



## MODELAGEM E ANÁLISE FLUIDODINÂMICA DE UM VENTILADOR CENTRÍFUGO PARA FORNOS COMBINADOS: Estudo de caso Prática Klimaquip

Matheus Costa Pereira<sup>a</sup>, Paulo Sérgio Ferreira<sup>b</sup>, Lyncoln Almeida Rezende<sup>b</sup>, Alex Geovani de Souza<sup>b</sup>, Marcelo Pereira Martins<sup>b</sup>, Pedro José Papandréa<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Itajubá – MG

<sup>b</sup> Centro Universitário UNA (UNA), Pouso Alegre - MG

<sup>c</sup> Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL, Alfenas - MG

### RESUMO

Com o desenvolvimento do projeto, o objetivo é atender às especificações técnicas para a criação de um ventilador centrífugo robusto, eficiente e com alto custo-benefício para a empresa Prática Klimaquip. Para alcançar esses objetivos, serão utilizadas análises computacionais fluidodinâmicas na voluta, com o software Ansys Fluent, que realiza análise fluidodinâmica computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics). Será realizada uma avaliação prévia da turbina e de seus fatores influentes, com o intuito de aumentar o Índice de Desempenho (ID) do produto em 20,00% em relação ao ventilador atual. Além disso, busca-se compreender a influência de cada fator no desempenho do projeto. Essa abordagem será conduzida como uma pesquisa aplicada, envolvendo análises qualitativas e quantitativas, com o uso de pesquisa-ação. Serão realizados estudos, por meio de análises e simulações, para avaliar a vazão mássica, o torque requerido e a massa da estrutura. Essas análises visam compreender o impacto de cada um desses fatores e buscar maneiras de aumentar o ID e melhorar o desempenho atual do ventilador.

### PALAVRAS-CHAVE:

Ventilador Centrífugo;  
Análise Fluidodinâmica;  
CFD;  
Análise CAE;  
Fornos.

### INTRODUÇÃO

Nas indústrias, os ventiladores centrífugos possuem uma ampla gama de aplicações e as empresas estão constantemente buscando melhorar a eficiência, a qualidade e reduzir os custos de seus produtos, resultando em um mercado altamente competitivo. Nesse contexto, investir em equipamentos modernos e com alto desempenho torna-se essencial.

O rendimento elevado e o consumo eficiente de energia elétrica são fatores de extrema importância. Portanto, os ventiladores centrífugos devem atender a esses requisitos e ser amplamente utilizados (TOLEDO; ROSA, 2020). Com a crescente globalização e a escassez de tempo, as tecnologias devem oferecer soluções rápidas e práticas, inclusive no preparo das refeições. De acordo com o jornal JC Negócios (2015), na 10ª edição da feira Eletrolar Show, as indústrias de eletrodomésticos buscam cada vez mais aprimorar a eficiência de seus produtos. O Plano Nacional de Eficiência Energética (2011) também reforça essas informações.

O estudo de caso e a identificação de possíveis melhorias foram realizados com um ventilador centrífugo fornecido pela empresa Prática Klimaquip, sediada em Pouso Alegre, no Sul de Minas Gerais. A empresa tinha o objetivo de desenvolver um ventilador mais robusto para substituir o existente, porém com menor custo e alto desempenho, sem alterações na voluta, restringindo-se

\*Autor para correspondência:  
Pedro José Papandréa  
e-mail: [pedro.papandrea@unifal-mg.edu.br](mailto:pedro.papandrea@unifal-mg.edu.br)

apenas à geometria do ventilador.

Destaca-se que a turbina projetada pela empresa para possíveis melhorias possui 6 pás e não apresenta angulação de entrada e saída. Além disso, todas as palhetas possuem o comprimento total, ou seja, do cilindro de restrição até a borda. No estudo de caso inicial, as pás foram fabricadas em alumínio (Al) e o fluido utilizado no ventilador foi o ar.

O modelo desenvolvido neste trabalho para substituir o atual, proposto pela Prática Klimaquip, é apresentado na Figura 1. É possível identificar o ventilador e suas pás, representadas de forma mais transparente. Além disso, há outros elementos, como as chapas e a turbina. Observa-se que o ventilador é composto por 12 pás inclinadas.



Figura 1 – Ventilador Centrífugo projetado

O ventilador fornecido para análise tem como objetivo realizar a recirculação de ar em um forno de alta velocidade. Para esse fim, será utilizada a Computational Fluid Dynamics (CFD), que, de acordo com a ESSS (2016), é uma área de conhecimento que realiza simulações numéricas de escoamento de fluidos, transferência de calor e reações químicas.

A aplicação da fluidodinâmica computacional nesse estudo é de extrema importância para compreender o comportamento do fluido dentro do ventilador, desde a entrada até a saída. Isso permite analisar possíveis melhorias e encontrar os melhores resultados. A vazão mássica do fluido é a quantidade de massa de uma substância que passa por um determinado ponto em um intervalo de tempo, medida em kg/s.

O software utilizado possui modelos matemáticos capazes de realizar cálculos extremamente complexos. Estudos numéricos e experimentais contribuem significativamente para melhorias no desempenho dos ventiladores centrífugos (KOTHE; LUZ; VECINA, 2016). Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados três softwares da Ansys, cada um com uma função específica, como mencionado a seguir:

- Workbench: responsável pela estrutura e organização do projeto.
- SpaceClaim: utilizado para modelagem geométrica.
- Fluent: utilizado para simulação computacional de fluidos.
- A Prática Klimaquip identificou três pontos de influência significativa para obter melhores resultados:
- Massa da turbina: busca-se reduzir o peso do produto e diminuir os custos.
- Torque requerido: o objetivo é aumentar a durabilidade e vida útil do ventilador.
- Vazão mássica de ar na saída: busca-se otimizar o tempo de cocção dos alimentos.

A Figura 2 apresenta o ventilador completo, sem a transparência presente na figura anterior.

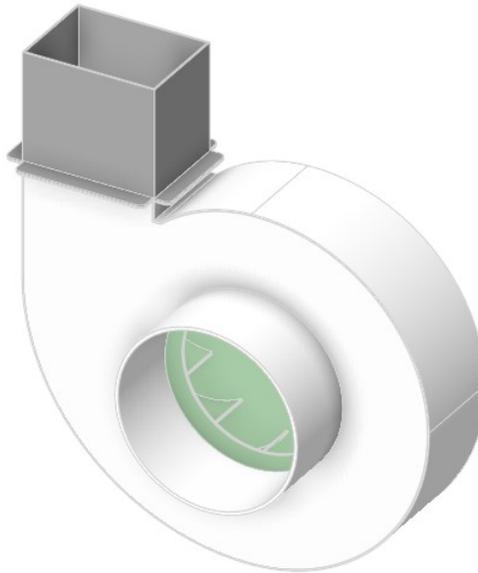


Figura 2 – Ventilador centrífugo projetado

No contexto do desenvolvimento de novos produtos ou aprimoramento dos existentes, constatou-se que o custo com protótipos físicos, mão de obra e testes em experimentos reais desnecessários aumentava o custo e prolongava significativamente o tempo do projeto. Com o objetivo de evitar desperdícios e agregar novos valores, foram adotados softwares que utilizam métodos computacionais, como o Computer Aided Design (CAD) e o Computer Aided Engineering (CAE). A engenharia desempenha um papel fundamental no aperfeiçoamento do produto, e, para evitar gastos com protótipos e testes físicos, são utilizados estudos intermediários com o uso do CFD (CAMARGO; WEBLER; CASSOL, 2018).

O projeto visa aprimorar uma turbina existente, utilizada no fluxo de ar quente de um forno, como descrito anteriormente. A proposta apresentada demonstrou um ID significativamente superior em comparação com o disponibilizado pela Prática Klimaquip e por outras equipes que também buscavam um resultado melhor do que o oferecido pela empresa.

Além do uso de grandezas físicas para calcular o diferencial de pressão, temperatura e torque, foram empregadas diversas ferramentas de modelagem virtual e simulação 3D. É importante ressaltar o avanço tecnológico que possibilita análises cada vez mais complexas e precisas de peças e equipamentos. O que hoje é considerado uma simulação simples e rápida, há alguns anos era praticamente impossível, devido ao rápido avanço da tecnologia computacional (SUN; XIAO, 2016). No entanto, é necessário contar com profissionais especializados no software e na área para interpretar e avaliar os resultados de forma precisa.

Foram realizados vários testes e investigações para identificar os principais fatores que influenciavam o projeto, a fim de alcançar o modelo ideal. Foram efetuadas 12 simulações para obter o maior valor possível de vazão mássica, juntamente com a redução do torque requerido.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

No trabalho, foi desenvolvido um estudo de caso da empresa Prática Klimaquip, com o objetivo de aprimorar um ventilador centrífugo e aumentar sua eficiência. Quanto à natureza, foi utilizada a pesquisa aplicada, que examina soluções e respostas para os desafios enfrentados por uma organização empresarial (KOTHARI, 2004). A abordagem adotada foi tanto qualitativa quanto quantitativa, pois envolveu medições e termos que podem ser expressos em quantidade, bem como a preocupação com a qualidade do fenômeno (KOTHARI, 2004). Em relação aos procedimentos, foi utilizada a pesquisa-ação, que busca a associação entre teoria e prática (AVISON et al., 1999).

A melhoria da eficácia da turbina é o ponto chave no desenvolvimento. Fang e Xu (2011) realizaram um experimento relacionado à efetividade de uma turbina utilizando modelos de valor médio e a Série de Taylor. O componente estudado é responsável pela recirculação de ar quente, sendo que uma pressão de ar mais alta na saída da turbina resulta em um tempo de cocção do alimento menor, desde que a massa de ar seja direcionada adequadamente. Ressalta-se que o projeto foi elaborado com base nas seguintes diretrizes:

- Apenas a geometria do ventilador pode ser alterada;
- O ventilador não pode ser maior do que o cilindro com diâmetro de 198 mm e comprimento de 50,50 mm;
- A rotação do ventilador é de 5.500 rpm;
- As posições globais ou relativas das geometrias não devem ser alteradas;
- A vazão mássica dos ventiladores deve ser calculada na saída da voluta.

Para que o ventilador seja considerado, é necessário obter um Índice de Desempenho (ID) superior a 291,80, que é o valor atualmente disponibilizado pela empresa. Esse índice pode ser calculado utilizando a Equação (1), desenvolvida pela Prática Klimaquip (2022).

$$ID = 1200 \cdot Q_{massa} + \frac{11000}{m_{ventilador}} + \frac{100}{T_{requerido}} \quad (1)$$

Na qual:

**ID**: Índice de desempenho

**$Q_{massa}$** : Vazão mássica na saída [kg/s]

**$m_{ventilador}$** : Massa do ventilador [g]

**$T_{requerido}$** : Torque requerido [N·m]

O aumento da vazão mássica garante a evolução da sucção e a melhoria na performance da transferência de calor (ZHAO et al., 2018). A utilização da metodologia de projetos e análises de problemas reais de um ventilador centrífugo por meio do método numérico é descrita por SANTOS (2017).

O CFD é um fator importante no desenvolvimento da física dos fluidos, e com o passar do tempo está em constante desenvolvimento, tratando do fluxo de matéria em escalas cada vez menores (SUCCI, 2015). Pesquisas feitas por Versteeg e Malalaskera (2007) representam diversos cálculos com o uso da fluidodinâmica computacional utilizando o método de volumes finitos.

A aplicação do sensoriamento numérico permite quantificar valores e estudar fenômenos de forma clara, possibilitando a avaliação precisa de problemas propostos (ROBALINHO; DECKMANN, 2019). O método de elementos finitos é extremamente útil para cálculos precisos e complexos, visando determinar a tensão, a deformação e a vazão (FORONI; MENEZES; MOREIRA FILHO, 2006).

Lin e Huang (2002) realizaram testes com uma ventoinha centrífuga e, ao comparar os resultados experimentais com os resultados numéricos, as simulações utilizando o CFD apresentaram soluções próximas e um custo extremamente inferior.

Ao escolher ou trocar os materiais utilizados, é necessário avaliar aspectos técnicos, processos de fabricação, acabamento resultante, além de investigar os problemas a serem solucionados (SANTOS, 2000). Ligas à base de alumínio são frequentemente utilizadas devido à facilidade de processamento, alta resistência ao desgaste, baixo custo e relação potência-peso favorável (STOJANOVIC et al., 2018). A adição de elementos de liga como ferro, cromo e níquel em combinação com outros elementos também pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas do material (OLIVEIRA, 2018). A utilização de aluminetos de titânio nas turbinas reduz o peso e a inércia de rotação, permitindo o aumento da velocidade desejada (SIMAS, 2015).

Para preservar as propriedades mecânicas em temperaturas elevadas, é comum utilizar uma pequena rede de carbonetos de cromo, além de reduzir o uso de carbono para evitar corrosões (CARBÓ, 2008). É importante ressaltar que o aproveitamento do material deve estar diretamente relacionado com a disponibilidade financeira, pois, embora possa oferecer grandes benefícios, se não for economicamente viável, sua utilidade será questionada. O alumínio apresenta uma série de vantagens, além das mencionadas anteriormente, e a possibilidade de combinar com outros materiais auxilia na escolha do material (BARBOSA, 2013).

Estudos recentes atualizaram a angulação das pás, reduzindo-as em relação à angulação definida por Eckardt (1976 e 1979), que considerava uma saída equivalente a 90°. Hathaway et al. (1993) realizaram experimentos com uma angulação consideravelmente

inferior a 90°. Recomenda-se que os ângulos de entrada das palhetas estejam entre 20° e 45°, e os ângulos de saída entre 40° e 60° (SINHORELLI, 2019). Após definir a curvatura das pás, o próximo passo é escolher os ângulos de entrada e saída, buscando a máxima eficiência do sistema.

Um planejamento inadequado das pás pode resultar em mudanças inesperadas de direção, afetando diretamente o rendimento e a dissipação de energia do rotor para o fluido (SANTOS, 2013). O número de pás está diretamente relacionado aos resultados de vazão, sendo comum que ventiladores centrífugos tenham um número de pás que varia entre 4 e 16 (FERREIRA, 2013).

Este capítulo foi dividido em 6 etapas, com o intuito de garantir que todos os passos fossem realizados e verificados de maneira correta e precisa. Os estágios do desenvolvimento são: explicação sobre o uso do CFD, possíveis materiais e suas aplicações, fatores que influenciam o cálculo, importância e cálculo da vazão e torque, construção da geometria e simulações. Na Figura 3, é possível identificar a vista explodida do ventilador.

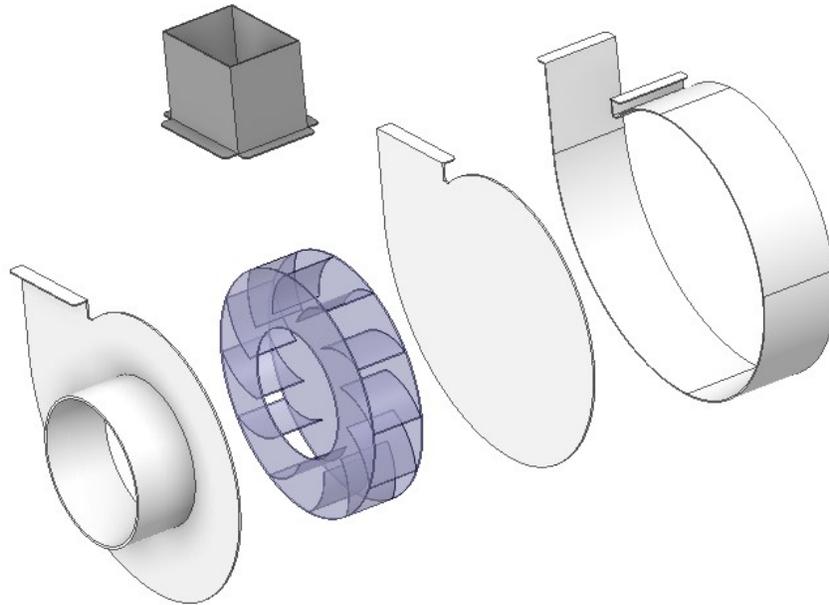


Figura 3 – Vista explodida do ventilador

O CFD foi desenvolvido com o objetivo de analisar e compreender fenômenos físicos de forma concisa. Ele pode ser aplicado em diversas áreas, incluindo peças e ferramentas, permitindo a avaliação de diversos pontos que influenciam no desenvolvimento de um projeto.

Segundo PINI et al. (2012), o CFD é reconhecido pela sua qualidade e precisão no estudo de fluxos. A fluidodinâmica computacional é responsável por analisar o escoamento de fluidos, transferência de calor, reações químicas e outros fenômenos. Através de métodos numéricos, o CFD desempenha um papel fundamental em projetos e análises relacionados ao fluxo de turbinas, compressores e bombas centrífugas (PINTO et al., 2017).

Com a introdução do CFD, tornou-se possível resolver as equações de Navier-Stokes (GIRAULT; RAVIART, 1979). Dada a complexidade do modelo, resolver essas equações manualmente seria inviável, tornando-se necessário o desenvolvimento de softwares capazes de solucionar esses problemas em uma ampla gama de cenários.

Na análise do problema em questão, é crucial seguir as etapas adequadas. Compreende-se que a análise de tensões, resultados obtidos e possíveis melhorias depende não apenas da qualidade do software, mas também do conhecimento do usuário.

O CFD permite compreender as mudanças na resistência e nos padrões de fluxo de ar ao alterar elementos das pás, como espessura, quantidade, comprimento, largura e angulação. Ao utilizar o software, é possível realizar testes abrangentes e avaliar melhorias ou perdas decorrentes de cada modificação na estrutura. Essa abordagem reduz significativamente a necessidade de protótipos físicos, resultando em economia de mão de obra, custos e tempo.

Dentre os materiais amplamente utilizados na fabricação de pás e turbinas dos ventiladores centrífugos, destacam-se o aço inoxidável, ligas de titânio, compósitos de fibra de carbono e resinas de união para essas fibras. No entanto, após a revisão

bibliográfica, o alumínio foi escolhido como material principal.

Existem dois principais motivos para o uso do alumínio: baixa densidade, que permite uma ampla gama de aplicações, e o preço acessível, o que influencia no custo do produto. Além disso, o alumínio possui boa ductilidade e é facilmente usinável em comparação com outros materiais. Sua dureza Brinell é de 18,40 [HB], enquanto o titânio possui uma dureza de aproximadamente 102,80 [HB] e o aço inoxidável cerca de 82,00 [HB].

O aço inoxidável também é altamente valorizado nesse contexto devido à sua alta resistência mecânica e resistência à corrosão. A resistência mecânica do alumínio 6061-T6 é de cerca de 50,00% em comparação com o aço inoxidável 304, enquanto o titânio tem cerca de 70,00% da resistência mecânica do aço inoxidável. Esses fatores desempenham um papel crucial na vida útil dos equipamentos.

Devido às boas propriedades de usinabilidade, as ligas de alumínio podem ser facilmente fabricadas utilizando sistemas de Computer Aided Manufacturing (CAM) em conjunto com controle numérico computadorizado (CNC). Isso permite a fabricação de geometrias altamente complexas que também podem ser soldadas. Outra vantagem do uso de ligas de alumínio é a capacidade de moldagem, o que permite a fundição em moldes com geometrias pré-determinadas. A Figura 4 exemplifica algumas propriedades mecânicas de diferentes ligas de alumínio que são adequadas para a moldagem.

Liga	Têmpera	Limite de Resistência LR (MPa)	Limite de Escoamento LE (MPa)	Alongamento A* (%) * 50 mm	Dureza (HB <sup>12</sup> )
7075	T6, T651	570	505	11	160
	T73, T735X	505	435	13	150
7175	T736	550	485	10	160
	T7351	505	435	13	150
7475	T7351	505	435	14	150
7050	T74, T7452	510	450	13	142
7178	T6, T651	605	540	10	160
7049A	T73	650	570	10	165

Figura 4 – Propriedades mecânicas das ligas de alumínio (Revista Ferramental, 2022)

As ligas mais nobres, como as ligas de titânio e as fibras de carbono, são utilizadas na fabricação de turbinas que requerem alto desempenho e baixa densidade, como é o caso das turbinas aeronáuticas. No entanto, é importante destacar que esses materiais apresentam desafios significativos nos processos de fabricação devido à sua alta dureza, o que torna a soldagem e a usinagem mais complexas.

Quando o aço é utilizado em aplicações que têm contato direto com alimentos, o aço inoxidável polido e o aço inoxidável 304 são boas alternativas. Esses materiais também são amplamente empregados em fornos devido à sua resistência em altas temperaturas. Além disso, o aço inoxidável 304 tem a vantagem de não acumular sujeira com facilidade, facilitando a limpeza das pás e evitando a proliferação de bactérias. No entanto, é importante ressaltar que o custo desses materiais e a mão de obra necessária para seu uso são significativamente mais elevados.

Neste trabalho, é necessário considerar três fatores para calcular o resultado, também conhecido como Índice de Desempenho (ID): massa do ventilador, torque requerido e vazão mássica na saída. Todos esses fatores são importantes para o resultado, porém, alguns têm maior relevância do que outros, exercendo uma influência maior na obtenção do ID.

O primeiro fator a ser analisado é a massa do ventilador, que representa a quantidade de material que compõe a estrutura. Isso inclui todas as peças que formam o produto, como chapas metálicas, pás e turbina. Embora tenha alguma influência no resultado, esse fator é o de menor importância, tendo uma contribuição limitada para o ID. Portanto, é possível desenvolver estruturas robustas sem comprometer significativamente o desempenho.

O segundo fator de maior importância é o torque requerido, que representa a força vetorial necessária para a turbina girar as pás. O torque requerido está diretamente relacionado à capacidade energética do motor. É importante ressaltar que esse fator tem uma relação inversa com a vazão mássica, ou seja, à medida que a vazão aumenta, o torque requerido diminui, e vice-versa. Portanto, é necessário encontrar um equilíbrio entre esses dois fatores para otimizar o desempenho do ventilador.

O fator mais importante para avaliar os resultados é a vazão mássica na saída do ventilador, que representa a quantidade de ar que

é expelida pelo equipamento. O aumento da vazão mássica atende às demandas necessárias e, portanto, esse coeficiente foi amplamente trabalhado durante o desenvolvimento do projeto. Foram realizados vários testes para encontrar o valor adequado da vazão mássica.

A vazão mássica pode ser definida como a massa de um elemento que atravessa uma superfície em um determinado intervalo de tempo (ADEEB; MAQSOOD; MUSHTAQ, 2015). Kloss et al. (2012) mencionam experimentos realizados para estudar o fluxo de massa e garantem que a vazão mássica obtida em casos simulados fisicamente e virtualmente apresentam resultados satisfatórios e semelhantes.

A vazão em um ventilador pode ser definida como a quantidade de fluido que se desloca em um determinado volume de tempo, independentemente da densidade do ar (SANTOS, 2017). A vazão mássica de cada fase, em conjunto com o fluxo em canal aberto, pode ser calculada utilizando a Equação (2).

$$\dot{m}_{fase} = \rho_{fase} \cdot (A_{fase}) \cdot (v) \quad (2)$$

Na Equação (3), é apresentado o cálculo da vazão mássica através de uma superfície. Essa equação utiliza o somatório do produto entre a densidade do fluido, o vetor velocidade e o vetor área. Essa é a equação utilizada pelo software Fluent para o cálculo da integral da superfície.

$$\int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \rho_i \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \quad (3)$$

Pela Equação (4), que também é utilizada pelo software Fluent, calcula-se a média ponderada em massa da região. Essa equação utiliza uma integral para o cálculo da taxa de massa do fluxo.

$$\frac{\int \phi \rho |\vec{v} d\vec{A}|}{\int \rho |\vec{v} d\vec{A}|} = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i |v_i \cdot A_i|}{\sum_{i=1}^n \rho_i |v_i \cdot A_i|} \quad (4)$$

Para calcular o torque requerido, utiliza-se a Equação (5). O momento calculado é gerado pelos produtos cruzados dos vetores de pressão e força.

$$\vec{M}_A = \vec{r}_{AB} \times \vec{F}_p + \vec{r}_{AB} \times \vec{F}_v \quad (5)$$

Para o cálculo da quantidade de momento em uma palheta de turbina, utiliza-se a Equação (6), que descreve o escoamento permanente.

$$T = \int \int \int_S r v_{\theta} \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dS \quad (6)$$

Para que as alterações e a elaboração da nova geometria fossem propostas, além de possuir o modelo matemático, foi realizada uma análise do ventilador físico disponibilizado pela Prática Klimaquip para análise e melhorias. O ventilador atual estudado foi produzido com alumínio e possui 6 pás. A Figura 5 ilustra o ventilador atual projetado pela empresa.



Figura 5 – Ventilador Prática Klimaquip



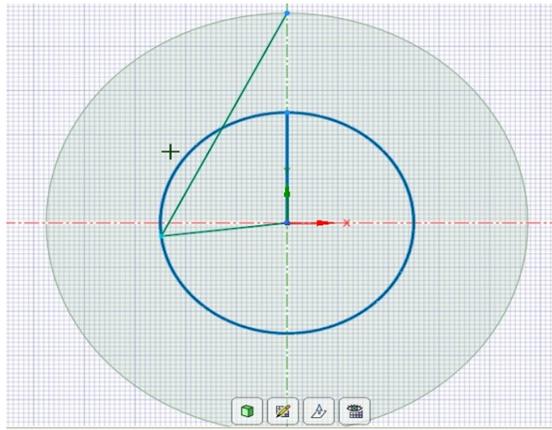


Figura 9 – Retas

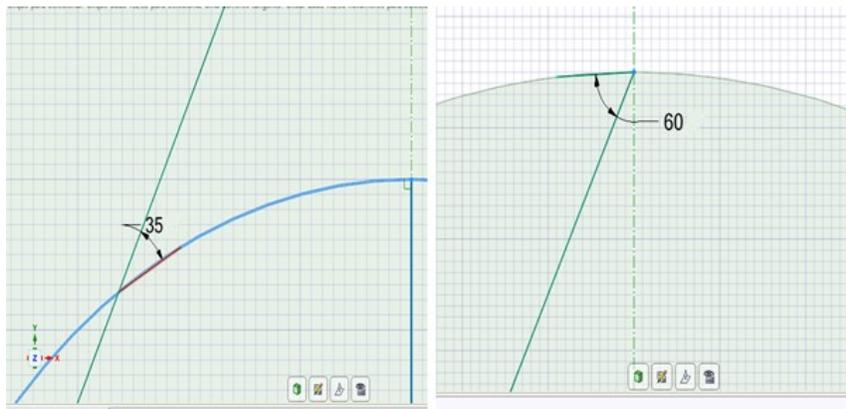


Figura 10 – Angulação de entrada e de saída

Após definir a angulação desejada, é desenhado um triângulo equilátero com ângulos de  $60^\circ$  para manter a angulação na saída, como ilustrado na Figura 11. Em seguida, a partir da extremidade desse triângulo, é desenhado um círculo até a parte superior, formando uma circunferência, conforme representado na Figura 12.

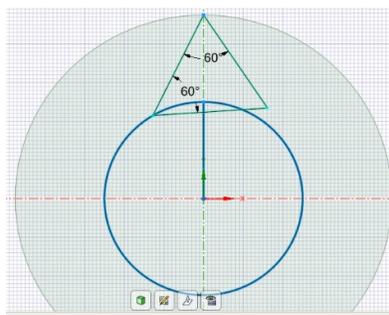


Figura 11 – Angulação de entrada e de saída

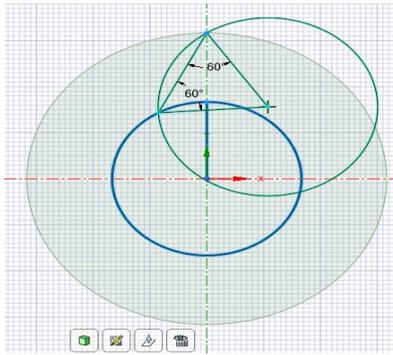


Figura 12 – Angulação de entrada e de saída

A partir dos ângulos definidos e da circunferência ao redor, são feitos os recortes adequados para criar a forma da pá. Apenas o perfil da pá necessário é mantido, enquanto o restante da geometria é removido, resultando na Figura 13. Essa figura é então multiplicada pela quantidade de pás definida, seguindo um padrão circular, para obter a geometria final, como mostrado na Figura 14.

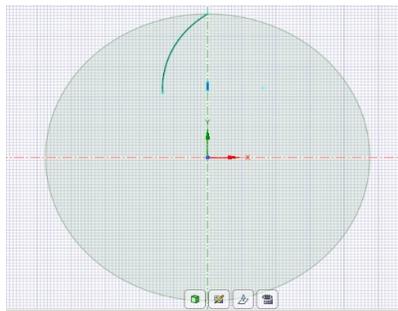


Figura 13 – Definição da pá

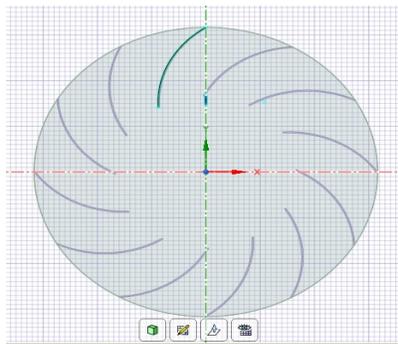


Figura 14 – Replicação das pás

Após a criação da geometria, foi realizada a etapa da simulação computacional utilizando o CFD. Antes de realizar a simulação, é necessário definir os parâmetros estabelecidos pela Prática Klimaquip, seguindo os padrões da empresa e as normas da ABNT, como a ABNT NBR 14518 (2000), que regula os sistemas de ventilação para cozinhas industriais.

Foram realizadas 250 iterações para garantir a estabilização da temperatura e da pressão até atingir um ponto ideal. Destaca-se que houve um refinamento da malha para obter uma análise mais precisa dos resultados.

Para aprimorar o desempenho das pás, é fundamental analisar cuidadosamente os pontos de separação, e o uso do CFD é viável para essa finalidade (MADHWESH; KARANTH; SHARMA, 2011). A ferramenta Ansys Fluent é de extrema importância para prever fenômenos de transferência de calor em experimentos, proporcionando diversas avaliações (MARIANO, 2008).

A Figura 15 mostra a geração das malhas com um refinamento significativo para garantir maior precisão na simulação. Nas Figuras 16 e 17, são apresentados os contornos do modelo em relação à velocidade e pressão, respectivamente. A legenda lateral

auxilia na compreensão das áreas com valores mais altos e mais baixos, focando na análise das pás do ventilador.

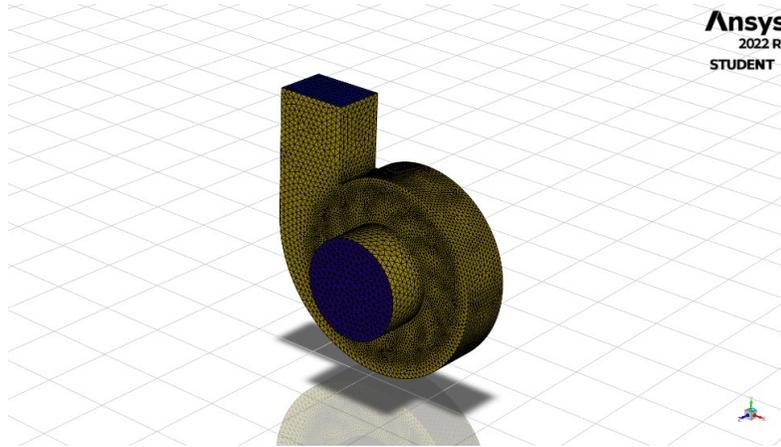


Figura 15 – Modelo com malhas

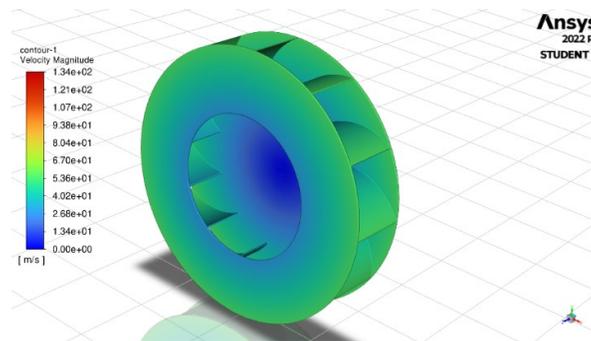


Figura 16 – Contornos em relação a velocidade

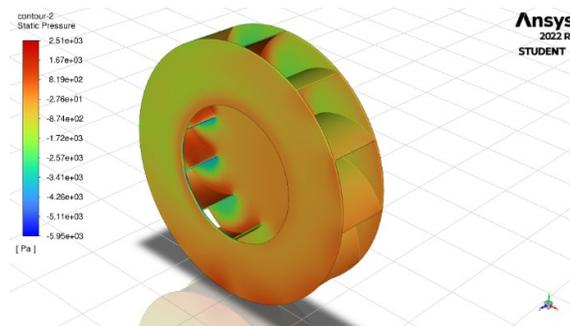


Figura 17 – Contornos em relação a pressão

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o desenvolvimento da turbina, é essencial avaliar os resultados obtidos e discutir sobre os valores encontrados. O fator de maior influência para a viabilidade do projeto é o ID, conforme mencionado anteriormente. As Figuras 18, 19 e 20 ilustram os resultados dos parâmetros que influenciam o ID, obtidos por meio do software Ansys Fluent.

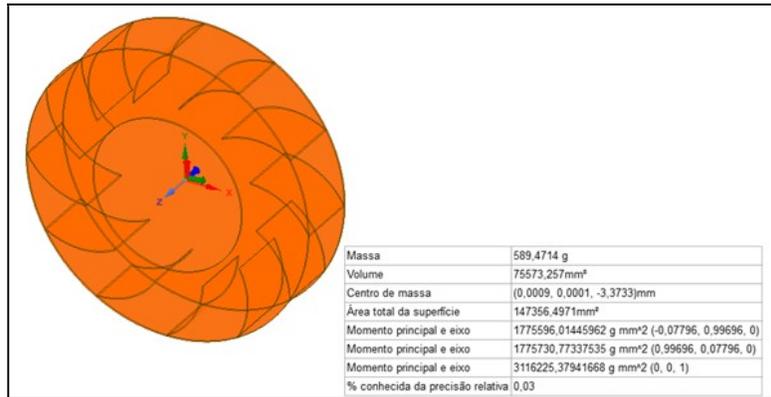


Figura 18 – Massa do ventilador

Moments - Moment Center (0 0 0) Moment Axis (0 0 1)						
Zone	Moments [N m]			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
turbine	2.5071969	-0.01493609	2.4922608	4.0933827	-0.024385454	4.0689972
Net	2.5071969	-0.01493609	2.4922608	4.0933827	-0.024385454	4.0689972

Figura 19 – Torque requerido

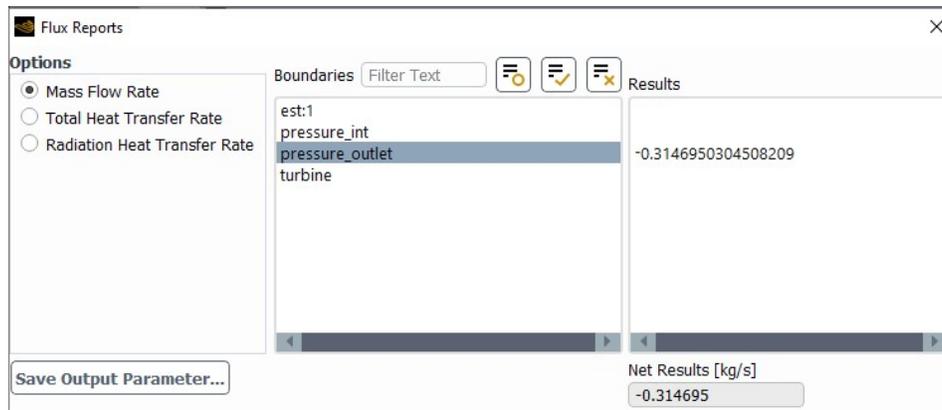


Figura 20 – Vazão mássica na saída

Com o auxílio da Equação (1), é possível calcular o ID conforme Equação (7).

$$ID = 1200 \cdot Q_{massa} + \frac{11000}{m_{ventilador}} + \frac{100}{T_{requerido}} \quad (7)$$

$$ID = 1200 \cdot 0,314695 + \frac{11000}{589,4714} + \frac{100}{4,0689972} = 420,708$$

Ao iniciar o estudo de caso, o objetivo era aumentar o ID em 20,00%. No entanto, por meio das investigações e simulações realizadas, o aumento obtido foi mais significativo do que o esperado. Inicialmente, o ID do ventilador fornecido pela Prática Klimaquip era de 291,8241. Observa-se, portanto, uma evolução considerável no resultado, com um aumento de 44,40%, alcançando um valor de 420,7080. Esse crescimento representa uma mudança altamente significativa no rendimento do ventilador centrífugo.

Para encontrar o melhor resultado, foram realizados vários testes, todos apoiados em referências bibliográficas. Após 12 testes, o melhor resultado foi encontrado, mas outras duas tentativas foram feitas para confirmar que realmente seria a solução ideal. A angulação e o direcionamento das pás foram fatores fundamentais para a construção do modelo, mas o dimensionamento das palhetas também teve relevância e impacto no resultado.

A vazão mássica do projeto apresentou um ganho de 61,70% em comparação com a atual utilizada pela Prática Klimaquip. O

valor passou de 0,1947 para 0,3147, representando uma excelente evolução. No teste número 12, a vazão mássica na saída foi a maior encontrada em todas as replicações. Além disso, o valor do torque requerido também foi o maior, mas é importante ressaltar que outros testes apresentaram um torque alto sem uma vazão mássica elevada, o que não é considerado uma solução adequada. Em relação à massa do ventilador, embora não seja um fator de grande influência, ela ficou entre as cinco mais baixas.

A Figura 21 apresenta a alteração do ID com a realização dos experimentos. Observa-se que no teste 9 o resultado também foi próximo do resultado, porém ainda havia possibilidade de melhoria, tanto na redução da massa quanto no aumento da vazão mássica. Outro ponto importante a ser destacado é que, em todos os testes, o ID obtido foi superior ao do projeto modelo feito pela Prática Klimaquip.

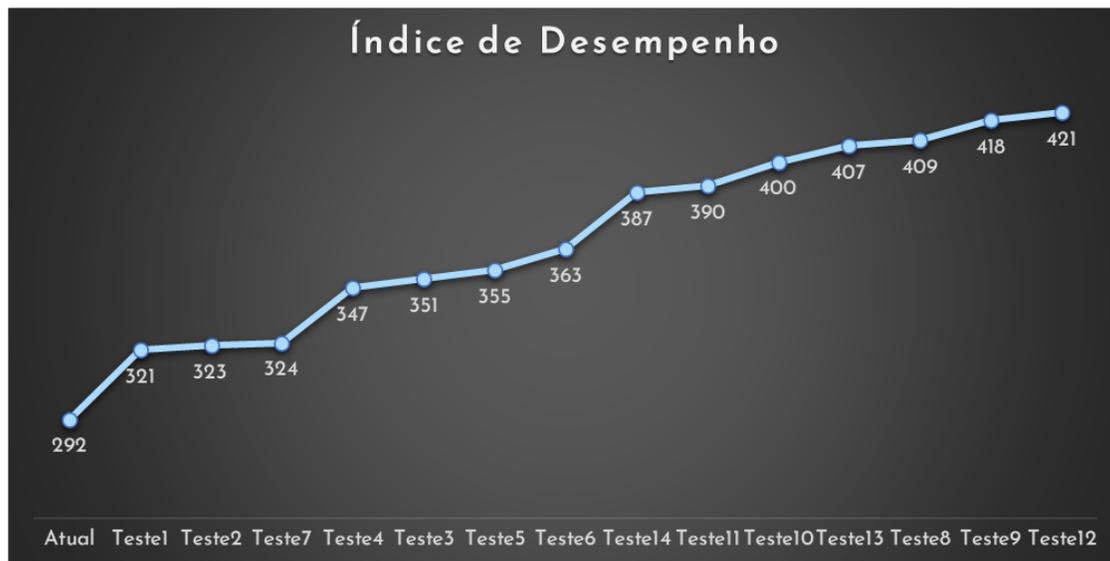


Figura 21 – Variação do ID

Para fins de comparação, a Figura 22 apresenta a transição dos valores entre o ventilador atualmente utilizado pela Prática Klimaquip e o ventilador desenvolvido neste trabalho. Essa representação visual evidencia claramente a evolução dos fatores analisados.

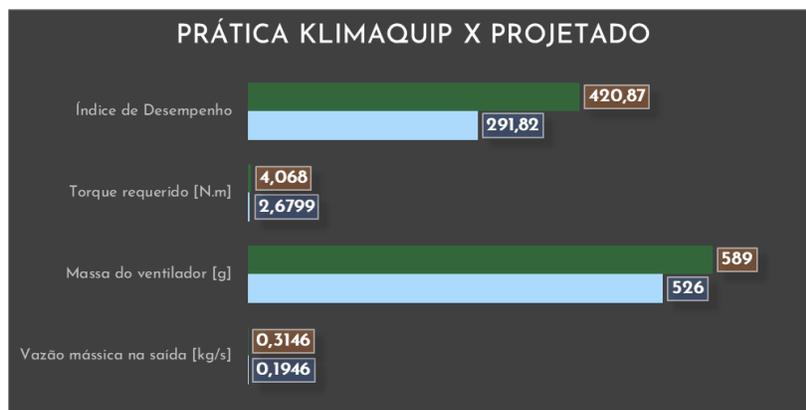


Figura 22 – Evolução do ventilador

Outro ponto de destaque, além dos valores obtidos, são as linhas de contorno e as linhas de corrente, que permitem avaliar melhorias nos campos de pressão e velocidade, além de visualizar possíveis áreas com valores máximos que podem ser reduzidos para obter uma distribuição mais uniforme nos pontos de entrada e saída de ar.

As pathlines representam as linhas de corrente ao longo das quais as partículas se movimentam em equilíbrio com o fluxo, permitindo visualizar os fluxos tridimensionais (ANSYS, 2009). Por outro lado, os contours são as linhas de constante, que mantêm um fator selecionado constante e variam em cores de acordo com uma escala (ANSYS, 2009). Esses elementos são

exemplificados na Figura 23, onde as linhas de corrente estão presentes no modelo completo, e na Figura 24, onde os contornos são exibidos no plano frontal da turbina.

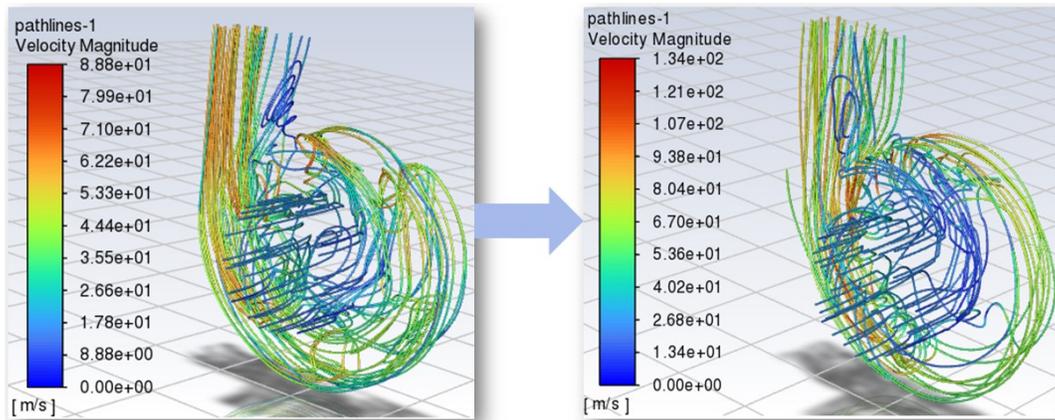


Figura 23 – Evolução das linhas de corrente da velocidade

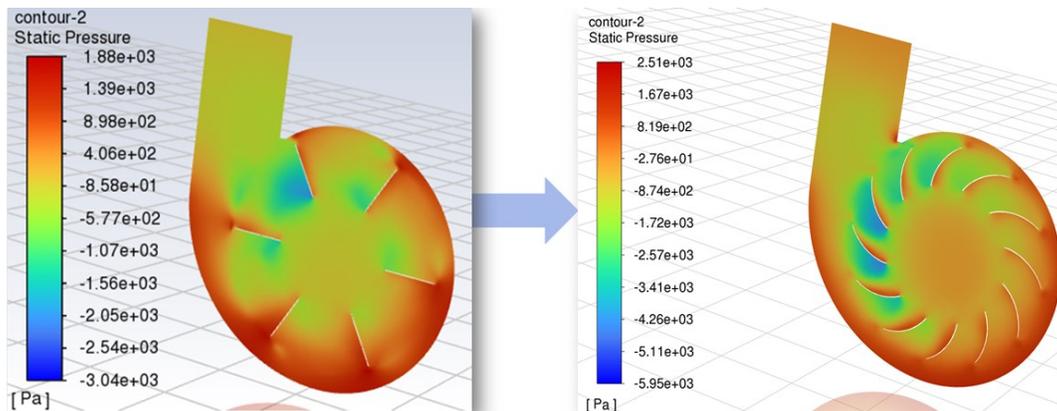


Figura 24 – Evolução do contorno de pressão

Torna-se possível analisar a relação direta entre os gráficos gerados e os resultados avaliados pelo ID. Com o uso dos softwares Ansys, foi possível realizar inúmeros testes para alcançar o resultado desejado, sem a necessidade de custos com a construção de protótipos físicos.

Os resultados obtidos foram mais satisfatórios do que o esperado inicialmente, que era apenas um aumento de 20,00% no ID em relação ao existente. Além dos ganhos no ID, é importante considerar outros fatores, como a redução do custo de produção devido à diferença de massa. A circulação do fluido é feita de maneira mais adequada, como evidenciado pelos contornos e pelas linhas de corrente. Na Figura 25, é possível observar as linhas de corrente, com o auxílio de setas que indicam a direção de entrada e saída do fluido. As linhas de corrente foram organizadas de acordo com as partículas.

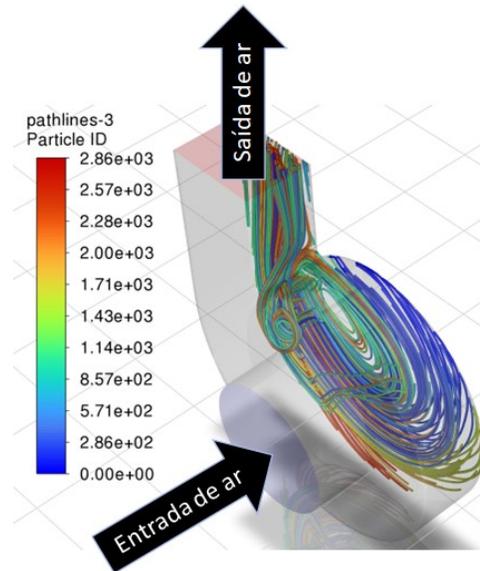


Figura 25 – Linhas de corrente de entrada e saída de ar

## CONCLUSÕES

Com a avaliação cuidadosa de cada um dos elementos na construção da geometria e na simulação matemática, constatou-se que os resultados alcançados no projeto foram adequados e significativos, com valores superiores ao comparar com a turbina atual da Prática Klimaquip. A turbina construída pode ser visualizada com clareza na Figura 26.

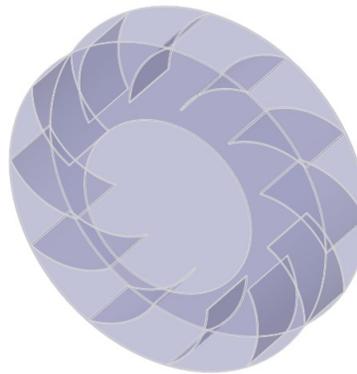


Figura 26 – Turbina construída

Tornou-se evidente a importância da quantidade de pás, onde um número excessivo resulta em perdas significativas devido ao aumento de massa e influência no torque. No entanto, uma quantidade muito pequena de pás resulta em baixo valor de vazão mássica. Ao reduzir o comprimento das pás até encontrar o tamanho ideal, ocorre uma redução no torque requerido. A angulação tanto na entrada quanto na saída das pás também mostrou ser um fator de grande relevância.

Apesar da realização de um número expressivo de testes, totalizando 14, e das inúmeras alterações nos parâmetros, o processo foi realizado de forma ágil devido à utilização do software, o que eliminou a necessidade de construir vários protótipos. Outro ponto importante foi a análise prévia dos pontos críticos com base em referências bibliográficas e em ventiladores existentes, antes de iniciar os desenhos, evitando assim testes com geometrias falhas.

As ferramentas, como as linhas de corrente, as linhas de contorno e a mesclagem de malhas com linhas, facilitam a compreensão do movimento do ar dentro do ventilador, sendo essenciais para a análise do deslocamento das partículas. Essas análises comprovam a eficácia do cálculo, confirmando os resultados positivos por meio desses recursos.

A cada acréscimo de 0,01 [kg/s] na vazão mássica na saída, ocorre um aumento de 12 pontos no ID. Para obter o mesmo ganho apenas por meio de alterações em outros fatores, seria necessário reduzir aproximadamente 209 [g] de massa ou ainda diminuir 1,03 [N·m] no torque requerido, o que seria praticamente impossível devido às condições atuais do produto.

A evolução do ID foi surpreendente, uma vez que o componente projetado pela Prática Klimaquip possuía um valor de 291,824, enquanto o projetado no presente trabalho alcançou 420,708, representando uma otimização de 44,40%. Percebe-se que, para obter o aumento no fator de maior influência, a vazão mássica, foi necessário um leve aumento na massa e no torque requerido. No entanto, tais mudanças resultaram em um significativo aumento no desempenho da turbina. O progresso no crescimento do ID foi superior ao esperado inicialmente, que era de 20,00%, demonstrando uma enorme superioridade na projeção alcançada.

## REFERÊNCIAS

- ADEEB, Ehsan; MAQSOOD, Adnan; MUSHTAQ, Ammar. Effect of number of blades on performance of ceiling fans. **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, v. 28, 2015.
- ANSYS Inc. Displaying Contours and Profiles, **AFS Enea**, 2009. Disponível em: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node892.htm#:~:text=ANSYS%20FLUENT%20allows%20you%20to,%2C%20isobars%2C%20etc.>. Acesso em: 07 out. 2022.
- ANSYS Inc. Pathlines, **AFS Enea**, 2009. Disponível em: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/tg/node401.htm#:~:text=Pathlines%20are%20the%20lines%20traveled,the%20wake%20of%20the%20module>. Acesso em: 07 out. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR: 14518: Sistemas de ventilação**. Rio de Janeiro, 2000.
- AVISON, David E. et al. Action research. **Communications of the ACM**, v. 42, n. 1, p. 94-97, 1999.
- BARBOSA, Rodolfo dos Santos. **Projeto estrutural do cubo do rotor de uma turbina hidráulica tipo Kaplan**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, p. 89, 2013.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento de Desenvolvimento Energético. Brasília, 2011.
- CAMARGO, Eduardo Breitenbach; WEBLER, Geovane; CASSOL, Fabiano. Simulação numérica de escoamento sobre perfil aerodinâmico eppler 423. **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, v. 5, n. 2, 2018.
- CARBÓ, Héctor Mario. Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações. **ArcelorMittal Brasil**, São Paulo, v. 29, 2008.
- ECKARDT, D. Detailed flow investigations within a high-speed centrifugal compressor impeller. **ASME Journal of Fluids Engineering**. v. 98, 1976.
- ECKARDT, D. Flow field analysis of radial and backswept centrifugal compressor impellers. I-Flow measurements using a laser velocimeter. **Performance prediction of centrifugal pumps and compressors**, p. 77-86, 1979.
- ESSS. Fluidodinâmica Computacional: o que é?. **Blog ESSS**, 2016. Disponível em: <https://www.esss.co>. Acesso em: 13 set. 2022.
- FANG, Xiande; XU, Yu. Development of an empirical model of turbine efficiency using the Taylor expansion and regression analysis. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 2937-2942, 2011.
- FERREIRA, Paulo Créder Gonçalves. **Análise Teórica e Experimental das Características de Desempenho Aerodinâmico de Ventiladores Centrífugos com Pás Auxiliares**. Monografia (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.
- FORONI, F. D.; MENEZES, M. A.; MOREIRA FILHO, L. A. Uso do aço AISI 409 para fabricação de pás para ventiladores. **CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. p. 15-19, 2006.
- GIRAULT, Vivette; RAVIART, Pierre-Arnaud. **Finite element approximation of the Navier-Stokes equations**. Berlin: Springer, 1979.
- HATHAWAY, Michael D. et al. **Experimental and computational investigation of the NASA low-speed centrifugal compressor flow field**. 1993.
- KOTHARI, Chakravanti Rajagopalachari. **Research methodology: Methods and Techniques**. 2ª ed. New Age International Publishers, 2004.
- KOTHE, Leonardo Brito; LUZ, José Leandro Rosales; VECINA, Tanit Daniel Jodar. Projeto de otimização de um ventilador centrífugo através da dinâmica dos fluidos computacional (CFD). **Revista Técnico-Científica**, 2016.

LIN, Sheam-Chyun; HUANG, Chia-Lieh. An integrated experimental and numerical study of forward – Curved centrifugal fan. **Experimental thermal and fluid science**, v. 26, n. 5, p. 421-434, 2002.

MADHWESH, N.; KARANTH, K. Vasudeva; SHARMA, N. Yagnesh. Impeller treatment for a centrifugal fan using splitter vanes – A CFD approach. **Proceedings of the World Congress on Engineering**. 2011

Marcas de eletrodomésticos se reinventam para manter clientes e aumentar vendas. **JC Negócios**, UOL, 2015. Disponível em: <https://jc.ne10.uol.com.br/canal/economia/noticia/2015/07/21/marcas-de-elerodomesticos-se-reinventam-para-manter-clientes-e-aumentar-vendas-191155.php>. Acesso em: 17 out. 2022.

MARIANO, Gabriel Casseiro. **Estudo do escoamento imiscível água/óleo mediante experimentação em Célula de Hele-Shaw e Simulação CFD**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, p. 85, 2008.

OLIVEIRA, Bruno José. **Fabricação de peças complexas em chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304 utilizando o método de estampagem incremental**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

OTAM VENTILADORES INDUSTRIAIS. Manual Técnico. Boletim Técnico nº 1: O que é um Ventilador. Porto Alegre, 2020.

PINI, Matteo et al. Preliminary design of a centrifugal turbine for organic rankine cycle applications. **Journal of Engineering for Gas turbines and power**, v. 135, n. 4, 2013.

PINTO, Runa Nivea et al. Computational fluid dynamics in turbomachinery: a review of state of the art. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 24, n. 3, p. 467-479, 2017.

PRÁTICA KLIMAQUIP. **Desafio Prática de Inovação**. Rev. 1, p. 8, 2022.

ROBALINHO, Eric; DECKMANN, Indhirha. Análise Numérica e Sensoriamento Inteligente usando técnicas de CFD. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 2, p. 100-111, 2019.

SANTOS, Felipe Ludwig dos. **Dimensionamento e projeto de um ventilador centrífugo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013.

SANTOS, Felipe Ludwig dos. **Análise numérica de ventilador centrífugo**. Monografia (Pós-graduação em Engenharia Industrial) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Pannambi, 2017.

SANTOS, Túlio Fernandes do. **Estudo sobre a abertura e estabilidade do arco MIG na soldagem de alumínio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, p. 58, Florianópolis, 2000.

SIMAS, João Dias. **Fundição de turbinas em aluminetos de titânio**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, p. 171, 2015.

SUCCI, Sauro. **Computational Fluid Dynamics (IACS)**. IACS-SEAS Harvard, Cambridge, 2015, set. 2015.

SUN, Rui; XIAO, Heng. CFD–DEM simulations of current-induced dune formation and morphological evolution. **Advances in water resources**, v. 92, p. 228-239, 2016.

TOLEDO, Gabriela Pereira; ROSA, Henrique Márcio Pereira. Simulação numérica de ventiladores centrífugos com variação do tipo da voluta: normal e com reentrância. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 5, p. 0723-0731, 2020.

Sinhorelli, Luciane Bassi. **Catálogo Técnico de Ventilação Industrial**. Motolovent. 2019.

STOJANOVIC, Blaza et al. Application of aluminum and aluminum alloys in engineering. *Applied Engineering Letters*, 2018.

VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson education, 2007.

ZHAO, Zhiqi et al. Effect of coolant mass flow rate of dirt purge hole on heat transfer and flow characteristics at a turbine blade tip underside. **ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air**, v.5<sup>a</sup>, 2018.