., HASHEMABADI, S. H. CFD analysis of inlet chamber body profile effects on de-oiling hydrocyclone efficiency. *Chemical Engineering Research and Design* 89, 2011, 968-977.
- REN, L., MENG, J., LEI, Z., WANG, J., Fluid Dynamic and Mechanical & Electrical Control Engineering. *Applied Mechanics and Materials* 233, 2012, 7-10.
- RIETEMA, K., Performance and design of hydrocyclones IV: Design of hydrocyclones, *Chem. Eng. Sci.* 15 (1961), 320–325.
- SCHEID, C. M., CALÇADA, L. A., GONÇALVES, R. S. A., An Investigation of the Behavior of a Classifying Hydrocyclone with Pseudoplastic Fluids. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 3, No. 4, 2013, 781-791.
- SCHUBERT, H., Which demands should and can meet a separation model for hydro-cyclone classification? *International Journal of Mineral Processing* 96 (2010) 14 - 26.
- SRIPRIYA, R., SURESH, N., CHANDRA, S., BHATACHARJEE, D., The effect of diameter and height of the inserted rod in a dense medium cyclone to suppress the air core. *Minerals Engineering* 42, 2013, 1- 8.
- SVAROVSKY, L. *Hydrocyclones*. Technomic Publishing Co., Inc., 1984.
- SVAROVSKY, L. *Solid-Liquid Separation*, 3rd Edn. Butterworths, London, 1990.
- SVAROVSKY, L. *Solid-Liquid Separation*, 4rd Edn. Butterworths, London, 2000.

- THOMAS, J. E. Fundamentos de engenharia de petróleo, 2ª Edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2001.
- VIEIRA, L. G. Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes. Tese de doutorado em Engenharia Química – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- VIEIRA, L. G. M., DAMASCENO, J. J. R., BARROZO, M. A. S. Improvement of hydrocyclone separation performance by incorporating a conical filtering wall. Chemical Engineering and Processing 49, 2010, 460-467.
- ZHAO, L., JIANG, M., XU, B., ZHU, B. Development of a new type high-efficient inner-cone hydrocyclone. Chemical Engineering Research and Design 90, 2012, 2129-
- YAMAMOTO, K., JIAO, X. Hydrocyclone with a perforated inner cylinder, Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu B 63 (615) (1997) 3623–3628.
- YANG, Q., LI, Z., LV, W., WANG, H. On the laboratory and field studies of removing fine particles suspended in wastewater using mini-hydrocyclone. Separation and Purification Technology 110, 2013, 93–100
- WILLS, B. A. An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, 6th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997.
- WILLS, B. A., NAPIER-MUNN, T. Wills' Mineral Processing Technology, Seventh ed. Butterworth-Heinemann, Boston, 2006.

## APÊNDICE A – Interface gráfica e diagrama de blocos do sistema de controle utilizado



## APÊNDICE B - Distribuição granulométrica da rocha fosfática utilizada.

Diâmetro médio (µm)	Volume (%)
0,262	0,0349
0,314	0,1872
0,375	0,4378
0,448	0,7078
0,535	1,0097
0,640	1,3179
0,765	1,6082
0,914	1,8556
1,092	2,0383
1,305	2,1445
1,560	2,1771
1,864	2,1550
2,228	2,1067
2,663	2,0604
3,183	2,0365
3,804	2,0490
4,546	2,1062
5,433	2,2084
6,494	2,3469
7,761	2,5075
9,276	2,6808
11,086	2,8712
13,249	3,0950
15,835	3,3718
18,925	3,7191
22,618	4,1448
27,032	4,6360
32,307	5,1493
38,612	5,6084
46,147	5,9134
55,153	5,9617
65,916	5,6778
78,780	5,0406
94,154	4,0937
112,528	2,9236
134,488	1,6624
160,733	0,3508
192,101	0,0039
0,262	0,0349

## APÊNDICE C – Distribuição granulométrica do cascalho.

Diâmetro médio (µm)	Volume (%)
0,313	0,000
0,364	0,000
0,424	0,009
0,494	0,121
0,576	0,179
0,671	0,242
0,781	0,311
0,910	0,383
1,060	0,457
1,235	0,533
1,439	0,609
1,677	0,686
1,953	0,767
2,276	0,856
2,651	0,959
3,089	1,087
3,598	1,249
4,192	1,457
4,884	1,723
5,689	2,056
6,628	2,463
7,722	2,944
8,996	3,490
10,480	4,082
12,210	4,693
14,224	5,278
16,571	5,786
19,305	6,158
22,491	6,345
26,202	6,316
30,525	6,071
35,562	5,638
41,429	5,075
48,265	4,458
56,229	3,858
65,507	3,331
76,315	2,890
88,907	2,504
103,577	2,108
120,667	1,610

## APÊNDICE D – Resultados obtidos nos experimentos de otimização

$\bar{L}_c$	$\bar{\theta}$	$\bar{L}_v$	$\bar{D}_u$	$\bar{P}$	$W_u$ (g/s)	$W_o$ (g/s)	$W_a$ (g/s)	$cw_u$	$cw_o$	$cw_a$	$R_L$ (%)	$\eta$ (%)
-1	-1	-1	-1	-1	54,13	379,68	433,81	0,1004	0,0038	0,0159	11,41	78,95
-1	-1	-1	-1	1	58,94	425,40	484,33	0,1044	0,0036	0,0159	11,07	79,89
-1	-1	-1	1	-1	111,16	328,77	439,93	0,0518	0,0035	0,0157	24,34	83,16
-1	-1	-1	1	1	121,29	366,37	487,66	0,0551	0,0034	0,0163	23,89	84,17
-1	-1	1	-1	-1	53,88	379,31	433,20	0,1010	0,0038	0,0159	11,36	79,23
-1	-1	1	-1	1	58,89	423,21	482,10	0,1053	0,0036	0,0160	11,11	80,47
-1	-1	1	1	-1	114,06	325,21	439,27	0,0516	0,0032	0,0157	26,02	84,08
-1	-1	1	1	1	130,40	362,28	492,68	0,0529	0,0030	0,0158	25,61	85,16
-1	1	-1	-1	-1	50,87	390,45	441,32	0,1097	0,0039	0,0161	10,43	78,50
-1	1	-1	-1	1	54,19	435,84	490,04	0,1159	0,0038	0,0162	9,94	79,14
-1	1	-1	1	-1	103,89	342,89	446,77	0,0571	0,0037	0,0161	22,28	82,35
-1	1	-1	1	1	114,26	382,56	496,83	0,0606	0,0036	0,0167	21,97	83,60
-1	1	1	-1	-1	49,62	379,75	429,37	0,1106	0,0038	0,0162	10,45	78,98
-1	1	1	-1	1	53,81	423,05	476,87	0,1162	0,0037	0,0164	10,14	79,99
-1	1	1	1	-1	104,59	326,58	431,16	0,0552	0,0034	0,0160	23,29	83,95
-1	1	1	1	1	114,36	366,80	481,16	0,0578	0,0033	0,0162	22,76	84,65
1	-1	-1	-1	-1	64,97	397,69	462,65	0,0881	0,0037	0,0156	13,01	79,35
1	-1	-1	-1	1	68,91	434,43	503,34	0,0932	0,0037	0,0159	12,61	80,18
1	-1	-1	1	-1	121,84	335,65	457,49	0,0491	0,0036	0,0157	25,73	83,26
1	-1	-1	1	1	132,93	373,87	506,80	0,0514	0,0035	0,0161	25,29	83,94
1	-1	1	-1	-1	62,80	387,73	450,53	0,0913	0,0037	0,0159	12,87	79,91
1	-1	1	-1	1	68,34	435,01	503,35	0,0959	0,0036	0,0161	12,48	80,73
1	-1	1	1	-1	126,23	330,71	456,93	0,0500	0,0035	0,0163	26,68	84,45
1	-1	1	1	1	138,81	375,46	514,28	0,0516	0,0034	0,0164	26,03	84,83
1	1	-1	-1	-1	63,92	374,89	438,81	0,0879	0,0040	0,0162	13,51	79,06
1	1	-1	-1	1	69,74	423,57	493,31	0,0910	0,0038	0,0162	13,06	79,57
1	1	-1	1	-1	114,66	332,55	447,21	0,0531	0,0035	0,0163	24,68	83,81
1	1	-1	1	1	124,96	373,40	498,36	0,0551	0,0034	0,0164	24,09	84,33
1	1	1	-1	-1	56,87	376,99	433,86	0,0957	0,0037	0,0158	12,04	79,44
1	1	1	-1	1	63,18	420,23	483,41	0,0969	0,0036	0,0158	11,99	80,25
1	1	1	1	-1	105,63	329,70	435,33	0,0531	0,0036	0,0156	23,34	82,72
1	1	1	1	1	116,50	369,01	485,51	0,0554	0,0034	0,0159	23,03	83,53
-2	0	0	0	0	85,27	352,73	438,00	0,0669	0,0033	0,0157	18,46	82,87
2	0	0	0	0	90,92	383,81	474,73	0,0685	0,0036	0,0160	18,13	81,76
0	-2	0	0	0	104,36	388,82	493,18	0,0643	0,0034	0,0163	20,13	83,44
0	2	0	0	0	83,44	371,89	455,32	0,0734	0,0036	0,0164	17,26	81,93
0	0	-2	0	0	88,09	380,02	468,11	0,0727	0,0035	0,0166	17,74	82,63
0	0	2	0	0	88,85	379,10	467,96	0,0710	0,0037	0,0165	17,93	81,85
0	0	0	-2	0	39,90	414,17	454,07	0,1446	0,0038	0,0162	7,64	78,36
0	0	0	2	0	167,19	302,60	469,79	0,0364	0,0033	0,0151	34,82	85,79
0	0	0	0	-2	80,41	327,05	407,46	0,0645	0,0037	0,0157	18,76	81,10
0	0	0	0	2	97,00	406,42	503,42	0,0689	0,0034	0,0160	18,23	82,79
0	0	0	0	0	89,21	370,77	459,97	0,0653	0,0034	0,0154	18,41	82,15
0	0	0	0	0	89,12	371,41	460,53	0,0670	0,0034	0,0157	18,34	82,58
0	0	0	0	0	88,70	369,89	458,59	0,0686	0,0034	0,0160	18,31	82,74
0	0	0	0	0	89,54	369,79	459,32	0,0677	0,0036	0,0161	18,47	82,15
0	0	0	0	0	89,43	368,48	457,91	0,0655	0,0035	0,0156	18,54	81,87
0	0	0	0	0	89,57	368,82	458,39	0,0672	0,0035	0,0159	18,52	82,50
0	0	0	0	0	90,19	372,19	462,38	0,0662	0,0034	0,0157	18,50	82,32
0	0	0	0	0	88,87	370,17	459,04	0,0665	0,0035	0,0157	18,36	82,08



## APÊNDICE E – Resultados para configuração ótima operando com fluido pseudoplástico

$\bar{C}_{cmc}$	$\bar{C}_{sól}$	$\bar{D}_u$	$W_u$ (g/s)	$W_a$ (g/s)	$cw_u$	$cw_a$	$R_L$ (%)	$\eta$ (%)	$S$	$d_{50}$ (µm)
-1	-1	-1	27,4	399,6	0,0894	0,0111	6,30	55,25	6,47	17,54
-1	-1	0	78,7	405,1	0,0371	0,0111	18,92	65,25	19,09	14,05
-1	-1	1	140,4	409,8	0,0232	0,0110	33,81	72,08	33,94	10,45
-1	0	-1	33,7	408,0	0,2364	0,0360	6,54	54,24	7,09	16,12
-1	0	0	84,3	406,7	0,1103	0,0361	19,12	63,28	19,64	12,29
-1	0	1	150,9	413,9	0,0709	0,0363	35,14	71,11	35,57	8,21
-1	1	-1	38,5	420,5	0,3665	0,0611	6,18	54,96	7,16	16,00
-1	1	0	95,4	425,4	0,1727	0,0611	19,78	63,51	20,66	12,20
-1	1	1	160,2	427,6	0,1174	0,0612	35,19	71,80	35,93	7,74
0	-1	-1	40,6	433,1	0,0510	0,0120	9,00	39,93	9,12	35,22
0	-1	0	105,3	433,0	0,0263	0,0120	23,97	53,03	24,08	27,03
0	-1	1	167,4	440,4	0,0199	0,0122	37,76	62,27	37,85	17,99
0	0	-1	43,8	444,3	0,1415	0,0356	8,78	39,19	9,13	33,27
0	0	0	111,1	442,1	0,0747	0,0353	24,10	53,18	23,90	23,05
0	0	0	112,6	443,4	0,0749	0,0356	24,36	53,43	24,41	24,03
0	0	0	111,3	443,6	0,0746	0,0355	24,06	52,61	24,39	25,56
0	0	1	176,1	449,7	0,0557	0,0355	38,32	61,49	38,58	16,80
0	1	-1	43,6	446,9	0,2418	0,0589	7,86	40,04	8,48	32,78
0	1	0	111,8	443,9	0,1253	0,0590	23,40	53,49	23,98	23,11
0	1	1	176,3	448,4	0,0944	0,0590	37,87	62,99	38,36	17,89
1	-1	-1	89,5	466,2	0,0196	0,0116	19,06	32,53	19,11	56,60
1	-1	0	161,8	472,4	0,0161	0,0115	34,12	48,16	34,17	43,99
1	-1	1	197,5	474,3	0,0151	0,0115	41,50	54,97	41,55	25,70
1	0	-1	93,2	478,3	0,0614	0,0365	18,99	32,84	19,15	56,51
1	0	0	169,3	482,8	0,0519	0,0369	34,50	49,26	34,67	35,88
1	0	1	203,1	483,1	0,0487	0,0369	41,53	55,49	41,70	25,09
1	1	-1	92,0	481,4	0,1073	0,0612	18,19	33,50	18,49	53,94
1	1	0	159,3	484,9	0,0897	0,0613	31,84	48,06	32,17	37,07
1	1	1	201,4	490,5	0,0828	0,0612	40,16	55,65	40,47	27,34

## APÊNDICE F – Curvas de eficiência granulométrica para testes com fluido pseudoplástico.

Curvas de eficiência granulométrica  $\bar{C}_{cmc} = +1$

Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	Eficiência total de coleta (%)								
	$\bar{C}_{sol} = -1$			$\bar{C}_{sol} = 0$			$\bar{C}_{sol} = +1$		
	$\bar{D}_u = -1$	$\bar{D}_u = 0$	$\bar{D}_u = +1$	$\bar{D}_u = -1$	$\bar{D}_u = 0$	$\bar{D}_u = +1$	$\bar{D}_u = -1$	$\bar{D}_u = 0$	$\bar{D}_u = +1$
0,3125	15,82	25,14	39,70	23,96	35,69	40,08	27,38	40,41	49,31
0,3641	17,02	27,11	40,46	23,80	36,27	40,84	26,86	39,59	47,98
0,4242	17,72	28,30	40,77	23,63	36,38	41,16	26,59	39,09	47,16
0,4941	18,22	29,20	40,93	23,47	36,34	41,32	26,41	38,72	46,57
0,5757	18,63	29,99	41,04	23,34	36,26	41,43	26,26	38,41	46,08
0,6707	19,01	30,74	41,13	23,22	36,14	41,53	26,12	38,14	45,64
0,7813	19,36	31,48	41,22	23,11	36,02	41,61	25,97	37,87	45,23
0,9103	19,66	32,24	41,26	22,97	35,85	41,66	25,76	37,55	44,77
1,0604	19,91	32,94	41,34	22,88	35,77	41,74	25,55	37,28	44,38
1,2354	20,06	33,54	41,46	22,84	35,83	41,85	25,32	37,03	44,04
1,4393	20,09	34,01	41,56	22,83	36,00	41,96	25,07	36,78	43,73
1,6767	20,03	34,35	41,60	22,76	36,13	42,00	24,79	36,49	43,39
1,9534	19,94	34,58	41,56	22,62	36,18	41,96	24,47	36,14	42,97
2,2757	19,81	34,72	41,52	22,47	36,28	41,92	24,13	35,77	42,55
2,6512	19,65	34,77	41,51	22,34	36,47	41,90	23,80	35,43	42,17
3,0887	19,54	34,77	41,55	22,24	36,67	41,95	23,55	35,18	41,89
3,5983	19,53	34,73	41,64	22,19	36,88	42,04	23,46	35,08	41,73
4,1920	19,63	34,67	41,73	22,18	36,99	42,13	23,51	35,07	41,67
4,8837	19,81	34,63	41,83	22,19	37,02	42,23	23,63	35,14	41,69
5,6895	20,01	34,63	41,91	22,18	36,96	42,31	23,71	35,19	41,69
6,6283	20,20	34,67	42,00	22,14	36,88	42,40	23,61	35,15	41,62
7,7219	20,29	34,69	41,98	21,97	36,65	42,38	23,31	34,94	41,40
8,9960	20,24	34,64	41,81	21,59	36,24	42,21	22,79	34,58	41,01
10,4804	20,06	34,55	41,64	21,10	35,88	42,04	22,12	34,17	40,58
12,2096	19,88	34,50	41,66	20,66	35,78	42,06	21,50	33,92	40,31
14,2242	19,88	34,60	42,11	20,48	36,22	42,51	21,21	34,12	40,51
16,5712	20,28	35,06	43,20	20,84	37,41	43,62	21,51	35,02	41,43
19,3055	21,23	36,00	45,02	21,88	39,37	45,45	22,56	36,72	43,22
22,4909	22,78	37,51	47,51	23,60	41,94	47,96	24,36	39,19	45,83
26,2019	24,87	39,48	50,39	25,88	44,80	50,87	26,77	42,23	49,02
30,5252	27,32	41,61	53,21	28,45	47,52	53,72	29,60	45,47	52,43
35,5618	29,86	43,56	55,67	30,92	49,75	56,20	32,62	48,56	55,63
41,4295	34,00	47,59	61,05	34,87	54,30	61,64	37,63	54,17	61,69
48,2654	40,07	54,02	68,97	40,61	61,85	69,63	45,13	62,94	71,30
56,2292	49,60	64,77	75,98	49,73	68,24	76,71	51,96	70,28	79,23
65,5070	59,47	76,41	84,57	58,60	76,34	85,38	59,55	78,67	88,33
76,3157	73,49	94,13	96,50	70,95	88,14	97,43	68,80	89,41	100,00
88,9077	96,93	100,00	100,00	91,01	100,00	100,00	82,60	100,00	100,00
103,5775	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Curvas de eficiência granulométrica  $\bar{C}_{cmc} = 0$

Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	Eficiência total de coleta (%)								
	$\bar{C}_{sól} = -1$			$\bar{C}_{sól} = 0$			$\bar{C}_{sól} = +1$		
	$\bar{D}_u = -1$	$\bar{D}_u = 0$	$\bar{D}_u = +1$	$\bar{D}_u = -1$	$\bar{D}_u = 0$	$\bar{D}_u = +1$	$\bar{D}_u = -1$	$\bar{D}_u = 0$	$\bar{D}_u = +1$
0,3125	16,53	25,32	42,54	12,89	28,20	47,24	15,56	33,72	49,25
0,3641	17,09	26,74	42,72	14,10	29,15	46,64	16,32	33,68	47,95
0,4242	17,47	27,54	42,27	14,97	29,68	45,67	16,85	33,60	47,10
0,4941	17,73	28,10	41,64	15,62	30,02	44,62	17,21	33,47	46,44
0,5757	17,91	28,55	40,91	16,09	30,26	43,53	17,43	33,31	45,86
0,6707	18,02	28,95	40,11	16,41	30,44	42,40	17,53	33,09	45,32
0,7813	18,08	29,32	39,26	16,58	30,56	41,22	17,50	32,81	44,78
0,9103	17,92	29,56	38,34	16,40	30,47	39,99	17,13	32,28	44,12
1,0604	17,69	29,77	37,65	16,05	30,32	39,04	16,62	31,73	43,51
1,2354	17,31	29,88	37,35	15,46	30,03	38,54	15,90	31,08	42,93
1,4393	16,77	29,84	37,43	14,68	29,57	38,45	15,01	30,30	42,34
1,6767	16,16	29,68	37,60	13,87	29,01	38,48	14,08	29,47	41,75
1,9534	15,51	29,44	37,68	13,09	28,47	38,46	13,19	28,69	41,17
2,2757	14,85	29,18	37,92	12,32	27,99	38,62	12,35	28,01	40,64
2,6512	14,28	28,99	38,37	11,70	27,67	39,00	11,71	27,55	40,26
3,0887	13,97	28,94	38,84	11,45	27,63	39,43	11,47	27,45	40,08
3,5983	13,97	28,98	39,31	11,63	27,86	39,85	11,69	27,68	40,10
4,1920	14,24	29,05	39,56	12,20	28,26	40,06	12,26	28,09	40,21
4,8837	14,57	29,10	39,65	12,88	28,65	40,13	12,90	28,45	40,30
5,6895	14,72	29,02	39,55	13,37	28,85	40,05	13,27	28,58	40,25
6,6283	14,46	28,76	39,46	13,32	28,76	40,05	13,08	28,36	40,05
7,7219	13,74	28,27	39,22	12,79	28,45	40,02	12,36	27,91	39,77
8,9960	12,72	27,70	38,90	11,97	28,15	40,04	11,32	27,53	39,63
10,4804	11,75	27,39	39,07	11,26	28,26	40,66	10,42	27,66	39,98
12,2096	11,48	27,80	40,22	11,36	29,33	42,28	10,42	28,86	41,26
14,2242	12,53	29,41	42,83	12,88	31,79	45,23	11,95	31,57	43,78
16,5712	15,25	32,47	47,09	15,97	35,84	49,56	15,18	35,93	47,62
19,3055	19,64	36,94	52,72	20,56	41,34	54,88	20,06	41,79	52,57
22,4909	25,54	42,53	59,13	26,61	47,94	60,61	26,58	48,75	58,25
26,2019	32,89	48,78	65,46	34,40	55,09	66,08	34,93	56,27	64,21
30,5252	41,48	55,13	70,80	44,06	62,04	70,74	45,08	63,55	69,99
35,5618	50,62	60,98	74,47	54,95	67,93	74,38	56,08	69,68	75,22
41,4295	62,22	69,64	80,79	69,26	76,31	81,57	69,79	78,21	84,34
48,2654	75,87	82,02	91,04	86,64	87,93	86,13	85,65	89,94	90,71
56,2292	93,09	91,54	96,92	96,14	94,02	91,07	100,00	95,73	96,90
65,5070	100,00	100,00	100,00	100,00	99,24	97,22	100,00	100,00	100,00
76,3157	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
88,9077	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
103,5775	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Curvas de eficiência granulométrica  $\bar{C}_{cmc} = -1$

Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	Eficiência total de coleta (%)								
	$\bar{C}_{sól} = -1$			$\bar{C}_{sól} = 0$			$\bar{C}_{sól} = +1$		
	$\bar{D}_u = -1$	$\bar{D}_u = 0$	$\bar{D}_u = +1$	$\bar{D}_u = -1$	$\bar{D}_u = 0$	$\bar{D}_u = +1$	$\bar{D}_u = -1$	$\bar{D}_u = 0$	$\bar{D}_u = +1$
0,3125	26,17	43,72	60,89	32,54	50,84	66,02	32,97	56,16	71,75
0,3641	24,83	40,61	55,22	29,98	46,80	61,30	30,38	51,61	66,79
0,4242	24,10	38,87	51,88	28,47	44,49	58,76	28,85	48,98	64,10
0,4941	23,59	37,70	49,62	27,34	42,84	57,06	27,70	46,96	62,21
0,5757	23,12	36,77	47,91	26,34	41,47	55,71	26,69	45,08	60,56
0,6707	22,58	35,88	46,49	25,29	40,10	54,40	25,62	43,07	58,82
0,7813	20,90	33,55	43,69	23,05	37,17	51,14	23,35	39,33	54,89
0,9103	19,91	32,45	42,79	21,67	35,63	49,74	21,96	37,11	52,92
1,0604	18,32	30,58	41,29	19,76	33,31	47,31	20,02	34,27	49,90
1,2354	16,49	28,41	39,66	17,68	30,77	44,57	17,91	31,43	46,70
1,4393	14,94	26,61	38,48	15,96	28,78	42,51	16,17	29,26	44,34
1,6767	13,81	25,36	37,85	14,74	27,47	41,26	14,93	27,72	42,88
1,9534	12,96	24,37	37,46	13,82	26,42	40,24	14,00	26,43	41,61
2,2757	12,56	23,91	37,63	13,36	25,92	39,85	13,54	25,70	40,97
2,6512	12,82	24,30	38,56	13,52	26,24	40,52	13,70	25,84	41,47
3,0887	13,53	25,23	39,76	14,07	27,05	41,87	14,25	26,71	42,77
3,5983	14,44	26,47	40,97	14,76	28,16	43,69	14,96	28,12	44,72
4,1920	14,98	27,34	41,63	15,07	28,93	45,10	15,27	29,31	46,35
4,8837	14,82	27,62	41,79	14,84	29,28	45,94	15,04	30,02	47,42
5,6895	13,87	27,22	41,59	14,12	29,18	46,00	14,31	29,98	47,55
6,6283	12,86	27,07	41,91	13,74	29,71	46,65	13,92	30,47	48,26
7,7219	12,62	27,90	43,21	14,48	31,65	48,70	14,67	32,39	50,47
8,9960	13,84	30,09	45,71	16,90	35,25	52,10	17,12	35,83	54,00
10,4804	17,41	34,51	50,10	21,72	41,19	57,53	22,01	41,46	59,47
12,2096	23,73	41,45	56,47	29,28	49,57	64,95	29,67	49,44	66,85
14,2242	32,89	50,81	64,49	39,63	59,91	73,71	40,15	59,28	75,42
16,5712	44,90	62,13	73,41	52,49	71,35	82,97	53,19	70,29	84,31
19,3055	59,36	74,32	82,08	66,80	82,37	91,33	67,69	81,04	92,17
22,4909	75,22	86,07	89,55	80,85	91,70	97,82	81,92	90,27	98,23
26,2019	90,27	95,89	95,01	92,32	98,47	100,00	93,55	97,06	100,00
30,5252	100,00	100,00	98,00	99,27	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
35,5618	100,00	100,00	98,73	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
41,4295	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
48,2654	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
56,2292	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
65,5070	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
76,3157	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
88,9077	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
103,5775	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00