



ISABELA TAVARES PINTO

**ANÁLISE NUMÉRICA VIA CFD DE UM
HIDROCICLONE NÃO-CONVENCIONAL**

**LAVRAS – MG
2023**

ISABELA TAVARES PINTO

**ANÁLISE NUMÉRICA VIA CFD DE UM HIDROCICLONE
NÃO-CONVENCIONAL**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Curso
de Engenharia Química, para a
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

ISABELA TAVARES PINTO

**ANÁLISE NUMÉRICA VIA CFD DE UM HIDROCICLONE
NÃO-CONVENCIONAL**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do Curso de
Engenharia Química, para a obtenção do
título de Bacharel.

APROVADO em .

Msc. Paula Giarolla Silveira
DCA/UFLA

Prof^ª. Dr^ª. Suellen Mendonça Nascimento
DEG/UFLA

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior
DEG/UFLA

**LAVRAS – MG
2023**

*Aos meus pais Rômulo e Elimar.
Às minhas avós Maria e Neusa.
À minha irmã Maria Clara.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que é minha fortaleza e nunca me abandona, aos meus pais Rômulo e Elimar e minha irmã Maria Clara por todo o apoio durante toda minha vida pessoal e acadêmica, por serem meu porto seguro e sempre me darem forças nos momentos difíceis.

Às minhas avós, Maria e Neusa por todo carinho, orações e ajuda.

À minha família por sempre estarem ao meu lado e me apoiarem.

Aos meus amigos, os de Belo Horizonte que sempre fizeram parte da minha história, os de Lavras que foram minha família nesses anos, e agora os de Campinas, que me receberam de braços abertos. E a todos que fizeram parte da minha trajetória.

A todos meus professores do pré à graduação, que foram essenciais na minha formação e especialmente ao Professor Irineu, que me orientou durante esse trabalho sempre me ensinando e auxiliando.

À Universidade Federal de Lavras, que me proporcionou vivências acadêmicas incríveis e inúmeros aprendizados, especialmente a PQ Júnior e o NENP.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Os hidrociclones são equipamentos industriais que realizam a separação sólido-líquido envolvendo materiais particulados. São compostos por uma parte cilíndrica acoplada a uma parte cônica, sem partes móveis, possuindo uma entrada e duas saídas. Como sua eficiência de separação depende diretamente de vários fatores geométricos, como o diâmetro do corpo cilíndrico e é um fator crítico no desempenho do equipamento, a mesma pode ser ajustada a fim de atender necessidades específicas de cada aplicação. O hidrociclone de três produtos possui três correntes de saída e vem sendo estudado por ter melhor desempenho. A simulação computacional via fluidodinâmica computacional (CFD) é largamente utilizada na resolução de problemas complexos como o caso da análise do escoamento de fluidos. Este trabalho tem como objetivos a modelagem tridimensional do hidrociclone convencional e de três produtos, bem como a análise da qualidade das malhas geradas, dos resultados pelos perfis de velocidade e pressão, do Número de Euler, Razão de Líquido e Eficiência, de ambos equipamentos. A construção das geometrias, malhas e as simulações foram feitas utilizando o pacote estudantil ANSYS® e a partir disso foram avaliados os vetores de velocidade por magnitude, bem como os contornos de velocidade por magnitude e axial, de pressão e de fração volumétrica da água, em ambos hidrociclones. As malhas geradas obtiveram bom refinamento com baixas distorções, contribuindo para simulações com elementos de qualidade excelente, para ambos equipamentos. Os perfis de velocidade apresentaram resultados condizentes com a literatura, de modo a comprovar que as mudanças na geometria do hidrociclone podem melhorar a eficiência de separação. Os perfis de pressão mostraram que o hidrociclone de três produtos apresentou uma maior queda de pressão e ao avaliar os contornos de fração volumétrica, comprovou-se a presença de zonas de ar, comprovando a formação de *air core*. Por fim, pelos resultados dos cálculos do Número de Euler e Razão de Líquido, reafirmaram que o separador não-convencional apresenta melhor escoamento, otimizando a operação e melhorando a eficiência do equipamento. As simulações obtiveram resultados satisfatórios, para ambos hidrociclones, e ressaltou a importância da fluidodinâmica computacional para análise fiel do escoamento em hidrociclones, sendo uma ferramenta viável para auxílio na aplicação de novas tecnologias na indústria.

Palavras-chave: Ciclone de três produtos. Fluidodinâmica Computacional. Perfil de velocidade e pressão. Razão de líquido.

ABSTRACT

Hydrocyclones are industrial equipment that perform solid-liquid separation involving particulate materials. They are composed of a cylindrical part coupled to a conical part, with no moving parts, with one inlet and two outlets. As its separation efficiency depends directly on several geometric factors, such as the diameter of the cylindrical body, and is a critical factor in the equipment's performance, it can be adjusted to meet the specific needs of each application. The three-product hydrocyclone has three outlet streams and has been studied in result of a better performance. Computational simulation via computational fluid dynamics (CFD) is widely used in solving complex problems such as fluid flow analysis. This work has as objectives the three-dimensional modeling of the conventional and three-product hydrocyclone, as well as the analysis of the quality of the generated meshes, the results by the velocity and pressure profiles, the Euler Number, Liquid Ratio and Efficiency, of both equipments. The construction of the geometries, meshes and the simulations were done using the student package ANSYS® and from this the results of the velocity vectors by magnitude, as well as the velocity by magnitude and axial, pressure and water volume fraction contours, in both hydrocyclones, were evaluated. The generated meshes obtained good refinement with low distortions, contributing to simulations with excellent quality elements for both equipments. The velocity profiles showed results consistent with the literature, so that changes in the hydrocyclone geometry improved the separation efficiency. The pressure profiles showed that the three-product hydrocyclone presented a higher pressure drop, and by evaluating the volume fraction contours, the presence of air zones was proven, proving the formation of air core. Finally, the results of the Euler Number and Liquid Ratio calculations reaffirmed that the non-conventional separator presents better flow, optimizing the operation and improving the efficiency of the equipment. The simulations obtained satisfactory results, for both hydrocyclones, and highlighted the importance of computational fluid dynamics for a faithful analysis of the flow in hydrocyclones, being a viable tool to aid in the application of new technologies in the industry.

Keywords: Three-product cyclone. Computational Fluid Dynamics. Velocity and pressure profile. Split ratio.

LISTA DE SÍMBOLOS

g^{\rightarrow}	Vetor gravidade	[m/s ²]
V^{\rightarrow}	Vetor velocidade	[m/s]
d	Diâmetro da partícula	[m]
D*	Diâmetro de corte	[m]
D _c	Diâmetro da seção cilíndrica	[m]
D _i	Diâmetro do duto de alimentação	[m]
D _o	Diâmetro do tubo de <i>overflow</i>	[m]
D _u	Diâmetro do orifício do <i>underflow</i>	[m]
Eu	Número de Euler	[-]
f(RL)	Quociente de vazão no <i>underflow</i> e na alimentação	[-]
g _x	Gravidade no eixo x	[m/s ²]
g _y	Gravidade no eixo y	[m/s ²]
g _z	Gravidade no eixo z	[m/s ²]
H	Comprimento da parte cônica	[m]
h	Comprimento da parte cilíndrica	[m]
k	Parâmetro do modelo RRB	[-]
l	Comprimento do <i>vortex finder</i>	[m]
L	Comprimento total	[m]
m	Parâmetro do modelo RRB	[-]
P	Pressão	[Pa]
P _k	Produção de turbulência devido às forças viscosas	[kg/m.s ³]
P _{eb}	Forças de empuxo	[-]
Q	Vazão de alimentação	[kg/s]
Re	Número de Reynolds	[-]
R _L	Razão de líquido	[%]
t	Tempo	[s]

u	Componente da velocidade no eixo x	[m/s]
u'	Velocidade de flutuações	[m/s]
\bar{u}	Velocidade média temporal	[m/s]
U_c	Velocidade média do fluido na sessão cilíndrica	[m/s]
v	Componente da velocidade no eixo y	[m/s]
w	Componente de velocidade no eixo z	[m/s]
W_a	Vazão mássica de água na alimentação	[kg/s]
W_u	Vazão mássica de água no <i>underflow</i>	[kg/s]
y	Distribuição cumulativa do modelo RRB	[-]

Símbolos gregos

β	Parâmetro dependente da configuração do hidrociclone	[-]
ΔP	Queda de pressão	[Pa]
η	Eficiência total de separação	[%]
θ	Ângulo da seção cônica	[°]
μ	Viscosidade do fluido	[Pa.s]
μ_T	Viscosidade turbulenta	[kg/m.s]
ρ	Densidade da fase líquida	[kg/m ³]
ρ_s	Densidade da fase sólida	[kg/m ³]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de um hidrociclone.....	4
Figura 2– Representação das principais dimensões de um hidrociclone.....	5
Figura 3– Representação das componentes da velocidade de um hidrociclone.	11
Figura 4 – Representação da distribuição de velocidade tangencial em um hidrociclone.	11
Figura 5 – Esquema dos principais componentes dos hidrociclones a) convencionais e b) de três produtos.....	12
Figura 6 – Esquema das principais características do hidrociclone de três produtos.....	13
Figura 7 – Representação das escalas de turbulência em um escoamento.	17
Figura 8 – Representação das flutuações de uma variável no tempo.	17
Figura 9 – Vista isométrica do exterior da geometria dos hidrociclones.	23
Figura 10- – Vista do plano xy dos hidrociclones	23
Figura 11 – Vista do plano xz do hidrociclone a) convencional e b) de três produtos.....	23
Figura 12 – Vista do plano yz dos hidrociclones.....	23
Figura 13 – Malha do hidrociclone convencional a) vista do equipamento inteiro e b) vista com mais detalhes da malha.	24
Figura 14 – Malha do hidrociclone de três produtos a) vista do equipamento inteiro e b) vista com mais detalhes da malha.	24
Figura 15 – Gráfico de qualidade da malha com a representação de skewness para o hidrociclone convencional.....	28
Figura 16 – Gráfico de qualidade da malha com a representação de skewness para o hidrociclone de três produtos.....	28
Figura 17 – Gráfico de qualidade da malha com a representação de <i>aspect ratio</i> para o hidrociclone convencional.....	29
Figura 18 – Gráfico de qualidade da malha com a representação de <i>aspect ratio</i> para o hidrociclone de três produtos.....	29
Figura 19 – Vetor de velocidade por magnitude do hidrociclone convencional.	30
Figura 20 – Vetor de velocidade por magnitude do hidrociclone de três produtos.....	30
Figura 21 – Vetor de velocidade por magnitude próximo à ponta do localizador do vortex e regiões cônicas do hidrociclone convencional.....	30
Figura 22 – Vetor de velocidade por magnitude próximo à ponta do localizador do vortex e regiões cônicas do hidrociclone de três produtos.	30
Figura 23 – Contorno de velocidade por magnitude do hidrociclone convencional.	32

Figura 24 – Contorno de velocidade por magnitude do hidrociclone de três produtos.....	32
Figura 25 – Contorno de velocidade axial do hidrociclone convencional.	33
Figura 26 – Contorno de velocidade axial do hidrociclone de três produtos.	33
Figura 27 – Contorno de pressão do hidrociclone convencional.....	34
Figura 28 – Contorno de pressão do hidrociclone de três produtos.	34
Figura 29 – Contorno de fração volumétrica da água do hidrociclone convencional.	35
Figura 30 – Contorno de fração volumétrica da água do hidrociclone de três produtos.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros para os principais tipos de hidrociclone.	8
Tabela 2 – Dimensões dos hidrociclones convencional e de três produtos.	22
Tabela 3 – Condições de contorno para a simulação dos hidrociclones convencional e de três produtos.	25
Tabela 4 – Parâmetros usados na simulação do hidrociclone convencional e de três produtos.	26
Tabela 5 – Valores mínimos, máximos e médios para skewness e aspect ratio para o hidrociclone convencional e de três produtos.	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
3	REFERENCIAL TEÓRICO	4
3.1	Hidrociclones	4
3.1.1	Distribuição granulométrica de partículas	9
3.1.2	Razão de líquido	10
3.1.3	Velocidade e distribuição de pressão.....	10
3.1.4	Hidrociclones Não-Convencionais	11
3.2	Fluidodinâmica Computacional (CFD)	13
3.2.1	Pré-processador	14
3.2.2	Processador	15
3.2.3	Pós-processador	15
3.2.4	Equações de Conservação	15
3.2.4.1	Equação da continuidade.....	15
3.2.4.2	Equação da quantidade de movimento.....	16
3.2.5	Modelos de turbulência	17
3.2.5.1	Modelo k- ϵ	18
3.3	Trabalhos Correlatos.....	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	Geometria.....	22
4.2	Malha	24
4.3	Simulação.....	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1	Qualidade de Malha	27
5.2	Perfis de Velocidade e Pressão	29
5.3	Número de Euler e Razão de Líquido.....	36
6	CONCLUSÕES	38
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Os hidrociclones são equipamentos que promovem separações sólido-líquido, envolvendo materiais particulados, muito utilizado na indústria química. O separador foi patenteado pela primeira vez por Bretney, em 1891, utilizado na indústria de mineração e permaneceu com o uso restrito e pouco difundido por algumas décadas. Até que, por volta de 1940, seu uso foi expandido para demais indústrias químicas e tornou-se um importante processo unitário, sendo cada vez mais utilizado (SVAROVSKY, 1984).

O princípio básico de separação do equipamento é a sedimentação centrífuga, ou seja, a partir da aceleração centrífuga que a suspensão de partículas é submetida que ocorre a separação fluido-partícula, baseado na diferença de densidade. Os hidrociclones não possuem partes móveis, sendo compostos por uma parte cilíndrica acoplada a uma parte cônica. No topo da seção cilíndrica há o duto de alimentação e possui duas saídas, uma na parte superior do cilindro, onde há o tubo de *overflow* e outra na parte inferior da seção cônica com o orifício de *underflow*. Assim, o custo de aquisição, operação e manutenção é reduzido e sua construção e funcionamento é mais simples quando comparado a outros equipamentos de separação (SVAROVSKY, 2000).

Atualmente, é um equipamento vital em diversos setores, tais como indústrias químicas, petroquímicas, de alimentos, têxtil, extrativista, mineral, entre outras. Com o aumento da poluição industrial, a legislação está cada vez mais rigorosa, e se tratando do descarte de efluentes industriais, o hidrociclone tem sido muito utilizado na purificação da água, evitando a contaminação por contaminantes orgânicos, por exemplo (SALVADOR, 2013). Além disso, são utilizados na clarificação de líquidos, classificação de partículas e no espessamento de suspensões.

Em virtude de seu grande potencial de aplicação, os hidrociclones tem sido cada vez mais utilizados e difundidos nas mais diversas áreas de indústria. Dessa maneira, sua configuração vem sendo estudada ao longo dos anos a fim de propor melhorias na tecnologia de separação, como maior eficiência de operação, capacidade de lidar com altas taxas de transferência, redução energética, otimização de processos, qualidade de separação, entre outros.

Portanto, com o intuito de atender as necessidades individuais de cada processo industrial, foram estudadas modificações no hidrociclone convencional, seja agregando outra operação unitária no processo ou alterando a geometria do equipamento, uma vez que as

relações geométricas do equipamento têm influência direta desempenho e eficiência de separação e classificação da fase dispersa. Assim, é de suma importância a compreensão da influência das variáveis geométricas e operacionais no desempenho dos hidrociclones (SILVA, 2012).

O hidrociclone de três produtos é um separador não-convencional, já que apresenta uma corrente de entrada e três correntes de saída - duas que saem pelos tubos de *overflow* e uma que sai pelo orifício de *underflow*. A geometria desse separador foi modificada de modo que foi adicionado um tubo concêntrico na parte superior do cilindro a fim de minimizar a presença de finos na corrente de *underflow* (OBENG, 2003; MAINZA, 2004).

Existem diversas técnicas para avaliar a construção e operação dos hidrociclones não convencionais e verificar se as modificações realizadas na geometria do equipamento atenderam às expectativas de melhoria do processo. A fluidodinâmica computacional (CFD) é uma ferramenta utilizada para analisar o comportamento de sistemas envolvendo escoamento de fluidos e outros fenômenos associados que se baseia na capacidade de processamento computacional. Como a literatura prevê, a construção do hidrociclone é relativamente simples, porém a análise do comportamento do escoamento é complexa, o que dificulta sua previsão e validação, fazendo assim com que o CFD seja um dos métodos mais eficientes para o estudo da dinâmica de fluidos, sendo amplamente utilizado (MAINZA, 2006).

2 OBJETIVOS

Diante dos fatos apresentados, o objetivo geral do presente estudo é realizar uma análise numérica via fluidodinâmica computacional do hidrociclone de três produtos mediante comparação com a simulação do mesmo hidrociclones com geometria convencional (dois produtos) e com a literatura apresentada.

Por sua vez, os objetivos específicos do presente trabalho são a análise da qualidade da malha gerada para ambos equipamentos, a fim de garantir uma boa performance nas simulações, apresentando elementos com qualidade e baixas distorções, garantindo uma confiabilidade dos resultados gerados. Além disso, a análise dos perfis de velocidade e de pressão, a fim de comparação com a literatura e verificação do comportamento da fluidodinâmica do escoamento, bem como a avaliação de uma melhor eficiência do hidrociclone de três produtos. Por fim, a análise dos resultados dos cálculos do Número de Euler

e Razão de Líquido, para ambos separados, com o intuito de verificar novamente a eficiência e o escoamento dos hidrociclones perante dois parâmetros importantes e que se influenciam diretamente pela mudança na geometria do equipamento.

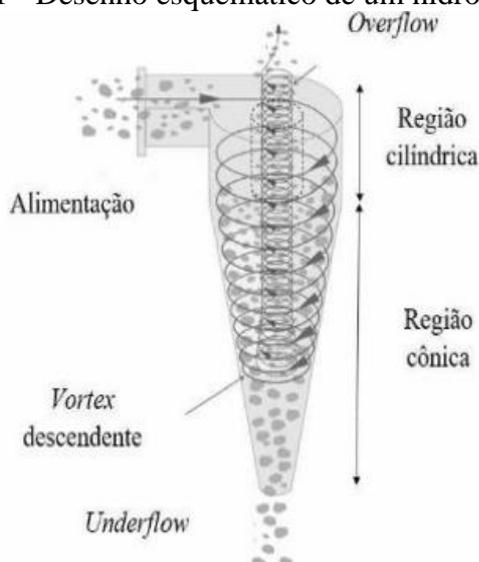
3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção é apresentada uma fundamentação teórica sobre hidrociclones convencionais e não convencionais, bem como os princípios de seu funcionamento e conceitos importantes sobre as ferramentas de fluidodinâmica computacional utilizadas para a simulação.

3.1 Hidrociclones

Os hidrociclones são equipamentos utilizados nas indústrias químicas, petroquímicas, têxtil, metalúrgica, nuclear, entre outras a fim de realizar a separação de particulados presentes em uma corrente fluida, podendo receber a denominação de ciclone hidráulico ou ciclone líquido. Em sua configuração convencional, sua estrutura consiste em uma câmara cilíndrica acoplada a uma peça cônica, sem peças móveis, constituindo-se de uma entrada lateral e duas saídas orientadas no eixo central do equipamento, uma delas localizada na parte superior da câmara, *overflow*, e outra localizada na parte inferior da peça cônica, *underflow* (CREMASCO, 2018). A Figura 1 mostra o esquema de um hidrociclone.

Figura 1 - Desenho esquemático de um hidrociclone.



Fonte: Adaptado de Silva (2019).

Os hidrociclones apresentam vantagens quando comparados com outros equipamentos de separação, como a facilidade na montagem, ou seja, pode ser montado em posição vertical ou horizontal, além de poderem ser operados a baixas e altas temperaturas e pressões, possuem baixo custo de instalação e operação e baixo tempo de residência. (CAVALCANTE, 2018). Também são muito versáteis, podendo ser utilizados na classificação de partículas, espessamento de suspensões, separação de dois líquidos imiscíveis, entre outros. Portanto,

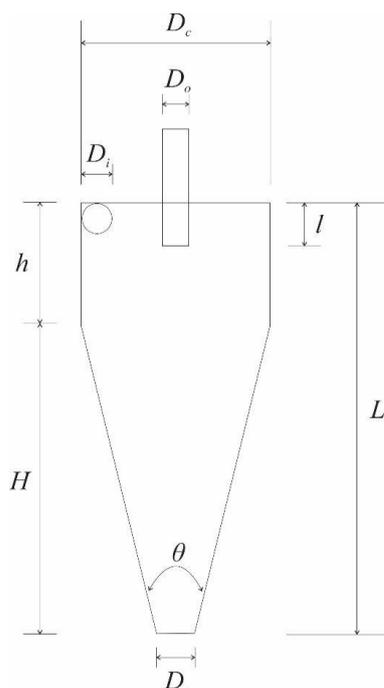
possuem alta versatilidade, além de alta eficiência e baixo custo energético e de manutenção (NI *et al.*, 2019).

Os hidrociclones podem ser fabricados em poliuretano, aço revestido em borracha ou poliuretano, aço inoxidável, entre outros, variando de acordo com a aplicação e material a ser tratado no equipamento. A fim de garantir uma homogeneidade e distribuição equivalente da pressão e vazão do material, são utilizados sistemas de distribuidores anulares, permitindo, assim, otimizar o espaço do equipamento, garantindo uma alta vazão quando o *overflow* e *underflow* possuem a devida separação entre eles (ALMEIDA, 2016).

O funcionamento do hidrociclone utiliza como princípio a força centrífuga, no qual a alimentação da suspensão sólido-líquido é realizada de forma tangencial formando um movimento descendente em espiral, no qual as partículas maiores e mais densas são arrastadas para o *underflow*. Enquanto que as partículas menores e menos densas são coletadas no *overflow*, uma vez que são arrastadas para o centro do equipamento, onde acontece um estrangulamento do vórtex, formando um movimento ascendente em espiral (CAVALCANTE, 2018).

O hidrociclone tem desempenho altamente influenciado pela sua geometria, uma vez que sua eficiência de separação depende de vários fatores geométricos portanto, as relações entre suas dimensões são de suma importância para a projeção do mesmo (CUNHA *et al.*, 2021). Como mostra a Figura 2, as principais dimensões de um hidrociclone são os diâmetros da seção cilíndrica, do duto de alimentação, do tubo de *overflow* e do orifício de *underflow*, representados por D_c , D_i , D_o e D_u , respectivamente. Além disso, estão representados os comprimentos da parte cilíndrica, cônica, total, do *vortex finder* e o ângulo da seção cônica, representados por h , H , L , l e θ , respectivamente (ULLMANN *et al.*, 2022).

Figura 2– Representação das principais dimensões de um hidrociclone.



Fonte: Adaptado de Ullman (2022).

As proporções relativas das dimensões do hidrociclone são vitais para o efeito na eficiência de separação e queda de pressão. Portanto, todas as medidas que aumentam a resistência ao escoamento melhoram a eficiência de separação e vice-versa, por exemplo, um hidrociclone com saída relativamente pequena oferece uma maior resistência ao escoamento, tendo menor capacidade, porém oferece uma maior recuperação em massa (HUSVEG *et al.*, 2007).

Assim, segundo Alves (2012), as variáveis geométricas do hidrociclone afetam seu desempenho, o aumento da capacidade se dá pelo aumento do diâmetro do hidrociclone e do comprimento total, e pela redução do comprimento do *vortex finder*. Para reduzir o diâmetro de corte, reduz-se o diâmetro do hidrociclone, o ângulo da região cônica e o comprimento do *vortex finder*, e aumenta-se o comprimento total do equipamento. Para aumentar a razão de fluido, aumenta-se o diâmetro de saída do concentrado e reduz-se o diâmetro da saída do diluído. E, por fim, para aumentar a queda de pressão, diminui-se o diâmetro das saídas e aumenta-se o diâmetro da entrada.

Para uma melhor operação, o ajuste correto do diâmetro do orifício do *underflow* é de suma importância, entretanto, não pode ser predito de forma exata devido a vários fatores que afetam o desempenho do hidrociclone, como a variação no tamanho e densidade das partículas a serem separadas. Como diferentes partículas têm diferentes velocidades de sedimentação, a

quantidade de sólidos que sai pelo *underflow* também varia, dificultando a determinação do tamanho exato do orifício para uma separação ideal. Portanto, é uma variável operacional, sendo melhor ajustado após a instalação e de acordo com a operação do equipamento, com o uso de bocais substituíveis e orifícios ajustáveis (CRUZ, 2010).

Outras variáveis operacionais que afetam o desempenho de hidrociclone podem ser destacadas, como a diferença de densidade das fases, que impacta diretamente na separação das fases; as condições de operação da vazão de alimentação, que afetam a intensidade do campo centrífugo; a temperatura que afeta a densidade e viscosidade, afetando a mobilidade da fase dispersa; entre outras (DIBB, 1997).

Os diâmetros de um hidrociclone individual podem variar de 10 mm a 2,5m, portanto, o corte para os sólidos varia de tamanho de 2 a 250 μm . As quedas de pressão operacionais variam de 0,34 a 6 bar, sendo que as partículas menores operam a pressões mais elevadas quando comparadas a partículas maiores. Assim, dependendo do tamanho e estrutura da partícula, das condições operacionais e da natureza dos sólidos, as concentrações no *underflow* raramente excedem 45 a 50% em volume (CAVALCANTE, 2018).

As dimensões geométricas do hidrociclone podem afetar diversas variáveis do equipamento, como por exemplo, ao aumentar o diâmetro do hidrociclone, aumenta-se o diâmetro da entrada, da saída e o comprimento total, reduzindo, assim, o comprimento do *vortex finder*, causando o aumento da capacidade do equipamento. Além disso, ao reduzir o diâmetro do ciclone, reduz-se o diâmetro de entrada, de saída, o ângulo da região cônica, bem como o comprimento do *vortex finder*, aumentando o comprimento total do mesmo, reduz-se, assim, o diâmetro de corte, conseqüentemente, aumenta-se a eficiência (CAVALCANTE, 2018).

Dessa maneira, pelo diâmetro de corte, D^* ou d_{50} , que corresponde às partículas com tamanho equivalente a 50% de probabilidade de serem coletadas, é possível calcular a eficiência de um hidrociclone, como mostra a Equação 1 (MASSARANI, 2001).

$$\frac{D^*}{D_c} = k \left(\frac{D_c \mu}{Q(\rho_s - \rho)} \right)^{1/2} f(RL)P \quad (1)$$

Em que:

D^* = Diâmetro de corte;

Q = Vazão de alimentação;

$(\rho_s - \rho)$ = Diferença de densidade entre as fases;

k = Constante dependente do tipo de configuração do hidrociclone;

$f(RL)$ = Quociente da vazão no *underflow* e na alimentação;

μ = Viscosidade do fluido;

P = Fator de concentração volumétrica.

Sendo que, $f(RL)$ é descrito pelas Equações 2 e 3.

$$f(RL) = \frac{1}{1+AR_L} \quad (2)$$

$$RL = B \left[\frac{D_u}{D_c} \right] \quad (3)$$

Em que:

A = fator de correção que leva em conta os efeitos da recirculação do fluxo e da turbulência;

B = parâmetro de correção.

De acordo com a Equação 1, nota-se que, quanto maior for a diferença de densidade entre o sólido e o fluido, menor é o diâmetro de corte, resultando em uma maior eficiência de um hidrociclone, sendo que as outras variáveis permanecem constantes. A queda de pressão entre o *overflow* e a alimentação é representada pela Equação 4 (CRUZ, 2010).

$$\beta = \frac{-\Delta P}{\rho U_c^2} \quad (4)$$

Em que:

β = Parâmetro dependente da configuração do hidrociclone;

ΔP = Queda de pressão;

U_c = Velocidade média do fluido na sessão cilíndrica, representada na Equação 5.

$$U_c = \frac{Q}{(\pi D_c^2)/4} \quad (5)$$

Além disso, os hidrociclones podem ser classificados de acordo com suas dimensões, como mostrado pela Figura 2, sendo os mais conhecidos, do tipo Bradley e Rietema. Os parâmetros K , A , B , C e β são definidos de acordo com cada tipo de hidrociclone e também definidos em uma faixa de Reynolds e estão dispostos na Tabela 1, assim como as condições de operação de cada tipo.

Tabela 1 - Parâmetros para os principais tipos de hidrociclone.

	K	A	B	C	β	Re
Bradley	0,015	1,73	55,3	2,63	7500	$5,10^3 < Re < 50,10^3$
Rietema	0,039	1,73	145	5,75	1200	$3,10^3 < Re < 20,10^3$

Fonte: SOUZA *et al.* (2015)

O número de Reynolds (Re) é um parâmetro adimensional usado para descrever as características de fluxo em um hidrociclone, sendo definido como a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas no fluxo. É calculado com base na vazão, densidade e viscosidade do fluido e nas dimensões do equipamento, sendo frequentemente usado para projetar e otimizar o desempenho do hidrociclone, sendo definido pela Equação 6.

$$Re = \frac{D_c u_c \rho}{\mu} \quad (6)$$

Além do número de Reynolds, outro grupo adimensional tem se tornado relevante na literatura envolvendo projeto e desempenho de hidrociclones, o número de Euler (Eu), que se refere ao custo energético e é descrito pela Equação 7 (SALVADOR, 2013).

$$Eu = \frac{2(-\Delta P)}{\rho u_c^2} \quad (7)$$

Assim, faz-se necessário definir a eficiência total de separação (η), que é representada pela Equação 8, que é definida como a razão entre a quantidade mássica de sólidos coletados no *underflow*, independentemente do modo como a separação ocorreu –seja por arraste ou centrifugação- e a quantidade mássica de sólidos alimentados no hidrociclone (VIEIRA, 2006).

$$\eta = \frac{C\omega_u * W_u}{C\omega_a * W_a} \quad (8)$$

Em que:

$C\omega_u$ = Concentração mássica no *underflow*;

$C\omega_a$ = Concentração mássica na alimentação;

W_u = Vazão mássica de água no *underflow*;

W_a = Vazão mássica de água na alimentação.

3.1.1 Distribuição granulométrica de partículas

A distribuição granulométrica descreve a distribuição de tamanhos de partículas em função da frequência relativa das mesmas que detêm certo diâmetro. Pode ser expressa em função da massa, pela técnica de peneiramento, em função do volume, no caso de difração a

laser, ou pelo número de partículas, pela técnica de análise de imagens. Também pode ser representada pela distribuição cumulativa de partículas, que possuem diâmetro menor e maior que um valor médio de partículas, em um intervalo da grandeza acumulada (CREMASCO, 2018).

Dessa forma, qualquer que seja a distribuição granulométrica, é possível descrevê-la a partir de modelos matemáticos, como o de Gates, de Gaudin e Schumann (GGS) e de Rosin, Rammler e Bennet (RRB), adotado nesse estudo. Assim, a Equação 9, descreve o equacionamento do modelo RRB e a Equação 10, sua linearização.

$$y = 1 - \exp \left[-\left(\frac{d}{k}\right)^m \right] \quad (9)$$

$$\ln(-\ln(1 - y)) = m * \ln(k) \quad (10)$$

Em que:

y = Distribuição cumulativa menor que dado tamanho;

d = diâmetro da partícula;

m; k = parâmetros do modelo RRB.

3.1.2 Razão de líquido

A razão de líquido (R_L) é definida como a razão entre a quantidade de fluido direcionada ao *underflow* e a quantidade total de líquido alimentada, como mostra a Equação 11. Seu cálculo é importante, uma vez que, ao se utilizar o hidrociclone no processo de separação líquido-líquido, as partículas deixam o equipamento pelo *overflow*, em que a parte contínua é mais densa que a dispersa, entretanto, observa-se que uma fração da fase contínua também sai do equipamento pela mesma saída (ALVES, 2012).

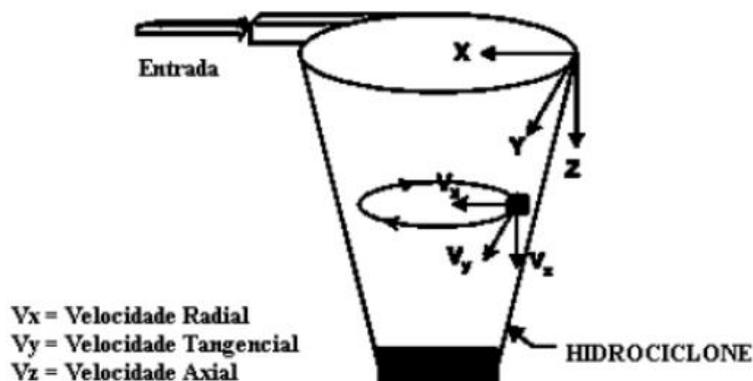
$$R_L = \frac{W_u}{W_a} \quad (11)$$

3.1.3 Velocidade e distribuição de pressão

A velocidade do fluxo em um hidrociclone abrange três componentes: tangencial, axial e radial, como mostra a Figura 3, uma vez que o processo de separação do equipamento é baseado no efeito das forças centrífugas no corpo do hidrociclone e, como não possui peças móveis, o vórtex é produzido pelo bombeamento do fluido, que entra tangencialmente no equipamento. É muito importante conhecer as distribuições de velocidade dentro do

escoamento para construir um modelo teórico do processo de separação e simular as trajetórias de partículas (CAVALCANTE, 2018).

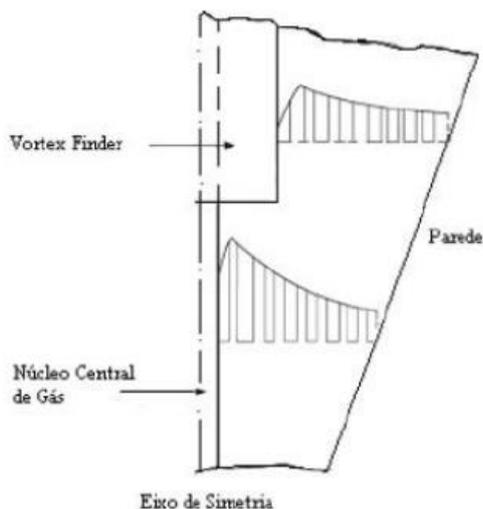
Figura 3– Representação das componentes da velocidade de um hidrociclone.



Fonte: Adaptado de Cavalcante (2018).

As distribuições de velocidade tangencial podem ser estimadas por medidas de pressão estática radial, uma vez que a pressão estática aumenta radialmente para fora devido ao escoamento turbilhonar nos hidrociclones. Na Figura 4, observa-se que a velocidade tangencial aumenta a partir da parede a medida que o raio diminui, passando então por um máximo e diminuindo na direção do núcleo central (ALMEIDA, 2009).

Figura 4 – Representação da distribuição de velocidade tangencial em um hidrociclone.



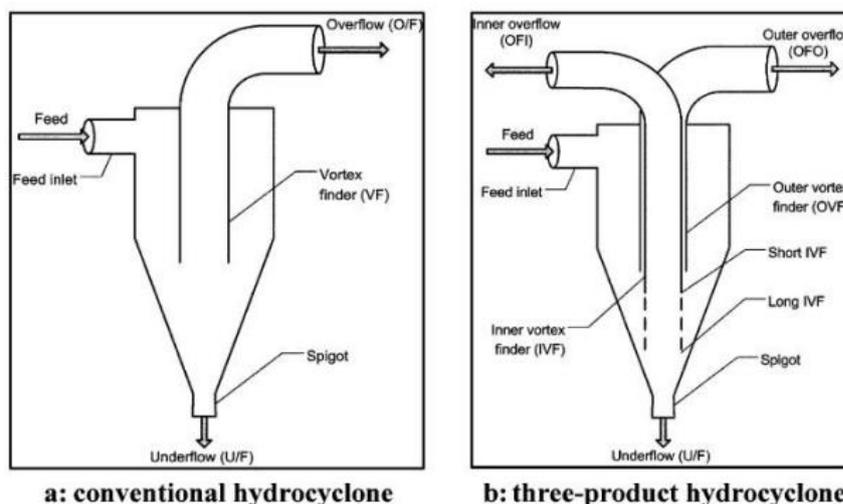
Fonte: Adaptado de Svarovsky (1984).

3.1.4 Hidrociclones Não-Convencionais

Existem diversos tipos de hidrociclones não-convencionais e no presente trabalho será utilizado um deles, o hidrociclone de três produtos, que é a modificação do hidrociclone convencional com um localizador de vórtex adicional inserido de forma concêntrica ao

existente no *overflow*, como mostra a Figura 5 (MAINZA *et al.* 2004), sendo que o localizador do vórtex externo é OVF e o localizador do vórtex interno é IVF.

Figura 5 – Esquema dos principais componentes dos hidrociclones a) convencionais e b) de três produtos.



Fonte: Adaptado de Mainza *et al.* (2004).

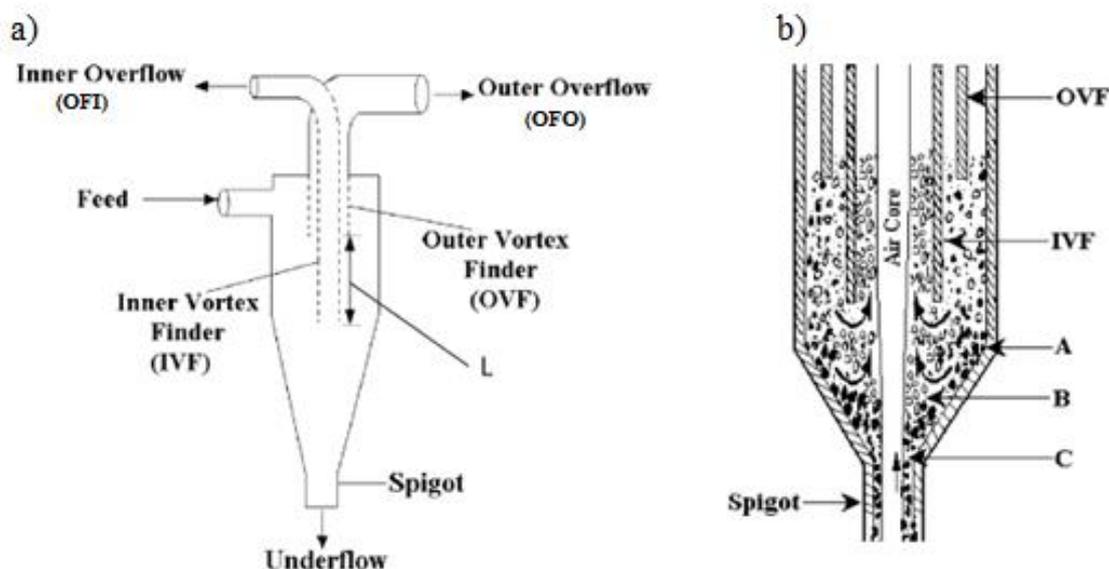
A principal diferença no projeto dos dois equipamentos é que o hidrociclone de três produtos possui um localizador de vórtex adicional para produzir um terceiro produto, ou seja, produz um fluxo de *overflow* mais fino, um fluxo de *overflow* mediano e um fluxo de *underflow* mais grosso. Sendo que, o produto do IVF é chamado *overflow* interno (OFI) e o produto do anular, que é o intervalo entre o IVF e o OVF, é chamado de *overflow* externo (OFO) (MAINZA, 2004).

Além disso, o hidrociclone de três produtos usa um tamanho de espigão menor que a unidade convencional, a fim de criar condições de aglomeração e dificultar a sedimentação na seção cônica. Assim, sob a influência da força centrífuga, as partículas maiores tem maior probabilidade de serem coletadas primeiro, em comparação as mais finas e leves (OBENG, 2003).

O funcionamento do hidrociclone de três-produtos é semelhante ao convencional. O fluido é introduzido na alimentação de forma tangencial formando um movimento descendente em espiral e toda movimentação das partículas, de acordo com sua densidade, é igual. A diferença é que a separação será maior, de forma que as partículas mais densas são coletadas no *underflow*, as mais finas e intermediárias são arrastadas para o centro, onde há o estrangulamento do vórtex e elas seguem para o *overflow*. As mais finas são arrastadas para à espiral mais interna e saem no OFI, enquanto as intermediárias saem no OFO, como mostra a Figura 6 (OBENG, 2002).

Figura 6 – Esquema das principais características do hidrociclone de três produtos

a) vista externa e b) vista interna



Fonte: Adaptado de Obeng (2002).

Na Figura 6, na região A há a estratificação das partículas mais densas, que é resultado do fenômeno de sedimentação dificultada, servindo como leito para as partículas intermediárias. Na região B, as correntes centrais são mais fortes e resultam em descamação do topo do leito, assim as partículas intermediárias são arrastadas para o OVF devido à proximidade. Por fim, na região C, as partículas finas que escaparam das correntes centrais são arrastadas em direção ao IVF pelo processo de elutriação, deixando as partículas mais densas serem coletadas no *underflow* (OBENG, 2002).

Por fim, como o hidrociclone de três-produtos é uma adaptação do convencional, as ferramentas utilizadas para modelagem de fluxo no hidrociclone convencional podem ser aplicadas ao não-convencional, uma vez que possuem características gerais de fluxo semelhantes. Entretanto, a presença de um localizador de vórtex extra altera o comportamento do fluxo local e as variações na geometria podem levar a mudanças significativas (MAINZA, 2006).

3.2 Fluidodinâmica Computacional (CFD)

A fluidodinâmica computacional, cuja sigla CFD, que vem de *Computational Fluid Dynamics*, é uma ferramenta muito utilizada na concepção de equipamentos de separação, na qual aplica as leis de conservação de massa, energia e quantidade de movimento e equações constituintes do problema, aplicar algoritmos numéricos de solução e processamento de dados (ULLMANN, 2022). Diversas áreas da indústria são abrangidas nessa técnica, como o estudo

de aerodinâmica de aeronaves e veículos, bombas, reatores, compressores, entre outras (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

O método exige apenas os dados da alimentação referentes às condições iniciais e de contorno do sistema e, a partir das equações fundamentais citadas acima é possível realizar o cálculo das variáveis ao longo do tempo (XIA & SUN, 2002). Assim, enquanto a solução analítica desses modelos só é possível quando aplicados a casos simples, em que o escoamento é unidirecional e não há variações temporais, pelo CFD, por meio de métodos numéricos e discretização das equações, é possível a solução de problemas mais complexos (AMARAL, 2017; COSTA, 2016).

As vantagens da utilização do modelo de CFD vão desde o ponto de vista econômico, uma vez que, comparada à construção de protótipos para coleta de resultados relevantes que tem um alto custo; até o ponto de vista científico, uma vez que abrange problemas de alta complexidade. Assim, a aplicabilidade em escala industrial e otimização do mesmo torna-se possível e de suma importância (COSTA, 2021).

A aplicação das técnicas de CFD podem ser divididas em três elementos principais: pré-processador, processador (*solver*) e pós-processador.

3.2.1 Pré-processador

Na etapa de pré-processamento é realizada a construção da geometria junto da discretização do domínio, sendo de suma importância para garantir que o problema irá convergir a partir de um número suficiente de células. Os softwares mais utilizados para o desenvolvimento da geometria são o *SpaceClaim*[®], *DesignModeler*[®], *SolidWorks*[®], entre outros, e para a malha, *Meshing*[®], *ICEM*[®] e *Gambit*[®] (COSTA, 2021).

A primeira fase dessa etapa consiste, portanto, na criação da geometria (*geometry*), de domínio computacional ou região de estudo, destacando-se as regiões com circulação de fluido (VERSTEEG; MALALASSEKERA, 2007). A segunda fase é a geração da malha (*mesh*), onde são definidas as propriedades do fluido e as condições iniciais e de contorno. As malhas são geradas a partir de um processo que divide o domínio em pequenos volumes, possibilitando, assim, que as equações de solução sejam integradas em cada uma das células (COSTA, 2016; LÓPEZ, 2017) que podem ter diferentes formatos, de acordo com cada geometria, como triangular, quadrilátero, tetraédrico, hexaédrico, piramidal ou prismático, sendo que uma mesma malha pode ter várias formas de elementos.

3.2.2 Processador

Na etapa de processamento é realizada a resolução das equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento, a partir de métodos iterativos pelo *solver*. Os softwares mais utilizados são *FLUENT*[®] e *CFX*[®], que utilizam do Método dos Volumes Finitos (MVF), um dos mais utilizados pelos pacotes comerciais. Esse método trabalha com a integração no espaço e tempo das equações do escoamento sobre todos os volumes. Assim, essas integrais são convertidas em equações algébricas, resolvidas de forma iterativa (MALISKA, 2005).

3.2.3 Pós-processador

Na etapa de pós-processamento, os resultados da simulação são, então, analisados, a fim de se verificar a validade do modelo numérico. Esses resultados podem ser de grandeza primária, como velocidade, pressão e temperatura, ou secundário, como coeficiente de arraste, torque e coeficiente de transferência de calor (MATEUS, 2021). Portanto, deve ser analisado se os resultados estão de acordo com a realidade a partir de comparações com dados experimentais.

3.2.4 Equações de Conservação

As equações de conservação são utilizadas para descrever o comportamento de um fluido newtoniano, independentemente de sua natureza, sendo que, é definido como substância que ao sofrer ação de uma, ou mais, força reage com uma deformação contínua e sem reações internas suficientes para sustentar e manter o equilíbrio (BISTAFA, 2018). Essas equações variam de acordo com as condições de simulação, sendo que, no caso do hidrociclone são de continuidade, energia e quantidade de momento. Assim, os fluidos são analisados de acordo com suas propriedades, como velocidade e pressão.

3.2.4.1 Equação da continuidade

A Equação da continuidade deriva da lei de conservação de massa, ou seja, dado um volume de controle contendo um fluido, a massa nele contida pode ser descrita pela entrada, saída, geração ou destruição da mesma (MATEUS, 2021). De acordo com Patankar (1980), a Equação 12 descreve a equação da continuidade em um volume de controle infinitesimal tridimensional.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

Em que:

t = tempo;

u = Componente da velocidade no eixo x;

v = Componente da velocidade no eixo y;

w = Componente da velocidade no eixo z.

3.2.4.2 Equação da quantidade de movimento

A Equação da quantidade de movimento deriva da segunda lei de Newton, que determina que a soma de todas as forças atuantes na partícula é igual à taxa de variação de momento da partícula fluida. Essas forças resultantes que atuam sob o sistema são de campo e de superfície (pressão e tensões) (MATEUS, 2021). A Equação 13 descreve a equação da quantidade de momento, a partir da Equação de Navier-Stokes, representada pela Equação 14, em sua forma compacta.

$$\begin{aligned} & \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial t} + u \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + w \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] = \\ & \rho g_x + \rho g_y + \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Em que:

g_x = Gravidade no eixo x;

g_y = Gravidade no eixo y;

g_z = Gravidade no eixo z;

P = Pressão.

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla P + \mu \nabla^2 V \quad (14)$$

Em que:

V = Vetor velocidade;

\vec{g} = Vetor gravidade.

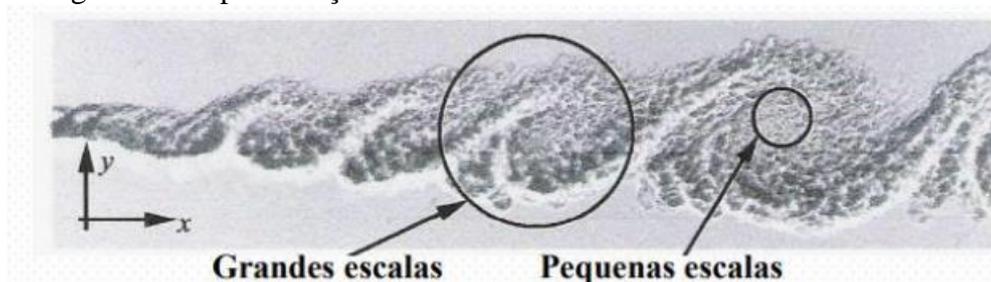
3.2.5 Modelos de turbulência

A turbulência é um fenômeno que ocorre no escoamento de um fluido quando o gradiente de velocidades é elevado, que causam o aparecimento de perturbações, fazendo com que o fluido se movimente de forma caótica e aleatória (CHUNG, 2002). Não é possível utilizar as equações de Navier-Stokes para resolver essas flutuações de velocidade que são resultado do fenômeno. Assim, torna-se necessário a utilização de modelos de turbulência (VIEIRA, 2006).

Em escoamentos com turbulência são formadas pequenas e grandes escalas de energia proporcionais aos vórtices formados, como mostra a Figura 7. Assim, as escalas maiores transferem energia para as menores, que dissipam a mesma em forma de calor (CHUNG, 2002).

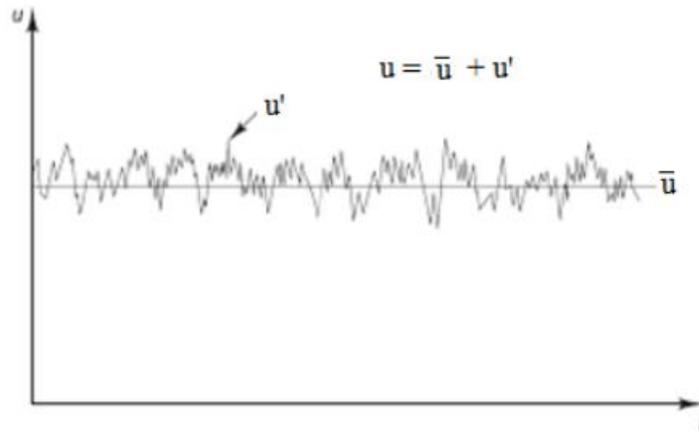
Todo escoamento turbulento é tridimensional e transiente, sendo caracterizado pela presença de diversos vórtices, ocupando, assim, uma larga faixa de escalas de comprimento e de tempo, fazendo-se necessário de uma discretização espacial e temporal refinada para a resolução de todas as escalas, requerendo de um grande esforço computacional (VIEIRA, 2006). Como a turbulência é caracterizada por essas flutuações aleatórias, os métodos estatísticos substituem os determinísticos, fazendo uma média nos tempos das variáveis e separando os valores médios e flutuações, conforme Figura 8. Em que u é a componente instantânea da velocidade no eixo x , \bar{u} é a média temporal e u' são as flutuações. A decomposição média de Reynolds ou método RANS (do inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes Methods*) é o nome desse método, que exige malhas menos refinadas e gera, assim, um menor custo operacional (CHUNG, 2002).

Figura 7 – Representação das escalas de turbulência em um escoamento.



Fonte: Adaptado de Petri (2020).

Figura 8 – Representação das flutuações de uma variável no tempo.



Fonte: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007).

Dessa forma, o modelo de turbulência a ser adotado deve ter baixo custo operacional, sendo um dos métodos RANS os que mais atendem esse requisito, visto que é necessário entender a influência da turbulência no escoamento do equipamento (LÓPEZ, 2017). O software FLUENT[®], possui modelos dentro da categoria RANS, sendo o modelo k-ε escolhido no presente trabalho.

3.2.5.1 Modelo k-ε

O modelo k-ε foi proposto por Launder & Spalding (1972) e possui duas equações de transporte, sendo que quando resolvidas separadamente, fornece de forma independente a velocidade de turbulência e as escalas de comprimento (COSTA, 2021). Assim, a energia cinética turbulenta k, definida como a variação das flutuações de velocidade, e sua taxa de dissipação ε, que é a taxa na qual as flutuações de velocidade se dissipam são modeladas. A Equação 15 relaciona a viscosidade turbulenta com a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação (VERSTEEG, 2007).

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

Em que:

μ_T = viscosidade turbulenta;

C_μ = Constante adimensional do modelo k-ε.

Os valores de k e ε são obtidos pelas Equações 16 e 17.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{V}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{V}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (17)$$

Em que:

$\rho_k, \rho_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2} =$ Constante adimensional;

$P_{kb} =$ Forças de empuxo – energia cinética turbulenta;

$P_k =$ Produção de turbulência devido às forças viscosas;

$P_{\varepsilon b} =$ Forças de empuxo – taxa de dissipação de energia turbulenta.

A produção de turbulência devido às forças viscosas pode ser calculada pela Equação 18, desprezando as forças de empuxo, já que a gravidade é desconsiderada no sistema.

$$P_k = \mu_T \left(\frac{\partial \vec{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \vec{v}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \vec{v}_i}{\partial x_j} \quad (18)$$

3.3 Trabalhos Correlatos

O estudo de hidrociclones por meio da simulação computacional através da fluidodinâmica computacional (CFD) vem sendo cada vez mais utilizado. Existem, portanto, diversos trabalhos que buscam melhorias na eficiência do equipamento e analisam diversos parâmetros por meio de métodos numéricos, no qual são consideradas diferentes metodologias.

Segundo Cavalcante (2018), utilizando do CFD foi realizado simulações numéricas computacionais através do *software* ANSYS® de um hidrociclone para separação água-óleo, nas quais foram analisadas quanto ao perfil de velocidade tangencial, radial e axial. Além disso, fez-se a análise de distribuição de pressão no interior do equipamento e o comportamento das partículas da mistura, comparando-as com a literatura. Os perfis de velocidade e pressão mantiveram o comportamento esperado para hidrociclones e foi apresentado um ótimo desempenho, a partir da simulação realizada, analisando a eficiência do mesmo.

Segundo Freitas (2009), a análise do comportamento fluidodinâmico de um hidrociclone foi conduzida utilizando da simulação numérica, através do CFD. Assim, a influência da geometria na eficiência de separação do equipamento foi analisada mostrando que os diâmetros de *overflow* e de *underflow* são as variáveis que mais se destacaram nesse parâmetro.

Segundo Liu *et al.* (2022), para investigar o comportamento do escoamento de fluido passando pela tela de um ciclone de três produtos, utilizou-se uma combinação de análise dinâmica e simulação numérica, através do CFD. A tela do equipamento é projetada para classificação de partículas com base no tamanho, sendo muito utilizada no campo industrial. Assim, à medida que a velocidade de entrada aumentava, o fluxo de massa do refluxo de tela aumentava, sendo desenvolvida uma equação de fluxo para o *underflow* da tela do hidrociclone,

que está relacionada com a geometria do equipamento e os parâmetros de processo, como a viscosidade dinâmica do fluido e a diferença de pressão entre a entrada de alimentação e as saídas.

Segundo Ullmann *et al.* (2022), realizou-se uma simulação via CFD do escoamento no interior de um hidrociclone concentrador HOII. A razão de líquido e o número de Euler foram calculados pela simulação e comparados com os resultados experimentais, previamente calculados por modelos empíricos. Concluiu-se que o modelo CFD possui uma capacidade preditiva satisfatória das respostas do equipamento e que o escoamento no interior do mesmo envolve a formação de um *air core* estável, resultando em um movimento axial descendente somente nas proximidades das paredes do hidrociclone, tal qual mostra a literatura.

Segundo Maciel (2013), os hidrociclones são usados com frequência devido à elevada capacidade de processamento, baixo custo de manutenção e pouco espaço exigido para instalação. Assim, avaliou-se a influência dos parâmetros operacionais sobre a eficiência de separação realizada por um hidrociclone sob a ótica do CFD. Dentre as variáveis analisadas pelo autor, os resultados apresentaram boa concordância com a literatura e indicaram que a dinâmica de escoamento é mais afetada pela concentração de óleo na entrada do equipamento.

Segundo Garcia (2018), foram estimados o número de Euler, razão de líquido e eficiência de hidrociclones de acordo com as dimensões geométricas utilizando otimização nominal e robusta pelo algoritmo de evolução diferencial. Na otimização do caso 1, em que o objetivo era uma eficiência máxima e razão de líquido mínima, os hidrociclones apresentam um diâmetro pequeno no duto de alimentação, bem como um comprimento pequeno. Para o caso 2, em que se buscou uma maximização da eficiência e número de Euler mínimo, o diâmetro do *overflow* e comprimento devem ser medianos. Para o caso 3, no qual visou-se uma mínima razão de líquido e número de Euler, resultou em elevados diâmetros de *overflow*. Por fim, no caso 4, em que o objetivo era a otimização dos três parâmetros simultaneamente, resultou-se em hidrociclones com diâmetros de *overflow* elevados e comprimento total médio.

Por fim, segundo Mainza *et al.* (2006), a dinâmica utilizando CFD foi usada para modelar um hidrociclone de três produtos, a fim de avaliar a interação das variáveis de projeto, bem como o comportamento do escoamento e a influência do localizador de vórtex duplo no mesmo. As mesmas simulações foram realizadas em um hidrociclone convencional a fim de comparação de resultados, que mostraram que uma inserção de um localizador de vórtex extra concêntrico ao existente influencia significativamente os perfis de velocidade tangencial, sendo

que o comprimento do localizador de vórtex interno pode melhorar a eficiência de separação do equipamento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As simulações numéricas computacionais dos hidrociclones, tanto do convencional quanto do de três produtos, foram realizadas no pacote comercial ANSYS®, que comporta diversos *softwares*, e divididas em três etapas principais, na construção da geometria, na geração da malha e nas simulações em si. Foram analisadas quanto à distribuição de pressão no interior do equipamento, perfil da velocidade tangencial, radial e axial.

Faz-se importante ressaltar que, para fins de validação da modelagem adequada, buscou-se na literatura estudos com configuração e geometria similares às utilizadas no presente estudo, bem como dados de perfil de velocidades tangenciais e condições de contorno bem definidas, uma vez que tais parâmetros são fundamentais para caracterização do escoamento. Os artigos utilizados foram descritos anteriormente na seção 3.3 em Trabalhos Correlatos.

4.1 Geometria

A geometria dos hidrociclones foi criada utilizando o *software* SpaceClaim® de acordo com as dimensões com base no trabalho experimental de Mainza *et al.* (2006) que estuda o comportamento do escoamento de um hidrociclone convencional com um de três produtos. As dimensões são descritas na Tabela 3.

Tabela 2 – Dimensões dos hidrociclones convencional e de três produtos.

Variável	Dimensões
Diâmetro do ciclone	600 mm
Comprimento da peça cilíndrica	570 mm
Diâmetro da peça cilíndrica	95 mm
Ângulo do cone	20°
Diâmetro do <i>vortex finder</i> externo	220 mm
Diâmetro do <i>vortex finder</i> interno	675 mm
Comprimento do <i>vortex finder</i> externo	165 mm
Comprimento do <i>vortex finder</i> interno	925 mm

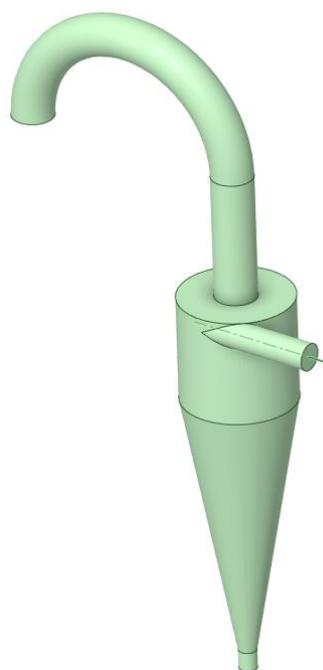
Fonte: MAINZA *et al.* (2006)

A construção da geometria do hidrociclone convencional e do de três produtos se iniciou pelo corpo cilíndrico ligado à região cônica seguido do duto de alimentação tangencial. Na parte inferior do equipamento foi feito o *underflow* e, posteriormente, na parte superior do equipamento foi construído o *overflow*, que possui uma extensão para a parte cilíndrica, chamada de *vortex finder*.

Já na construção da geometria do hidrociclone de três produtos, ou não convencional, seguiu-se a mesma ordem, porém com uma mudança no *overflow*, já que tem duas saídas concêntricas, portanto o tubo interno foi construído primeiro, junto com o *vortex finder* interno, e posteriormente, o tubo externo com o *vortex finder* externo.

Na Figura 10 pode ser visto o exterior dos hidrociclones, composto pelo corpo cilíndrico acoplado da região cônica, os dutos de alimentação e as respectivas saídas. As Figuras 11, 12 e 13 mostram as vistas dos equipamentos nos planos xy , xz e yz , respectivamente. Nota-se que a única vista que mostra a diferença entre os dois equipamentos é a no plano xz , uma vez que o *overflow* interno é concêntrico ao externo.

Figura 10 – Vista isométrica do exterior da geometria dos hidrociclones.



Fonte: Da autora.

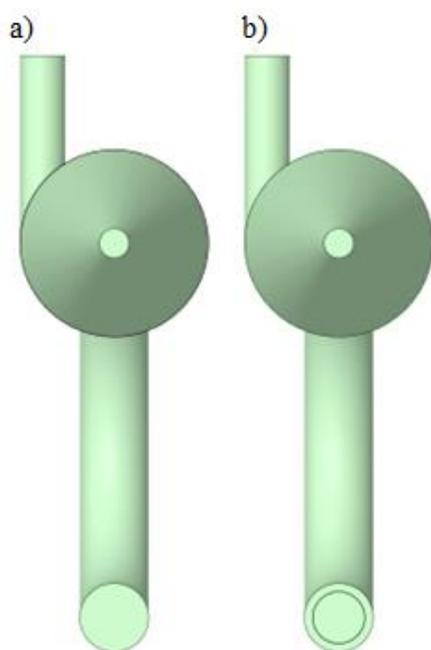
Figura 11 – Vista do plano xy dos hidrociclones.



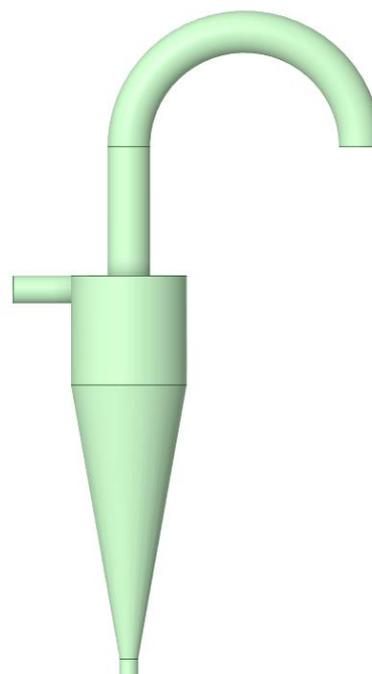
Fonte: Da autora.

Figura 12 – Vista do plano xz do hidrociclone a) convencional e b) de três produtos.

Figura 13 – Vista do plano yz dos hidrociclones.



Fonte: Da autora.



Fonte: Da autora.

Após a finalização das geometrias foi possível gerar as malhas e aplicar as condições de contorno e escolher os métodos numéricos.

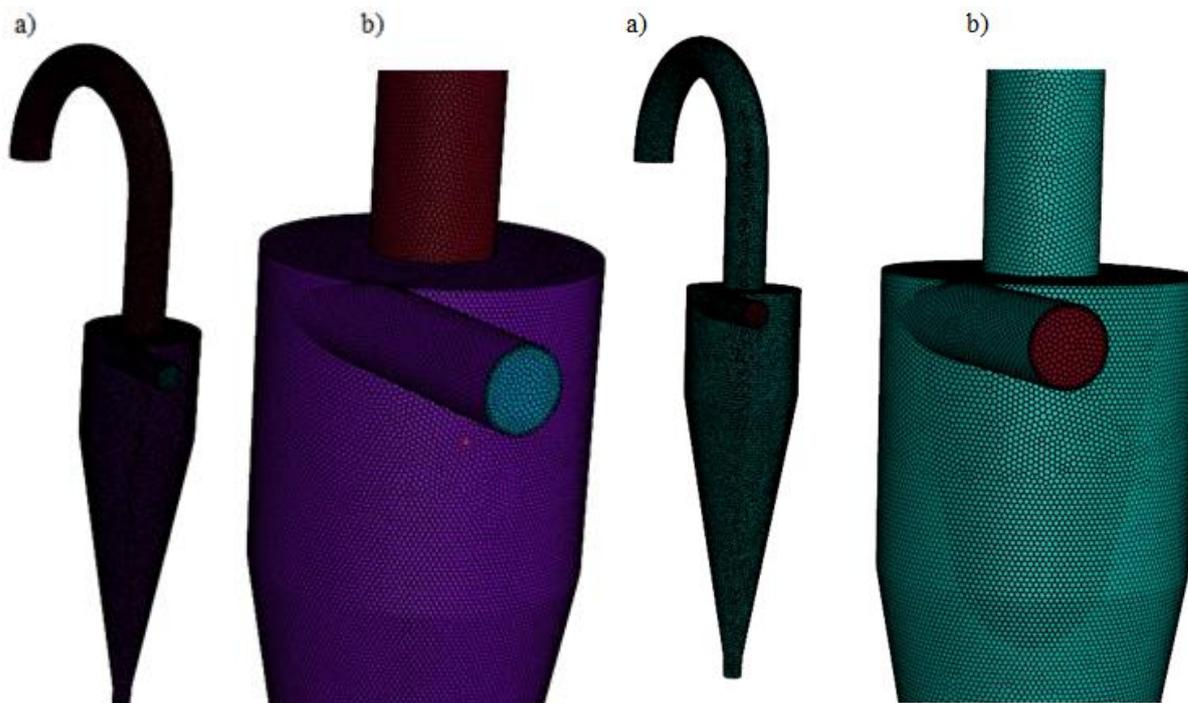
4.2 Malha

Para a geração das malhas computacionais, foi utilizado o *software* FLUENT Meshing[®], estando dentro do limite de 512.000 células, valor máximo permitido pela licença estudantil. As células foram, portanto, alteradas de tamanho e formato de acordo com avaliação das propriedades *skewness* e *aspect ratio*, a fim de obter a malha mais satisfatória.

A malha gerada para o hidrociclone convencional e do hidrociclone de três produtos tem 508.996 e 508.063 células, respectivamente, do tipo *poly-hexcore*, respeitando o limite permitido pela licença e atendendo às propriedades acima. A Figura 14 e 15 mostram o volume discretizado no equipamento convencional e de três produtos, respectivamente.

Figura 14 – Malha do hidrociclone convencional a) vista do equipamento inteiro e b) vista com mais detalhes da malha.

Figura 15 – Malha do hidrociclone de três produtos a) vista do equipamento inteiro e b) vista com mais detalhes da malha.



Fonte: Da autora.

Fonte: Da autora.

4.3 Simulação

As simulações dos hidrociclones foram realizadas utilizando o *software* FLUENT®, definindo as condições de contorno com base no estudo de MAINZA *et al.* (2006), conforme mostrado na Tabela 4. Além disso, foi utilizado um supercomputador (Processador Intel Core i7-8700k, 24 GB RAM DDR4) para rodar todas as simulações que está localizado no Laboratório de Fluidodinâmica Computacional no Departamento de Engenharia da UFLA.

Tabela 3 – Condições de contorno para a simulação dos hidrociclones convencional e de três produtos.

Condições de Contorno	
Vazão de entrada convencional	171 kg/s
Pressão na entrada convencional	103942,33 Pa
Vazão de entrada 3 produtos	171 kg/s
Pressão na entrada 3 produtos	310703,93 Pa
Densidade da água	997 kg/m ³
Modelo multifásico	VOF
Modelo de turbulência	k-epsilon

Fonte: da Autora.

As simulações para ambos os hidrociclones, tanto o convencional quanto o de três produtos, foram conduzidas usando o modelo de turbulência *k-epsilon*, apesar do modelo mais utilizado em simulações de hidrociclones ser o LES, como visto no estudo de MAINZA *et al.*

(2006). Entretanto, o presente estudo foi realizado utilizando a licença estudantil, que limita o máximo de células a 512.000, portanto o modelo LES não é o mais apropriado, por necessitar de um grande refinamento de células para gerar resultados confiáveis, tornando, assim, o modelo *k-epsilon* mais adequado.

Já o modelo multifásico escolhido para resolver o núcleo de ar, para ambas as simulações, foi o modelo de Volume de Fluido (VOF – *Volume of Fluid*) implícito, utilizando a água como fase primária e o ar como fase secundária, com coeficiente de tensão superficial constante de 0,072 N/m. Assim, a alimentação foi feita em água líquida pura, com formação de air-core com ar puro, ambos na temperatura ambiente com densidades de 998,2 e 1,225 kg.m⁻³, respectivamente.

Para ambas as simulações, tanto a do hidrociclone convencional, quanto do de três produtos, foi aplicado a condição de não deslizamento, *no-slip*, nas paredes do equipamento. Além disso, foi aplicado a condição isotérmica, ou seja, a temperatura do fluido é constante em todo o escoamento, independente da pressão e velocidade. A pressão de operação foi de 101325 Pa, com localização da pressão de referência no centro da face de *overflow* dos hidrociclones.

Para resolução das equações do problema, utilizou-se do Método dos Volumes Finitos, em que o domínio é dividido em pequenos volumes finitos, que no presente estudo foi utilizado *poly-hexcore*, conforme apresentado anteriormente, e a equação diferencial é aplicada a cada volume finito. A Tabela 5 apresenta as configurações utilizadas na simulação.

Tabela 4 – Parâmetros usados na simulação do hidrociclone convencional e de três produtos.

Propriedade	Parâmetro
Tipo de resolvidor	<i>Pressure-Based</i>
Aceleração Gravitacional	9,81 m.s ⁻²
Acoplamento Pressão-Velocidade	SIMPLE
Discretização dos Gradientes	<i>Least Squares Cell Based</i>
Discretização da Pressão	PRESTO!
Discretização do Momento	QUICK
Discretização da Fração de Volume	<i>Compressive</i>
Discretização da Energia Cinética Turbulenta, da Taxa de Dissipação Turbulenta e da Formulação Transiente	<i>First Order Upwind</i>
<i>Time-step</i>	1x10 ⁻⁴ s

Fonte: da Autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram analisados os resultados encontrados por meio das simulações numéricas via CFD para o hidrociclone convencional e o hidrociclone de três produtos, comparando os resultados tanto com a literatura quanto entre os equipamentos em si. Foi realizada uma análise da qualidade da malha, dos perfis de velocidade e pressão, bem como da injeção de partículas. Além disso, também foram comparados o número de Euler, razão de líquido e eficiência.

As simulações foram conduzidas até o tempo de 60 s, valor superior a 20x o tempo de residência no equipamento que é de 2,45 s, calculado de acordo com a geometria adotada. Assim, o escoamento plenamente desenvolvido foi garantido visando a análise dos contornos e parâmetros da fluidodinâmica do hidrociclone.

5.1 Qualidade de Malha

Para avaliar a qualidade da malha gerada no *software* FLUENT Meshing®, foram utilizados os parâmetros de *skewness* e *aspect ratio*, em que seus valores mínimos, máximos e médios estão dispostos na Tabela 6, tanto para o hidrociclones convencional, quanto para o de três produtos. Vale lembrar que a malha foi constituída, majoritariamente, de elementos do tipo *poly-hexcore* para ambos equipamentos.

Tabela 5 – Valores mínimos, máximos e médios para *skewness* e *aspect ratio* para o hidrociclone convencional e de três produtos.

Tipo de hidrociclone	Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média
Convencional	<i>Skewness</i>	0,0000	0,7969	0,0499
	<i>Aspect Ratio</i>	1,0000	26,0028	2,8302
Três produtos	<i>Skewness</i>	0,0000	0,87622	0,0485
	<i>Aspect Ratio</i>	1,0000	27,8421	3,2549

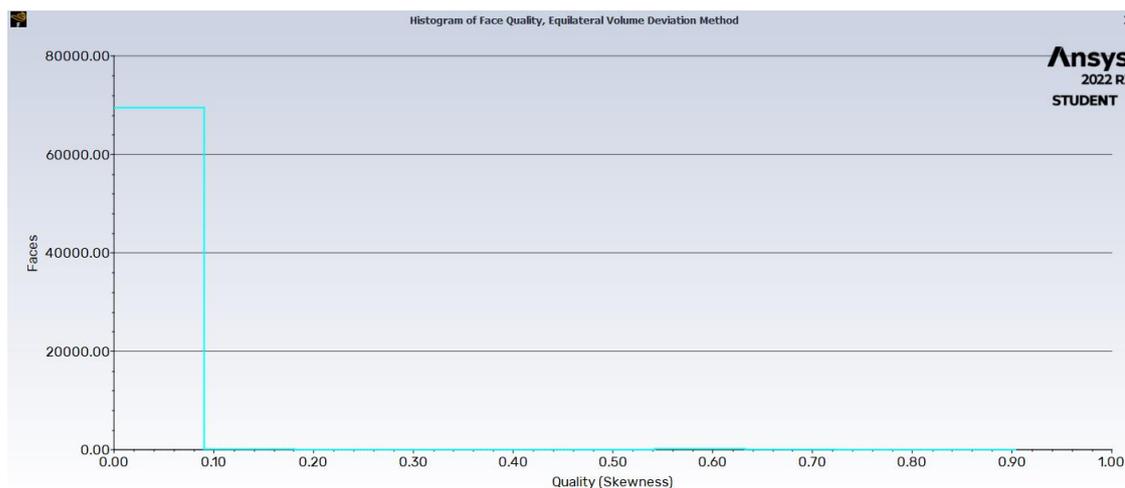
Fonte: Da Autora.

Analisando os valores de *skewness* e *aspect ratio* obtidos para ambos os hidrociclones, pode-se constatar que a malha computacional obtida tem boa qualidade, uma vez que possui baixas distorções tridimensionais dos elementos. Isso comprova-se pelo fato do valor médio de *aspect ratio* ter se aproximado da unidade, bem como o valor médio de *skwness* ter se aproximado da nulidade. Entretanto, analisando os valores máximos de ambos equipamentos para o parâmetro *aspect ratio*, há elementos com baixa qualidade, porém de forma minoritária, uma vez que os valores se distanciam muito da unidade. Em contrapartida, para ambos

equipamentos, os valores mínimos, resultaram nos valores ideais (para *skewness*: 0,0000; para *aspect ratio*: 1,0000), concluindo-se que existem elementos com qualidade excelente.

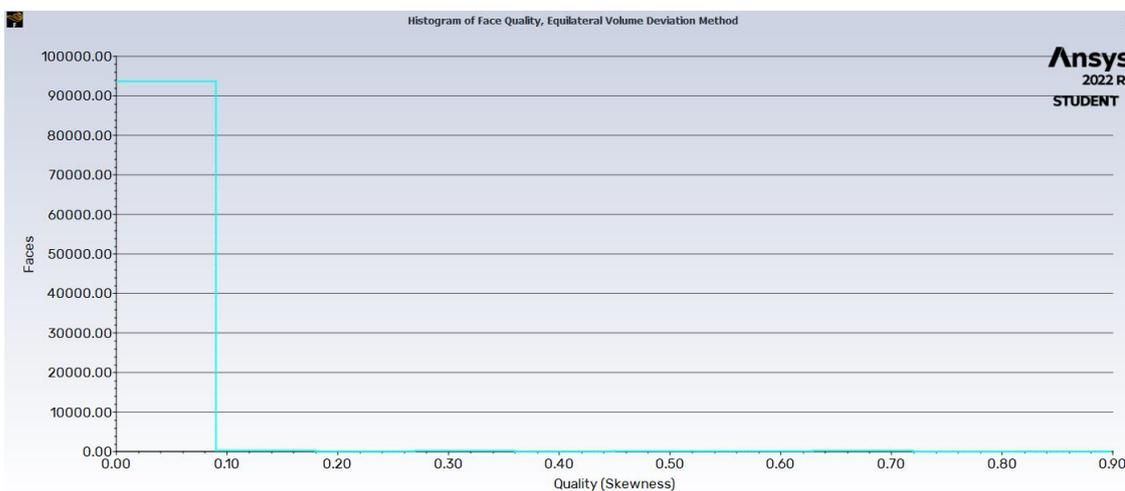
Os resultados obtidos para a análise de *skewness* de acordo com a distribuição de células nas malhas geradas para *skewness* estão dispostos nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Gráfico de qualidade da malha com a representação de *skewness* para o hidrociclone convencional.



Fonte: Da autora.

Figura 17 – Gráfico de qualidade da malha com a representação de *skewness* para o hidrociclone de três produtos.

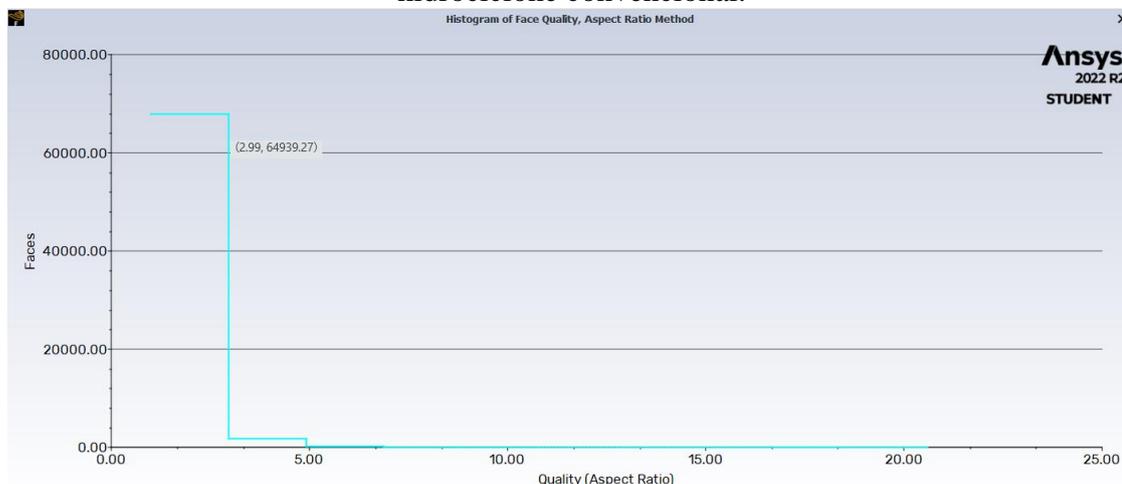


Fonte: Da autora.

A propriedade *skewness* está relacionada ao desvio do vetor que liga o centro de duas células vizinhas, portanto, altos valores afetam a precisão da solução numérica da simulação. A maior parte dos elementos apresentou valores de *skewness* próximos a zero, tanto para o hidrociclone convencional, quanto para o de três produtos, apresentando, assim, um ótimo

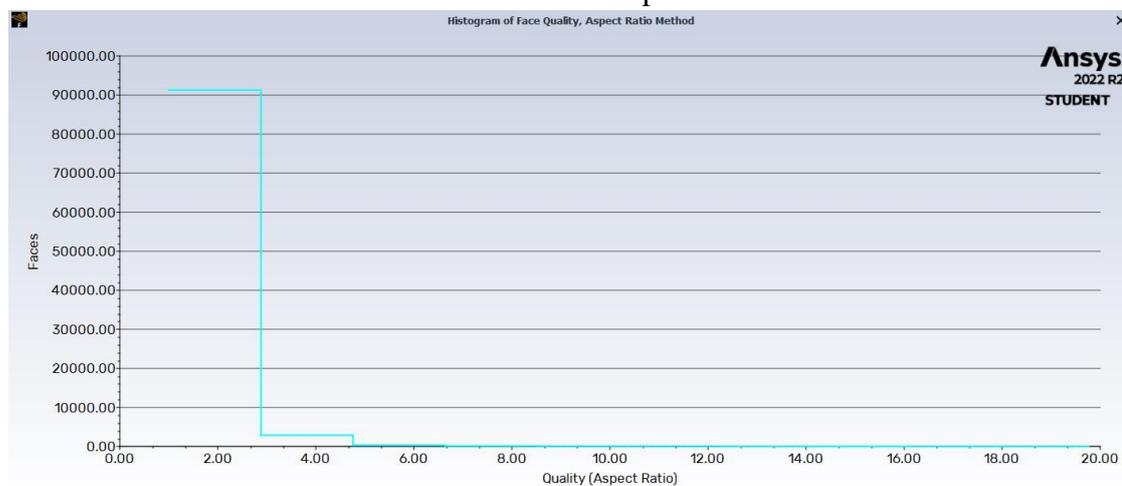
resultado. Nas Figuras 18 e 19 estão representados os resultados obtidos para a análise de *aspect ratio*.

Figura 17 – Gráfico de qualidade da malha com a representação de *aspect ratio* para o hidrociclone convencional.



Fonte: Da autora.

Figura 19 – Gráfico de qualidade da malha com a representação de *aspect ratio* para o hidrociclone de três produtos.



Fonte: Da autora.

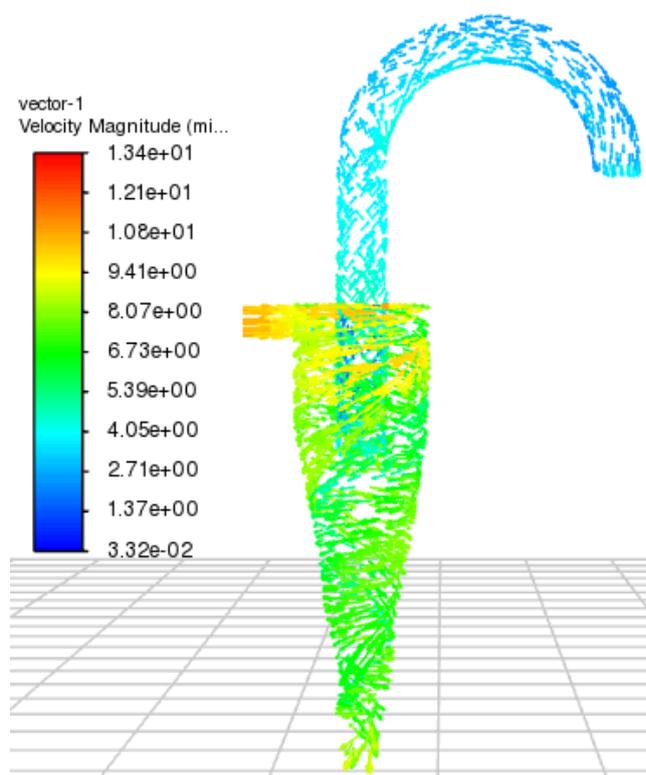
A propriedade *aspect ratio* é a razão entre a maior e a menor aresta de um elemento, portanto, quanto mais próxima de um é a razão, melhores os resultados da simulação. Pelas Figuras 17 e 18 é possível observar que a maior parte dos elementos está próxima de 1, também apresentando um resultado satisfatório para ambos os equipamentos.

5.2 Perfis de Velocidade e Pressão

As simulações foram realizadas para os hidrociclones convencional e de três produtos em um sistema contendo água e ar e, assim, foram obtidos os perfis de velocidade e pressão para ambos os equipamentos. Nas Figuras 20 e 21 estão apresentados os vetores de velocidade

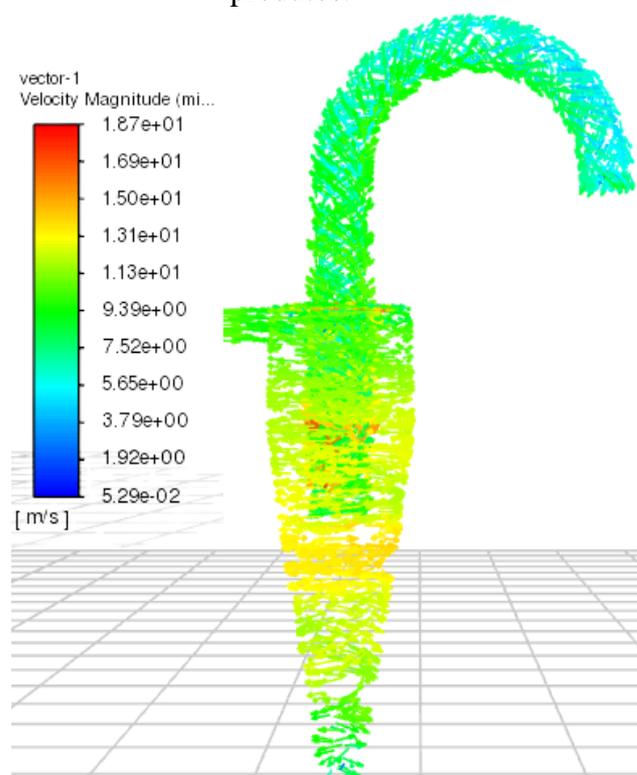
por magnitude para o hidrociclone convencional e de três produtos, respectivamente. As setas indicam o sentido de escoamento dos fluidos e seu tamanho indica a magnitude da velocidade.

Figura 20 – Vetor de velocidade da água por magnitude do hidrociclone convencional.



Fonte: Da autora.

Figura 21 – Vetor de velocidade da água por magnitude do hidrociclone de três produtos.

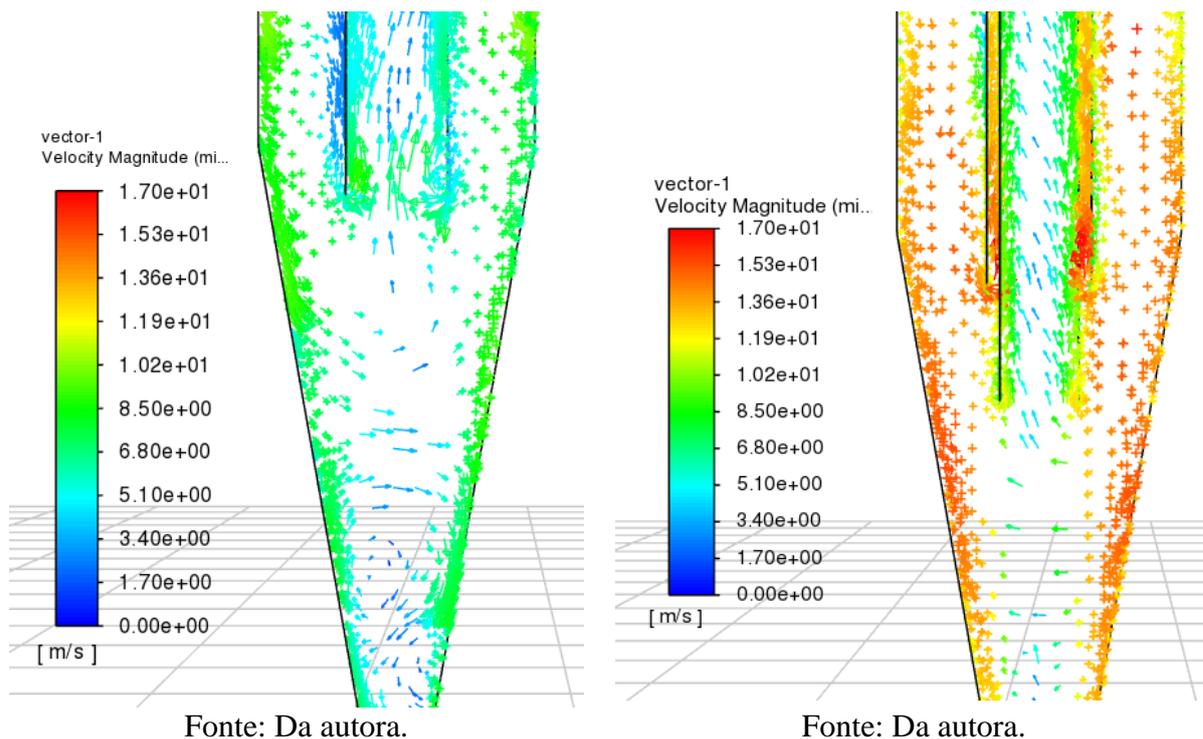


Fonte: Da autora.

Observando as Figuras 20 e 21, fica nítido o escoamento no hidrociclone pela representação em vetores e é possível observar as diferentes velocidades do fluido no interior do equipamento, de acordo com a geometria. No caso do de três produtos as partículas saem pelo *overflow* com maior velocidade, quando comparado ao equipamento convencional, provando a influência da geometria no escoamento, já que possui mais um *vortex finder*, conseqüentemente, mais um *overflow*. E nas Figuras 22 e 23 estão apresentados os vetores de velocidade próximos à ponta do localizador do *vortex* e regiões cônicas do hidrociclone convencional e de três produtos, respectivamente.

Figura 22 – Vetor de velocidade da água por magnitude próximo à ponta do localizador do *vortex* e regiões cônicas do hidrociclone convencional.

Figura 23 – Vetor de velocidade da água por magnitude próximo à ponta do localizador do *vortex* e regiões cônicas do hidrociclone de três produtos.



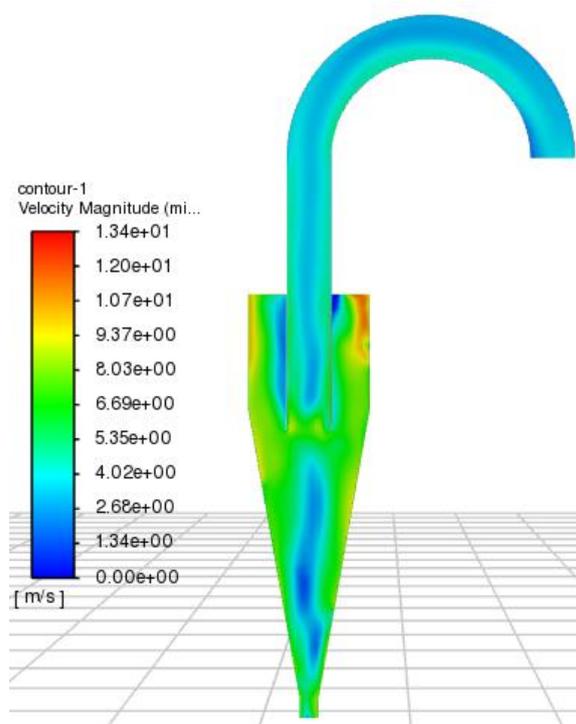
A partir dos vetores apresentados nas Figuras 22 e 23, observa-se que as inversões de fluxo ocorrem de forma mais significativa próximo ao *vortex finder*, tanto no caso do hidrociclone convencional, quanto do de três produtos. Esse resultado difere do estudo de Mainza (2006), uma vez que na literatura as inversões de fluxo ocorrem ao longo de toda a região dos equipamentos. Isso ocorre, uma vez que, no presente trabalho os equipamentos foram simulados por completo, considerando o tubo em U que sai o *overflow*, como mostra as Figuras 20 e 21, e no caso da literatura, não foi considerado esse tubo na geometria, portanto observa-se essa diferença no escoamento e prova-se a importância da geometria na avaliação do escoamento do hidrociclone, como já apresentado anteriormente.

Agora, comparando o resultado dos vetores de velocidade entre os dois hidrociclones do presente estudo, a principal diferença para o hidrociclone de três produtos para o convencional é a divisão dos vetores ascendentes no *vortex finder* interno e externo, que dá origem aos produtos de *overflow* interno (OFI) e externo (OFO). Também observou-se que a velocidade máxima foi de 3,99 m/s para o hidrociclone convencional na saída do *overflow*. Já as velocidades máximas para o hidrociclone de três produtos foram de 8,72 m/s e 7,14 m/s na saída do *overflow* externo e interno, respectivamente. Além disso, a velocidade mínima na região foi próxima de zero para ambos os equipamentos. Comparando com a literatura as velocidades máximas foram maiores, porém a confirmação de que a geometria do *vortex finder*

desempenha um papel importante na determinação dos fluxos de velocidade se confirmam mais uma vez, assim como no estudo de Mainza (2006).

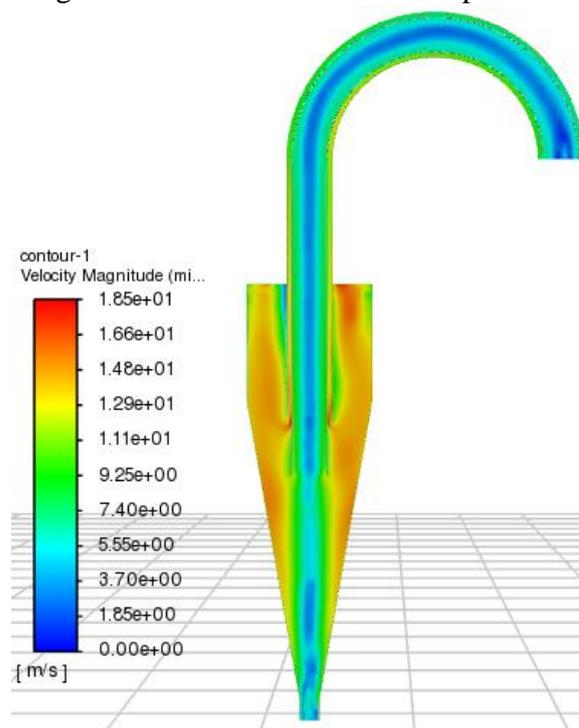
Por meio dos contornos, é possível analisar o comportamento dos fluidos no interior dos equipamentos. As Figuras 24 e 25 apresentam os contornos de velocidade por magnitude dos hidrociclones convencional e de três produtos, respectivamente.

Figura 24 – Contorno de velocidade por magnitude do hidrociclone convencional.



Fonte: Da autora.

Figura 25 – Contorno de velocidade por magnitude do hidrociclone de três produtos.



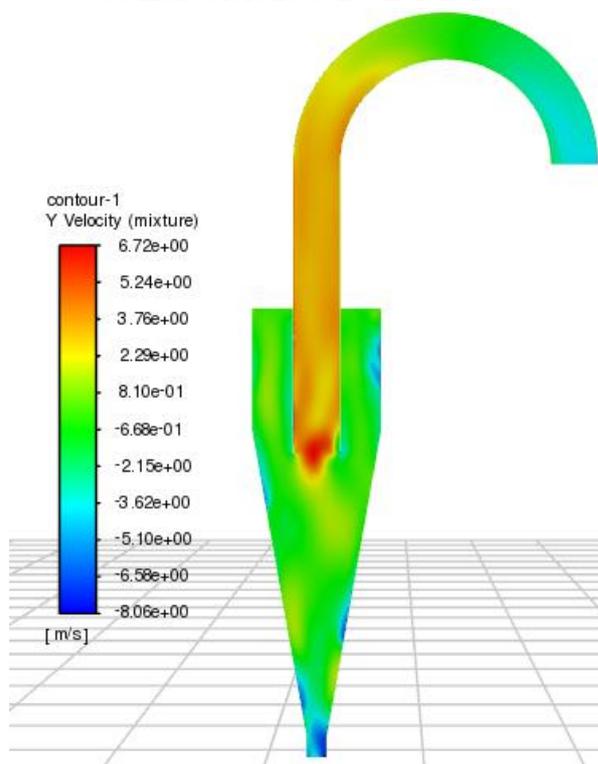
Fonte: Da autora.

É possível observar que a velocidade é maior no hidrociclone de três produtos quando comparado com o convencional, sendo que a maior velocidade do fluido ocorre na região próxima à entrada para ambos, revelando uma alta energia cinética e efeito centrífugo. No hidrociclone de três produtos a velocidade se mantém alta também na região próxima aos *vortex finder* interno e externo, como anteriormente observado pelos vetores de velocidade. Em ambos equipamentos essa velocidade diminui ao longo dos caminhos de fluxo rotacional e no centro. Isso ocorre, uma vez que o fluxo de fluido de rotação no hidrociclone faz com que a velocidade seja maior perto das paredes e muito menor no centro do equipamento.

A partir dos contornos apresentados, conclui-se que a inserção de outro *vortex finder* concêntrico ao existente influencia no escoamento e que o efeito na magnitude das velocidades é maior com *vortex finder* mais longos, melhorando, assim, a eficiência de separação. Além da avaliação dos contornos de velocidade por magnitude, é de suma importância avaliar os

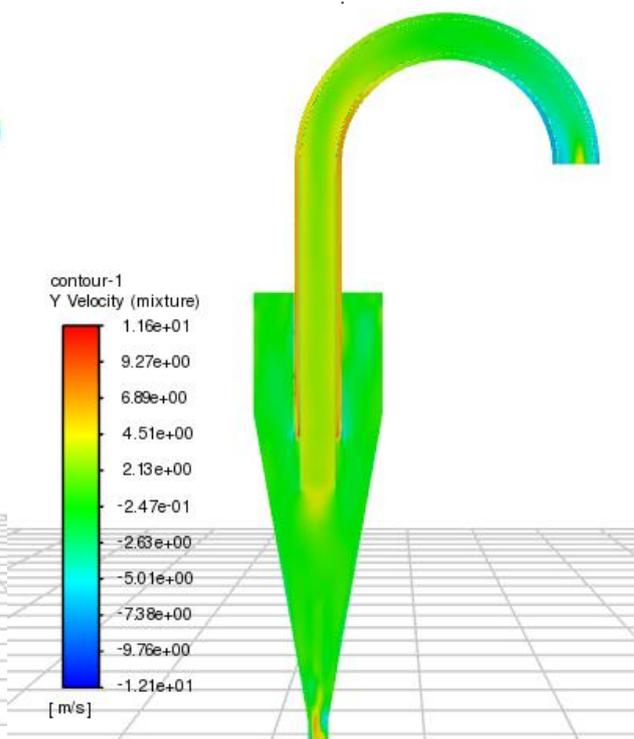
contornos de velocidade axial, que estão apresentados nas Figuras 26 e 27 para o hidrociclone convencional e de três produtos, respectivamente.

Figura 26 – Contorno de velocidade axial do hidrociclone convencional.



Fonte: Da autora.

Figura 27 – Contorno de velocidade axial do hidrociclone de três produtos.



Fonte: Da autora.

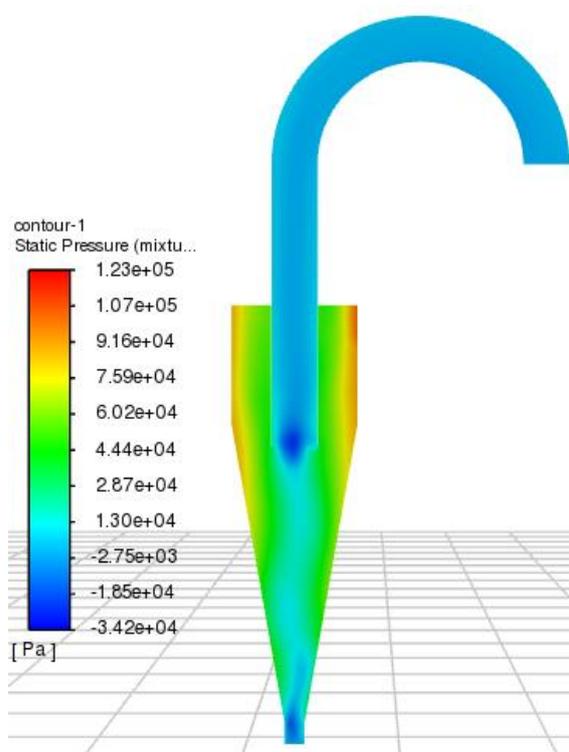
A velocidade axial está relacionada diretamente com a razão de líquido, uma vez que quanto maior a velocidade axial, maior a força de cisalhamento do líquido e menor a razão de líquido, ou seja, está relacionada com o movimento ascendente ou descendente do fluido. Assim, pode-se observar que as distribuições de velocidade axial para o hidrociclone convencional foram significativamente maiores quando comparadas ao de três produtos, sendo maior na entrada do *vortex finder* e na ascensão do fluido pelo *overflow*. Isso também é observado no hidrociclone de três produtos, porém a velocidade é de maior intensidade no *vortex finder* externo.

Os contornos de velocidade axial são bem diferentes quando comparados com os contornos de velocidade por magnitude. No caso do hidrociclone de três produtos, observa-se que a velocidade axial diminui com o aumento do comprimento do *vortex finder*, o inverso do que ocorreu a partir da análise pela velocidade por magnitude. Além disso, percebe-se que, para ambos os hidrociclones, o fluxo descendente é mais próximo às paredes e, na região central, o fluxo é ascendente. Observa-se também que, a velocidade axial máxima concentra-se na linha central

do equipamento e vai diminuindo ao aproximar-se do *overflow* e *underflow*, bem como visto nos contornos de velocidade por magnitude.

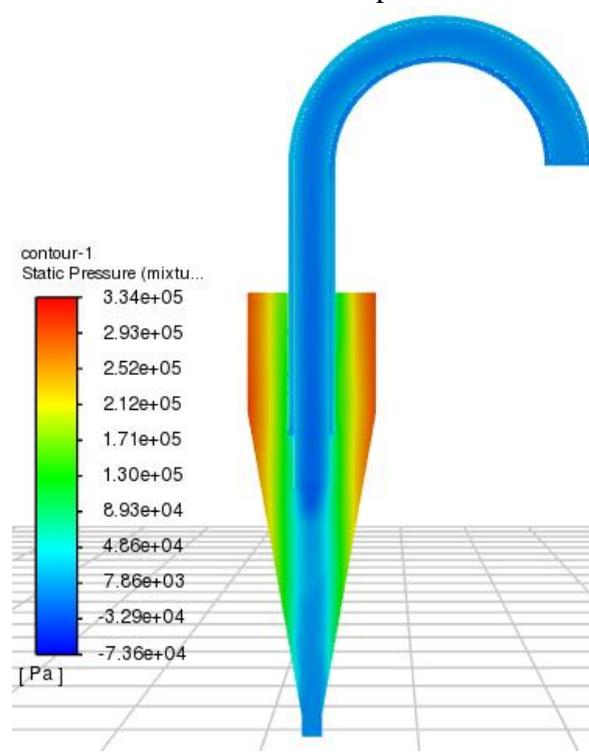
Além dos perfis de velocidade, é importante avaliar os perfis de pressão. De acordo com a literatura, o comportamento esperado para um hidrociclone é que a pressão siga reduzindo progressivamente das paredes em direção ao centro, ou seja, a pressão é maior na região das paredes. Os contornos de pressão resultantes da simulação do hidrociclone convencional e de três produtos estão apresentados nas Figuras 28 e 29, respectivamente.

Figura 28 – Contorno de pressão do hidrociclone convencional.



Fonte: Da autora.

Figura 29 – Contorno de pressão do hidrociclone de três produtos.



Fonte: Da autora.

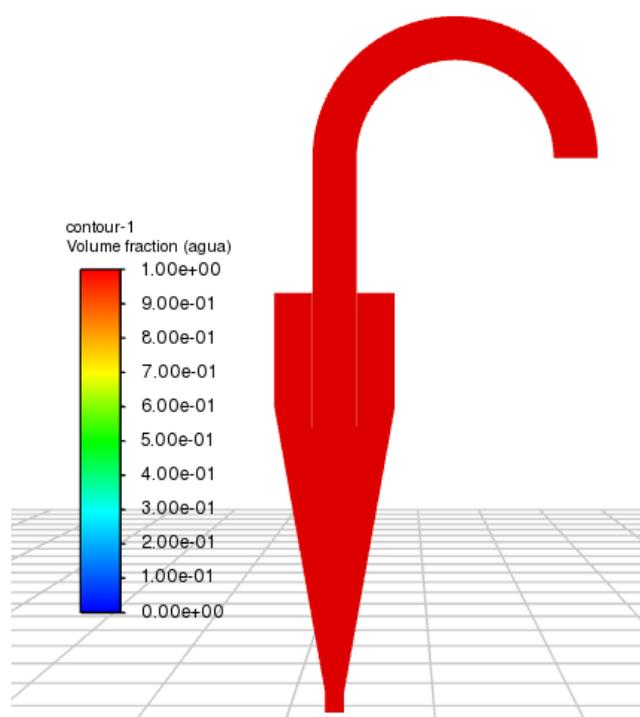
É possível observar que os contornos de pressão para ambos os hidrociclones seguem o comportamento esperado para o equipamento, segundo a literatura. Além disso, a queda de pressão está diretamente relacionada com a eficiência de separação, uma vez que, o gradiente de pressão menor no centro do equipamento puxa a fase menos densa para essa região, sendo ou elevada ao *overflow* ou descendida ao *underflow*.

O hidrociclone de três produtos tem gradientes de pressão mais concentrados quando comparados com o convencional, sendo que a pressão nas paredes e na entrada do equipamento é muito maior e divergente do centro do mesmo. Além disso, observa-se que os gradientes de pressão no *vortex finder* interno e externo são praticamente os mesmos, entretanto, o fato do

hidrociclone possuir mais um *overflow*, acentua-se mais ainda a diferença de gradiente de pressão no interior do equipamento e a faixa de menor valor de pressão aumenta.

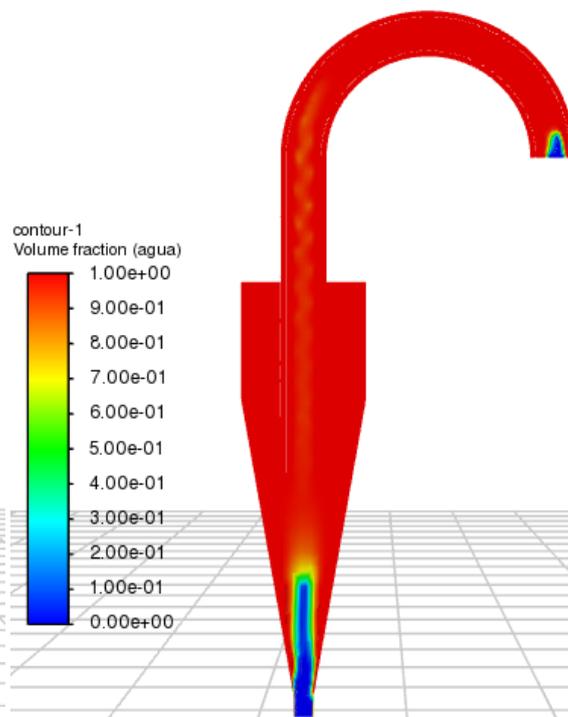
A formação de zonas de baixa pressão no interior do hidrociclone podem levar a formação de colunas de ar, fenômeno chamado de *air core*, o qual interfere negativamente na separação das partículas e promove uma redução da razão de líquido. Para observar a formação desse fenômeno, é importante avaliar os contornos de fração volumétrica de água, apresentados nas Figuras 30 e 31 para o hidrociclone convencional e de três produtos, respectivamente.

Figura 30 – Contorno de fração volumétrica da água do hidrociclone convencional.



Fonte: Da autora.

Figura 31 – Contorno de fração volumétrica da água do hidrociclone de três produtos.



Fonte: Da autora.

A fração volumétrica de água para o hidrociclone convencional é constante no valor de 1,00, indicando que não há formação de *air core*, o que já era esperado devido à análise dos resultados da simulação através do contorno de pressão no mesmo, que resultaram em uma não formação de zonas expressivas de baixa pressão.

Já observando os resultados do contorno da fração volumétrica de água para o hidrociclone de três produtos, percebe-se a formação do *air core*. A maior parte do equipamento também tem valor de 1,00, entretanto há zonas em que há volume de ar e principalmente no *underflow* e *overflow*, onde há zonas com valor 0,00 de fração volumétrica de água. Esse resultado também era esperado devido à análise do contorno de pressão no mesmo.

Comparando os resultados do hidrociclone de três produtos com a literatura, comprova-se que, como Mainza (2006) afirmou, a razão entre o anel e a abertura do *vortex finder* tem significativa influência na divisão do fluxo para ambos produtos no equipamento não convencional. Além disso, observa-se que há formação de *air core* apenas no interior do *vortex finder* interno, não ocorrendo entre o *vortex finder* interno e externo, concordando com a literatura mais uma vez.

5.3 Número de Euler e Razão de Líquido

A Tabela 7 mostra os resultados dos cálculos do Número de Euler (Eu) e Razão de líquido (R_L) para o hidrociclone convencional e de três produtos, de acordo com as Equações 7 e 12 apresentadas anteriormente.

Tabela 7 – Número de Euler, razão de líquido e eficiência total para o hidrociclone convencional e de três produtos.

Tipo de hidrociclone	R_L(%)	Eu
Convencional	22	570,0590
Três produtos	2	1704,0214

Fonte: Da Autora.

Sabe-se que o Número de Euler se relaciona com a queda de pressão e a vazão de alimentação do ciclone, assim, quanto menor for o diâmetro de *underflow*, maior o Eu, uma vez que há maior resistência ao escoamento da suspensão no interior do ciclone. Como o diâmetro de *underflow* é o mesmo para ambos equipamentos, assim como o fluido, a queda de pressão se torna o único parâmetro variável. Como a queda de pressão é maior no hidrociclone de três produtos, como visto pelos contornos de pressão apresentados anteriormente, nas Figuras 27 e 28, era de se esperar que o valor de Eu é maior, o que foi comprovado.

Além disso, quanto maior o valor de Eu, maior a velocidade de escoamento de líquido no interior do hidrociclone, conseqüentemente, uma maior eficiência de separação. Como visto pelas Figuras 19 e 20, que mostram os vetores de velocidade em todo equipamento, o hidrociclone de três produtos apresenta uma maior velocidade de escoamento quando comparado com o convencional e mais uma vez é comprovado que esse tipo de hidrociclone não-convencional é mais eficiente.

A Razão de Líquido também exerce influência direta sobre a eficiência do separador, sendo que quanto maior for esse parâmetro, mais significativo é o arraste de partículas para a corrente de *underflow*. Assim, quanto maior a razão de líquido, menor a eficiência de separação

e como observado pela Tabela 7, o hidrociclone convencional possui maior valor de razão de líquido, o que era esperado pelo resultado de Eu e todas as análises de vetores de velocidade pelas Figuras 20, 21, 22 e 23.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou uma análise numérica via fluidodinâmica computacional de um hidrociclone de três produtos mediante comparação com a simulação de um equipamento convencional e a literatura apresentada.

Foi realizada a modelagem tridimensional dos equipamentos via CFD a partir da construção da geometria, aplicação da malha e, enfim, a simulação. As geometrias foram baseadas no estudo de Mainza (2006) e as malhas geradas foram avaliadas de acordo com os parâmetros de *skewness* e *aspect ratio* resultando em um bom refinamento com baixas distorções. O limite máximo de 512.000 células foi respeitado, devido ao uso da licença estudantil e as malhas performaram bem nas simulações com elementos de qualidade excelente.

Além disso, foi avaliado os perfis de velocidade para cada hidrociclone. A partir dos vetores de velocidade por magnitude, concluiu-se que o hidrociclone de três produtos opera suportando velocidades mais altas, confirmando que a geometria do *vortex finder* desempenha um importante papel na determinação dos fluxos de velocidade, concordando com a literatura. Avaliando-se os contornos de velocidade, foi possível observar que, em ambos equipamentos, a velocidade é mais alta mais próximo às paredes e vai diminuindo ao longo dos caminhos de fluxo rotacional e do centro. Também se concluiu que a inserção de outro tubo de *overflow* concêntrico, portanto de outro *vortex finder*, influencia no escoamento, uma vez que magnitudes maiores de velocidade melhoram a eficiência de separação, provando, portanto, que mudanças na geometria do hidrociclone otimizam a operação do equipamento. Por fim, os contornos de velocidade axial foram avaliados e percebeu-se que as distribuições desse parâmetro foram significativamente maiores no hidrociclone convencional. Como a velocidade axial se relaciona diretamente com a razão de líquido, maior é o arraste das partículas para o *underflow* no equipamento convencional, quando comparado ao de três produtos, comprovando mais uma vez que a eficiência foi aumentada com a mudança na geometria.

Os perfis de pressão também foram avaliados e ambos equipamentos obtiveram resultados esperados de comportamento para um hidrociclone que é a pressão reduzir progressivamente das paredes ao centro. Entretanto, o hidrociclone de três produtos tem gradientes de pressão muito concentrados, configurando numa alta queda de pressão. Isso pode levar a formação do *air core*, que interfere na separação de partículas, promovendo uma redução da razão de líquido. Assim, analisando os contornos de fração volumétrica da água nos

equipamentos e percebeu-se zonas de presença de ar no equipamento não-convencional no *overflow*, *underflow* e no *vortex finder* interno, comprovando a formação do *air core*.

Avaliou-se, por fim, os resultados dos cálculos do Número de Euler e Razão de Líquido para os hidrociclones. O equipamento de três produtos apresentou menor R_L e maior Eu , que se relaciona com a queda de pressão e a velocidade de escoamento de líquido em seu interior, comprovando mais uma vez maior eficiência de operação.

Portanto, conclui-se que as simulações dos hidrociclones convencional e de três produtos obtiveram resultados satisfatórios, estando sempre de acordo com a literatura. Assim, comprovou-se que o separador não-convencional apresenta escoamento melhor, podendo ter um fluxo de partículas diferenciado, de modo que melhore a eficiência e otimize a operação, sendo, portanto, industrialmente mais viável. Além disso, comprovou-se que a fluidodinâmica computacional é uma ferramenta de análise importante, economicamente viável e que auxilia na aplicação de novas tecnologias na indústria, uma vez que permite uma análise fiel do escoamento em hidrociclones e outros equipamentos industriais.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros sugere-se que seja realizada a injeção de partículas no hidrociclone convencional e no de três produtos, uma vez que é de extrema importância considerar o escoamento bifásico na fluidodinâmica do sistema. Assim, seria possível avaliar a separação de partículas de diferentes densidades e tamanhos, além de analisar o desgaste do equipamento e a formação de acúmulo de partículas.

O presente trabalho realizou as simulações utilizando a licença estudantil do pacote comercial ANSYS® que contém todos os *softwares* utilizados para construção da geometria, malha e simulação dos hidrociclones, limitando a um máximo de 512.000 células, não permitindo, portanto, o refinamento de malha necessário para a realização da injeção de partículas, seguindo o estudo de Obeng (2003) como literatura base, a fim de comparação e discussão dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. C. de. **Simulação numérica da separação água-óleo em hidrociclones para baixas frações de óleo**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.
- AMARAL, R. **Simulação da secagem de café utilizando a fluidodinâmica computacional**. 2017. 43p. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.
- BISTAFA, S. R. **Mecânica dos fluidos: noções e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2018. ISBN: 978-85-212-1033-7
- CAVALCANTE, I. R. M. **Modelagem e simulação numérica de escoamento bifásico para estudo de hidrociclone através do software ANSYS®**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- CHUNG, T. J. **Computational Fluid Dynamics**. 1. ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 2002.
- CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidodinâmicos**. 2018. 3. ed. São Paulo: Editora Blucher, São Paulo 2018.
- COSTA, F. O. da. **Análise do escoamento multifásico em flotor com agitação mecânica via fluidodinâmica computacional**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.
- COSTA, M. C. V. **Simulação e análise do efeito da variação de parâmetros sobre a perda de carga e transferência de calor em trocadores de calor casco e tubo**. 2016. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.
- CRUZ, O.DA; ZANINI, J.R. **Eficiência de um hidrociclone de geometria “Rietema” para préfiltração de água**. Revista Engenharia agrícola, Jaboticabal, v.30, n.4, p.637-645, Jul/ago. 2010.
- CUNHA, M. V.; ALVES, J. V. S.; OLIVEIRA, M. S. **Avaliação da deslamagem de minério fosfático utilizando diferentes geometrias de hidrociclone**. 2021. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 3, p. 30314-30330, DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-653>.

- DIBB, A. **Comportamento fluidodinâmico do ciclone em diferentes geometrias**. UEC. Campinas. Dissertação de Mestrado.1997.
- FREITAS, A., G., B. **Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclones**. 2009. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2009.
- GARCIA, V. A. **Projeto de hidrociclones usando otimização robusta e evolução diferencial**. 2018. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- HUSVEG, T., RAMBEAU, O., DRENGSTIG, T. **Performance of a deoling hidrocyclone during variable flow rates**. Minerals Engineering 20 368-379, Norway, 2007.
- LIU, H.; YU, A.; LV, J.; WANG, C.; ZHU, Z.; KHAN, M. S. **Study of the fluid passing through the screen in the three products hydrocyclone screen (TPHS): a theoretical analysis and numerical simulation**. 2022. Processes, 10, 628. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10040628>
- LÓPEZ, D. P. P. **Simulação computacional de CFD de um pequeno trocador de calor casco e tubo**. 2017. 64 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energias) – Universidade Federal da Integração Latino-americana, Foz do Iguaçu, 2017.
- MACIEL, S. M. S. **Efeito da influência de parâmetros operacionais no processo de separação água/óleo via hidrociclone**. 2013. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.
- MAINZA, A.; POWELL, M. S.; KNOPJES, B. **Differential classification of dense material in a three-product Cyclone**. 2004. Elsevier Ltd. DOI:10.1016/j.mineng.2004.01.023.
- MAINZA, A.; NARASIMHA, M.; POWELL, M. S.; HOLTHAM, P. N.; BRENNAN, M. **Study of flow behaviour in a three-product Cyclone using computational fluid dynamics**. 2006. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.mineng.2006.03.014.
- MALISKA, J. **Transferência De Calor e Mecânica Dos Fluidos Computacional**. 2 ed. Brasil, Ltc Editora, 2005. ISBN: 9788521633358. Acesso em: 20 maio. 2021.
- MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2001. 2. ed. Programa de Engenharia Química. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

- MATEUS, F. L. B. **Simulação CFD da secagem de cafés especiais em leito fixo e camada espessa**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.
- NI, L.; TIAN, J.; SONG, T.; JONG, Y.; ZHAO, J. **Optimizing Geometric Parameters in Hydrocyclones for Enhanced Separations: A Review and Perspective**. 2019. Separation and Purification Reviews, v. 48, p.30-51, 2019.
- PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Boca Raton: CRC Press, 2009, 1980, 197 p.
- SILVA, D. O. **Otimização da separação sólido-líquido em hidrociclones mediante modificações geométricas**. 2012. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
- SOUZA, M.T.V; GONÇALVES, S.M; VIEIRA, L.G.M; BARROZO, M.A.S. **Desempenho de um hidrociclone otimizado**. XI Congresso Brasileiro de engenharia química em iniciação científica. Campinas. SP. 2015.
- SVAROVSKY, L. **Hydrocyclones**, Holt, Rinehart and Winston, London, 1984.
- SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid Separation**. 4th Edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 2000. 554 p.
- ULLMANN, G.; GARCIA, V. A.; KYRIAKIDIS, Y. N.; SILVA, D. O. de; VIEIRA, L. G. M.; LOBATO, F.S. **Simulação por fluidodinâmica computacional do escoamento em um hidrociclone concentrador de alto desempenho**. 2022. Brazil Journal of Development, Curitiba, v.8, n.2, p. 1524-1563 feb., 2022.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method**. 2 ed. England: Pearson Education Limited, 2007, 503 p.
- VIEIRA, L. G. M. **Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15053/1/LGMVieira1TESPRT.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2022.
- XIA, Bin; SUN, Da-Wen. **Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review**. Computers and electronics in agriculture, v. 34, n. 1-3, p. 5-24, 2002.