



**ANDRÉ LUIZ DAS GRAÇAS MARTINS**

**LEVANTAMENTO DO CAMPO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE UMA  
TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL DE ARRASTO UTILIZANDO A  
FERRAMENTA NUMÉRICA CFD**

**LAVRAS – MG**

**2022**

**ANDRÉ LUIZ DAS GRAÇAS MARTINS**

**LEVANTAMENTO DO CAMPO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE UMA  
TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL DE ARRASTO UTILIZANDO A  
FERRAMENTA NUMÉRICA CFD**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Lavras, como parte das exigências do Curso  
de Engenharia Mecânica, para a obtenção do  
título de Bacharel.

Prof<sup>a</sup>. Dra. Bruna Oliveira Passos e Silva Siqueira

Orientadora

**Lavras – MG**

**2022**

*Este trabalho é dedicado à minha família e amigos que contribuíram muito na minha caminhada.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me abençoado ao longo desta jornada.

Aos meus avós, Antônio Monteiro e Maria Aparecida, que estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis e felizes da minha vida.

A minha mãe e irmã, Marilene e Aline, que sempre me incentivaram na realização deste sonho.

Aos meus amigos, principalmente os da engenharia mecânica, pelos anos de convivência e aprendizado.

Aos professores e demais funcionários que conheci durante a minha jornada na UFLA, que contribuíram de alguma forma na minha formação profissional e pessoal.

A minha prezada orientadora Prof.<sup>a</sup> Bruna Siqueira, por seus ensinamentos, incentivo, paciência e compreensão para o desenvolvimento deste projeto.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Curvas do ângulo de passo.....	14
Figura 2: Etapa para a realização do estudo.....	25
Figura 3: Relação de $C_l/C_d$ versus Alpha .....	27
Figura 4: Perfil NACA25112 .....	28
Figura 5: Construção do perfil NACA25112 .....	28
Figura 6: Construção do rotor da TEEV de 6 pás.....	29
Figura 7: Malha na TEEV de 6 pás .....	30
Figura 8: Fronteiras entre a turbina .....	31
Figura 9: Fronteira de entrada.....	31
Figura 10: Fronteira lateral e de saída .....	32
Figura 11: Coeficiente de potência para a TEEV de 6 pás.....	36
Figura 12: Coeficiente de potência para diversos modelos de turbinas eólicas .....	37
Figura 13: Coeficiente de potência em função da velocidade específica para diferentes valores de $\beta$ .....	38
Figura 14: Curva de torque da TEEV de seis pás .....	39
Figura 15: Curva de potência mecânica da TEEV de seis pás.....	40
Figura 16: Curva de potência elétrica gerada pela turbina de acordo com a velocidade de vento.....	41
Figura 17: Curva de potência elétrica gerada pela TEEV de seis pás em função da velocidade do vento .....	42
Figura 18: Comportamento da velocidade em turbinas.....	43
Figura 19: Campo de velocidade.....	44
Figura 20: Campo de pressão .....	45

## LISTAS DE SIGLAS

A – Área da Seção Transversal ( $m^2$ )

CAD - *Computer-Aided Design*

Cd – Coeficiente de Arrasto

CFD - *Computational Fluid Dynamics*

Cl – Coeficiente de Sustentação

Cp - Coeficiente de Potência

EDP - Equações diferenciais Parciais

HAWT - *Horizontal Axis Wind Turbine*

NACA – *National Advisory Committee for Aeronautics*

n – Rotação (rpm)

PCH - Pequenas Usinas Hidrelétricas

R – Raio do Rotor (m)

TEEV – Turbina Eólica de Eixo Vertical

VAWT - *Verticais Axis Wind Turbine*

Vp – Velocidade da Ponta da Pá (m/s)

V – Velocidade do Vento (m/s)

$P_{mec}$  – Potência Mecânica (W)

$P_{eólico}$  - Potência Disponível do Vento (W)

$T_{mec}$  – Torque Mecânico (Nm)

$\omega$  – Velocidade Rotacional Angular (rpm)

$\lambda$  - Velocidade Específica

$\rho$  - Massa Específica do Ar ( $kg/m^3$ )

$\beta$  – Ângulo de Passo

$\lambda_i$  - Velocidade Específica

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	8
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>1.1 OBJETIVO GERAL</b> .....	11
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	11
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	12
<b>2.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE FUNCIONAMENTO DE TURBINAS EÓLICAS</b>	12
<b>2.2 PROJETO DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL PARA BAIXAS VELOCIDADES DE VENTO</b> .....	15
<b>2.3 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL: ANÁLISE DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL</b> .....	16
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	19
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	23
<b>2. METODOLOGIA</b> .....	25
<b>2.1 ANÁLISE CFD</b> .....	25
<b>2.1.1 DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA</b> .....	25
<b>2.1.2 DESCRIÇÃO DA MALHA NÚMERICA</b> .....	29
<b>2.1.3 DESCRIÇÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL</b> .....	30
<b>2.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA</b> .....	32
<b>2.2.1 CONDIÇÕES INICIAIS DE CONTORNO</b> .....	32
<b>2.2.2 MODELAGEM FÍSICA E MATEMÁTICA DO PROBLEMA</b> .....	33
<b>2.2.3 MODELO STANDARD K-ÉPSILON</b> .....	34
<b>3 ANÁLISES DOS RESULTADOS</b> .....	35
<b>3.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DA TEEV DE 6 PÁS</b> .....	35
<b>3.1.1 CURVA DA EFICIÊNCIA DA TURBINA</b> .....	35
<b>3.1.2 CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA MECÂNICA</b> .....	38
<b>3.1.3 CURVA DA POTÊNCIA ELÉTRICA</b> .....	40
<b>3.2 CONTORNO DE VELOCIDADE E PRESSÃO</b> .....	43
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	47
<b>5 REFERÊNCIAS</b> .....	48

## **CAPÍTULO 1**



## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo do século, cresceu a demanda por energia devido ao aumento populacional e as novas tecnologias. Assim, a energia renovável tem sido foco de muitas pesquisas no mundo todo pelo baixo custo na produção e isso, tem resultado no aumento de investimentos dessas fontes de energia (KAPLAN, 2015).

Comparado com outras partes do mundo, o Brasil se tornou um bom exemplo de consumo de energia renovável. Cerca de 22,4% da energia em solo brasileiro vem dos ventos, da biomassa-de-açúcar de bagaço e de Pequenas Usinas Hidrelétricas (PCH) (ABEEólica, 2020).

O desenvolvimento desse setor de geração de energia elétrica acontece porque o Brasil tem investido em políticas públicas de incentivo à pesquisa de novas tecnologias de energias renováveis, e tem demonstrado grande potencial para recursos naturais como água e vento (EPE, 2019). A energia eólica se tornou uma das bases para a manutenção do abastecimento nacional, equivalente a 10,1% da capacidade total instalada no país. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica, existem cerca de 686 usinas eólicas em operação no país com produtividade de 17,75GW instalada e houve crescimento de 14,89% de potência em relação ao ano de 2019 (ABEEólica, 2020).

O avanço da tecnologia no desenvolvimento de turbinas eólicas possibilitou a produção e a obtenção de energia elétrica de forma limpa. Pois, utiliza um recurso natural que possui a capacidade de regenerar com o tempo e, além disso, não emite gases poluentes sendo considerada uma fonte renovável e inesgotável (MOHAMED, 2015).

Nos parques eólicos instalados no Brasil, a conversão de energia eólica ocorre por meio de turbina eólicas de eixo horizontal. Esse tipo de aerogerador permite maior aproveitamento de energia disponível do vento apresentando melhor estabilidade e exigindo menores esforços de manobra para ventos de alta velocidade gerando grandes potências e uma produção de eletricidade em grande escala. Em relação as dimensões, essas turbinas têm uma variação entre 20 e 160 metros de altura, o que as impede de ser instaladas em regiões pequenas como as áreas urbanas e rurais. Vale ressaltar, que nem todas as regiões do Brasil apresentam ventos com características favoráveis (ventos de alta velocidade) para a utilização de turbinas

eólicas horizontais de grande porte, sendo mais comum instalar parques eólicos com este tipo de turbina em regiões como no Nordeste e no Sul do Brasil, onde as condições de vento são mais favoráveis para a geração eólica em grande escala (GORAYEB, 2016).

Dessa forma, têm-se observado um grande crescimento nas pesquisas para o desenvolvimento de turbinas eólicas de eixo horizontal de pequeno porte para aproveitamento de ventos de baixa velocidade. Outra vertente de pesquisa é o investimento em turbinas eólicas verticais. Estes tipos de aerogeradores tendem a ser mais seguros, fáceis de construir, podem ser montados próximo ao solo e apresentam uma resposta mais estável aos ventos turbulentos. As torres são baixas com dimensões entre 0,1 e 0,5 vezes a altura do próprio rotor, em um mesmo conjunto (CARMO, 2012).

Neste contexto, foi desenvolvido o presente trabalho de conclusão de curso, que é fruto de uma pesquisa de desenvolvimento de uma turbina eólica de eixo vertical para aproveitamento de baixas velocidades de vento. O rotor consiste em uma adaptação do modelo Savonius, na qual as pás em semicilindros foram substituídas por 6 pás com perfis de aerofólio do tipo NACA 25112. Em um trabalho inicial foram levantadas as características aerodinâmicas para caracterização deste rotor e no presente trabalho de conclusão, o intuito é levantar o campo básico de funcionamento desta turbina através das curvas de potencial eólico, potência mecânica, torque e outros parâmetros derivados destes em função de uma faixa específica de velocidades de vento. Estas curvas são cruciais para determinação das aplicações para a turbina em estudo e também para a proposição de melhorias no projeto da mesma. As análises foram realizadas utilizando a ferramenta numérica CFD e os resultados validados com trabalhos técnico-científicos disponíveis na literatura.

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste trabalho é realizar o levantamento do campo básico de funcionamento de uma turbina eólica de eixo vertical, do tipo Savonius modificada, com seis pás em formato de aerofólio.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- I. Realizar uma pesquisa bibliográfica referente ao campo básico de funcionamento de turbinas eólicas de eixo vertical para seleção de parâmetros e validação das simulações numérica.
- II. Construção da geométrica e malha da turbina eólica para realização da simulação numérica.
- III. Levantar as curvas operacionais do sistema.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção serão abordadas as características básicas de funcionamento, projetos e análise de turbinas eólicas de eixo verticais.

### 2.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE FUNCIONAMENTO DE TURBINAS EÓLICAS

Algumas expressões são essenciais para caracterizar o funcionamento de uma turbina eólica. Essas expressões fornecem dados que permitem avaliar qual o máximo desempenho que uma turbina eólica desenvolve quando exposta a uma dada velocidade de escoamento do vento. A primeira expressão matemática, é a rotação ( $n$ ), que vai variar conforme a velocidade de entrada do vento na turbina eólica, conforme apresentado na equação 1 (SILVA, 2012).

$$n = \frac{V60}{2\pi R} \quad (1)$$

Sendo,  $V$  a velocidade do vento (m/s),  $R$  é o raio do rotor (m) e  $n$  rotação em (rpm).

Nessa etapa, são apresentados alguns conceitos básicos de energia eólica para realizar o levantamento das curvas aplicando equações matemáticas. O primeiro parâmetro apresentado é o potencial eólico, que diz respeito a quantidade de energia que pode ser extraído a partir da energia cinética presente no escoamento de ar que passa através da área varrida pelo rotor da turbina. Este cálculo é feito através da Equação (2) (SILVA, 2012):

$$P_{eólico} = 0,5\rho AV^3 \quad (2)$$

O  $P_{eólico}$  é a potência disponível do vento em [W],  $\rho$  massa específica do ar [ $\text{kg/m}^3$ ],  $A$  área da seção transversal da turbina em [ $\text{m}^2$ ] e  $V$  a velocidade do vento em [m/s].

Outro parâmetro característico da turbina é a potência mecânica, que resulta do aproveitamento da energia cinética disponível no vento, representada pelo

potencial eólico. Para cálculo da potência mecânica, além do potencial eólico, é necessário conhecer o coeficiente de potência da turbina ( $C_p$ ), conhecido também como eficiência ou rendimento da mesma. Para cálculo do  $C_p$  é preciso conhecer alguns parâmetros de escoamento através da turbina, sendo eles a velocidade de ponta da pá da turbina ( $V_p$ ) e a velocidade específica de ponta de pá ( $\lambda$ ). A velocidade de ponta de pá é dada pela Equação (3) (SILVA, 2012).

$$V_p = \omega R \quad (3)$$

Onde a velocidade da ponta da pá ( $V_p$ ) da turbina é dada em [m/s], a velocidade angular ( $\omega$ ) em rad/s e raio ( $r$ ) em [m].

Já a velocidade específica de ponta de pá ( $\lambda$ ) relaciona a  $V_p$  da turbina com a velocidade do vento ( $v$ ), ambas em [m/s], conforme a Equação (4) (SILVA, 2012).

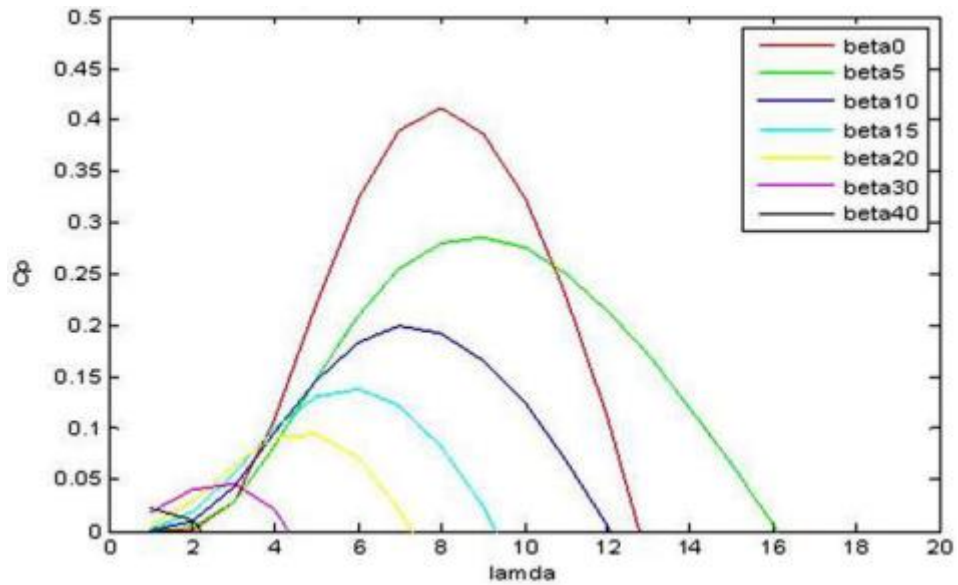
$$\lambda = \frac{V_p}{v} \quad (4)$$

Por fim, o coeficiente de potência ( $C_p$ ) é expresso pela seguinte expressão matemática (SILVA, 2012). Com os parâmetros de velocidade de ponta da pá e velocidade específico definidos é possível então calcular o coeficiente de potência ( $C_p$ ) da turbina eólica de acordo com a Equação (5).

$$C_p (\lambda, \beta) = 0,5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0,0068\lambda \quad (5)$$

Onde o ângulo de passo ( $\beta$ ) das pás das turbinas interfere no coeficiente de potência. Essa interferência no comportamento do coeficiente de potência pode ser verificada na Figura 1.

Figura 1: Curvas do ângulo de passo



Fonte: HASHMI, 2012.

Podemos destacar que quando o valor de passo é ajustado em 0° graus, o valor máximo de  $C_p$  é atingindo. Esse valor é obtido com uma velocidade específica de 8 e possui um valor menor que o limite de Betz. De acordo com a Lei de Betz, as turbinas podem extrair 16/27 de energia aproveitada pelo vento. A característica desta curva é que representa a eficiência da turbina eólica realizando trabalhos mecânicos em diferentes velocidades de rotações sob diferentes velocidades do vento (BURTON, 2001).

A diferença entre o valor máximo alcançado e o limite de Betz é causado pelas perdas presentes na transmissão mecânicas dos aerogeradores e pelos projetos de pás de turbinas eólicas que não são ideais. Outros valores de ângulo de passo, como o 5° e 10° graus, pode alterar drasticamente a potência mecânica extraída do vento pelas turbinas eólicas. Esse conceito é observado na Figura 1, visto que, quanto maior o ângulo de passo menores são os valores de pico das curvas (BURTON, 2001).

À medida que aumenta o ângulo de passo reduz o valor do coeficiente de potência extraído do vento. Para isso, o valor adotado no ângulo de passo foi 0. Para complementar a equação do coeficiente de potência, é necessário calcular a velocidade específica inicial para cada velocidade, conforme a equação (6).

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (6)$$

Com a definição do  $C_p$ , é possível determinar a potência mecânica. A equação da potência mecânica é a multiplicação da potência eólica pelo  $C_p$ , conforme a equação (7):

$$P_{mec} = 0,5A\rho V^3 C_p \quad (7)$$

Por fim, define-se o torque mecânico da turbina que corresponde à relação entre a potência mecânica e a velocidade angular da mesma, conforme a Equação (8).

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (8)$$

## **2.2 PROJETO DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL PARA BAIXAS VELOCIDADES DE VENTO**

Sabendo do potencial eólico disponível em ventos de baixa velocidade, pesquisas tanto no meio técnico quanto científico vem sendo desenvolvidas de forma a otimizar turbinas eólicas de eixo vertical disponíveis no mercado e também no sentido de desenvolver novos projetos alterando ou adaptando a geometria destes tipos de turbinas. Estes novos projetos visam ampliar a utilização de energia eólica em centros urbanos e regiões isoladas e sem acesso de energia de forma a aproveitar este potencial (KUMAR, 2018).

Lap-Arparat (2019) discute em seu estudo que o tipo e o projeto de uma turbina eólica dependem da velocidade de vento do local onde a turbina. Como exemplo, turbinas eólicas de eixo horizontal são instaladas em grandes parques eólicos em locais de altas velocidades de vento, já as turbinas eólicas de eixo vertical são recomendadas para locais com velocidades baixas de vento como centros urbanos.

Korprasertsak e Leephakpreeda (2016) desenvolveram uma análise numérica para otimização de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius através da utilização de um sistema diretor para controlar as características aerodinâmicas do escoamento de ar no rotor. Os resultados mostraram que esta alteração no projeto convencional da turbina Savonius levou a um aumento da velocidade angular e, conseqüentemente, ao aumento potência mecânica da turbina. Ainda mostraram que a utilização de ferramentas de otimização permitiu obter as soluções ideais de

número, forma e ângulo de ataque das palhetas guia são determinadas pela maximização do coeficiente de potência.

Li et al. (2018) apresenta um estudo numérico para otimização da geometria de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo H, avaliando ângulos de inclinação das pás da turbina. Os autores observaram que para os valores de ângulo de inclinação otimizados os coeficientes de potência aumentaram, para duas variações do comprimento de corda dos perfis de pá da turbina.

Saad et al. (2020) desenvolveu um estudo numérico para avaliar a influência da mudança no projeto de pás de turbinas eólicas do tipo Savonius. A metodologia de projeto consiste em torcionar as pás da turbina de forma a melhorar sua performance. Os autores observaram que este novo formato das pás aumentou o coeficiente de potência da turbina e também a capacidade de partida automática da mesma.

Outras formas de melhorar a performance de turbinas eólicas de eixo vertical do tipo Savonius é variar sua razão de aspecto (Sheldahl et al., 1978; Ferrari et al., 2017; Bhayo e Al-kayiem, 2017) e modificar o posicionamento das pás, como por exemplo, montar pás sobrepostas no rotor (Sheldahl et al., 1978). Estes parâmetros geométricos promovem aumento de performance e também facilitam a partida automática da turbina.

Neste contexto, destaca-se a importância do desenvolvimento de novas turbinas de eixo vertical, com projetos que ataquem a geometria dessas máquinas de forma a obter modelos que permitam o aproveitamento de baixas e altas velocidades de vento com alta eficiência.

## **2.3 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL: ANÁLISE DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL**

O avanço da tecnologia nas últimas décadas tem levado o ser humano a automatizar cada vez mais seus processos. Hoje são encontrados computadores de alto desempenho que permitem a análise de diversos fenômenos físicos envolvendo engenharia e, no que diz respeito a este trabalho de conclusão de curso, aos fenômenos presentes em mecânica dos fluidos. Aliado à estas tecnologias, surgem também códigos e softwares computacionais de ponta que trazem resultados muito



próximos ou iguais a realidade, fazendo com que as pesquisas se desenvolvam de forma mais rápida e eficiente (KUMAR, 2018).

Neste contexto, destaca-se a Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD - Do inglês "*Computational Fluid Mechanics*"). Através desta ferramenta é possível estudar vários problemas práticos de engenharia como escoamento externo, escoamentos reativos, processos de transferência de calor, entre outros (KUMAR, 2018).

Na área de avaliação de performance de turbinas eólicas o CFD é um grande aliado das análises experimentais. Esta ferramenta numérica permite o desenvolvimento de novos projetos de turbinas, bem como, a otimização de turbinas já existentes (KUMAR, 2018).

Zanforlin et al. (2018) desenvolveu um estudo em CFD para análise de turbinas eólicas de eixo vertical de pás retas para investigar os efeitos combinados das perdas na ponta da pá e de baixos números de Reynolds no desempenho de turbinas eólicas de eixo vertical e, portanto, encontrar a razão de aspecto ótima da turbina, que fornece o melhor coeficiente de potência. Os resultados mostraram que as perdas de ponta são equilibradas pelos efeitos de baixos números de Reynolds, portanto, uma variação de razão de aspecto não implica uma variação de CP. Para todos os casos que foram analisados, o tamanho da turbina e, portanto, número de Reynolds não afetam significativamente a distribuição normalizada de CP ao longo a lâmina, que só depende da razão de aspecto.

Hosseini et al. (2019) projetaram, simularam e avaliaram o desempenho de uma inovadora turbina eólica híbrida de eixo vertical (VAWT) para obter uma faixa operacional estendida e aprimorar as capacidades de partida automática. A turbina consiste em um rotor tipo Savonius Bach modificado de 2 pás e um rotor de 3 pás de Darrieus. As simulações foram realizadas em CFD e os resultados numéricos mostraram que enquanto a turbina Darrieus apresentou o maior coeficiente de potência ( $C_p$ ) de 48,4% a uma velocidade de ponta de pá de 2,50, sofria de altos requisitos de torque de partida. A turbina híbrida demonstrou partida automática capacidades, atingindo um  $C_p$  máximo de 41,4% em uma velocidade de ponta de pá de 2,5 e operação até um valor de velocidade de ponta de pá de 4,5. Quando em comparação com projetos turbina eólica de eixo vertical híbridos anteriores, a configuração proposta demonstrou melhorias na eficiência e alcance operacional que suportam as perspectivas de sustentabilidade energética.

Saat et al. (2019) utilizaram o software ANSYS FLUENT para analisar a variação do coeficiente de potência de uma turbina do tipo Darrieus, variando seu número de pás. Através das simulações foram obtidos os valores de torque para cálculo da potência produzida pela turbina e o  $C_p$  pode ser calculado. Os resultados forneceram dados para um projeto aprimorado para comparar e validar a melhoria em termos de potência produzida. Ao aumentar o número de pás, uma diferença significativa nos resultados pode ser obtida.

Ahmad et al. (2022) desenvolveram o projeto de uma turbina eólica Double-Darrieus com pás retas com alto coeficiente de potência e capacidade de partida automática utilizando a ferramenta CFD para otimização da turbina experimental desenvolvida. Os resultados numéricos obtidos permitiram a determinação do comprimento de corda otimizado, número de pás, ângulo de passo, distância das pás do eixo giratório central e altura do rotor. Ainda foi possível obter das simulações numéricas os limites de velocidades operados pela turbina de forma a produzir energia elétrica e a velocidade de partida automática da turbina. De uma forma geral foi possível concluir que a ferramenta CFD permitiu a determinação da configuração ideal do projeto da turbina eólica de eixo vertical híbrida, juntamente com uma análise de alta fidelidade na fase inicial do projeto.

No contexto desta discussão, é possível observar a satisfatoriedade da aplicação de ferramentas CFD em projetos e otimização de geometrias de turbinas eólicas de eixo vertical. Sendo assim, o presente trabalho tem por proposta utilizar a ferramenta numérica ANSYS CFX para projeto de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius com pás modificadas em formato de perfis de aerofólio para análise preliminar de sua performance através de suas características básicas de funcionamento.

## **CAPÍTULO 2**

**LEVANTAMENTO DO CAMPO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE UMA  
TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL DE ARRASTO UTILIZANDO A  
FERRAMENTA NUMÉRICA CFD**

## RESUMO

Nas últimas décadas a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis vem ganhando espaço no mundo todo por trazer benefícios ao meio ambiente e por não causar poluição. Já existem vários estudos sobre a utilização das turbinas eólicas em ambientes urbanos. Em consonância com essas pesquisas, o presente trabalho apresenta um estudo do desempenho de uma turbina de eixo vertical do tipo Savonius modificada com seis pás em formato de aerofólio que busca extrair o máximo de potência desta turbina através da simulação numérica utilizando o software *Ansys*. Nesse sentido, o objetivo foi realizar um levantamento das curvas de coeficiente de potência, potência mecânica, torque mecânico e potência elétrica, com a variação da velocidade do vento de 0 até 20 m/s. O método de levantamento das curvas e simulação numérica mostrou-se eficiente para a análise do desempenho da turbina. Porém, a turbina vertical só pode ser aplicada a uma velocidade máxima de 9m/s, acima disso a turbina começa a apresentar instabilidade. Já o coeficiente de potência máximo encontrado foi de 45% que pode ser convertido em energia elétrica e deste percentual a potência máxima foi de 6,5 kW e um torque de 4,43 N.m, que é bastante satisfatório conforme a literatura.

**Palavras-chave:** Turbina Eólica, Energia Eólica, Coeficiente de Potência, Curva de Potência, Dinâmica dos Fluidos Computacional.

## ABSTRACT

In recent decades, the generation of electricity from renewable sources has been gaining ground worldwide for bringing benefits to the environment and not causing pollution. There are already several studies on the use of wind turbines in urban environments. In line with these researches, the present work presents a study of the performance of a modified Savonius-type vertical axis turbine with six airfoil-shaped blades that seeks to extract the maximum power from this turbine through numerical simulation using Ansys software. In this sense, the objective was to carry out a survey of the power coefficient curves, mechanical power, mechanical torque and electrical power, with the variation of wind speed from 0 to 20 m/s. The method of surveying the curves and numerical simulation proved to be efficient for the analysis of turbine performance. However, the vertical turbine can only be applied at a maximum speed of 9m/s, above that the turbine starts to show instability. The maximum power coefficient found was 45%, which can be converted into electrical energy, and from this percentage the maximum power was 6.5kW and a torque of 4.43N.m, which is quite satisfactory according to the literature.

**Keywords:** Wind Turbine, Wind Energy, Power Coefficient, Power Curve, Computational Fluid Dynamics.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento populacional, uma das maiores preocupações do mundo é como gerar energia suficiente para atender a toda essa demanda. Atualmente, as atenções estão voltadas para a geração de eletricidade de forma renovável sustentável. O mercado de turbinas eólicas horizontais cresceu consideravelmente no último século devido aos avanços na tecnologia que levaram a melhorias nos sistemas de geração de energia eólica (ANI, 2012).

Os dados da Global Wind Energy Council (2021), mostram esse alto crescimento de energia eólica espalhados pelo mundo. E em 2022, a capacidade de energia eólica no mundo foi de 93,6GW, e teve um grande aumento em comparação com o ano de 2019, que apresentou uma capacidade de energia de 60,8GW. No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEólica, 2020), o potencial eólico instalado no país chegou a uma capacidade instalada de 17,75 GW em 2020 com geração a partir de 685 usinas. Dados como estes são animadores, ainda mais quando se pensa na capacidade de geração eólica off-shore tanto no Brasil, quanto no mundo.

Todo este aproveitamento do potencial eólico dos ventos se dá através de turbinas, que são classificadas de acordo com a disposição do eixo do rotor em Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH) e Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV). As TEEH's são usadas em muitos países para projetos de energia de média a grande escala, e a maioria das instalações comerciais em todo o mundo são baseadas exclusivamente nessas turbinas (Kumar, 2018). Por outro lado, as TEEV's não são reconhecidas como uma opção viável para aproveitar a energia do vento em áreas urbanas, onde o vento é menos intenso, muito mais caótico e turbulento (Kumar, 2018).

Com o avanço da tecnologia e aumento dos investimentos em usinas eólicas, vem acontecendo nos últimos anos um crescimento nas pesquisas para melhora de eficiência de TEEH's para as aplicações em parques eólicos, desenvolvimento de TEEH's de pequeno porte para aproveitamento de baixas velocidades de vento e, no que diz respeito às TEEV's, projetos de novos modelos surgem com constância em pesquisas técnicas e científicas (Migliore, 1980; Shiono, 2002; Marsh, 2015; Bianchini, 2016; Xu, 2019; De Tavernier, 2019).

Esse grande interesse por TEEV's se dá pelo fato de que elas apresentam alto desempenho quando operam ventos altamente turbulentos, baixas emissões de ruídos e por serem esteticamente mais atraentes, tornando-as opções muito atrativas para geração de energia em ambientes urbanos e residenciais (Mertens, 2006; Islam, 2007; Hand, 2016).

As TEEV's apresentam vantagens como: facilidade de construção quando comparadas à TEEH, obtenção de energia eólica em qualquer direção de vento e por seu tamanho, que permite sua instalação em diversos locais. Os tipos de turbinas eólicas de eixo vertical mais comuns são as turbinas do tipo Darrieus e Savonius, que são movidas através de forças de sustentação e arrasto (Hand et al., 2020).

A turbina eólica Savonius é um dos tipos de TEEV's mais estudada nos últimos anos por apresentar características de partida adequadas, velocidades de operação relativamente baixas, estrutura simples e por capturar vento de qualquer direção. Abordagens numéricas e experimentais têm sido desenvolvidas para analisar os efeitos de parâmetros de projeto como o número de pás, a quantidade de sobreposição e folga de separação entre as pás do rotor, mudança de perfil de pás, placas superior e inferior das pás nos estados estático e dinâmico do rotor, a relação de aspecto do rotor e dispositivos de aumento de potência para melhorar o desempenho aerodinâmico dos rotores eólicos Savonius (Nimvari, et al., 2020).

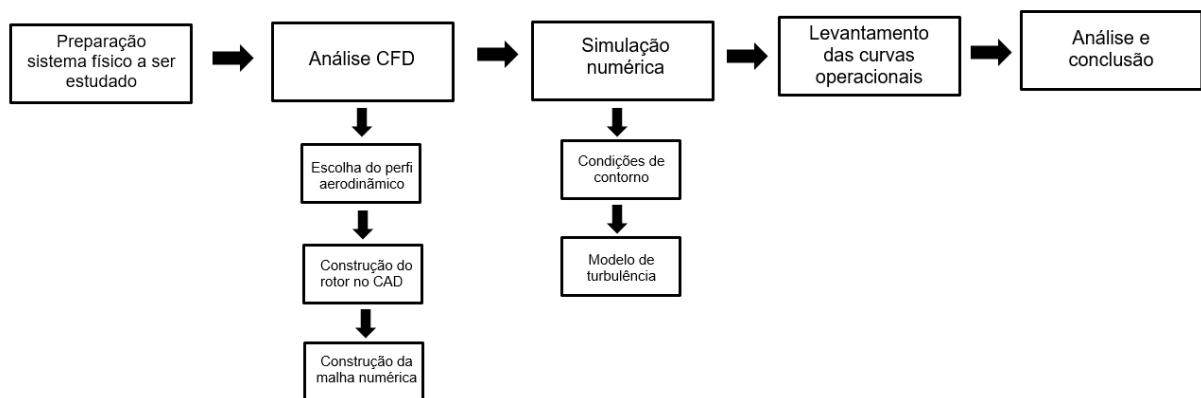
Neste contexto, surgiu a ideia que motivou o desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso que consiste em levantar o campo básico de funcionamento de uma TEEV do tipo Savonius modificada, onde as pás em semi-clindros foram substituídas por perfis de aerofólios. Esta turbina teve seu projeto preliminar desenvolvido em projeto integrador para levantamento de suas características geométricas e agora será avaliado seu potencial de produção de energia eólica de acordo o torque, potência mecânica e coeficiente de potência produzidos para uma faixa de velocidades de vento de 0 a 20 m/s. Também serão apresentados os campos de pressão e velocidade que se desenvolvem de acordo com o escoamento de ar através da turbina. As análises foram realizadas utilizando a ferramenta ANSYS CFX.



## 2. METODOLOGIA

A metodologia aplicada para desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso consiste em discretizar o domínio computacional relativo à TEEV projetada (desenho da geometria e discretização de malha), definir a modelagem de turbulência e aplicar as condições de contorno iniciais para realização das simulações numéricas, a etapa de cada processo é mostrado na Figura 2.

Figura 2: Etapa para a realização do estudo



Fonte: Autor

### 2.1 ANÁLISE CFD

Para a realização das simulações numéricas foi empregado o software ANSYS versão estudante através da plataforma Workbench, onde a geometria é gerada pelo software *Design Modeler*, a malha é construída no Meshing e as simulações desenvolvidas no ANSYS CFX.

#### 2.1.1 DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA

A geometria da turbina foi definida em um projeto anterior. Ela consiste em um rotor de seis pás construídas a partir de aerofólios do tipo NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), afixados entre dois discos. De acordo com Bezerra Neto

(2019), nos anos 80 os modelos mais utilizados em turbinas eólicas e que até hoje são usados é os perfis NACA de cinco dígitos, que possuem diferentes características de sustentação e arrasto. Deste modo, para realizar este trabalho foram feitas análises de todos os perfis aerodinâmicos de cinco dígitos disponíveis no site Airfoil Tools.

A escolha do perfil para a construção da turbina eólica de eixo vertical (TEEV) levou em conta, a melhor eficiência entre a relação  $C_l$  (Coeficiente de sustentação) e  $C_d$  (Coeficiente de arrasto) versus ângulo de incidência do escoamento, que foi retirado do site (TOOLS, 2021), que utiliza o software Xfoil para obter essa relação. Nesta etapa, foi realizada a configuração do software com Reynolds ( $Re$ ) de um milhão para o caso mais crítico, para baixos número de Reynolds pode ocorrer vários problemas de convergência nas simulações.

Na Tabela 1 são apresentadas as características dos perfis de aerofólios analisados para construção da turbina eólica projetada neste estudo.

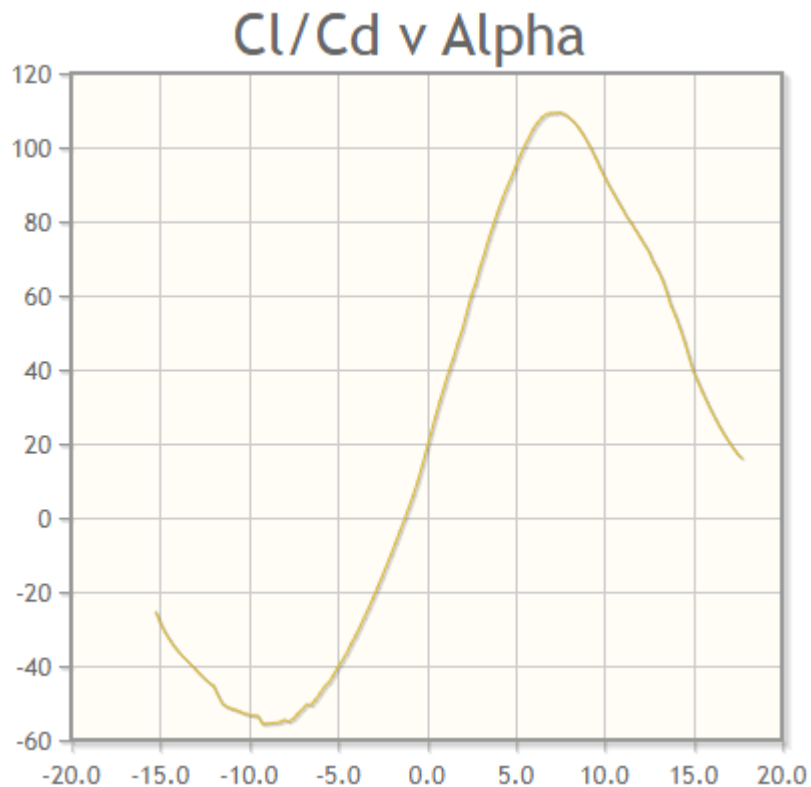
Tabela 1: NACA 5 dígitos

Perfis	Máx ( $C_l/C_d$ )	Alpha
NACA25112	109,4	7,50
NACA24112	105,5	7,75
NACA23112	98,6	8,75
NACA23012	96,8	8,75
NACA23015	91,0	10
NACA22112	89,4	9,25
NACA23018	89,9	9,50
NACA23021	64,3	5,50
NACA23024	56,9	8,50

Fonte: Autor.

O perfil que apresentou a melhor eficiência na relação  $C_l/C_d$  de acordo com a Tabela 1, foi o perfil NACA 25112, com o valor aproximado de 110 na vertical que representa a relação  $C_l/C_d$  e um ângulo de incidência de 7,50 graus. A relação desses valores pode ser verificada na Figura 3, em que a direção vertical representa a relação  $C_l/C_d$  e na horizontal o valor do ângulo de incidência do escoamento ( $\alpha$ ).

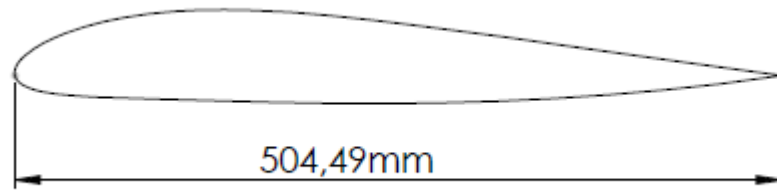
Figura 3: Relação de  $C_l/C_d$  versus Alpha



Fonte: TOOLS, 2021.

O propósito deste trabalho é extrair uma maior potência para a turbina, que estará operando com baixa velocidade do vento, para isso, inicialmente foi construído um modelo de 6 pás seguindo o modelo de turbina Savonius modificada, utilizando perfis aerodinâmicos para o formato das pás. Estes perfis são movimentados pela velocidade do vento criando sustentação e produzindo energia. A geometria inicial apresenta pás com ângulo de incidência de  $0^\circ$  e apenas um rotor. Conforme estabelecido anteriormente, cada pá foi construída através do perfil NACA 25112, conforme apresentado na Figura 4.

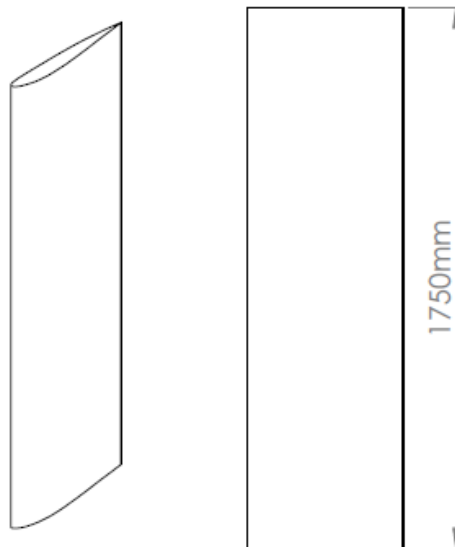
Figura 4: Perfil NACA25112



Fonte: Autor.

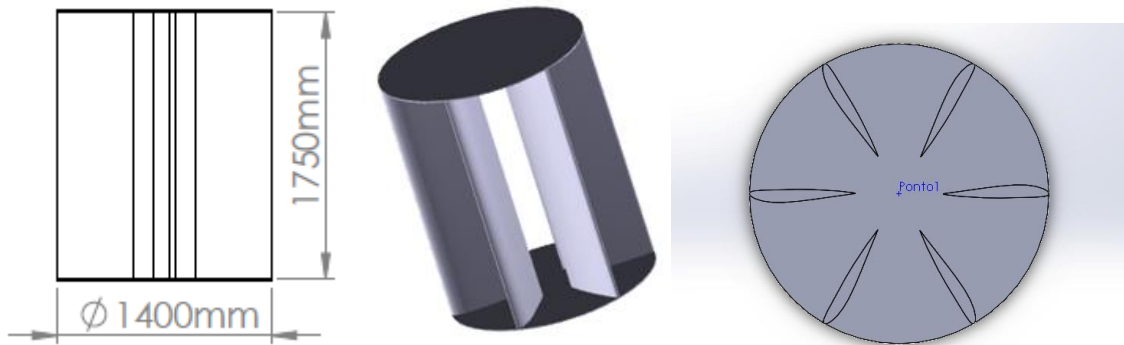
Na Figura 4 é mostrada a pá resultante do perfil NACA 25112, com altura de 175 centímetros. Já na Figura 6, são apresentados o corte da seção meridional do rotor com seis pás e o desenho tridimensional da turbina. O diâmetro total dela é de 140 centímetros. As dimensões da turbina foram definidas de acordo com a potência desejada durante seu dimensionamento em projeto anterior.

Figura 5: Construção do perfil NACA25112



Fonte: Autor.

Figura 6: Construção do rotor da TEEV de 6 pás



Fonte: Autor.

### 2.1.2 DESCRIÇÃO DA MALHA NÚMERICA

Após a construção da geometria, esta foi carregada no software ANSYS Meshing para discretização da malha do domínio numérico. O domínio numérico é representado por um cilindro, ver Figura 7.

Para o rotor, foram estabelecidas as seguintes configurações. O solver escolhido é o CFX, com um ângulo de curvatura de  $20^\circ$ , tamanho mínimo e máximo da malha será 0,005m e 0,120m e, com um tamanho máximo da face de 0,120m, conforme pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2: Detalhamento da construção da malha (mesh)

Solver	CFX
Ângulo de curvatura	$20^\circ$
Tamanho mínimo da malha	0,005m
Tamanho máximo da malha	0,120m
Tamanho máximo da face	0,120m

Fonte: Autor.

Por fim, foi aplicada na malha a função *inflation*, que tem como objetivo criar camadas espaçadas com a fronteira escolhida. A fronteira escolhida foi o rotor e as outras configurações desta função podem ser observadas na Tabela 3.

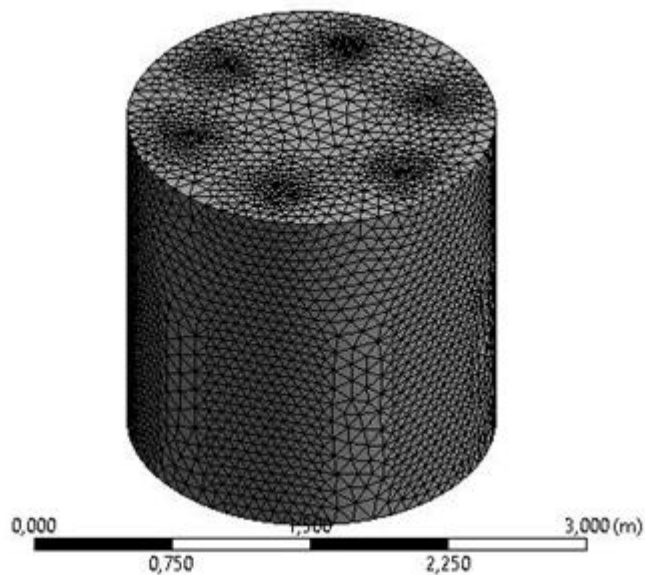
Tabela 3: Detalhamento da configuração de *Inflation*

Altura da primeira camada	0,005m
Camada máxima	15
Taxa de crescimento	1,4

Fonte: Autor.

Por fim, malha construída na turbina de 6 pás é representada na Figura 7, que mostra o resultado final da malha do rotor da turbina eólica vertical com uma quantidade de nós e elementos permitido pela licença estudantil.

Figura 7: Malha na TEEV de 6 pás



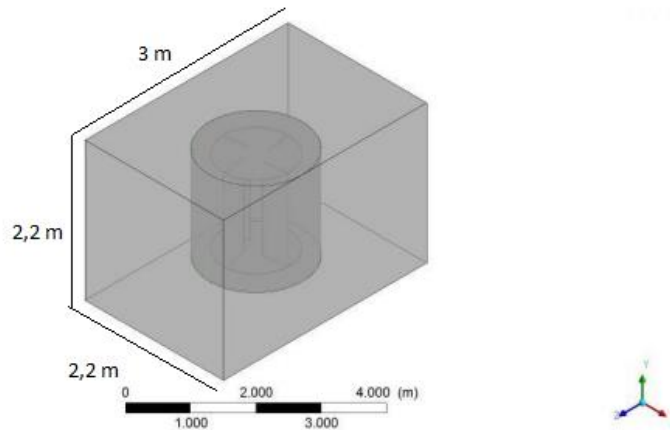
Fonte: Autor.

### 2.1.3 DESCRIÇÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL

As condições iniciais de contorno de *inlet* (entrada) e *outlet* (saída), são superfícies onde tem predominantemente a entrada e saída de fluidos, respectivamente da direção e do escoamento. Essas superfícies têm como objetivo

não influenciar os campos de velocidade e pressão. As fronteiras têm dimensões de  $x=2200$  mm,  $y=2200$  mm e  $z=3000$  mm, conforme a Figura 8.

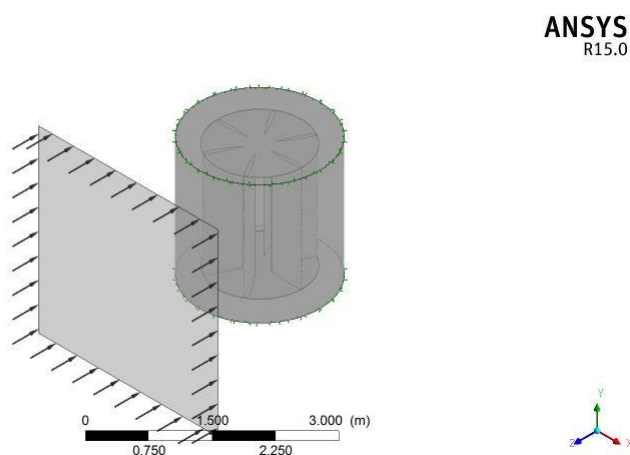
Figura 8: Fronteiras entre a turbina



Fonte: Autor.

A fronteira de entrada (*inlet*), conforme a Figura 9, é a entrada da velocidade do vento que varia de 0 em 20 m/s, e as setas representam as pressões aplicada na fronteira de entrada 0 atm e pressão relativa de 1 atm.

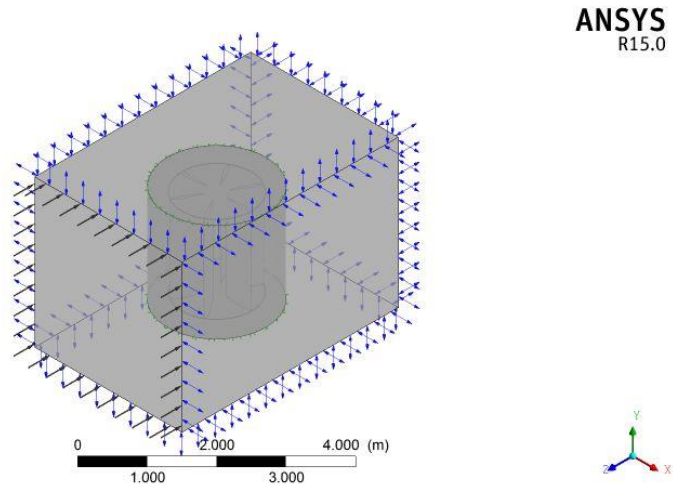
Figura 9: Fronteira de entrada



Fonte: Autor.

A Figura 10, apresenta as fronteiras de saída (outlet) e as setas azuis são a representação das pressões de saída. Em cada turbina, foi realizada a simulação com apenas 100 iterações devido as condições do operacionais do computador.

Figura 10: Fronteira lateral e de saída



Fonte: Autor.

## 2.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação computacional numérica é utilizada para realizar análises e melhorar a qualidade dos produtos e projetos. Desta forma, a geometria da turbina será submetida a condições que representa o domínio contínuo do problema em estudo.

### 2.2.1 CONDIÇÕES INICIAIS DE CONTORNO

A realização da modelagem da TEEV consiste em definir exatamente quais as condições de contorno adequadas à análise, sabendo que, os desfechos dependem diretamente destas condições e, caso necessário, deve se preparar vários modelos de análise para que seja possível avaliar os resultados. O escoamento escolhido é o escoamento permanente, devido as propriedades do fluido não mudar ao longo do tempo.



Depois de feita uma avaliação na maneira que a turbina será trabalhada, foram empregadas condições que se aproximem das condições reais de trabalho no dia a dia. As condições de contorno de entrada (*inlet*), tem uma velocidade normal que varia de 0 em 20 m/s. Já a condição de saída (*outlet*), tem uma pressão relativa de 1 atm e intensidade de turbulência de 5%. Outros parâmetros empregados no domínio variam conforme os locais de aplicação, sendo assim, as condições de contorno empregadas foram:

- Temperatura: Ar a 25° C (Temperatura Ambiente)
- Tipo de ambiente: Externo
- Tipo de fluido: Ar
- Velocidade de entrada: 0 até 20 m/s
- Pressão: 0 atm.
- Pressão Relativa: 1 atm.
- Intensidade de turbulência: 5% (médio)
- Variáveis de saída: Pressão, Velocidade, Pressão total e Vorticidade.

### 2.2.2 MODELAGEM FÍSICA E MATEMÁTICA DO PROBLEMA

O modelo K-epsilon é um dos modelos de turbulência mais comuns. É um modelo de duas equações, ou seja, inclui duas equações de transporte adicionais para representar as propriedades turbulentas do escoamento. Isso permite que um modelo de duas equações leve em conta os efeitos históricos, como convecção e difusão de energia turbulenta (MOHAMED, 2015).

A energia cinética turbulenta,  $k$ , é a variável transportada. A dissipação turbulenta,  $\epsilon$ , é a segunda variável transportada, que determina a escala da turbulência, enquanto a primeira variável,  $k$ , determina a energia na turbulência.

Foi utilizado o modelo de turbulência K-epsilon por sua boa capacidade de reprodução de fenômenos físicos em escoamentos sobre perfis aerodinâmicos e rotores (Kim et al., 2012; Balogh et al., 2012; Sharma et al., 2020) e também por implicar em menor tempo computacional para realização das simulações.

### 2.2.3 MODELO STANDARD K-ÉPSILON

O modelo Standard K-épsilon é um modelo semi-empírico de energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação baseada no modelo de equação de transporte. A equações de transporte deste modelo é descrita nas equações 9 e 10 (FLUENT, 2002).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_K \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (10)$$

Onde:

$G_k$  representa a geração de energia cinética de turbulência devido aos gradientes médios de velocidade e  $G_b$  é a geração de energia cinética de turbulência devido ao empuxo. A variável  $Y_M$  representa a contribuição da dilatação flutuante em turbulência compressível para a taxa de dissipação global.

A modelagem da viscosidade turbulenta é definida na equação 11.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

Onde as constantes do modelo apresentam os seguintes valores  $C_{1\varepsilon}=1.44$ ,  $C_{2\varepsilon}=1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k=1.0$  e  $\sigma_\varepsilon=1.3$  (FLUENT, 2002).

### 3 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Nesse tópico são apresentados os resultados obtidos através das simulações numéricas. Inicialmente são apresentadas as curvas caracterizam a turbina considerando velocidade de vento entre 0 e 20m/s. Na segunda parte foi avaliado o comportamento da distribuição dos campos de velocidade, pressão e turbulência ao redor da turbina.

#### 3.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DA TEEV DE 6 PÁS

Neste tópico são apresentadas as curvas correspondentes ao campo básico de funcionamento da TEEV de 6 pás em estudo no presente trabalho de conclusão de curso. A partir dos resultados obtidos na simulação numérica foi possível levantar as seguintes curvas:

- Curva de eficiência da turbina ( $C_p$ ) versus velocidade específica do vento ( $\lambda$ );
- Curva de torque e de potência mecânica pela velocidade rotacional da turbina;
- Curva de Potência versus Velocidade de vento.

O conhecimento destas curvas é de extrema importância, pois estão associadas ao desempenho da turbina e indicam as melhores condições de trabalho para sua aplicação de acordo com a faixa de velocidades de vento disponível para instalação desta turbina

##### 3.1.1 CURVA DA EFICIÊNCIA DA TURBINA

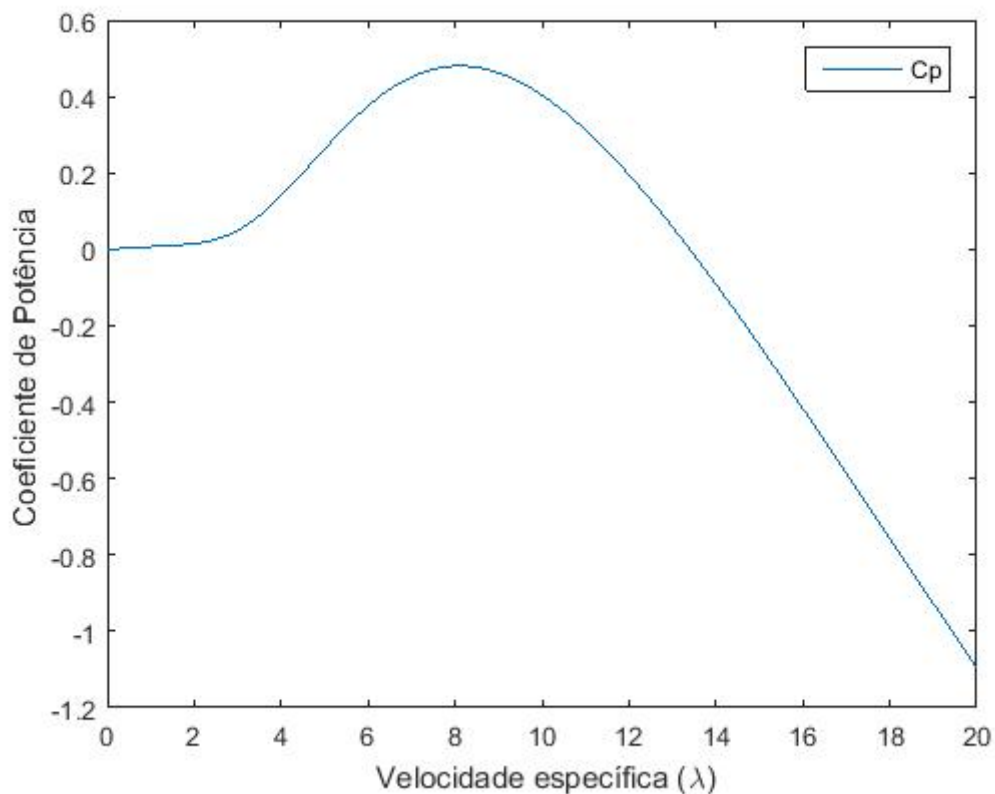
Na Figura 11 é representada a curva de eficiência da TEEV de seis pás, onde são plotados os coeficientes de potência ( $C_p$ ) em função da velocidade específica da turbina ( $\lambda$ ). Para o levantamento desta curva foi adotada uma faixa de velocidade específica entre 0 a 20 e ângulo de passo das pás da turbina ( $\beta$ ) igual a  $0^\circ$ .

O comportamento da curva observado na Figura 11 mostra que a turbina eólica analisada no presente estudo apresenta uma boa faixa de coeficientes de potência variando entre 0,10 e 0,45 para uma faixa de velocidades específicas variando entre 4 e 13, respectivamente. A partir da relação de velocidade específica igual a 13, nota-se que os coeficientes de potência da turbina passam a ser negativos, evidenciando instabilidades operacionais da turbina para altas velocidades de vento.

Ainda na Figura 11, pode se observar que a eficiência máxima da turbina é de aproximadamente 0,45 para velocidade específica próxima a 8. Isto quer dizer que cerca de 45% da energia disponível no vento pode ser convertida em potência mecânica já o restante corresponde a perdas mecânicas e de escoamento através da turbina.

De acordo com Mazumder et al. (2019) o coeficiente de potência do perfil NACA 25112 utilizado na construção da turbina em estudo apresenta coeficiente de potência da ordem de 0,547242, valor este acima do  $c_p$  da TEEV. Em turbinas eólicas não se aproveita todo potencial de produção de potência do conjunto de perfis, sendo assim o valor de 0,45 atingido pela turbina mostra que a geometria em análise apresenta bom potencial de conversão de energia do vento. Valores próximos a este também são encontrados em Mohamed et al. (2015) e Kumar et al. (2015) para uma turbina Darrieus operando com ângulo de passo igual a zero.

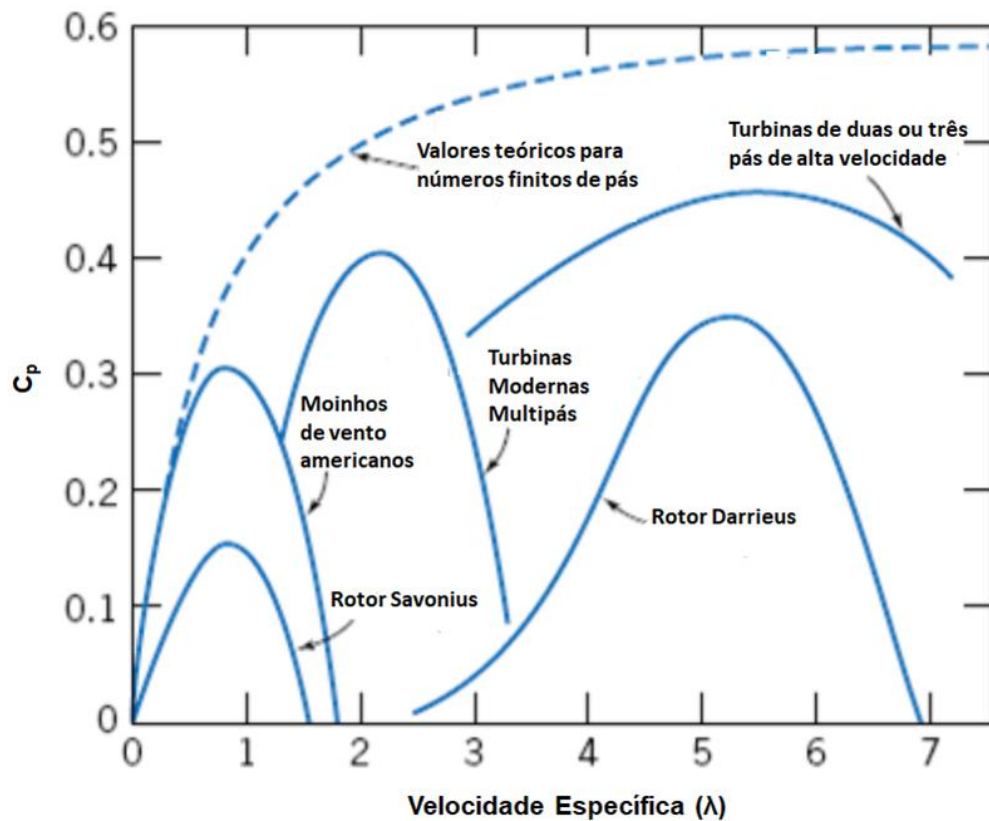
Figura 11: Coeficiente de potência para a TEEV de 6 pás



Fonte: Autor.

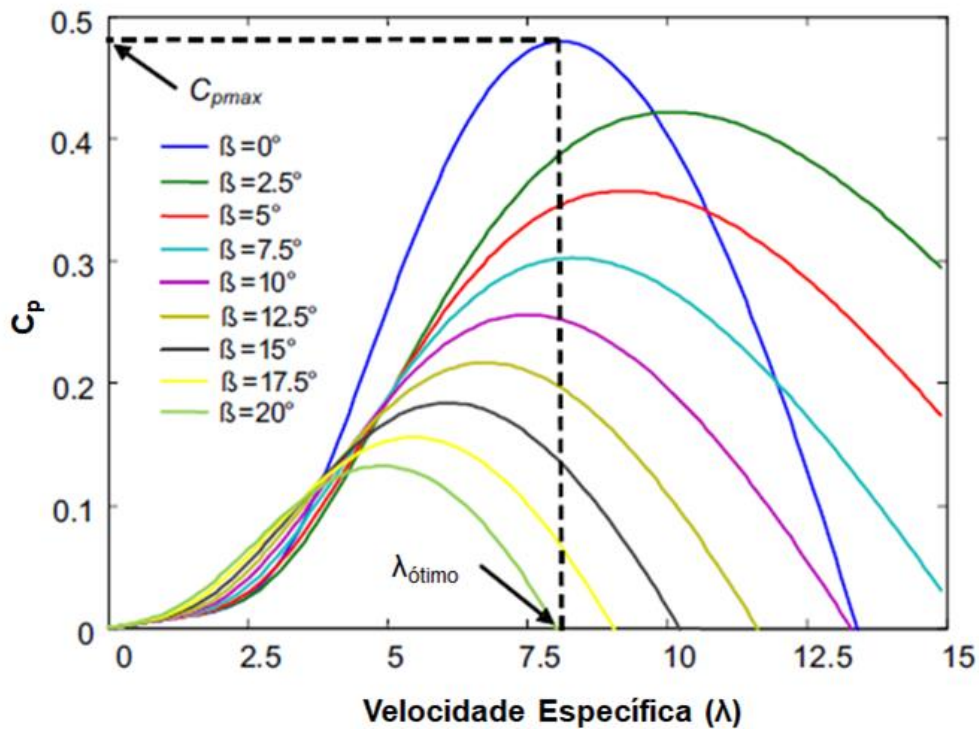
A turbina do presente estudo mistura conceitos geométricos de turbinas do tipo Savonius, Darrieus e turbinas modernas multipás, para as quais os coeficientes de potência máximos variam entre 0,15 e 0,40, aproximadamente, conforme observado na Figura 12. O valor de  $C_p$  igual a 0,45 encontrado no presente trabalho condiz com os valores disponíveis na literatura (THONGAM et al., 2011), porém ainda está acima dos modelos de TEEV citados anteriormente, uma justificativa para isso é que o ângulo de passo das pás das turbinas influencia no coeficiente de potência. Na Figura 13, pode-se notar que quando o ângulo de passo ( $\beta$ ) aumenta existe uma redução no valor do coeficiente de potência extraída do vento e que os valores máximos de  $C_p$  correspondem a  $\beta = 0^\circ$ , valor este correspondente ao do presente trabalho.

Figura 12: Coeficiente de potência para diversos modelos de turbinas eólicas



Fonte: Adaptado de LIBII, (2013).

Figura 13: Coeficiente de potência em função da velocidade específica para diferentes valores de  $\beta$



Fonte: Adaptado de ZARAGOZA et al., (2011).

### 3.1.2 CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA MECÂNICA

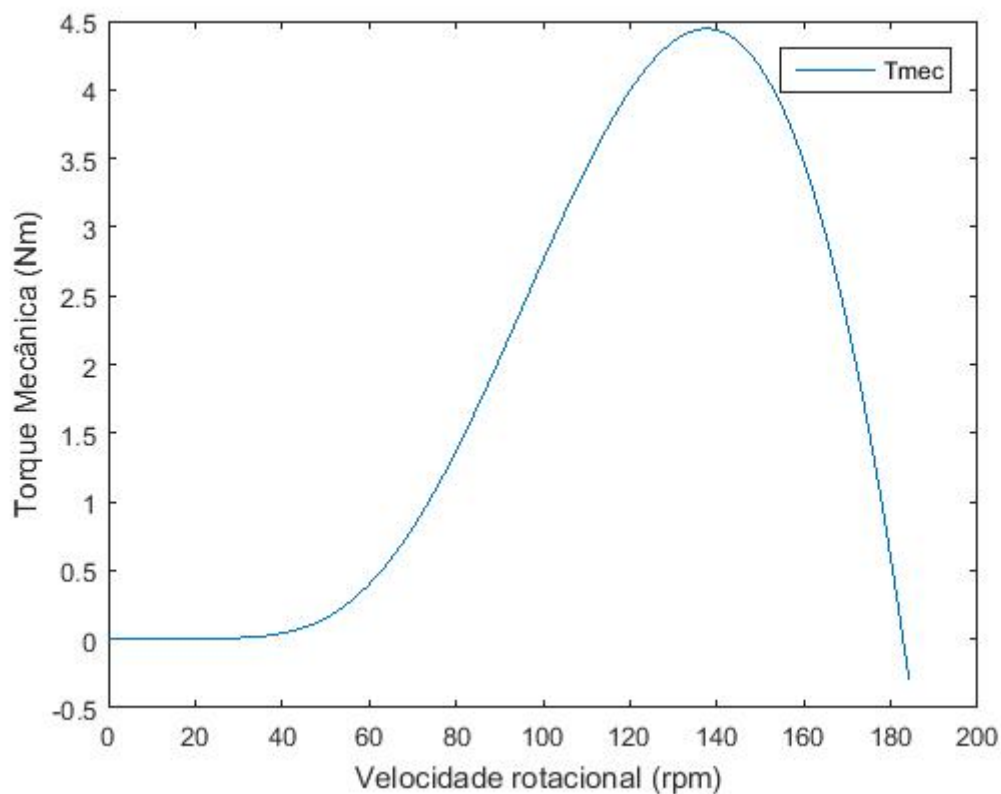
Nas Figuras 14 e 15 são apresentadas a evolução do torque e da potência mecânica em função da velocidade rotacional da TEEV de seis pás, respectivamente. De acordo com a Figura 15 é possível observar que a TEEV de seis pás apresenta um aumento do torque até uma velocidade rotacional de 131 rpm com torque igual a 4,43 N.m, que corresponde a uma velocidade de vento de aproximadamente 9 m/s. A partir deste valor o torque da turbina começa a cair atingindo valores negativos para velocidade rotacional de 182 rpm, com velocidade de vento igual a 13 m/s e torque de 0,56 N.m. Nesse caso, a turbina continua gerando torque e potência mecânica, porém esse torque não é aproveitado. De uma forma geral, quando a rotação da turbina aumenta, para uma determinada velocidade de vento, o torque disponível no eixo da turbina diminui consideravelmente.

A Figura 15 mostra que a potência mecânica (ou de eixo) apresenta o mesmo comportamento da curva de torque, um aumento na velocidade rotacional da turbina

a partir de uma certa faixa de velocidade de vento, implica em queda da potência mecânica. No presente caso a turbina apresenta um aumento de potência mecânica até uma velocidade rotacional de 131 rpm, correspondendo a uma potência de 650 W, valores de rotação acima destes implicam em queda de potência mecânica da turbina.

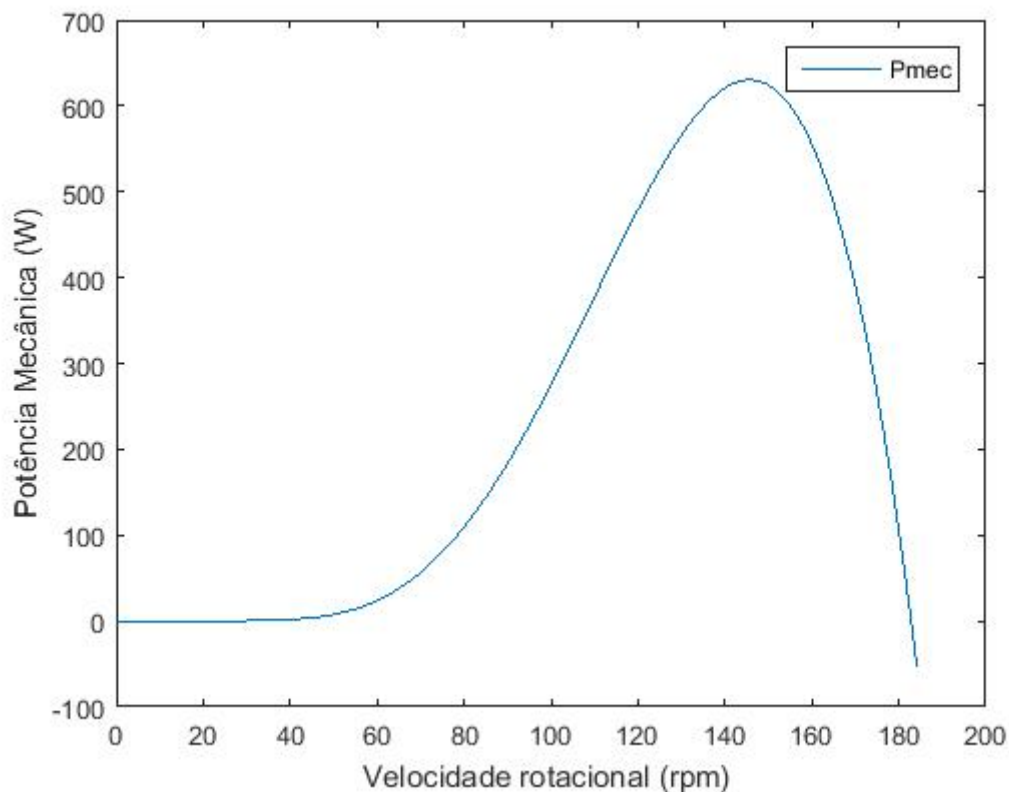
O conhecimento do comportamento das curvas de torque e de potência mecânica da TEEV de seis pás mostram pontos importantes sobre o funcionamento desta em função da velocidade de vento, que vão auxiliar na construção da curva de potência elétrica da turbina que será discutida no item a seguir.

Figura 14: Curva de torque da TEEV de seis pás



Fonte: Autor.

Figura 15: Curva de potência mecânica da TEEV de seis pás.



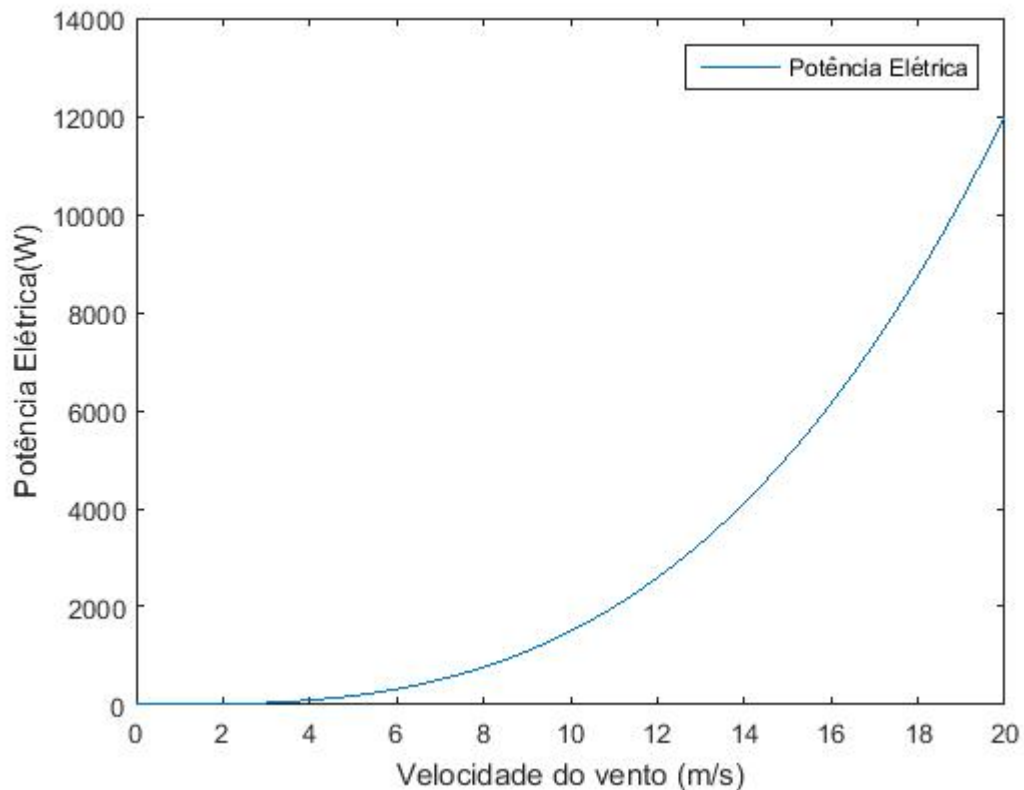
Fonte: Autor.

### 3.1.3 CURVA DA POTÊNCIA ELÉTRICA

A curva de potência elétrica é conhecida como o documento de identidade de uma turbina eólica. Na Figura 16 é mostrada a curva característica preliminar da TEEV de seis pás obtidas através dos resultados numéricos obtidos no presente trabalho. Inicialmente o estudo buscou verificar o desempenho da turbina com a variação da velocidade do vento entre 0 e 20 m/s, onde a potência elétrica produzida atinge um valor máximo de 12000 W para a velocidade de vento de 20 m/s.



Figura 16: Curva de potência elétrica gerada pela turbina de acordo com a velocidade de vento.



Fonte: Autor.

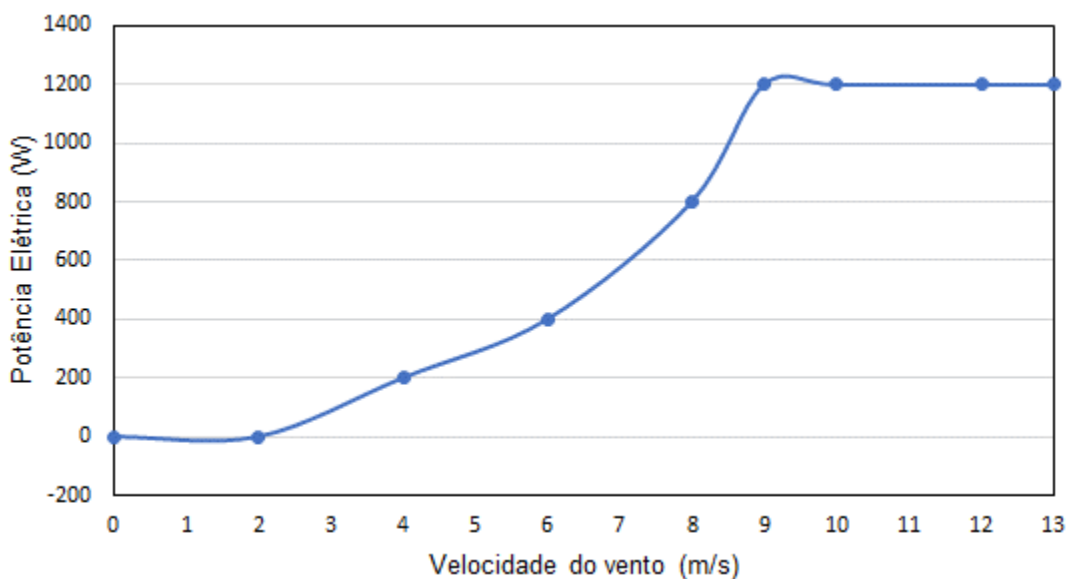
Porém, a curva de coeficiente de potência da Figura 11, mostrou que para valores de velocidade específica ( $\lambda$ ) acima de 13 os valores de  $C_p$  apresentam valores negativos, ou seja, a partir deste valor de velocidade a TEEV começará a apresentar instabilidades (como vibrações e ruídos) de funcionamento, que resultam da geometria da turbina e do tipo de pás utilizadas para conversão de energia (AKWA et al., 2012). Considerando ainda as observações referentes às curvas de torque e de potência mecânica realizadas no Item 3.1.2, é possível definir o real comportamento da curva de potência elétrica da TEEV de seis pás de acordo com as seguintes conclusões:

- Conforme observado nas Figuras 13 e 14, no Item 1.3.2, o máximo torque desenvolvido pela TEEV corresponde à velocidade de 9 m/s;
- O valor de torque, de potência mecânica e do  $C_p$  começam a cair a partir desta velocidade de 9 m/s;

- Os valores de  $C_p$ , de torque e de potência mecânica começam a apresentar valores negativos para  $\lambda = 13$  e velocidade rotacional de 182,5 rpm, que corresponde a uma velocidade de vento de 13 m/s, aproximadamente.

A partir destas considerações é possível construir uma aproximação real da curva de potência elétrica da TEEV, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17: Curva de potência elétrica gerada pela TEEV de seis pás em função da velocidade do vento



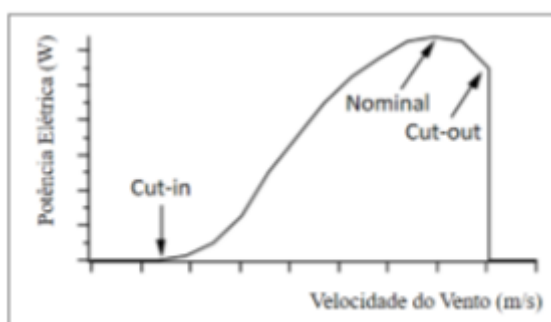
Fonte: Autor.

Na Figura 17 apresenta o comportamento real da turbina. Nela observamos três regiões:

- Região I – de 0 a 2 m/s: Esta região representa o ponto da velocidade de partida da TEEV, onde a potência gerada é próxima a zero e é consumida durante a partida da mesma.
- Região II – de 2 a 9 m/s: Esta região representa a faixa de operação ótima da turbina, com velocidade de partida de 2 m/s gerando uma potência máxima de 1200 Watts para velocidade de 9 m/s.
- Região III – 9 a 13 m/s: representa a região de eficiência reduzida da TEEV. A partir de 13 m/s não há produção de potência.

Este comportamento da curva de potência elétrica condiz com o conceito disponível na literatura (Ver Figura 18). Vale lembrar que esta é uma aproximação inicial e que para verificar o comportamento real será necessário o desenvolvimento de experimentos para confirmação desta curva.

Figura 18: Comportamento da velocidade em turbinas



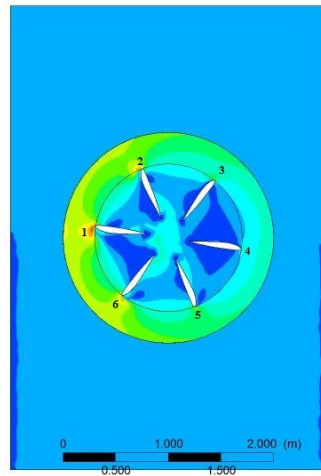
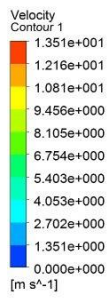
Fonte: MANWELL, 2010.

### 3.2 CONTORNO DE VELOCIDADE E PRESSÃO

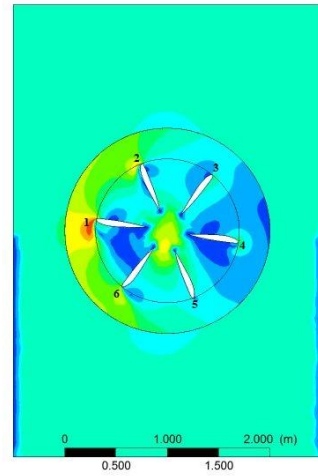
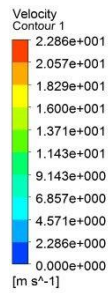
Neste tópico são apresentados os contornos de velocidade e pressão obtidos nas simulações numéricas para as velocidades delimitantes da curva de potência elétrica da TEEV (Ver Figura 18) velocidades de vento operadas pela turbina.

Nas Figuras 19, são apresentados os perfis de velocidades para as velocidades de 2, 9 e 13 m/s e para todos os casos analisados é possível observar que quando o vento incide na turbina ele perde velocidade à medida que passa pelas pás do rotor e se aproxima do bordo de fuga das pás. Porém, à medida que o escoamento cruza o rotor, ele volta a ganhar velocidade resultando em regiões de maiores velocidades na região adjacente à saída do rotor. Este mesmo comportamento é observado nos resultados das simulações numéricas de Morshed et al. (2013) para uma turbina Savonius com três pás semicirculares, o que confirma de forma qualitativa que os fenômenos que se desenvolvem no rotor em estudo no presente trabalho apresentam características compatíveis com o rotor do tipo Savonius.

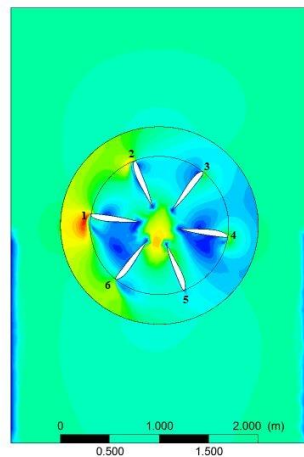
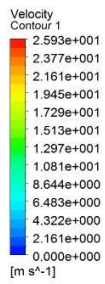
Figura 19: Campo de velocidade



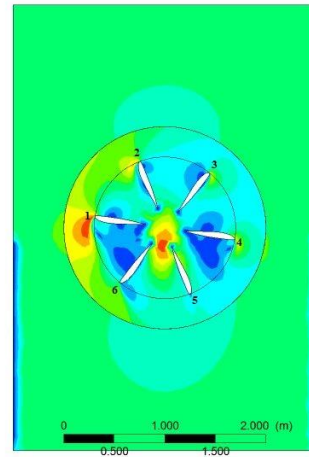
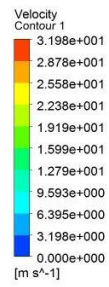
2 m/s



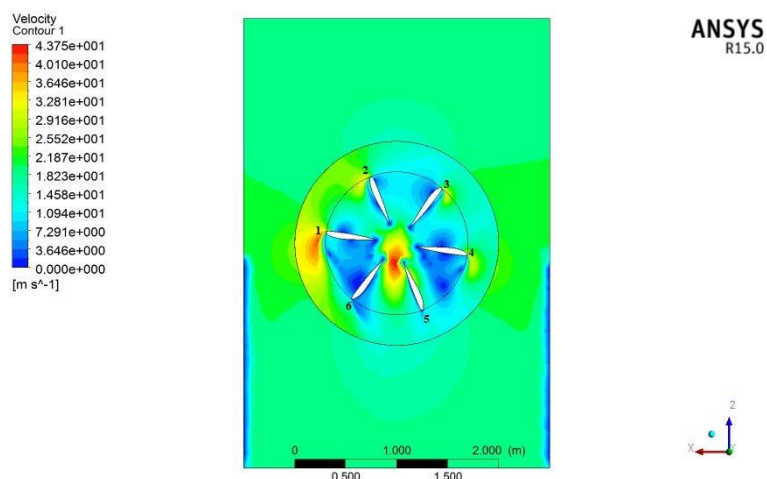
9 m/s



10m/s



14 m/s

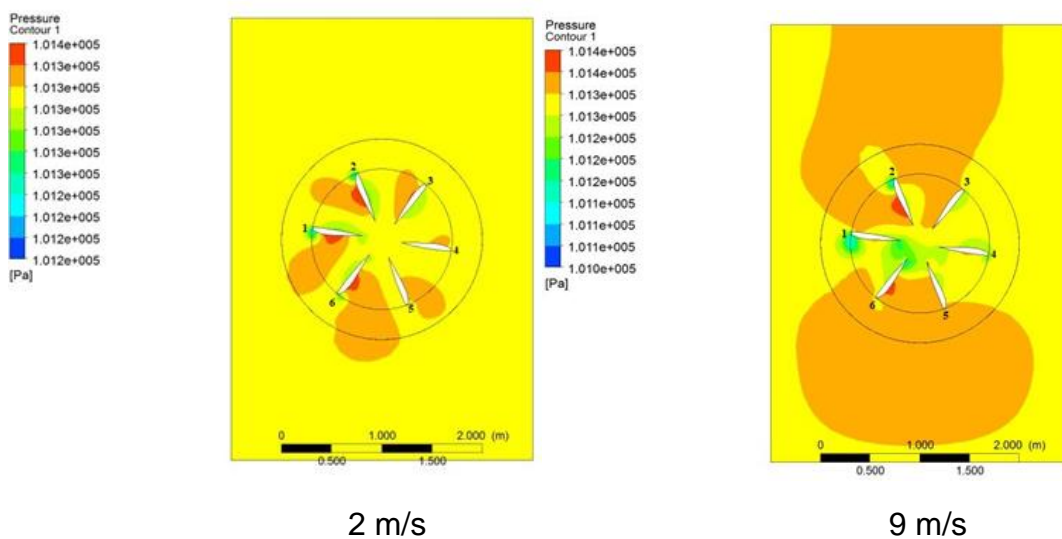


20 m/s

Fonte: Autor.

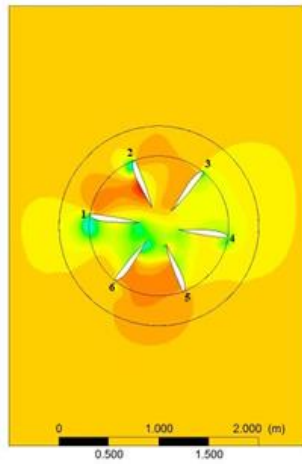
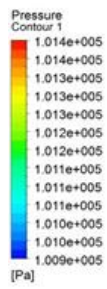
Na Figura 20 são apresentados os campos de pressão para as velocidades 2, 9 e 13 m/s e pode-se observar que à medida que o escoamento passa pelo perfil aerodinâmico no rotor, obedece às leis de escoamento externo, gerando uma região de alta pressão na parte inferior do perfil e de baixa pressão na região superior. Tomando como exemplo o perfil 1, na Figura 20, é possível observar que a alta pressão na região inferior deste perfil, promove o movimento rotacional do perfil 2 devido à região de baixa pressão que se desenvolve na parte superior deste último. Este condiz mais uma vez, com o trabalho de Morshed (2013).

Figura 20: Campo de pressão

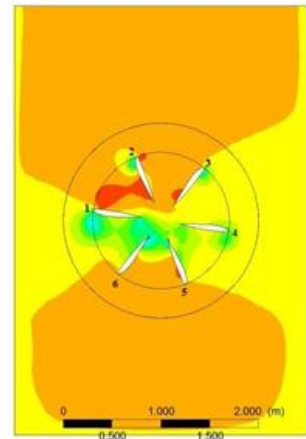
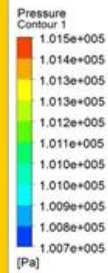


2 m/s

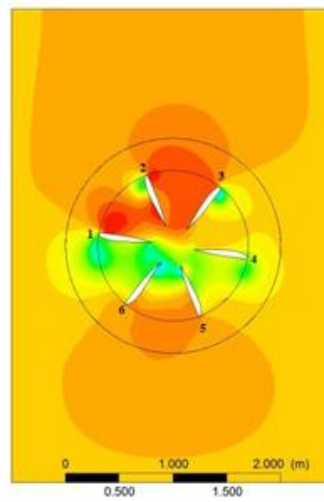
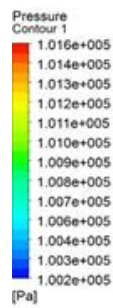
9 m/s



10 m/s



13 m/s



20 m/s

Fonte: Autor.

## 4 CONCLUSÃO

Ao analisar a curva do coeficiente de potência em termos de velocidade específica, nota-se que a máxima eficiência da turbina em estudo pode ser obtida quando a velocidade específica estiver próximo de 8, quando a velocidade do vento aumenta e ultrapassa 13m/s, a turbina começa a ficar instável gerando uma potência de 6,50kW para uma rotação máxima de 131 rpm.

Ao verificar o comportamento do campo de velocidade e pressão é perceptível que o vento incide na turbina e perde a velocidade à medida que passa pelas pás do rotor e se aproxima do bordo de fuga das pás. No campo de pressão, na parte inferior do perfil gera uma alta pressão e na inferior uma baixa pressão obedecendo a leis de escoamento externo.

Para trabalhos futuros, os dados coletados e analisados nas simulações e, as curvas propostas podem ser utilizadas e adaptadas de acordo com as regiões. Outro ponto interessante é o estudo experimental da TEEV 6 pás, e a realizar a coleta de dados em campo e fazer uma comparação teórica e prática para analisar se os resultados encontrados na simulação são compatíveis com os práticos.

## 5 REFERÊNCIAS

AHMAD, Muhammad et al. Design optimization of Double-Darrieus hybrid vertical axis wind turbine. **Ocean Engineering**, v. 254, p. 111171, 2022.

AKWA, Joao Vicente; VIELMO, Horacio Antonio; PETRY, Adriane Prisco. A review on the performance of Savonius wind turbines. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 16, n. 5, p. 3054-3064, 2012.

ANI, Samuel O.; POLINDER, Henk; FERREIRA, Jan Abraham. Comparison of energy yield of small wind turbines in low wind speed areas. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 4, n. 1, p. 42-49, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica), **Boletim Anual de Geração Eólica**. São Paulo, 2020.

BALOGH, Miklós; PARENTE, Alessandro; BENOCCI, Carlo. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced k- $\epsilon$  model and wall function formulation: Implementation and comparison for fluent and OpenFOAM. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 104, p. 360-368, 2012.

BHAYO, Bilawal A.; AL-KAYIEM, Hussain H. Experimental characterization and comparison of performance parameters of S-rotors for standalone wind power system. **Energy**, v. 138, p. 752-763, 2017.

BIANCHINI, Alessandro et al. Influence of the blade-spoke connection point on the aerodynamic performance of Darrieus wind turbines. In: **Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air**. American Society of Mechanical Engineers, 2016. p. V009T46A012.

BURTON, T. et al. Wind energy handbook. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001.



CARMO, D. M. F. G. M. **Projeto de uma turbina eólica de eixo vertical para aplicação em meio urbano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2012.

DE TAVERNIER, Delphine; FERREIRA, Carlos; VAN BUSSEL, Gerard. Airfoil optimisation for vertical-axis wind turbines with variable pitch. **Wind Energy**, v. 22, n. 4, p. 547-562, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2019**. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

FERRARI, G. et al. CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis. **Renewable energy**, v. 105, p. 722-734, 2017.

FLUENT, I. Fluent 14.5 user guide. **Fluent Inc., Lebanon. NH-03766**, 2002.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, G. W. E. C. Global wind report 2021. 2021.

GORAYEB, Adryane; BRANNSTROM, Christian. Caminhos para uma gestão participativa dos recursos energéticos de matriz renovável (parques eólicos) no nordeste do Brasil. **Mercator**, Fortaleza, v. 15, n. 1, p. 101-115, 2016.

HAND, Brian; CASHMAN, Andrew; KELLY, Ger. A low-order model for offshore floating vertical axis wind turbine aerodynamics. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 1, p. 512-520, 2016.

HAND, Brian; CASHMAN, Andrew. A review on the historical development of the lift-type vertical axis wind turbine: From onshore to offshore floating application. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 38, p. 100646, 2020.

HASHMI, Md Umar. Design and development of upf rectifier in a microgrid environment. **Indian Institute of Technology Bombay**, 2012.

HOSSEINI, Arian; GOUDARZI, Navid. Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems. **Energy conversion and management**, v. 189, p. 49-59, 2019.

ISLAM, Mazharul; TING, David SK; FARTAJ, Amir. Desirable airfoil features for smaller-capacity straight-bladed VAWT. **Wind Engineering**, v. 31, n. 3, p. 165-196, 2007.

KAPLAN, Yusuf Alper. Overview of wind energy in the world and assessment of current wind energy policies in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 562-568, 2015.

KIM, Donghyun; KIM, B.-Y. Development and validation of computational wind field model (Wind scape). 2012.

KORPRASERTSAK, Natapol; LEEPHAKPREEDA, Thananchai. Analysis and optimal design of wind boosters for Vertical Axis Wind Turbines at low wind speed. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 159, p. 9-18, 2016.

KUMAR, Rakesh; RAAHEMIFAR, Kaamran; FUNG, Alan S. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 281-291, 2018.

KUMAR, AV Pavan; PARIMI, Alivelu M.; RAO, K. Uma. Investigation of small PMSG based wind turbine for variable wind speed. In: **2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)**. IEEE, 2015. p. 107-112.

LAP-ARPARAT, Pongpak; LEEPHAKPREEDA, Thananchai. Real-time maximized power generation of vertical axis wind turbines based on characteristic curves of power coefficients via fuzzy pulse width modulation load regulation. **Energy**, v. 182, p. 975-987, 2019.

LI, Chao et al. Optimization of blade pitch in H-rotor vertical axis wind turbines through computational fluid dynamics simulations. **Applied Energy**, v. 212, p. 1107-1125, 2018.

LIBII, Josué Njock. Comparing the calculated coefficients of performance of a class of wind turbines that produce power between 330 kW and 7,500 kW. **World Transactions on Engineering and Technology Education**, v. 11, n. 1, p. 36-40, 2013.

MARSH, Philip et al. Numerical investigation of the influence of blade helicity on the performance characteristics of vertical axis tidal turbines. **Renewable Energy**, v. 81, p. 926-935, 2015.

MANWELL, James F.; MCGOWAN, Jon G.; ROGERS, Anthony L. **Wind energy explained: theory, design and application**. John Wiley & Sons, 2010.

MAZUMDER, Arnob; SHUVO, Badhan; ISLAM, MD. Samim. **Study of Blade Performance Parameters of Horizontal Axis Wind Turbine for Different Airfoil Section to be used in Bangladesh**. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering), Department of Mechanical Engineering Bangladesh University of Engineering and Technology, 2019.

MERTENS, Sander. Wind energy in the built environment: concentrator effects of buildings. 2006.

MIGLIORE, P. G.; WOLFE, W. P.; FANUCCI, J. B. Flow curvature effects on Darrieus turbine blade aerodynamics. **Journal of Energy**, v. 4, n. 2, p. 49-55, 1980.

MOHAMED, M. H.; ALI, A. M.; HAFIZ, A. A. CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wind energy converter. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 18, n. 1, p. 1-13, 2015.

MORSLED, Khandakar Niaz et al. Wind tunnel testing and numerical simulation on aerodynamic performance of a three-bladed Savonius wind turbine. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1-14, 2013.

NIMVARI, Majid Eshagh; FATAHIAN, Hossein; FATAHIAN, Esmaeel. Performance improvement of a Savonius vertical axis wind turbine using a porous deflector. **Energy Conversion and Management**, v. 220, p. 113062, 2020.

SAAD, Ahmed S. et al. Performance enhancement of twisted-bladed Savonius vertical axis wind turbines. **Energy Conversion and Management**, v. 209, p. 112673, 2020.

SAAT, Abdullah Fauzi; ROSLY, Nurhayati. Aerodynamic analysis of vertical axis wind turbine. **Journal of Aviation and Aerospace Technology**, v. 1, n. 1, 2019.

SHARMA, Pramod Kumar; WARUDKAR, Vilas; AHMED, Siraj. Application of a new method to develop a CFD model to analyze wind characteristics for a complex terrain. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 37, p. 100580, 2020.

SHELDAHL, Robert E.; BLACKWELL, Bennie F.; FELTZ, Louis V. Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors. **Journal of Energy**, v. 2, n. 3, p. 160-164, 1978.

SHIONO, Mitsuhiro; SUZUKI, Katsuyuki; KIHO, Sezji. Output characteristics of Darrieus water turbine with helical blades for tidal current generations. In: **The twelfth international offshore and polar engineering conference**. OnePetro, 2002.

SILVA, Renato Ferreira. **Emulação de uma turbina eólica e controle vetorial do gerador de indução rotor gaiola de esquilo para um sistema eólico**. 112 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

THONGAM, J. S. et al. Control of variable speed wind energy conversion system using a wind speed sensorless optimum speed MPPT control method. In: **IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2011. p. 855-860.

TOOLS, Airfoil. NACA 5 digit airfoil generator. **National Advisory Committee for Aeronautics**, 2021.

XU, You-Lin; PENG, Yi-Xin; ZHAN, Sheng. Optimal blade pitch function and control device for high-solidity straight-bladed vertical axis wind turbines. **Applied Energy**, v. 242, p. 1613-1625, 2019.

ZANFORLIN, Stefania; DELUCA, Stefano. Effects of the Reynolds number and the tip losses on the optimal aspect ratio of straight-bladed Vertical Axis Wind Turbines. **Energy**, v. 148, p. 179-195, 2018.

ZARAGOZA, Jordi et al. Study and experimental verification of control tuning strategies in a variable speed wind energy conversion system. **Renewable Energy**, v. 36, n. 5, p. 1421-1430, 2011.