



Gabriela Liandra Fitz

ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE UM TUBO DE VÓRTICE

Horizontina-RS

2025

Gabriela Liandra Fitz

**ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE TUBO DE RANQUE-HILSH – TUBO DE
VÓRTICE**

Trabalho Final de Curso apresentado como
requisito parcial para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade
Horizontina, sob a orientação da Prof. Ma. Francine
Centenaro Gomes

Horizontina-RS

2025

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

“Estudo e dimensionamento de um Tubo de Vórtice”

Elaborada por:
Gabriela Liandra Fitz

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 09/12/2025
Pela Comissão Examinadora

Profa. Ma. Francine Centenaro Gomes
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Profa. Ma. Eliane Garlet
FAHOR – Faculdade Horizontina

Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin
FAHOR – Faculdade Horizontina

Horizontina - RS
2025

Ao meu namorado Henrique que esteve comigo durante toda a minha trajetória acadêmica, que sempre me apoiou e incentivou, você foi uma pessoa indispensável. Aos meus filhos Matteo e Maitê, que são a minha motivação para nunca desistir, vocês são o meu incentivo para seguir sempre em busca do melhor. Mãe a você que sempre foi uma inspiração para mim, um exemplo de mulher e de força, que nunca me deixou desistir dos meus sonhos e que principalmente estava sempre ali para me apoiar. Pai, você foi quem me apresentou a engenharia, és um exemplo de determinação para mim. Ao meu irmão Pedro pelo companheirismo de sempre. A todos os meus amigos que estiveram comigo durante a faculdade. Muito obrigada a todos vocês.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um projeto conceitual de um sistema de refrigeração localizada baseado no tubo de vórtice, com aplicação voltada a processos de usinagem. O estudo busca ampliar conhecimentos bem como oferecer uma alternativa sustentável aos sistemas convencionais de refrigeração por fluidos de corte, que, embora eficientes, apresentam impactos ambientais e custos operacionais elevados. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão bibliográfica, modelagem tridimensional em Creo Parametric e análise qualitativa do escoamento em regime compressível via SimScale. Foram avaliados os parâmetros geométricos e funcionais que influenciam o desempenho térmico do tubo, adotando uma configuração sem válvula de controle, com foco em estabilidade operacional. O modelo desenvolvido apresenta estrutura simples, modular, e de fácil integração a centros de usinagem, utilizando apenas ar comprimido como fonte de energia. Os resultados indicam que o modelo proposto apresenta coerência com os fenômenos descritos na literatura, reduzindo o padrão de separação energética característico de tubos de vórtice e evidenciando viabilidade para integração em sistemas de refrigeração limpa na usinagem. O estudo estabelece bases para futuros protótipos físicos e análises experimentais.

Palavras-chave: Tubo de vórtice. Refrigeração localizada. Usinagem. Análise de escoamento compressível.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variações de entrada da turbina	15
Figura 2 – Funcionamento do Tubo de Vórtice	17
Figura 3 – Fluxograma de sequenciamento de atividades	21
Figura 4 – Modelo 3D completo do tubo de vórtice	27
Figura 5 – Vista explodida de componentes	28
Figura 6 – Demonstração de volume interno	29
Figura 7 – Volume interno	30
Figura 8 – Vista em corte	30
Figura 9 – Turbina	31
Figura 10 – Corte longitudinal demonstrando velocidade interna	33
Figura 11 – Redução de velocidade	34
Figura 12 – Alojamento da turbina	34
Figura 13 – Vista em corte radial	35
Figura 14 – Fluxo na turbina	36
Figura 15 – Aproximação da turbina	37
Figura 16 – Fluxo térmico	38
Figura 17 – Demonstração da saída	39
Figura 18 – Fluxo periférico na saída da turbina	39
Figura 19 – Turbulência interna	41

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1	TEMA	10
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	10
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	10
1.4	OBJETIVOS	11
1.4.1	Objetivo geral.....	11
1.4.2	Objetivos específicos.....	11
1.5	JUSTIFICATIVA.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	TUBO DE VÓRTICE.....	13
2.1.1	Definição e histórico.....	13
2.1.2	Princípios e funcionamento.....	13
2.1.3	Parâmetros geométricos e funcionais.....	14
2.1.4	Fenômenos fluidodinâmicos e termodinâmicos.....	16
2.1.5	Aplicações industriais.....	17
2.1.6	Estudos relevantes na literatura.....	18
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA E CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO.....	22
3.2	MODELAGEM TRIDIMENSIONAL.....	22
3.3	SIMULAÇÃO CFD: PARÂMETROS E CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	23
3.4	LIMITAÇÕES DO MODELO NUMÉRICO.....	23
4	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E RESULTADO.....	25
4.1	ESCOLHAS GEOMÉTRICAS DO MODELO	25
4.1.1	Diâmetro da garganta.....	25
4.1.2	Área da câmara associada à fração quente.....	25
4.1.3	Comprimento da câmara fria.....	26
4.2	DESCRIÇÃO DAS PARTES DO CONJUNTO	26
4.3	DETALHAMENTO DA SIMULAÇÃO CFD	31
4.3.1	Malha computacional.....	31
4.3.2	Solver e modelo de turbulência.....	32

4.3.3	Condições de contorno e parâmetros operacionais.....	32
4.3.4	Limitações da simulação.....	32
4.4	ANÁLISE CFD DE FLUIDO COMPRESSÍVEL	33
4.5	DISTRIBUIÇÃO TÉRMICA E GANHO TÉRMICO	37
4.6	MÉTODOS CONVENCIONAIS DE REFRIGERAÇÃO.....	42
4.6.1	Pontos positivos e negativos.....	43
CONSIDERAÇÕES FINAIS		44
REFERÊNCIAS.....		46

1. INTRODUÇÃO

A usinagem convencional e por comando numérico computadorizado (CNC) é amplamente empregada na indústria de manufatura e caracteriza-se pela remoção de material por meio de ferramentas de corte, processo no qual ocorre intensa geração de calor na zona de contato entre ferramenta e peça. Esse aumento de temperatura afeta diretamente a vida útil da ferramenta, a precisão dimensional e o acabamento superficial da peça usinada, tornando o controle térmico um fator crítico para a eficiência do processo.

Tradicionalmente, a dissipação desse calor é realizada por meio de fluidos de corte, que atuam simultaneamente como agentes refrigerantes e lubrificantes. Embora eficientes sob o ponto de vista térmico, esses fluidos apresentam desvantagens relevantes, como elevado custo operacional, complexidade de manutenção, impactos ambientais associados ao descarte inadequado e riscos à saúde dos operadores devido à exposição prolongada. Esses fatores têm impulsionado a busca por alternativas mais limpas e sustentáveis para a refrigeração localizada na usinagem.

Nesse contexto, o tubo de vórtice do tipo Ranque-Hilsch surge como uma tecnologia alternativa promissora. Trata-se de um dispositivo termodinâmico capaz de separar um fluxo de ar comprimido em duas correntes de diferentes temperaturas — uma quente e outra fria — sem a utilização de partes móveis ou agentes químicos, utilizando exclusivamente ar comprimido como fonte de energia. Sua simplicidade construtiva, baixo custo operacional e facilidade de integração a máquinas-ferramenta tornam-no atrativo para aplicações de refrigeração pontual em processos industriais.

A literatura disponível aborda majoritariamente tubos de vórtice equipados com válvula de controle na extremidade quente, elemento responsável por ajustar a fração mássica entre os fluxos quente e frio e, conseqüentemente, influenciar a eficiência térmica do dispositivo. No entanto, observa-se uma lacuna em estudos voltados à análise de configurações geométricas sem válvula de estrangulamento, especialmente sob a ótica de estabilidade operacional e simplicidade construtiva para aplicações industriais específicas, como a usinagem.

Dessa forma, o presente Trabalho de Conclusão de Curso propõe o desenvolvimento e a análise conceitual de um tubo de vórtice sem válvula de controle, buscando investigar se a própria geometria do dispositivo é capaz de induzir a separação energética característica do efeito Ranque-Hilsch. A escolha por uma

configuração sem válvula justifica-se pelo interesse em avaliar um regime de operação mais estável, com menor complexidade mecânica e menor sensibilidade a ajustes operacionais, características desejáveis em ambientes industriais.

O estudo é conduzido por meio de uma abordagem conceitual e qualitativa, baseada em revisão bibliográfica, modelagem tridimensional em ambiente CAD e análise de escoamento de fluido compressível via simulação computacional (CFD). A opção por uma modelagem conceitual deve-se às limitações inerentes à simulação numérica de escoamentos altamente turbulentos e compressíveis, bem como ao objetivo acadêmico do trabalho, que não visa a obtenção de valores quantitativos absolutos de desempenho térmico, mas sim a compreensão dos fenômenos fluidodinâmicos e termodinâmicos associados ao funcionamento do dispositivo.

Assim, este trabalho busca contribuir para o entendimento do comportamento de tubos de vórtice em configurações simplificadas, fornecendo subsídios técnicos para o desenvolvimento futuro de protótipos físicos e estudos experimentais, além de reforçar o potencial do tubo de vórtice como alternativa sustentável aos métodos convencionais de refrigeração na usinagem.

1.1 TEMA

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um projeto conceitual de um sistema de refrigeração localizada baseado em tubos de vórtice (Ranque-Hilsch), aplicável a processos de usinagem.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A pesquisa foi de natureza bibliográfica e conceitual, concentrando-se na proposição e modelagem e análise 3D de um sistema de refrigeração localizada por tubo de vórtice. São abordadas as características construtivas, princípios de funcionamento e parâmetros críticos que influenciam o desempenho térmico e energético do sistema, e possível análise de fluido compressível para identificação de fenômeno termodinâmico interno.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Apesar da ampla utilização de tubos de vórtice do tipo Ranque-Hilsch em aplicações industriais, observa-se que a maioria dos estudos disponíveis na literatura

concentra-se em dispositivos equipados com válvulas de controle na saída quente, bem como em análises experimentais ou numéricas voltadas à maximização da eficiência térmica. Em contrapartida, são escassos os trabalhos que abordam configurações simplificadas de tubos de vórtice sem válvula de estrangulamento, especialmente sob a perspectiva de pré-dimensionamento geométrico e análise conceitual do escoamento interno.

Além disso, há uma carência de estudos que relacionem diretamente o uso do tubo de vórtice à refrigeração localizada em processos de usinagem, considerando critérios de simplicidade construtiva, estabilidade operacional e viabilidade de integração a máquinas-ferramenta. Essa lacuna dificulta o desenvolvimento de protótipos físicos e a aplicação prática dessa tecnologia como alternativa aos sistemas convencionais de refrigeração por fluidos de corte.

Diante desse contexto, o problema de pesquisa deste trabalho é formulado da seguinte maneira: Quais parâmetros geométricos e operacionais devem ser considerados para o dimensionamento inicial de um tubo de vórtice voltado à refrigeração localizada em processos de usinagem, e de que forma esses parâmetros influenciam qualitativamente o comportamento do escoamento interno e da separação energética?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Desenvolver um projeto conceitual em CAD de um dispositivo de resfriamento localizado utilizando o princípio do tubo de vórtice, com foco em aplicações industriais e viabilidade de fabricação.

1.4.2 Objetivos específicos

- Estudar o princípio de funcionamento do tubo de vórtice e os parâmetros que influenciam seu desempenho térmico e energético.
- Investigar aplicações industriais do tubo de vórtice, com ênfase em processos de usinagem;

- Desenvolver um sistema de refrigeração localizada com base em tubo de vórtice;
- Analisar por meio de entrevista vantagens e desvantagens da usabilidade do tubo de vórtice;
- Realizar análise CFD (*Computational Fluid Dynamics*) de fluido compressível.

1.5 JUSTIFICATIVA

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso justifica-se pela busca por alternativas sustentáveis e tecnicamente viáveis aos métodos convencionais de refrigeração em processos de usinagem, que ainda dependem majoritariamente do uso de fluidos de corte. Embora eficientes, esses fluidos apresentam elevados custos operacionais, impactos ambientais associados ao descarte e riscos à saúde ocupacional.

O tubo de vórtice do tipo Ranque-Hilsch destaca-se como uma alternativa promissora por utilizar exclusivamente ar comprimido, dispensar agentes químicos e apresentar simplicidade construtiva. Contudo, observa-se que a maior parte dos estudos disponíveis na literatura concentra-se em dispositivos equipados com válvula de controle, havendo escassez de abordagens voltadas ao pré-dimensionamento e à análise conceitual de tubos de vórtice sem válvula, especialmente para aplicações em usinagem.

Nesse contexto, o presente trabalho contribui ao propor um modelo tridimensional conceitual de um tubo de vórtice sem válvula de estrangulamento, acompanhado de uma análise qualitativa do escoamento interno. Mesmo sem a construção de um protótipo físico, o estudo fornece subsídios técnicos relevantes para a compreensão do comportamento fluidodinâmico do dispositivo e para a definição de parâmetros iniciais de projeto, servindo como base para o desenvolvimento de protótipos e estudos experimentais futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TUBO DE VÓRTICE

2.1.1 Definição e histórico

O tubo de vórtice, também conhecido como tubo de Ranque-Hilsch, é um dispositivo termodinâmico que promove a separação de um fluxo de ar comprimido em duas correntes com temperaturas distintas — uma quente e outra fria — sem a utilização de partes móveis e sem troca de calor com o ambiente externo. Apesar de frequentemente associado a trocadores de calor, o tubo de vórtice não pode ser classificado como tal sob a ótica termodinâmica, uma vez que não ocorre transferência de calor entre dois meios distintos, tampouco a realização de um ciclo termodinâmico fechado. Trata-se, portanto, de um processo termodinâmico aberto e contínuo, no qual o fluido não retorna ao seu estado inicial.

A sua nomenclatura ou caracterização “RANQUE-HILSCH” se dá devido a dois pesquisadores que o descobriram os fenômenos que originam o tubo de vórtice. O francês Gerges Joseph Ranque e o alemão Rudolf Hilsch. Ranque (1993) deu início com estudo que registrou a geração simultânea de correntes de ar quente e fria a partir de um jato de ar em rotação. O autor em seu estudo descobriu o fenômeno de separação de temperaturas em um tubo sem a necessidade de partes moveis.

Posteriormente, Hilsch (1947) trouxe esse mesmo estudo e elaborou a explicação teoria do fenômeno. Hilsch demonstrou matematicamente que a separação ocorria devido a interação complexa entre efeitos de expansão adiabática e gradientes de entalpia, que poderia ser controlada pela fração de fluxo geometria (L/D , orifício de entrada, pressão, entre outros influentes).

2.1.2 Princípios de funcionamento

De acordo com Pise e Patil (2014), o tubo de vórtice também conhecido como tubo de Ranque-Hilsch opera a partir da expansão e separação do ar comprimido em fluxos de diferentes temperaturas. O ar comprimido é inserido tangencialmente em uma câmara de vórtice, o que induz um movimento rotacional de alta intensidade. Esse ar em rotação se divide em duas correntes quente e fria.

Segundo Yilmaz *et al.* (2009), o funcionamento do tubo de vórtice baseia-se na introdução tangencial de ar comprimido em uma câmara cilíndrica, promovendo um

escoamento rotacional intenso. Esse movimento gera um vórtice no interior do tubo, caracterizado por elevados gradientes radiais de pressão, velocidade e energia. Parte do fluido escoo em direção à extremidade quente, enquanto outra parcela retorna pelo núcleo central em direção à saída fria, resultando em duas correntes com temperaturas significativamente diferentes.

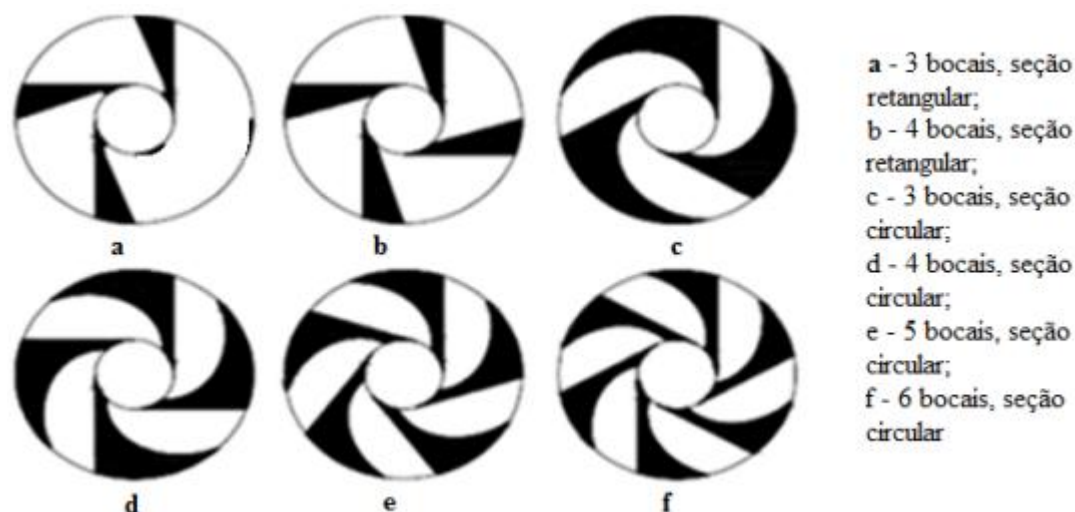
Smith (2008), relata diferentemente de um trocador de calor convencional, no qual há transferência de energia térmica entre dois meios distintos, o tubo de vórtice realiza uma redistribuição interna de energia dentro de um único fluido em escoamento. Na região central do vórtice ocorre uma expansão adiabática, levando à redução da temperatura do fluxo frio, enquanto a camada periférica sofre compressão e atrito, elevando sua temperatura. Dessa forma, obtêm-se simultaneamente duas correntes térmicas sem que haja troca de calor com o ambiente externo.

2.1.3 Parâmetros geométricos e operacionais

Diversos estudos experimentais e numéricos ao longo das últimas décadas têm buscado compreender a influência da geometria e dos parâmetros construtivos no desempenho de tubos de vórtice do tipo Ranque-Hilsch, especialmente quanto à eficiência da separação térmica entre as saídas quente e fria.

Whang *et al.* (2009) destacaram que os bocais de entrada são elementos centrais no comportamento do dispositivo, pois estão diretamente relacionados ao processo de separação de energia. Em seus experimentos, o autor testa geradores de vórtices com diferentes configurações variando o número de entradas (três a seis) e o formato geométrico dos bocais, que foram projetados para injetar o ar de maneira tangencial à parede da câmara. As variações incluíram entradas de formato linear, retangular, em “K” e helicoidal circular, esta última considerada pelo autor espiral de Arquimedes, demonstrando grande influência sobre a intensidade do escoamento rotacional interno como é possível observar na Figura 1.

Figura 1 – Variações de entrada da turbina



Fonte: (Santos, 2017)

Mantendo os demais parâmetros geométricos constantes, Whang *et al.* (2009) variaram apenas o tipo e a quantidade de bocais, medindo o efeito sobre a refrigeração em função da fração de massa fria, isto é, a razão entre o fluxo de massa que sai pela extremidade fria e o fluxo total de entrada. Sob pressão de 7 bar, os resultados mostraram que o tipo e o número de bocais têm efeito direto no desempenho térmico, sendo a geometria helicoidal a que apresentou maior eficiência na separação de energia demonstrado no mencionado estudo.

Aljuwayhel *et al.* (2005) abordaram o impacto do diâmetro interno do tubo, observando que o aumento do diâmetro reduz o efeito de separação de energia. Para condições fixas de pressão e temperatura na entrada, verificou-se que o momento angular decai com o aumento do diâmetro, reduzindo assim o gradiente radial de energia e, conseqüentemente, o diferencial térmico entre as saídas. Esse comportamento decorre da menor intensidade do escoamento rotacional e da dissipação viscosa mais pronunciada.

Complementando essa análise, Eiamsa e Promvonge (2008) observaram o comportamento oposto em tubos de diâmetro excessivamente pequeno: nestes casos, ocorre uma elevação significativa da pressão interna, porém o volume específico do ar é tão reduzido que as velocidades tangenciais entre o centro e a parede tornam-se semelhantes, dificultando a difusão de energia cinética e, portanto, reduzindo a separação térmica. Esses resultados indicam que existe um intervalo ótimo de diâmetro, dentro do qual o fenômeno de separação é maximizado — o que

reforça a necessidade de equilíbrio entre compressão, expansão e intensidade de vórtice.

Outro parâmetro amplamente investigado é o comprimento do tubo (L) em relação ao seu diâmetro (D), razão representada por L/D . Essa variável influencia diretamente o tempo de residência e o desenvolvimento do vórtice interno, impactando a eficiência térmica. Yilmaz *et al.* (2009) e Hilsch (1947) relataram que um comprimento significativamente maior que o diâmetro favorece uma melhor separação. Hilsch sugeriu originalmente uma razão L/D próximo a 50 como ideal, enquanto Martynovski e Alekseev (1957) indicaram que valores acima de 10 já seriam suficientes para o efeito ocorrer.

Posteriormente, Saidi e Yazdi (1999) refinaram essa análise, verificando que o aumento do comprimento tende a ampliar a diferença de temperatura, mas apenas até certo ponto: quando $L/D \leq 20$, o efeito é reduzido por escoamento incompleto; já quando $L/D \geq 55$, o ganho térmico praticamente desaparece. A partir dessa observação, Saidi e Valipour (2003) propuseram uma faixa ideal de $20 \leq L/D \leq 55$, dentro da qual o tubo apresenta desempenho térmico otimizado e estabilidade de escoamento.

Em síntese, o conjunto desses estudos mostra que o desempenho de um tubo de Ranque-Hilsch é resultado da interação entre geometria de entrada (bocais e ângulo de injeção), dimensões principais (L/D e diâmetro interno) e condições operacionais (pressão e fração fria). Esses parâmetros definem o equilíbrio entre o escoamento rotacional, gradiente de pressão radial e transferência de energia fundamentos do mecanismo de separação térmica que caracteriza o conceito Ranque-Hilsch.

2.1.4 Fenômenos fluidodinâmicos e termodinâmicos

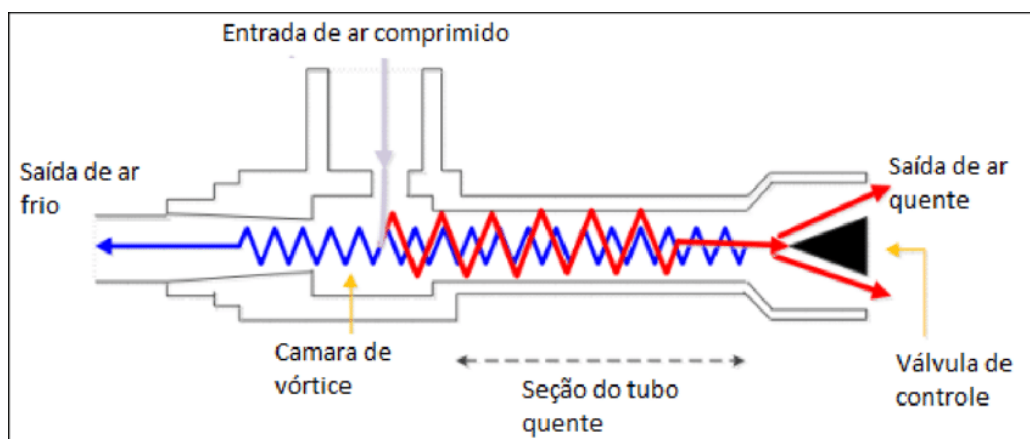
Kaufmann (2022) em seu livro reforça e replica a abordagem do autor anterior e completa que o tubo de vórtice em termos práticos respeita a Primeira Lei da Termodinâmica, de fomenta que o dispositivo é opera em sistema adiabático e conserva a energia total do sistema, apenas dividindo a entalpia entre as duas saídas. Essa atribuição é reforçada pelos estudos de Park *et al.* (2022) e Ambedkar & Dutta (2023).

Já pela Segunda Lei, Kaufmann traz o processo como irreversível, apresentando geração de entropia associada às perdas por atrito, mistura e

dissipação do escoamento. Assim, o tubo de vórtice pode ser definido como um separador adiabático de energia, ou ainda um dispositivo de expansão rotacional, por conta dessa transformação da energia e pressão, termo também trazidas por pelos autores acima citados. Em síntese, ele não “transfere calor” como um trocador, mas reorganiza internamente a energia do fluido, respeitando as leis fundamentais da termodinâmica e demonstrando de forma prática o equilíbrio entre conservação de energia e aumento de entropia.

Em estudo, Çengel e Boles (2015), destacam o fenômeno que ocorre no interior do tubo e enfatiza que está relacionado à conversão parcial de energia cinética em energia térmica e à transferência de momento angular entre as camadas concêntricas do ar em rotação. Embora o mecanismo exato de separação térmica ainda seja objeto de estudo, é amplamente aceito que efeitos de compressão e expansão adiabática simultâneos contribuem para a geração das duas correntes de temperatura distintas. Pode-se identificar através da Figura 2 que ilustra o princípio de funcionamento do tubo de vórtice, destacando o fluxo das correntes quente e fria resultantes do processo.

Figura 2 – Funcionamento do Tubo de Vórtice



Fonte: Adaptado de Rattanongphisat e Thungthong (2014).

2.1.5 Aplicações industriais

O tubo de vórtice tem sido amplamente estudado como alternativa aos métodos convencionais de refrigeração, especialmente em processos de usinagem. Behera *et al.* (2018) demonstraram que sua aplicação resulta em redução significativa da

temperatura da ferramenta e aumento da vida útil, evidenciando seu potencial como substituto parcial ou total dos fluidos de corte tradicionais.

Prajapati *et al.* (2021) observaram reduções de até 35 °C na temperatura da ferramenta quando o tubo de vórtice é aplicado diretamente na zona de corte, em comparação à usinagem a seco. Além disso, o dispositivo pode ser facilmente acoplado a centros de usinagem, direcionando o jato de ar frio para a interface ferramenta-peça, sem necessidade de grandes adaptações.

2.1.6 Estudos relevantes na literatura

A refrigeração durante o processo de usinagem é fundamental para o controle térmico da ferramenta e da peça, influenciando diretamente a qualidade superficial, a vida útil da ferramenta e a eficiência do processo produtivo. Tradicionalmente, esse controle térmico é realizado por meio de fluidos de corte, aplicados em abundância sobre a região de contato entre a ferramenta e o material.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), os fluidos de corte têm como principais funções reduzir o atrito, remover o calor gerado e facilitar a evacuação de cavacos. No entanto, seu uso intensivo implica altos custos operacionais e ambientais, relacionados à aquisição, descarte e riscos à saúde dos operadores. Além disso, a necessidade de sistemas de bombeamento e filtragem aumenta a complexidade de manutenção das máquinas, e trazem consigo um fator importante que através de baixo uso, misturar com óleo ou outros lubrificantes da máquina gerando borra, entupimento de mangueiras levando ao possível apodrecimento ou mal cheiro.

Nos últimos anos, diversas alternativas ao método convencional têm sido estudadas, como a usinagem a seco, a usinagem com mínima quantidade de fluido (MQF ou MQL – *Minimum Quantity Lubrication*) e o uso de ar comprimido refrigerado, no qual se insere o tubo de vórtice (Yilmaz *et al.*, 2009; Behera *et al.*, 2018).

Por outro lado, métodos como a MQL, embora mais sustentáveis que o uso convencional de fluidos, ainda dependem de lubrificantes biodegradáveis, e a usinagem a seco tende a resultar em maiores temperaturas de corte e desgaste acelerado da ferramenta (Çengel; Ghajar, 2012; Prajapati *et al.*, 2021).

Dessa forma, o tubo de vórtice surge como uma alternativa eficiente e ambientalmente favorável, especialmente em aplicações localizadas onde o controle

térmico pontual é mais importante do que a lubrificação. O Quadro 1 apresenta uma comparação qualitativa sucinta entre os métodos convencionais e o tubo de vórtice.

Quadro 1 - Comparação entre métodos de refrigeração em usinagem

Método	Meio de refrigeração	Manutenção	Impacto ambiental	Eficiência térmica	Custo operacional
Fluido convencional (emulsão)	Fluido químico	Alta	Alto	Alta	Alto
MQL (mínima quantidade)	Névoa de óleo biodegradável	Média	Médio	Média	Médio
Usinagem a seco	Nenhum	Baixa	Baixo	Baixa	Baixo
Tubo de vórtice	Ar comprimido	Baixa	Muito baixo	Média a alta	Baixo

Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

Após a análise comparativa, observa-se que o tubo de vórtice apresenta um equilíbrio favorável entre eficiência térmica, simplicidade e sustentabilidade. Embora o desempenho térmico do método tradicional com fluido de corte ainda seja ligeiramente superior em certos casos, os custos e os impactos ambientais associados ao seu uso têm impulsionado a busca por soluções mais limpas.

Çengel e Ghajar (2012;) ressaltam que o tubo de vórtice, por sua vez, apresenta-se uma alternativa viável para aplicações industriais que exigem refrigeração localizada, sem comprometer o meio ambiente nem exigir grandes adaptações nas máquinas-ferramenta. Além disso, os autores afirmam que sua manutenção reduzida e baixo custo operacional reforçam o potencial dessa tecnologia

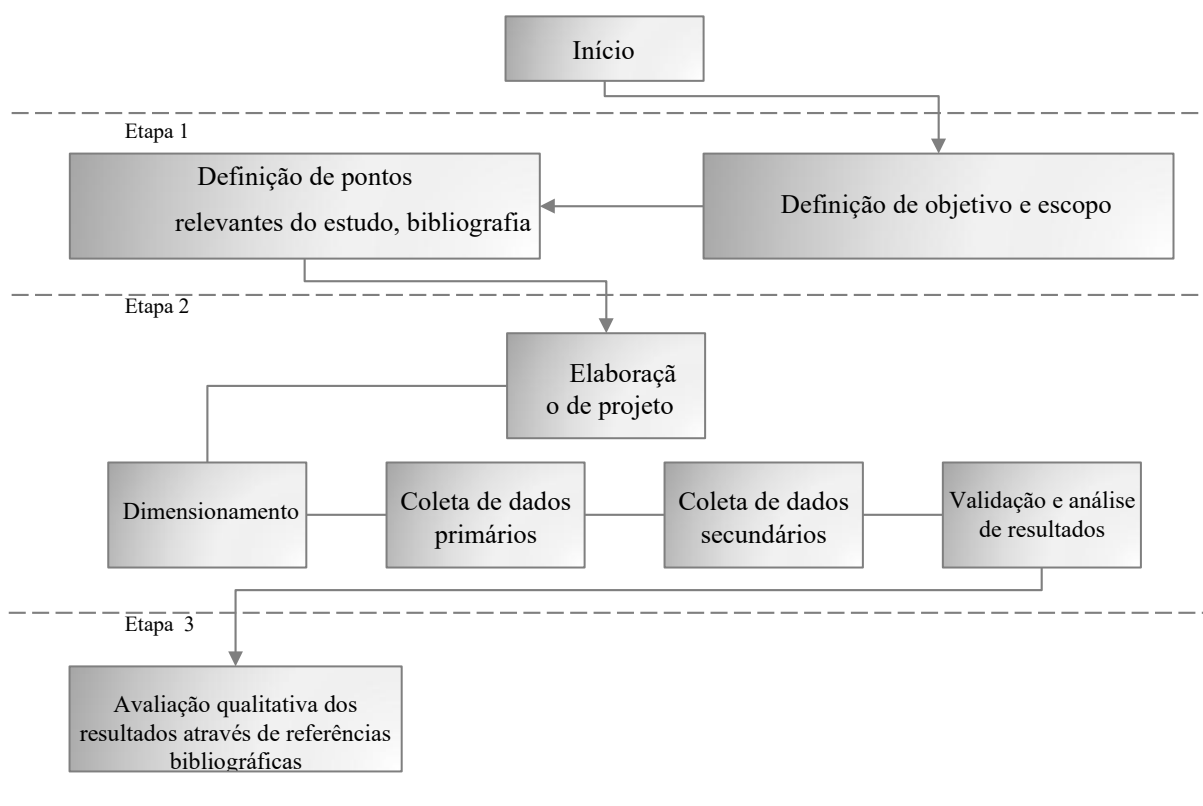
como ferramenta complementar ou substitutiva aos métodos convencionais, especialmente em contextos de manufatura sustentável e eficiência energética.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se em uma abordagem de projeto conceitual, apoiada em pesquisa bibliográfica e modelagem tridimensional (CAD). O estudo tem caráter teórico e exploratório, pois busca compreender os fundamentos do tubo de vórtice e propor uma configuração construtiva viável para aplicação em processos de usinagem, sem a necessidade de validação experimental.

O desenvolvimento metodológico foi estruturado em três etapas principais: **(i)** levantamento teórico e análise de estudos anteriores; **(ii)** definição dos requisitos técnicos e funcionais do sistema; e **(iii)** modelagem tridimensional do dispositivo. Essa sequência permitiu a consolidação de um modelo conceitual coerente com os princípios de funcionamento do tubo de vórtice e com as exigências operacionais típicas de sistemas de refrigeração localizada em usinagem. Contudo, na Figura 3 são expressas as etapas que deram andamento para este trabalho.

Figura 3 – Fluxograma de sequenciamento de atividades



Fonte: Autora (2025).

3.1 DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA E CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

A definição geométrica do tubo de vórtice baseou-se em parâmetros amplamente discutidos na literatura técnica, especialmente aqueles relacionados à influência da geometria na separação energética, como o diâmetro interno, o comprimento do tubo e a razão entre comprimento e diâmetro (L/D).

A razão inicial $L/D = 20$ foi adotada com base nos estudos de Hilsch (1947), Saidi e Valipour (2003) e Yilmaz et al. (2009), que indicam que valores nessa faixa são suficientes para o desenvolvimento do vórtice e da separação energética, ao mesmo tempo em que evitam comprimentos excessivos que não agregam ganhos térmicos significativos. A escolha desse valor também está alinhada ao objetivo de manter um dispositivo compacto e compatível com aplicações em usinagem.

Outros parâmetros geométricos, como o diâmetro do tubo interno, a posição da saída fria e a geometria da turbina, foram definidos com base em tendências observadas na literatura, priorizando configurações que favorecem a introdução tangencial do escoamento e a geração de momento angular. Dimensões específicas que não apresentavam valores padronizados nos estudos consultados foram assumidas de forma conceitual, respeitando proporções geométricas coerentes com modelos comerciais e estudos experimentais reportados.

3.2 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL

A modelagem tridimensional do tubo de vórtice foi realizada no software *Creo Parametric*, utilizando modelagem paramétrica para permitir ajustes dimensionais e análise geométrica do conjunto. O modelo foi desenvolvido com dimensões reais e organizado de forma modular, contemplando os principais componentes do dispositivo: entrada de ar comprimido, turbina, câmara de vórtice, tubo quente e saída fria.

Para viabilizar a simulação computacional, o volume interno correspondente ao domínio do fluido foi isolado e reconstruído como um sólido único, procedimento necessário devido às restrições do software de simulação em relação à leitura de conjuntos CAD. Em algumas etapas, o software *SolidWorks* foi utilizado de forma complementar para adequação do modelo ao ambiente de simulação.

3.3 SIMULAÇÃO CFD: PARÂMETROS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

A análise do escoamento interno foi realizada por meio de simulação CFD utilizando a plataforma online *SimScale*, considerando escoamento compressível e regime permanente. A simulação teve caráter qualitativo, com o objetivo de visualizar padrões de escoamento, distribuição de velocidades, formação do vórtice e comportamento térmico geral do fluido.

Foi adotado um modelo de turbulência do tipo RANS, amplamente empregado em análises industriais por apresentar bom compromisso entre custo computacional e estabilidade numérica. A malha computacional foi gerada automaticamente pela plataforma, com refinamento global suficiente para capturar os principais gradientes de velocidade e turbulência ao longo do domínio do fluido.

As condições de contorno foram definidas da seguinte forma:

- **Entrada:** condição de pressão ou velocidade prescrita, representando o suprimento de ar comprimido;
- **Saídas:** condições de pressão ambiente, tanto para a saída quente quanto para a saída fria;
- **Paredes:** condição de não deslizamento (no-slip), assumindo paredes rígidas e adiabáticas.

Os valores absolutos de pressão, temperatura e vazão foram mantidos em níveis conservadores, compatíveis com as limitações da versão gratuita do software, priorizando a estabilidade da simulação em detrimento da obtenção de resultados quantitativos precisos.

3.4 LIMITAÇÕES DO MODELO NUMÉRICO

É importante destacar que a versão gratuita da plataforma *SimScale* impõe restrições quanto ao número de elementos de malha, ao refinamento local e ao número de iterações permitidas. Essas limitações impactam diretamente a resolução do escoamento compressível e a magnitude dos gradientes térmicos obtidos.

Dessa forma, os resultados apresentados neste trabalho não devem ser interpretados como valores absolutos de desempenho térmico do dispositivo, mas sim

como uma análise qualitativa do comportamento fluidodinâmico e da separação energética. Ainda assim, os padrões observados — como gradientes radiais de velocidade, concentração de turbulência periférica e formação do núcleo central — mostram-se coerentes com os fenômenos descritos na literatura, validando o modelo conceitual proposto.

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E RESULTADO

4.1 ESCOLHAS GEOMÉTRICAS DO MODELO

O dimensionamento geométrico do tubo de vórtice desenvolvido neste trabalho teve como objetivo principal garantir a formação do escoamento rotacional e da separação energética característica do efeito Ranque-Hilsch, respeitando critérios amplamente discutidos na literatura, porém mantendo simplicidade construtiva e aplicabilidade à refrigeração localizada em usinagem.

4.1.1 Diâmetro da garganta

O diâmetro da garganta, responsável pela saída da fração fria do escoamento, foi definido de forma proporcional ao diâmetro interno do tubo principal, seguindo tendências observadas em estudos clássicos de tubos de vórtice. Segundo Hilsch (1947) e Saidi e Valipour (2003), a redução da área na região da garganta favorece a expansão adiabática do fluido no núcleo central, promovendo a queda de temperatura associada à fração fria.

Neste trabalho, o valor adotado para o diâmetro da garganta não visa otimização térmica quantitativa, mas sim garantir a presença do mecanismo físico de retorno axial do fluxo frio. Dessa forma, a dimensão foi definida de maneira conceitual, respeitando proporções geométricas relatadas na literatura e modelos comerciais, permitindo a visualização qualitativa do escoamento de retorno no núcleo central.

4.1.2 Área da câmara associada à fração quente

A região periférica da câmara de vórtice foi projetada com área suficiente para permitir o desenvolvimento do escoamento rotacional de alta velocidade junto às paredes internas. De acordo com Eiamsa e Promvonge (2008) e Kaufmann (2022), o aquecimento da fração quente ocorre predominantemente nessa região devido à compressão centrífuga, ao atrito viscoso e à dissipação de energia turbulenta.

Assim, a maior área da câmara externa não foi escolhida de forma arbitrária, mas sim para favorecer a manutenção do vórtice periférico e permitir a conversão de energia cinética em energia térmica. Esse critério explica o acúmulo de temperaturas mais elevadas observado nas regiões externas da simulação, coerente com o comportamento descrito na literatura.

4.1.3 Comprimento da câmara fria

O comprimento total da câmara foi definido de modo a garantir espaço suficiente para o desenvolvimento do vórtice e da separação energética antes da extração da fração fria. A adoção de uma razão $L/D = 20$ atende às recomendações de Saidi e Valipour (2003) e Yilmaz et al. (2009), que indicam que valores nessa faixa são adequados para promover a separação sem introduzir perdas excessivas por atrito ao longo do comprimento.

A região associada à saída fria localiza-se próxima ao eixo central e ao final do comprimento útil do tubo, justamente onde o escoamento axial de retorno encontra-se mais desenvolvido. Essa escolha geométrica permite que o fluido central passe por um processo de expansão mais pronunciado, justificando o comportamento térmico observado nas simulações, ainda que de forma qualitativa.

4.2 DESCRIÇÃO DAS PARTES DO CONJUNTO

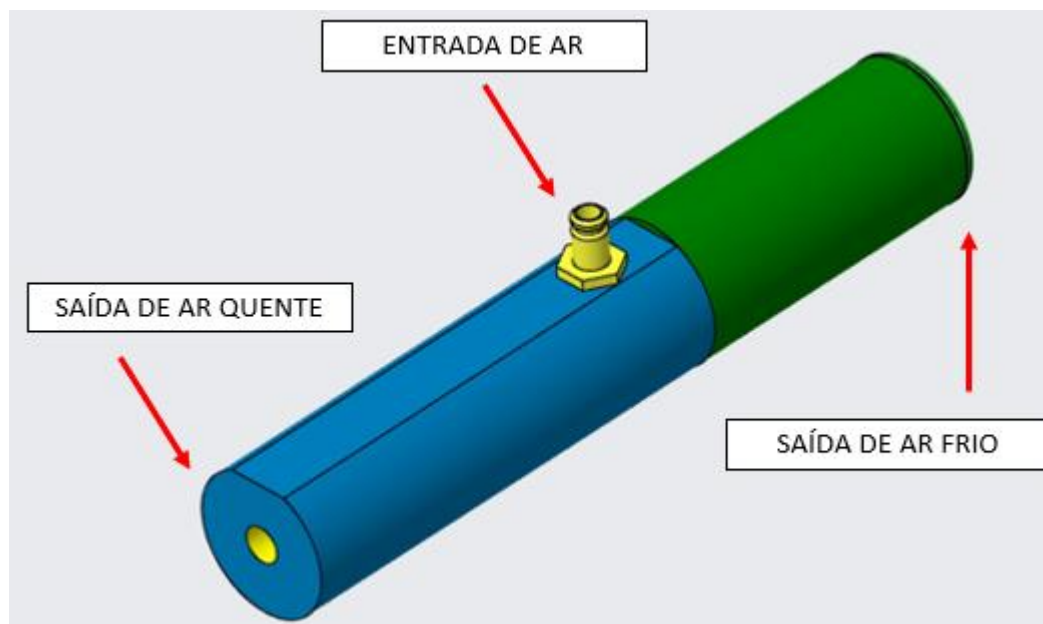
Foi desenvolvido o projeto conceitual de um sistema de refrigeração localizada com base no tubo de vórtice, incluindo sua modelagem tridimensional (3D) e representação funcional.

O modelo 3D foi projetado integralmente no Creo Parametric, com dimensões reais e detalhes construtivos que permitem análise visual e técnica do sistema. O dispositivo é composto pelas seguintes partes principais:

1. Entrada de ar comprimido: responsável por introduzir o fluido de forma tangencial na câmara de vórtice, induzindo o movimento rotacional. O diâmetro e o ângulo de entrada foram definidos de acordo com parâmetros médios encontrados na literatura.
2. Câmara de vórtice: componente central onde ocorre o escoamento rotacional e a separação térmica. Foi dimensionada de modo a garantir uma relação L/D próxima de 20, valor típico para bom desempenho térmico.
3. Tubo quente: canal longitudinal por onde escoar a corrente de ar aquecida, controlada por uma válvula de escape ajustável, projetada para regular a fração de vazão fria (ϵ).
4. Saída fria: localizada no núcleo central do dispositivo, direciona o ar resfriado para a região de aplicação, permitindo refrigeração localizada no ponto de corte.

Com o proposto identificado, a Figura 4 apresenta a vista geral do tubo de vórtice modelado no Creo Parametric, destacando as principais regiões funcionais. O dimensionamento do mesmo, se sucedeu com condições iniciais de fração L/D igual a 20. Para que de forma gradativa dentro das mudanças existentes para meios comerciais seja aprimorado e melhorado mediante análises desejadas.

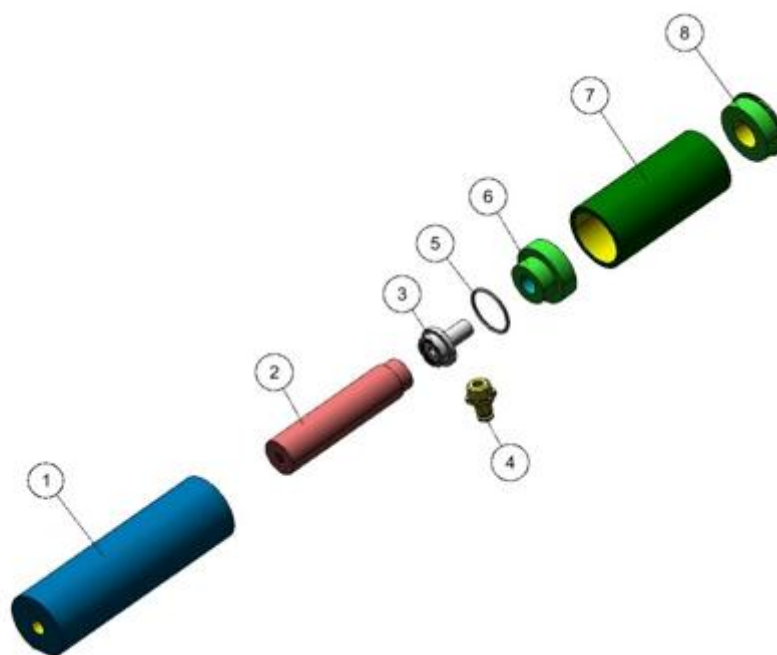
Figura 4 - Modelo 3D completo do tubo de vórtice



Fonte: Autora (2025).

O conjunto demonstrou robustez e simplicidade construtiva. Dando continuidade, a Figura 5 apresenta detalhadamente os componentes do conjunto em vista explodida.

Figura 5 – Vista explodida de componentes

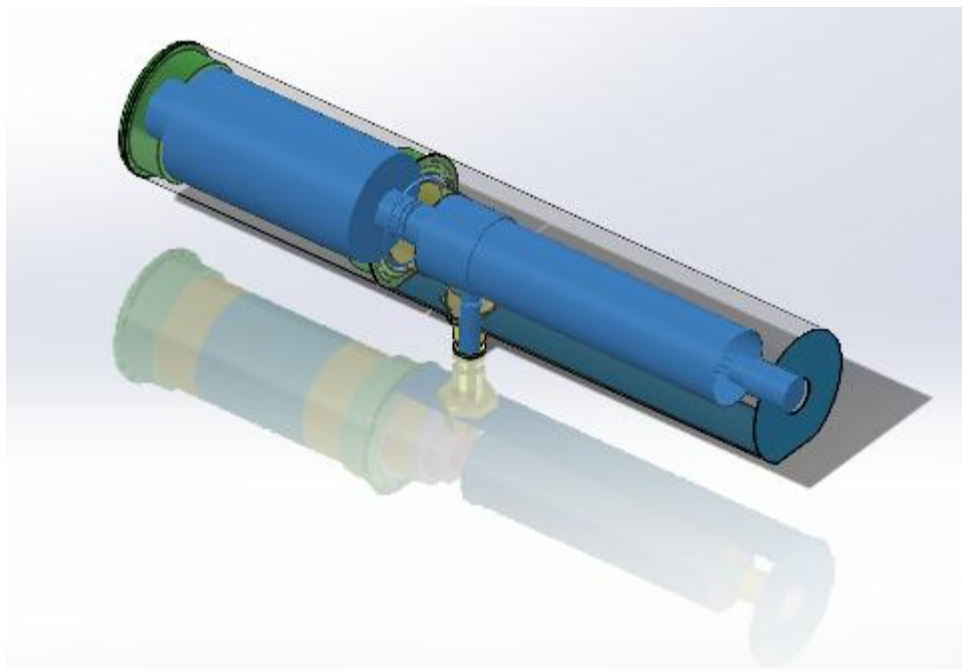


Fonte: Autora (2025).

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 1. Tubo principal; | 5. Anel de vedação; |
| 2. Tubo interno; | 6. Luva/Bucha; |
| 3. Turbina; | 7. Tubo secundário; |
| 4. Válvula de engate; | 8. Tampa; |

Como componentes do conjunto montado o sistema conta também com anel de vedação para união das partes, que pode ser de origem rosqueável mas no projeto está apenas de maneira conceitual, e também com um conector de mangueira comercial, que não influencia no funcionamento do sistema. Com isso, a Figura 6 traz uma visualização do volume interno ocupado pelo fluido (ar).

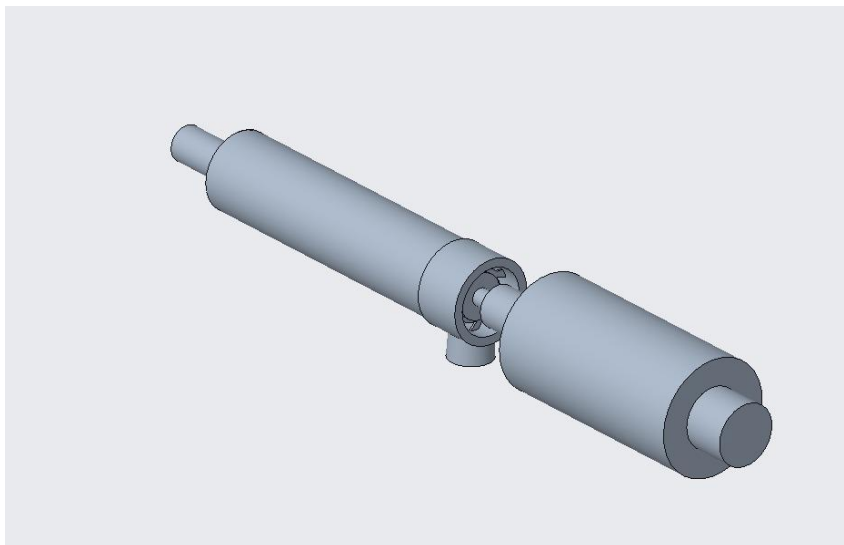
Figura 6 – Demonstração de volume interno



Fonte: Autora (2025).

A Figura 7 apresenta o volume interno que precisou ser isolado para permitir qualquer simulação coerente no *SimScale*. Essa etapa, embora pareça simples, foi um ponto trabalhoso do desenvolvimento. O *software* não aceita análise com dois corpos sólidos sobrepostos (peça e fluido), nem interpreta conjuntos CAD. O que exigiu a reconstrução do volume interior inteiro. A figura ilustra exatamente o sólido que representa o “ar” dentro do dispositivo. Portanto foi necessária uma interação entre funções de *SimScale*, *Creo Parametric* e *SolidWorks*. Onde características singulares de cada *software* interagindo em um mesmo modelo (peça) foi possível obter o resultado desejado.

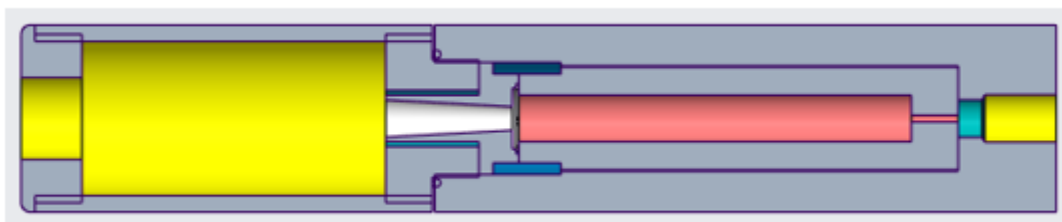
Figura 7 – Volume interno



Fonte: Autora (2025).

Esse processo também justifica o porquê de a simulação só acontecer quando o modelo é reduzido ao volume fluido puro. Como o *SimScale* trabalha com malhas orientadas ao domínio do fluido, qualquer corpo estrutural interfere na sua leitura, inviabilizando as condições de contorno, bem como, o volume interno carece de ser fiel a realidade do sistema para melhor análise e interpretação. Com simulação em *software*, a Figura 8 trata-se de uma vista em corte, onde foi possível observar em corte longitudinal que o projeto possui apenas folgas mínimas e previstas, evitando perdas indesejadas.

Figura 8 – Vista em corte

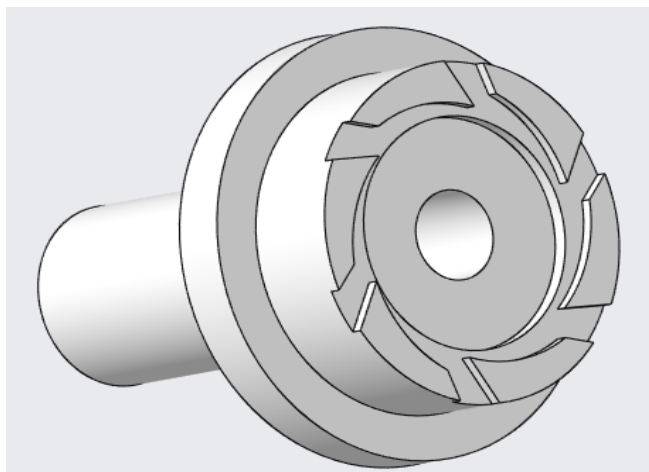


Fonte: Autora (2025).

Dando continuidade a demonstração de componentes principais, a Figura 9 traz a demonstração da turbina, no seu perfil buscou-se atender as especificações recomendadas pelos autores referência. A turbina conta com um formato cônico na

sua vazão interna, para melhor fluidez do fluxo frio. Esta respeitou estudos em bibliografia que trazem melhor resultado com 6 entradas de ar.

Figura 9 - Turbina



Fonte: Autora (2025).

A turbina fica fixada com a bucha de encaixe, possui comprimento longitudinal suficiente pro fluxo mássico transpassar pelo seu interior e alimentar a saída de vazão de ar frio. Seu corpo está dimensionado para o compartimento ideal da zona de admissão de ar. O intuito é que não ocorra deslizamento com a pressão do ar de entrada.

4.3 DETALHAMENTO DA SIMULAÇÃO CFD

A análise do escoamento interno foi realizada por meio de simulação computacional de dinâmica dos fluidos (CFD) utilizando a plataforma *SimScale*, considerando escoamento tridimensional, compressível, turbulento e em regime permanente. O objetivo da simulação foi avaliar qualitativamente o comportamento do escoamento, a formação do vórtice e a distribuição de velocidades, turbulência e temperatura no interior do tubo.

4.3.1 Malha computacional

A malha foi gerada automaticamente pela plataforma *SimScale*, utilizando elementos predominantemente tetraédricos, adequados para geometrias complexas. O domínio do fluido foi discretizado com ordem de centenas de milhares de elementos valor compatível com as limitações da versão gratuita do software.

Foi adotado refinamento global uniforme, priorizando a estabilidade numérica e a captura dos gradientes principais de velocidade e turbulência, especialmente nas regiões próximas à turbina e às paredes da câmara de vórtice.

4.3.2 Solver e modelo de turbulência

Foi utilizado um solver compressível em regime permanente. O modelo de turbulência adotado foi do tipo $k-\epsilon$, amplamente empregado em aplicações industriais por apresentar robustez numérica e bom compromisso entre custo computacional e representação de escoamentos turbulentos internos.

A escolha desse modelo justifica-se pelo caráter qualitativo da análise e pelas limitações computacionais impostas pela plataforma, não sendo objetivo do trabalho capturar estruturas turbulentas de pequena escala.

4.3.3 Condições de contorno e parâmetros operacionais

As condições de contorno foram definidas conforme segue:

- **Entrada de ar:** condição de velocidade prescrita, com valor da ordem de 20 m/s, representando o suprimento de ar comprimido;
- **Saídas quente e fria:** condição de pressão ambiente;
- **Paredes:** condição de não deslizamento (no-slip) e comportamento adiabático.

A temperatura de entrada do ar foi considerada próxima à ambiente, e os valores de pressão e velocidade foram mantidos em níveis conservadores, compatíveis com as restrições da versão gratuita do *SimScale*, priorizando a convergência da solução.

4.3.4 Limitações da simulação

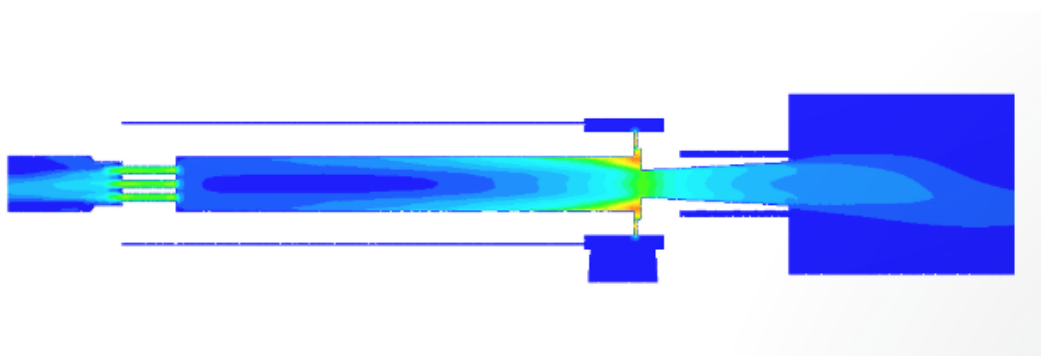
Devido às restrições da plataforma gratuita, não foi possível realizar refinamentos locais avançados de malha, simulações transientes ou variações paramétricas mais extensas. Além disso, os valores absolutos de temperatura e pressão obtidos não devem ser interpretados como resultados quantitativos finais.

Ainda assim, os campos de velocidade, turbulência e temperatura apresentaram padrões coerentes com o comportamento descrito na literatura, permitindo a análise qualitativa do escoamento e a validação conceitual da geometria proposta.

4.4 ANÁLISE CFD DE FLUIDO COMPRESSÍVEL

A Figura 10 apresenta um corte longitudinal que evidencia a formação do escoamento axial após a entrada do ar comprimido no sistema. A distribuição das velocidades é coerente com o comportamento esperado para um tubo de vórtice, onde o fluido tende a perder velocidade próximo ao eixo central, enquanto as regiões periféricas aparecem com velocidades maiores.

Figura 10 – Corte longitudinal demonstrando velocidade interna



Fonte: Autora (2025).

Outro ponto importante é que a figura permite observar a coerência geométrica do projeto com o conceito de razão L/D . Embora esta simulação ainda não represente compressibilidade real, o comprimento útil do tubo proporciona espaço suficiente para que ocorra uma separação de regimes.

Como Saidi e Valipour (2003) destacam, valores na faixa de 20 a 55 produzem resultados mais estáveis em termos de separação energética, e aqui, visualmente, percebe-se que o escoamento encontra um canal suficientemente longo para desenvolver gradientes relevantes. Isso reforça que, mesmo com as limitações da simulação, o conceito geométrico do projeto está respeitando tendências observadas em literatura, que no caso deste estudo e projeto a razão usada foi igual a 20.

A Figura 11 mostra uma aproximação da região correspondente à saída de ar quente. É nítida uma redução local de velocidade, que, apesar de parecer um “perda” de energia, na verdade sugere que o fluido encontra uma zona de alívio antes de ser expelido. Em termos práticos, essa redução é coerente com o fenômeno físico esperado ao se aproximar da parede externa, o fluido tende a perder velocidade tangencial e, portanto, tende ao fluxo reverso por colisão e início da massa fria dosada no sistema. Um comportamento discutido por Eiamsa e Promvonge (2008), que

associam baixas velocidades à menor difusão de energia cinética na troca térmica existente.

Figura 11 – Redução de velocidade

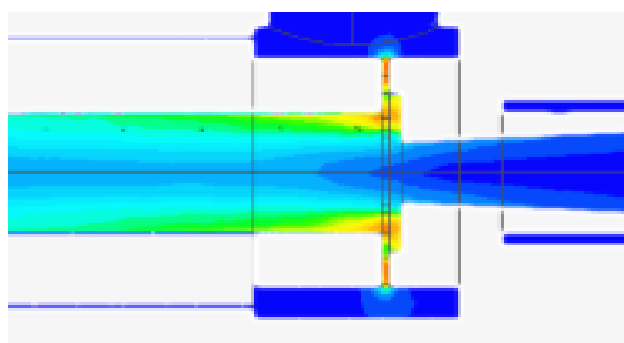


Fonte: Autora (2025).

Essa interpretação também pode ser vista como um indicativo de que o projeto mantém o caminho necessário para que, sob pressões reais de operação (maiores que as utilizadas nesta simulação preliminar), ocorra o retorno da massa fria pelo núcleo central, de certa forma de análise conclusiva, percebe-se que a estrutura geométrica permite que uma separação axial possa ocorrer.

Com uma demonstração mais aproximada, a Figura 12 destaca a ação da turbina no alojamento responsável por direcionar o fluido para as paredes do tubo. O aumento local de velocidade, representado por cores mais quentes no mapa, confirma que o conjunto helicoidal está cumprindo sua função fundamental: empurrar a massa de ar para a periferia, criando o gradiente de escoamento característico que, segundo Kaufmann (2022), é o núcleo do processo de separação energética em um tubo de Ranque-Hilsch. Esse comportamento é essencial, pois sem essa transferência angular, não há desenvolvimento do fluxo rotacional que posteriormente se divide em quente e frio.

Figura 12 – Alojamento da turbina

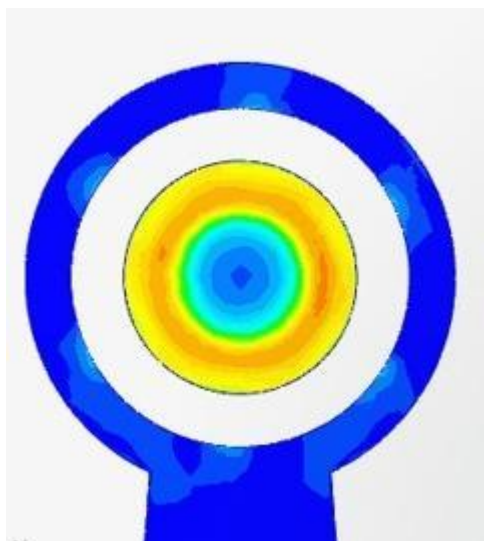


Fonte: Autora (2025).

Então, essa concentração de energia nas paredes reforça que o dispositivo não direciona o fluido ao centro, o que seria incoerente e não funcional para o sistema, mas sim transfere momento angular para a região periférica tangente ao tubo.

A Figura 13 mostra em seção de corte radial evidenciando o padrão concêntrico típico de separação que seria térmica num tubo real. A leitura qualitativa é válida das regiões periféricas com maior magnitude. Onde de forma analítica pode ser identificado como regime mais energético e, portanto, mais quente. Já o núcleo central, com velocidade reduzida, corresponde ao fluxo frio de retorno. Esse padrão é amplamente descrito por Hilsch (1947) e Martynovski & Alekseev (1957), que apontam justamente esse gradiente radial como prova fundamental do efeito Ranque-Hilsch.

Figura 13 – Vista em corte radial

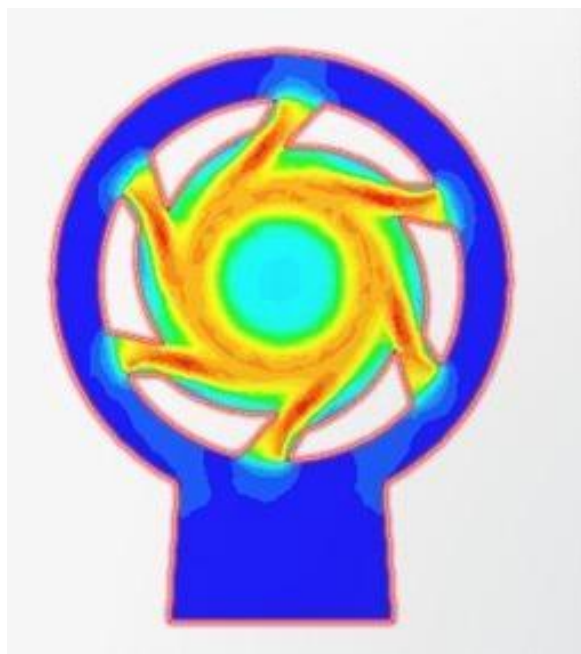


Fonte: Autora (2025).

Apesar de ser uma simulação compressível com limitações, o comportamento é extremamente semelhante ao observado nos experimentos do referencial teórico, o núcleo central mais lento, periferia mais veloz e com maior magnitude térmica. Isso confirma, mais uma vez, que o projeto, em sua forma geométrica, está adequado, e que a turbina fornece a rotação necessária para construir esse gradiente.

De mesmo modo, a Figura 14 apresenta a turbina em destaque e deixa clara a importância da geometria adotada. As pás introduzem um componente tangencial significativo no escoamento, impulsionando o fluido para as paredes internas da câmara. Esse comportamento está alinhado com Whang *et al.* (2009), que compararam diferentes geometrias de entrada e concluíram que variações no formato, inclinação e número de bocais alteram drasticamente o campo de velocidade e a intensidade do vórtice.

Figura 14 – Fluxo na turbina

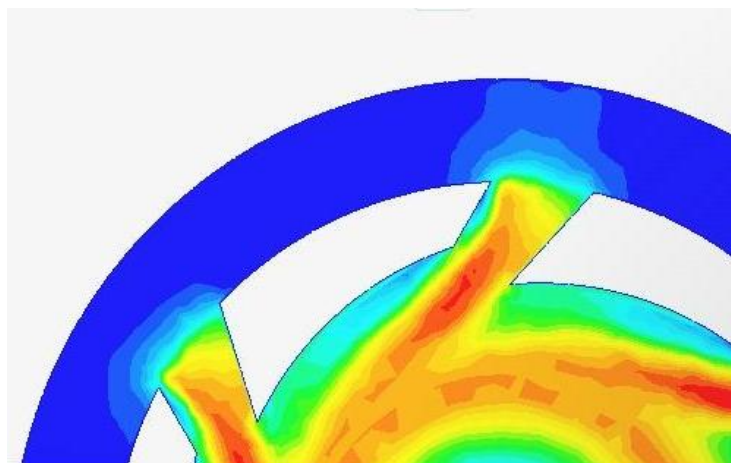


Fonte: Autora (2025).

Além disso, o ganho de intensidade do giro observada nas regiões mais próximas às pás reforça que o dispositivo está conseguindo produzir uma separação angular do fluido importante para o fenômeno termodinâmico ocorrer. A imagem evidencia alta densidade de velocidade periférica, o que significa maior energia e, portanto, maior tendência ao aquecimento neste ponto, seguindo o comportamento descrito por Kaufmann (2022).

De mesmo modo, a Figura 15, traz uma aproximação da turbina, evidencia o aspecto geométrico extremamente relevante das entradas que possuem ângulos retos que criam zonas de acúmulo de velocidade. Esse comportamento é abordado por Aljuwayhel *et al.* (2005) que descrevem ao avaliar diferentes perfis de entrada os formatos abruptos tendem a gerar recirculações menores, perda localizada e menor eficiência do vórtice.

Figura 15 – Aproximação da turbina



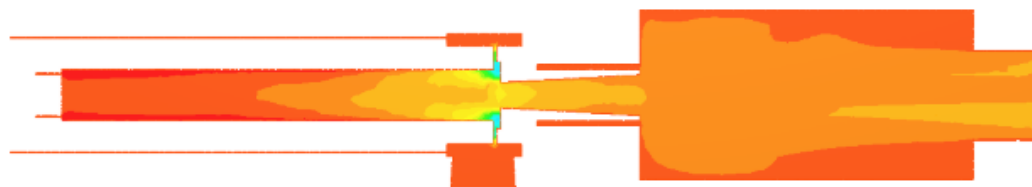
Fonte: Autora (2025).

No embasamento teórico utilizado neste trabalho, alguns autores relatam em seus estudos e análises, melhor desempenho em modelos onde a entrada do ar na turbina apresenta uma curvatura suave em vez de um ângulo reto. Essa curvatura reduz perdas locais e melhora a transferência de momento angular, aumentando a intensidade do giro. A Figura 15 por mostrar uma entrada com canto vivo se torna um ponto importante, não como defeito, mas como justificativa técnica ao comportamento observado e passível de melhoria e nova análise comparativa para melhor resolução.

4.5 DISTRIBUIÇÃO TÉRMICA E GANHO TÉRMICO

A representação completa do campo de temperatura ao longo do tubo de vórtice permite observar, de forma mais abrangente, o início do processo de separação térmica característico dos dispositivos Ranque-Hilsch. Nesta visualização representada na Figura 16. Como mencionado, os parâmetros de entrada foram simplificados dentro das limitações do *software*, porém, percebe-se que o ar ao ingressar no tubo e adquirir momento angular devido à geometria da turbina, passa imediatamente a sofrer dissipação no meio longitudinal do tubo e na periferia tangente a ele, o que resulta em um aumento gradual de temperatura ao longo da direção axial e do atrito gerado.

Figura 16 – Fluxo térmico



Fonte: Autora (2025).

As regiões em tons alaranjados e vermelhos evidenciam essa conversão de energia cinética em energia térmica, especialmente nas camadas periféricas do escoamento exatamente como descrito por Hilsch (1947) e detalhado numericamente por Behera *et al.* (2018). Vale ressaltar, que a diferença térmica não se torna tão expressiva em tom visual através da coloração de resultados do gráfico por conta das limitações do software. Por se tratar de um plano acadêmico solicitado ao suporte técnico, há um limite de 1000 interações, o que faz com que ocasione na redução de condições de entrada e consequentemente de resultados obtidos.

Outro aspecto importante destacado por essa imagem é o comportamento da região correspondente à saída quente. Como a ideologia do projeto propõem o não uso de válvula controle, foi perceptível com análises realizadas a necessidade das saídas do ar quente serem voltadas para a extremidade. A Figura 17 deixa mais visível essas saídas nas extremidades e traz o comportamento do fluxo térmico que tende a sair pelas extremidades, se tornando então um facilitador. Dessa forma, mesmo sem a presença de uma válvula de estrangulamento, nota-se um acúmulo térmico significativo próximo à área de descarga, sugerindo que a própria geometria do protótipo induz uma restrição natural, suficiente para intensificar a dissipação de energia turbulenta antes da expulsão do ar. Através da coloração graduada também é perceptível que o final de curso fixo mantém a dosagem do fluxo central de retorno.

Figura 17 – Demonstração da saída

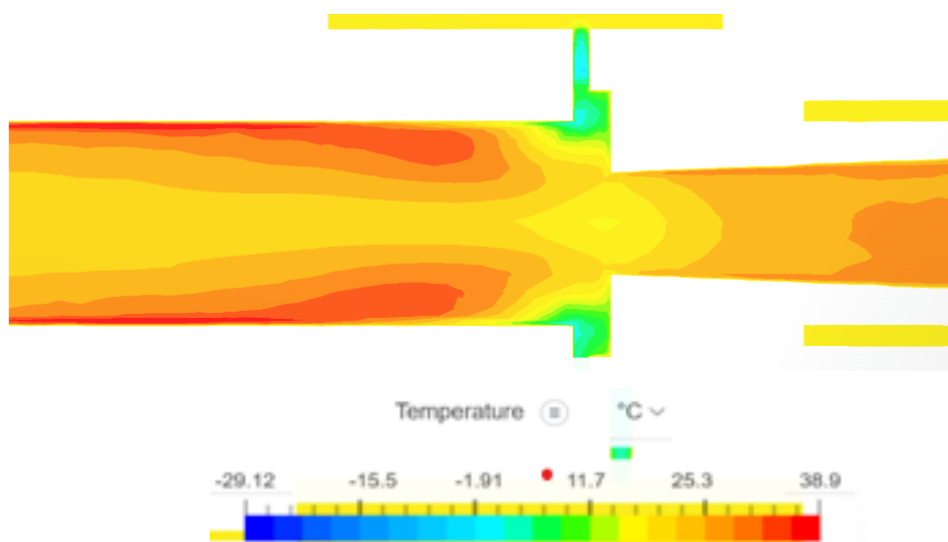


Fonte: Autora (2025).

Esse fenômeno está alinhado com a descrição feita por Eiamsa e Promvonge (2008), que segundo os autores o gradiente de pressão e o escoamento rotacional forçado promovem aquecimento da fração periférica independentemente da existência de dispositivos de ajuste fino. Por se tratar de uma simulação realizada sob condições de contorno simplificadas reflexo de limitações impostas pelo *software* para o modelo compressível a amplitude absoluta das temperaturas não alcança valores drasticamente distintos.

Contudo, a organização espacial do campo térmico, com aquecimento periférico e manutenção de temperaturas menores no núcleo, confirma que o mecanismo essencial de separação energética está presente. Essa observação serve como base introdutória para a análise detalhada apresentada na Figura 18, onde uma aproximação da região da turbina evidencia, com maior precisão, o papel do atrito e da expansão local na consolidação das frações quente e fria. A Figura 18 deixa claro também que os resultados de troca térmica se iniciam já desde a saída da turbina gerando o atrito.

Figura 18 – Fluxo periférico na saída da turbina



Fonte: Autora (2025).

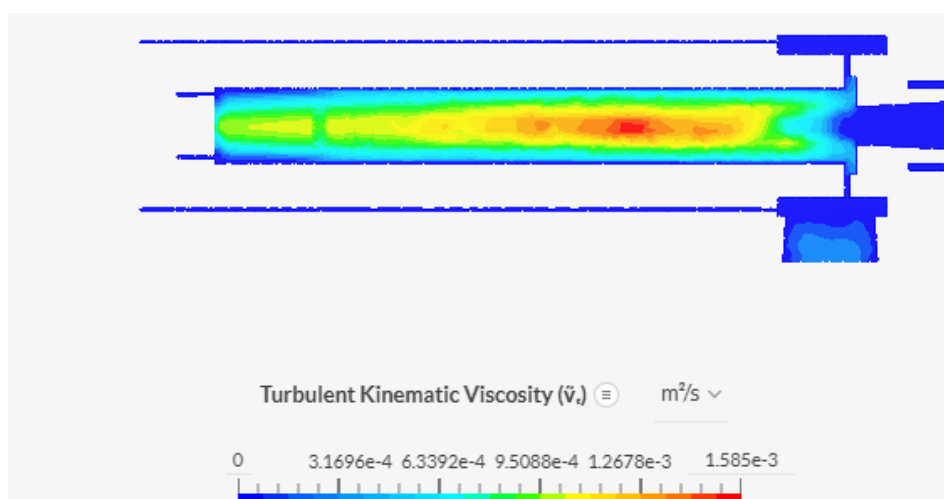
A distribuição de temperatura apresentada na imagem evidencia um comportamento coerente com o mecanismo inicial de funcionamento do tubo de vórtice: assim que o escoamento atravessa a turbina e é forçado a assumir movimento rotacional, ocorre um aumento local de temperatura devido ao atrito viscoso entre o fluido e as paredes internas do tubo. Essa elevação térmica é mais perceptível na região imediatamente posterior à turbina, onde o gradiente de velocidade é mais intenso e o escoamento ainda está em processo de estabilização do movimento helicoidal. Os tons amarelados e alaranjados que surgem ao longo do tubo refletem exatamente esse início de dissipação de energia mecânica em forma de calor, resultado descrito por Hilsch (1947) e posteriormente confirmado por Behera *et al.* (2018) em seus estudos numéricos.

Entretanto, é importante destacar que a variação de temperatura observada na simulação não apresenta amplitudes muito elevadas, o que está diretamente relacionado às limitações impostas pelas condições de contorno disponíveis no *software* durante esta etapa do estudo. Como a plataforma não permitiu a especificação direta de parâmetros térmicos mais agressivos como pressão total realista na entrada, regimes adequados de expansão adiabática ou ajustes finos do escoamento compressível pois o modelo acaba operando dentro de um envelope mais conservador, no qual a separação térmica ocorre, mas com intensidade moderada. Em outras palavras, o comportamento qualitativo do escoamento é reproduzido corretamente, mas os valores absolutos da diferença térmica não devem ser interpretados como representativos do desempenho final de um tubo de vórtice em condição ideal.

Ainda assim, mesmo dentro dessas restrições, o padrão visual do campo térmico confirma que o protótipo é capaz de iniciar o processo de separação energética característico dos tubos Ranque-Hilsch. Observa-se o aquecimento progressivo das camadas periféricas da região associada à fração quente e ao mesmo tempo em que o núcleo apresenta tendência a temperaturas menores, fenômeno compatível com a expansão adiabática que dá origem à fração fria. Como relatado por Eiamsa e Promvonge (2008), essa diferença de comportamento entre periferia e centro constitui a assinatura fundamental do efeito Ranque-Hilsch, e sua presença, mesmo sob condições numéricas limitadas, reforça que a geometria analisada opera de forma coerente com os princípios teóricos do dispositivo.

A avaliação da viscosidade cinemática turbulenta obtida na simulação numérica da Figura 19 revelou um comportamento consistente com o fenômeno fundamental descrito nos estudos mencionados no embasamento teórico. Observa-se ao longo do comprimento do dispositivo a formação de um campo turbulento altamente formado e concentrado na região periférica do tubo e especialmente intensificados na extremidade quente. Segundo Behera *et al.* (2018), a forte dissipação de energia turbulenta nas camadas externas do escoamento é diretamente responsável pelo incremento de temperatura associado à fração quente, resultado da intensa taxa de cisalhamento imposta pelo movimento rotacional.

Figura 19 – Turbulência interna



Fonte: Autora (2025).

Ao mesmo tempo, o núcleo central apresenta valores substancialmente menores de viscosidade turbulenta, caracterizando um escoamento mais ordenado e com menor troca de momento transversal. Esse comportamento, também observado experimentalmente por Eiamsa e Promvonge (2008), indica a formação de uma zona de expansão aproximadamente adiabática, mecanismo diretamente ligado à queda de temperatura da fração fria conforme descrito originalmente por Ranque (1933) e posteriormente detalhado por Hilsch (1947). A presença simultânea de elevada turbulência periférica e baixa turbulência no núcleo é exatamente a assinatura física da separação energética que caracteriza o tubo de vórtice.

A distribuição energética apresentada neste trabalho sugere ainda que a geometria, mesmo sem o emprego de uma válvula de estrangulamento na saída quente, é capaz de promover gradientes suficientemente intensos para gerar circulação interna e induzir a separação entre as frações quente e fria. A literatura

demonstra que dispositivos equipados com válvula permitem modular a fração mássica fria e, conseqüentemente, otimizar a eficiência térmica (Ahlborn; Gordon, 2000), enquanto geometrias com saída fixa tendem a operar em regime mais estável, porém menos ajustável. No presente caso, os picos de viscosidade turbulenta próximos da região de descarga quente indicam que o estrangulamento natural da própria geometria supre parcialmente o papel dinâmico da válvula, sustentando a mistura turbulenta necessária para o aquecimento da fração externa.

Em síntese, o campo de turbulência evidenciado pela simulação corrobora qualitativamente o funcionamento previsto na literatura, indicando que o protótipo analisado reproduz os mecanismos essenciais para a separação energética. Essa coerência entre o padrão de turbulência simulado e os fenômenos descritos por Hilsch (1947), Behera *et al.* (2018) e Eiamsa & Promvonge (2008) fortalece a fundamentação do projeto e valida o comportamento físico inicial do dispositivo dentro dos limites da análise numérica.

4.6 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE REFRIGERAÇÃO

Os métodos convencionais de refrigeração em processos de usinagem baseiam-se predominantemente no uso de fluidos de corte aplicados de forma abundante ou mínima (MQL), com o objetivo de reduzir a temperatura na zona de corte, melhorar a lubrificação e prolongar a vida útil da ferramenta. Embora amplamente consolidados, esses métodos apresentam limitações relevantes, como custos associados à aquisição, manutenção e descarte dos fluidos, além de impactos ambientais e riscos à saúde ocupacional.

Do ponto de vista térmico, a eficiência desses métodos depende diretamente do acesso do fluido à zona de corte, o que nem sempre ocorre de forma eficaz, especialmente em operações de alta velocidade ou geometrias complexas. Além disso, a aplicação convencional não permite controle localizado do campo térmico, resultando frequentemente em resfriamento excessivo de regiões que não participam diretamente do processo de corte.

Essas limitações motivam a investigação de alternativas baseadas em refrigeração localizada por ar, como o tubo de vórtice, cujo princípio difere fundamentalmente dos métodos convencionais, ao promover separação energética sem o uso de agentes externos.

4.6.1 Pontos positivos e negativos

Os métodos convencionais de refrigeração em usinagem, baseados no uso de fluidos de corte, são amplamente utilizados por sua eficiência na redução da temperatura na zona de corte, melhoria da lubrificação e auxílio na remoção de cavacos. Em operações de usinagem pesada ou com elevados esforços de corte, esses métodos apresentam bom desempenho térmico e contribuem para a estabilidade do processo e para a vida útil das ferramentas.

Entretanto, o uso de fluidos de corte também está associado a desvantagens relevantes, como elevados custos de aquisição, manutenção e descarte, necessidade de sistemas auxiliares de filtragem e armazenamento, geração de resíduos e impactos ambientais, além de possíveis problemas operacionais em usinagens de precisão, especialmente em materiais como o alumínio, nos quais pode ocorrer empastamento de cavacos e resíduos finos.

Nesse contexto, torna-se pertinente analisar de forma objetiva os atributos que consolidam o tubo de vórtice como uma solução alternativa para a refrigeração em usinagem, ao mesmo tempo em que se identificam suas limitações em aplicações reais. Para isso, este trabalho considerou um levantamento qualitativo baseado em entrevista com uma empresa que utiliza atualmente o tubo de vórtice em seus processos produtivos em centros de usinagem CNC e tornos CNC, a empresa DRF Ferramentas, atuante em processos de usinagem em geral.

Essa abordagem permite confrontar os fundamentos teóricos apresentados ao longo do trabalho com a prática industrial, possibilitando uma avaliação crítica da tecnologia em cenários reais de usinagem, evidenciando tanto os aspectos em que o tubo de vórtice se destaca quanto as situações em que sua aplicação se mostra limitada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um projeto conceitual de um sistema de refrigeração localizada com base em tubo de vórtice, direcionado à aplicação em processos de usinagem. A partir do estudo teórico, da modelagem tridimensional e da análise de viabilidade técnica, foi possível demonstrar que essa tecnologia representa uma alternativa promissora aos métodos convencionais de refrigeração por fluidos de corte, especialmente sob a ótica da sustentabilidade e da eficiência operacional mesmo sem o uso de válvula ou registro na dosagem de controle do sistema.

O objetivo geral foi plenamente atingido com a elaboração do modelo 3D completo do tubo de vórtice no *software Creo Parametric*, desenvolvido com dimensões reais e características compatíveis com sistemas de usinagem convencionais. O dispositivo proposto atende aos requisitos de simplicidade construtiva, facilidade de montagem e baixo custo operacional, além de permitir integração direta a linhas pneumáticas industriais. Esses conhecimentos fundamentaram as decisões de projeto e permitiram a definição das dimensões e proporções mais adequadas ao modelo desenvolvido e na evolução do estudo.

O objetivo de investigar as aplicações industriais do tubo de vórtice, também foi atingido a partir de entrevista, que evidenciou seu potencial em operações de fresamento, furação e torneamento. A substituição parcial ou total dos fluidos de corte convencionais por sistemas baseados em ar comprimido mostrou-se viável e alinhada às demandas atuais de manufatura limpa e sustentável.

Apesar dos resultados positivos, destaca-se que o presente trabalho possui caráter conceitual e teórico, não abrangendo a construção física do dispositivo nem medições experimentais. Assim, recomenda-se que pesquisas futuras incluam testes mais conclusivos para validação térmica e simulações de acordo com mudanças realizadas no projeto, sendo possível observar o escoamento interno e otimização geométrica.

De modo geral, diante dos dados demonstrados e obtidos neste desenvolvimento, fica evidente que este método de refrigeração possui pontos positivos e significativos. Com isso, o presente trabalho apresentou andamento das atividades, tornando visível que o desenvolvimento de sistemas de refrigeração limpa e eficiente é um caminho viável como refrigeração alternativa para usinagem. O uso

do tubo de vórtice, conforme proposto neste trabalho, representa um passo relevante rumo à substituição de métodos convencionais de resfriamento por tecnologias mais seguras, econômicas e ambientalmente responsável.

Quanto ao problema de pesquisa, conclui-se que ele foi atendido dentro dos limites propostos. O trabalho identificou os principais parâmetros geométricos e operacionais relevantes para o dimensionamento inicial de um tubo de vórtice voltado à refrigeração localizada e analisou, de forma qualitativa, como esses parâmetros influenciam o comportamento do escoamento interno.

Como demonstrado e também dentro dos fatos e análises cabe como sugestão de trabalho futuro ou continuidade como forma de artigo uma sucinta pesquisa de viabilidade onde está pode trazer dados operacionais em conjunto que podem trazer certa lucratividade no conceito residual de uma empresa por uma possível economia gerada com o uso desse tipo de refrigeração em relação a fluido de corte convencional.

Como resultado, foram produzidos conhecimentos associados à identificação dos principais parâmetros geométricos e operacionais que influenciam o comportamento do escoamento interno, tais como a razão comprimento/diâmetro (L/D), a geometria da entrada tangencial, o diâmetro da garganta e a distribuição das regiões associadas às frações quente e fria. A análise CFD qualitativa permitiu visualizar a formação do vórtice, o retorno axial do escoamento frio e a concentração de turbulência na região periférica, em concordância com os fenômenos descritos na literatura.

Além disso, o trabalho contribuiu ao delimitar claramente as potencialidades e limitações do uso do tubo de vórtice sem válvula em usinagem, apoiando-se tanto na modelagem computacional quanto em evidências práticas obtidas por meio de entrevistas com aplicação industrial real. Essa abordagem integrada entre teoria, simulação e prática produtiva reforça a relevância do estudo como base conceitual.

Os elementos desenvolvidos neste trabalho mostram-se diretamente aplicáveis a estudos futuros, destacando-se o modelo geométrico paramétrico, os critérios iniciais de dimensionamento e o procedimento de preparação do domínio de fluido para simulação CFD. Esses componentes podem ser utilizados como ponto de partida para a construção de protótipos físicos, para análises quantitativas de desempenho térmico e energético, bem como para investigações comparativas com métodos convencionais de refrigeração, ampliando o entendimento e a aplicabilidade do tubo de vórtice em cenários industriais reais.

REFERÊNCIAS

RANQUE, G. J. **Experiments on expansion in a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air**. Le Journal de Physique et le Radium, v. 4, p. 112–114, 1933.

HILSCH, R. **The use of expansion of gases in a centrifugal field as cooling process**. Review of Scientific Instruments, v. 18, p. 108–113, 1947.

SAIDI, M. H.; VALIPOUR, M. S. **Experimental modeling of vortex tube refrigerator**. Applied Thermal Engineering, v. 23, n. 14, p. 1971–1980, 2003.

Aljuwayhel, NF, GF Nellis e SA Klein. **Estudo paramétrico e interno do tubo de vórtice usando um modelo CFD**. Revista Internacional de Refrigeração 28.3 (2005): 442-450.

Eiamsa-ard, Smith e Pongjet Promvonge. **Revisão dos efeitos Ranque-Hilsch em tubos de vórtice**. Renewable and sustainable energy reviews 12.7 (2008): 1822-1842.

YILMAZ, M. et al. **A review on design criteria for vortex tubes**. Heat Mass Transfer, 2009. 613-632.

YILMAZ, M.; KUCUK, H.; KOYUNCU, I. **Experimental investigation of the effects of vortex tube nozzle number and diameter on the performance of the vortex tube**. International Journal of Refrigeration, v. 32, n. 1, p. 87–94, 2009.

WHANG, Z.; TONG, M.; YUAG, R. **Experimental Study on Channel Characteristic and Refrigerating Effect in Vortex Tubes**. Journal of Chongqing University. v. 32, n. 8, p. 971-975, 2009.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

Park, S.Y.; Yoon, S.H.; Yu, S.S.; Kim, B.J. **Numerical Investigation on the Principle of Energy Separation in the Vortex Tube**. Appl. Sci. 2022, 12, 10142

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

PISE, R. H.; PATIL, A. M. **Comparative Study of Conventional Vortex Tube and Modified Vortex Tube**. International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering, v. 02, n. 03, p. 232-236, Março 2014.

RATTANONGPHISAT, W.; THUNGTHONG, K. **Improvement vortex cooling capacity by reducing hot tube surface temperature: Experiment**. 2013 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies, 2014. 1-9.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

SANTOS, José Luiz Silva dos. **Estudo de um tubo de Ranque-Hilsch e possíveis aplicações**. 2017. 30. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário Anhanguera de São Paulo – Unidade Vila Mariana, São Paulo, 2017

BEHERA, A. K.; SAHOO, A. K.; PANDA, S. S. **Performance analysis of vortex tube cooling in machining: a review**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 97, p. 1073–1089, 2018.

PRAJAPATI, A. et al. **Experimental investigation of vortex tube assisted cooling during drilling operation**. Materials Today: Proceedings, v. 46, p. 2320–2326, 2021.

KAUFMANN, André. **Ranque Hilsch Vortex Tube Demystified**. Springer International Publishing, 2022.