



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



ANA GABRIELA MARTINS SILVA

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA ALTERAÇÃO GEOMÉTRICA NO DUTO DE
ALIMENTAÇÃO DE UM HIDROCICLONE GEOMTRICAMENTE OTIMIZADO

Uberlândia - MG

2025

ANA GABRIELA MARTINS SILVA

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA ALTERAÇÃO GEOMÉTRICA NO DUTO DE
ALIMENTAÇÃO DE UM HIDROCICLONE GEOMTRICAMENTE OTIMIZADO

Projeto Final de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Química.

Orientador(a): Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva

Uberlândia - MG

2025

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo estímulo, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me guiar com sabedoria e força ao longo dessa caminhada, especialmente nos momentos mais desafiadores.

Sou imensamente grata à minha família, meu alicerce mais firme. Em especial, à minha mãe, Ilma, e ao meu pai, Donizett, por todo o amor, apoio e por nunca medirem esforços para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigada por acreditarem em mim, mesmo quando eu mesma tive dúvidas.

Agradeço também ao meu irmão, João Guilherme, pela companhia e pela alegria que sempre trouxe aos meus dias.

Ao meu namorado, Carlos, por estar ao meu lado e sempre oferecer apoio, paciência, incentivo e muito amor. Sua presença foi muito importante para que eu mantivesse o equilíbrio e a motivação.

Sou muito grata aos meus amigos que tornaram essa trajetória mais leve e inesquecível. Um agradecimento especial à Ana Laura e ao Lucas, que estiveram comigo em tantos momentos importantes da faculdade. Obrigada por cada risada, cada troca e cada apoio silencioso quando precisei.

Ao meu orientador, professor Danylo, pela orientação, pela paciência em cada dúvida e pela confiança no desenvolvimento deste trabalho. Sua contribuição foi essencial para que eu conseguisse melhorar ao longo desse processo.

A todos as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que esse momento fosse possível, deixo: o meu mais sincero muito obrigada.

“A educação é a arma mais poderosa que
você pode usar para mudar o mundo.”
- Nelson Mandela

RESUMO

O desempenho dos hidrociclones, equipamentos amplamente utilizados em processos de separação sólido-líquido, está fortemente relacionada à sua configuração geométrica, especialmente à região de alimentação, responsável por induzir o escoamento rotacional. Alterações nessa região podem impactar diretamente o desempenho hidrodinâmico do equipamento. Neste trabalho, a técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD) foi aplicada para analisar os efeitos da substituição da entrada circular convencional por uma entrada quadrada de mesma área, resultando no modelo modificado HGOT1-Q. A simulação permitiu avaliar a influência dessa alteração geométrica na formação do escoamento e nos principais parâmetros de desempenho, como número de Euler (Eu) e razão de líquido (R_L). Os resultados mostraram que o HGOT1-Q preservou o vórtice duplo característico, apresentou velocidades axiais e tangenciais máximas de aproximadamente $\pm 11,6$ m/s e 11,7 m/s, e obteve número de Euler igual a 1888, indicando menor dissipação de energia. A razão de líquido de 41,1% também revelou bom equilíbrio entre overflow e underflow. Esses resultados apontam o potencial da geometria modificada para aplicações mais eficientes com menor perda de carga.

Palavras-chave: Hidrociclone. CFD. Geometria de entrada. Número de Euler.

ABSTRACT

The performance of hydrocyclones, which are widely used in solid–liquid separation processes, is strongly influenced by their geometric configuration, particularly in the feed region responsible for inducing rotational flow. Modifications in this area can directly affect the hydrodynamic performance of the equipment. In this study, Computational Fluid Dynamics (CFD) was applied to analyze the effects of replacing the conventional circular inlet with a square inlet of equal area, resulting in the modified model HGOT1-Q. The simulation enabled the evaluation of how this geometric alteration influenced flow formation and key performance parameters such as the Euler number (Eu) and liquid ratio (RL). The results showed that the HGOT1-Q preserved the characteristic double vortex, presented maximum axial and tangential velocities of approximately ± 11.6 m/s and 11.7 m/s, and reached an Euler number of 1888, indicating lower energy dissipation. The liquid ratio of 0.411 also revealed a good balance between overflow and underflow. These findings highlight the potential of the modified geometry for more efficient applications with reduced pressure loss.

Keywords: Hydrocyclone. CFD. Inlet geometry. Euler number.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação do escoamento em um hidrociclone.....	15
Figura 2 – Representação esquemática do hidrociclone com parede porosa.	16
Figura 3 – Diagrama estrutural do separador gás-líquido.	17
Figura 4 – Modelos dos hidrociclones estudados por Li (2021). As entradas apresentadas são: (A) Retangular; (B) Involutiva; (C) Bissimétrica retangular; (D) Bissimétrica involutiva.....	19
Figura 5 - Perfil de velocidade axial descendente.	38
Figura 6 - Perfil de velocidade axial ascendente.	39
Figura 7 – Distribuições de pressão total no HGOT1-Q.	40
Figura 8 – Distribuição de pressão absoluta no HGOT1-Q.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões Geométricas dos Hidrociclones estudados por Kyriakidis (2018).....	27
Tabela 2 – Comparativo dos resultados experimentais obtidos por Kyriakidis (2018).....	28
Tabela 4 – Dimensões geométricas do hidrociclone HGOT1-Q.	34
Tabela 5 – Condições de contorno e parâmetros de simulação computacional.	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. OBJETIVOS	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. HIDROCICLONES.....	14
2.1.1. Funcionamento dos hidrociclones	14
2.1.2. Hidrociclones e suas aplicações	15
2.2. OTIMIZAÇÃO	20
2.2.1. Vazão de alimentação	20
2.2.2. Pressão de alimentação.....	21
2.2.3. Concentração de partículas de alimentação	22
2.2.4. Tamanho das partículas de alimentação	22
2.2.5. Forma das partículas de alimentação	23
2.2.6. Viscosidade e reologia do fluido de alimentação.....	23
2.2.7. Alterações geométricas	24
2.3. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD).....	32
3. METODOLOGIA.....	33
3.1. MALHAS COMPUTACIONAIS	36
3.1.1. Cálculo das grandezas associadas à separação em hidrociclones	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5. CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

Os hidrociclones são equipamentos aplicados, principalmente, na separação sólido-líquido, que se baseia na sedimentação das partículas por meio da força centrífuga, levando em consideração o tamanho, o formato e a densidade das partículas. O funcionamento do hidrociclone consiste em submeter as partículas a uma aceleração centrífuga, em que o movimento de vórtice é realizado pelo próprio fluido. Esse movimento provoca a separação das partículas sólidas do líquido, com as partículas maiores, mais pesadas ou de maior momento angular sendo empurradas para as paredes do hidrociclone e coletadas no orifício inferior (*underflow*), e as mais leves sendo conduzidas para o centro, sendo removidas no orifício superior (*overflow*) (Silva *et al.*, 2012; Svarovsky, 1984).

Entre as principais vantagens na utilização de hidrociclones estão a capacidade de coleta de partículas de menor diâmetro, baixo custo operacional, alta capacidade de processamento, pequeno volume, estrutura simples e ausência de partes móveis (Ni *et al.*, 2018; Svarovsky, 1984). Devido a essas vantagens, os hidrociclones são amplamente aplicados em diversas indústrias, incluindo a química, de mineração e a petrolífera, envolvendo aplicações como a proteção ambiental, clarificação de líquidos, separação de líquidos imiscíveis, gestão de resíduos e, entre outros (Ni *et al.*, 2018).

Alguns estudos da aplicação dos hidrociclones envolvem sua utilização na separação de partículas da água, subproduto na indústria de petróleo e gás (Adewoye, 2020), como dispositivos de retenção celular para perfusão de ovário de hamster em biorreatores (Bertinardi, 2020), e na reciclagem de partículas de terras raras (Yu *et al.*; 2017; Silva *et al.*; 2019).

Sabe-se que as condições operacionais afetam significativamente o desempenho do hidrociclone. Por exemplo, com o aumento da concentração de alimentação, a eficiência de coleta tende a diminuir. Por essa razão, a alimentação diluída é comumente utilizada para garantir alta recuperação de massa total. No geral, os diâmetros dos hidrociclones individuais variam de 10 mm a 2,5 m, os tamanhos de corte para a maioria dos sólidos variam de 2 a 250 μm , as taxas de fluxo variam de 0,1 a 7200 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Além disso, as quedas de pressão variam de 0,34 a 6 bar e as concentrações de sólidos coletadas no *underflow* estão entre 45 ou 50% em volume (Svarovsky, 1984).

A modificação da geometria do hidrociclone é uma estratégia comum para otimizar sua performance, especialmente no que se refere à eficiência de separação e à diminuição da queda de pressão (Silva *et al.*, 2024). Essas modificações podem envolver o ajuste do diâmetro

de entrada, o ângulo de seção de entrada e/ou formato, além da localização, comprimento, espessura, diâmetro e e/ou formato do *vortex finder* (Ni *et al.*, 2018).

Diversos estudos têm analisado o impacto de modificações geométricas específicas, como o trabalho de Zhang *et al.* (2017), que realizou um estudo numérico para investigar os efeitos do raio de curvatura no desempenho de separação do hidrociclone com uma entrada tangente circular. O raio de curvatura é o raio dos arcos circulares que compõem a trajetória da entrada da alimentação no ciclone. Diferentes valores de raio foram utilizados para alterar a suavidade com que o fluido entra no equipamento, o que afeta diretamente a formação do escoamento e os gradientes de pressão. Os resultados mostraram que um raio de curvatura menor poderia aumentar a velocidade tangencial e o gradiente de pressão. Além disso, a energia cinética de turbulência é reduzida na seção de entrada e na seção anular, diminuindo o raio de curvatura.

Em seu trabalho, Tang *et al.* (2017) estudou diferentes diâmetros no duto de alimentação e os seus resultados mostraram que uma melhor classificação foi alcançada até certo valor considerado como crítico, ou seja, a eficiência de separação das partículas grossas no *underflow* diminuiu significativamente quando a entrada tinha um diâmetro superdimensionado. Assim, revelando a importância do dimensionamento adequado do diâmetro de entrada no duto.

Com o objetivo de avaliar a modificação no duto de alimentação, o estudo de Rocha *et al.* (2020) apresentou simulações em que um duto de alimentação não circular proporcionou alterações no número de Euler (Eu) indicando melhora no desempenho de coleta. O estudo foi realizado comparado com o hidrociclone de geometria otimizada (HOPT1) obtido por Silva *et al.* (2012), e o trabalho visava a maximizar a classificação deste equipamento com restrição no número de Euler ($Eu \leq 7000$). Nos testes experimentais comprovou-se a redução de 32% no diâmetro de corte em comparação com o modelo HOPT1, evidenciando o impacto positivo da modificação geométrica no desempenho do equipamento.

Outro estudo realizado Liu *et al.* (2023) investigou o efeito da adição de entrada espiral na performance do hidrociclone para aplicação no desaeramento e recuperação de gás natural. Foi comprovado que a quantidade de espirais aumenta o desempenho do hidrociclone aumentando a eficiência de coleta, pois a taxa de recuperação do *underflow* de partículas finas de 5 μm e 10 μm foi reduzida em 16,5% e 15,7%, respectivamente, quando comparado com o hidrociclone padrão com características de altura e comprimento pré-estabelecidos.

1.1. OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo geral realizar uma análise numérico-experimental da performance de um hidrociclone otimizado por meio de modificações geométricas no duto de alimentação. A abordagem adotada envolve a utilização de simulações numéricas baseadas em fluidodinâmica computacional (CFD) para prever o comportamento do fluido e a eficiência de separação.

Como objetivos específicos, destacam-se os seguintes:

- realizar uma revisão bibliográfica abrangente da literatura sobre modificações geométricas no duto de alimentação de hidrociclones;
- implementar uma simulação numérica para analisar o impacto das modificações geométricas no duto de alimentação sobre a eficiência de separação do hidrociclone;
- identificar a configuração geométrica que proporciona a melhor performance em termos de eficiência de separação e queda de pressão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HIDROCICLONES

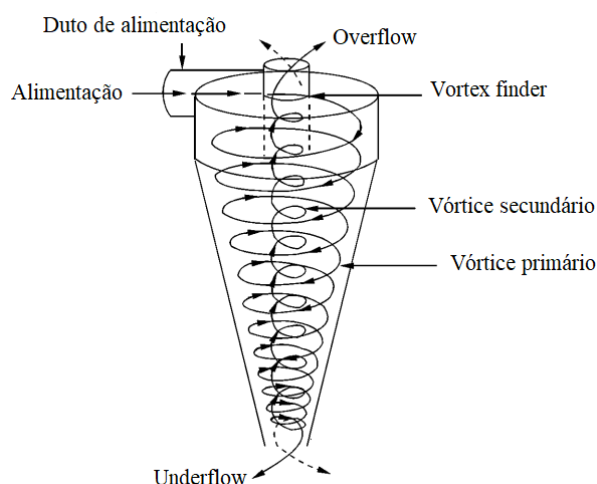
2.1.1. Funcionamento dos hidrociclones

Os hidrociclones são equipamentos normalmente destinados à separação de partículas presentes em uma corrente líquida utilizando a força centrífuga. Esses equipamentos não apresentam partes móveis e possuem um topo cilíndrico conectado a uma base cônica com uma entrada lateral e duas saídas verticais. A saída do tronco de cone (corrente de *underflow*) coleta as partículas mais grossas, enquanto o cilindro (corrente de *overflow*) apresenta a descarga da corrente fluida com partículas finas para um filtro (Cremasco, 2018).

Em geral, a mistura líquido/partículas é inserida tangencialmente no duto de alimentação e é submetida a forças centrífuga e de arraste. A ação centrífuga é responsável por carrear as partículas para a parede enquanto a força de arraste desloca as partículas para o centro do equipamento, criando assim os vórtices primário e secundário, respectivamente. As partículas maiores são lançadas contra a parede devido à força centrífuga e perdem movimento radial, consequentemente, se estabilizando e formando o vórtice primário, sendo coletadas na corrente de *underflow* com parte do líquido. Enquanto isso, as partículas menores sofrem a ação da força de arraste e são levadas ao centro e, juntamente com outra porção de líquido, são

lançadas para fora através do *vortex finder* (Figura 1). Essa separação ocorre devido à diferença de pressão entre os vórtices primário e secundário (Vimal *et al.*, 2023).

Figura 1 – Representação do escoamento em um hidrociclone.



Fonte: Adaptado de Cilliers (2000).

2.1.2. Hidrociclones e suas aplicações

Os hidrociclones apresentam diversas aplicações, pois podem ser utilizados em separações sólido-líquido, líquido-líquido e gás-líquido (Vimal *et al.*, 2023). Segundo Concha (2018) esses equipamentos podem ser utilizados com os objetivos de:

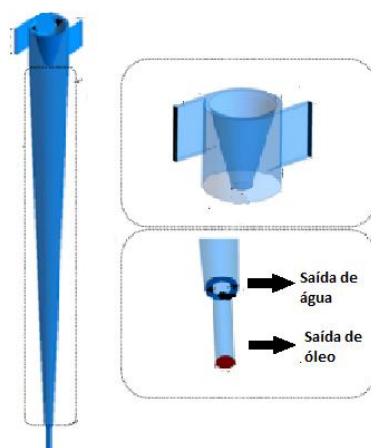
- classificação, com o intuito de remover partículas menores de um produto desejado e devolver as partículas mais grossas;
- deslamagem, com a eliminação de partículas finas ou argilas de minérios moídos antes de uma concentração;
- espessamento, em que o produto útil é a fração mais densa do subfluxo, sendo utilizada em alguns concentradores para aumentar a capacidade de espessamento;
- refino, para a remoção de partículas grossas em suspensão.

Como já mencionado, os hidrociclones podem ter diversas aplicações e alguns estudos recentes indicaram a utilização dos equipamentos para processos como separação de água e óleo (Nunes *et al.*, 2022); separação gás-líquido (Rui *et al.*, 2020); precipitação química (Almily *et al.*, 2023); purificação de águas residuais retirando sedimentos granulares (LI *et al.*, 2021).

Os autores Nunes *et al.* (2022) realizaram uma investigação numérica sobre a separação de água oleosa utilizando um hidrociclone com parede de membrana porosa, representada na Figura 2. As simulações computacionais foram realizadas através do software

ANSYS Fluent, empregando o modelo multifásico Euler–Euler. Foram analisados os efeitos da permeabilidade da membrana, da pressão transmembrana (TMP), da concentração de óleo na alimentação e da pressão de entrada sobre a eficiência de separação.

Figura 2 – Representação esquemática do hidrociclone com parede porosa.



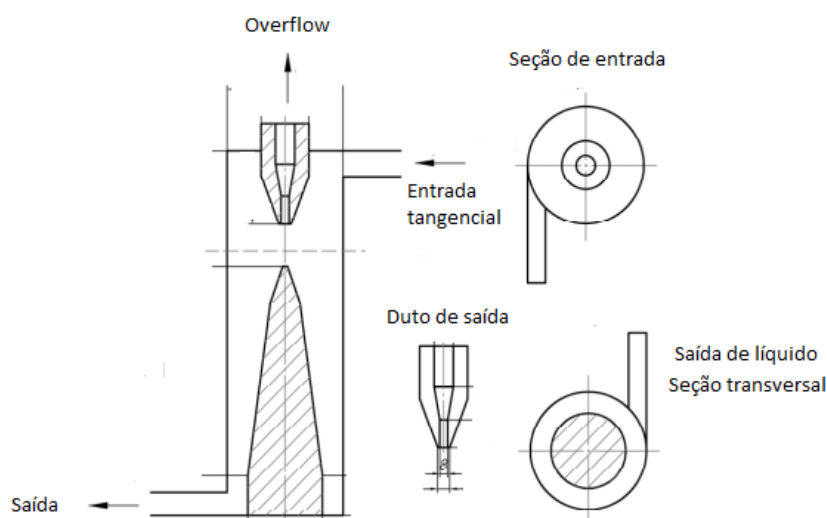
Fonte: NUNES *et al.* (2022).

No trabalho de Nunes *et al.* (2022) foram simuladas três permeabilidades distintas da membrana: 10^{-14} , 10^{-13} e 10^{-12} m^2 , observando-se que o aumento da permeabilidade favoreceu o escoamento radial da fase aquosa, elevando a eficiência do processo. As pressões transmembrana avaliadas foram 0 Pa, 50.000 Pa e 100.000 Pa, sendo que esta última apresentou eficiência de separação de até 97%, com concentração volumétrica de 6% de óleo na alimentação. A fração volumétrica de óleo variou entre 1%, 3% e 6%, sendo que a eficiência reduziu com o aumento da concentração, mas ainda assim, permaneceu acima de 90% em configurações otimizadas. A pressão de entrada variou entre 100.000 Pa e 200.000 Pa, sendo que a maior pressão resultou em melhor perfil de escoamento e aumento da eficiência.

As simulações numéricas mostraram grandes contribuições por comprovarem que o uso de membranas porosas nas paredes do hidrociclone aumenta significativamente a eficiência de separação, representando uma proposta inovadora. Além disso, é possível visualizar os parâmetros operacionais mais detalhadamente, fornecendo dados sobre o impacto das variáveis no processo. Ainda, as visualizações do escoamento e da distribuição das fases mostram o comportamento hidrodinâmico interno, auxiliando no entendimento dos mecanismos de separação. Ainda, conseguiu demonstrar a capacidade do sistema, que manteve alto desempenho mesmo sob elevada carga de óleo (Nunes *et al.*, 2021).

Usando hidrociclones Rui *et al.* (2020) propuseram um estudo sobre a análise experimental de um ciclone separador gás-líquido, visando otimizar sua eficiência de separação e comportamento hidrodinâmico. O trabalho combinou modelagem física, simulação CFD e testes experimentais, avaliando as condições operacionais de vazão, razão de divisão, relação gás-líquido e seus efeitos sobre a eficiência de separação, queda de pressão e comportamento do escoamento. O modelo estudado está representado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama estrutural do separador gás-líquido.



Fonte: Adaptado de Rui *et al.* (2020).

O modelo físico do separador foi desenvolvido com base em parâmetros do seu uso em operações industriais, contendo um tubo de entrada tangencial, câmara cilíndrica de separação, tubo de saída de gás e tubo de saída de líquido. Foi utilizado o software ANSYS Fluent para simulações numéricas baseadas em dinâmica dos fluidos computacional (CFD) com malha hexaédrica e condições de contorno adequadas para entrada tangencial de mistura bifásica (Rui *et al.*, 2020).

A vazão foi uma variável avaliada e indicou que quando aumentada de 20 m³/h para 50 m³/h, a eficiência de separação variou significativamente, atingindo seu melhor resultado em torno de 40 m³/h, onde houve o menor desvio na linha de pressão interna e o escoamento mais estável, com eficiência superior a 95%. Vazões maiores causaram instabilidade e recirculações internas, e consequentemente, diminuíram o desempenho (Rui *et al.*, 2020).

A razão de divisão (RL) demonstrou ter grande impacto sobre a queda de pressão (ΔP). O estudo experimental indicou que, à medida que a razão de divisão aumentou, a pressão interna do ciclone cresceu significativamente, o que resultou em maior resistência ao escoamento. Esse comportamento é evidenciado pelo aumento do número de Euler, que foi diretamente

proporcional ao ΔP em todas as condições testadas, com variações entre 1650 e 2505 Pa, dependendo da configuração adotada (Rui *et al.*, 2020).

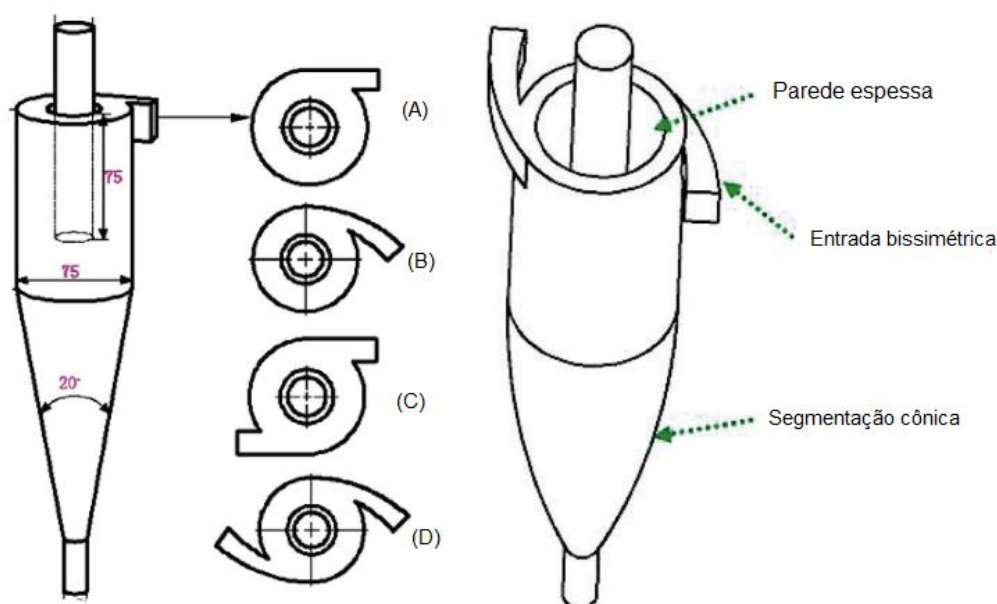
Além disso, ao avaliar a razão gás-líquido, foram testadas proporções de 1:1 a 1:5. Observou-se que maiores proporções de gás, como 1:5, causaram instabilidades no campo de escoamento e aumento da pressão, resultando em menor eficiência de separação. Por outro lado, razões mais equilibradas, entre 1:2 e 1:3, apresentaram melhor desempenho, com fluxo mais estável e eficiência superior (Rui *et al.*, 2020).

No que diz respeito ao fluxo de gás na saída inferior, o estudo revelou que elevadas proporções gás-líquido intensificaram o refluxo de gás, comprometendo a função de separação. Em contrapartida, taxas mais moderadas proporcionaram fluxo descendente mais estável, favorecendo a previsibilidade e a eficácia do processo (Rui *et al.*, 2020).

Dessa forma, Rui *et al.* (2020) concluíram que o desempenho ideal do ciclone foi obtido sob condições de vazão de 40 m³/h, razão de divisão de 10% e relação gás-líquido de 1:2 ou 1:3, resultando em eficiências superiores a 95% e queda de pressão reduzida, em torno de 800 Pa (Rui *et al.*, 2020).

Outro estudo foi conduzido por Li *et al.* (2023) e abordou o desenvolvimento e a avaliação de um hidrociclone inovador destinado à purificação de sedimentos granulares presentes em águas residuais. O objetivo era aprimorar a eficiência na separação de partículas sólidas, otimizando o design do equipamento e entender o comportamento das partículas durante o processo de separação. O modelo do hidrociclone é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Modelos dos hidrociclones estudados por Li (2021). As entradas apresentadas são: (A) Retangular; (B) Involutiva; (C) Bissimétrica retangular; (D) Bissimétrica involutiva.



Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2021).

Para alcançar esse objetivo, os pesquisadores exploraram diversas variáveis como a geometria do hidrociclone com diferentes configurações, incluindo variações no diâmetro do cilindro, comprimento do cone e diâmetro do *vortex finder*, alterando as condições operacionais como a vazão de alimentação foi ajustada em diferentes níveis para avaliar seu impacto na eficiência de separação e para as partículas foram usadas diferentes distribuições de tamanho e densidade para simular condições reais de águas residuais industriais (Li *et al.*, 2023).

Através dos resultados obtidos foi demonstrado que o hidrociclone desenvolvido alcançou uma eficiência de separação superior a 90% para partículas com diâmetro maior que 50 μm . Além disso, houve uma perda de carga moderada, indicando um equilíbrio entre eficiência de separação e consumo energético. Além disso, constatou-se que a eficiência de separação aumentava com o incremento da vazão de alimentação até um ponto ótimo; após esse ponto, a eficiência começou a declinar devido ao aumento da turbulência interna. (Li *et al.*, 2023).

Por outro lado, identificou-se uma limitação na separação de partículas muito finas; a eficiência para partículas com diâmetro inferior a 20 μm foi menor, sugerindo a necessidade de ajustes adicionais no design ou operação para melhorar a remoção dessas partículas menores.

As simulações numéricas foram realizadas utilizando a técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD), usando o modelo de Euler-Lagrange para mapear o movimento das partículas dentro do hidrociclone. As partículas foram modeladas considerando interações com

o fluido contínuo e entre si, permitindo uma análise dos padrões de escoamento e identificação das zonas de alta concentração de partículas (Li *et al.*, 2023).

Conforme os estudos supracitados, nota-se o grande potencial e a abrangência das aplicações de hidrociclones em diversas áreas. Além disso, os trabalhos demonstram uma grande base teórica para o desenvolvimento de hidrociclones mais eficientes, contribuindo para uma melhor qualidade nos tratamentos para as indústrias que utilizam este equipamento e revelam como algumas alterações possibilitam o alcance de equipamentos melhores (Li *et al.*, 2023).

2.2. OTIMIZAÇÃO

Segundo Tian *et al.* (2018), a eficiência de separação de hidrociclones também pode ser otimizada através dos seguintes parâmetros, relacionados às condições operacionais:

- vazão de alimentação;
- pressão de alimentação;
- parâmetros das partículas na alimentação, como a concentração, tamanho, forma e disposição;
- parâmetros de fluido de alimentação, como o tipo de fluido, viscosidade e reologia.

Tais parâmetros serão explorados na sequência, além dos parâmetros geométricos.

2.2.1. Vazão de alimentação

A vazão de entrada do fluido no hidrociclone é um dos parâmetros operacionais mais influentes no desempenho da separação. Através dela, define-se a energia do sistema e a intensidade do campo centrífugo gerado no interior do equipamento. Segundo Tian *et al.* (2018), o aumento da vazão de alimentação geralmente melhora a eficiência da separação, pois aumenta a força centrífuga aplicada às partículas. No entanto, esse efeito ocorre até um certo ponto ótimo, acima do qual o excesso de energia gera instabilidades e recirculações, prejudicando a qualidade da separação.

No estudo realizado por Zhang *et al.* (2022), foi feita a análise da influência da vazão de alimentação no desempenho do campo do fluxo interno de um hidrociclone, utilizando simulações numéricas para avaliar a eficiência. Os autores realizaram os testes com velocidades entre 1 m/s a 5 m/s e observaram que com o aumento da vazão houve o aumento da pressão estática de 5,49 kPa para 182,78 kPa e da velocidade tangencial de 1,97 m/s para 11,16 m/s.

Tais mudanças intensificaram o campo centrífugo, favorecendo a separação inicial das partículas. Entretanto, com o aumento da vazão também houve a redução do tempo de residência das partículas dentro do hidrociclone, fator que pode comprometer a eficiência de separação ainda mais para partículas de menor diâmetro. Além disso, a energia cinética turbulenta aumentou com a vazão, o que pode resultar em maior consumo energético e instabilidades no núcleo do vórtice. Assim, o estudo demonstrou que, tanto a existência de um ponto ótimo de vazão, quanto o aumento excessivo de vazão, podem influenciar a eficiência devido aos efeitos adversos da turbulência e do escoamento acelerado.

2.2.2. Pressão de alimentação

A pressão de alimentação também é uma das variáveis operacionais mais importantes em um hidrociclone, já que ela determina o quão intensa será a força centrífuga aplicada sobre as partículas. À medida que essa pressão aumenta, a velocidade tangencial do fluido também cresce, o que tende a favorecer a separação, especialmente de partículas menores. Entretanto, pressões muito elevadas podem reduzir o tempo de permanência das partículas no interior do equipamento, aumentar a turbulência e, com isso, comprometer a eficiência geral da operação, pois há uma maior energia disponível para ser transformada em energia cinética. (Zhang *et al.*, 2022).

Em uma série de simulações numéricas, Zhang *et al.* (2022) observaram que o aumento da velocidade de entrada de 1 para 5 m/s fez com que a pressão estática saísse de 5,49 kPa para mais de 180 kPa. Isso elevou a velocidade tangencial para até 11 m/s, fortalecendo o vórtice interno e melhorando a separação, entretanto foi gerado um maior consumo de energia cinética turbulenta e menor tempo de residência reduzindo, a seletividade do processo.

No trabalho realizado por Chu *et al.* (2000) foi relatado um comportamento semelhante em testes experimentais, onde ao se aumentar a pressão de entrada de 100 para 300 kPa, foi obtido um aumento de 15% na eficiência de separação de partículas com diâmetro entre 20 e 50 micrômetros. Entretanto, essa melhoria elevou o consumo de energia em torno de 40%. Assim, o estudo indica a necessidade de equilíbrio entre desempenho e custo operacional.

Já o estudo realizado por Tian *et al.* (2018) mostrou que pressões acima de 250 kPa e em sistemas com alta concentração de sólidos, pode haver a formação de vórtices secundários e instabilidades no núcleo do ciclone. Com isso, há perturbações que afetam negativamente a eficiência e aumentam as chances de problemas operacionais, como uma descarga contínua e espessa que gera uma perda de performance.

O estudo de Neesse *et al.* (2015), testou hidrociclones operando sob pressões ainda mais elevadas, entre 400 e 600 kPa, com o objetivo de classificar partículas na faixa submicrométrica. Os resultados mostraram que é possível obter alta eficiência mesmo com partículas extremamente finas, mas apenas se a geometria do ciclone for ajustada para suportar essas pressões.

Assim, os estudos revelam que operar em pressões altas leva a um maior desgaste, além de um consumo energético superior. Por outro lado, com pressões mais baixas pode-se comprometer a eficiência de separação, principalmente para partículas menores.

2.2.3. Concentração de partículas de alimentação

As concentrações elevadas de sólidos na alimentação podem aumentar a viscosidade do fluido, afetando negativamente a formação do vórtice e, consequentemente, a eficiência de separação, pois altera o padrão de escoamento. Assim, o estudo sugere que a otimização da concentração de partículas é crucial para melhorar o desempenho dos hidrociclones e reduzir o consumo de energia (Silva *et al.*, 2024).

No trabalho de Nunes *et al.* (2022) foram realizadas simulações que mostraram que o aumento da concentração volumétrica de óleo de 1% para 6% em um modelo multifásico resultou na queda da eficiência de separação de 96% para 83%. Assim, é possível destacar como pequenas variações na concentração de partículas podem impactar significativamente o desempenho do equipamento.

Dessa forma, os trabalhos revelam a importância de monitorar e controlar a concentração de partículas na alimentação para garantir a eficiência do processo.

2.2.4. Tamanho das partículas de alimentação

A eficiência de separação em hidrociclones é fortemente influenciada pelo tamanho das partículas. Em geral, partículas maiores tendem a responder mais intensamente à força centrífuga gerada pelo escoamento tangencial, o que reduz a influência de efeitos de dispersão e promove sua rápida migração para a parede externa do equipamento. Isso contribui para um aumento na eficiência de corte, especialmente em sistemas com configuração hidrodinâmica otimizada (SILVA *et al.*, 2024).

No estudo de Ni *et al.* (2019) foi relatado que o diâmetro de corte (d_{50}) da partícula pode ser reduzido ao utilizar uma geometria de cone alongado e um *vortex finder* estreito, sendo possível favorecer o campo centrífugo e melhorar a eficiência de separação.

Para o trabalho de Quteishat (2020), através de simulações numéricas, foi possível demonstrar que a eficiência de separação cai drasticamente para partículas menores que 10 μm , mesmo quando se utilizam altas pressões de operação, indicando limitações na separação de partículas ultrafinas.

2.2.5. Forma das partículas a serem separadas

A forma das partículas presentes na alimentação de hidrociclones desempenha um papel importante na eficiência do processo de separação. Estudos demonstram que partículas com diferentes formatos como esféricas, laminadas ou irregulares, respondem de maneira distinta às forças centrífugas e de arrasto dentro do equipamento (Tian *et al.*, 2018).

Kashiwaya *et al.* (2012) investigaram o comportamento de partículas esféricas (esferas de vidro), planas (PTFE e flocos de vidro) e em forma de bloco (quartzo) em hidrociclones. Os resultados indicaram que, com o aumento da razão entre o diâmetro da partícula e sua espessura, o coeficiente de arrasto aumentou, levando assim, a uma diminuição na eficiência de separação, mostrando que partículas mais achatadas ou com maior área tendem a ser menos classificadas em hidrociclones devido ao aumento do arrasto e à orientação desfavorável durante a centrifugação.

No estudo de Tang *et al.* (2019) foi realizado experimentos e simulações numéricas para avaliar o impacto do tamanho e da forma das partículas na separação em hidrociclones. Foi observado que partículas esféricas maiores são mais facilmente separadas, enquanto partículas menores e com formas irregulares tendem a seguir o fluxo ascendente, reduzindo a eficiência de separação. Dessa forma, o estudo conseguiu revelar a importância de considerar tanto o tamanho quanto a forma das partículas ao projetar e operar hidrociclones para otimizar a eficiência de separação.

Com isso, as pesquisas reforçam que é importante uma análise detalhada das características físicas das partículas ao utilizar hidrociclones, especialmente em processos que envolvem uma ampla variedade de formas e tamanhos de partículas.

2.2.6. Viscosidade e reologia do fluido de alimentação

A viscosidade do fluido de alimentação é um parâmetro crítico que afeta a separação eficiência e queda de pressão (Tian *et al.*, 2018). Quanto maior for a viscosidade da suspensão, a intensidade do escoamento diminui e há uma redução da velocidade tangencial e campo centrífugo, o que compromete a eficiência do processo de separação aumentando o diâmetro de corte das partículas (Silva *et al.*, 2024).

O trabalho realizado por Morimoto *et al.* (2023) avaliou o comportamento de hidrociclones filtrantes operando com concentração de suspensões não-newtonianas, especialmente à base de rocha fosfática. O foco do estudo foi entender como o aumento da viscosidade aparente influencia o desempenho do equipamento. Assim, foram utilizados fluidos com viscosidade das suspensões entre 7,4 e 31,9 cP, e assim, foi observada uma redução significativa na intensidade do escoamento do *vortex* interno, o que comprometeu a eficiência da separação centrífuga.

Dessa forma, houve uma diminuição da perda de carga no sistema e, por consequência, uma queda no número de Euler em cerca de 33%. Além disso, o escoamento axial da suspensão passou a ser favorecido, o que facilitou o direcionamento do fluido para o *underflow*. Devido a alta viscosidade, tornou-se mais difícil para o fluido inverter seu movimento axial e alcançar o *overflow*. Como resultado, houve um aumento na razão de divisão (*split ratio*) em torno de 23% e uma queda expressiva de aproximadamente 29% na eficiência de separação do equipamento (Morimoto *et al.*, 2023).

Em seus estudos, Wu *et al.* (2017), objetivaram compreender como diferentes graus de viscosidade e comportamento não-newtoniano afetavam o desempenho de hidrociclones. Assim, os autores alteraram a concentração de ácido poliacrílico (PAA) em suspensões, criando fluidos com características reológicas distintas. Esses fluidos foram analisados com base na chamada equação da lei da potência, e observou-se que o índice de comportamento variava entre 0,51 e 0,84, respectivamente do mais pseudoplástico ao mais próximo do comportamento newtoniano.

À medida que o fluido se tornava mais viscoso a suspensão passava a resistir mais ao movimento rotacional dentro do hidrociclone. Esse efeito reduziu a força centrífuga disponível para separar as partículas, o que levou a um aumento significativo no diâmetro de corte do equipamento: de 2,1 para 4,2 μm . Em outras palavras, o hidrociclone teve mais dificuldade em separar partículas menores quando operando com suspensões mais viscosas (Wu *et al.*, 2017).

Por outro lado, quando o fluido apresentava um comportamento menos resistente ao escoamento, a separação foi muito mais eficiente. Nessas condições, os autores registraram uma melhoria de até 40% na eficiência total do processo, evidenciando a forte influência da viscosidade e do comportamento reológico no desempenho do equipamento (Wu *et al.*, 2017).

2.2.7. Alterações geométricas

Há muitos estudos que abordam a influência dos parâmetros operacionais e alterações geométricas no desempenho da coleta dos hidrociclones (Quteishat, 2020). Em sua revisão, Ni

et al. (2018) classificaram 10 grupos de geometrias que influenciam na otimização de parâmetros geométricos, como alterações na seção cilíndrica, duto de alimentação, duto de *vortex finder*, duto de saída de *underflow*, seção cônica, ângulo de inclinação do hidrociclone, entre outros.

Em sua revisão, Silva *et al.* (2024) apresentaram diversos trabalhos que revelaram a influência das mudanças geométricas em hidrociclone através das alterações do diâmetro do duto de alimentação, da seção cilíndrica, da seção cônica e do *vortex finder*, além de mostrar configurações não tradicionais como hidrociclones com entrada em voluta, cones parabólicos e hidrociclones filtrantes. O trabalho mostra que as alterações geométricas melhoraram a performance do equipamento, bem como possuem a capacidade de tornar o processo mais sustentável e ajustado às demandas específicas de cada indústria.

Outra revisão apresentada por Ni *et al.* (2019) reuniu diversas evidências experimentais e numéricas sobre os impactos de parâmetros geométricos como comprimento do cone, altura da seção cilíndrica, diâmetro e comprimento do *vortex finder*. Através do levantamento em literatura, foi comprovado que aumentar o comprimento do cone melhora a capacidade de reter partículas maiores no *underflow*, enquanto o alongamento do *vortex finder* reduz o curto-circuito hidráulico, permitindo que mais partículas finas permaneçam no vórtice. Em contrapartida, um *vortex finder* muito longo pode aumentar a perda de carga e provocar instabilidades na saída superior. A revisão de Ni *et al.* também destaca a importância da razão entre o diâmetro da seção cilíndrica e o diâmetro do apex na definição do ponto de corte e da capacidade operacional do ciclone.

O trabalho de Chu, Chen e Lee (2000) avalia como modificações estruturais em hidrociclones com pequenas alterações geométricas podem influenciar significativamente o desempenho de hidrociclones. A pesquisa se concentrou no impacto do ângulo do cone de separação.

Utilizando um planejamento experimental ortogonal, os autores avaliaram diversos arranjos, testando diferentes ângulos de cone e formatos geométricos através de perfis parabólicos e hiperbólicos, além da inclusão de elementos internos, como núcleos sólidos e difusores. Os resultados mostraram que cones com ângulos mais fechados, entre 10° e 15°, proporcionaram melhores condições para a separação de partículas finas. Isso porque esses ângulos aumentaram o tempo de residência do fluido dentro do hidrociclone, o que favorece o estabelecimento do campo centrífugo necessário para a classificação eficiente (Chu *et al.*, 2000).

Por outro lado, quando o cone apresentava um ângulo mais aberto, acima de 20° , o fluido escoava com maior rapidez. Embora isso possa beneficiar a separação de partículas mais grossas, acabou comprometendo a eficiência global, ainda mais em sistemas com distribuição granulométrica mais ampla. Ou seja, deve-se haver uma comparação entre o ganho velocidade de escoamento e seletividade na separação, o que evidencia a necessidade de escolha criteriosa da geometria em função do tipo de material a ser processado (Chu *et al.*, 2000).

Além disso, o estudo avaliou o uso de geometrias não convencionais, como cones parabólicos e hiperbólicos, em substituição ao tradicional cone reto. Essas formas mostraram desempenho superior, promovendo um escoamento mais estável e suave, com melhor controle da trajetória das partículas e menor turbulência quando comparadas com hidrociclones de cone reto convencional. O ganho em eficiência, aliado à economia de energia decorrente da menor resistência hidráulica, demonstra o potencial dessas alterações para aplicações industriais que exigem alta precisão e menor custo operacional (Chu *et al.*, 2000).

Em síntese, a pesquisa de Chu *et al.* (2000) reforça a ideia de que a geometria do hidrociclone não deve ser tratada como um padrão fixo, mas sim como uma variável estratégica que pode adaptada às características específicas da operação. A partir de alterações relativamente simples, é possível alcançar ganhos expressivos tanto em eficiência de separação quanto em economia energética o que tornam as mesmas elementos fundamentais para a competitividade de processos industriais que utilizam essa tecnologia.

O trabalho desenvolvido por Kyriakidis (2018), teve como objetivo a otimização geométrica de hidrociclones com base em um histórico experimental consolidado. Combinando modelagem matemática, simulações de fluidodinâmica computacional (CFD) e validações experimentais, o estudo avaliou como alterações específicas nas dimensões do equipamento influenciam diretamente seu desempenho em parâmetros como eficiência total (η), razão de líquido (R_L), número de Euler (Eu) e diâmetro de corte reduzido (d'_{50}).

O estudo gerou quatro geometrias otimizadas denominadas HGOT1, HGOT2, HGOT3 e HGOT4, além de uma quinta variação (HGOT3DU3), que incluiu uma modificação no diâmetro do orifício de *underflow* (D_U). A otimização dessas geometrias foi feita por meio de um Algoritmo de Evolução Diferencial (AED), com base em equações empíricas ajustadas a partir de dados experimentais históricos. Apresenta-se um resumo das dimensões geométricas construídas pela autora na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões Geométricas dos Hidrociclones estudados por Kyriakidis (2018).

Parâmetro	HGOT1	HGOT2	HGOT3	HGOT4
D _i (mm)	8,7	8,7	6,3	6,3
D _o (mm)	4,8	9,4	10,5	10,5
L (mm)	228,0	174,0	228,0	185,0
h (mm)	69,0	15,0	114,0	114,0
H (mm)	159,0	159,0	114,0	71,0
θ (°)	9,0	9,0	12,5	20,0
ℓ (mm)	55,2	12,0	91,2	91,2
D _U (mm)	5,0	3,0	5	4,4

Fonte: Kyriakidis (2018).

As simulações CFD foram realizadas no *software* Fluent, utilizando uma abordagem tridimensional, transiente e monofásica. A água foi o fluido adotado, com densidade de 998,2 kg/m³ e viscosidade de 1,003·10⁻³ kg/(m·s), sob gravidade de 9,8 m/s². O modelo de turbulência empregado foi o RSM (Reynolds Stress Model), adequado para escoamentos rotacionais com forte anisotropia, como os de hidrociclones. As condições de contorno incluíram vazão mássica na entrada, com base nas condições experimentais (ΔP de até 177 kPa), pressão atmosférica nas saídas e paredes com condição de não deslizamento. A discretização foi feita com os esquemas QUICK (momento), PRESTO! (pressão) e Least Squares para os gradientes. A convergência foi fixada em 10⁻⁵, com passos de tempo de 10⁻⁵ s, totalizando 2,0 s de simulação.

Os ensaios experimentais foram conduzidos com suspensões de quartzito (95% de sílica), com concentração volumétrica de 1,0%. O material foi previamente preparado por moagem e peneiramento. Os testes foram realizados em diferentes quedas de pressão (88 a 177 kPa), e as medições envolveram eficiência total, razão de líquido, número de Euler, diâmetro de corte e vazões das correntes. Apresenta-se o comparativo dos resultados das geometrias à $\Delta P = 177$ KPa encontrados a partir dos valores experimentais na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparativo dos resultados experimentais obtidos por Kyriakidis (2018).

Geometria	Objetivo de Otimização	Eficiência Total (η)	Número de Euler (Eu)	Razão de Líquido (R_L)	Diâmetro de Corte Reduzido (d'_{50}) [μm]	Destaques
HGOT1	Maximizar a eficiência total	91,04%	2078	49,33%	6,6	Igualou a melhor eficiência do banco de dados com 44,69% menos energia
HGOT2	Minimizar R_L	72,88%	1205	0,74%	13,0	Reduziu R_L mantendo boa eficiência; D_U de 3,0 mm
HGOT3DU3	Minimizar Eu	61,81%	1297	4,22%	17,4	Maior concentração no <i>underflow</i> ; menor R_L entre todas geometrias
HGOT4	Minimizar Eu	67,85%	1190	4,22%	16,7	Melhor relação entre consumo e desempenho geral

Fonte: Kyriakidis (2018).

Os resultados evidenciam como alterações nas proporções geométricas como o comprimento do *vortex finder* (ℓ), ângulo do cone (θ) e o diâmetro de saída (D_U) afetam diretamente o padrão de escoamento e a separação de partículas. A geometria HGOT1 alcançou desempenho similar à melhor referência histórica, quando comparado com o hidrociclone HCOT1 projetado por Silva (2012) e modificado por Kyriakidis (2014), porém com uma expressiva redução no consumo de energia. Já a HGOT3DU3, apesar de menor eficiência total, mostrou-se mais adequada para processos de concentração, com aumento médio de 52,43% na concentração de sólidos no *underflow* e uma R_L 49,73% inferior à do melhor equipamento da literatura pesquisada.

A partir da integração entre simulação CFD e validação experimental, a autora demonstrou que é possível customizar hidrociclones para diferentes finalidades com foco em eficiência energética, seletividade granulométrica e concentração da fase sólida.

2.2.7.1. Alterações geométricas no duto de alimentação

Entre as principais alterações geométricas no duto de alimentação dos hidrociclones estão a mudança no diâmetro, ângulo da seção de entrada e formato (Ni *et al.*, 2018). A forma da seção transversal da entrada pode ser circular ou retangular, sendo este último um pouco melhor porque, para a mesma área de fluxo, aproxima as partículas um pouco mais da parede

na entrada. As entradas retangulares não representam uma complicação de fabricação porque hoje em dia a maioria dos ciclones são fundidos, facilitando a sua construção (Svarovsky, 2001).

O estudo conduzido por Tang *et al.* (2017) investigou, por meio de simulações CFD, como diferentes diâmetros do duto de alimentação afetam o desempenho de um hidrociclone de 75 mm de diâmetro, aplicado no processo de separação de partículas provenientes de uma produção de dióxido de titânio. Foram analisadas especialmente as variáveis do diâmetro de entrada (D_i) e velocidade de alimentação (v), com foco nos efeitos sobre a eficiência de separação, queda de pressão, razão de divisão e precisão da classificação (K).

Para isso, os autores utilizaram diferentes razões entre o diâmetro de entrada e o diâmetro do corpo do ciclone variando D_i/D_c de 0,20 a 0,40, e velocidades entre 1,28 e 3,03 m/s, abrangendo números de Reynolds de 22.840 a 90.465. Os modelos utilizados incluíram RSM para turbulência, VOF para o núcleo de ar e modelo Lagrangiano estocástico para acompanhar as partículas. Isso garantiu simulações mais fiéis ao comportamento real do escoamento (Tang *et al.*, 2017).

Os resultados demonstraram que existe um valor crítico para o diâmetro do duto de alimentação. Quando D_i/D_c foi mantido entre 0,20 e 0,30, a eficiência de recuperação de partículas maiores que 25 μm pelo *underflow* foi superior a 96%. No entanto, quando o diâmetro foi aumentado para $D_i/D_c = 0,35$ ou 0,40, essa eficiência caiu drasticamente, e até 20,6% das partículas grossas escaparam pelo *overflow*, sem nem passar pela região de separação. Isso foi atribuído à intensificação do fluxo de curto-circuito, resultante de um campo de pressão mais inadequado e de um aumento das velocidades radiais junto à parede interna do *vortex finder* (Tang *et al.*, 2017).

Além disso, observou-se que o diâmetro de corte (d_{50}) teve comportamento não linear. Em condições ótimas consideradas pelos autores ($D_i/D_c = 0,25$, $v = 2,28$ m/s), o valor de d_{50} foi 20 μm , com Eficiência Total (ET) de 81,2% e um índice de seletividade (K) de 0,844, considerado ideal para aplicações industriais. Por outro lado, quando $D_i/D_c = 0,40$, o d_{50} aumentou para 22,9 μm , a ET caiu para 67,2%, e o K para 0,743, evidenciando uma separação menos precisa e maior perda de energia (Tang *et al.*, 2017).

Do ponto de vista da velocidade, também foi identificado um comportamento crítico para velocidades muito baixas (1,28 m/s) que resultou em baixa eficiência na separação de partículas grossas. Por outro lado, velocidades muito altas (acima de 2,78 m/s) comprometeram a separação de partículas finas, que passaram a ser capturadas indevidamente pelo *overflow* (Tang *et al.*, 2017).

Um ponto importante que os autores destacaram é que o aumento do diâmetro de entrada injeta mais fluido tangencial ao sistema, o que eleva a energia do vórtice e, consequentemente, a queda de pressão para se manter uma vazão mássica de alimentação. Assim, uma entrada demasiadamente larga não apenas compromete a eficiência da separação, como também aumenta o consumo de energia sem benefício prático (Tang *et al.*, 2017).

Assim, o estudo mostrou que o ajuste fino da geometria do duto de alimentação, especialmente em relação ao diâmetro e à velocidade de entrada, tem um impacto direto na qualidade da separação, na economia energética e no controle de partículas mal classificadas. Valores ideais encontrados foram D_i/D_c de 0,25 a 0,30 e velocidades de entrada entre 2,0 e 2,5 m/s, resultando em combinações com eficiência de separação superiores a 80% e classificações mais nítidas, sem excessos de curto-circuito ou perdas no *overflow* (Tang *et al.*, 2017).

O estudo de Clara Rocha (2019) investigou como alterações geométricas no duto de alimentação podem modificar significativamente o desempenho de um hidrociclone anteriormente otimizado. A pesquisa partiu da geometria de referência HCOT1 proposta por Kyriakidis (2014), com seção de entrada circular de 7,8 mm, e propôs outras quatro configurações de entrada: uma quadrada (STQ, 7x7 mm), duas retangulares (STR, 8x6 mm e 9x5,3 mm) e uma com duas entradas simultâneas (2STR, 8x3 mm cada). Todas essas geometrias mantiveram a área de seção transversal da entrada de cerca de 47,78 mm², o que garante a comparação entre os modelos.

As demais dimensões do hidrociclone foram mantidas constantes baseadas no trabalho de referência. Assim, têm-se o diâmetro do *vortex finder* (D_o) foi de 5,7 mm, o orifício de *underflow* (D_u) de 5,0 mm, o comprimento total (L) de 169 mm, altura da seção cônica (H) de 159 mm, altura da seção cilíndrica (h) de 10 mm, ângulo do cone (θ) de 9°, e comprimento do *vortex finder* (ℓ) de 6,5 mm. Essas características permitiram a avaliação do impacto apenas da variação geométrica do duto de entrada (Rocha, 2019).

Utilizando simulações CFD com água como fluido de trabalho, vazão mássica de 0,266 kg/s e o modelo de turbulência RSM, os resultados mostraram que o número de Euler (Eu) aumentou com as geometrias modificadas. Isso representou um leve aumento do consumo energético, mas também está associado a uma maior intensidade de campo centrífugo, o que favoreceu a separação de partículas (Rocha, 2019). Na **Erro! Fonte de referência não encontrada**. resumem-se os principais resultados obtidos.

Tabela 3 – Resultados obtidos por Rocha (2019) das simulações em CFD.

Respostas Simuladas	HOCT1	STQ (7x7)	STR (8x6)	STR (9x5,3)	2STR (8x3)
<i>Eu</i>	2604	2846	2984	3106	3328
<i>R_L</i> (%)	44,22	47,12	46,93	46,7	45,59

Fonte: Rocha (2019).

A razão de líquido (*R_L*) também aumentou nas geometrias modificadas, com destaque para o modelo STQ (7x7), que alcançou 47,12%, sugerindo maior volume de fluido escoando pelo *underflow*, o que favoreceu o transporte de partículas sólidas concentradas (Rocha, 2019).

Avaliando os resultados obtidos através da simulação em CFD, os perfis de velocidade axial mostraram maior intensidade de escoamento descendente junto às paredes nas geometrias estudadas, indicando que o fluido foi mais efetivamente conduzido em direção ao *underflow*, possibilitando o aumento da sedimentação de partículas maiores. A geometria STQ apresentou o maior pico de velocidade axial entre os modelos estudados, contribuindo para uma separação mais eficiente no *underflow* do hidrociclone (Rocha, 2019).

As velocidades tangenciais, por sua vez, apresentaram padrão típico de hidrociclones, com valores máximos intermediários entre o centro e a parede. A diferença foi dada na diferença de intensidade do vórtice: modelos como o 2STR e o STQ apresentaram maiores valores de velocidade tangencial média, o que reforça o papel do formato da entrada na geração de escoamentos mais rotacionais, condição essencial para uma boa performance de separação (Rocha, 2019).

Entre os cinco modelos, o STQ (7x7) foi selecionado pela autora para ser construído fisicamente e testado experimentalmente. Os testes comparando com os dados das simulações CFD, apresentaram desvios inferiores a 3,5%. Experimentalmente, o STQ demonstrou redução de 32% no diâmetro de corte (*d₅₀*) em relação ao HCOT1, o que representa uma capacidade superior para separar partículas menores. Também foram observados aumentos de 12,49% no número de Euler, 7,60% na razão de líquido, e uma leve redução de 5,90% na vazão de alimentação (Rocha, 2019).

Esses resultados mostram que a alteração da entrada circular para uma geometria quadrada foi suficiente para promover melhorias significativas, tanto na eficiência de separação quanto na seletividade do processo, sem necessidade de alterar o restante da estrutura do equipamento. Dessa forma, o trabalho de Rocha (2019) evidencia a importância de se considerar o duto de alimentação como variável estratégica no projeto e na otimização de

hidrociclones, entretanto, a literatura apresenta poucos trabalhos com esse tema, mostrando a necessidade de estudos relacionados.

2.3. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) tem se consolidado como uma ferramenta indispensável na análise de processos que envolvem escoamentos complexos, como os que ocorrem no interior de hidrociclones. Esses equipamentos, amplamente utilizados na separação sólido-líquido, apresentam comportamento hidrodinâmico intensamente rotacional e turbulento, dificultando a análise experimental direta. Assim a utilização do CFD permite simular o escoamento interno com alta resolução, possibilitando a visualização de fenômenos como a formação do núcleo de ar, padrões de recirculação e distribuição de partículas, os quais seriam de difícil observação em experimentos físicos tradicionais (Rocha, 2019).

O processo de simulação numérica por CFD é estruturado em três etapas principais. No pré-processamento, define-se a geometria do domínio, a geração da malha computacional e as condições de contorno. Na etapa de solução, são aplicados modelos matemáticos de turbulência como o modelo dos tensores de Reynolds (RSM), o modelo RNG k- ϵ ou o Large Eddy Simulation (LES) para resolver as equações de Navier-Stokes. Por fim, no pós-processamento, os resultados são analisados em forma de perfis de velocidade, linhas de corrente, mapas de pressão e outras variáveis relevantes. Dessa forma, é possível obter dados consistentes e detalhados para avaliação do desempenho do equipamento simulado (Kyriakidis, 2014).

Dentre as principais vantagens associadas à aplicação da CFD, destacam-se a redução de custos com protótipos físicos, a possibilidade de testar diversas geometrias em curto espaço de tempo, e a capacidade de visualizar parâmetros hidrodinâmicos com alta precisão. Além disso, a simulação permite estimar variáveis internas como velocidades axiais e tangenciais, gradientes de pressão e extensão do núcleo de ar que são praticamente inacessíveis por métodos experimentais convencionais. Tais características tornam a simulação CFD uma ferramenta valiosa na etapa de projeto e otimização de hidrociclones, conforme apontado por Silvestri (2021), que ressalta sua aplicabilidade no contexto da Indústria 4.0 e integração com tecnologias como realidade aumentada (Silvestri, 2021).

Apesar dos inúmeros benefícios, a simulação CFD apresenta limitações e desafios que devem ser considerados. A obtenção de resultados confiáveis depende de malhas suficientemente refinadas, o que pode demandar tempo computacional elevado, especialmente quando se utilizam modelos de turbulência mais robustos como o LES. Além disso, a escolha

inadequada de modelos e algoritmos ou a imposição de condições de contorno imprecisas podem comprometer a acurácia das previsões. Outro ponto crítico é a necessidade de validação experimental: mesmo com simulações bem conduzidas, os resultados devem ser comparados com dados reais para assegurar a representatividade do modelo da simulação (Durango-Cogollo *et al.*, 2020).

Estudos recentes têm demonstrado que, quando devidamente aplicadas, as simulações por CFD produzem resultados bastante coerentes com ensaios experimentais. No trabalho de Durango-Cogollo *et al.* (2020), por exemplo, foi realizada uma comparação entre os modelos RNG k- ϵ , RSM e LES, observando-se erros inferiores a 3% nas velocidades tangenciais simuladas, além de boa previsão da formação do núcleo de ar e da distribuição de pressão interna. A autora Rocha (2019) também obteve excelente concordância entre os dados experimentais e numéricos ao testar a geometria STQ (7x7 mm), registrando um desvio inferior a 3,5% nos principais parâmetros de desempenho do hidrociclone (Durango-Cogollo *et al.*, 2020; Rocha, 2019).

Além dos indicadores globais de eficiência, os resultados da simulação numérica oferecem detalhes valiosos sobre o escoamento interno. No estudo de Rocha (2019), verificou-se que a geometria STQ apresentou velocidades axiais mais intensas junto à parede do equipamento e um padrão de recirculação central mais definido, o que favoreceu a migração das partículas maiores em direção ao *underflow*. A simulação também revelou que as velocidades tangenciais foram significativamente elevadas nas novas geometrias testadas, aumentando a força centrífuga atuante e, conseqüentemente, a eficiência da separação (Rocha, 2019).

Considerando o avanço contínuo da tecnologia, é possível afirmar que a aplicação da CFD em hidrociclones tende a crescer de forma expressiva, sobretudo com sua integração a sistemas digitais inteligentes. A combinação entre simulação, sensoriamento em tempo real e automação cria oportunidades para controle preditivo, monitoramento contínuo e reconfiguração dos processos, tornando o ambiente industrial mais eficiente, seguro e sustentável (Silvestri, 2021).

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido exclusivamente por meio de simulações numéricas utilizando a técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD), com o objetivo de investigar o comportamento interno do escoamento em hidrociclones a partir de alterações no duto de alimentação. Assim, foi possível entender como pequenas mudanças geométricas podem

impactar o desempenho do equipamento, sem recorrer a experimentos físicos. Para isso, foram adotadas as mesmas condições de referência utilizadas por Kyriakidis (2018).

A geometria básica do hidrociclone seguiu o modelo HGOT1, o mesmo utilizado por Kyriakidis (2018), com todas as dimensões mantidas como o comprimento do equipamento, diâmetro das saídas (*underflow* e *overflow*), comprimento do *vortex finder* e ângulo do cone. A única variável modificada foi o formato do duto de alimentação, que foram adaptados conforme as propostas do presente estudo. Essa escolha permitiu isolar os efeitos da entrada e compreender seu papel no escoamento interno no hidrociclone que obteve a maior eficiência de coleta apresentado no trabalho referenciado. A versão adotada, foi denominada HGOT1-Q.

Para manter a área de seção transversal da entrada do hidrociclone HGOT1, cujo duto de alimentação possui geometria circular com diâmetro de 8,7 mm, foi necessário calcular o lado equivalente para uma seção quadrada. A área da entrada circular foi determinada pela fórmula convencional da área do círculo, resultando em aproximadamente 59,42 mm². A partir desse valor, considerou-se uma seção quadrada com área equivalente. Assim, o lado do quadrado necessário para manter a área foi obtido por meio da raiz quadrada, resultando em um valor aproximado de 7,71 mm. Portanto, para que a nova geometria quadrada preserve as mesmas condições de entrada da HGOT1 em termos de área de escoamento, o lado da seção quadrada adotada foi de 7,7 mm.

Na Tabela 4 representam-se os valores utilizados na construção da geometria HGOT1-Q, em que D_i é o tamanho da entrada do fluido no equipamento, D_o representa o diâmetro do *vortex finder*, por onde sai o *overflow*. D_u é o diâmetro da saída inferior, o *underflow*, que descarrega o concentrado, L corresponde à altura total do hidrociclone, h é a altura da seção cilíndrica e H, da seção cônica. O ângulo θ indica a inclinação do cone, e ℓ representa o comprimento do *vortex finder* dentro do corpo do ciclone.

Tabela 4 – Dimensões geométricas do hidrociclone HGOT1-Q.

HGOT1-Q	Dimensão característica
D_i (mm)	$7,71 \times 7,71$
D_o (mm)	4,8
D_u (mm)	5,0
L (mm)	228,0
h (mm)	69,0
H (mm)	159,0
θ (°)	9,0°
D_c (mm)	30 mm
ℓ (mm)	55,2

Fonte: a autora.

As simulações foram conduzidas no software ANSYS Fluent® 2025 R1, considerando um modelo tridimensional, transiente e com escoamento monofásico de água à temperatura ambiente (20 °C). As propriedades do fluido foram mantidas constantes, com densidade de 998,2 kg/m³ e viscosidade de 1,003·10⁻³ kg/(m·s). A gravidade foi aplicada na direção vertical (z) com aceleração de 9,8 m/s².

Para representar o escoamento turbulento dentro do equipamento, será utilizado o modelo RSM (Reynolds Stress Model), amplamente reconhecido por sua capacidade de lidar com anisotropias e regiões com rotação intensa, características comuns em hidrociclones (HOFFMANN; STEIN, 2008; ROCHA et al., 2020). A discretização das equações será realizada com os esquemas QUICK para o momento e PRESTO! para a pressão, enquanto o algoritmo SIMPLE será empregado para o acoplamento entre pressão e velocidade, conforme recomendado pela documentação técnica do ANSYS Fluent (ANSYS Inc., 2020).

As condições de contorno serão definidas com base em uma vazão mássica de entrada correspondente a uma queda de pressão de 177 kPa, baseadas na referência experimental de Kyriakidis (2018) de valor de 292 cm³·s⁻¹, enquanto as saídas (*overflow* e *underflow*) operarão sob pressão atmosférica. As paredes do equipamento serão consideradas com condição de não deslizamento.

O critério de convergência foi fixado em 10⁻³ para todas as equações, e o passo de tempo adotado será de 10⁻⁵ s, com tempo total de simulação de 2 segundos, para observar a estabilização do escoamento e identificar padrões consistentes. A Tabela 5 contém um resumo dos parâmetros de simulação computacional.

Cabe destacar que não foi conduzido um teste formal de independência de malha neste trabalho devido ao tempo para a execução do trabalho. Entretanto, conforme será apresentado posteriormente, os resultados obtidos foram coerentes com aqueles obtidos por Kyriakidis (2018), principalmente no que tange aos resultados de pressão

Tabela 5 – Condições de contorno e parâmetros de simulação computacional.

Propriedade	Informação
Software utilizado	Ansys Fluent 2025 R1
Tipo de resolvidor	Pressure-Based
Regime de escoamento	Transiente
Gravidade	9,8 m/s ²
Fase simulada	Água líquida a 20 °C
Densidade do fluido	998,2 kg/m ³
Viscosidade do fluido	1,003·10 ⁻³ kg/(m·s)
Modelo de turbulência	RSM (Reynolds Stress Model)
Condição na entrada	Vazão mássica
Condições nas saídas	Pressão atmosférica
Valor da pressão atmosférica	101325 Pa
Condições nas paredes	Não aderência (no-slip), tubo liso
Acoplamento pressão-velocidade	SIMPLE
Discretização dos gradientes	Least Squares Cell Based
Discretização da pressão	PRESTO!
Discretização do momento	QUICK
Critério de convergência	Resíduo absoluto de 10 ⁻⁵
Passo de tempo (time-step)	1·10 ⁻⁵ s
Tempo total de simulação	2,0 s

Fonte: Adaptado de KYRIAKIDIS (2018).

A análise dos resultados foi feita por meio da observação dos campos de velocidade axial e tangencial, linhas de corrente, gradientes de pressão. Também serão calculados indicadores globais como o número de Euler (Eu) e a razão de líquido (R_L), com o objetivo de quantificar o desempenho das diferentes geometrias.

A partir disso, espera-se compreender como o formato da entrada influencia a intensidade do vórtice, a separação das partículas e, possivelmente, a eficiência global do hidrociclone. A metodologia, apesar de restrita à simulação, se baseia em parâmetros já testados e validados na literatura, conferindo confiabilidade aos resultados que foram gerados.

3.1. MALHAS COMPUTACIONAIS

A geometria tridimensional dos hidrociclones simulados neste estudo foi desenvolvida utilizando o software ANSYS SpaceClaim[®], que oferece uma interface intuitiva e precisa para modelagem de sólidos. Foi construída a configuração geométrica mantendo-se constante a estrutura principal do equipamento e alterando apenas o formato do duto de alimentação, com o objetivo de avaliar sua influência sobre o comportamento do escoamento interno.

Após a construção da geometria, foi realizada a geração da malha computacional no módulo ANSYS Meshing[®]. Foram utilizados predominantemente elementos do tipo tetraédrico, com refinamentos locais aplicados nas regiões de entrada, *underflow* e *overflow*, a

fim de garantir maior precisão nas áreas com maior gradiente de velocidade. Dessa forma, a malha apresentou cerca de 100 mil elementos.

3.1.1. Cálculo das grandezas associadas à separação em hidrociclones

Para compreender melhor o comportamento energético do escoamento dentro do hidrociclone é utilizado um parâmetro adimensional chamado número de Euler (Eu). Ele expressa a relação entre a energia dissipada no equipamento (associada à queda de pressão) e a energia cinética disponível por unidade de volume na seção cilíndrica. Assim, ele mostra o quanto de energia está sendo consumido para manter o escoamento funcionando, podendo ser calculado pela Equação (3.1).

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\rho_{\text{água}} \cdot \frac{v_c^2}{2}} \quad (3.1)$$

O cálculo é feito a partir da razão entre a queda de pressão total no hidrociclone ($-\Delta P$) e o termo de energia cinética, representado por $\frac{1}{2} \rho_{\text{água}} \cdot v_c^2$, onde ρ é a densidade da água e v_c é a velocidade na seção de entrada, calculado conforme a Equação 3.2, em que Q é a vazão volumétrica na corrente de alimentação e D é o diâmetro da seção cilíndrica, representando assim, a área circular perpendicular ao eixo axial.

$$v_c = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (3.2)$$

Outro parâmetro importante na análise do desempenho do hidrociclone é a razão de líquido (R_L). Esse índice está associado ao fenômeno conhecido como “efeito T”, que acontece quando um equipamento divide o fluxo de entrada entre as saídas de *overflow* e *underflow* de maneira não uniforme. O cálculo da R_L considera as vazões e concentrações volumétricas de sólidos nas correntes de alimentação (Q_A e C_{VA}) e *underflow* (Q_U e C_{VU}). Assim, quanto maior o valor de R_L , maior a quantidade de líquido escoando pelo *underflow*, o que influencia diretamente no transporte de partículas e na eficiência da separação. Como a simulação foi realizada apenas com água, sem partículas, foi considerado $C_{VA} = C_{VU} = 0$. Assim, temos a equação 3.3.

$$R_L = \frac{Q_U}{Q_A} \quad (3.3)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos por meio da simulação numérica realizada com o modelo HGOT1-Q, com entrada quadrada de área equivalente à circular de 8,7 mm de diâmetro da geometria HGOT1. Os dados obtidos foram principalmente comparados com os resultados encontrados por Rocha (2019) e Kyriakidis (2018), buscando avaliar as diferenças no comportamento hidrodinâmico do escoamento e nos indicadores de desempenho do hidrociclone, a partir da modificação no formato do duto de alimentação.

O campo de velocidade axial da fase água é medido na direção Z, a qual representa o eixo principal do equipamento. O padrão observado é típico de um hidrociclone bem configurado: o fluido se move descendente junto à parede (valores negativos) e ascendentemente no centro (valores positivos), formando a estrutura de duplo vórtice.

Figura 5 - Perfil de velocidade axial descendente.

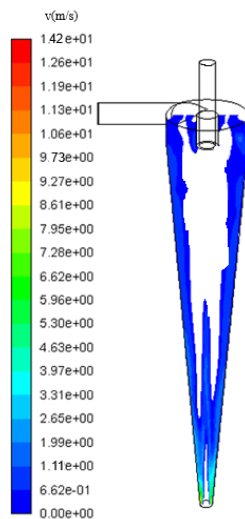
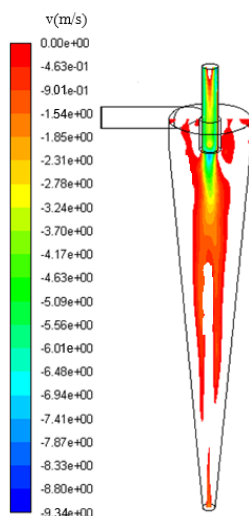


Figura 6 - Perfil de velocidade axial ascendente.



Os valores máximos registrados foram de aproximadamente $+9,01$ m/s na zona ascendente e $-9,01$ m/s na região descendente, indicando simetria e estabilidade do escoamento. Em comparação, Rocha (2019) observou valores máximos próximos a $\pm 9,5$ m/s em seu modelo STQ. Assim, os resultados da simulação HGOT1-Q apontam para um escoamento axial mais intenso, o que pode favorecer a separação de partículas mais finas, em razão do maior gradiente de velocidades entre as regiões periféricas e centrais.

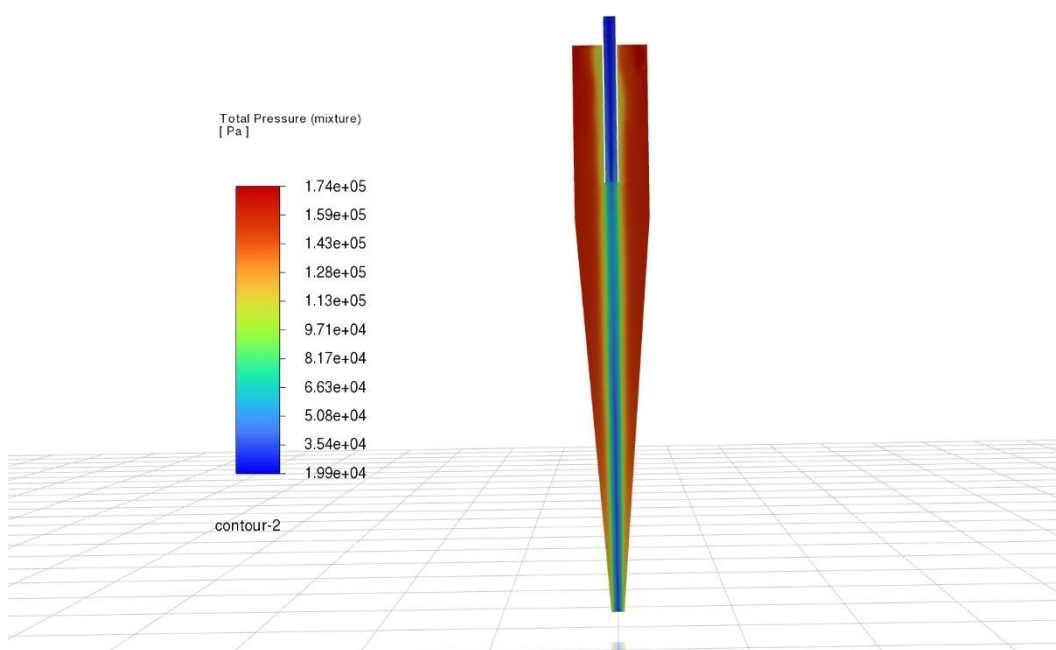
Esse comportamento também se mostra mais pronunciado que o do modelo HCOT1 (Kyriakidis, 2018), que apresentou velocidade axial máxima em torno de $\pm 7,8$ m/s, reforçando a influência positiva do novo duto de alimentação combinado com o corpo alongado do HGOT1.

O contorno de velocidade tangencial da mistura, representando o movimento giratório característico do escoamento dentro do ciclone. Observa-se que os maiores valores de velocidade tangencial ocorrem numa região intermediária entre o eixo e a parede, comportamento típico de escoamentos com estrutura tipo vórtice forçado. O valor máximo registrado foi de aproximadamente $11,7$ m/s, o que indica um campo centrífugo bem desenvolvido.

Em comparação com o modelo STQ (7×7 mm) analisado por Rocha (2019), que apresentou velocidade tangencial máxima em torno de $10,2$ m/s, o modelo HGOT1-Q obteve desempenho ligeiramente superior, sugerindo que a entrada quadrada integrada à geometria alongada do HGOT1 promove maior transferência de momento angular. Quando comparado ao modelo HCOT1 de Kyriakidis (2018), cujo valor máximo foi da ordem de $9,6$ m/s, o aumento observado nesta simulação reforça o potencial da modificação proposta.

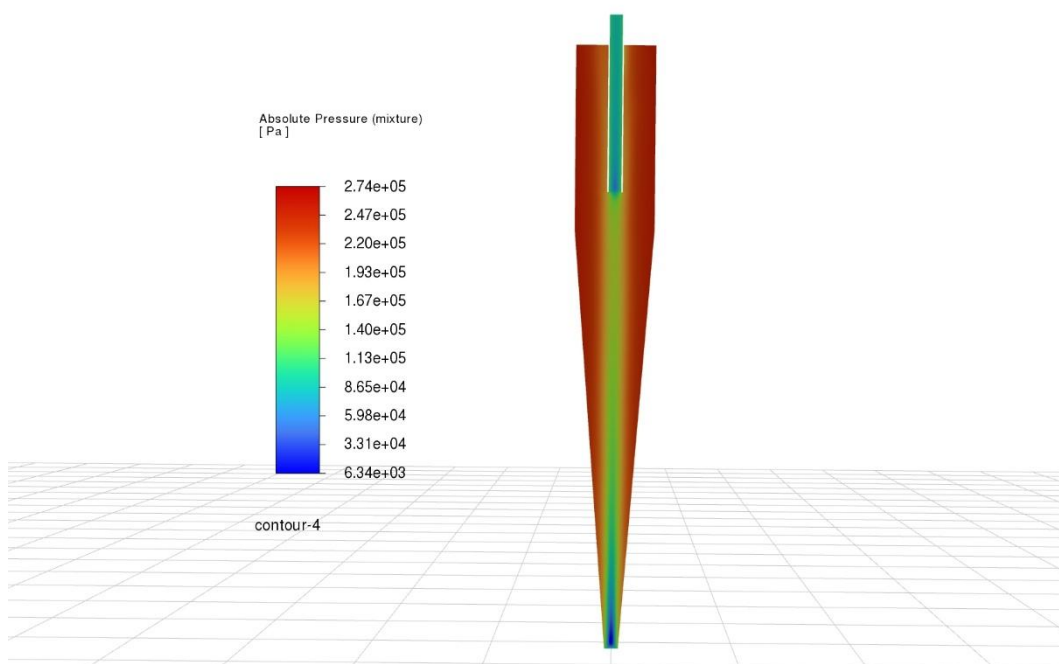
A análise da distribuição de pressão é fundamental para compreender o comportamento hidrodinâmico do escoamento dentro do hidrociclone, especialmente no que se refere à formação do vórtice e ao funcionamento do núcleo de ar. Nas figuras a seguir apresentam-se os contornos de pressão total (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e pressão absoluta (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) obtidos a partir da simulação do modelo HGOT1-Q.

Figura 7 – Distribuições de pressão total no HGOT1-Q.



Nota-se que os valores mais elevados se concentram nas regiões periféricas da seção cilíndrica, atingindo aproximadamente $1,74 \cdot 10^5$ Pa, enquanto os menores valores aparecem no centro do vórtice e nas regiões próximas ao *vortex finder*, chegando a cerca de $2,0 \cdot 10^4$ Pa. Essa variação indica a forte conversão da energia de pressão em energia cinética, associada à formação do vórtice interno. A região central azulada representa o núcleo de baixa pressão, que é essencial para a manutenção do vórtice ascendente.

Figura 8 – Distribuição de pressão absoluta no HGOT1-Q.



Observa-se novamente a concentração de pressões mais altas nas regiões periféricas, com valores máximos em torno de $2,74 \cdot 10^5$ Pa, enquanto a menor pressão absoluta registrada é da ordem de $6,3 \cdot 10^3$ Pa. A baixa pressão no eixo central evidencia a formação clara do núcleo de ar, responsável por criar a trajetória de retorno do fluido (*overflow*). Essa zona de pressão mínima é fundamental para garantir o arraste do fluido clarificado pela parte superior do equipamento.

Em ambas as representações, percebe-se que a transição de alta para baixa pressão ocorre de forma contínua, sem pontos de desorganização do campo, o que demonstra a estabilidade do escoamento simulado. Assim, comparando os valores máximos e mínimos de pressão obtidos para o modelo HGOT1-Q estão em um intervalo inferior quando comparado com o HGOT1 e superior em comparação com o STQ (7 x 7), sugerindo que a modificação na geometria de entrada influenciou de maneira positiva o desempenho energético do sistema quando comparado ao trabalho de Kyriakidis (2018).

De modo geral, a diferença de pressão entre as regiões externas e o núcleo central reforça a presença de um vórtice bem desenvolvido, condição essencial para que o hidrociclone opere de forma eficiente. O perfil das linhas de contorno ainda demonstra que a entrada quadrada não prejudicou o desenvolvimento do campo de pressão.

Essa diferença, também conhecida como gradiente radial de pressão, é o que gera a força centrífuga que impulsiona as partículas mais densas e/ou maiores em direção à parede do

equipamento, enquanto as menores ou menos densas são arrastadas pelo núcleo de baixa pressão rumo ao overflow. No modelo HGOT1-Q, o maior gradiente de pressão observado sugere um vórtice mais intenso e bem estruturado, o que favorece a eficiência de separação, especialmente por diferença de densidade e tamanho. Em termos práticos, isso pode significar uma redução do diâmetro de corte (d_{50}), permitindo a separação de partículas mais finas. Além disso, a manutenção de uma zona de baixa pressão estável no centro do ciclone é crucial para garantir o arraste seletivo do fluido clarificado, evitando a reincorporação de partículas indesejadas ao overflow.

Para avaliar o desempenho hidrodinâmico do hidrociclone modelado, foram calculados dois indicadores globais: o número de Euler (Eu) e a razão de líquido (R_L). Ambos fornecem informações complementares sobre a eficiência energética e a distribuição do escoamento nas correntes de saída.

O valor calculado para o número de Euler foi de aproximadamente 1888, o que representa uma relação equilibrada entre a energia dissipada no interior do equipamento e a energia cinética do fluido no ponto de entrada. Esse valor é significativamente inferior ao reportado por Kyriakidis (2018) para o modelo HCOT1 ($Eu \approx 2604$) e por Rocha (2019) para o modelo STQ ($Eu \approx 2846$).

Em relação à razão de líquido (R_L), foi obtido um valor de 0,411, indicando que cerca de 41,1% do volume de entrada do fluido escoava pela saída inferior (*underflow*). Este resultado está alinhado com o comportamento esperado em hidrociclones operando sob condições de balanço hidrodinâmico estável, sugerindo que o escoamento se dividiu de maneira adequada entre as saídas. Quando comparado com os valores apresentados por Rocha (2019) que obteve $RL \approx 0,47$ para o modelo STQ, o resultado obtido no modelo HGOT1-Q é ligeiramente inferior, o que pode estar relacionado à geometria do *vortex finder* mais alongado e à entrada com menor largura hidráulica efetiva. Já os dados de Kyriakidis (2018) apontam para valores de RL próximos a 0,45, o que mostra que a geometria aqui simulada se comporta de forma semelhante, apesar da alteração na forma da alimentação.

Esses dois indicadores Eu e R_L apontam para um sistema que apresenta menor consumo de energia por unidade de velocidade e uma distribuição de líquido adequada entre *underflow* e *overflow*. A entrada quadrada proposta não comprometeu a simetria do escoamento e permitiu o desenvolvimento de um vórtice bem estruturado. Além disso, o baixo valor de Eu indica que a modificação geométrica pode representar uma alternativa interessante para redução de perda de carga, desde que associada a um desempenho satisfatório de separação (a ser confirmado com a análise do diâmetro de corte em trabalhos futuros).

A análise dos resultados obtidos revela que um menor valor de razão de líquido (RL) pode estar associado a uma maior retenção de partículas finas na região central do escoamento, favorecendo seu direcionamento para o overflow. Em ensaios práticos, esse comportamento pode comprometer a eficiência de separação por tamanho, já que partículas que idealmente deveriam ser removidas no underflow acabam sendo carregadas para a saída superior, elevando o diâmetro de corte (d_{50}) e reduzindo a seletividade do processo.

De maneira geral, os resultados obtidos nesta simulação sugerem que a geometria HGOT1-Q é energeticamente mais eficiente que as geometrias convencionais analisadas nos trabalhos de referência, e mantém boa estabilidade hidrodinâmica, com padrão de divisão de fluxo coerente com os valores da literatura.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou, por meio de simulações CFD, o comportamento hidrodinâmico de um hidrociclone modificado, denominado HGOT1-Q, cuja entrada circular foi substituída por uma entrada quadrada de mesma área. A alteração teve como objetivo avaliar os efeitos dessa mudança na dinâmica do escoamento e nos indicadores de desempenho.

Os resultados demonstraram que a geometria HGOT1-Q manteve o padrão característico de escoamento com vórtice duplo bem definido. As velocidades axiais e tangenciais máximas foram de aproximadamente $\pm 11,6$ m/s e 11,7 m/s, respectivamente, superiores às obtidas nos modelos de referência estudados por Rocha (2019) e Kyriakidis (2018). A distribuição de pressão revelou a formação clara do núcleo de ar e uma queda de pressão bem distribuída ao longo do corpo do equipamento.

O número de Euler calculado foi de 1888, indicando menor dissipação de energia em relação às geometrias convencionais. Já a razão de líquido, de 0,411, mostrou que o escoamento se dividiu de forma equilibrada entre *overflow* e *underflow*, em linha com os valores encontrados na literatura.

Os resultados obtidos evidenciam que a substituição da entrada circular convencional por uma entrada quadrada de mesma área (modelo HGOT1-Q) resultou em um ganho energético significativo, representado pela redução do número de Euler. Esse comportamento está diretamente relacionado à forma como o escoamento é induzido na região de alimentação: a entrada quadrada proporcionou uma distribuição mais eficiente do momento angular ao fluido, intensificando o vórtice externo desde os instantes iniciais da simulação e promovendo uma aceleração mais suave e controlada do escoamento. Esse mecanismo reduziu a dissipação

de energia por turbulência desnecessária e favoreceu a formação de um campo de velocidades mais organizado, com maiores componentes tangenciais e axiais em regiões estratégicas do equipamento.

Quanto à razão de líquido (R_L), observou-se um valor de 0,411, levemente superior ao do modelo convencional, o que indica um equilíbrio mais favorável entre as vazões de overflow e *underflow*. Essa alteração está associada à forma como a entrada quadrada reorganiza o padrão de escoamento, redistribuindo as linhas de corrente e aumentando a velocidade axial descendente, o que reforça o direcionamento das partículas para o underflow. Na prática, esses efeitos combinados sugerem que a geometria modificada pode não apenas reduzir o consumo energético do processo, mas também melhorar a eficiência de separação, sobretudo de partículas mais finas, ao promover um campo de força centrífuga mais intenso e estável. Esses achados demonstram que alterações geométricas pontuais na região de alimentação de hidrociclones podem impactar de forma significativa o desempenho global do equipamento, tanto em termos hidrodinâmicos quanto operacionais.

Em resumo, a entrada quadrada aplicada ao modelo HGOT1 demonstrou bom desempenho hidrodinâmico, com potencial para uso em projetos futuros que busquem maior eficiência com menor perda de carga. Estudos complementares com simulações multifásicas e validação experimental são recomendados para aprofundar essa análise.

REFERÊNCIAS

ANSYS INC. *ANSYS Fluent 2025 R1*.

ANSYS INC. *ANSYS Fluent Theory Guide*. Canonsburg, PA, 2020.

ADEWOYE, A. J.; HOSSAIN, M.; KARNIK, A. Improvement to hydrocyclone used in separating particles from produced water in the oil and gas industry. 2020.

ALMILY, M. A.; AL-OBEIDI, M. A.; AL-ANI, M. A. Modeling industrial hydrocyclone operational variables by SHAP and machine learning techniques. *Separation Science and Technology*, v. 58, n. 5, p. 835–847, 2023.

BETTINARDI, I. W.; CASTAN, A.; MEDRONHO, R. A.; CASTILHO, L. R. Hydrocyclones as cell retention device for CHO perfusion processes in single-use bioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 117, n. 7, p. 1915–1928, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.27335>.

CHU, L. Y.; CHEN, W. M.; LEE, X. Z. Effect of structural modification on hydrocyclone performance. *Separation and Purification Technology*, v. 21, p. 71–86, 2000.

CILLIERS, J. J. Hydrocyclones for particle size separation. In: WILSON, I. D.; POOLE, C. F.; COOKE, M. (Ed.). *Encyclopedia of Separation Science*. St. Louis: Academic Press, 2000. p. 1819–1825.

Concha Juan Luis Bouso A, F. A. (2018). *Fluid Mechanics and Its Applications Fluid Mechanics Fundamentals of Hydrocyclones and Its Applications in the Mining Industry*. <http://www.springer.com/series/5980>

CREMASCO, Marco Aurélio. *Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2018.

DURANGO-COGOLLO, M. *et al.* CFD modeling of hydrocyclones—A study of efficiency of hydrodynamic reservoirs. *Fluids*, v. 5, n. 3, p. 118, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids5030118>.

GONÇALVES, S. M. *et al.* Effect of solids concentration and operational variables on the performance of hydrocyclones. *Separation and Purification Technology*, v. 350, p. 124000, 2024.

HOFFMANN, A. C.; STEIN, L. E. *Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation*. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2008.

KASHIWAYA, S.; OKUYAMA, K.; KAWAMURA, K. Effect of particle shape on hydrocyclone classification. *Powder Technology*, v. 226, p. 147–156, 2012.

KYRIAKIDIS, Y. N. Estudo da influência de parâmetros geométricos e operacionais no desempenho de hidrociclones. 2014. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

KYRIAKIDIS, Y. N. Otimização geométrica de hidrociclones a partir de um histórico em hidrociclonagem na FEQUI/UFU. 2018. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) –

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2018.808>.

LI, F.; LIU, P. K.; YANG, X. H.; ZHANG, Y. K.; JIANG, L. Y.; WANG, H. The effects of the height-to-width ratio of the rectangular inlet on the flow field and separation performance by hydrocyclone. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, v. 42, n. 10, p. 3137–3154, 2021.

LIU, P. *et al.* Effect of spiral vanes width on the separation performance of a hydrocyclone. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, v. 59, n. 6, 2023. DOI: <https://doi.org/10.37190/PPMP/173563>.

MORIMOTO, M. G. *et al.* Study on filtering hydrocyclones operating with concentrated non-Newtonian suspensions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 62, n. 37, p. 15190–15201, 2023. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c02342.

Neesse, T., Dueck, J., Schwemmer, H., & Farghaly, M. (2015). Using a high pressure hydrocyclone for solids classification in the submicron range. *Minerals Engineering*, 71, 85–88. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.10.017>

NI, L. *et al.* Optimizing geometric parameters in hydrocyclones for enhanced separations: A review and perspective. *Separation and Purification Reviews*, v. 48, n. 1, p. 30–51, 2019. DOI: 10.1080/15422119.2017.1421558.

NUNES, J. A. M.; OLIVEIRA, L. B.; SILVA, R. D. Oily water separation process using hydrocyclone of porous membrane wall: A numerical investigation. *Membranes*, v. 12, n. 2, p. 171, 2022.

QUTEISHAT, M. A. K. Hydrocyclone flow characteristics and measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 73, p. 101741, 2020. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101741.

ROCHA, C. R. Estudo numérico e experimental da influência da geometria do duto de alimentação no desempenho de um hidrociclone. 2019. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

Rocha, C. A. O., Ullmann, G., Silva, D. O., & Vieira, L. G. M. (2020). Effect of changes in the feed duct on hydrocyclone performance. *Powder Technology*, 374, 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.001>

Rui, Y., Lei, Z., Chao, L., & Baojin, Z. (2020). The structure design and experimental study of the gas-liquid separation cyclone. *Proceedings - 2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering, ICMCCE 2020*, 167–170. <https://doi.org/10.1109/ICMCCE51767.2020.00044>

SILVA, D. P. S. *et al.* Effect of operational and geometric variables in hydrocyclones to improve separation efficiency and reduce energy consumption: A review and new insights. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 45, n. 1, p. 1–15, 2024.

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

- Silva, J. T. T. da. (2019). *Hidrociclonagem aplicada ao processamento físico de concentrado fosfático contendo minérios de terras raras*. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2019.1508>
- SILVESTRI, L. CFD modeling in Industry 4.0: new perspectives for smart factories. *Procedia Computer Science*, v. 180, p. 381–387, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.359>.
- SVAROVSKY, L. *Hydrocyclones*. London: Holt, Rinehart and Winston, 1984.
- TANG, B. *et al.* Effect of inlet configuration on hydrocyclone performance. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 27, p. 1645–1655, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60187-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60187-0).
- TANG, Z. *et al.* Effect of particle size and shape on separation in a hydrocyclone. *Water*, v. 11, n. 1, p. 16, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/1/16>.
- TIAN, J. *et al.* An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations. *Separation and Purification Technology*, v. 206, p. 268–285, 2018.
- Vimal, A., Thalaieswaran, S., Kannan, N. H., Ganeshan, P., & Venkatesh, S. (2023). A review on the Investigation of Hydrocyclone Performance by shape optimization. *E3S Web of Conferences*, 405. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340504047>
- WU, Y. *et al.* Effect of fluid viscosity on hydrocyclone performance. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 123, p. 1–9, 2017. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.05.010.
- YU, J. F. *et al.* Recycling of rare earth particle by mini-hydrocyclones. *Waste Management*, v. 61, p. 362–371, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.014>.
- ZHANG, H. *et al.* Influence of feed rate on the performance of hydrocyclone flow field. *Separations*, v. 9, n. 11, p. 349, 2022.