



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Química  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos



## **AVALIAÇÃO DE ALTERAÇÕES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DO DUTO DE ALIMENTAÇÃO DE UM HIDROCICLONE**

Patos de Minas - MG

2019



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Química  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos



## **AVALIAÇÃO DE ALTERAÇÕES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DO DUTO DE ALIMENTAÇÃO DE UM HIDROCICLONE**

Clara de Assis Oliveira da Rocha

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Danylo de Oliveira Silva

Coorientador: Luiz Gustavo Martins Vieira

Patos de Minas - MG

2019

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

---

R672a Rocha, Clara de Assis Oliveira da, 1993-  
2019 Avaliação de alterações na seção transversal do duto de alimentação  
de um hidrociclone [recurso eletrônico] / Clara de Assis Oliveira da  
Rocha. - 2019.

Orientador: Danylo de Oliveira Silva.

Coorientador: Luiz Gustavo Martins Vieira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.359>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Alimentos - Indústria. 2. Hidrociclone. 3. Partículas. 4. Separação  
(Tecnologia). I. Silva, Danylo de Oliveira, 1981- (Orient.). II. Vieira,  
Luiz Gustavo Martins, 1976- (Coorient.). III. Universidade Federal de  
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos.  
IV. Título.

CDU:664

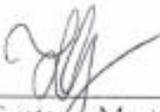
---

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262

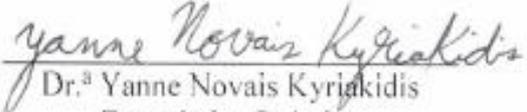
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CLARA DE ASSIS OLIVEIRA DA ROCHA,  
SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
ALIMENTOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE  
DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA DE ALIMENTOS, EM 22 DE FEVEREIRO DE 2019.

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva  
Orientador – PPGEA/UFU

  
Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira  
Orientador – PPGEQ/UFU

  
Prof. Dr. Diego Alves de Moro Martins  
CEFET-MG – Campus Araxá

  
Dr.ª Yanne Novais Kyriakidis  
Engenheira Química



Dedico este trabalho à minha mãe e ao meu irmão.



## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e por proporcionar-me força e paciência para concluir mais esta etapa.

À minha família e aos amigos, pela compreensão, apoio e companheirismo diante de todas as dificuldades enfrentadas no decorrer deste trabalho. Em especial à minha mãe, Dona Mariana, por tudo que já realizou por mim e que nunca mediu esforços para me ajudar em toda minha vida acadêmica e ao meu irmão, professor Geandre, que sempre será como um pai pra mim e que sempre me incentivou muito.

Ao meu orientador, professor Dr. Danylo de Oliveira Silva, por toda paciência e dedicação, a todo ensinamento repassado sobre hidrociclones e fluidodinâmica computacional. Por sempre me ajudar muito tanto nos momentos de desânimo, com sábias palavras, quanto nos momentos felizes, compartilhando histórias legais. Tornando assim, uma das pessoas essenciais para meu crescimento acadêmico.

Ao meu coorientador, professor Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira, pelas contribuições importantes para esta dissertação e pelo valoroso apoio.

Ao professor Dr. Ricardo Corrêa de Santana por recomendar soluções diante de algumas dúvidas e por todas as sugestões para a melhoria deste trabalho.

Aos colegas, que de alguma forma contribuíram para realização desta dissertação, em especial Grégori Ullmann, Guilherme Guimarães Ascendino, Maryane Cristina Alves de Sousa, Suélen Mara Gonçalves e Yanne Novais Kyriakidis.

À banca pelas contribuições relevantes dadas a este trabalho.

Aos futuros leitores deste estudo, que o mesmo possa contribuir de alguma forma para a pesquisa.

À Universidade Federal de Uberlândia – *campus* Patos de Minas pela oportunidade da realização deste curso.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o meu trabalho.

Obrigada.



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos.....	4
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 Alterações geométricas.....	6
2.1.1 <i>Alterações em ciclones</i> .....	6
2.1.1.1 <i>Alterações no duto de alimentação de ciclones</i> .....	9
2.1.2 <i>Alterações em hidrociclones</i> .....	11
2.1.2.1 <i>Alterações no duto de alimentação de hidrociclones</i> .....	18
2.2 Fluidodinâmica computacional (CFD).....	21
2.2.1 <i>Aplicações em engenharia de alimentos</i> .....	22
2.2.2 <i>Aplicações em ciclones</i> .....	24
2.2.3 <i>Aplicações em hidrociclones</i> .....	26
2.3 Aplicabilidade de hidrociclones na área de alimentos.....	28
<b>CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA .....</b>	<b>31</b>
3.1 Geração das malhas computacionais e simulações.....	31
3.2 Execução experimental.....	34
3.2.1 <i>Unidade experimental</i> .....	34
3.2.2 <i>Material particulado</i> .....	35
3.2.3 <i>O hidrociclone</i> .....	37
3.2.4 <i>Procedimento experimental</i> .....	38

3.2.5 Cálculo das grandezas associadas à separação em hidrociclones .....	39
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
4.1 Resultados das simulações .....	43
4.2 Resultados experimentais .....	49
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....</b>	<b>54</b>
5.1 Conclusões.....	54
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	55
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Representação da estrutura de um hidrociclone.....	1
Figura 1.2 – Representação simplificada do escoamento no interior de hidrociclones.....	2
Figura 2.1 – Representação esquemática do ciclone (mm) em que: A, B e C indicam os locais da fenda e a região sombreada indica o revestimento .....	8
Figura 2.2 – Ciclone com cone interno invertido .....	9
Figura 2.3 – Dimensões e configurações dos ciclones estudados por Misiulia; Andersson e Lundström (2017).....	11
Figura 2.4 – Hidrociclones com seção cônica de diferentes formas em que: da esquerda para a direita - o côncavo, reto e convexo .....	14
Figura 2.5 – Diferentes conformações para <i>vortex finder</i> .....	15
Figura 2.6 – Malhas de cinco hidrociclones distintos .....	17
Figura 2.7 – Alimentação do tipo rampa .....	18
Figura 2.8 – Diferentes configurações de alimentação de um hidrociclone.....	19
Figura 2.9 – Duto de alimentação posicionado em diferentes ângulos .....	20
Figura 2.10 – Estrutura de malha dos hidrociclones: (a) Doxie e (b) AKW .....	27
Figura 3.1 – Malhas das quatro geometrias propostas: (a) STQ (7x7); (b) STR (8x6); (c) STR (9x5,3); (d) 2STR (8x3).....	32
Figura 3.2 – Unidade experimental: (1) Reservatório; (2) Agitador mecânico; (3) Bomba centrífuga; (4) Válvula de <i>bypass</i> ; (5) Válvula reguladora de vazão; (6) Medidor de vazão; (7) Manômetro; (8) Hidrociclone.....	35
Figura 3.3 – Distribuição granulométrica do material particulado.....	37
Figura 3.4 – Hidrociclone STQ (7x7).....	38
Figura 4.1 – Distribuições de pressão total dos hidrociclones avaliados .....	44
Figura 4.2 – Perfis de velocidade axial ascendente dos hidrociclones avaliados.....	45
Figura 4.3 – Perfis de velocidade axial descendente dos hidrociclones avaliados.....	45

Figura 4.4 – Perfis de velocidade tangencial dos hidrociclones analisados .....	46
Figura 4.5 – Corte realizado na seção cônica dos hidrociclones, localizado a 95,4 mm acima do <i>underflow</i> e 63,6 mm abaixo da seção cilíndrica .....	47
Figura 4.6 – Perfis de velocidade axial a 95,4 mm acima do orifício de <i>underflow</i> .....	47
Figura 4.7 – Perfis de velocidade tangencial a 95,4 mm acima do orifício de <i>underflow</i> .....	48
Figura 4.8 – Resultados experimentais da vazão volumétrica de alimentação ( $Q_A$ ) para os hidrociclones HCOT1 e STQ (7x7) .....	50
Figura 4.9 – Resultados experimentais do número de Euler ( $Eu$ ) para os hidrociclones HCOT1 e STQ (7x7).....	51
Figura 4.10 – Resultados experimentais da razão de líquido ( $R_L$ ) para os hidrociclones HCOT1 e STQ (7x7) .....	52
Figura 4.11 – Resultados experimentais do diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) para os hidrociclones HCOT1 e STQ (7x7) .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros e modelos adotados nas simulações.....	33
Tabela 3.2 – Composição química do quartzito .....	36
Tabela 4.1 – Resultados das simulações em CFD para os hidrociclones avaliados.....	43
Tabela 4.2 – Resultados experimentais para o hidrociclone STQ (7x7).....	49
Tabela 4.3 – Resultados experimentais obtidos para o HCOT1 por Silva (2012).....	50
Tabela 4.4 – Resultados simulados e experimentais dos hidrociclones HCOT1 e STQ (7x7) a 176 kPa.....	53

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Abreviaturas

2STR (8x3)	Hidrociclone com duas seções transversais de alimentação retangulares ( $H = 8$ e $W = 3$ mm)
ASM	<i>Algebraic Slip Mixture</i> – Mistura de deslizamento algébrico
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> – Fluidodinâmica computacional
DEM	<i>Discrete Element Method</i> – Método de elemento discreto
DMC	<i>Dense Medium Cyclone</i> – Ciclone médio denso
DNV	<i>Det Norske Veritas</i> – Modelo de erosão
DPM	<i>Discrete Phase Modeling</i> – Modelagem da fase discreta
FVM	<i>Finite Volume Method</i> – Método dos volumes finitos
HC11	Hidrociclone Convencional caso 11
HCOT1	Hidrociclone Convencional OTimizado caso 1
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MEGM	<i>Multiphase Eulerian Granular Model</i> – Modelo Eulariano granulométrico multifásico
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i> – Velocimetria por imagem de partículas
RHC	Hidrociclone com alimentação do tipo rampa
RRB	Modelo estatístico usado para representar uma distribuição granulométrica (Rosin-Rammler-Bennet)
RSM	<i>Reynolds Stress Model</i>
SGS	<i>Smagorinsky-Lilly subgrid-scale</i>
STQ (7x7)	Hidrociclone com seção transversal de alimentação quadrada ( $H$ e $W = 7$ mm)

STR (8x6)	Hidrociclone com seção transversal de alimentação retangular ( $H = 8$ e $W = 6$ mm)
STR (9x5,3)	Hidrociclone com seção transversal de alimentação retangular ( $H = 9$ e $W = 5,3$ mm)
TFM	<i>Two-Fluid Model</i> – Modelo de dois fluidos
URANS	<i>Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes</i> – Equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds

### Símbolos

$c$	Fator de forma cônica, $[M^0L^0T^0]$
$C_{VA}$	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
$C_{VU}$	Concentração volumétrica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
$C_{WA}$	Concentração mássica de sólidos na corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
$C_{WU}$	Concentração mássica de sólidos na corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
$d'_{50}$	Diâmetro de corte reduzido, $[M^0L^1T^0]$
$d_{25C}$	Diâmetro de partícula coletada com 25% de eficiência granulométrica reduzida, $[M^0L^1T^0]$
$d_{50}$	Diâmetro de corte, $[M^0L^1T^0]$
$d_{63,2}$	Parâmetro ajustado do modelo RRB, $[M^0L^1T^0]$
$d_{63,2_a}$	Parâmetro ajustado do modelo RRB da corrente de alimentação, $[M^0L^1T^0]$
$d_{63,2_u}$	Parâmetro ajustado do modelo RRB da corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^1T^0]$
$d_{75C}$	Diâmetro de partícula coletada com 75% de eficiência granulométrica reduzida, $[M^0L^1T^0]$
$D$	Diâmetro do ciclone, $[M^0L^1T^0]$
$D_c$	Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$D_i$	Diâmetro do duto de alimentação do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$D_o$	Diâmetro do duto de <i>overflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$

$d_p$	Diâmetro da partícula, $[M^0L^1T^0]$
$D_u$	Diâmetro do duto de <i>underflow</i> do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$E_p$	Probabilidade de “fuga”, $[M^0L^1T^0]$
$Eu$	Número de Euler, $[M^0L^0T^0]$
$H$	Altura da seção transversal do duto de alimentação, $[M^0L^1T^0]$
$KA$	Proporção entre a seção transversal do cilindro e a seção transversal da entrada, $[M^0L^0T^0]$
$L$	Comprimento total do hidrociclone, $[M^0L^1T^0]$
$n$	Parâmetro ajustado do modelo RRB, $[M^0L^0T^0]$
$n_a$	Parâmetro ajustado do modelo RRB da corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$
$n_u$	Parâmetro ajustado do modelo RRB da corrente de <i>underflow</i> , $[M^0L^0T^0]$
$P$	Pressão total no hidrociclone, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$
$Q_A$	Vazão volumétrica da corrente de alimentação do hidrociclones, $[M^0L^3T^{-1}]$
$Q_U$	Vazão volumétrica da corrente de <i>underflow</i> do hidrociclones, $[M^0L^3T^{-1}]$
$Re$	Número de Reynolds, $[M^0L^0T^0]$
$R_L$	Razão de líquido, $[M^0L^0T^0]$
$r^2$	Coefficiente de determinação, $[M^0L^0T^0]$
$v$	Componente de velocidade tangencial, $[M^0L^1T^{-1}]$
$v_c$	Velocidade na seção cilíndrica, $[M^0L^1T^{-1}]$
$V_f$	Comprimento total do <i>vortex finder</i> , $[M^0L^1T^0]$
$w$	Componente de velocidade axial, $[M^0L^1T^{-1}]$
$W$	Largura da seção transversal do duto de alimentação, $[M^0L^1T^0]$
$W_A$	Vazão mássica da corrente de alimentação, $[M^1L^0T^{-1}]$
$W_U$	Vazão mássica da corrente de <i>underflow</i> , $[M^1L^0T^{-1}]$
$X_a$	Fração mássica de partículas iguais ou menores do que $d_p$ na corrente de alimentação, $[M^0L^0T^0]$

$X_u$  Fração mássica de partículas iguais ou menores do que  $d_p$  na corrente de *underflow*,  $[M^0L^0T^0]$

### Símbolos gregos

$-\Delta P$  Queda de pressão,  $[M^1L^{-1}T^{-2}]$

$\eta$  Eficiência total,  $[M^0L^0T^0]$

$\eta'_G$  Eficiência granulométrica reduzida,  $[M^0L^0T^0]$

$\eta_G$  Eficiência granulométrica,  $[M^0L^0T^0]$

$\theta$  Ângulo da parte cônica do hidrociclone,  $[^\circ]$

$\rho_a$  Densidade da corrente de alimentação,  $[M^1L^{-3}T^0]$

$\rho_{\text{água}}$  Densidade da água,  $[M^1L^{-3}T^0]$

$\rho_s$  Densidade do sólido (material particulado),  $[M^1L^{-3}T^0]$

$\rho_u$  Densidade da corrente de *underflow*,  $[M^1L^{-3}T^0]$

## RESUMO

Hidrociclones fazem parte de um relevante grupo de equipamentos utilizados para a separação de partículas em campo centrífugo. A previsão e descrição do escoamento no interior destes equipamentos pode ser obtida por meio de simulações em fluidodinâmica computacional (CFD). Alguns estudos indicam que os parâmetros operacionais e geométricos podem influenciar diretamente o desempenho de separação de um hidrociclone. Diante disto, uma alternativa para esta melhoria, proposta na literatura, sugere realizar a alteração da seção transversal do duto de alimentação de circular para retangular. O objetivo do presente trabalho foi avaliar, por meio das técnicas de CFD, a modificação do duto de alimentação de circular para quadrado (7x7 mm) e retangular (8x6 mm e 9x5,3 mm) de um hidrociclone de geometria otimizada (HCOT1), mantendo-se aproximadamente a mesma área de seção transversal (47,78 mm<sup>2</sup>). Além destas alterações, realizou-se o acoplamento de mais um duto de alimentação, ambos com seções transversais retangulares (8x3 mm), esta modificação foi efetuada considerando um trabalho disponível na literatura, que relata a possibilidade de melhora na eficiência de separação de partículas ao aumentar o número de entradas e diminuir a largura das mesmas. Todas as malhas foram confeccionadas com o auxílio do software GAMBIT<sup>®</sup>, utilizando elementos de malha do tipo hexaédrico. As simulações tridimensionais em escoamento monofásico foram conduzidas por meio do solucionador numérico FLUENT<sup>®</sup> *Academic* utilizando-se o modelo de turbulência RSM, em regime transiente, adotando-se como critério de convergência um resíduo máximo de  $1.10^{-4}$ , sendo consideradas estáveis a partir de 2 s. Posteriormente, foram realizados testes experimentais em um dos hidrociclones propostos, denominado STQ (7x7), utilizando uma suspensão aquosa de quartzito em quatro diferentes quedas de pressão. Ressalta-se que a escolha deste hidrociclone foi realizada com base nas descrições fornecidas pelos perfis fluidodinâmicos, em que foi possível observar maiores valores de velocidade axial e tangencial para este equipamento em comparação ao HCOT1. Por meio das simulações realizadas foi possível analisar as diferenças e similaridades dos equipamentos avaliados, utilizando-se das previsões do número de Euler ( $Eu$ ) e razão de líquido ( $R_L$ ). Apesar de as simulações indicarem razões de líquido ( $R_L$ ) similares para todos os hidrociclones, o resultado foi ligeiramente superior para as novas configurações; ainda de acordo com as simulações, a geometria denominada HCOT1 apresentou o menor consumo energético ( $Eu = 2604$ ). Ressalta-se que o hidrociclone HCOT1 é uma geometria já otimizada, obtida por pesquisadores da Faculdade de Engenharia Química da UFU, e qualquer melhoria, por menor que possa parecer, é importante. De fato, diante dos resultados obtidos experimentalmente, uma das geometrias propostas neste estudo, denominada de STQ (7x7); comparada ao HCOT1 apresentou, em média, valores de  $R_L$  3,19 pontos percentuais maiores; diâmetro de corte 32% menor em média; e número de Euler 12,49% maior em média, ou seja, um consumo energético maior. Portanto, dependendo da finalidade da utilização do equipamento STQ (7x7), se este aumento no consumo energético não for significativo, um menor diâmetro de corte na operação deste pode ser uma alternativa interessante.

Palavras-chave: Alteração geométrica. Separação sólido-líquido. CFD.

## ABSTRACT

Hydrocyclones are part of an important group of equipment used for separation of particles in centrifugal field. The flowfield prediction inside this equipment can be obtained by computational fluid dynamics (CFD) simulation. Some studies indicate that the operational and geometric parameters can directly influence the separation performance of a hydrocyclone. Therefore, an alternative to this improvement, according to the literature, is a possibility to change the cross section of the circular feed duct to rectangular. The objective of the present work was to evaluate, using CFD techniques, the modification of the cross section of the duct feed from circular to square (7x7 mm) and rectangular (8x6 mm and 9x5,3 mm) of an optimized hydrocyclone (HCOT1), keeping the same transversal area (around 47,78 mm<sup>2</sup>). In addition, it was simulated the coupling of another feed duct, both with rectangular transversal section (8x3 mm), this modification was performed considering a study available in the literature, which reports the possibility of improvement in particle separation efficiency by increasing the number of entrances and reducing their widths. All meshes were made with the aid of GAMBIT<sup>®</sup> software, using mesh elements of the hexahedral type. The three-dimensional single-phase flow simulations were conducted using the FLUENT<sup>®</sup> Academic numerical solver applying the RSM turbulence model, in transient regime, adopting a maximum residue of  $1.10^{-4}$  as convergence criteria, being considered stable from 2 s. Thereafter, experimental tests were performed on one of the proposed hydrocyclones, denominated STQ (7x7), using an aqueous suspension of quartzite in four different pressure drops. It is emphasized that the choice of this hydrocyclone was made based on the descriptions of the fluid dynamics profiles, in which it was possible to observe higher values of axial and tangential velocities for this equipment in comparison to HCOT1. Through the carried out of simulations, was possible to analyze the differences and similarit of the evaluated equipment, using the predictions of Euler number ( $Eu$ ) and liquid-to-throughput ratio ( $R_L$ ). Despite the simulations indicate  $R_L$  being similar for all hydrocyclones, it was superior for the new configurations, but the geometry called HCOT1 presented the lowest energy consumption ( $Eu = 2604$ ). It should be noted that the hydrocyclone HCOT1 is an already optimized geometry, obtained by researchers of the School of Chemical Engineering of UFU, and any small improvement is important. In fact, in view of the experimental results, one of the geometries proposed in this study, called STQ (7x7), compared to HCOT1 presented, in general:  $R_L$  values 3,19 percentual dots higher (in average); cut size diameter 32% smaller in average; and Euler number 12,49% higher in average, that is, a higher energy consumption. Therefore, depending on the purpose of the use of the STQ (7x7) equipment, if this increase in energy consumption is not significant, a smaller cut size diameter in the operation of this equipment can be an interesting alternative.

Keywords: Geometric change. Solid-liquid separation. CFD.

---

# CAPÍTULO 1

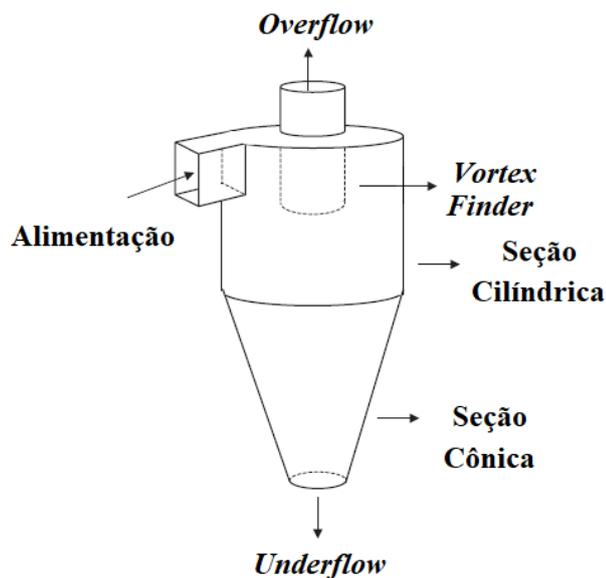
## INTRODUÇÃO

---

Os ciclones hidráulicos ou ciclones de líquidos, comumente conhecidos como hidrociclones, fazem parte de um relevante grupo de equipamentos utilizados para a separação de partículas dispersas em campo centrífugo, os quais utilizam um líquido como fase contínua (SOUZA et al., 2000; WILLS; NAPIER-MUNN, 2006; SRIPRIYA et al., 2007).

Hidrociclones têm sua aplicação bastante difundida em separações sólido-líquido e líquido-líquido, uma vez que apresentam vantagens como baixo custo operacional, alta capacidade, pequeno volume, ausência de partes móveis e estrutura simples (SVAROVSKY, 2000). Sua estrutura (Figura 1.1) é constituída basicamente por uma seção cônica justaposta a uma seção cilíndrica, a qual apresenta tangencialmente acoplado, um duto de alimentação. Na região superior desta mesma seção, observa-se um tubo denominado de *vortex finder*, o qual se prolonga até a saída e passa a ser designado como *overflow*. Além deste, o hidrociclone apresenta mais um duto de saída denominado de *underflow*, que se encontra localizado na parte inferior desse equipamento (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

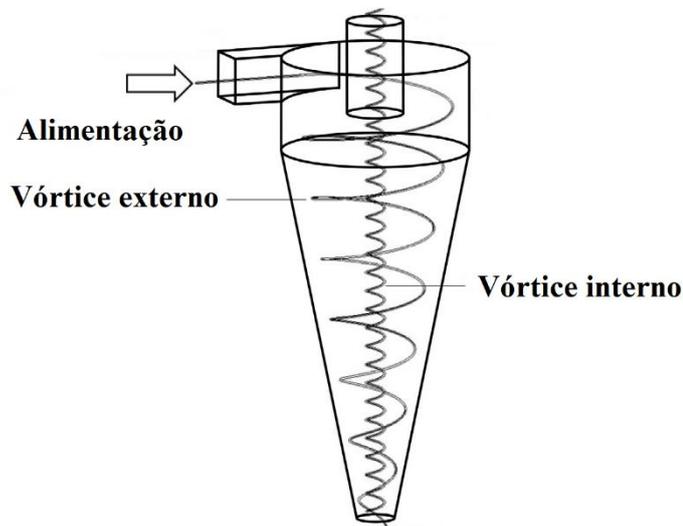
Figura 1.1 – Representação da estrutura de um hidrociclone



Fonte: Adaptada de Ortega-Rivas (2004).

O princípio operacional dos hidrociclones é caracterizado pela sedimentação centrífuga, em que as partículas são submetidas a uma aceleração centrífuga, a qual promove sua separação do fluido. A suspensão é introduzida, tangencialmente, sob pressão através do duto de alimentação situado no topo da parte cilíndrica do equipamento; como consequência, essa alimentação tangencial induz um vórtice helicoidal descendente (externo) e, por ação da força centrífuga, as partículas maiores, mais densas e de maior momento angular são forçadas a deslocar-se em direção à parede do hidrociclone, sendo coletadas no orifício da parte inferior da seção cônica, o *underflow*. Já as partículas menores, menos densas e de menor momento angular juntamente com grande parte da fase líquida são direcionadas para o centro do hidrociclone, formando um vórtice helicoidal ascendente (interno) com movimento rotacional inverso ao vórtice externo, sendo conduzidas para o *vortex finder* e, então, coletadas pelo tubo de *overflow* (SVAROVSKY, 1984; DRZYMALA, 2007). Apresenta-se, na Figura 1.2, um esquema representativo da formação dos vórtices interno e externo durante o escoamento no interior de hidrociclones.

Figura 1.2 – Representação simplificada do escoamento no interior de hidrociclones



Fonte: Adaptada de Vega-Garcia; Brito-Parada; Cilliers (2018).

Devido à complexidade dos fenômenos que ocorrem no interior de equipamentos como hidrociclones e às dificuldades de se estudar esses fenômenos em escala experimental, as técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) são utilizadas com o objetivo de prever e descrever esses comportamentos internos por meio dos perfis fluidodinâmicos (FERZIGER; PERIC, 2002; GONÇALVES, 2016).

Sendo assim, projetos de hidrociclones de elevada eficiência associados às técnicas de CFD podem ser definidos como um método útil, confiável e relativamente econômico (HWANG; CHOU, 2017). A economia gerada pode ser devido ao fato de as técnicas de CFD proporcionarem a otimização e avaliação do desempenho dos equipamentos; assim, pode ser possível reduzir consideravelmente o tempo dedicado aos estudos experimentais e os gastos com a construção de um número excessivo de equipamentos para analisar a influência de diversas combinações de parâmetros possíveis (TU; YEOH; LIU, 2008).

No entanto, é necessário salientar que fluidodinâmica computacional tem a finalidade de complementar, e não de substituir os estudos teóricos e as análises experimentais referentes à dinâmica dos fluidos. É por meio da análise teórica que é possível saber quais modelos serão adotados, bem como quais hipóteses podem ser simplificadas se utilizadas para a solução do problema numérico. Já os resultados obtidos em análises experimentais servem para validar os modelos numéricos, bem como colaboram na elaboração de novos modelos. Desta forma, as três análises (teórica, numérica e experimental) são importantes para proporcionar um entendimento mais claro do processo (PATANKAR, 1980).

Parâmetros operacionais e geométricos podem influenciar diretamente o desempenho de separação de um hidrociclone. A forma e o tamanho desse equipamento são os principais responsáveis pela estrutura do escoamento da fase contínua e, portanto, influenciam na separação ou classificação da fase dispersa (PETTY; PARKS, 2001; SABBAGH et al., 2017). Diante disso, há vários estudos relacionados às alterações geométricas em hidrociclones de diferentes famílias com o objetivo de melhorar os seus desempenhos (SOUZA et al., 2000; VIEIRA et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2009; SILVA et al., 2012).

Um hidrociclone de elevada eficiência de separação de partículas, definido com alto poder classificador, foi obtido por Silva (2012). Em seu estudo de otimização realizado na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), o autor, por meio da técnica de Evolução Diferencial, encontrou uma configuração com elevado desempenho, a qual foi denominada HCOT1 (**H**idrociclone **C**onvencional **O**timizado caso **1**). Essa geometria foi obtida a partir dos dados experimentais de Vieira (2006), que avaliou 25 configurações de hidrociclones, utilizando a aplicação de planejamento experimental (BOX; HUNTER; HUNTER, 1978), superfície de resposta (MYERS, 1976) e análise canônica.

Hwang; Hwang e Yoshida (2013), por meio de um estudo numérico, analisaram o desempenho de hidrociclones com diferentes tamanhos e números de entrada. Os autores relataram que ao aumentar o número de entradas e diminuir a largura das mesmas é possível melhorar a eficiência de separação de partículas, devido à maior conservação da energia cinética

e ao aumento da velocidade do fluido, ambos na parte cilíndrica do hidrociclone.

Outra alteração geométrica foi proposta por Morgan (2005), o qual relata que a alteração do formato da seção transversal do duto de alimentação de circular para retangular pode aumentar a capacidade de hidrociclones bem como a sua eficiência de separação de partículas. Svarovsky (2000) afirma que o aumento na eficiência está relacionado ao fato da eliminação de “zonas mortas” no duto de alimentação, sendo que a configuração retangular pode garantir com que as partículas fluam ligeiramente mais próximas da parede na entrada do hidrociclone.

Com base nos trabalhos previamente descritos, o presente estudo teve como propósito realizar uma modificação geométrica na seção transversal do duto de alimentação em um hidrociclone já otimizado (HCOT1), com o intuito de avaliar de forma numérica e experimental se alterações em um equipamento já otimizado consegue proporcionar alguma melhoria para este equipamento. Apresentando como público-alvo as indústrias que fazem uso de equipamentos como os hidrociclones e também ser considerado como um estudo de direcionamento para área acadêmica, podendo ser relevante para trabalhos futuros.

## 1.1 Objetivos

Diante do exposto, o objetivo geral do presente trabalho foi verificar a viabilidade de modificações na alimentação do hidrociclone HCOT1 por meio de técnicas de CFD e de estudos experimentais.

Como objetivos específicos têm-se:

- a) obter os perfis de escoamento do hidrociclone otimizado (HCOT1) com seção transversal circular do duto de alimentação através de técnicas de CFD;
- b) avaliar, por meio das simulações em CFD, a influência da modificação da seção transversal do duto de alimentação de circular para quadrada e para retangular no padrão de escoamento do fluido no hidrociclone otimizado (HCOT1);
- c) analisar a influência do número de entradas retangulares no desempenho do hidrociclone otimizado (HCOT1) através das simulações em CFD;
- d) selecionar, com base nas descrições fornecidas pelos perfis fluidodinâmico, uma das geometrias simuladas que apresenta melhorias para o HCOT1 com o intuito de realizar a sua confecção para que sejam conduzidos ensaios experimentais com o propósito de verificar os resultados simulados;

- e) Comparar os resultados experimentais do HCOT1 disponíveis na literatura com os resultados obtidos para uma das geometrias propostas e comparar também com as respectivas simulações.

---

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

**N**este capítulo são abordados estudos relacionados a alterações geométricas realizadas em ciclones e hidrociclones, uso de técnicas de fluidodinâmica computacional para descrever o comportamento associado a transferências de momento e/ou de calor em diversos equipamentos e a aplicabilidade de hidrociclones na área de alimentos.

#### 2.1 Alterações geométricas

A alteração geométrica de um equipamento pode acarretar em um aumento na sua produtividade. Segundo Ghodrati et al. (2014), dependendo das condições operacionais e dos materiais utilizados na construção de hidrociclone, a estrutura desse equipamento pode afetar diretamente o seu desempenho. Sendo, portanto, necessário conhecer as consequências das modificações geométricas para futuras aplicações práticas neste equipamento.

Ainda que existam trabalhos que visem à mudança no duto da alimentação em hidrociclones (CHU; CHEN; LEE, 2000; CULLIVAN; WILLIAMS; CROSS, 2003; HWANG et al., 2008), torna-se necessário expor também estudos que apresentaram alterações geométricas tanto em outras seções quanto em outros equipamentos. Uma vez que tais estudos mostram não só a importância de realizar as modificações geométricas como também a influência dessas no desempenho dos equipamentos.

##### 2.1.1 Alterações em ciclones

Com o objetivo de avaliar o efeito das dimensões do *vortex finder* no desempenho de um ciclone, Elsayed e Lacor (2013) realizaram investigações computacionais em escoamento multifásico utilizando a abordagem Euleriana-Lagrangiana para a modelagem da fase discreta (DPM – *Discrete Phase Modeling*) e como modelo de turbulência a *Large Eddy Simulation* (LES). Foram geradas nove malhas hexaédricas com o auxílio do software GAMBIT®; cada uma apresentou, aproximadamente, 1.174.029 elementos. Os valores das dimensões do *vortex*

*finder* foram: diâmetro igual 0,3 a 0,5 vezes o diâmetro do ciclone (31 mm) e comprimento igual a 0,5 vezes a unidade do diâmetro do ciclone.

Os resultados demonstraram que a queda de pressão foi menor ao aumentar o diâmetro do *vortex finder*. E com o aumento do comprimento ocorreu uma elevação do pico da zona de velocidade axial, fazendo com que as partículas maiores escapassem com o fluxo ascendente, o que comprometeu o desempenho do ciclone.

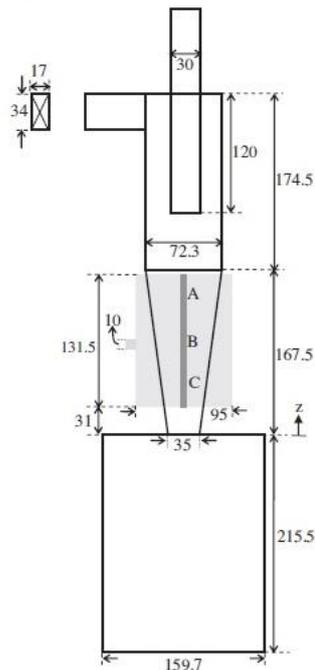
De acordo com Brar; Sharma e Elsayed (2015), o comprimento do ciclone afeta diretamente a queda de pressão nesse equipamento e, conseqüentemente, sua eficiência de coleta. Os autores avaliaram o efeito do comprimento tanto do cilindro quanto do cone no desempenho do ciclone de Stairmand em escoamento multifásico. Foram confeccionados cinco modelos para ambos os parâmetros geométricos analisados, com respectivas malhas hexaédricas com, aproximadamente, 399.924 elementos. As simulações realizadas por meio do software FLUENT®, as equações de Navier-Stokes foram discretizadas utilizando o método dos volumes finitos (FVM – *Finite Volume Method*) e como modelo de turbulência foi utilizado o *Reynolds Stress Model* (RSM).

Com o aumento do comprimento do cilindro em até 5,5 vezes o diâmetro do ciclone foi possível reduzir em torno de 34% a queda de pressão, o que acarretou um aumento de eficiência de coleta em aproximadamente 9,5%. Já aumentando o comprimento do cone em até 6,5 vezes o diâmetro do ciclone, foi alcançada uma redução próxima de 29% na queda de pressão e um aumento de cerca de 11% na eficiência de coleta. Além disso, a intensidade da turbulência no interior dos equipamentos foi reduzida de forma mais efetiva com o aumento do comprimento do cone quando comparado com o aumento do comprimento do cilindro. Diante disso, os autores concluíram que quando se deseja uma máxima eficiência de coleta é mais conveniente aumentar o comprimento do cone do que o comprimento do cilindro.

Huang, A. N. et al. (2017) avaliaram os efeitos de uma fenda na seção cônica de um ciclone nos perfis de escoamento de gás e na eficiência de separação de partículas por meio de resultados experimentais e simulação em CFD com escoamento multifásico. Os autores compararam três geometrias de ciclone que possuíam fenda no cone com um ciclone convencional. A fenda, de comprimento igual a 44,1 mm, estava localizada na parte superior, média ou inferior da seção cônica (Figura 2.1). Esta seção foi revestida com o intuito de realizar a coleta de partículas antes de serem conduzidas para o *vortex finder*. As simulações foram realizadas no software FLUENT® e o FVM foi utilizado para resolver as equações de Navier-Stokes, em estado estacionário, juntamente com o modelo de turbulência *Reynolds Stress Model* e com a abordagem Lagrangiana para a DPM.

O acoplamento da fenda proporcionou um aumento no movimento radial do fluxo de gás, uma melhoria na eficiência do equipamento em coletar partículas mais finas (menores que  $1\ \mu\text{m}$ ) e uma redução da saída do gás pelo *vortex finder*. Além disso, a eficiência de separação (80,7%) foi maior para o ciclone com uma fenda na parte inferior da seção cônica quando comparado a um ciclone convencional (74,5%).

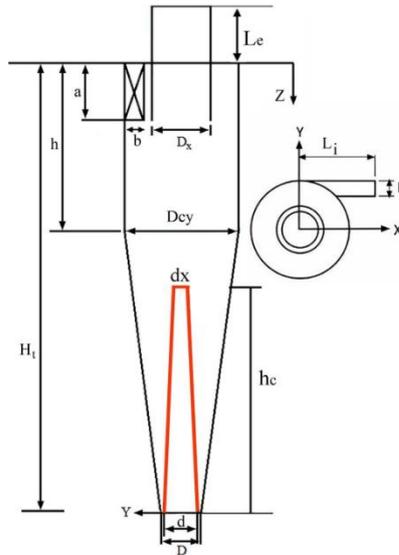
Figura 2.1 – Representação esquemática do ciclone (mm) em que: A, B e C indicam os locais da fenda e a região sombreada indica o revestimento



Fonte: Adaptada de Huang, A. N. et al. (2017).

Com o intuito de avaliar, a partir de uma alteração geométrica, o desempenho de um ciclone, Parvaz et al. (2018) realizaram simulações em CFD com escoamento multifásico utilizando o modelo de turbulência RSM e a abordagem Euleriana-Lagrangiana para a modelagem da fase discreta. Esta alteração foi promovida pelo acoplamento de um cone interno invertido com diferentes diâmetros e alturas localizado na parte inferior do ciclone (Figura 2.2). Além do desempenho, a taxa de erosão causada por partículas de carbonato de cálcio com diferentes velocidades também foi avaliada utilizando o modelo de erosão DNV (*Det Norske Veritas*).

Figura 2.2 – Ciclone com cone interno invertido



Fonte: Parvaz et al. (2018).

Os autores verificaram que com o aumento do diâmetro do cone interno, a eficiência de coleta do ciclone diminui. Por outro lado, o aumento da altura do cone interno favorece o aumento da eficiência do ciclone. Comparando o ciclone do referido estudo com o ciclone convencional, esse último apresenta uma maior eficiência de coleta, contudo, a presença de um cone interno reduz o retorno de partículas capturadas e também gera uma maior economia.

Em relação à erosão foi observado que quando o diâmetro e altura do cone interno aumentam, a taxa de erosão também aumenta. Em comparação, o ciclone convencional apresenta a maior taxa de erosão provocada pelas partículas do que o ciclone com o cone interno.

#### 2.1.1.1 Alterações no duto de alimentação de ciclones

Por meio de experimentos e simulações utilizando as técnicas de CFD, Yang; Sun e Gao (2013) analisaram o efeito das dimensões de entrada na altura ideal do ciclone (denominada de altura do ciclone de máxima eficiência).

Os autores variaram as dimensões da entrada do ciclone, indicadas pelo parâmetro KA (proporção entre a seção transversal do cilindro e a seção transversal da entrada), da seguinte forma: 3; 5,5 e 8. E a altura do ciclone foi modificada alterando somente a altura da seção cônica, a qual foi determinada pela relação entre a altura do cone e o diâmetro do ciclone com valores iguais a: 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10.

A partir dos resultados experimentais foi possível observar que a altura ideal do ciclone (que maximizava a sua eficiência) era menor à medida que a dimensão da entrada era reduzida.

E por meio das simulações em CFD, os autores perceberam uma significativa relação entre a mudança da altura ideal do ciclone e o comprimento do *vortex finder*, o qual conseqüentemente foi menor com a redução das dimensões da entrada.

A extensão do comprimento do *vortex finder* foi provocada pelo aumento da altura do cone, resultando numa maior eficiência de separação. No entanto, foi ressaltado que a posição da extremidade do *vortex finder* não deve adentrar o espaço da seção cônica, o que acarretaria, segundo os autores, na diminuição da eficiência de separação. Sendo assim, foi concluído que o efeito das dimensões da entrada na altura do ciclone de máxima eficiência está diretamente relacionado ao efeito dessas dimensões da entrada no comprimento do *vortex finder*.

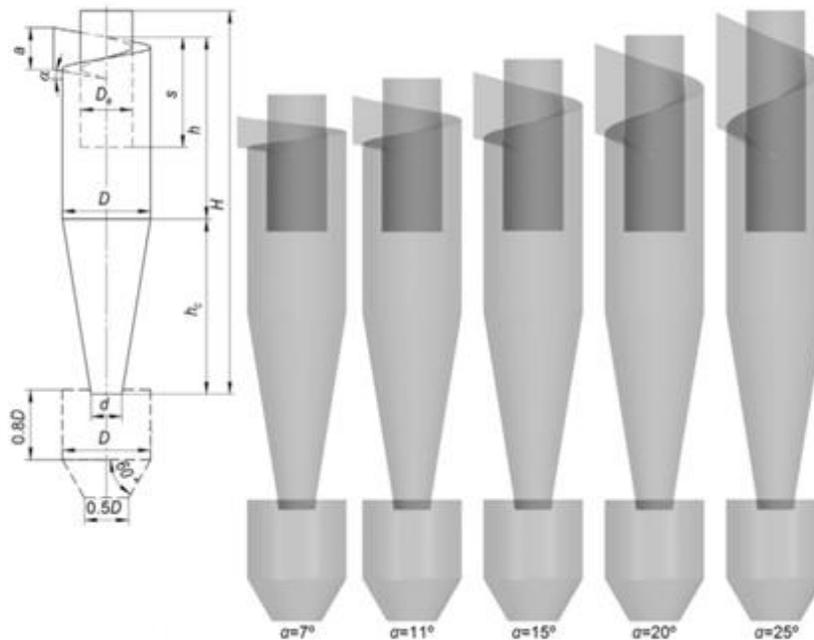
Duan et al. (2015) realizaram simulações do escoamento monofásico em ciclones com diferentes diâmetros de tubos de saída e dimensões de entrada utilizando o *Reynolds Stress Model* (RSM) e a abordagem Euleriana. As malhas das geometrias dos ciclones foram estruturadas por meio do software GAMBIT<sup>®</sup>, as quais apresentaram 600.000 elementos, aproximadamente. Os valores dos diâmetros do tubo de saída (*vortex finder*) foram determinados pela relação entre o diâmetro do *overflow* e o diâmetro do ciclone ( $D_o/D$ ), compreendidos na faixa de 0,25 a 0,7; com intervalo de 0,05. E os valores de dimensões de entrada definidos por KA, que foram iguais a 5; 10; 12,5; 15; 17,5 e 20.

Os resultados das simulações foram comparados com dados experimentais, e mostraram que a perda de energia diminuiu com o aumento da relação  $D_o/D$  e do parâmetro adimensional da entrada KA. Os autores ressaltaram que tanto o *vortex finder* quanto a entrada do *dust hopper* (coletor de poeira) foram os principais locais onde ocorre o maior consumo de energia nos ciclones avaliados.

Por meio de investigações computacionais em escoamento multifásico, Misiulia; Andersson e Lundström (2017) avaliaram os efeitos do ângulo de entrada na eficiência de coleta de um ciclone com entrada tipo cobertura-helicoidal (rampa), utilizando a abordagem Euleriana-Lagrangiana e o modelo de turbulência *Large Eddy Simulations* (LES) juntamente do modelo dinâmico *Smagorinsky-Lilly subgrid-scale* (SGS).

Os autores ressaltaram que a altura da seção de alimentação do ciclone com entrada tipo rampa depende diretamente do ângulo de entrada. Assim sendo, foram confeccionados cinco ciclones de mesmo diâmetro interno (240 mm) com diferentes ângulos de entrada, sendo os valores utilizados iguais a 7, 11, 15, 20 e 25° (Figura 2.3). As simulações foram conduzidas com malhas hexaédricas que foram geradas pelo software ANSYS MESHING<sup>®</sup>, estas malhas apresentaram cerca de 1,3 a 1,5 milhões de elementos.

Figura 2.3 – Dimensões e configurações dos ciclones estudados por Misiulia; Andersson e Lundström (2017)



Fonte: Adaptada de Misiulia; Andersson e Lundström (2017).

Os resultados obtidos revelaram que com o aumento do ângulo de entrada houve também o aumento do diâmetro de corte  $d_{50}$  (correspondente ao diâmetro da partícula coletada com eficiência de separação de 50% em relação à curva de separação), resultando na redução da eficiência da coleta do ciclone. Além disso, o coeficiente de queda de pressão foi reduzido, o que acarretou em perdas de carga mais baixas. Para os casos em que é necessária uma alta eficiência de separação com queda de pressão moderada, o valor do ângulo de entrada do ciclone, sugerido pelos autores, deve ser igual a 11 ou 15°.

### 2.1.2 Alterações em hidrociclones

Vieira (2006) propôs um planejamento composto central considerando quatro variáveis geométricas: diâmetro da alimentação ( $D_i$ ), diâmetro de *overflow* ( $D_o$ ), comprimento total do hidrociclone ( $L$ ) e ângulo do tronco de cone ( $\theta$ ). A partir deste planejamento, o autor avaliou experimentalmente 25 configurações de hidrociclones em quatro condições de queda de pressão (0,9; 1,2; 1,5 e 1,8 kgf/cm<sup>2</sup>) e utilizou as técnicas de superfície de resposta para quantificar a influência de cada variável geométrica.

Diante dos resultados obtidos observou-se que todas as variáveis geométricas foram relevantes para o número de Euler e diâmetro de corte. Dentre as variáveis, o  $D_i$  e o  $D_o$  foram as quais proporcionaram, respectivamente, uma maior influência nesses dois parâmetros.

A partir da nomenclatura utilizada pelo autor, o hidrociclone H16 foi relatado como o equipamento que apresentou as melhores condições em relação ao número mínimo de Euler (menor custo de energético) e o hidrociclone H19 foi o que exibiu as melhores condições de diâmetro de corte (maior eficiência). Os hidrociclones H9, H10, H11 e H12 foram os quais apresentaram, em combinação, baixos números de Euler com diâmetros de corte pequenos. Sendo, entre estas configurações, o hidrociclone H11 a melhor configuração geométrica obtida pelo autor.

Por meio da técnica de Evolução Diferencial, Silva (2012) formulou e resolveu um problema de otimização a fim de determinar uma configuração geométrica de hidrociclone que apresentasse uma máxima eficiência total de separação de partículas. Ressalta-se que esta otimização foi realizada a partir dos dados experimentais obtidos por Vieira (2006), que avaliou 25 configurações geométricas de hidrociclones. Além do mais, com o intuito de validar a metodologia proposta, o autor realizou testes experimentais com a geometria obtida a partir do estudo de otimização. Os experimentos realizados utilizando uma suspensão de concentração sólida a 1% em volume.

O autor obteve uma configuração otimizada, que foi denominada de HCOT1. Esta geometria em comparação com a configuração H19 obtida por Vieira (2006), apresentou uma eficiência total 12,50% maior e um número de Euler 30% menor ( $Eu = 2150$ ), sob as mesmas condições de operação. Diante dos resultados, o autor concluiu que o hidrociclone HCOT1 apresenta um elevado desempenho, ou seja, maior eficiência e menores custos operacionais de energia. E em relação a eficiência total reduzida, que considera apenas a separação centrífuga descontando o efeito de divisão de fluxo, o hidrociclone HCOT1 também foi o mais eficiente. Uma vez que, em comparação com todos os 25 hidrociclones, este equipamento apresentou uma eficiência total reduzida de 73,90%. O autor também ressaltou que os resultados experimentais confirmaram a previsão do algoritmo de Evolução Diferencial.

Cinco diferentes geometrias de hidrociclone foram estudadas por Delgadillo et al. (2012). Esses autores verificaram, em comparação com dados experimentais, o efeito do diâmetro do *vortex finder*, do diâmetro de *underflow* e do ângulo do cone na classificação de partículas. Os autores conduziram simulações, realizadas por meio do software FLUENT®, que foram executadas até que se atingisse o estado estacionário, resultando em um tempo real de 2 s simulados com um *time step* de 0,0005 s. O modelo de turbulência utilizado pelos autores foi o LES e para a modelagem da fase dispersa foi utilizada a abordagem Lagrangiana.

Os resultados obtidos revelaram que a redução do diâmetro do *vortex finder* proporcionou uma diminuição no diâmetro de corte  $d_{50}$ , por causa do aumento da pressão

interna no hidrociclone. E a redução do diâmetro de *underflow* gerou um aumento no diâmetro de corte  $d_{50}$ . Por fim, os autores relataram que o diâmetro de corte  $d_{50}$  aumentou com a redução do ângulo do cone. A modificação desse ângulo alterou a relação entre a divisão de fluxo e a queda de pressão do sistema, além de modificar o tempo de residência do fluido no hidrociclone, o que afetou o processo de classificação.

He et al. (2013) avaliaram, por meio do equipamento denominado de analisador de partículas por fase *Doppler*, a influência da profundidade da inserção do *vortex finder* nas características do escoamento bifásico em mini-hidrociclones ( $D_c = 25$  mm). Foram confeccionadas cinco malhas com proporções distintas entre a profundidade do *vortex finder* e diâmetro do hidrociclone e entre a profundidade do *vortex finder* e comprimento da seção cilíndrica. Os autores analisaram as distribuições de velocidade, concentração e diâmetro médio das partículas.

Os resultados mostraram que velocidade tangencial foi menor na seção transversal próxima à seção cilíndrica do hidrociclone com inserção do *vortex finder* de maior profundidade; isso ocorreu devido à perda de energia do movimento de rotação de alimentação que é utilizado para superar o *vortex finder*. Quando a profundidade de inserção do *vortex finder* atingiu a seção cônica, ocorreu uma forte turbulência próxima ao *vortex finder*, fazendo com que as partículas escapassem por esse local. Essa forte turbulência também aconteceu quando parte do fluxo mudou a sua direção de fluxo ascendente helicoidal externo para interno. Em relação à distribuição do diâmetro médio das partículas, a mesma apresentou uma tendência decrescente no sentido da parede ao centro do mini-hidrociclone.

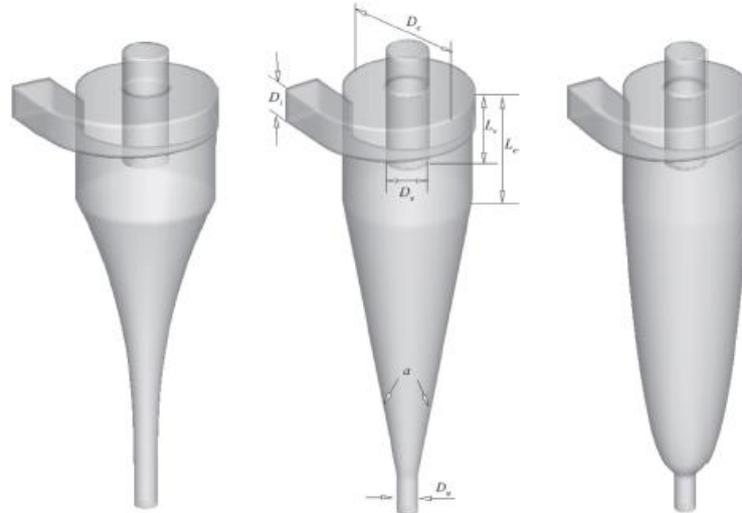
Segundo Ghodrati et al. (2014), de forma geral, os hidrociclones com projetos convencionais podem apresentar algumas limitações no desempenho de separação. Assim, esses autores realizaram um estudo numérico de hidrociclones com diferentes configurações da seção cônica por meio de técnicas de CFD utilizando o modelo de dois fluidos (TFM – *Two-Fluid Model*), que trata as fases fluida (líquida e ar) e sólida como contínuas interpenetradas. E o escoamento turbulento da mistura líquido-gás-sólido foi modelado usando o RSM.

Para as três novas configurações da seção cônica, duas variáveis geométricas foram consideradas: o comprimento, que variou de 35 a 385 mm e formas da seção cônica (Figura 2.4), as quais compreenderam o côncavo ( $c^1 < 1$ ), reto (geometria convencional,  $c=1$ ) e convexo ( $c > 1$ ). Todos os hidrociclones estudados possuíram o mesmo *vortex finder*, a mesma seção cilíndrica e de alimentação.

---

<sup>1</sup> Em que  $c$  é referido como o fator de forma cônica e varia entre 0,3 e 3.

Figura 2.4 – Hidrociclones com seção cônica de diferentes formas em que: da esquerda para a direita - o côncavo, reto e convexo



Fonte: Ghodrati et al. (2014).

Os autores relataram por meio dos resultados numéricos que o desempenho do hidrociclone foi sensível ao comprimento e forma da seção cônica, bem como à concentração de sólidos na alimentação. Um comprimento mais longo da seção cônica pode reduzir a queda de pressão de entrada e o diâmetro de corte  $d_{50}$ .

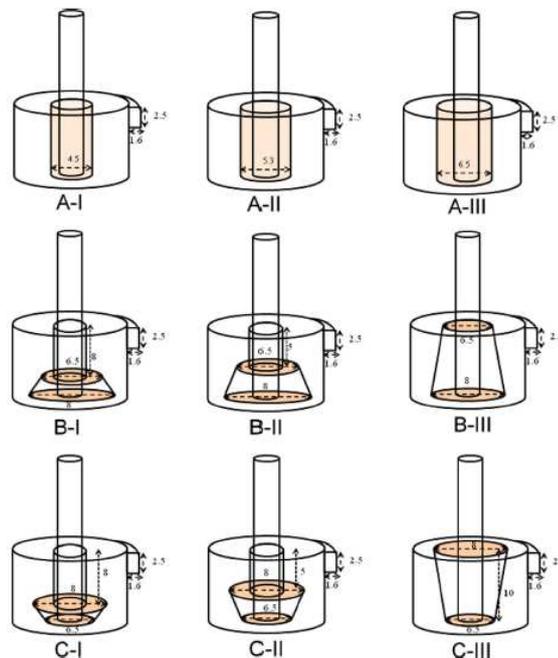
Em relação à forma cônica, que varia gradualmente dos formatos côncavo para convexo, foi observado que um desempenho ideal foi obtido pelo hidrociclone com um cone convexo, o que resultou em uma queda de pressão de entrada relativamente pequena e em um mínimo  $E_p$  (probabilidade de “fuga”) – relativo a  $\frac{d_{75C} - d_{25C}}{2}$ , em que  $d_{75C}$  e  $d_{25C}$  são os diâmetros de partículas coletadas com 75 e 25% de eficiência, respectivamente.

Wang e Wu (2017) propuseram um novo tipo de hidrociclone, acoplando ao tubo do *overflow* uma membrana tubular, a qual fora responsável por filtrar as partículas e permitir a passagem do fluido próximo ao tubo *overflow*. Essa membrana foi confeccionada em acrílico e em cerâmica, ambos de 30 mm. Os autores realizaram as simulações por meio do software FLUENT® com base no método LES e no *Reynolds Stress Model* (RSM) para modelagem turbulenta e para a modelagem da fase discreta (DPM) foi utilizada a abordagem Lagrangiana

Em comparação ao hidrociclone convencional, o novo hidrociclone obteve uma menor turbulência no *overflow* e uma maior concentração no *underflow*. No entanto, a eficiência de separação foi similar. Além disso, os autores ressaltaram que esta nova configuração é adequada para aplicações em que as partículas de metais preciosos precisam ser recuperadas no *underflow*.

Hwang e Chou (2017) projetaram hidrociclones com o mesmo diâmetro interno (10 mm), alterando somente o *vortex finder*, que apresentou diâmetros e geometrias diferentes. Os hidrociclones foram nomeados como tipo A, B e C (Figura 2.5) e para cada um desses foram confeccionadas três malhas distintas. O tipo A apresentava espessuras de *vortex finder* uniformes, porém com diâmetros diferentes: 1,0; 1,4 e 2,0 mm. Na superfície externa dos *vortex finders* dos hidrociclones dos tipos B e C foram acoplados um tronco cônico com comprimentos de 2, 5 e 10 mm e os diâmetros dos planos superiores e inferiores foram iguais a 6,5 e 8,0 mm, respectivamente. Em comparação com o tipo B, o tipo C teve estruturas de tronco cônico inversas.

Figura 2.5 – Diferentes conformações para *vortex finder*



Fonte: Hwang e Chou (2017).

O software GAMBIT<sup>®</sup> foi utilizado pelos autores para a criação da geometria dos hidrociclones e das malhas, que foram empregadas na forma hexaédrica e não estruturadas com, aproximadamente, 120.000 elementos. As trajetórias das partículas e o escoamento do fluido foram simulados utilizando o software FLUENT<sup>®</sup> utilizando o RSM devido à turbulência anisotrópica e a abordagem Lagrangiana foi utilizada para a definição da trajetória das partículas.

Os autores relataram que uma maior eficiência de separação de partículas pode ser obtida quando o *vortex finder* é mais espesso, uma vez que uma maior velocidade é mantida na parte cilíndrica. Essa configuração também proporcionou o aumento da queda de pressão através do hidrociclone e um menor tempo de residência de partículas. A incorporação de

troncos cônicos na superfície externa dos *vortex finders* também proporcionou uma melhor eficiência de separação. Nesse contexto, o tipo C foi o que apresentou maior eficiência de separação de partículas, seguido do tipo B e do tipo A.

A fim de reduzir o deslocamento das partículas grosseiras em torno das paredes do *vortex finder*, Vakamalla et al. (2017) desenvolveram novos projetos de hidrociclone em que substituíram o tubo do *vortex finder* reto por um cônico (forma de tronco) com espessuras diferentes. Além disso, utilizaram um ângulo de cone pequeno, pois, segundo os autores, neste caso pode reduzir a saída de água pelo *underflow* e, conseqüentemente, menores quantidades de partículas finas seriam arrastadas para esse tubo. O CFD foi utilizado para descrever o escoamento multifásico no interior dos hidrociclones, o modelo de turbulência adotado pelos autores foi *Reynolds Stress Model* e o modelo de Mistura de deslizamento algébrico (ASM – *Algebraic Slip Mixture*) foi utilizado para prever a classificação de partículas por meio da abordagem Lagrangiana.

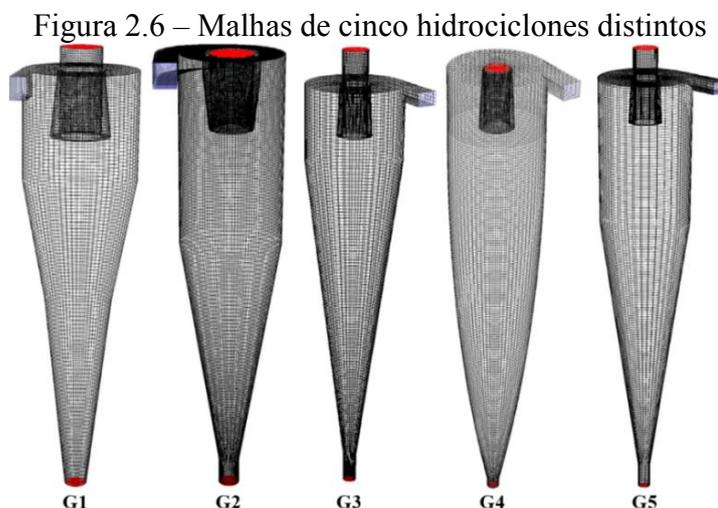
Os autores confeccionaram cinco malhas distintas (G1, G2, G3, G4 e G5) (Figura 2.6), sendo uma referente ao convencional, com aproximadamente, 203.399 elementos. A geometria G1 consistiu numa secção de alimentação tangencial, *vortex finder* cônico com um cilindro curto seguido por duas seções cônicas com ângulos de 20 e 10°. A geometria G2 foi denotada como padrão, o qual apresentou um diâmetro interno do *vortex finder* e *underflow* 0,4 e 0,2 vezes o diâmetro do hidrociclone, respectivamente, e ângulo de cone igual a 20°. A geometria proposta G3 era composta por um pequeno ângulo de cone (10°), secção de alimentação tangencial, *vortex finder* cônico (de menor espessura em comparação com G1) com cilindro curto seguido de longa secção cônica. A configuração G4, descrita como inovadora, apresentava corpo parabólico terminado com um ângulo de cone pequeno (10°), secção de alimentação tangencial, *vortex finder* cônico (espessura igual à geometria G3). E por fim, a geometria G5 foi uma configuração alterada de G2, o qual apresentou secção cilíndrica semelhante, modificação do ângulo da secção cônica de 20 para 10° e mudança no *vortex finder*, cônico com um ângulo de 2°, direcionado para diminuir a partícula grosseira.

Em comparação com a geometria convencional, todas as novas configurações mostraram altas velocidades tangenciais, um diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) baixo e alta nitidez de separação<sup>2</sup>. A substituição do *vortex finder* de tubo cilíndrico linear pelo cônico reduziu o deslocamento da partícula grosseira no *overflow*. O cone longo proporcionou um tempo de

---

<sup>2</sup> É dependente da inclinação da curva de eficiência granulométrica e comumente medida pela razão entre dois tamanhos, que correspondem a dois diferentes percentuais (simétricos em torno de 50%) na curva de eficiência granulométrica. Quanto maior a nitidez de separação, melhor é a eficiência de separação do processo.

residência suficiente para que todas as partículas fossem separadas com base nas forças centrífugas e permitiu também um menor diâmetro de corte.



Fonte: Adaptada de Vakamalla et al.(2017).

Brito-Parada et al. (2018) avaliaram as consequências da alteração do diâmetro e da altura do *vortex finder* e do diâmetro do *underflow* na eficiência de separação da levedura em mini-hidrociclones. Estes equipamentos foram produzidos por impressão 3D em acrílico transparente. Para os experimentos, foi selecionada uma suspensão diluída da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, com concentração de 0,5 g/L.

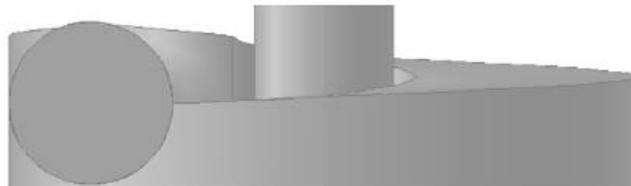
Os resultados obtidos revelaram que a recuperação da levedura foi afetada por todas variáveis geométricas avaliadas, sendo que os diâmetros do *vortex finder* e do *underflow* apresentaram um efeito maior do que a altura do *vortex finder*. Valores mais baixos para a altura do *vortex finder* resultaram em maiores recuperações de levedura, uma vez que altos valores de altura do *vortex finder* reduziram o fluxo e conseqüentemente, a porcentagem de sólidos coletados no *underflow*.

Em relação à razão de concentração, essa foi maior à medida que se reduziu o diâmetro do *underflow*, isso pode ter ocorrido pelo fato de pressões mais altas serem esperadas devido à redução do diâmetro de saída. Este parâmetro não foi influenciado pela altura do *vortex finder*, o que indica que essa variável pode ser ajustada para otimizar a recuperação sem comprometer as taxas de concentração que podem ser alcançadas.

### 2.1.2.1 Alterações no duto de alimentação de hidrociclones

Silva (2012) analisou diversas propostas de alterações para o hidrociclone HC11 (Hidrociclone Convencional caso 11), uma das quais foi modificar a estrutura de entrada deste equipamento. Em uma avaliação numérica, o autor utilizou uma alimentação do tipo rampa, com o objetivo de reduzir a perda de carga no interior do equipamento e aumentar o seu rendimento. A rampa proposta foi projetada de forma que finalizasse na metade do diâmetro da alimentação ( $D_i = 7,8$  mm) (Figura 2.7), uma vez que seção final da rampa em relação ao duto de alimentação é muito importante no escoamento. Sendo assim, a análise da influência da alimentação do tipo rampa no desempenho do hidrociclone HC11 foi realizada por meio das técnicas de CFD utilizando o modelo de turbulência RSM, a malha utilizada na simulação apresentou, aproximadamente, 117.059 elementos.

Figura 2.7 – Alimentação do tipo rampa

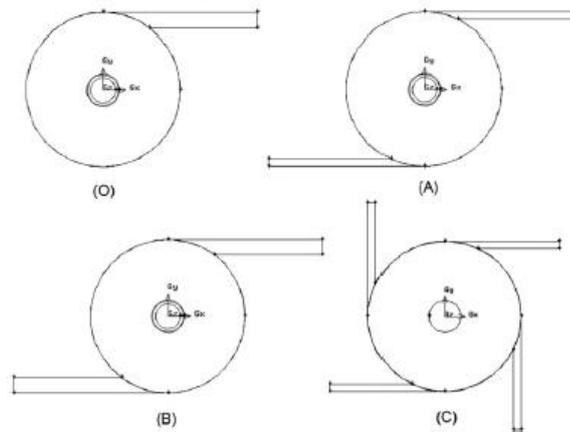


Fonte: Silva (2012).

Segundo o autor foi possível prever, a partir das técnicas de CFD, a redução da perda de carga no interior do hidrociclone HC11 com a alimentação do tipo rampa (RHC). Sendo esta queda de pressão aproximadamente 25% menor que o HC11 convencional, conseqüentemente o consumo energético foi menor, devido à maior facilidade para o escoamento.

Hwang; Hwang e Yoshida (2013) analisaram o desempenho de hidrociclones com diferentes tamanhos e números de entrada, os quais foram testados com a mesma vazão volumétrica de alimentação. As quatro geometrias e suas respectivas malhas hexaédricas foram confeccionadas no software GAMBIT<sup>®</sup>, essas malhas apresentaram, aproximadamente, 160.000 elementos. Todas as entradas eram do tipo tangencial e de seção transversal retangular com mesma altura (6 mm) (Figura 2.8), sendo que a original foi denominada como tipo O, a qual apresentava uma única entrada com largura de 2 mm; os tipos A e B eram providos de duas entradas, com larguras de 1 e 2 mm, respectivamente, e o tipo C com quatro entradas com largura de 1 mm.

Figura 2.8 – Diferentes configurações de alimentação de um hidrociclone



Fonte: Hwang; Hwang e Yoshida (2013).

As simulações numéricas tridimensionais em escoamento multifásico foram realizadas com o auxílio do software FLUENT<sup>®</sup>. O modelo utilizado para as trajetórias das partículas foi o Lagrangeano de segregação de partículas e o modelo de turbulência empregado foi o *Reynolds Stress Model*. Os resultados em relação à eficiência de separação de partículas obtidos por meio das simulações foram comparados com dados experimentais. Os autores descreveram que ao aumentar o número de entradas e diminuir a largura das mesmas é possível melhorar a eficiência de separação de partículas, devido à retenção por mais tempo da energia cinética e ao aumento da velocidade do fluido, ambos na parte cilíndrica do hidrociclone.

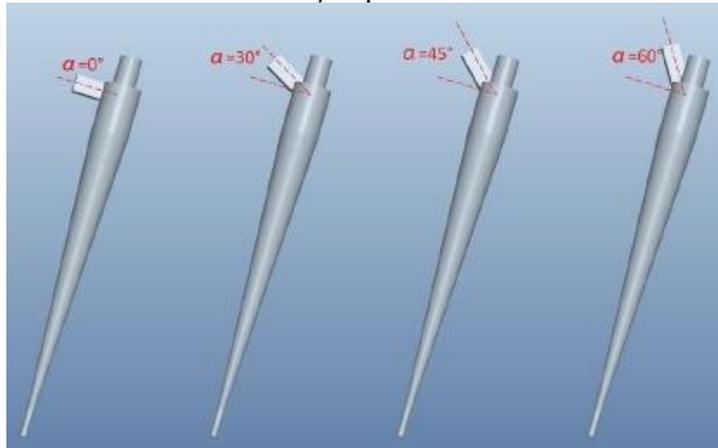
Yan; Yang e Wang (2014) utilizaram o software FLUENT<sup>®</sup> para simular a eficiência de separação de partículas finas e o escoamento da fase contínua e da fase dispersa de mini-hidrociclones, utilizando o modelo de turbulência RSM e a abordagem Lagrangiana para a trajetória das partículas. Esses equipamentos com diâmetro de 25 mm foram confeccionados por meio do software Icem CFD<sup>®</sup> com diferentes tamanhos de entrada (diferentes proporções entre largura e altura -  $W:H$ ) e mesma área de seção transversal de 24 mm<sup>2</sup>. Este software foi utilizado também para gerar as malhas hexaédricas.

Os autores relataram que os diferentes tamanhos de entrada dos mini-hidrociclones não afetaram a distribuição das velocidades tangencial, radial e axial; no entanto, afetaram a magnitude dessas velocidades, sendo a velocidade axial a que apresentou menor magnitude. E em relação à eficiência de separação, o melhor desempenho foi obtido pelo hidrociclone com menor proporção de largura-altura ( $W:H = 1:3$ ).

Com o objetivo de analisar os efeitos do ângulo da seção de entrada no desempenho de separação de mini-hidrociclones, Fan et al. (2015) utilizaram a técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV – *Particle Image Velocimetry*) para avaliar o escoamento. Os autores

avaliaram mini-hidrociclones com quatro diferentes ângulos de seção de entrada ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ ) e diâmetro da seção cilíndrica igual a 35 mm (Figura 2.9), os quais foram confeccionados em vidro de sílica para a geração de imagens, que posteriormente foram analisadas pelo software PIV<sup>®</sup>.

Figura 2.9 – Duto de alimentação posicionado em diferentes ângulos



Fonte: Fan et al. (2015).

Os resultados indicaram que o ângulo da seção de entrada melhorou o desempenho da separação e classificação de partículas com diâmetro de 4 a 7  $\mu\text{m}$ , sendo o ângulo de  $30^\circ$  o ideal para esse caso. No entanto, para partículas com diâmetro maior que 15  $\mu\text{m}$ , a variação do ângulo do duto de alimentação não apresentou melhorias na eficiência de separação.

Por meio de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD), Tang et al. (2017) estudaram os efeitos da configuração de entrada na classificação de hidrociclones. Os hidrociclones foram confeccionados e simulados em malhas hexaédricas com, aproximadamente, 259.000. As simulações numéricas tridimensionais foram conduzidas utilizando o RSM para prever o forte fluxo rotativo considerando a natureza anisotrópica da turbulência e o modelo estocástico de Lagrange para descrever a trajetória das partículas.

Os autores ressaltaram que compreender o mecanismo dessas configurações na eficiência e nitidez de separação contribui de forma significativa para a melhoria do desempenho de hidrociclones. Sendo assim, as diferentes configurações de entrada foram definidas conforme a relação entre o diâmetro da alimentação e o diâmetro da seção cilíndrica ( $D_i/D_c$ ), a qual variou de 0,3 a 0,4.

Os resultados mostraram que ao analisar as partículas menores que 20  $\mu\text{m}$ , a eficiência de classificação foi ligeiramente alterada quando houve a variação da relação  $D_i/D_c$ , possibilitando afirmar que as partículas apresentaram bom seguimento com o fluido nos

hidrociclones. Já para a classificação das partículas maiores do que 20  $\mu\text{m}$ , os autores observaram que o diâmetro da entrada afetou significativamente a eficiência, sendo que essa diminuiu com o aumento da relação  $D_i/D_c$ , devido ao fluxo de curto-circuito, uma vez que com  $D_i/D_c > 0,35$  ocorreu um elevado escape das partículas densas pelo *overflow*.

Com o objetivo de avaliar o efeito do aumento do número de entradas no desempenho de um hidrociclone, Alamatian e Nasiri-Kalat (2018) realizaram testes experimentais em um hidrociclone contendo duas alimentações com 80 mm de diâmetro cada.

Os resultados mostraram que ao aumentar o número de entradas a eficiência de remoção de sólidos aumentou em 77% e proporcionou ao equipamento a remoção de partículas menores. Além disso, os autores ressaltaram que a temperatura local não é efetiva na taxa de remoção de partículas no hidrociclone.

Diante dos trabalhos reportados, pode-se inferir que as alterações geométricas realizadas em hidrociclone é um tema bastante empregado para a melhorar o desempenho deste equipamento. Sendo assim, ressalta-se que estes estudos são de extrema importância, em especial os que realizaram alterações na alimentação de hidrociclones, pois vão de acordo com a proposta do presente estudo; proporcionando o embasamento e compreensão do assunto.

## 2.2 Fluidodinâmica computacional (CFD)

Os fenômenos que envolvem o movimento de fluidos podem ser considerados complexos. Sendo assim, devido ao avanço das técnicas computacionais, empregou-se uma alternativa para avaliar a dinâmica dos fluidos através de simulações numéricas. Esta alternativa, denominada como fluidodinâmica computacional, é provida de características que complementam as técnicas experimentais descritas na mecânica dos fluidos (SIMÕES, 2005).

Segundo Alves (2011), ao se iniciar um projeto de simulação em CFD, é necessário avaliar o problema com o objetivo de determinar quais são as variáveis mais relevantes no processo e quais podem ser simplificadas ou desconsideradas. Sendo assim, nesta etapa definem-se os fenômenos físicos que atuam em um determinado problema e como as mesmas o afetam.

Posteriormente, deve-se escolher o modelo que descreva matematicamente os fenômenos envolvidos no caso estudado. Este modelo deve ser tratado computacionalmente; para isso, apresentam-se adequadamente as equações e o volume de controle em que essas serão válidas. Inicialmente, o domínio é discretizado, uma vez que a obtenção de soluções numéricas sobre uma região contínua é impossível por causa dos infinitos pontos providos dessa região.

Assim, a discretização divide o domínio em um número finito de pontos, definidos como nós, onde as equações são solucionadas (unicamente nesses pontos). E as resoluções dessas equações, a partir da discretização do domínio, deixam de ser através de equações diferenciais, substituindo-se as derivadas por equações diferenciais parciais resolvidas numericamente (FORTUNA, 2000; SCHÄFER, 2006).

### 2.2.1 Aplicações em engenharia de alimentos

Por meio de técnicas de CFD, Choi et al. (2013) desenvolveram um modelo tridimensional para descrever o fenômeno de incrustação em trocadores de calor de placas durante o processo de pasteurização do leite. O software AutoCAD<sup>®</sup> foi utilizado para a confecção das geometrias destes equipamentos e as malhas tetraédricas foram geradas no GAMBIT<sup>®</sup>.

Os resultados mostraram que a taxa de incrustação foi menor à medida que se aumentava o fluxo de leite desnatado, isso pode ter ocorrido por causa das tensões de cisalhamento, que foram maiores nas superfícies dos trocadores de placas. Além disso, a temperatura da placa interferiu de modo significativo em relação à taxa de incrustação. Assim, por apresentar temperaturas mais elevadas, a placa inferior apresentou maiores taxas de incrustações. Segundo os autores, isso pode ter ocorrido devido às altas temperaturas encontradas na superfície de trocadores de calor, que favorecem as reações químicas, fazendo com que os compostos orgânicos presentes em elevadas concentrações formem precursores, os quais em seguida se depositam na superfície.

Por meio de simulações numéricas utilizando as técnicas de CFD, Faleiros et al. (2014) avaliaram o comportamento do escoamento granular em um leito de jorro bidimensional com alimentação não convencional. Posteriormente, os autores compararam os resultados numéricos com dados experimentais obtidos por Chen (2008).

A geometria do leito de jorro foi confeccionada com o auxílio do software comercial ANSYS<sup>®</sup> DesignModeler<sup>™</sup> 14.0 e sua respectiva malha foi gerada no software ANSYS<sup>®</sup> ICEM CFD<sup>™</sup> 14.0, sendo esta do tipo não-estruturada, tridimensional, hexaédrica e com aproximadamente 311.800 elementos. O modelo utilizado para descrever o escoamento multifásico foi o modelo Euleriano granular multifásico (MEGM – *Multiphase Eulerian Granular Model*), que trata as fases gasosas e sólidas como mutuamente interpenetradas.

Diante dos resultados, foi possível observar uma boa semelhança dos resultados numéricos de queda de pressão com os dados experimentais de Chen (2008). Sendo, o regime

de jorro interno o de maior conformidade, apresentando um valor simulado de 7,972 kPa e experimental de 7,894 kPa para queda de pressão, com um erro relativo baixo (0,988%). Com isso, os autores concluíram que as técnicas de CFD podem fornecer uma predição de geometrias e condições operacionais a um *scale-up* deste leito de jorro.

Com o intuito de estudar a transferência de calor e massa na secagem por convecção de damascos, Cârlescu et al. (2017) realizaram simulações a partir das técnicas de CFD, em regime de fluxo instável, sendo que os damascos foram representados por uma geometria (calota esférica de base grande) que não apresentasse mudança ao longo do tempo.

Os resultados em relação à umidade e temperatura obtidos por simulação foram comparados com os dados experimentais. A distribuição de temperatura ao redor do damasco mudou consideravelmente com tempo, devido à intensificação da transferência de calor através da convecção; sendo assim, tem-se que a transferência de calor é mais intensa na superfície externa e especialmente, na parte lateral em comparação com a parte inferior dos damascos. A distribuição da umidade na seção transversal do damasco ocorreu de forma irregular durante o processo de secagem e foi notada a formação de um gradiente de umidade no núcleo central, que registrou maiores valores de umidade na parte inferior do damasco.

Os autores afirmaram que foi possível encontrar uma boa correlação entre o experimento e a simulação, uma vez que os resultados experimentais estavam de acordo com os resultados previstos pela simulação em CFD.

Conforme descrito por Elgamal; Kishk e Elmasry (2017), na modelagem de processos de secagem de cereais, a validação é uma das etapas mais importantes, uma vez que a validação do modelo permite que o mesmo seja utilizado para aplicações práticas. Diante disso, os autores avaliaram o potencial da técnica de imagem térmica para validar modelos de simulação por meio da fluidodinâmica computacional (CFD), que foram desenvolvidos para descrever o processo de secagem em camada profunda de arroz áspero e para visualizar os perfis de temperatura ao longo do leito sob diferentes condições de secagem.

Os dados obtidos por meio da técnica de CFD para distribuições de umidade e temperatura foram comparados com os resultados experimentais. Após essa análise, os autores descreveram que o modelo desenvolvido apresentou um bom desempenho para prever o teor de umidade bem como a distribuição da temperatura do arroz áspero no interior do secador de camada profunda. Levando à conclusão de que as técnicas de CFD são precisas e podem ser utilizadas com segurança no ramo da engenharia de alimentos, em aplicações práticas que incluem a secagem.

Kim e Chung (2018) realizaram um estudo referente a granulação em leito fluidizado de alimentos em pó, considerando suas mudanças nas propriedades reológicas e teor de água. Com o objetivo de determinar um modelo para o comportamento desta granulação, os autores efetuaram simulações utilizando as técnicas de CFD.

Os autores conseguiram descrever com sucesso a nucleação e aglomeração de partículas com a evaporação da água e almejam que o trabalho de modelagem possa contribuir para a otimização dos processos de granulação de alimentos em pó nas condições de processo utilizadas. Os resultados da simulação apresentaram uma concordância relativamente boa com os resultados do processo experimental, exceto pela quebra de partículas, uma vez que a quebra e o atrito são muito difíceis de quantificar em nanopartículas. Diante disso, os autores ressaltaram a importância da inclusão de um modelo de quebra para trabalhos futuros.

Como a alteração volumétrica de partículas (encolhimento) é uma das importantes e complicadas mudanças físicas na secagem, Azmir; Hou e Yu (2019) realizaram o acréscimo de um modelo de redução de diâmetro de partículas ao modelo de secagem para grãos alimentícios por meio das técnicas de CFD. Primeiramente, os autores reproduziram as características de mistura, secagem geral, variação do diâmetro das partículas e retração incluindo partículas e umidade do ar. Em seguida, testaram o modelo comparando os dados previstos para a redução do volume com os dados experimentais da literatura.

Os resultados demonstraram a capacidade do modelo em prever as características de secagem e de redução de partículas. A taxa de encolhimento aumenta à medida que a temperatura do ar aumenta, entretanto, aumenta ligeiramente com o aumento da velocidade do ar de entrada. A uniformidade do tamanho do grão aumenta com a redução da temperatura do ar ou com o aumento da velocidade do ar.

Os estudos aqui apresentados mostram que as técnicas de fluidodinâmica computacional são amplamente utilizadas. E é notório que cada vez mais há o interesse de se compreender o comportamento no interior de diversos equipamentos, em especial na área de alimentos, em que estas técnicas podem proporcionar um melhor entendimento do alimento e por consequência proporcionar melhorias, por exemplo, na sua conservação.

### ***2.2.2 Aplicações em ciclones***

Segundo Sgrott Jr et al. (2015), a perda de carga e a eficiência da coleta são os parâmetros mais importantes para avaliar o desempenho de ciclones, sendo que os melhores equipamentos apresentam uma eficiência relativamente alta com baixa perda de carga. As

geometrias clássicas utilizadas para a confecção de ciclones são as de Stairmand e de Lapple, em que a primeira é utilizada quando necessita-se de uma alta eficiência de coleta, enquanto a segunda proporciona uma baixa queda de pressão.

Diante do exposto, os autores apresentaram uma nova geometria de ciclone de alta eficiência, situada entre as geometrias de Stairmand e Lapple. Objetivando a maximização da eficiência da coleta com uma restrição máxima de queda de pressão, realizaram simulações por meio de técnicas de CFD em três malhas ortogonais com refinamento de cerca de 1,2 entre cada malha, essa taxa de refinamento foi determinada para permitir que o erro proveniente da discretização fosse diferente das outras fontes de erro. O modelo utilizado para representar o fluxo gás-sólido nos ciclones avaliados foi o modelo de seis fases Euleriana-Euleriana (considera uma fase gasosa e cinco fases sólidas) e o modelo de turbulência da fase contínua foi formulado combinando o modelo  $k-\varepsilon$  para os componentes de tensão Reynolds radiais e axiais e a teoria da mistura de Prandtl para os componentes tangenciais.

Com isto, obtiveram um ciclone de configuração otimizada que apresentou, em comparação com os ciclones Stairmand e Lapple, uma eficiência de coleta cerca de 3,5% e 9,2% maior e queda de pressão de 6,3% e 11,4% menor, respectivamente. Os autores descreveram que esse aumento na eficiência com menor queda de pressão foi devido ao aumento da velocidade tangencial perto da parede e ao aumento no campo centrífugo provocado pelo deslocamento do pico da velocidade tangencial em direção à parede. E concluíram que a utilização de técnicas de CFD é viável tanto em termos de tempo e precisão, para avaliar objetivos em relação à otimização de ciclones.

Utilizando técnicas de CFD juntamente com o método de elemento discreto (DEM – *Discrete Element Method*), Chu et al. (2017) analisaram a influência de partículas de diferentes tamanhos no fluxo médio em um ciclone médio denso (DMC – *Dense Medium Cyclone*), uma vez que a avaliação do efeito das suas propriedades (tamanho, densidade e forma) permite um melhor entendimento sobre a influência da taxa de carga de sólidos no desempenho do ciclone. As simulações foram conduzidas utilizando a abordagem Euleriana-Euleriana e o modelo de turbulência RSM.

Os autores utilizaram partículas de carvão com diferentes diâmetros e densidades, variando de 0,25 a 60 mm e 1200 a 2200 Kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Sendo o efeito do tamanho da partícula dependente da sua densidade, verificaram que fluxos médios são afetados com relação ao tamanho da partícula, uma vez que essas podem apresentar diversas trajetórias em um ciclone. Isso ocorreu, provavelmente, devido à concorrência entre a força de arraste e a força do gradiente de pressão, o que levou as partículas para diferentes distribuições espaciais

da interação volumétrica partícula-fluido, resultando assim no impacto diferente sobre o escoamento do fluido.

Luciano et al. (2018) realizaram a otimização de três ciclones em série com base na modelagem por meio das técnicas de CFD utilizando modelo de turbulência  $k-\varepsilon$ -Prandtl e o método dos volumes finitos para resolver o modelo de seis fases Euleriana-Euleriana. Os autores avaliaram uma metodologia totalmente automatizada, com o intuito de minimizar a queda de pressão e maximizar a eficiência, simultaneamente. Os resultados foram comparados com dois ciclones convencionais: de Stairmand (alta eficiência) e Lapple (queda de pressão moderada).

Os resultados obtidos para os três ciclones otimizados demonstraram que esses equipamentos superaram as geometrias clássicas de Stairmand e Lapple. Os equipamentos avaliados no estudo conseguiram uma eficiência maior que o ciclone de Stairmand e um menor consumo de energia, com uma queda de pressão menor do que o ciclone de Lapple. Os autores ressaltaram que a otimização dos ciclones em série proporcionou excelentes resultados e que por isso, é viável em termos de escalas industriais, sem comprometer a fidelidade do modelo matemático utilizado.

### 2.2.3 Aplicações em hidrociclones

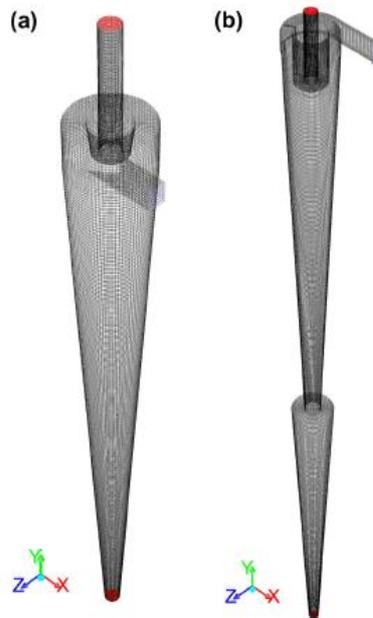
Para estimar o desempenho de dois hidrociclones comerciais (Doxie tipo-A e AKW tipo RWK 21), Pinto et al. (2013) utilizaram esses equipamentos para a separação de *Saccharomyces cerevisiae* do caldo de fermentação alcoólica.

Segundo os autores, a utilização de hidrociclones para a separação da levedura foi para substituir o equipamento utilizado em uma das etapas do processo industrial de etanol, a centrifugação. O interesse em eliminar o uso de centrífugas foi devido ao alto custo tanto energético quanto operacional desse equipamento, ao contrário dos hidrociclones, que apresentam baixos custos de fabricação e instalação e ainda fornecem alta eficiência de separação.

Para analisar o escoamento no interior dos hidrociclones foram confeccionadas malhas tetraédricas (Figura 2.10), sendo para a configuração Doixie 864.000 elementos e para a configuração SKW 1.210.188 de elemento. As simulações foram realizadas por meio do software FLUENT® e técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) foram utilizadas juntamente com o modelo de turbulência *Large Eddy Simulation* (LES). E para a solução numérica das equações foi utilizado o método dos volumes finitos. Os resultados obtidos

mostraram que o hidrociclone de AKW apresentou um melhor desempenho de separação (89,13%) bem como uma capacidade de processamento superior em comparação com o hidrociclone de Doxie.

Figura 2.10 – Estrutura de malha dos hidrociclones: (a) Doxie e (b) AKW



Fonte: Pinto et al. (2013).

Yuan et al. (2015) empregaram simulações em CFD para avaliar a eficiência de separação de partículas de politereftalato de etileno (PET) e policloreto de polivinila (PVC) em um hidrociclone. A malha deste equipamento foi gerada com o auxílio do software GAMBIT<sup>®</sup> com, aproximadamente, 123.706 elementos. A simulação foi realizada no software FLUENT<sup>®</sup> com uma suspensão formulada com cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), 120 partículas de PET e 40 partículas de PVC. E o modelo utilizado para descrever a turbulência do fluxo no interior do equipamento foi o *Reynolds Stress Model* e a Eficiência de Newton foi utilizada para avaliar a eficiência de separação.

Por ser mais densa, grande parte das partículas de plástico PVC foi coletada no *underflow* e conseqüentemente, uma elevada porção de PET fora coletada no *overflow*. O nível de pureza alcançado, respectivamente, para o PVC e o PET foi de 94,6% e 95,9%. Além disso, os autores ressaltaram que o efeito de cisalhamento que ocorre no interior de hidrociclones é de extrema importância para melhorar o processo de separação, uma vez que esse efeito cisalhante promove a dispersão das partículas de plástico que se aderem umas às outras.

Por meio de técnicas de CFD e métodos experimentais, Huang, L. et al. (2017) analisaram o desempenho de separação óleo-água e o escoamento interno de um hidrociclone

rotativo. A entrada do fluido neste hidrociclone é de forma axial, sendo a principal diferença em relação a um hidrociclone estático. Este fluido posteriormente é girado por palhetas-guia rotativas que estão sincronizadas e por um tubo (parede da câmara de separação) movido por um motor. A força centrífuga, produzida pelo fluxo giratório resultante, faz com que a água se desloque em direção à parede que, posteriormente, é coletada no *underflow*. No mesmo instante, o óleo migra em direção ao centro do hidrociclone sendo, em seguida, recolhido no *overflow*.

As malhas foram geradas pelo software ICEM<sup>®</sup> e os modelos e o método definidos para a turbulência, o fluxo óleo-água e as paredes giratórias foram, respectivamente, *Reynolds Stress Model*, *Algebraic Slip Mixture Model* e *Multiple Reference Frame Method*. Os resultados referentes à simulação foram coerentes com os dados experimentais. A vazão e a velocidade de rotação influenciaram significativamente o perfil de velocidade; assim, à medida que se aumentava a velocidade de rotação ou diminuía a vazão, menor era a queda de pressão, proporcionando, portanto, maior eficiência de separação. Diante disso, os autores concluíram que este hidrociclone é um separador de alta eficiência e pode ser utilizado em ampla faixa de vazão.

### 2.3 Aplicabilidade de hidrociclones na área de alimentos

Ortega-Rivas; Meza-Velásquez e Olivas-Vargas (1997) avaliaram o desempenho de um hidrociclone na separação de sólidos suspensos de suco de maçã não clarificado. Considerando a alta viscosidade do suco, os experimentos foram realizados com duas quedas de pressão: 300 e 500 kPa. E como os materiais biológicos em circuitos de bombeamento recirculantes normalmente geram uma quantidade considerável de espuma, foi necessário a adição de um agente antiespumante (óleo de milho).

A combinação de alta queda de pressão com a adição de agente antiespumante proporcionou cerca de 40% na redução de sólidos suspensos no suco de maçã. Diante disso, os hidrociclones podem ser considerados como uma opção interessante para a separação de sólidos suspensos no suco de maçã.

Com o objetivo de melhorar a separação amido-proteína da farinha de grão-de-bico utilizando um hidrociclone, Emami et al. (2007) avaliaram os efeitos do pH e da remoção de gordura desta farinha. Com isto, as suspensões utilizadas nos experimentos foram feitas a partir de farinhas de grão-de-bico integral e desengordurada com pH igual a 6,6 e 9,0.

Os resultados demonstraram que o uso de farinha desengordurada a pH 9,0 resultou no maior teor de amido no *underflow* com eficiência de separação de 99,8%, e também em uma

maior fração proteica no *overflow*, sendo que a solubilidade da proteína de grão de bico foi maior a pH 9,0 do que a pH 6,6.

Com o intuito de melhorar o desempenho de separação de leveduras da fermentação alcoólica utilizando hidrociclones, Bicalho (2011) avaliou o efeito de diferentes variáveis geométricas e operacionais em um hidrociclone. Estas variáveis foram: diâmetro da alimentação ( $D_i$ ), diâmetro de *overflow* ( $D_o$ ), ângulo do tronco de cone ( $\theta$ ) e queda de pressão ( $-AP$ ). Para a realização dos experimentos foi utilizada uma suspensão de levedura em água à concentração de 1% em massa.

Diante dos resultados, foi possível observar que os hidrociclones que apresentaram maiores capacidades de processamento foram os denominados de 25, 26 e 27, os quais apresentam  $D_i$  e  $D_o$  iguais a 4 mm. Todas as variáveis estudadas proporcionaram influência significativa sobre a capacidade dos hidrociclones, sendo  $D_i$ ,  $D_o$  e  $-AP$  as que contribuíram positivamente para esta resposta; já a variável  $\theta$  foi a única que contribuiu negativamente para a capacidade. Em relação a eficiência total de separação todas as variáveis influenciaram de forma significativa sobre essa resposta, sendo  $-AP$  a única variável que contribuiu positivamente para a eficiência; já as demais variáveis ( $D_i$ ,  $D_o$  e  $\theta$ ) contribuíram de forma negativa para essa resposta. A autora, em conformidade com os resultados, relatou que o hidrociclone 1 apresentou o melhor desempenho de separação para a suspensão de leveduras.

Evans; Onkaew e Heunghok (2015) utilizaram dois hidrociclones, denominados de HY1 e MZ, para separação de levedura na indústria cervejeira. Os autores analisaram duas aplicações de separação, a clarificação do líquido para a unidade de pré-filtro e a recuperação da levedura para a unidade de fermentação. Na realização dos experimentos, as suspensões de alimentação foram retiradas das partes média e inferior do tanque de fermentação.

Ambos os hidrociclones, para a aplicação de clarificação líquida, demonstraram uma eficiência de 50%. E em relação à recuperação da levedura, os hidrociclones apresentaram uma baixa porcentagem de recuperação de sólidos, e os autores acreditam que isso possa ter ocorrido devido à viscosidade ou à alta concentração da suspensão.

Cilliers e Harrison (2019) avaliaram o efeito do grau de flocculação na concentração de suspensões de levedura de cerveja (*Saccharomyces cerevisiae*). Para esta avaliação, os autores utilizaram um mini-hidrociclone e seu desempenho de separação foi determinado ao variar o tamanho do floco e a concentração de alimentação. A variação na flocculação das leveduras foi obtida pela redução do pH com ácido acético, que proporcionou distribuições de tamanho de flocos entre 20  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$ , e a faixa de concentração de levedura alimentada utilizada foi entre 0,6 e 14 g/L.

Ao aumentar o tamanho do floco houve uma melhora considerável na separação e ao aumentar a concentração de alimentação ocorreu uma diminuição na recuperação da levedura no produto concentrado, ou seja, a maior taxa de recuperação e concentração no hidrociclone foi alcançada com baixas concentrações de alimentação e maiores tamanhos de flocos. O que se torna importante para a operação industrial, uma vez que a floculação pode ser prontamente alterada por seu controle criterioso, enquanto que a concentração não pode ser facilmente manipulada como uma variável operacional. Além do mais, os autores ressaltaram que a qualidade da levedura e o desempenho da fermentação não foram comprometidos após processamento no hidrociclone.

Diante da atualidade dos trabalhos mencionados, pode-se inferir que esta dissertação é de suma importância para área acadêmica e industrial, uma vez que é possível notar tendências de estudos voltados para melhoria de equipamentos como hidrociclones em diversas áreas, bem como a utilização das técnicas de CFD.

---

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

---

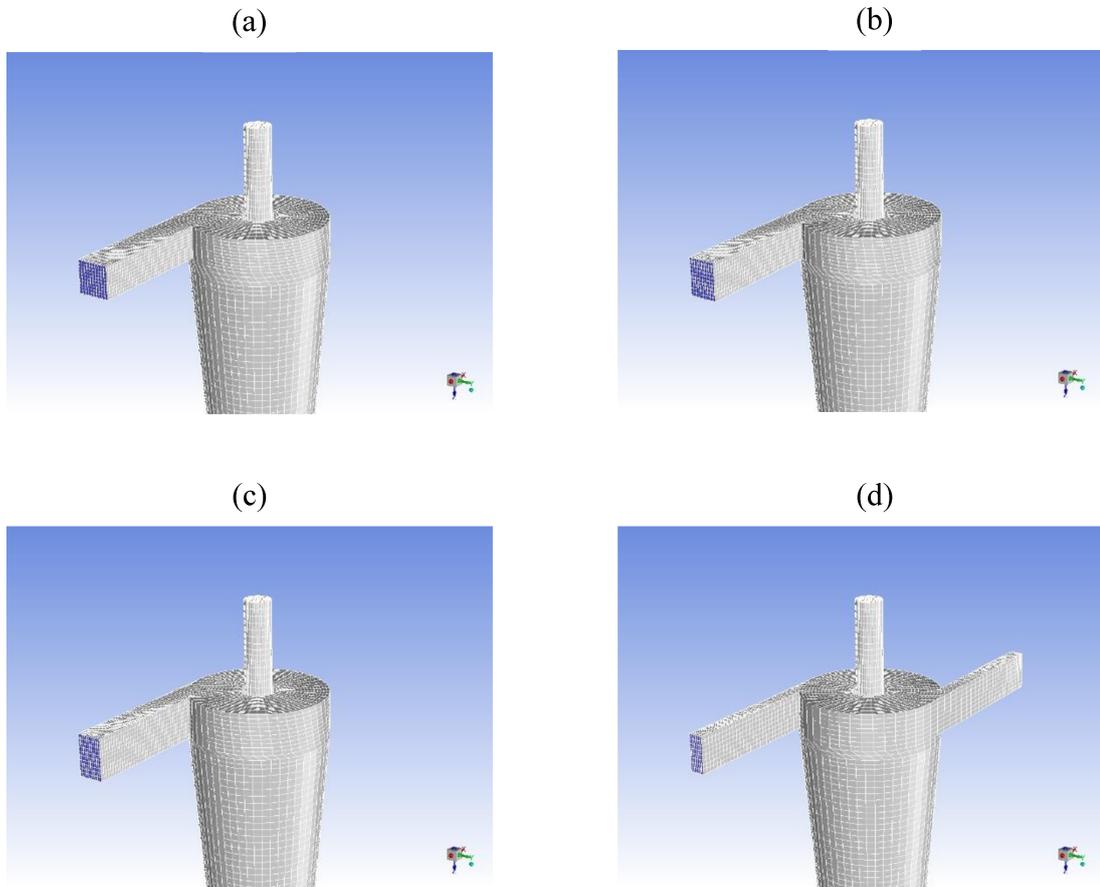
A metodologia empregada no desenvolvimento deste trabalho foi baseada nos resultados de Silva (2012), disponíveis na literatura. Neste capítulo estão descritas as informações necessárias para as simulações e execução experimental.

#### 3.1 Geração das malhas computacionais e simulações

Com o intuito de representar os hidrociclones para as simulações, as malhas computacionais foram aplicadas em quatro estudos de caso, cujas denominações foram STQ (7x7), STR (8x6), STR (9x5,3) e 2STR (8x3). As quatro malhas computacionais (Figura 3.1) foram confeccionadas com auxílio do software GAMBIT<sup>®</sup> licenciado para a Faculdade de Engenharia Química da UFU.

Salvo a dimensão e formato do duto de alimentação, todas as demais dimensões geométricas dos quatro estudos de caso eram idênticas à configuração utilizada para o hidrociclone HCOT1. Este hidrociclone foi otimizado por Silva (2012), visando à maximização de classificação deste equipamento a patamares razoáveis de número de Euler. O equipamento HCOT1 possui ângulo do cone ( $\theta = 9^\circ$ ), comprimento total do hidrociclone ( $L = 169$  mm), diâmetro da parte cilíndrica ( $D_c = 30$  mm), diâmetro de *overflow* ( $D_o = 5,7$  mm), comprimento de *vortex finder* ( $V_f = 12$  mm) e diâmetro de *underflow* ( $D_u = 5$  mm). Ressalta-se que a área da seção transversal do duto de alimentação ( $47,78$  mm<sup>2</sup>) foi aproximadamente a mesma para os cinco hidrociclones, apresentando as seguintes dimensões: circular ( $D_i = 7,8$  mm), referente ao HCOT1; quadrada ( $H$  e  $W = 7$  mm) e retangulares, sendo diferenciadas quanto ao comprimento dos lados ( $H = 8$  e  $W = 6$  mm;  $H = 9$  e  $W = 5,3$  mm). Destaca-se que  $H$  se refere à altura da seção e  $W$  à largura. A outra geometria é provida de dois dutos de alimentação retangulares, ambos com  $H = 8$  e  $W = 3$  mm.

Figura 3.1 – Malhas das quatro geometrias propostas: (a) STQ (7x7); (b) STR (8x6); (c) STR (9x5,3); (d) 2STR (8x3)



Fonte: A autora.

Para garantir a independência da malha, os testes foram realizados em um dos hidrociclones confeccionados: o STQ (7x7); uma vez que a única diferença na geometria dos hidrociclones era o duto de alimentação. Os elementos de malha utilizados para o STQ (7x7) foram hexaédricos com três quantidades diferentes: 155.880, 317.800 e 469.060. Após este teste de independência, as simulações do presente trabalho foram realizadas utilizando elementos de malha do tipo hexaédrico em quantidade próxima a 155.880, por exigir menos esforço computacional comparado aos demais números de elementos previamente estabelecidos no teste. Ressalta-se que não foi realizado nenhum refinamento na malha próximo às paredes dos hidrociclones e que os elementos possuíram assimetria dentro do limite aceitável, menor que 0,97. Acima deste valor os elementos são considerados de baixíssima qualidade.

Isto posto, as simulações numéricas tridimensionais foram conduzidas em regime transiente e, devido ao escoamento turbulento, foram empregados como critérios de parada a estabilização dos resultados de pressão estática na alimentação e razão de líquido ( $R_L$ ). O fluido

utilizado na fase contínua foi a água, sendo considerada como um fluido incompressível e newtoniano, e o sistema foi considerado como adiabático.

Utilizou-se a abordagem Euleriana, que é dedicada à simulação do escoamento monofásico (líquido isento de partículas) e para a solução desta abordagem foram utilizadas as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds para regime transiente (URANS – *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes*), que representam apenas as grandezas médias do escoamento, com todas as escalas de turbulência sendo modeladas.

E o modelo de turbulência utilizado foi o *Reynolds Stress Model*, pois considera que a turbulência na fase contínua (líquido) é anisotrópica. Estas simulações foram realizadas por meio das Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) utilizando o pacote comercial FLUENT® *Academic*, disponível no site da desenvolvedora ANSYS, Inc.

Apresenta-se, na Tabela 3.1, um resumo dos parâmetros e modelos adotados, que foram selecionados com base no guia da ANSYS Inc (ANSYS, 2006) e em alguns estudos disponíveis na literatura (SILVA, 2012; SHUKLA; SHUKLA; GHOSH, 2013; BRAR; SHARMA; ELSAYED, 2015).

Tabela 3.1 – Parâmetros e modelos adotados nas simulações

<b>Propriedade</b>	<b>Informação</b>
Vazão mássica na entrada	0,266 kg/s
Pressão atmosférica local	93 kPa
Fluido	Água
Densidade do fluido	998,2 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade do fluido	0,001003 Pa·s
Pressão nas saídas ( <i>overflow e underflow</i> )	Pressão atmosférica
Velocidade nas paredes	Zero ( <i>no slip</i> <sup>1</sup> )
Modelo de turbulência	RSM
Regime	Transiente
Esquema de acoplamento pressão-velocidade	SIMPLE
Discretização espacial – Gradiente	<i>Least Squares Cell Based</i>
Discretização espacial – Pressão	PRESTO!
Discretização espacial – Momento	QUICK
Discretização espacial – Energia cinética turbulenta	QUICK
Discretização espacial – Taxa de dissipação turbulenta	QUICK
Discretização espacial – Tensores de Reynolds	QUICK
Formulação transiente	Implícita de 1 <sup>a</sup> ordem
Critério de convergência (resíduo máximo)	1·10 <sup>-4</sup>
Passo no tempo ( <i>time step</i> )	5·10 <sup>-4</sup> s

Fonte: A autora.

<sup>1</sup> Condição física que ocorre na interface entre um fluido e uma superfície sólida, a qual descreve que a velocidade do fluido e a velocidade da superfície devem ser iguais. Deste modo, se a superfície é fixa, o fluido apresenta uma velocidade igual a zero nessa superfície. Conceitualmente, as moléculas do fluido se prendem à superfície pela qual este esco.

O valor referente a vazão mássica de alimentação dos hidrociclones foi escolhido com base nos resultados experimentais obtidos para o hidrociclone HCOT1 de Silva (2012). O autor, com o intuito de tentar explicar o comportamento interno do equipamento, realizou simulações utilizando as técnicas de CFD. Para a realização das simulações era necessário a informação da vazão de alimentação já pré-definida; sendo assim, Silva (2012) utilizou uma vazão de alimentação (0,266 kg/s) alcançada no estudo experimental na queda de pressão de 147 kPa, sendo essa uma pressão intermediária, pois era de se esperar que em todas as quedas de pressão o HCOT1, basicamente, teria o mesmo comportamento.

### 3.2 Execução experimental

Os experimentos foram realizados com o propósito de se comparar com a simulação computacional.

#### 3.2.1 Unidade experimental

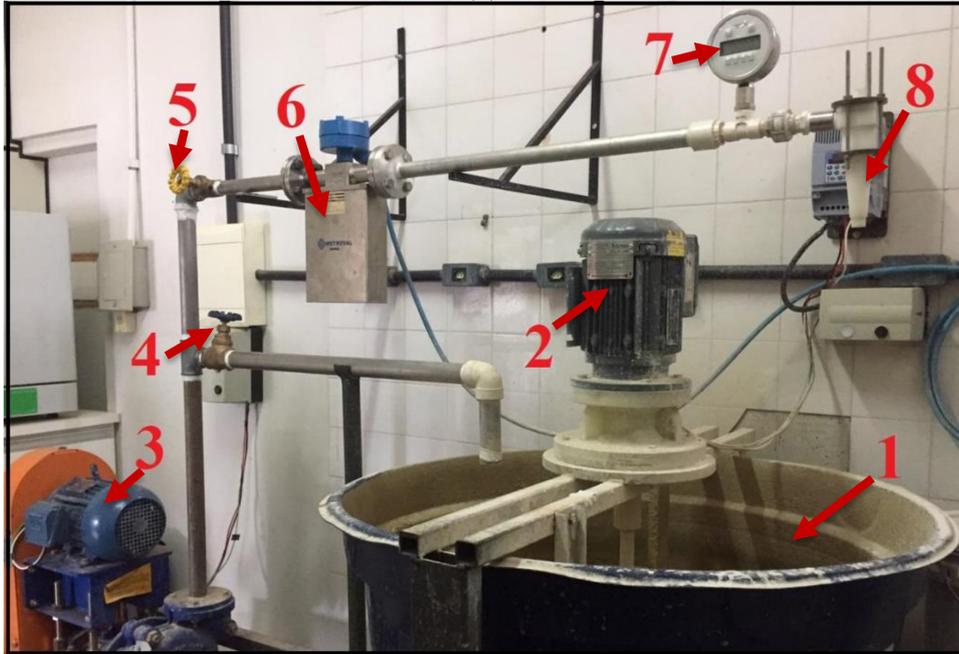
Para a execução experimental do presente trabalho foi utilizada uma unidade experimental (Figura 3.2) previamente montada no Laboratório de Separação e Energias Renováveis (LASER) do *Campus* Santa Mônica da Faculdade de Engenharia Química da UFU.

Esta unidade era constituída por um reservatório com capacidade máxima de 250 L, empregado para armazenar a suspensão de rocha quartzito. Durante a operação, para evitar a formação de um vórtice central e manter a homogeneização da concentração de rocha quartzito em todo o volume do reservatório, foi nele instalado, um agitador mecânico (com inversor de frequência de 1,5 cv) e um par de chicanas de placas perfuradas de aço. Uma bomba centrífuga de 5 cv com revestimento especial, resistente à abrasão e corrosão, foi também acoplada ao reservatório para fornecer energia à suspensão.

Parte da suspensão era bombeada através da tubulação que, em seu trajeto, era dividida em duas direções: para o desvio do duto de *bypass* e para a tubulação na qual o hidrociclone estava devidamente instalado. O controle da vazão em cada uma dessas direções era feito manualmente, por meio das válvulas gaveta e globo. Ressalta-se que, antes da entrada da suspensão no hidrociclone, foram acoplados um medidor de vazão do tipo Coriolis e um manômetro de Bourdon digital com o intuito de, respectivamente, se efetuar as leituras de vazão mássica de alimentação e da queda de pressão entre aquele ponto e o meio externo.

Posteriormente, as correntes efluentes do hidrociclone (*underflow* e *overflow*) eram descarregadas no reservatório.

Figura 3.2 – Unidade experimental: (1) Reservatório; (2) Agitador mecânico; (3) Bomba centrífuga; (4) Válvula de *bypass*; (5) Válvula reguladora de vazão; (6) Medidor de vazão; (7) Manômetro; (8) Hidrociclone



Fonte: A autora.

### 3.2.2 Material particulado

O material utilizado na execução experimental foi a rocha quartzito. Esta rocha é composta basicamente de quartzo, sendo esse mineral o responsável por proporcionar uma alta dureza ao quartzito. Além disso, esta rocha é resistente às alterações tanto intempérica quanto hidrotermal (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2013).

O quartzito foi fornecido pela empresa ANEX mineração, situada em Itabirito (MG), que disponibilizou também, a partir de análises de espectrometria de raios X, a composição química desse material (Tabela 3.2). A densidade real do quartzito foi determinada utilizando o equipamento *AccuPyc 1330* da *Micromeritics*<sup>®</sup> por meio da técnica de picnometria com deslocamento de gás Hélio. Após análises em triplicata, a densidade real do material particulado foi estimada em  $2740,0 \pm 0,5 \text{ kg/m}^3$ .

Tabela 3.2 – Composição química do quartzito

<b>Espécie química</b>	<b>Composição (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	95,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,56
K <sub>2</sub> O	0,65
Na <sub>2</sub> O	0,20
TiO <sub>2</sub>	0,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04
CaO	0,01
MgO	0,01

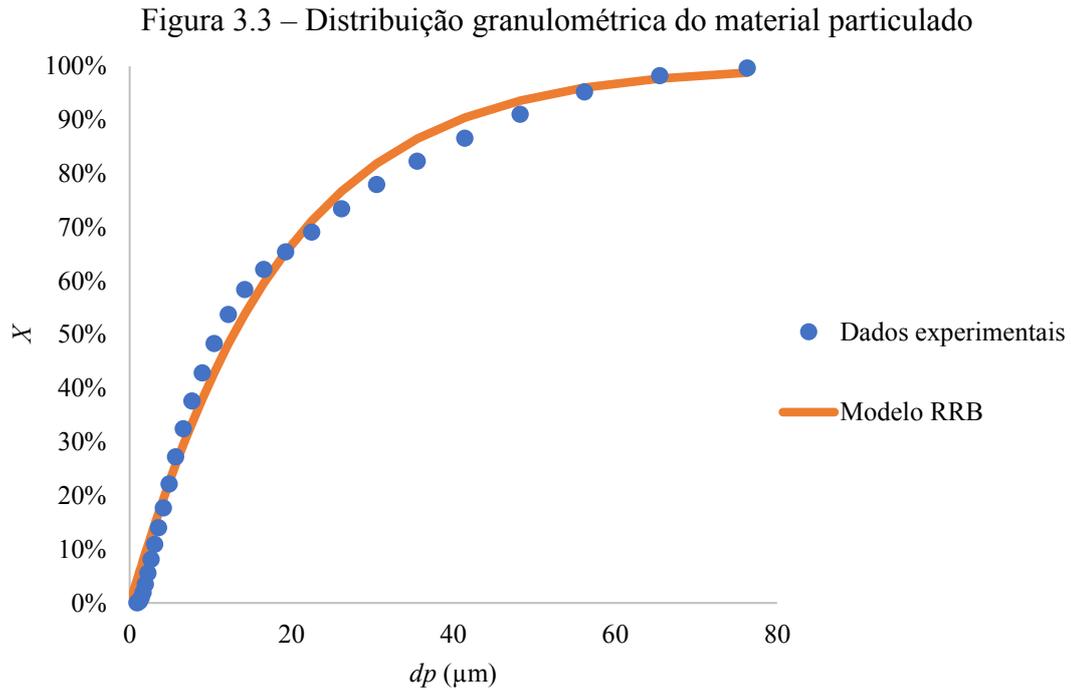
Fonte: ANEX mineração.

O material particulado foi preparado utilizando um moinho de bolas até que se atingisse uma faixa de distribuição granulométrica desejada, de forma que não houvessem partículas grosseiras que atrapalhassem o desempenho dos hidrociclones que seriam testados. Desta forma, foram realizadas bateladas em um moinho que continha um vaso cerâmico de 20 cm de diâmetro e 30 cm de altura, a uma rotação de 23 rpm, com 75 bolas de cerâmica de aproximadamente 4 cm de diâmetro cada. Posteriormente, amostras representativas deste material moído foram coletadas para realizar-se a análise granulométrica e de densidade. A distribuição granulométrica do material particulado foi obtida por meio do *Mastersizer Microplus* da marca *Malvern*, que é um analisador de partículas por difração a *laser*, sendo a dimensão característica fornecida pelo equipamento o diâmetro volumétrico das partículas. E a teoria utilizada na refração a *laser* foi a de *Mie* com o índice de refração da sílica em água.

Com os dados obtidos na análise de distribuição granulométrica realizou-se um ajuste seguindo o modelo Rosin-Rammler-Bennet (RRB), utilizando o software Statistica<sup>®</sup>. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi de 0,9948 e os parâmetros do ajuste  $d_{63,2}$  e  $n$  foram, respectivamente, 18,55  $\mu\text{m}$  e 1,04. O modelo RRB ajustado é mostrado na Equação (3.1).

$$X = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{d_p}{18,55} \right)^{1,04} \right] \quad (3.1)$$

Uma distribuição granulométrica típica do material particulado utilizado e o modelo RRB ajustado são apresentados na Figura 3.3.



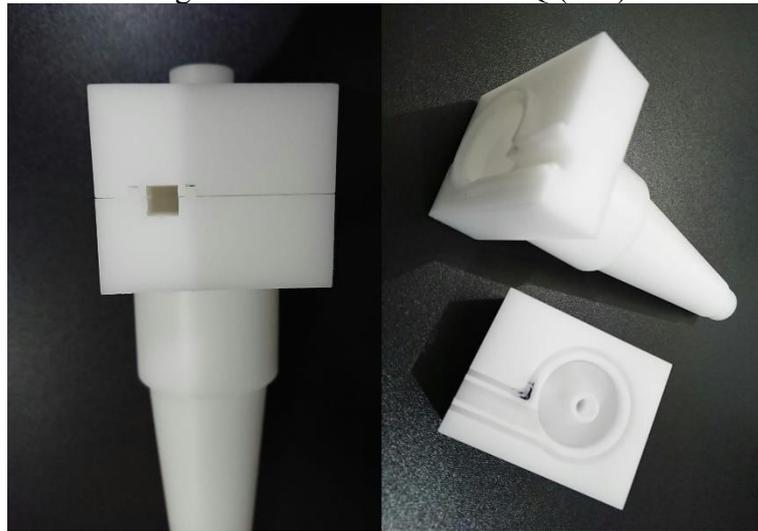
Fonte: A autora.

### 3.2.3 O hidrociclone

O presente estudo teve como proposta alterar o duto de alimentação de um hidrociclone otimizado (HCOT1). O recurso disponível para confecção de equipamentos neste trabalho, proveniente do Projeto FAPEMIG APQ-00716-14 (aprovado no Edital N° 17/2013 – PPP – Programa Primeiros Projetos) permitia a seleção de apenas um dos equipamentos propostos no presente estudo.

A escolha da construção do STQ (7x7) é melhor explicada no próximo capítulo. O equipamento foi desenvolvido de forma modular, o que possibilita a alteração de alguma peça com trocas simples. As peças foram mantidas conectadas por meio de sistemas de rosca ou de travas mecânicas. O hidrociclone STQ (7x7) (Figura 3.4) foi usinado em CNC ROMI D600 com quarto eixo, utilizando o material poliacetal devido a sua maior resistência à abrasão, baixa absorção de água e boa usinabilidade.

Figura 3.4 – Hidrociclone STQ (7x7)



Fonte: A autora.

### 3.2.4 Procedimento experimental

Ressalta-se que para a coleta dos dados experimentais os testes foram realizados em quatro condições de queda de pressão ( $-\Delta P$ ): 0,9; 1,2; 1,5 e 1,8 bar; aproximadamente. Previamente, o tanque foi preenchido com aproximadamente 200 L da suspensão de água e quartzito, sendo essa suspensão composta por 1% de concentração volumétrica do material particulado. Primeiramente, realizou-se a montagem do hidrociclone a ser testado e o seu acoplamento à unidade experimental.

O acionamento da unidade iniciava-se ligando o agitador mecânico para promover a homogeneização da suspensão e, posteriormente, a bomba centrífuga era acionada para o início da operação. Com o auxílio das válvulas globo e gaveta, regulava-se a quantidade de suspensão enviada para a linha do hidrociclone até que se atingisse a queda de pressão desejada. Após condições estáveis de queda de pressão, registrava-se a vazão mássica da alimentação que era fornecida no display do medidor de vazão. A vazão mássica da corrente de *underflow* foi determinada através de técnicas gravimétricas (coleta e pesagem de amostras), de forma que se coletava uma amostra dessa corrente, media-se o tempo de coleta e pesava-se a massa coletada em uma balança semianalítica com precisão de  $\pm 0,01$  g. Uma vez que o hidrociclone operava em estado estacionário, a vazão mássica da corrente de *overflow* foi estabelecida pelo balanço de massa total. E por fim, a temperatura da suspensão no tanque era registrada para posterior determinação da viscosidade e densidade do fluido (água).

Após a determinação das vazões mássicas, amostras das correntes de alimentação e *underflow* foram coletadas para a determinação das suas concentrações mássicas. Em seguida,

foram pesadas e armazenadas em uma estufa a 105°C por 24 h. Após este período, pesavam-se novamente as amostras (massa de sólido seco) para os cálculos das concentrações. Ressalta-se que este procedimento era realizado em triplicata.

Para realizar a análise de distribuição granulométrica do material particulado, alíquotas das correntes de alimentação e *underflow* foram coletadas. Esta análise foi realizada no equipamento *Mastersizer Microplus* da *Malvern*, que se baseia na técnica de difração de raios *laser* para análise do diâmetro das partículas. Inicialmente, realizou-se a calibração do sistema óptico do equipamento através da medida do “branco” (água destilada e dispersante), utilizada como referencial para as demais medidas. O dispersante utilizado foi hexametáfosfato de sódio (Calgon) na concentração de 1 g/L. Após a devida calibração do equipamento, cada amostra era adicionada ao béquer contendo a mistura de água com Calgon e submetida a um banho ultrassônico por 30 s para romper possíveis aglomerados de partículas existentes na amostra. Posteriormente, os dados obtidos pelo *Mastersizer* foram enviados a uma planilha eletrônica na forma de diâmetros de partículas e frações cumulativas e os parâmetros do modelo RRB foram determinados por regressão não-linear utilizando o software *Statistica*<sup>®</sup>.

### 3.2.5 Cálculo das grandezas associadas à separação em hidrociclones

As grandezas determinadas e calculadas neste estudo foram: Concentrações mássicas ( $C_W$ ) e volumétricas ( $C_V$ ) das correntes, vazões volumétricas das correntes ( $Q$ ), Número de Euler ( $Eu$ ), Razão de Líquido ( $R_L$ ), Número de Reynolds ( $Re$ ), Distribuição granulométrica da alimentação e do *underflow* e parâmetros do modelo RRB para cada uma dessas correntes, Diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) e Diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ).

A partir das concentrações mássicas das correntes ( $C_W$ ) obtidas por gravimetria e das densidades da água ( $\rho_{\text{água}}$ ) e do material particulado ( $\rho_s$ ), calcularam-se as concentrações volumétricas das correntes de alimentação e de *underflow* pelas Equações (3.2) e (3.3), respectivamente.

$$C_{VA} = \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho_{\text{água}}} \left( \frac{1}{C_{WA}} - 1 \right) + 1} \quad (3.2)$$

$$C_{VU} = \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho_{\text{água}}} \left( \frac{1}{C_{WU}} - 1 \right) + 1} \quad (3.3)$$

As densidades e as vazões volumétricas da alimentação e da corrente de *underflow* foram calculadas pelas Equações (3.4), (3.5), (3.6) e (3.7).

$$\rho_a = \frac{\rho_{\text{água}}}{1 - C_{WA} \left(1 - \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_s}\right)} \quad (3.4)$$

$$Q_A = \frac{W_A}{\rho_a} \quad (3.5)$$

$$\rho_u = \frac{\rho_{\text{água}}}{1 - C_{WU} \left(1 - \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_s}\right)} \quad (3.6)$$

$$Q_U = \frac{W_U}{\rho_u} \quad (3.7)$$

O número de Euler ( $Eu$ ) indica a relação entre a queda de pressão e a energia cinética por volume na seção cilíndrica, sendo calculado pela Equação (3.8).

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\rho_{\text{água}} \cdot v_c^2 / 2} \quad (3.8)$$

em que  $-\Delta P$  é a queda de pressão no equipamento,  $\rho_{\text{água}}$  é a densidade da água e  $v_c$  é a velocidade na seção cilíndrica, calculada pela razão entre a vazão volumétrica na corrente de alimentação ( $Q_A$ ) e a área da seção cilíndrica:

$$v_c = \frac{4Q_A}{\pi D_c^2} \quad (3.9)$$

A razão de líquido ( $R_L$ ) representa quantitativamente um fenômeno denominado de “efeito T”, o qual ocorre quando equipamentos como hidrociclones agem como divisores de escoamento. Este parâmetro pode ser calculado pela Equação (3.10).

$$R_L = \frac{Q_U(1 - C_{VU})}{Q_A(1 - C_{VA})} \quad (3.10)$$

O número de Reynolds ( $Re$ ) é dado pela Equação (3.11).

$$Re = \frac{\rho_{\text{água}} D_c v_c}{\mu} \quad (3.11)$$

Como o diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) corresponde ao tamanho da partícula separada com eficiência granulométrica de 50%, foi necessário utilizar a Equação (3.12) para calcular o  $d_{50}$  do hidrociclone. Nesta equação, deve-se determinar os valores de  $dX_u/d(dp)$  e de  $dX_a/d(dp)$ . Para isto, o modelo RRB foi ajustado à distribuição de tamanho de partículas das correntes de alimentação e de *underflow*, e determinaram-se os parâmetros  $d_{63,2}$  e  $n$  por ajuste não-linear no software Statistica<sup>®</sup>. Utilizando-se esta metodologia, obtêm-se as Equações (3.13) e (3.14).

$$\eta_G = \eta \frac{\frac{dX_u}{d(dp)}}{\frac{dX_a}{d(dp)}} \quad (3.12)$$

$$\frac{dX_u}{d(dp)} = \frac{n_u \left(\frac{dp}{d_{63,2,u}}\right)^{n_u} \exp\left[-\left(\frac{dp}{d_{63,2,u}}\right)^{n_u}\right]}{dp} \quad (3.13)$$

$$\frac{dX_a}{d(dp)} = \frac{n_a \left(\frac{dp}{d_{63,2,a}}\right)^{n_a} \exp\left[-\left(\frac{dp}{d_{63,2,a}}\right)^{n_a}\right]}{dp} \quad (3.14)$$

A eficiência granulométrica ( $\eta_G$ ), então, é dada pela substituição das Equações (3.13) e (3.14) na Equação (3.12), o que resulta na Equação (3.15).

$$\eta_G = \eta \frac{n_u \left(\frac{dp}{d_{63,2,u}}\right)^{n_u} \exp\left[-\left(\frac{dp}{d_{63,2,u}}\right)^{n_u}\right]}{n_a \left(\frac{dp}{d_{63,2,a}}\right)^{n_a} \exp\left[-\left(\frac{dp}{d_{63,2,a}}\right)^{n_a}\right]} \quad (3.15)$$

Ao substituir nesta última equação  $dp$  por  $d_{50}$ ,  $\eta_G$  assume o valor de 0,5. A expressão utilizada para o cálculo do diâmetro de corte é representada pela Equação (3.16), que é não-linear e foi resolvida numericamente. O diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ) foi calculado de maneira análoga ao diâmetro de corte, porém, em vez de se utilizar a Equação (3.12), utilizou-se a Equação (3.17) para determinar a eficiência granulométrica reduzida ( $\eta'_G$ ).

$$\eta \frac{n_u \left( \frac{d_{50}}{d_{63,2,u}} \right)^{n_u} \exp \left[ - \left( \frac{d_{50}}{d_{63,2,u}} \right)^{n_u} \right]}{n_a \left( \frac{d_{50}}{d_{63,2,a}} \right)^{n_a} \exp \left[ - \left( \frac{d_{50}}{d_{63,2,a}} \right)^{n_a} \right]} - 0,5 = 0 \quad (3.16)$$

$$\eta'_G = \frac{(\eta_G - R_L)}{(1 - R_L)} \quad (3.17)$$

---

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes às simulações em CFD e aos estudos experimentais para avaliar a viabilidade das alterações realizadas no duto de alimentação do hidrociclone HCOT1.

#### 4.1 Resultados das simulações

Ressalta-se que as simulações dos cinco hidrociclones analisados foram realizadas em uma mesma vazão volumétrica de alimentação: 0,266 kg/s e se mostraram estáveis a partir de 2 s. Os resultados obtidos nestas simulações dos hidrociclones HCOT1, STQ (7x7), STR (8x6), STR (9x5,3) e 2STR (8x3) são apresentados na Tabela 4.1, na qual se observa que o número de Euler ( $Eu$ ) foi menor para o hidrociclone HCOT1. Como este parâmetro indica a relação entre a queda de pressão e a energia cinética por volume na seção cilíndrica, é possível avaliar a capacidade de operação (consumo energético) de equipamentos como hidrociclones. Quanto menor o valor de  $Eu$ , menor é a queda de pressão (perda de carga) na mesma vazão, ou seja, o gasto energético é menor. Sendo assim, verifica-se que os resultados das simulações indicam que o hidrociclone HCOT1 apresenta um menor custo energético comparado aos demais hidrociclones. Cumpre esclarecer que os incrementos de Euler observados para os demais equipamentos não são, necessariamente, um aspecto ruim, pois podem sinalizar um ganho no poder de classificação de tais separadores.

Tabela 4.1 – Resultados das simulações em CFD para os hidrociclones avaliados

Respostas Simuladas	HCOT1	STQ (7x7)	STR (8x6)	STR (9x5,3)	2STR (8x3)
$Eu$	2604	2846	2984	3106	3328
$R_L$ (%)	45,22	47,12	46,93	46,78	45,59

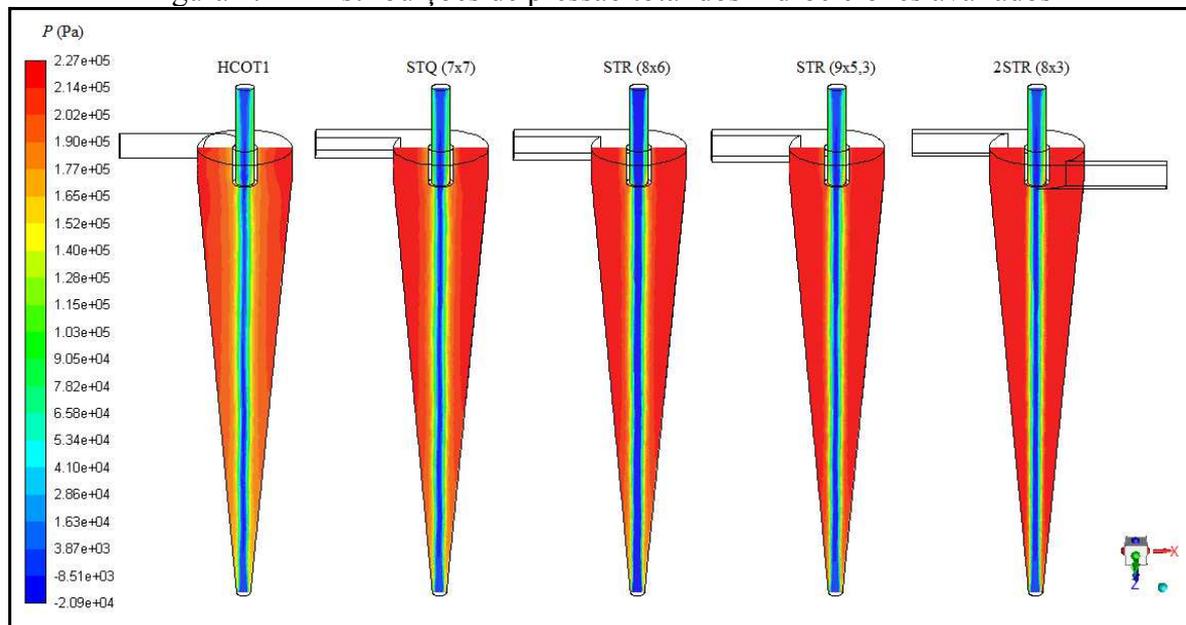
Fonte: A autora.

Já em relação à razão de líquido ( $R_L$ ), apesar de os resultados terem sido próximos, esse parâmetro foi maior para os novos equipamentos, sendo 1,90; 1,71; 1,56 e 0,37 pontos percentuais a mais para as configurações STQ (7x7), STR (8x6), STR (9x5,3) e 2STR (8x3); respectivamente. Espera-se que quanto maior o valor da razão de líquido, indubitavelmente,

maior seja a ação (majoração) da velocidade axial em direção ao orifício de *underflow*. Consequentemente, mais partículas podem ser separadas por causa da maior quantidade de líquido que passa a ser descarregada no *underflow*. Diante disto, pode-se inferir que, aparentemente, todos os hidrociclones sinalizam mais um aspecto favorável, juntamente com o incrementos de Euler, para maximizar as eficiências de classificação (menores diâmetros de corte) em relação ao hidrociclone HCOT1 de Silva (2012).

Na Figura 4.1 são apresentadas as distribuições de pressão total dos hidrociclones avaliados.

Figura 4.1 – Distribuições de pressão total dos hidrociclones avaliados



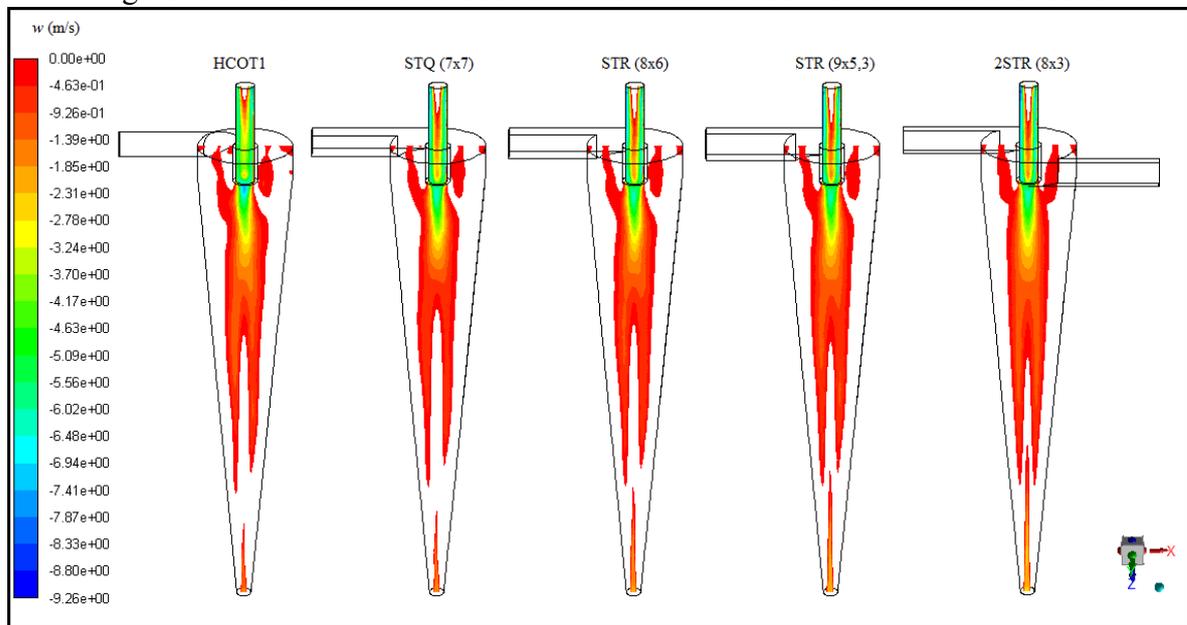
Fonte: A autora.

Pode-se verificar, em todos os hidrociclones analisados, que a pressão diminuiu conforme o raio, no sentido das paredes para a região central. Sendo este gradiente de pressão um dos responsáveis pela separação das fases (dispersa e contínua) nestes equipamentos. Todavia, a pressão total no interior do HCOT1 foi menor quando comparada aos demais hidrociclones, confirmando assim, a análise anteriormente relatada para o número de Euler, uma vez que esse parâmetro é diretamente proporcional à queda de pressão.

Além do mais, é possível também confirmar a análise previamente descrita sobre  $R_L$  através dos perfis de velocidade axial (Figura 4.2 e Figura 4.3), uma vez que essa velocidade está diretamente relacionada com a razão de líquido. Isto posto, observa-se que, de fato, maiores quantidades de fluido migraram para a corrente de *underflow*, pois a intensidade da velocidade

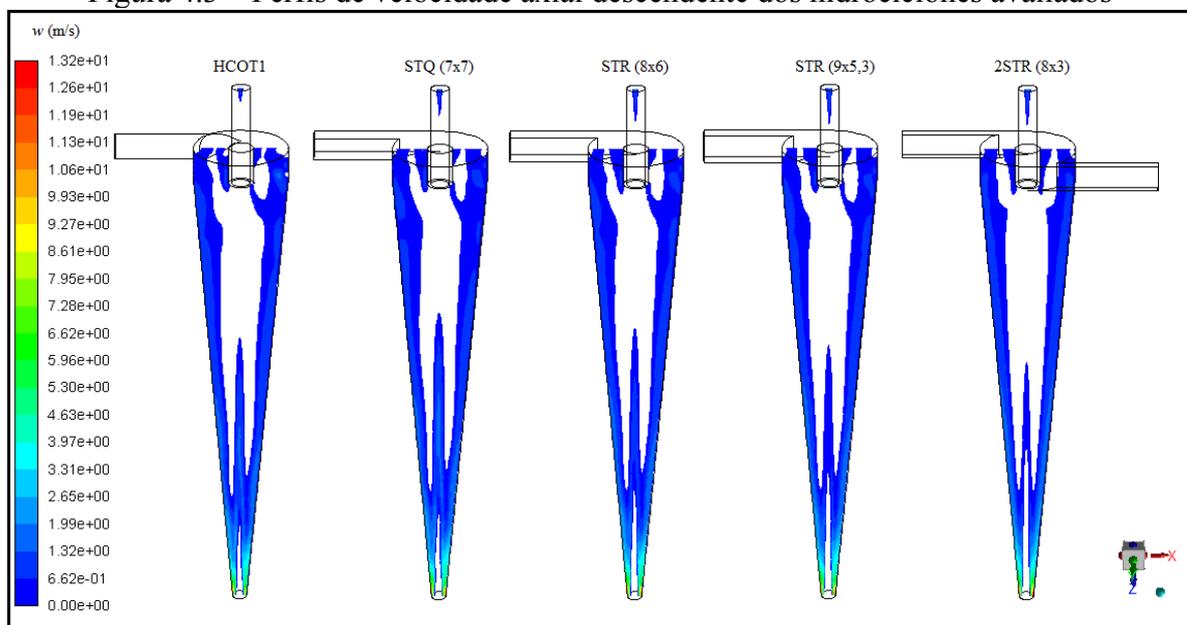
axial é maior próximo a esse orifício. Pode-se observar o escoamento ascendente no centro dos hidrociclones (Figura 4.2) e descendente próximo às paredes destes equipamentos (Figura 4.3).

Figura 4.2 – Perfis de velocidade axial ascendente dos hidrociclones avaliados



Fonte: A autora.

Figura 4.3 – Perfis de velocidade axial descendente dos hidrociclones avaliados

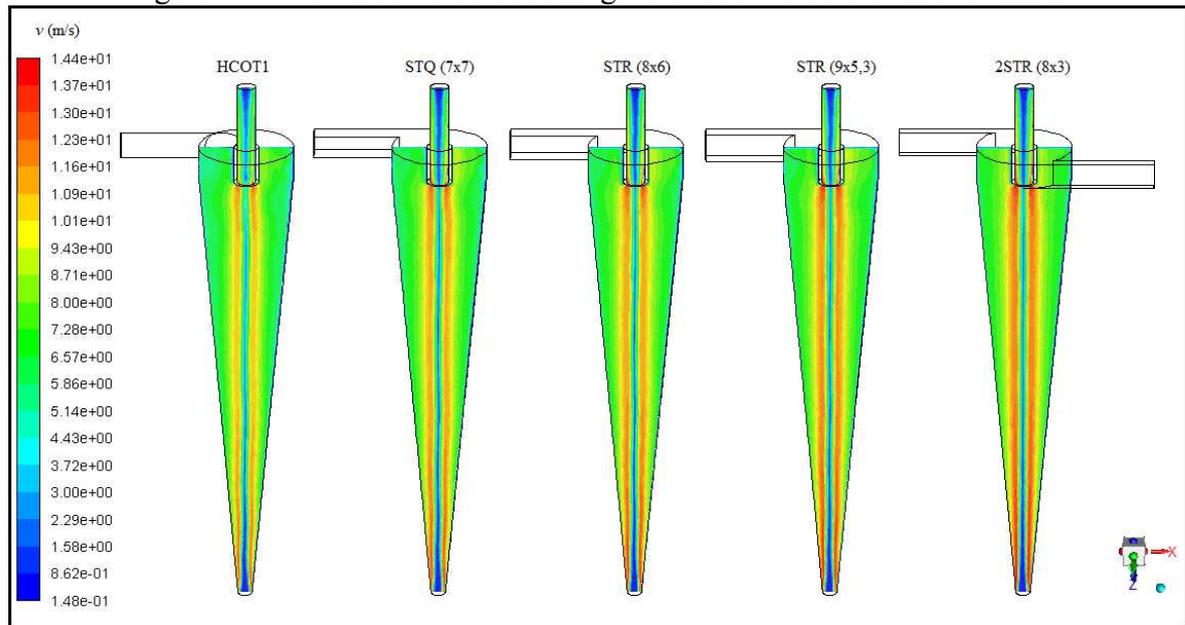


Fonte: A autora.

Na Figura 4.4 observam-se os perfis de velocidade tangencial dos hidrociclones analisados. A componente tangencial de velocidade no interior de equipamentos como os hidrociclones é bastante relevante, pois se relaciona diretamente com a força centrífuga, ou seja,

com o poder de classificação do equipamento. Esta velocidade aumenta a partir da parede com o decréscimo do raio até atingir um valor máximo, e a partir deste momento, diminui em direção à região central dos equipamentos. Apesar de ser observado comportamento similar da velocidade tangencial nos hidrociclones avaliados (Figura 4.4), a região de velocidades mais altas é aparentemente menor para o hidrociclone HCOT1, quando comparado aos demais.

Figura 4.4 – Perfis de velocidade tangencial dos hidrociclones analisados



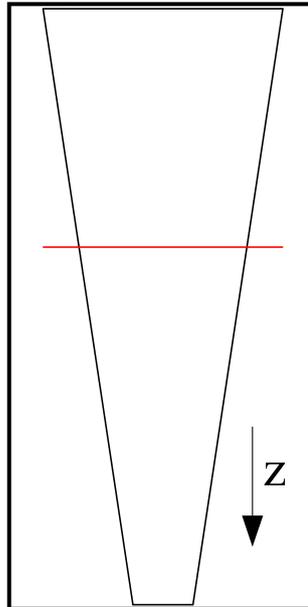
Fonte: A autora.

Através de um corte realizado na seção cônica dos hidrociclones estudados (Figura 4.5), é possível também representar os perfis de velocidade axial e velocidade tangencial, apresentados na Figura 4.6 e na Figura 4.7, respectivamente. Este corte apresenta raio igual a 10 mm e está localizado 95,4 mm acima do orifício de *underflow* e 63,6 mm abaixo da seção cilíndrica. Ressalta-se que o eixo z positivo é vertical para baixo.

Observa-se que a velocidade axial (Figura 4.6) é máxima em posição imediatamente antes das paredes dos hidrociclones e diminui ao longo da direção radial, apresentando um aumento na região central. Nota-se que a geometria 2STR (8x3) apresentou apenas um local de velocidade vertical zero de cada lado do eixo de simetria (eixo Z) e as demais apresentaram dois locais. Apesar da pequena diferença entre estes equipamentos, percebe-se que todos os hidrociclones apresentaram baixos valores para a velocidade ascendente (valores negativos) e altos valores para a descendente (valores positivos), o que poderia favorecer o poder de classificação destes equipamentos. Da Figura 4.6, denota-se ainda uma maior quantidade de

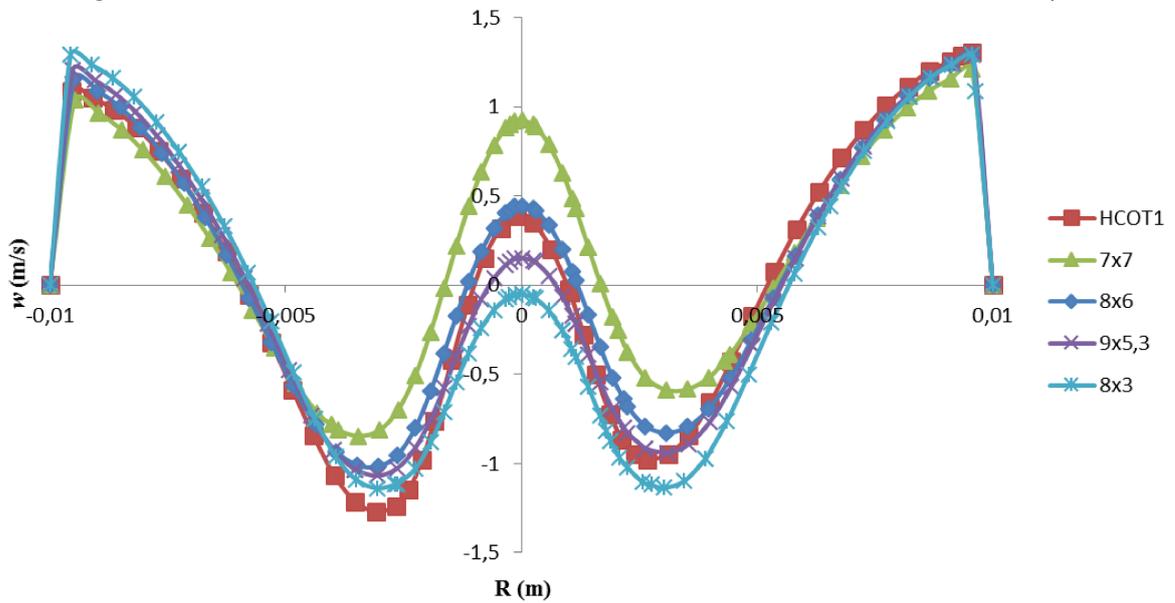
fluido sendo direcionada à corrente de *underflow* do hidrociclone STQ (7x7), ratificando, portanto, o maior valor de razão de líquido (47,12%) dentre os hidrociclones analisados.

Figura 4.5 – Corte realizado na seção cônica dos hidrociclones, localizado a 95,4 mm acima do *underflow* e 63,6 mm abaixo da seção cilíndrica

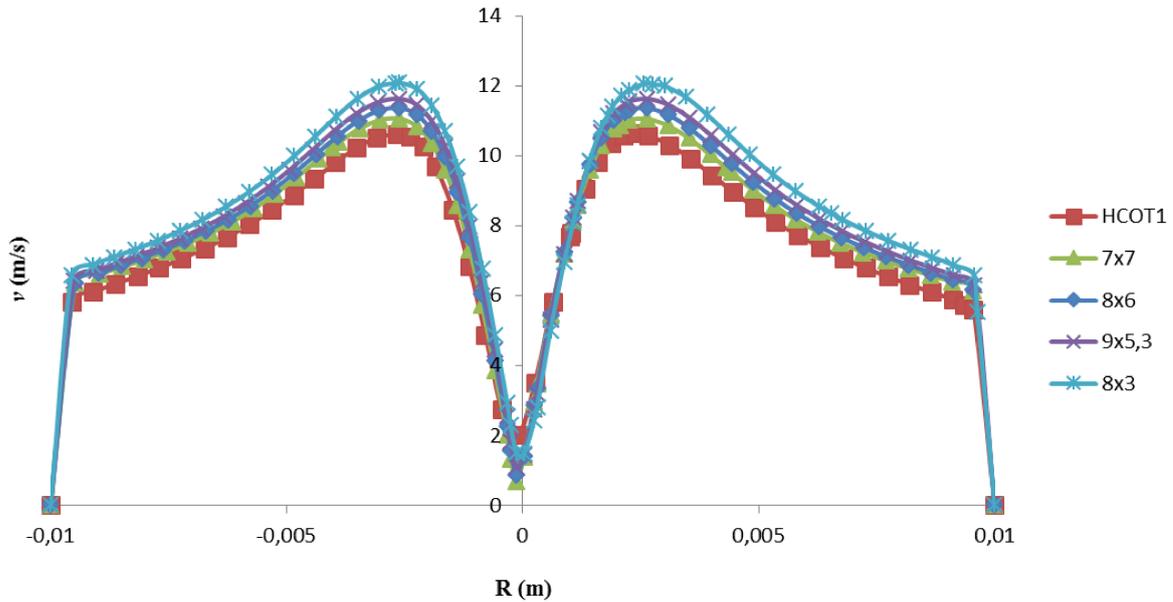


Fonte: Adaptada de Silva (2012).

Figura 4.6 – Perfis de velocidade axial a 95,4 mm acima do orifício de *underflow*



Fonte: A autora.

Figura 4.7 – Perfis de velocidade tangencial a 95,4 mm acima do orifício de *underflow*

A partir da análise gráfica da Figura 4.7, pode-se inferir que o escoamento é acelerado ao longo de boa parte da direção radial, fazendo com que a velocidade tangencial permaneça alta. Partindo do raio igual a zero, observa-se que a velocidade tangencial aumenta no sentido radial, atingindo um máximo, e posteriormente ocorre um declínio acentuado próximo à parede. De acordo com a Figura 4.7, nota-se que, como relatado anteriormente, todas as novas configurações apresentaram incrementos nos perfis de velocidade tangencial quando comparados com o hidrociclone HCOT1. Sendo assim, ao apresentar um elevado valor para esta velocidade e, conseqüentemente, resultar em elevados valores para a força centrífuga, presume-se que os hidrociclones com alterações na alimentação podem apresentar um melhor desempenho de separação quando comparados à configuração original com alimentação cilíndrica.

No contexto geral, avaliando apenas as simulações, com base apenas no consumo energético, a geometria denominada de HCOT1 poderia ser considerada como a melhor geometria do presente estudo, uma vez que apresentou o menor número de Euler ( $Eu = 2604$ ). Por outro lado, a ação do campo centrífugo em seu interior é menor que nos demais equipamentos propostos (tomando como referência a velocidade tangencial), o que pode levar a menores valores de eficiência. Ademais, de acordo com os perfis de velocidade axial, o hidrociclone HCOT1 também não foi o que levaria a maiores quantidades de líquido descarregado na corrente de *underflow*. Desta forma, para avaliar as melhorias no equipamento

propostas neste trabalho, à luz dos relatos de Morgan (2005) e Hwang; Hwang e Yoshida (2013), registradas anteriormente, procede-se à análise dos resultados experimentais.

Sabe-se que para a realização de teste experimental é necessário a usinagem de equipamentos e como descrito na seção 3.2.3, o recurso disponível para confecção destes permitiu a seleção de apenas um dos hidrociclones propostos no presente estudo. Com isso, a escolha deste foi realizada com base nos resultados das simulações numéricas.

A partir dos resultados simulados, foi possível observar que existem duas configurações geométricas com elevado potencial de melhoria para o HCOT1 otimizado por Silva (2012), sendo essas configurações denominadas de STQ (7x7) e 2STR (8x3); que apresentaram, respectivamente, maiores valores de velocidade axial e velocidade tangencial quando comparadas ao HCOT1.

Dentre as duas configurações destacadas anteriormente, selecionou-se para usinagem o hidrociclone STQ (7x7), por apresentar maior valor de razão de líquido e menor valor de número de Euler quando comparado com o hidrociclone 2STR (8x3), ou seja, o STQ (7x7) pode apresentar um maior poder de classificação consumindo menos energia em relação ao 2STR (8x3).

## 4.2 Resultados experimentais

Para níveis de comparações entre a nova geometria proposta e o hidrociclone HCOT1, foram utilizados os resultados experimentais do HCOT1 obtidos por Silva (2012) (Tabela 4.3). E os resultados experimentais para o STQ (7x7) são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados experimentais para o hidrociclone STQ (7x7)

$-\Delta P$ (Pa)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$	$Re$	$d_{50}$ (μm)	$d'_{50}$ (μm)	$C_{VU}$ (%)	$C_{VA}$ (%)
88260	207	45,28	2070	11448	3,68	15,83	1,70	0,99
117680	232	45,24	2190	12852	3,22	14,00	1,75	0,99
147100	251	46,73	2351	13868	1,63	11,63	1,75	0,99
176500	266	46,44	2502	14724	1,10	10,82	1,76	0,99

Fonte: A autora.

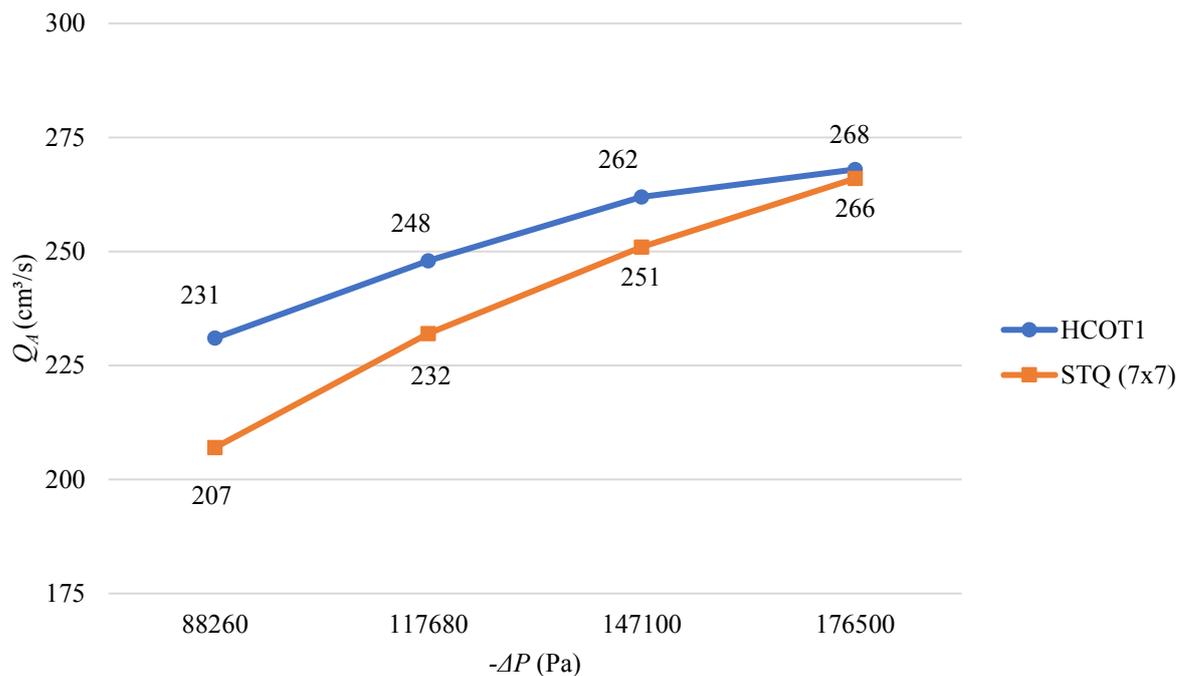
Tabela 4.3 – Resultados experimentais obtidos para o HCOT1 por Silva (2012)

$-\Delta P$ (Pa)	$Q_A$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_L$ (%)	$Eu$	$Re$	$d_{50}$ (μm)	$d'_{50}$ (μm)	$C_{VA}$ (%)
88260	231	40,59	1653	10580	4,29	6,17	1,01
117680	248	42,51	1917	11345	4,02	5,92	1,01
147100	262	44,57	2151	11974	2,76	4,36	1,01
176500	268	46,73	2472	12237	2,31	3,80	1,01

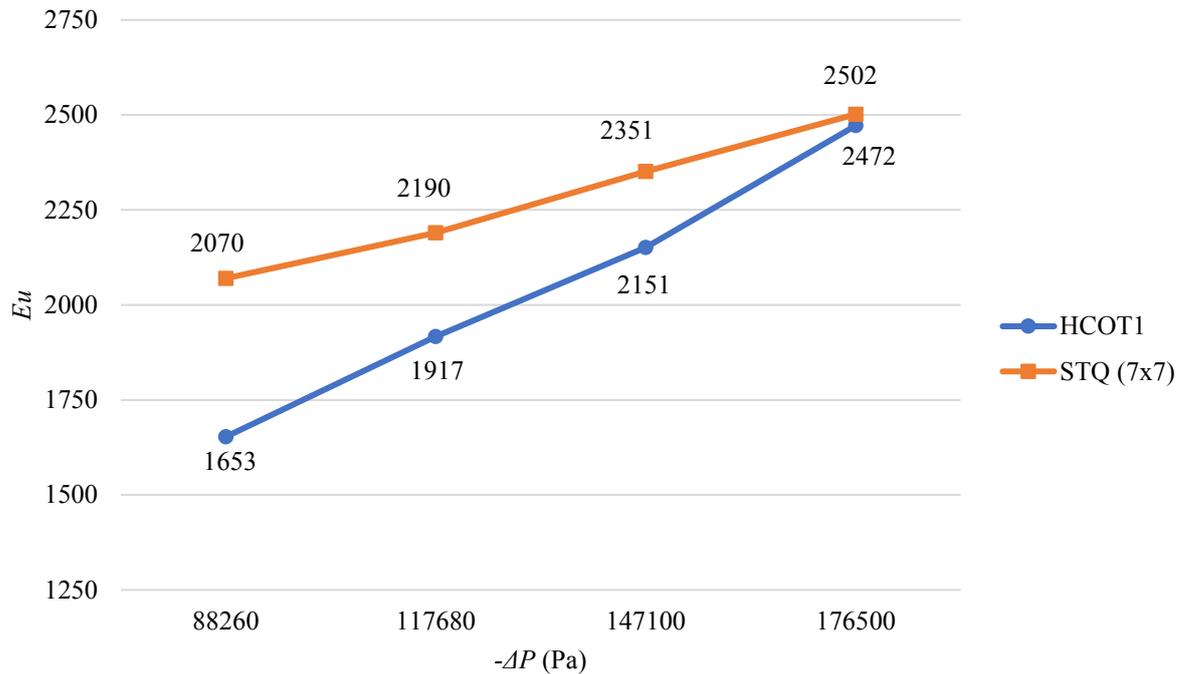
Fonte: Silva (2012).

Observa-se na Figura 4.8 e na Figura 4.9, respectivamente, a comparação dos resultados de vazão volumétrica de alimentação ( $Q_A$ ) e número de Euler ( $Eu$ ) obtidos para os dois hidrociclones em análise nas quatro quedas de pressão utilizadas na execução experimental.

Figura 4.8 – Resultados experimentais da vazão volumétrica de alimentação ( $Q_A$ ) para os hidrociclones HCOT1 e STQ (7x7)



Fonte: A autora.

Figura 4.9 – Resultados experimentais do número de Euler ( $Eu$ ) para os hidrociclones HCOT1 e STQ (7x7)

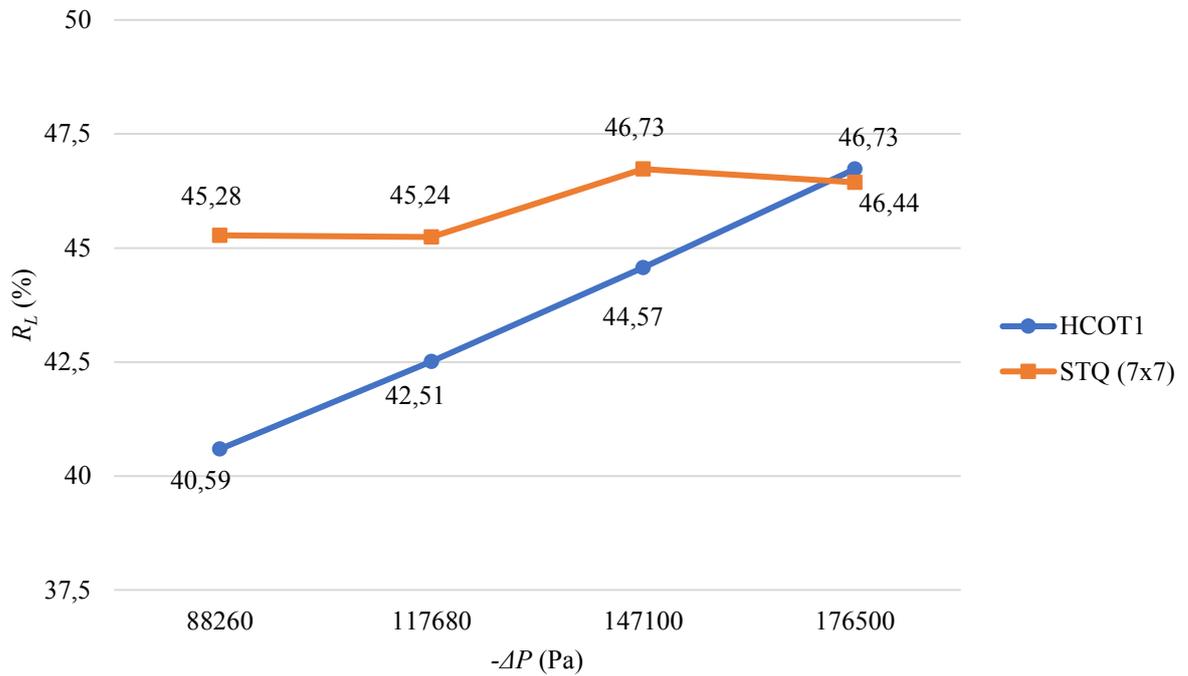
Fonte: A autora.

No mesmo sentido já sinalizado previamente pelas simulações em CFD, os testes experimentais comprovaram que o hidrociclone STQ (7x7) teve decréscimos médios de aproximadamente 5,90% para a vazão volumétrica de alimentação em relação ao hidrociclone HCOT1. Por sua vez, em se tratando do número de Euler, o hidrociclone STQ (7x7) teve incrementos médios de 12,49% em relação ao hidrociclone HCOT1.

Apesar de um maior gasto energético em relação ao hidrociclone HCOT1, observa-se que o hidrociclone STQ (7x7) apresentou os maiores valores de razão de líquido ( $R_L$ ) (Figura 4.10). Sendo assim, o hidrociclone STQ (7x7) apresentou uma maior quantidade de líquido descarregada na corrente de *underflow*, com incrementos médios de 7,60% na razão de líquido.

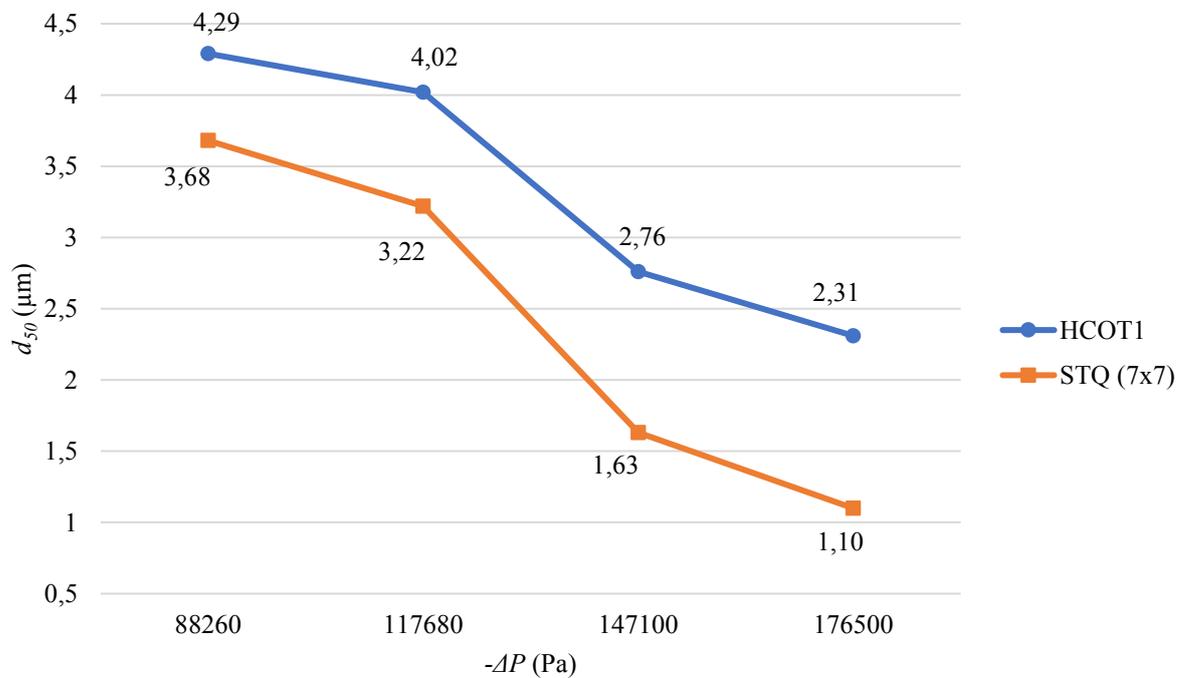
Na Figura 4.11 encontra-se a comparação do diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) dos hidrociclones avaliados. A análise deste parâmetro é interessante, pois permite avaliar as diferenças entre os equipamentos analisados; uma vez que, o diâmetro de corte, segundo Massarani (2001), depende da configuração geométrica do equipamento e de condições operacionais. Quanto menor o valor de  $d_{50}$  melhor é o poder de classificação para aquele equipamento em questão.

Figura 4.10 – Resultados experimentais da razão de líquido ( $R_L$ ) para os hidrociclones HCOT1 e STQ (7x7)



Fonte: A autora.

Figura 4.11 – Resultados experimentais do diâmetro de corte ( $d_{50}$ ) para os hidrociclones HCOT1 e STQ (7x7)



Fonte: A autora.

Observa-se que ambos os hidrociclones apresentam baixos valores de diâmetro de corte. No entanto, foi possível constatar experimentalmente que o STQ (7x7) é um melhor classificador de partículas quando comparado ao hidrociclone HCOT1. Nas mesmas condições operacionais, os diâmetros de corte do novo separador foram, em média, 32% menores que os obtidos por Silva (2012). Esta redução veio ao encontro das sinalizações já discutidas à luz das simulações fluidodinâmicas.

Por fim, na Tabela 4.4 é apresentada uma comparação dos resultados obtidos na simulação do presente estudo com os obtidos na execução experimental para os hidrociclones HCOT1 (SILVA, 2012) e STQ (7x7).

O número de Euler ( $Eu$ ), de acordo com a Equação 4.1 apresentada no capítulo 3, é diretamente proporcional à queda de pressão ( $-\Delta P$ ). Diante disso, espera-se que os valores dos desvios destes dois parâmetros sejam próximos. Justificando a utilização do  $Eu$  para descrever também o desvio entre os dados simulados e experimentais da queda de pressão.

Tabela 4.4 – Resultados simulados e experimentais dos hidrociclones HCOT1 e STQ (7x7) a 176 kPa

	HCOT1		STQ (7x7)	
	$Eu$	$R_L$ (%)	$Eu$	$R_L$ (%)
Respostas simuladas	2604	45,22	2846	47,12
Respostas experimentais	2472	46,73	2502	46,44
Desvio	5,34%	-3,23%	13,75%	1,46%

Fonte: A autora.

De acordo com a Tabela 4.4, foi possível verificar que as simulações fluidodinâmicas foram capazes de prever satisfatoriamente o desempenho dos hidrociclones analisados, especialmente, no que tange ao fechamento dos balanços mássicos. Neste quesito, os desvios não foram superiores a 3,5%.

---

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÃO E SUGESTÕES

---

**A**

s conclusões deste estudo bem como as sugestões para trabalhos futuros estão apresentadas neste capítulo.

#### 5.1 Conclusões

Diante dos resultados simulados e experimentais, foi possível concluir que o formato da seção do duto de alimentação (quadrado ou retangular) foi capaz de alterar o escoamento interno de um hidrociclone já otimizado (HCOT1 – seção transversal circular) e, por consequência, modificar seu desempenho energético-classificador. Tem-se a seguir o detalhamento das principais conclusões.

As simulações conduzidas com vazão volumétrica de alimentação de 0,266 kg/s mostraram que:

- As novas configurações apresentaram maiores valores para o número de Euler quando comparadas ao hidrociclone HCOT1;
- O parâmetro razão de líquido foi maior para os equipamentos com duto de alimentação quadrado ou retangular. Por meio do perfil de velocidade axial foi possível observar que maiores quantidades de fluido migraram para a corrente de *underflow*, o que pôde inferir que os hidrociclones apresentariam melhor eficiência de separação em relação ao hidrociclone HCOT1;
- As simulações fluidodinâmicas indicaram a existência de maiores velocidades tangenciais no interior dos novos hidrociclones, sinalizando um melhor poder de classificação quando comparados ao hidrociclone HCOT1.

A partir dos resultados experimentais conclui-se que:

- Os resultados experimentais para o hidrociclone STQ (7x7) ratificaram as mesmas tendências sinalizadas nas simulações fluidodinâmicas. De fato, a utilização de um duto de alimentação quadrado em detrimento de um circular aumentou o número de Euler;

- A presença de um duto de alimentação quadrado em detrimento de um duto circular proporcionou incrementos médios de 7,60% na razão de líquido do hidrociclone STQ (7x7), contribuindo para o aumento do poder de classificação do novo separador;
- A seção quadrada do hidrociclone STQ (7x7) foi favorável para potencializar o poder de classificação deste equipamento, haja vista uma redução expressiva (32% em média) nos valores de diâmetro de corte em face dos incrementos observados para o número de Euler, velocidade tangencial e razão de líquido;
- Foi observado que a simulação forneceu, de fato, uma boa previsão dos dados experimentais obtidos para o HCOT1 e o STQ (7x7). Ficou evidente que as técnicas de CFD foram uma ferramenta satisfatória para prever os perfis fluidodinâmicos em hidrociclones.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, fazem-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar testes experimentais nos hidrociclones STR (8x6), STR (9x5,3) e 2STR (8x3) e comparar com os resultados experimentais obtidos para o HCOT1 e STQ (7x7);
- Conduzir ensaios experimentais verificando o efeito de concentração de sólidos na alimentação dos hidrociclones HCOT1, STQ (7x7), STR (8x6), STR (9x5,3) e 2STR (8x3);
- Conduzir ensaios experimentais verificando o efeito reológico da suspensão injetada na alimentação dos hidrociclones HCOT1, STQ (7x7), STR (8x6), STR (9x5,3) e 2STR (8x3);
- Realizar um estudo mais abrangente sobre injeção de partículas utilizando as técnicas de CFD para obtenção de particularidades acerca das trajetórias das partículas no interior dos hidrociclones aqui citados.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ALAMATIAN, E.; NASIRI-KALAT, A. Experimental Assessment of Hydrocyclones with two Inlet ( Feed ) Gates. **International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES)**, v. 6, n. 3, p. 86–94, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3991/ijes.v6i3.9409>>.

ALVES, J. V. B. **Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias**. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos)—Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2011. Disponível em: <<http://epqb.eq.ufrj.br/resumos/separacao-do-oleo-residual-de-agua-em-refinarias/>>.

ANSYS. (2006). **ANSYS Fluent 6.3 user's guide**. USA: ANSYS, Inc. 2006. Disponível em: <[https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/main\\_pre.htm](https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/main_pre.htm)>

AZMIR, J.; HOU, Q.; YU, A. CFD-DEM simulation of drying of food grains with particle shrinkage. **Powder Technology**, v. 343, p. 792–802, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.097>>.

BICALHO, I. C. **Concentração de leveduras da fermentação alcoólica em hidrociclones**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)—Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15161>>.

BOX, M. J.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building**. [s.l.] New York: John Wiley and Sons, 1978.

BRAR, L. S.; SHARMA, R. P.; ELSAYED, K. The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone. **Powder Technology**, v. 286, p. 668–677, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.003>>.

BRITO-PARADA, P. R. et al. Influence of Design Parameters on Biomass Separation in Mini-hydrocyclones. **Chemical Engineering and Technology**, n. 12, p. 2323–2330, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ceat.201800290>>.

CÂRLESCU, P.-M. et al. CFD simulation of heat and mass transfer during apricots drying. **Food Science and Technology**, v. 85, p. 479–486, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.015>>.

CHEN, Z. **Hydrodynamics, Stability and Scale-up of Slot-Rectangular Spouted Beds**. 2008. Thesis (Doctorate in Philosophy)—Faculty of Chemical and Biological Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14288/1.0058503>>.

CHOI, W. et al. 3-D milk fouling modeling of plate heat exchangers with different surface finishes using computational fluid dynamics codes. **Journal of Food Process Engineering**, v.

36, n. 4, p. 439–449, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2012.00684.x>>.

CHU, K. W. et al. Understand solids loading effects in a dense medium cyclone: Effect of particle size by a CFD-DEM method. **Powder Technology**, v. 320, p. 594–609, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.032>>.

CHU, L. Y.; CHEN, W. M.; LEE, X. Z. Effect of structural modification on hydrocyclone performance. **Separation and Purification Technology**, v. 21, n. 1–2, p. 71–86, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(00\)00192-1](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(00)00192-1)>.

CILLIERS, J. J.; HARRISON, S. T. L. Yeast flocculation aids the performance of yeast dewatering using mini-hydrocyclones. **Separation and Purification Technology**, v. 209, p. 159–163, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.019>>.

CULLIVAN, J. C.; WILLIAMS, R. A.; CROSS, R. Understanding the Hydrocyclone Separator Through Computational Fluid Dynamics. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 81, n. 4, p. 455–466, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1205/026387603765173718>>.

DELGADILLO, J. A. et al. CFD analysis to study the effect of design variables on the particle cut size in hydrocyclones. **Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering**, v. 8, p. 627–635, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/apj.1702>>.

DRZYMALA, J. **Mineral Processing, Foundations of theory and practice of mineralurgy**. [s.l.] Wyrzeze Wypianskiego: Oficyna Wydawnicza PWr, 2007.

DUAN, L. et al. Entropy generation analysis on cyclone separators with different exit pipe diameters and inlet dimensions. **Chemical Engineering Science**, v. 138, p. 622–633, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.09.003>>.

ELGAMAL, R. A.; KISHK, S. S.; ELMASRY, G. M. Validation of CFD models for the deep-bed drying of rice using thermal imaging. **Biosystems Engineering**, v. 161, p. 135–144, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.018>>.

ELSAYED, K.; LACOR, C. The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES. **Computers and Fluids**, v. 71, p. 224–239, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.09.027>>.

EMAMI, S. et al. Starch-protein separation from chickpea flour using a hydrocyclone. **Journal of Food Engineering**, v. 82, n. 4, p. 460–465, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.03.002>>.

EVANS, W. K.; ONKAEW, P.; HEUNGHOK, B. An Application of Small Hydrocyclones for Separating Yeast in the Brewing Industry. **Asian Journal of Engineering and Technology**, v. 3, n. 3, p. 196–203, 2015. Disponível em: <<https://www.ajouronline.com/index.php/AJET/article/view/2822>>.

FALEIROS, M. F. et al. Estudo da Fluidodinâmica em um Leito de Jorro Bidimensional Com Alimentação Não Convencional. In: XIX Jornada em Engenharia Química-JORNEQ 2014,

- Anais...** Uberlândia/MG, 2014. Disponível em:  
<<http://www.peteq.feq.ufu.br/jorneq/anais2014/otimizacao.html>>.
- FAN, Y. et al. Experimental investigation of various inlet section angles in mini-hydrocyclones using particle imaging velocimetry. **Separation and Purification Technology**, v. 149, p. 156–164, 2015. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.04.047>>.
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. [s.l.] New York: Springer, 2002.
- FORTUNA, A. . **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. [s.l.] São Paulo: Editora da Universidade de São paulo, 2000.
- GHODRAT, M. et al. Numerical analysis of hydrocyclones with different conical section designs. **Minerals Engineering**, v. 62, p. 74–84, jul. 2014. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.12.003>>
- GONÇALVES, S. M. **Efeito da Concentração de Sólidos e de Variáveis Operacionais no Desempenho de um Hidrociclone Concentrador**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)–Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2016. Disponível em:  
<<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/17803>>.
- HE, F. et al. Flow patterns in mini-hydrocyclones with different vortex finder depths. **Chemical Engineering and Technology**, v. 36, n. 11, p. 1935–1942, 2013. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1002/ceat.201300204>>.
- HUANG, A.-N. et al. Classification performance analysis of a novel cyclone with a slit on the conical part by CFD simulation. **Separation and Purification Technology**, v. 190, p. 25–32, 2017a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.08.047>>
- HUANG, L. et al. Numerical simulation and experimental study on a deoiling rotary hydrocyclone. **Chemical Engineering Science**, v. 172, p. 107–116, 2017b. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.06.030>>.
- HWANG, K.-J.; CHOU, S.-P. Designing vortex finder structure for improving the particle separation efficiency of a hydrocyclone. **Separation and Purification Technology**, v. 172, p. 76–84, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.08.005>>
- HWANG, K.-J.; HWANG, Y.-W.; YOSHIDA, H. Design of novel hydrocyclone for improving fine particle separation using computational fluid dynamics. **Chemical Engineering Science**, v. 85, p. 62–68, 2013. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.12.046>>
- HWANG, K. J. et al. CFD study on the effect of hydrocyclone structure on the separation efficiency of fine particles. **Separation Science and Technology**, v. 43, n. 15, p. 3777–3797, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01496390802286637>>.
- KIM, J.-E.; CHUNG, Y. M. CFD-DEM Simulation of the Fluidized-bed Granulation of Food

Powders. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 15, p. 1–15, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12257-018-0382-6>>.

LUCIANO, R. D. et al. Multi-objective optimization of cyclone separators in series based on computational fluid dynamics. **Powder Technology**, v. 325, p. 452–466, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.043>>.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica de sistemas particulados**. 2. ed. ed. [s.l.] Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 2001.

MISIULIA, D.; ANDERSSON, A. G.; LUNDSTRÖM, T. S. Effects of the inlet angle on the collection efficiency of a cyclone with helical-roof inlet. **Powder Technology**, v. 305, p. 48–55, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.050>>.

MORGAN, M. C. *Drilling Fluids Processing Handbook*. In: [s.l.] Burlington, MA, USA: Elsevier Inc, 2005. p. 257–282.

MYERS, R. H. **Response Surface Methodology**. [s.l.] Virginia: Ann Arbor, Mich: Edwards Brothers (Distributors), 1976.

OLIVEIRA, D. C. et al. Influence of geometric dimensions on the performance of a filtering hydrocyclone: An experimental and CFD study. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 3, p. 575–582, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-66322009000300013>>.

ORTEGA-RIVAS, E. Applications of the liquid cyclone in biological separations. **Engineering in Life Sciences**, v. 4, n. 2, p. 119–123, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/elsc.200402004>>.

ORTEGA-RIVAS, E.; MEZA-VELÁSQUEZ, F.; OLIVAS-VARGAS, R. Reduction of solids by liquid cyclones as an aid to clarification in apple juice processing Reducción de sólidos mediante ciclones para líquidos en la clarificación de zumo de manzana. **Food Science and Technology International**, v. 3, n. 5, p. 325–331, 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/108201329700300503>>.

PARVAZ, F. et al. Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators. **Separation and Purification Technology**, v. 201, n. November 2017, p. 223–237, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.001>>.

PATANKAR, S. **Numerical heat transfer and fluid flow**. [s.l.] New York: Hemisphere Pub. Co., 1980.

PETTY, C. A.; PARKS, S. M. Flow predictions within hydrocyclones. **Filtration and Separation**, v. 38, n. 6, p. 28–34, 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(01\)80379-7](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(01)80379-7)>.

PINTO, A. A. et al. Separation of *Saccharomyces cerevisiae* from alcoholic fermentation broth by two commercial hydrocyclones. **Separation and Purification Technology**, v. 120, p. 69–77, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.09.013>>.

SABBAGH, R. et al. An experimental investigation on hydrocyclone underflow pumping. **Powder Technology**, v. 305, p. 98–107, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.045>>.

SCHÄFER, M. **Computational Engineering: Introduction to Numerical Methods**. [s.l.] Nova York: Springer, 2006.

SGROTT JR, O. L. et al. Cyclone optimization by COMPLEX method and CFD simulation. **Powder Technology**, v. 277, p. 11–21, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.039>>.

SHUKLA, S. K.; SHUKLA, P.; GHOSH, P. The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 8, p. 5774–5789, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.11.019>>.

SILVA, D. O. et al. Optimization of the design and performance of hydrocyclones by Differential Evolution technique. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 61, p. 1–7, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.07.002>>.

SILVA, D. O. **Otimização da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclones Mediante Modificações Geométricas**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Química)–Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15061>>.

SIMÕES, A. M. B. M. **Simulação Numérica da Fluidodinâmica de um Hidrociclone Aplicado na Separação Óleo/Água**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)–Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2005. Disponível em: <[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=103983](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=103983)>.

SOUZA, F. J. et al. Analysis of the influence of the filtering medium on the behaviour of the filtering hydrocyclone. **Powder Technology**, v. 107, n. 3, p. 259–267, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00248-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00248-X)>.

SRIPRIYA, R. et al. Studies on the performance of a hydrocyclone and modeling for flow characterization in presence and absence of air core. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 22, p. 6391–6402, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.07.046>>.

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclones**. 4. ed. [s.l.] Eastbourne, UK: Holt, Rinehart & Winston, 1984.

SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid Separation**. 4. ed. [s.l.] Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 2000.

- TANG, B. et al. Effect of inlet configuration on hydrocyclone performance. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 27, n. 7, p. 1645–1655, 2017. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60187-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60187-0)>.
- TU, J.; YEOH, G.-H.; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach**. In: 2. ed. [s.l.] Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 2008. p. 1–28.
- VAKAMALLA, T. R. et al. Development of novel hydrocyclone designs for improved fines classification using multiphase CFD model. **Separation and Purification Technology**, v. 175, p. 481–497, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.026>>.
- VEGA-GARCIA, D.; BRITO-PARADA, P. R.; CILLIERS, J. J. Optimising small hydrocyclone design using 3D printing and CFD simulations. **Chemical Engineering Journal**, v. 350, n. June, p. 653–659, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.016>>.
- VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. p. 155–257.
- VIEIRA, L. G. M. **Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química)–Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15053>>.
- VIEIRA, L. G. M. et al. A study of the fluid dynamic behaviour of filtering hydrocyclones. **Separation and Purification Technology**, v. 58, n. 2, p. 282–287, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.05.029>>.
- WANG, C.-C.; WU, R.-M. Experimental and simulation of a novel hydrocyclone-tubular membrane as overflow pipe. **Separation and Purification Technology**, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.034>>.
- WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. **Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 7. ed. [s.l.] Great Britain: Elsevier Science & Technology Books, 2006.
- YAN, C.; YANG, Q.; WANG, H. L. Simulation on the Flow Field of Mini-Hydrocyclones for Different Inlet Sizes. **Advanced Materials Research**, v. 864–867, p. 1183–1191, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.864-867.1183>>.
- YANG, J.; SUN, G.; GAO, C. Effect of the inlet dimensions on the maximum-efficiency cyclone height. **Separation and Purification Technology**, v. 105, p. 15–23, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.12.020>>.
- YUAN, H. et al. Study on the hydrocyclonic separation of waste plastics with different density. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 45, p. 108–111, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.037>>.