



Modelagem de um Ventilador Centrífugo pelo Método CFD: Estudo de Caso Prática Klimaquip

Alex Geovani de Souza

algeovane@gmail.com

Lyncoln Almeida Rezende

lyncolnrezende@gmail.com

Marcelo Pereira Martins

marcelo240100martins@gmail.com

Matheus Costa Pereira

matheusc_pereira@hotmail.com

Paulo Sérgio Ferreira

paulo.ps.sergiof@gmail.com

Orientador: Prof. Me. Francisco Reginaldo da Rosa

Coordenação de curso de Engenharia Mecânica

Resumo

Com o desenvolvimento do projeto, espera-se atender as especificações técnicas para que seja possível criar um ventilador centrífugo robusto, eficiente e com alto custo-benefício para a empresa Prática Klimaquip. Para alcançar tais propósitos, serão utilizadas análises computacionais fluidodinâmicas na voluta, com o software Ansys Fluent que realiza tais análises CFD (Computational Fluid Dynamics). Torna-se necessário uma avaliação prévia da turbina e de seus influentes, com isso, objetiva-se aumentar o ID (Índice Desempenho) do produto, com a perspectiva de evolução de 20% em relação ao ventilador atual, além de compreender o que cada fator influi no desdobramento do projeto. Este estudo caso de caso será feito como uma pesquisa aplicada e realizará abordagens qualitativas e quantitativas, com o uso de pesquisa-ação. Diante disso, serão estudadas com o auxílio de análises e simulações a vazão mássica, o torque requerido e a massa da estrutura para compreender o peso de cada um dos fatores e encontrar a elevação do ID e aumentar a performance atual do ventilador.

Palavras-chave: Análise CAE. Análise Fluidodinâmica. Fornos. Turbina. Ventilador Centrífugo.

1. Introdução

Nas indústrias há uma grande variedade de aplicações dos ventiladores centrífugos, além disso, há uma alta competitividade entre as empresas que constantemente buscam melhor eficiência, maior qualidade e menor custo de seus

produtos. Diante disso, os investimentos para um equipamento de alta modernização e com um índice de desempenho elevado tornam-se cada vez mais presentes e necessários.

O alto rendimento do maquinário e o consumo eficiente da energia elétrica são fatores altamente relevantes, isto posto, busca-se ventiladores centrífugos que possam ser amplamente utilizados e atenda tais requisitos (TOLEDO; ROSA, 2020). Com o passar dos anos e o aumento da globalização, o tempo se tornou algo mais escasso, e com isso, as tecnologias devem propor soluções rápidas e práticas, inclusive nos momentos de preparar as refeições. À vista disso, de acordo com JC Negócios (2015), na 10ª edição da feira Eletrolar Show, as indústrias eletrodomésticas buscam cada vez mais aprimorar a eficiência de seus produtos. O Plano Nacional de Eficiência Energética (2011), corrobora com as informações citadas.

O ventilador centrífugo utilizado para estudo de caso e identificação de possíveis melhorias foi disponibilizado pela empresa Prática Klimaquip, localizada em Pouso Alegre, no Sul de Minas Gerais. A empresa tinha o intuito de desenvolver um ventilador mais robusto, para substituir o existente, entretanto, com menor custo e com um alto índice de desempenho, mas, sem alteração da voluta, com modificações apenas na geometria do ventilador.

Salienta-se que no ventilador projetado pela empresa para modificação contém 6 pás e não há angulação de entrada e de saída, além disso, todas suas palhetas possuem o comprimento inteiro, ou seja, do cilindro de restrição até a sua borda. O material das pás no estudo de caso inicial foi o alumínio (Al) e o fluido circulante no ventilador foi o próprio ar.

O modelo desenvolvido no presente trabalho para substituir o atual proposto pela Prática Klimaquip é demonstrado na Figura 1, é possível identificar o ventilador e suas pás, que estão com maior transparência, nele também há outros elementos como chapas e turbinas. Nota-se que ele é composto por 12 pás inclinadas.

Figura 1: Ventilador Centrífugo projetado (I)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

O ventilador ofertado para análise tem a finalidade de efetuar a recirculação de ar em um forno de alta velocidade, com a utilização da CFD (*Computational Fluid Dynamics*), que segundo ESSS (2016), é o ramo do conhecimento que realiza simulações numéricas de escoamento de fluidos, além de outras simulações relacionadas com a transferência de calor e as reações químicas.

A utilidade da fluidodinâmica computacional neste estudo é de suma importância para que seja possível compreender o comportamento do fluido dentro do ventilador desde a entrada até a saída, deste modo, torna-se factível a análise das melhorias para que se encontre o melhor resultado possível, pelo fato que o software possui modelos matemáticos para realização de cálculos extremamente complexos. A vazão mássica do fluido pode ser descrita como a quantidade de massa de uma substância que passa por algo durante uma unidade de tempo, e sua unidade será kg/s.

Um estudo numérico e experimental tem inúmeras contribuições que possibilitam melhorias na performance de ventiladores centrífugos (KOTHE; LUZ; VECINA, 2016). Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados três softwares da Ansys, relacionados a seguir com suas funções:

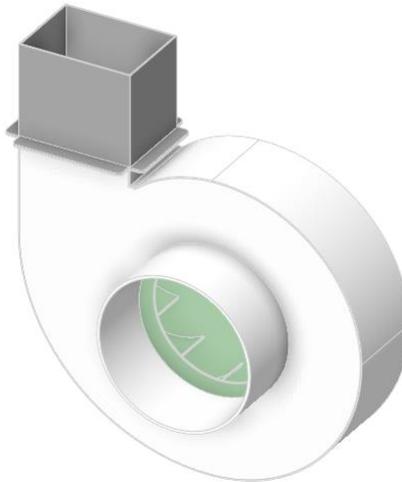
- Workbench: Árvore e estrutura do projeto;
- SpaceClaim: Geometria;
- Fluent: Simulação fluidodinâmica computacional.

Os três pontos de maior influência, descritos pela Prática Klimaquip, para que se obtenha um melhor resultado são:

- Massa da turbina: responsável por deixar o produto mais leve e com um custo mais baixo;
- Torque requerido: com o objetivo de aumentar o tempo de vida útil;
- Vazão mássica de ar na saída: Designada para otimizar o tempo de cocção do alimento.

Na Figura 2 torna-se possível observar o ventilador completo, sem a transparência presente da figura anterior.

Figura 2: Ventilador Centrífugo projetado



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

No âmbito da Engenharia de desenvolvimento de novos produtos ou melhorias de existentes, constatou-se que o gasto com protótipos físico, mão de obra e gastos desnecessários com inúmeros testes em experimentos reais elevava o custo e estendia drasticamente o tempo do projeto. Portanto, com a finalidade de evitar desperdícios e agregar diversos valores, foram adotados softwares que utilizam métodos computacionais como o CAD (*Computer Aided Desig*) e o CAE (*Computer Aided Engineering*). A engenharia tem função primordial no aperfeiçoamento do produto, com isso, para evitar gastos com protótipos e testes físicos, são utilizados estudos intermediários com o uso do CFD (CAMARGO; WEBLER; CASSOL, 2018).

O projeto tem como objetivo a melhoria de uma turbina exemplo, tal como descrita anteriormente, utilizada no fluxo de ar quente de um forno, para que se aumente a eficiência do produto. O estudo apresentou um Índice de Desempenho altamente superior comparado com o disponibilizado pela Prática Klimaquip e com o de outras equipes, em uma competição acadêmica, que também buscavam um resultado melhor do que o disponibilizado pela companhia. Além do uso de grandezas físicas para calcular o diferencial de pressão, de temperatura e de torque, foram utilizadas diversas ferramentas da área de modelagem virtual e simulação 3D.

Ressalta-se a importância de todo avanço tecnológico, no qual, possibilita análises cada vez mais complexas e precisas de peças e equipamentos. Uma simulação hoje considerada simples e rápida, há alguns anos era algo praticamente impossível, visto que, houve uma rápida evolução avanço da tecnologia computacional (SUN; XIAO, 2016). Não obstante, deixa-se claro que é necessário profissionais com conhecimento especializado do software e da área para que possam interpretar e avaliar os resultados obtidos de forma precisa.

Foram feitos vários testes e investigações para encontrar os principais fatores que influenciavam no projeto para encontrar o modelo ideal. Com isso, 12 simulações foram efetuadas para que se encontre um maior valor possível de vazão mássica, juntamente com a redução do torque requerido.

2. Desenvolvimento

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 e 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 com a utilização do método de volumes finitos.

Com a utilização do sensoriamento numérico, torna-se factível quantificar valores, estudar fenômenos de forma clara, ao qual, possibilita a avaliação precisa de problemas propostos (ROBALINHO; DECKMANN, 2019). O método de elementos finitos é extremamente útil para cálculos precisos e complexos para determinação de tensão, deformação e vazão (FORONI; MENEZES; MOREIRA FILHO, 2006).

Lin e Huang (2002) realizaram testes com uma ventoinha centrífuga e ao avaliar a comparação dos resultados obtidos experimentais aos numéricos, as simulações com o uso do CFD possuíam soluções próximas e o custo extremamente inferior.

Para o uso ou a troca de diversos materiais, é necessário avaliar aspectos técnicos, soldagem, acabamento resultante e realizar a investigação dos problemas a serem solucionados (SANTOS, 2000). Ligas a base de alumínio possuem facilidade em seu processo, além de garantirem uma alta resistência ao desgaste, um custo baixo e uma formidável relação potência-peso (STOJANOVIC et al., 2018). Ferro, cromo e níquel combinados com outros elementos de liga auxiliam de forma significativa nas propriedades mecânicas no material, com isso, altera-se a análise do composto (OLIVEIRA, 2018). Alumínios de titânio nas turbinas reduzem o peso, além de possuírem uma menor inércia de rotação, com isso, possibilita-se o aumento da velocidade desejada (Simas, 2015).

Para conservar de forma mais específica as propriedades mecânicas em temperaturas elevadas, utiliza-se uma pequena rede de carbonetos de cromo, ademais, para evitar corrosões, diminui-se o uso de carbono (CARBÓ, 2008). Importante salientar que o aproveitamento do material deve estar diretamente ligado com a verba disponível, menciona-se que este pode apresentar os maiores benefícios possíveis, contudo, se não for economicamente viável, sua serventia será contestada. O alumínio possui vastos benefícios, além dos citados anteriormente, a possibilidade de combiná-lo com outros materiais, auxilia no momento da definição do material (BARBOSA, 2013).

Estudos recentes atualizaram a angulação de pás, sendo estas bem menores do que a definida por Eckardt (1976 e 1979), ao qual, definiu a saída que equivale a 90°. Hathaway et al. (1993), cita experimentos realizados com uma angulação copiosamente inferior a 90°. Após a definição da curvatura das pás, o próximo passo é a escolha dos ângulos de entrada e saída. Neste item, busca-se a eficiência máxima do sistema. Recomenda-se que os ângulos de entrada das palhetas estejam entre 20° e 45° e os de saída entre 40° e 60° (SINHORELLI, 2019).

Um planejamento inadequado das pás é o causador de mudanças inesperadas de direção, com isso, pode afetar diretamente o rendimento e a energia dissipada do rotor ao fluido (SANTOS, 2013). O número de pás está diretamente ligado com os

resultados de vazão, com isso, ventiladores centrífugos costumam ter um número de pás que varia entre 4 e 16 (FERREIRA, 2013).

O aumento da vazão mássica garante a evolução da sucção e a melhoria na performance da transferência de calor (ZHAO et al., 2018).

2.1. Fluidodinâmica computacional (CFD)

O CFD foi desenvolvido com o objetivo de analisar e compreender fenômenos físicos de forma sucinta. Tal fenômeno analisado pode ser observado em diversas aplicações, tais como peças e ferramentas. Com a sua utilização é possível avaliar inúmeros pontos que possuem influência no desenvolvimento do projeto. PINI et al. (2012) garantem a qualidade e assertividade do CFD no estudo de qualquer tipo de fluxo. O uso da fluidodinâmica computacional tem a responsabilidade de analisar os escoamentos de fluidos, transferência de calor, reações químicas, além de outros fenômenos. Com a aplicação de métodos numéricos, o CFD representa uma função primordial nos projetos e análises que avaliam o fluxo de turbinas compressoras e bombas centrífugas (PINTO, 2017).

Com o surgimento da metodologia CFD, foi possível resolver as equações de Navier-Stokes (GIRAULT; RAVIART, 1979), pelo fato, que dependendo da complexidade do modelo, era totalmente inviável sua solução. tornou-se necessário o desenvolvimento de um software que se resolve tais problemas em inúmeros cenários.

Para a análise do problema em questão, é extremamente importante que as etapas sejam feitas de formas adequadas. Compreende-se que a análise das tensões, dos resultados obtidos e de possíveis melhorias não depende apenas da qualidade do software, mas também do conhecimento do usuário.

Possibilita-se compreender a alteração da resistência e os avanços do fluxo do fluido de ar com a alteração de itens das pás, tais como, espessura, quantidade, comprimento, largura e angulação. Deste modo, ao usufruir do software, há possibilidades de realizar profusos testes e avaliar as melhorias ou perdas em cada mudança da estrutura, responsável por reduzir drasticamente a mão de obra, o custo e o tempo, se caso tal estudo fosse feito com protótipos físicos.

2.2. Possibilidade de Ligas Materiais

Dentre os principais materiais utilizados na fabricação de pás e turbinas que compõem os ventiladores centrífugos, dispõe-se do aço inoxidável, das ligas de titânio, de compósitos a base de fibra de carbono e resinas de união para tais fibras. O principal e também utilizado após tais estudos bibliográficos foi o alumínio.

Os dois principais motivos para o uso do alumínio é o seu baixo valor de densidade, que gera um aumento de possíveis aplicações e o preço amplamente acessível, o que influencia no valor do produto. Destaca-se também a boa ductilidade e usinabilidade mais viável quando comparada com outros materiais, pelo fato de possuir um grau de Dureza Brinell de 18,4 [HB], enquanto a do titânio é de 102,8 [HB] e do aço inoxidável de aproximadamente 82 [HB].

O aço inoxidável também possui grande valia neste segmento pelo fato de possuir uma elevada resistência mecânica e resistência a corrosão, ao qual, o Alumínio 6061-T6 possui 50% e o 6061-T6 e o Titânio 70% da resistência mecânica em relação ao Aço Inoxidável 304. Tais fatores são de suma relevância na vida útil dos equipamentos.

Pelo fato de possuírem boas usinabilidades, há facilidade no processo de fabricação das ligas de alumínio, sendo assim, com o uso de sistemas CAM juntamente com o CNC, é possível fabricar geometrias altamente complexas, estas ligas também são passíveis ao processo de soldagem. Outra vantagem ao utilizar ligas de alumínio é a capacidade de moldagem que representa a possibilidade de sua fundição em moldes com geometrias predeterminadas. Na Tabela 1 é exemplificada algumas propriedades mecânicas de algumas ligas de alumínio que são suscetíveis a moldagem.

Tabela 1: Propriedades mecânicas das ligas de alumínio

Liga	Têmpera	Limite de Resistência LR (MPa)	Limite de Escoamento LE (MPa)	Alongamento A* (%) * 50 mm	Dureza (HB ¹⁵)
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

Fonte: Revista Ferramental. Acesso em: <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/aplicacao-ligas-alumunio-moldes-para-injecao-termoplasticos>. Disponível em: 18 de ago. 2022.

As ligas mais nobres como as ligas de titânio e fibras de carbono, por exemplo, são utilizadas na fabricação de turbinas que exigem maior desempenho e menos densidade, tais como, as turbinas aeronáuticas. Além disso, enfatiza-se a dificuldade nos processos de fabricação de ambos os materiais, pois possuem elevada classe de dureza para processos, tais como de soldagem e usinagem.

Quando o aço a ser empregado possui contato direto com os alimentos, o aço inoxidável polido e o aço inoxidável 304 tornam-se boas alternativas, tal que também são utilizados amplamente em fornos, pois apresentam bons índices em uma temperatura elevada. Além disso, ele não acumula sujidades com facilidade, fator que simplifica a limpeza das pás e evita a contaminação por bactérias que poderiam se proliferar. Entretanto, o custo do material e da mão de obra para o uso deste, é altamente elevado.

2.3. Principais Fatores para o Cálculo

Neste trabalho, três fatores devem ser levados em consideração para se calcular o resultado, também denominado de Índice de Desempenho, aos quais são: massa do ventilador, torque requerido e vazão mássica na saída. Todos possuem importância no valor final, entretanto, alguns têm mais importância do que outros, com uma influência maior na obtenção do ID.

2.3.1. Massa do Ventilador

O primeiro fator a ser analisado é a massa do ventilador, representada pela quantidade de matéria que compõe a estrutura. Neste caso, são todas as peças que formam a estrutura final do produto, tais como chapas metálicas, pás de turbina. Apesar de ter influência no resultado, este fator é o de menor importância, com pouca influência no Índice de Desempenho, com isso, é possível desenvolver estruturas robustas sem tanta perda no apuramento.

2.3.2. Torque Requerido

O segundo fator, no qual, a atenção foi maior do que na massa é o torque requerido, representado pela grandeza vetorial necessária pela turbina para agir na rotação das pás. O torque requerido está diretamente ligado com a capacidade

energética do motor. Salienta-se que este fator decresce inversamente a vazão mássica, perante o exposto, tem-se em vista que é necessário equilibrá-los.

2.3.3. Vazão Mássica

O índice mais importante para a avaliação dos resultados é a vazão mássica na saída, neste caso, a vazão é descrita pela quantidade de ar resultado na saída do ventilador. A vazão de massa pode ser descrita como a massa de um elemento, ao qual, atravessa uma superfície em uma unidade temporal (ADEEB; MAQSOOD; MUSHTAQ, 2015).

Kloss et al. (2012) citam experimentos realizados com o estudo do fluxo de massa e garante que a vazão mássica de casos simulados fisicamente e virtualmente apresentam resultados agradáveis. O aumento da vazão supri as necessidades requisitadas, conseqüentemente, este coeficiente foi o mais trabalhado durante o desenvolvimento do projeto, conseguinte, foram realizados diversos testes até encontrar o valor adequado.

2.4. Cálculo da Vazão e do Torque

A vazão em um ventilador pode ser representada pela quantia de fluido em volume, no qual, movimenta-se na unidade de tempo, sendo esta, independente da densidade do ar (SANTOS, 2017). A vazão mássica de cada fase com associação do fluxo de canal aberto é descrita pela equação 1. Além disso, para fluxos convectivos, é utilizada a equação 2.

$$\dot{m}_{fase} = \rho_{fase} \cdot (A_{fase}) \cdot (v) \quad (\text{Eq. 1})$$

Na equação 2 é demonstrado o cálculo da vazão mássica em uma superfície, é utilizado o somatório do valor da densidade do campo pelo produto escalar do vetor velocidade e do vetor área. Tal equação é a utilizada pelo Fluent para o cálculo da integral da superfície.

$$\int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \rho_i \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \quad (\text{Eq. 2})$$

Pela equação 3, também utilizada pelo Fluent, calcula-se a média ponderada em massa da região, também é utilizada uma integral para cálculo da taxa de massa do fluxo.

$$\frac{\int \phi \rho |\vec{v} d\vec{A}|}{\int \rho |\vec{v} d\vec{A}|} = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i |v_i \cdot A_i|}{\sum_{i=1}^n \rho_i |v_i \cdot A_i|} \quad (\text{Eq. 3})$$

Para calcular o torque requerido, usa-se equação 4. No qual o valor do momento calculado é gerado pelos produtos cruzados dos vetores de pressão e força.

$$\vec{M}_A = \vec{r}_{AB} \times \vec{F}_p + \vec{r}_{AB} \times \vec{F}_v \quad (\text{Eq. 4})$$

Para o cálculo da quantidade de momento movimento, em uma palheta de turbina, usa-se a equação 5, que descreve o escoamento permanente.

$$T = \int \iint_S r v_\theta \rho \vec{v} \cdot \hat{n} dS \quad (\text{Eq. 5})$$

3. Metodologia

No trabalho foi desenvolvido um estudo de caso da empresa Prática Klimaquip, com a finalidade de aprimorar um ventilador centrífugo e de aumentar a eficiência deste equipamento. Quanto à natureza, foi utilizada a pesquisa aplicada, pelo fato de buscar soluções e respostas para obstáculos enfrentados por uma organização empresarial (KOTHARI, 2004). A forma de abordagem foi tanto qualitativa, quanto quantitativa, pelo fato de avaliar e estudar medições e termos que podem ser expressos em quantidade e por ter a preocupação com a qualidade do fenômeno (KOTHARI, 2004). Em relação aos procedimentos, utilizou-se a pesquisa-ação, a qual busca a associação entre a teoria e a prática (AVISON et al., 1999).

A melhoria da eficácia da turbina é o ponto chave no desenvolvimento, Fang e Xu (2011) realizaram tal experimento relacionado com a efetividade de uma turbina com o uso de modelos de valor médio e com a aplicação da Série de Taylor. O componente estudado é utilizado em fornos, com a função de executar a recirculação de ar quente, portanto, quanto maior a pressão de ar na saída da turbina, menor será

o tempo de cocção do alimento, desde que essa massa de ar seja direcionada no local adequado.

O projeto foi elaborado com base nas seguintes diretrizes:

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

Para que o ventilador seja considerado, deve-se obter um Índice de Desempenho superior a 291,80, o qual é o atual disponibilizado pela empresa. Este índice pode ser calculado com a utilização da equação 6, desenvolvida pela Prática Klimaquip (2022). Com o auxílio da figura 3, torna-se possível compreender as etapas para a realização do Projeto.

$$ID = 1200 \cdot Q_{massa} + \frac{11000}{m_{ventilador}} + \frac{100}{T_{requerido}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

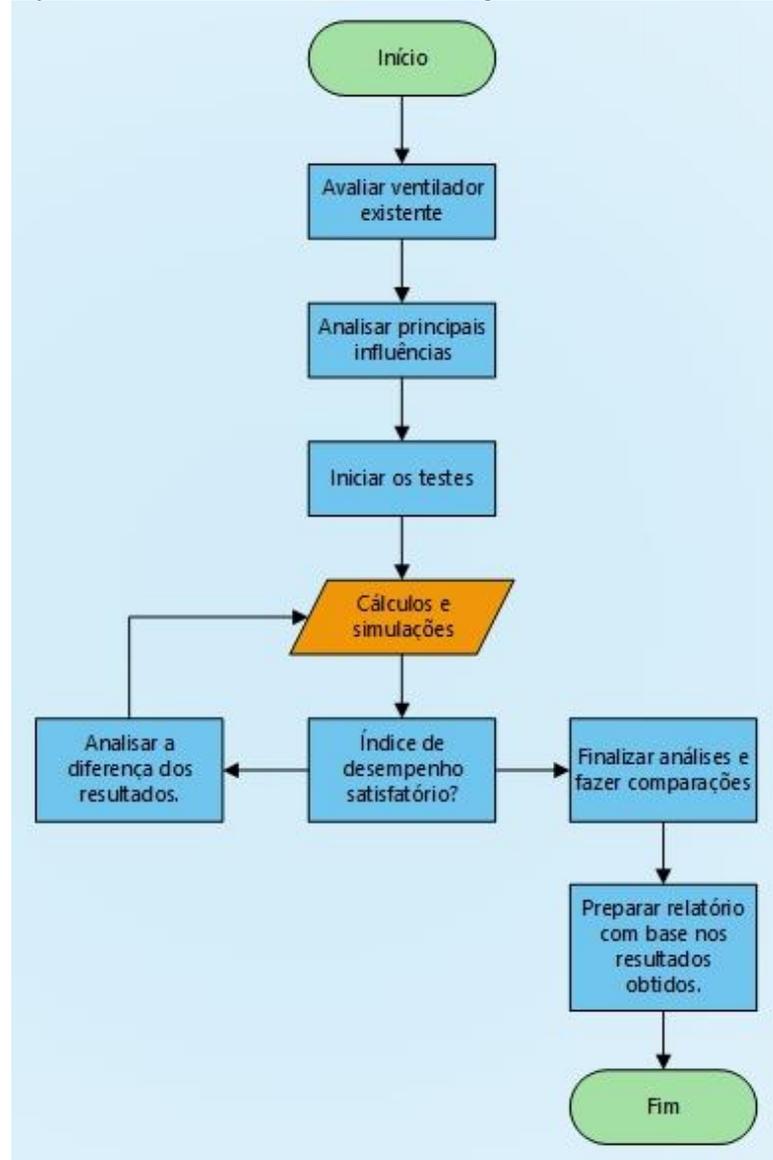
ID: Índice de desempenho

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

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

$T_{requerido}$: Torque requerido [N•m]

Figura 3: Etapas de desenvolvimento do Projeto-Ventilador Prática Klimaquip



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo foi desenvolvido com base nas seguintes etapas, com intuito de que todos os passos fossem feitos e verificados de forma correta e precisa. Será necessário conhecer os fundamentos sobre o uso do CFD, possíveis materiais e suas utilizações, fatores que influenciam o cálculo, importância e cálculo da vazão, vistos no capítulo de “Desenvolvimento”, de modo a continuar o estudo com a construção da geometria e simulações e análise de resultados e discussão.

4.1. Elaboração da Geometria

Para que a alteração e elaboração da nova geometria fosse proposta, além de possuir o modelo matemático, foi realizada uma análise do ventilador físico, no qual, foi produzido com alumínio e com 6 pás. Na figura 4, observa-se o ventilador atual estudado, projetado pela Prática Klimaquip.

Figura 4: Ventilador Prática Klimaquip



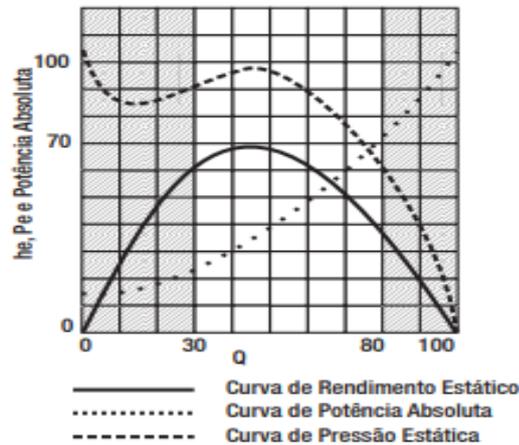
Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

A alteração do posicionamento, da curvatura e da angulação das pás está diretamente ligada com o rendimento do ventilador, diante disso, a primeira modificação na estrutura foi a utilização de suas pás com curvatura para frente que auxilia em sua vazão na saída.

A curvatura é um fator que resulta no aumento da taxa de fluxo, com o intuito de gerar um ganho em relação a outros ventiladores centrífugos de tamanho e velocidade idênticos (SANTOS, 2013). Ademais, salienta-se a importância de manter o mesmo raio de curvatura em regiões próximas à entrada das pás (FERREIRA, 2013).

O gráfico 1 possibilita a identificação e comparação de curvas, aos quais são: rendimento de acordo com a potência absoluta, com o rendimento estático e com a pressão estática.

Gráfico 1: Curva de rendimento



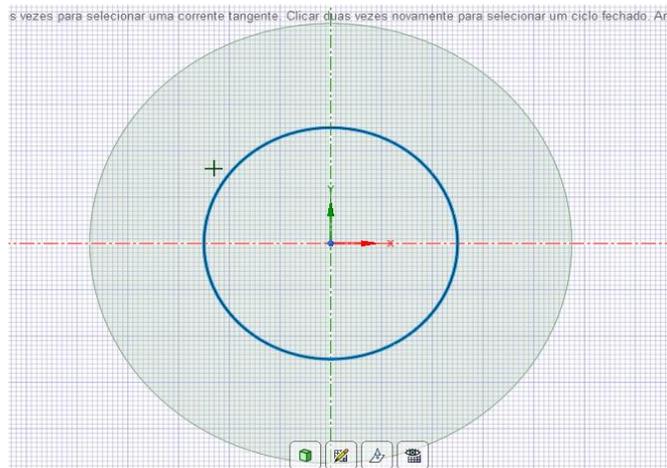
Fonte: OTAM Ventiladores Industriais (2020). Disponível em: https://solerpalau.com.br/biblioteca/documento/Manual_Tecnico-2020.pdf. Acesso em: 05 out. 2022.

Observa-se que a curva de pressão estática acompanha a curva de rendimento estático, região que apresenta uma pressão crescente juntamente com o aumento da vazão. Diante do Referencial Bibliográfico, foram feitos diversos testes com angulações dentro destes intervalos e a maior eficácia foi encontrada com a angulação de 35° de entrada e 60° na saída. Com as hipóteses consultadas cientificamente e com as simulações posteriores, o valor definido para a quantidade de pás mais eficiente foi de 12.

4.1.1. Desenho

A primeira etapa desenvolvida foi a circunferência de referência para localizar a entrada do fluido no ventilador, tal como descrito na figura 5.

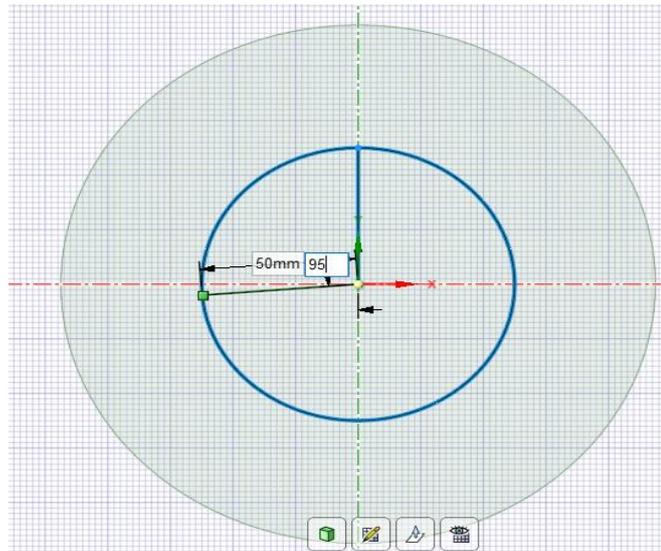
Figura 5: Circunferência referência



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Após isto, foi traçado uma linha vertical da parte superior o círculo interno até o centro, em seguida, uma linha horizontal com um ângulo de 95° , representado pelo somatório dos ângulos de entrada e de saída, descrito na figura 6.

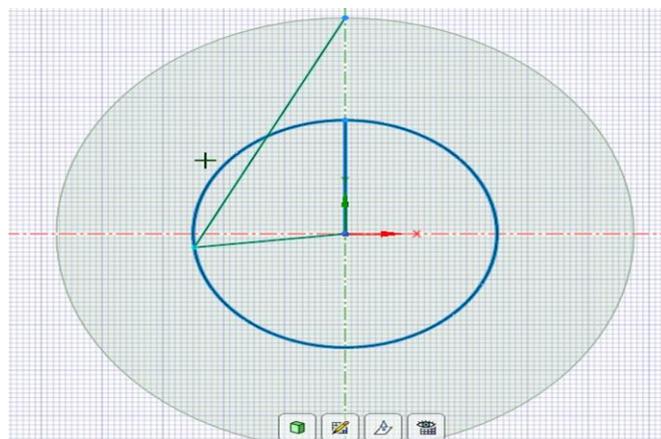
Figura 6: Linhas referências



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Traça-se uma linha da ponta desta reta horizontal até a circunferência, em seu ponto central, demonstrado na figura 7.

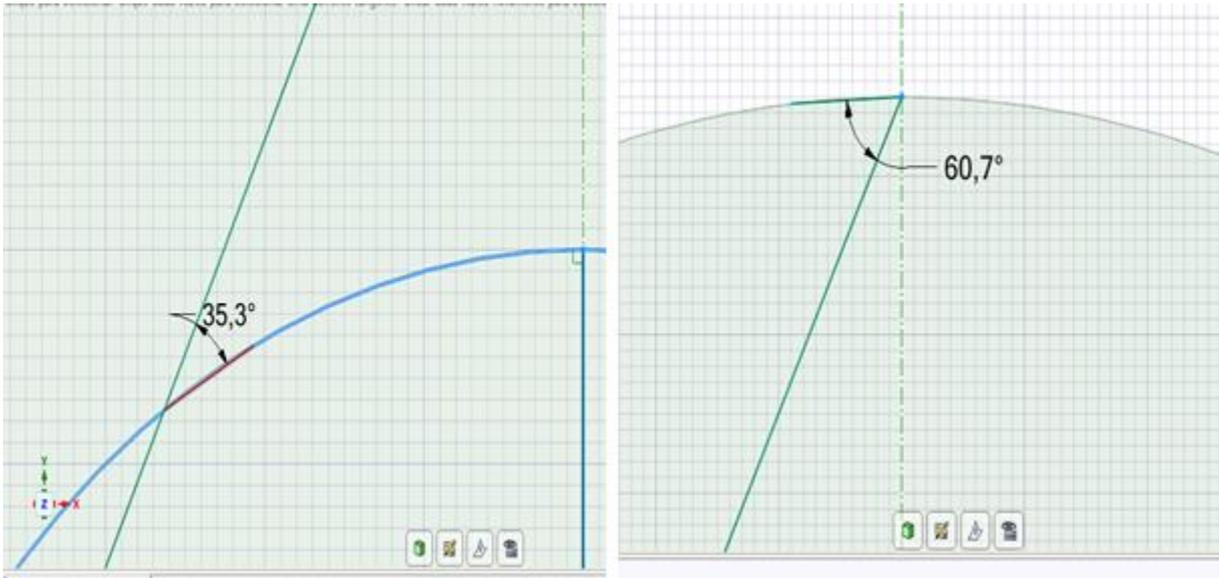
Figura 7: Retas



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Após isto, é possível avaliar os ângulos de entradas e saídas, ao qual, visualiza-se na figura 8.

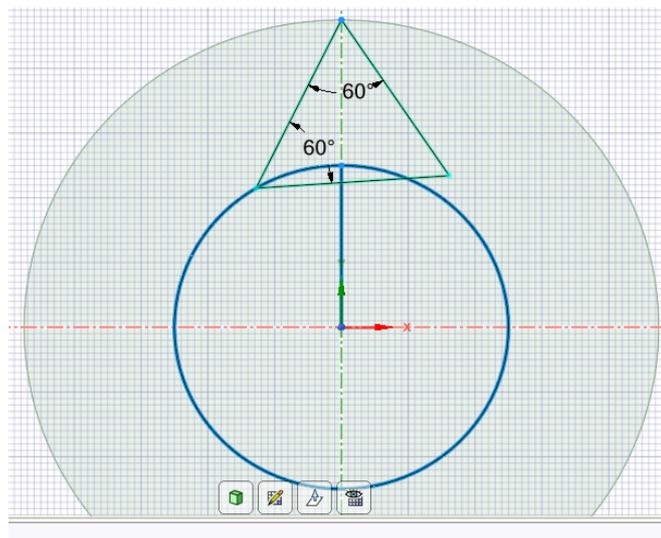
Figura 8: Angulação de entrada e de saída



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Com a certeza da angulação, é feito um triângulo equilátero com ângulos de 60° para que se mantenha tal angulação na saída, representado na figura 9.

Figura 9: Triângulo equilátero para corte



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

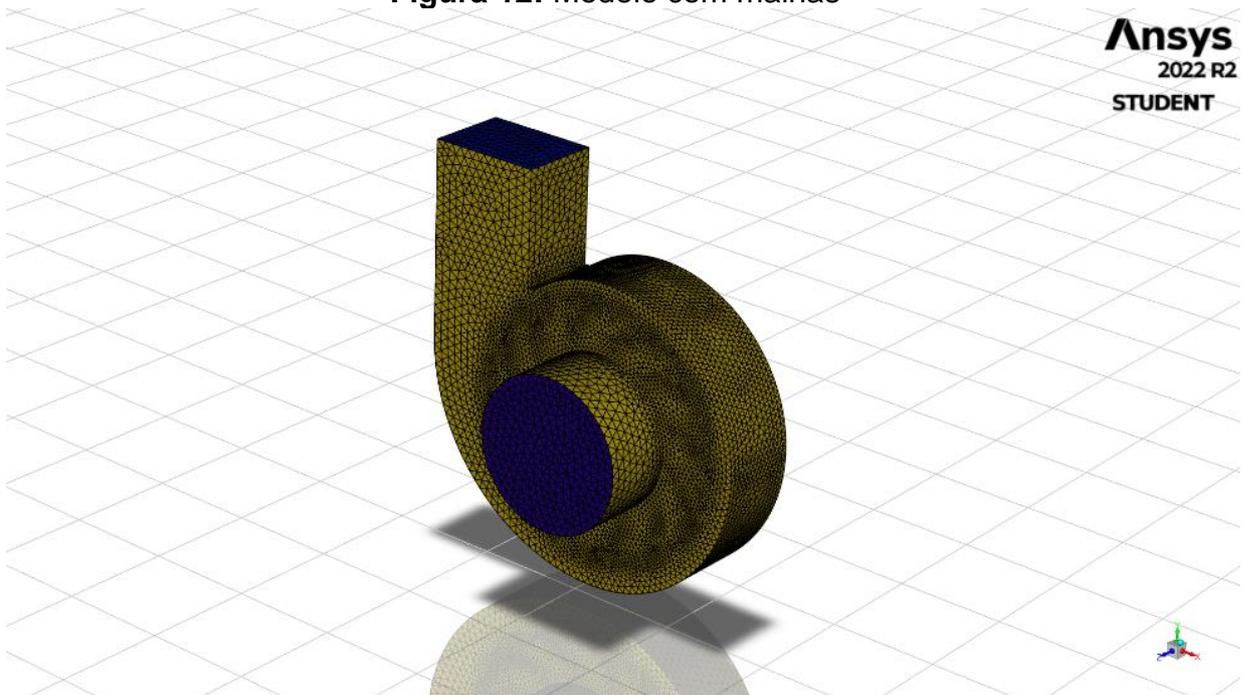
Com isso, tem-se os ângulos dos graus internos e uma circunferência ao seu redor que proporciona a realização dos recortes adequados para criação da pá, deixando apenas o perfil da pá necessário e o resto é excluído, demonstrado na figura 10.

Associação Brasileira das Normas Técnicas (ABNT), tais como a ABNT NBR 14518 (2000).

Foram feitas 250 iterações para que se possibilitasse que a temperatura e pressão estabilizassem e atingissem um ponto ótimo, além disso, o refino das malhas foi alto, desta forma, possibilita-se uma análise mais adequada do resultado. Para o aprimoramento do desempenho das pás, deve-se analisar criteriosamente os pontos de separação, ao qual, é viável com o uso do CFD (MADHWESH; KARANTH; SHARMA, 2011).

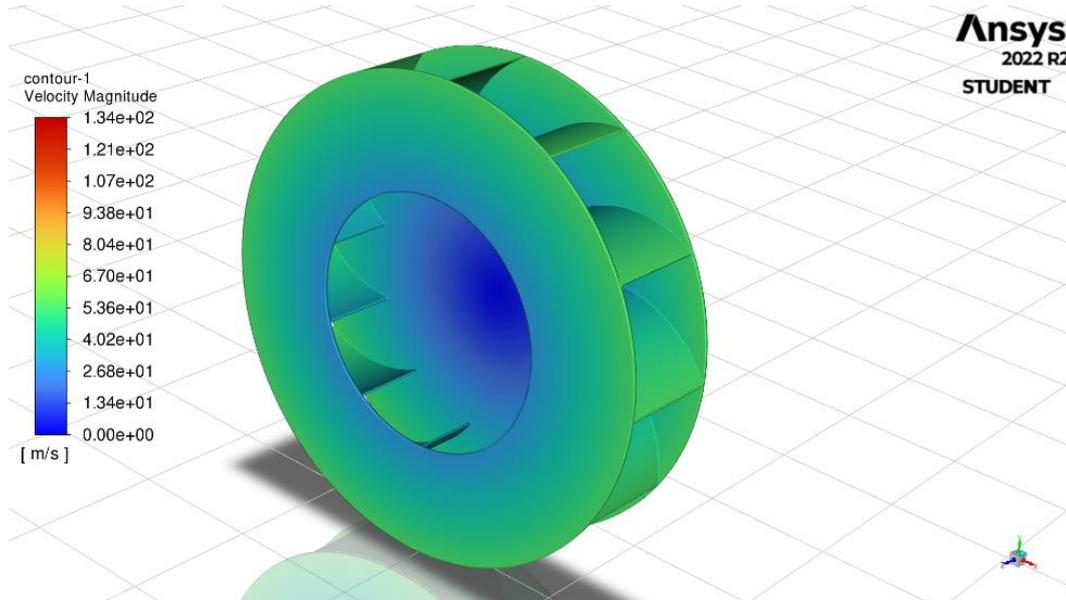
Com o auxílio do Ansys Fluent, torna-se exequível a previsão de fenômenos de transferência de calor em um experimento, o uso da ferramenta é de imensa influência para diversas avaliações (MARIANO; 2008). Na figura 12 é demonstrada a geração das malhas, com um alto grau de refino para que a simulação seja mais precisa e na figura 13 e figura 14 são exibidos os contornos do modelo em relação a velocidade e a pressão, respectivamente. Com auxílio da legenda lateral é possível compreender as áreas com valores mais altos e baixos e com foco na análise das palhetas do ventilador.

Figura 12: Modelo com malhas



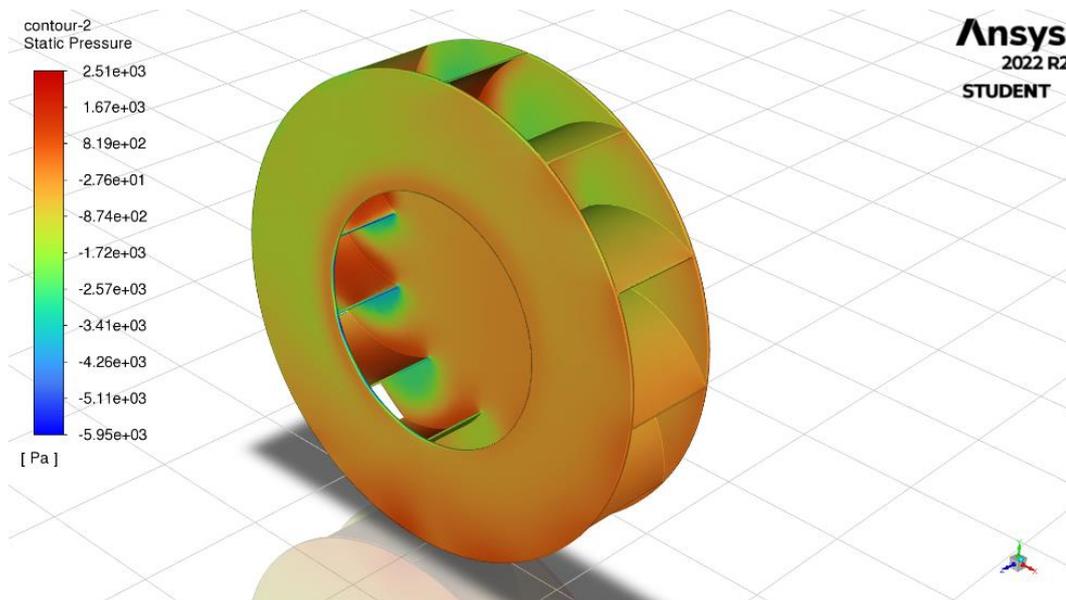
Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Figura 13: Contornos em relação a velocidade



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Figura 14: Contornos em relação a pressão

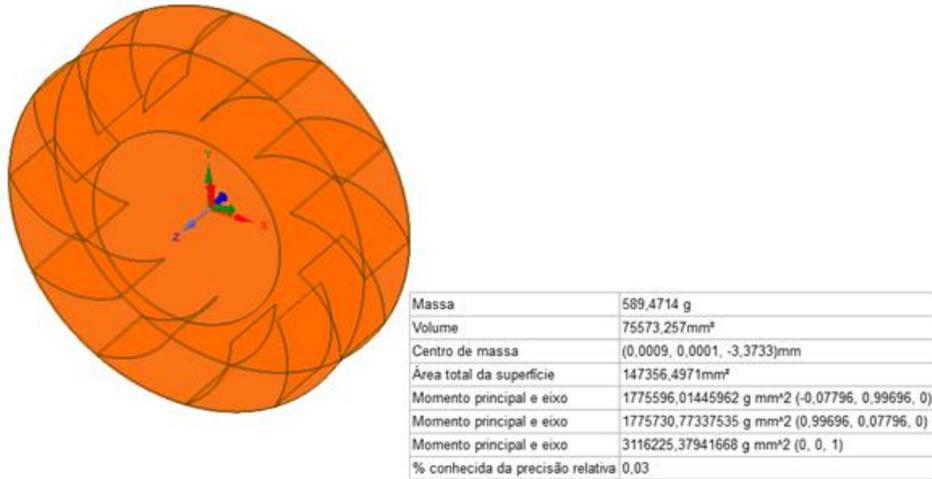


Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

4.3. Análise e Avaliação de Resultados

Posteriormente ao desenvolvimento da turbina, avalia-se o resultado encontrado e se discute sobre os valores obtidos. O fator com principal influência para a viabilidade do projeto, tal como citado, é o ID. Das figuras 15-17 demonstram os resultados dos influentes no ID, alcançados com o Ansys Fluent.

Figura 15: Massa do ventilador



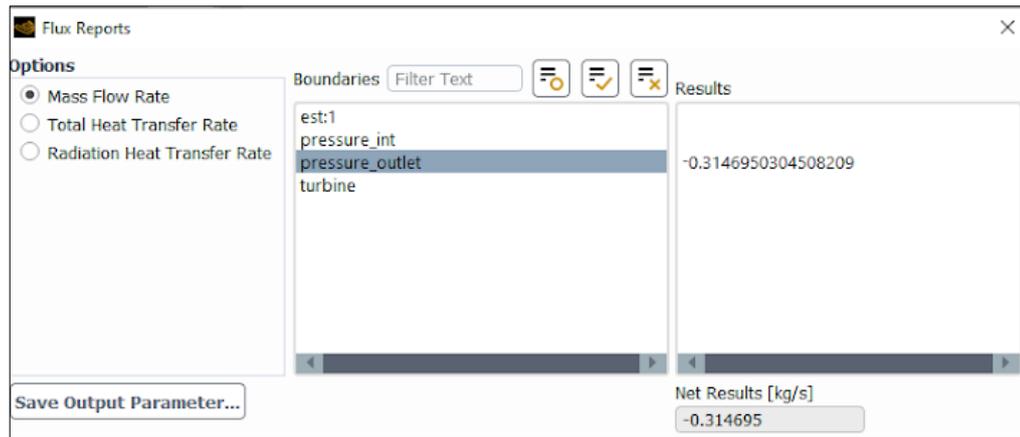
Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Figura 16: Torque requerido

Moments - Moment Center (0 0 0) Moment Axis (0 0 1)				Coefficients		
Zone	Moments [N m]	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

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Figura 17: Vazão mássica na saída



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Com o auxílio da equação 6, calcula-se o ID, representado abaixo.

$$ID = 1200 \cdot Q_{massa} + \frac{11000}{m_{ventilador}} + \frac{100}{T_{requerido}} \quad (\text{Eq. 6})$$

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

$$ID = 420,708$$

Ao iniciar o estudo de caso, a intenção era aumentar o ID em 20%, entretanto, com as investigações e as simulações realizadas, este aumento foi mais significativo do que o esperado. O ID do ventilador disposto pela Prática Klimaquip era de 291,8241, com isso, torna-se factível notar a bruta evolução no resultado encontrado, com uma evolução de 44,4%, ao qual, se alcançou um valor de 420,7080. Tal crescimento representa uma mudança altamente significativa no rendimento do ventilador centrífugo.

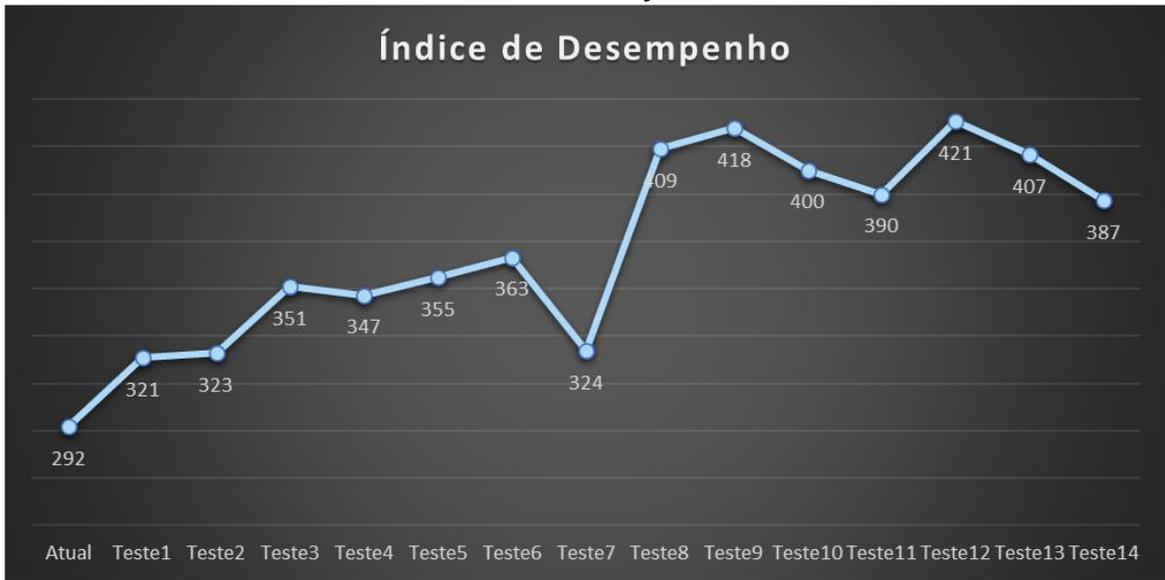
Para encontrar o melhor resultado, foram feitas diversas experiências, destaca-se que todos os testes realizados foram com apoio do referencial bibliográfica. Após 12 testes, foi encontrado o melhor resultado, entretanto, foram feitas outras 2 tentativas para confirmar que realmente seria a solução ideal.

A angulação e o direcionamento das pás foram um dos fatores preponderantes para a construção do modelo, todavia, o dimensionamento das palhetas também possui relevância e gera alteração no resultado.

A vazão mássica do projeto representa um ganho 61,7% em comparação a atual utilizada pela Prática Klimaquip, o valor de 0,1947 subiu para 0,3147, que representou uma excelente evolução. No teste de 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, retira-se a afirmação descrita anteriormente sobre a importância do equilíbrio dos fatores, destaca-se que outros testes garantiram um torque alto, todavia, não apresentaram uma vazão mássica alta, o que não concebe uma boa solução. A massa do ventilador, apesar de não ser um índice com alta influência, foi uma das 5 mais leves.

No gráfico 2, é apresentada a alteração do ID com a realização dos experimentos. Percebe-se que no teste 9 o resultado também foi bem próximo do final, contudo, ainda existia possibilidade de melhoria, tanto na redução da massa, quanto no aumento da vazão mássica. Outro fator importante a ser enfatizado é que em todos os testes, o ID obtido foi superior ao projeto modelo feito pela Prática.

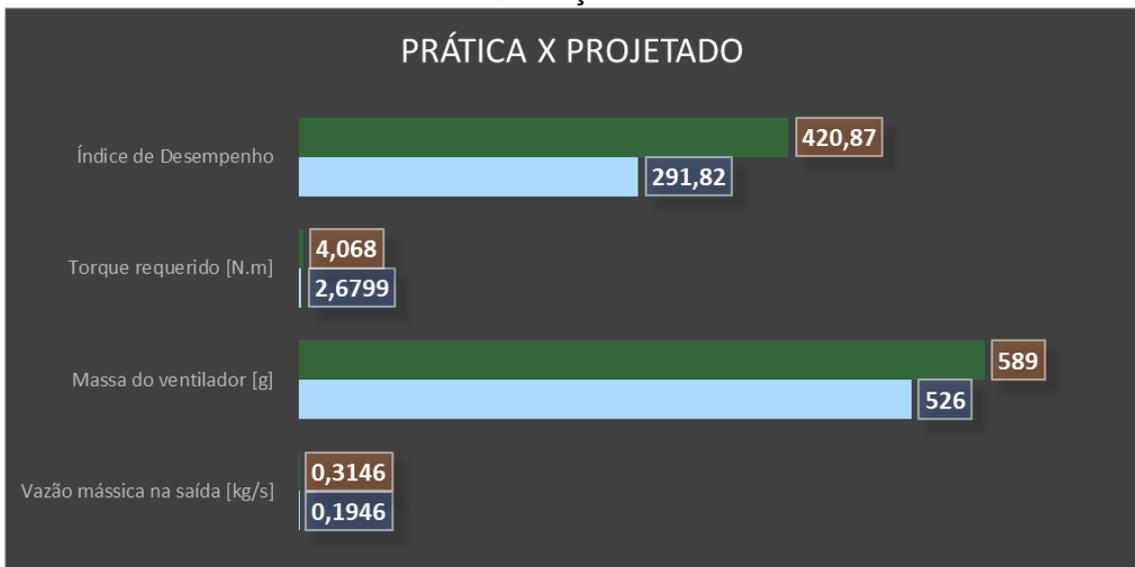
Gráfico 2: Variação do ID



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Para fins comparativos, na gráfico 3 é exposta a transição dos valores do ventilador atual utilizado pela Prática Klimaquip para o ventilador desenvolvido no trabalho. Com isso, fica nítida a evolução dos fatores.

Gráfico 3: Evolução do ventilador

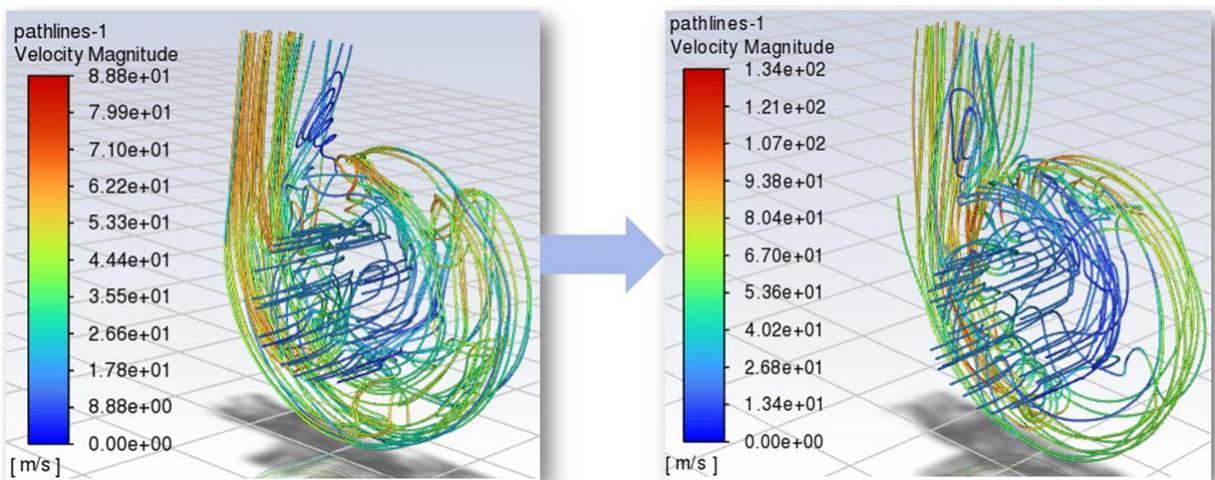


Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Outro ponto que se destaca, além dos valores, são as linhas de contorno e as linhas de correntes, as quais, avalia-se melhorias nos campos de pressão e de velocidade, e também a visualização de locais para possíveis reduções de valores máximos, garantindo uma distribuição mais uniforme em pontos de entrada e saída de ar.

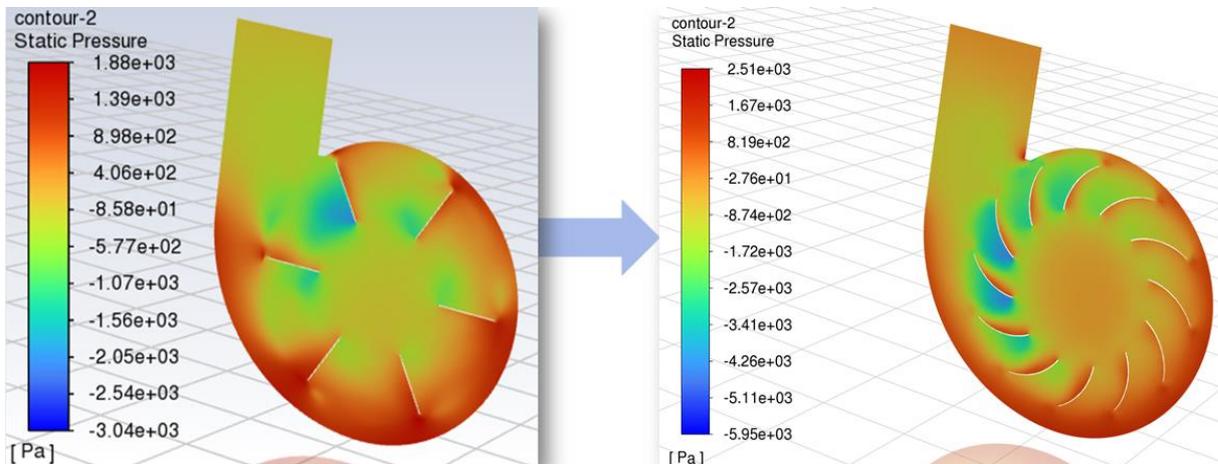
As *Pathlines* são as linhas de correntes, no qual, as partículas flutuantes movimentam-se em equilíbrio a fluidez, com o auxílio desta, é possível visualizar fluxos tridimensionais (ANSYS, 2009). Enquanto isso, os *Contours* são as linhas de constante, ao qual, são constantes para um fator selecionado e suas cores variam, de acordo, com uma escala (ANSYS, 2009). Tais itens são exemplificados na figura 18, aos quais as linhas de correntes estão no modelo completo e na figura 19 com os contornos sendo feitos no plano frontal da turbina.

Figura 18: Evolução das linhas de corrente da velocidade



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Figura 19: Evolução do contorno de pressão



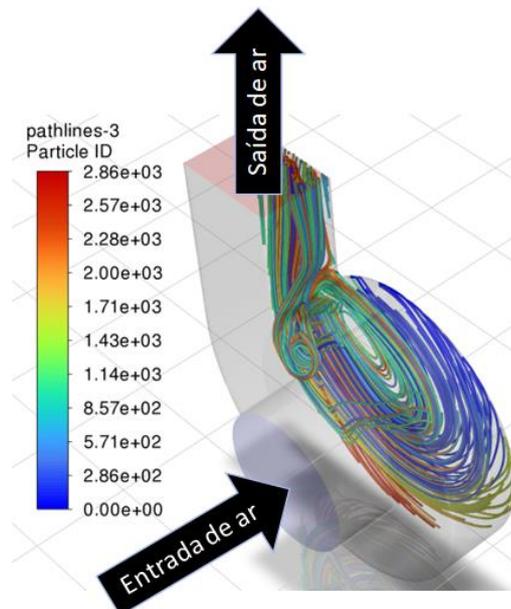
Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Torna-se possível analisar a direta relação dos gráficos gerados com os resultados avaliados pelo ID. Com o uso dos softwares Ansys, tornou-se factível a

realização de inúmeros testes para encontrar o resultado esperado, sem custo com a construção de protótipos físicos.

Os resultados obtidos foram mais satisfatórios do que os esperados inicialmente, que eram apenas atingir 20% a mais de ID em relação ao existente. Salienta-se que além dos ganhos nos ID, há outros fatores importantes a se levar em consideração, tal como a alteração do custo de produção, devido a diferença de massa. A circulação do fluido é feita de maneira mais adequada, tal como demonstrado pelos contornos e pelas linhas de corrente. Na figura 20, observa-se as linhas de corrente, com auxílio de setas que demonstram a direção da entrada e da saída do fluido. As linhas de correntes foram organizadas de acordo com as partículas.

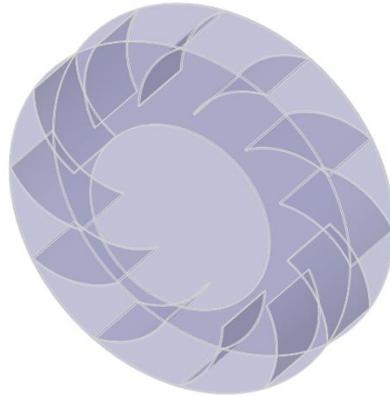
Figura 20: Linhas de corrente de entrada e saída de ar



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Com a avaliação criteriosa de cada um dos itens na construção da geometria e na simulação matemática, avalia-se que os resultados encontrados no projeto foram apropriados e relevantes, com valores soberanos ao se comparar com a turbina atual da Prática Klimaquip. A turbina construída pode ser verificada com clareza na figura 21.

Figura 21: Turbina construída



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Conclusão

Com este trabalho tornou-se possível analisar a importância da quantidade de pás, ao qual, quando o número é muito alto, há uma grande perda por conta do aumento de massa e influência em relação ao torque. Todavia, a principal perda com um número pequeno de pás é valor baixo em relação a vazão mássica. Com a redução do comprimento das pás, até encontrar o tamanho ideal, gera-se uma redução do torque requerido. A angulação tanto na entrada, quanto na saída das pás foi outro fator demasiadamente notório.

Apesar da alta quantidade de testes realizados, que foram 14 testes, e de inúmeras alterações dos parâmetros, o processo foi feito de forma rápida, pelo fato da usabilidade do software que não gera a necessidade de confecção de diversos protótipos. Outro ponto importante foi a análise prévia dos pontos críticos compreendidos em referenciais bibliográficos e em ventiladores existentes, antes de iniciar os desenhos de forma incerta, e conseqüentemente, elimina-se testes com geometrias falhas.

As ferramentas, tais como, as linhas de corrente, as linhas de contorno e a mesclagem de malhas com linhas, facilitam a compreensão da movimentação do fluido de ar dentro do ventilador, princípio eminente para a análise da mobilização das partículas. Tais análises comprovam a eficácia do cálculo, confirmando o resultado positivo por meio de ambos os recursos.

A cada acréscimo de 0,01 [kg/s] na vazão mássica na saída, há um ganho de 12 pontos no ID. Para se ter o mesmo ganho apenas com alterações de outros, é

preciso reduzir cerca de 209 [g] ou ainda reduzir 1,03 [N·m] do torque requerido, o que seria praticamente impossível devido as condições atuais do produto.

A evolução do Índice Desempenho foi abismal, o componente projetado pela Prática possuía um valor de 291,824, enquanto, o projetado no presente trabalho foi de 420,708 que representa uma otimização de 44,4%.

Concebe-se que para que fosse possível o aumento do fator principal de influência, a vazão mássica, tornou-se necessário o pequeno aumento da massa e a elevação do torque requerido, todavia, tais mudanças originaram uma elevação intensa no desempenho da turbina. O progresso do crescimento do ID foi maior do que o esperado inicialmente, no qual, era de 20%, tal aprimoramento foi superior e infere-se a enorme superioridade encontrada na projeção.

Referências Bibliográficas

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 epller 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.

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-eletrrodomesticos-se-reinventam-para-manter-clientes-e-aumentar-vendas-191155.php>. Acesso em: 17 out. 2022.

MARIANO, Gabriel Cassemiro. **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. **Computacional 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.

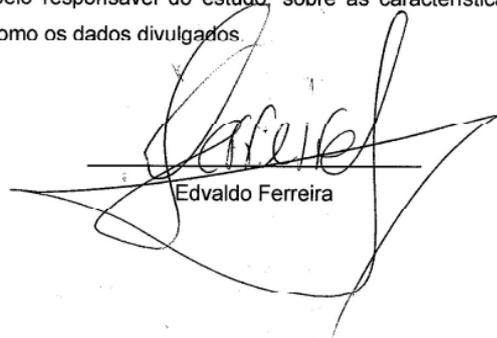
ZHAO, Zhiqi et al. Effect of coolant mass flow rate of dirt purge hole on heat transfer and flow characteristics at a turbine blade tip underside. **ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air**, v.5^a, 2018.

Anexo A – Declaração da Empresa

SOLICITAÇÃO DE AUTORIZAÇÃO PARA USO DE DADOS DA EMPRESA

Para tanto, Edvaldo Ferreira, abaixo assinado, responsável pela Prática Klimaquip Indústria e Comercio SA autorizo a divulgação dos dados no Trabalho Conclusão de Curso intitulado "Análise de um ventilador centrífugo pelo método CFD Estudo de caso Prática Klimaquip" a ser conduzido por Alex Geovani de Souza, Lyncoln Almeida de Rezende, Marcelo Pereira Martins Matheus Costa Pereira, Paulo Sérgio Ferreira e como orientador, Francisco Reginaldo da Rosa

Fui informado, pelo responsável do estudo, sobre as características e objetivos da pesquisa, bem como os dados divulgados.



Edvaldo Ferreira