



**INSTITUTO FEDERAL**  
Santa Catarina

Ministério da Educação  
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica  
**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA**

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS LAGES  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Thainara Hamerski Cabral

**Avaliação Experimental do Desempenho de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical Darrieus  
Rotor-H Confeccionadas em Prototipagem 3D**

LAGES  
2024

Thainara Hamerski Cabral

**Avaliação Experimental do Desempenho de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical Darrieus  
Rotor-H Confeccionadas em Prototipagem 3D**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Gustavo Schreiber.

Coorientador: Prof. MSc. Fernando da Silva Osório.

Lages

2024

Thainara Hamerski Cabral

**Avaliação Experimental do Desempenho de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical Darrieus  
Rotor-H Confeccionadas em Prototipagem 3D**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Mecânica

Lages, 27 de março de 2024.

---

Prof. Fernando da Silva Osório, MSc.  
Coordenador do Curso  
Coorientador

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Rafael Gustavo Schreiber, Dr.  
Orientador  
IFSC Campus Lages

---

Prof. Matheus Fontanelle Pereira, Dr.  
Avaliador  
IFSC Campus Lages

---

Prof<sup>ª</sup>. Natália Madalena Boelter, MSc  
Avaliadora  
IFSC Campus Lages

Este trabalho é dedicado a Deus, meus queridos pais e minha  
Irmã.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao criador por minha vida, por tudo que fez por mim e por nunca me abandonar.

Aos meus pais Sônia Neiva Hamerski Cabral e João Valdomiro de Campos Cabral, pela motivação, pelo amor e pelo apoio.

A minha irmã Ritiéli Hamerski Cabral por ser minha inspiração e por sempre estar ao meu lado.

Ao meu orientador Professor Rafael Gustavo Schreiber por seus ensinamentos, incentivo e compreensão.

Ao meu coorientador Fernando da Silva Osório, aos professores Matheus Fontanelle Pereira e Natália Madalena Boelter pela dedicação com que transmitem seus conhecimentos e exercem o ensino.

Aos meus amigos e colegas de curso, em especial agradeço ao Rafael Engels sem o qual este trabalho não seria possível.

Aos demais professores do IFSC e todos os funcionários da instituição.

“O vento assopra onde quer, e ouves a sua voz, mas não sabes de onde vem, nem para onde vai; assim é todo aquele que é nascido do Espírito.” (João 3:8)

## RESUMO

As turbinas eólicas de eixo vertical apresentam melhor desempenho para aplicações com alta turbulência e flutuações de fluxo de ar, se comparadas as turbinas de eixo horizontal. Porém a sua performance e eficiência variam de acordo com o modelo de aerofólio utilizado. Para comparar o desempenho de dois perfis de turbina Darrieus Rotor-H, o perfil NACA0015 e o perfil J-NACA0015, foram realizados testes experimentais em túnel de vento considerando diferentes velocidades (3 m/s, 4 m/s, 6 m/s e 8 m/s) que correspondem, respectivamente, a 25%, 50%, 75% e 100% da potência do túnel de vento. Sendo possível determinar os valores de velocidade de rotação e tensão elétrica da turbina para cada configuração do túnel de vento, considerando os dois perfis e dois diferentes ângulos de haste. Os valores máximos de velocidade de rotação e de tensão elétrica encontrados foram, respectivamente, de 780 RPM e 5 V, para o perfil NACA0015 (geometria sólida) com ângulo de haste de 40°.

**Palavras-Chave:** Darrieus; Turbina Eólica; Túnel de Vento.

## **ABSTRACT**

Vertical axis wind turbines perform better for applications with high turbulence and air flow fluctuations, compared to horizontal axis turbines. However, its performance and efficiency vary depending on the airfoil model used. To compare the performance of two Darrieus Rotor-H turbine profiles, the NACA0015 profile and the J-NACA0015 profile, experimental tests were carried out in a wind tunnel considering different speeds (3 m/s, 4 m/s, 6 m/s and 8 m/s) which correspond, respectively, to 25%, 50%, 75% and 100% of the wind tunnel power. It is possible to determine the turbine rotation speed and electrical voltage values for each wind tunnel configuration, considering the two profiles and two different rush angles. The maximum values of rotation speed and electrical voltage found were, respectively, 780 RPM and 5 V, for the NACA0015 profile (solid geometry) with a pressure angle of 40°.

**Keywords:** Darrieus; Wind turbine; Wind tunnel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fontes de geração na matriz elétrica brasileira.....	16
Figura 2 - Moinho de vento persa modelo vertical.....	20
Figura 3 - Moinho de vento do tipo holandês.....	21
Figura 4 - Gerador eólico de Chars F. Brush, USA, 1987/88. ....	22
Figura 5 - Ventos de circulação global. ....	24
Figura 6 - Representação da Energia Cinética absorvida por um aerogerador. ....	26
Figura 7 - Turbina de eixo vertical modelo Darrieus.....	26
Figura 8 - Curva de potência do vento em função de sua velocidade.....	28
Figura 9 - Forças que atuam em um objeto imerso em fluxo de ar. ....	29
Figura 10 - Diagrama de forças da pá (aerofólio).....	30
Figura 11 - O princípio da conversão da energia do vento em energia elétrica. ....	32
Figura 12 - Incidência do vento em uma turbina (a) upwind e (b) downwind.....	33
Figura 13 - Principais subsistemas de um aerogerador de eixo horizontal. ....	34
Figura 14 - TEEVs. (a) Savonius; (b) Darrieus; (c) Darrieus Rotor H. ....	36
Figura 15 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus. ....	37
Figura 16 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius. ....	38
Figura 17 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius de pás torcidas.....	39
Figura 18 - Túnel de vento DL WIND-B.....	40
Figura 19 - Plaqueta de identificação: Motor do ventilador do túnel de vento. ....	41
Figura 20 - Detalhes do tubo de Pitot instalado no túnel de vento.....	42
Figura 21 - Manômetro de coluna tipo U com régua graduada.....	42
Figura 22 - Medição de velocidade com anemômetro portátil.....	44
Figura 23 - Perfil aerodinâmico NACA0015. ....	45
Figura 24 - Configuração da turbina Darrieus Rotor-H J-NACA0015.....	45
Figura 25 - Protótipos projetados com a mesma estrutura central. a) Perfil NACA0015.      b) Perfil J-NACA0015. ....	46
Figura 26 - Peça rompida impressa com filamento ABS.....	46
Figura 27 - Peça posicionada no software Ultimaker Cura.....	47
Figura 28 - Impressão 3D do perfil NACA0015. ....	48
Figura 29 - Turbina montada junto ao gerador elétrico. ....	48
Figura 30 - Turbina posicionada no túnel de vento. ....	49
Figura 31 - Tacômetro digital TESTO 460. ....	50

Figura 32 - Medição da velocidade angular. ....	50
Figura 33 - Multímetro digital ET-2042F. ....	51
Figura 34 - Medição de tensão através de multímetro. ....	51
Figura 35 - Superfície 3D do perfil de velocidades (a) 420 rpm; (b) 840 rpm; (c) 1260 rpm; (d) 1680 rpm. ....	53
Figura 36 - Rotações por minuto para os dois perfis com diferentes ângulos de haste. ....	54
Figura 37 - Tensão gerada pelos dois perfis com diferentes ângulos de haste. ....	56

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Configurações de preenchimento das peças impressas. ....	47
Tabela 2 - Velocidade de rotação para cada perfil.....	55
Tabela 3 - Tempo de partida para cada perfil.....	55
Tabela 4 - Tensão gerada por cada perfil. ....	56

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**ABEEólica** – Associação Brasileira de Energia Eólica

**ABS** – Acrilonitrila Butadieno Estireno

**ANEEL** – Agência Nacional de Energia Elétrica

**GEE** – Gases de efeito estufa

**GWEC** – Global Wind Energy Council

**IFSC** – Instituto Federal de Santa Catarina

**NACA** – National Advisory Committee for Aeronautics

**PLA** – Políácido Láctico

**SSC** – Self Start Capability

**TEEH** – Turbina Eólica de Eixo Horizontal

**TEEV** – Turbina Eólica de Eixo Vertical

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A$  – Área varrida pelo aerogerador ( $m^2$ )  
 $\alpha$  – Ângulo de ataque ( $^\circ$ )  
 $C$  – Corda da pá ( $m$ )  
 $Cd$  – Coeficiente de arrasto (–)  
 $Cl$  – Coeficiente de sustentação (–)  
 $Cn$  – Coeficiente de força normal (–)  
 $Ct$  – Coeficiente de força tangencial (–)  
 $D$  – Força de arrasto ( $N$ )  
 $Ec$  – Energia cinética ( $J$ )  
 $Fn$  – Força normal ( $N$ )  
 $Ft$  – Força tangencial ( $N$ )  
 $Fta$  – Força tangencial média ( $N$ )  
 $H$  – Altura da turbina ( $m$ )  
 $l$  – Comprimento do cilindro ( $m$ )  
 $L$  – Força de sustentação ( $N$ )  
 $m$  – Massa de ar ( $kg$ )  
 $\dot{m}$  – Fluxo de massa de ar ( $kg/s$ )  
 $N$  – Número das pás (–)  
 $n$  – Número de mols ( $mol$ )  
 $P$  – Pressão (Pa)  
 $Patm$  – Pressão atmosférica (Pa)  
 $Pdisp$  – Potência disponível do vento ( $W$ )  
 $Ptotal$  – Potência total turbina ( $W$ )  
 $R$  – Raio da turbina ( $m$ )  
 $Rar$  – Constante do ar ( $J/kgK$ )  
 $T$  – Torque ( $Nm$ )  
 $\theta$  – Temperatura em escala absoluta ( $K$ )  
 $v$  – Velocidade do vento ( $m/s$ )  
 $V$  – Volume ( $m^3$ )  
 $\rho$  – Massa específica do ar ( $kg/m^3$ )  
 $\omega$  – Velocidade de rotação ( $rpm$ )

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1	OBJETIVOS .....	17
1.1.1	Objetivo Geral .....	17
1.1.2	Objetivos Específicos .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
2.1	ENERGIA EÓLICA .....	19
2.1.1	Histórico .....	19
2.1.2	Benefícios .....	22
2.2	RECURSO EÓLICO .....	23
2.2.1	Caracterização dos ventos .....	23
2.2.2	Potencial Eólico.....	24
2.2.3	Fatores Influentes na Energia do Vento .....	27
2.2.4	Aerodinâmica das Turbinas Eólicas .....	28
2.3	AEROGERADORES .....	31
2.3.1	A conversão de Energia .....	32
2.3.2	Classificação Aerogeradores .....	32
	2.3.2.1 Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH) .....	33
	2.3.2.2 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV) .....	35
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	40
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO.....	40
3.1.1	Especificações do túnel de vento.....	40
3.1.1	Medição das pressões e definição do perfil de velocidades.....	41
3.2	FABRICAÇÃO PROTÓTIPO .....	44
3.2.1	Escolha dos perfis aerodinâmicos .....	44
3.2.2	Dimensionamento do protótipo .....	45
3.2.3	Fabricação dos modelos em impressora 3D .....	46
3.2.4	Montagem da turbina .....	48
3.3	ANÁLISE EM TÚNEL DE VENTO .....	49
3.3.1	Determinação experimental da velocidade angular .....	49
3.3.2	Medição da tensão gerada pela turbina .....	51
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	53

4.1	CARACTERIZAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO.....	53
4.2	PROTOTIPAGEM 3D.....	54
4.3	VELOCIDADE ANGULAR .....	54
4.4	TENSÃO GERADA PELA TURBINA .....	56
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	59
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE A – Modelo de planilha utilizada para coleta de dados</b> .....	<b>62</b>
	<b>ANEXO A – Especificações túnel de vento .....</b>	<b>63</b>

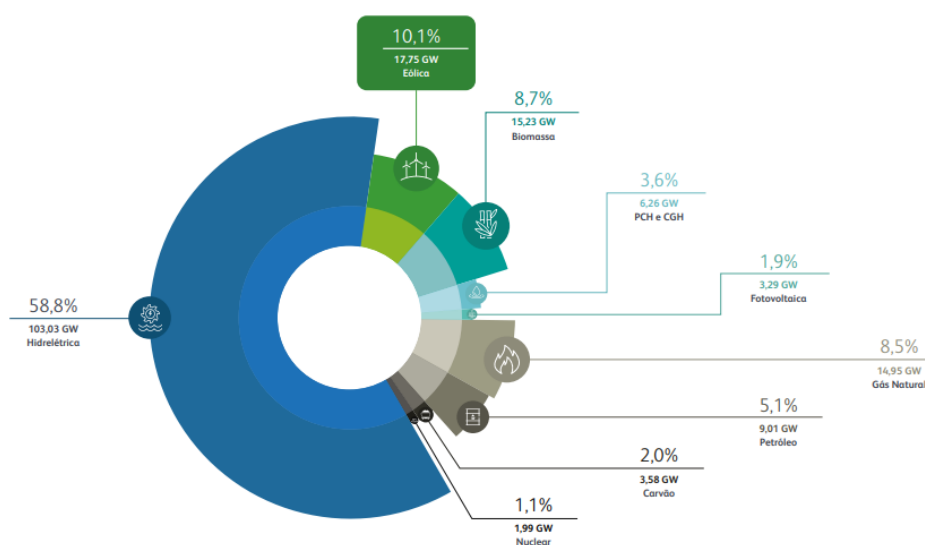
# 1 INTRODUÇÃO

A utilização do vento como um recurso energético nasceu da descoberta da conversão de sua energia em algo útil, através de instrumentos como os moinhos de vento, que possibilitam a moagem de grãos ou a elevação de água (Santos, Fontes de Energia Nova e Renovável, 2013). A energia eólica é uma energia limpa, abundante e renovável, que é gerada pelas massas de ar em deslocamento (Reis, 2008).

O aumento no consumo de energia elétrica, somado à escassez dos recursos fósseis traz uma grande relevância para as pesquisas e melhorias na transformação da energia mecânica em energia elétrica. Com foco na preservação ambiental, opções sustentáveis como a energia eólica se destacam por sua eficácia e pela ausência de danos ao meio ambiente, já que o vento é um elemento natural no ambiente e, em certas áreas, quase constante.

No Brasil, a energia eólica representa cerca de 10,13% da matriz elétrica brasileira com fornecimento de 17,75 GW, de acordo com a ABEEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica), conforme indicado na Figura 1. A expansão dessa fonte de energia fez o país subir no ranking do Global Wind Energy Council (GWEC) e ocupar a sexta posição em Capacidade Total Instalada de Energia Eólica Onshore<sup>1</sup> em 2021, devido seu crescimento na última década, destacando-se entre os cinco principais mercados do mundo para novas instalações, junto com a China, os Estados Unidos, o Vietnã e o Reino Unido que representam 75,1% das instalações (Brasil, 2022).

Figura 1 - Fontes de geração na matriz elétrica brasileira.



Fonte: ABEEÓLICA, 2020.

<sup>1</sup> Geração de energia elétrica através dos ventos dos parques eólicos localizados em terra.

Para a conversão de energia eólica em energia elétrica são utilizadas turbinas eólicas, máquinas capazes de absorver parte da potência cinética do vento através de um rotor aerodinâmico, por meio da rotação das pás, em torno de seu eixo, convertendo a energia cinética em potência mecânica de eixo, que através de um gerador elétrico é convertida em potência elétrica (Melo, 2013). A classificação das turbinas eólicas é feita segundo a posição do eixo do rotor, as denominadas Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH) possuem pás que giram num plano perpendicular à direção do vento, as Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV) possuem suas pás girando num plano paralelo à direção do vento.

A aquisição de uma turbina eólica requer um investimento elevado, no entanto, sua manutenção acessível e os custos operacionais reduzidos a tornam uma opção bastante viável para a geração de energia renovável.

Na busca pela melhoria da eficiência energética das turbinas eólicas são utilizadas análises do escoamento em torno de suas pás, onde a mínima variação da geometria impacta em uma mudança na potência gerada. Essa análise de interação do fluido e da estrutura pode ser realizada utilizando modelos teóricos e modelos experimentais.

Assim, percebendo a expansão do mercado eólico, que está associada com a problemática da utilização da energia fóssil convencional, seja pelos danos ambientais causados, ou pela possível escassez de recursos (Fadigas, 2011), o presente trabalho trata-se de um estudo comparativo entre o desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas de eixo vertical modelos Darrieus perfis NACA0015 e J-NACA0015. Que se destacam na geração de energia renovável devido sua aplicabilidade em centros urbanos, facilidade de instalação e ótimo aproveitamento do recurso eólico.

É optada por simulações pela experimentação em laboratório para validação dos resultados desse trabalho, por tratar da utilização de simulação com reprodução das condições mais aproximadas do real e do desenvolvimento de protótipo em impressão 3D das geometrias.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Comparar o desempenho operacional de dois perfis de turbinas eólicas de eixo vertical Darrieus Rotor-H, confeccionados em prototipagem 3D, através de análise experimental em túnel de vento.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Definir o perfil de velocidade do túnel de vento;
- Escolher o perfil de aerofólio da turbina de eixo vertical;
- Realizar prototipagem do modelo com tecnologia de impressão 3D;
- Realizar testes aerodinâmicos em túnel de vento.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre os principais conceitos envolvidos na geração da energia eólica. Partindo de concepções básicas sobre essa energia renovável e uma breve revisão histórica; na sequência é abordada a caracterização do potencial eólico e fatores de influência na geração de energia, finalizando com a definição de aerogeradores e sua classificação.

### **2.1 ENERGIA EÓLICA**

O aproveitamento da energia dos ventos é uma forma de produção de eletricidade por meio de uma das fontes renováveis mais interessantes e promissoras (Fadigas, 2011).

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) incentiva o uso de energia gerada por fontes renováveis, o que faz com que o interesse pela utilização da energia eólica para geração de energia elétrica aumente cada vez mais, isso ocorre por meio de investimentos tecnológicos, tornando o modelo de sistema mais atrativo também para aplicação no uso residencial (Silveira, 2021).

#### **2.1.1 Histórico**

Ainda há dúvidas de quando e onde exatamente a energia eólica começou a ser usada. A primeira informação confiável, retirada de fontes históricas, é de que os moinhos de vento surgiram na Pérsia por volta de 200 a.C (Fadigas, 2011). Esses moinhos de eixo vertical apresentavam baixa eficiência e eram usados na moagem de grãos e bombeamento d'água, conforme indicado na Figura 2.

Figura 2 - Moinho de vento persa modelo vertical.



Fonte: FADIGAS, 2011.

Os moinhos de vento foram disseminados na Europa no Século XI durante as Cruzadas, onde os conquistadores europeus da Palestina provavelmente conheceram os moinhos de vento do Oriente Médio e importaram a tecnologia para Europa. Os modelos verticais persistiram até o século XII, quando os europeus montaram as pás sobre um eixo horizontal ao invés de vertical, provavelmente inspirados pela configuração das rodas-d'água que eram utilizadas de forma horizontal.

Com o desenvolvimento tecnológico das pás, do sistema de controle e dos eixos, o uso dos moinhos de vento propiciou a otimização de várias atividades que utilizavam a força motriz do vento (Fadigas, 2011). No século XVII, a Holanda se destacava entre os países da Europa na utilização dos moinhos de vento, para drenagem de terras e moagem de grãos, conforme indicado na Figura 3.

Figura 3 - Moinho de vento do tipo holandês.

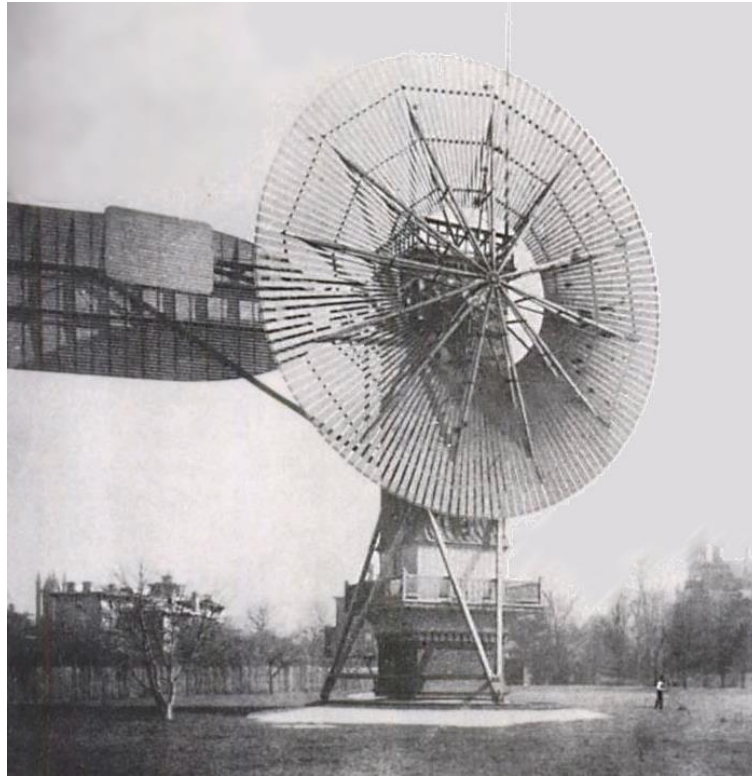


Fonte: FADIGAS, 2011.

Já no século XIX com o surgimento da máquina a vapor durante a Revolução Industrial, iniciou-se o declínio da energia eólica, fazendo com que o número de moinhos de vento começasse a diminuir (Pinto, 2013). Porém mesmo com o declínio essas construções continuaram se modernizando, como o caso dos modelos atuais de cata-ventos de múltiplas pás que continuam sendo utilizados no meio agrícola, devido sua fácil operação e manutenção (Fadigas, 2011).

Mesmo com a diminuição no uso desses equipamentos na Europa, os Estados Unidos expandiram a utilização da energia eólica, aperfeiçoando os equipamentos, tornando-os mais simples, menos pesados e mais eficientes, tudo isso em função da necessidade de energização de áreas que não possuíam reservas hídricas. A Figura 4 apresenta o primeiro cata-vento voltado para a geração de eletricidade, desenvolvido pelo americano Charles F. Brush na cidade de Cleveland, Ohio (Kaldellis & Zafirakis, 2011). O aerogerador era constituído de um rotor de 17 m de diâmetro com 144 lâminas sustentadas por uma torre de 18 m de altura, capaz de produzir uma potência de 18 kW (Pinto, 2013).

Figura 4 - Gerador eólico de Chars F. Brush, USA, 1987/88.



Fonte: PINTO, 2013.

Foi então em 1980, com o crescimento populacional e sua consequência na demanda energética, que surgiram novos espaços para o estudo da extração da energia eólica. Atualmente essa tecnologia é utilizada na geração de energia elétrica para abastecimento de grandes centros urbanos, através da conversão da energia cinética, com a utilização de turbinas eólicas (aerogeradores).

### **2.1.2 Benefícios**

A geração de energia eólica é benéfica para a sociedade e meio ambiente por ser uma fonte renovável, limpa e com custo bastante competitivo. Que devido a conversão direta da energia do vento, não apresenta processos de combustão e, assim, não apresenta emissão de gases poluentes, como os gases de efeito estufa (GEE) ou resíduos tóxicos (Tolmasquim, 2016).

Outro benefício desse tipo de geração de energia está na possibilidade de compatibilização do uso do solo com outras atividades, como a agricultura e a pecuária, o que diminui a interferência na dinâmica socioambiental (ABEEólica, 2020). E quando comparada a fontes de energia tradicionais, a implantação do recurso eólico se associada a boas práticas

ambientais, permitindo pequena e passível interferência com a flora e com a fauna, além da população local.

## 2.2 RECURSO EÓLICO

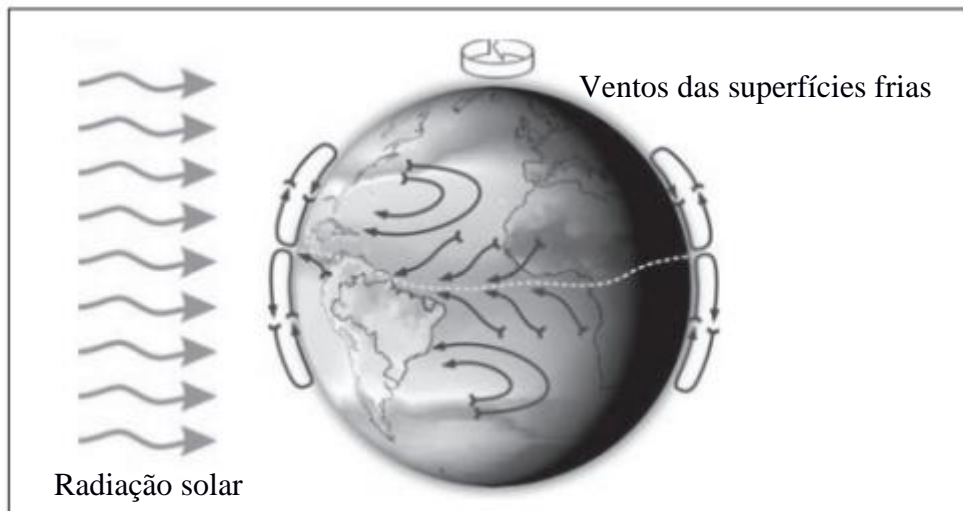
A definição do potencial eólico parte do conhecimento detalhado do comportamento dos ventos, os dados relativos a esse comportamento dizem respeito à intensidade da velocidade e à direção do vento. Sendo necessário analisar os fatores que influenciam o regime dos ventos, como o relevo, a rugosidade do solo e outros obstáculos distribuídos ao longo da região (Santos, Fontes de Energia Nova e Renovável, 2013).

### 2.2.1 Caracterização dos ventos

O vento é provocado pelo aquecimento desigual das superfícies da terra pelo sol, sendo assim, a energia eólica pode ser considerada uma forma de energia solar (Tolmasquim, 2016). Esse aquecimento desigual provoca gradientes de pressão que são responsáveis pela movimentação das massas de ar. Os ventos que sopram na Terra podem ser classificados como ventos de circulação global e local.

Os ventos de circulação global são representados pelas variações de pressão, temperatura e densidade causadas pelo aquecimento desigual da Terra devido à radiação solar, conforme indicado na Figura 5. Como a quantidade de radiação solar absorvida pela Terra é maior próximo à linha do Equador, do que a radiação solar absorvida nos polos, os ventos das superfícies frias circulam dos polos para o Equador (Brito, 2008). Nas grandes altitudes, o ar se move ao longo de linhas de mesma pressão e mesma altura onde o fluxo de ar não tem influência da superfície, já nas altitudes mais baixas, as diferentes superfícies da Terra, compostas por massas de água, terra e vegetação, afetam significativamente o fluxo de ar devido a variações de pressão, ao efeito térmico e a umidade. Essa parte da atmosfera cujos ventos são influenciados pela superfície é conhecida como camada limite.

Figura 5 - Ventos de circulação global.



Fonte: Adaptado de FADIGAS, 2011.

De modo geral, os ventos além de serem influenciados pelas diferenças de pressão, são também influenciados pelos mecanismos de rotação da Terra (efeito Coriolis<sup>2</sup>), por eventuais efeitos físicos de obstáculos, pela rugosidade do terreno e pela existência de montanhas (Tolmasquim, 2016). Sendo que somente uma fração do vento se encontra a uma altura próxima o suficiente da terra (até 200 m) para ser aproveitada e somente algumas regiões possuem um vento adequado para exploração.

### 2.2.2 Potencial Eólico

A energia contida no vento é a energia cinética  $E_c$ , ocasionada pelo ar em movimento (Pinto, 2013), determinada pela Equação 1.

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

Onde:

$E_c$  = Energia cinética (J);

$m$  = Massa de ar (kg);

$v$  = Velocidade do vento (m/s).

---

<sup>2</sup> Aceleração aparente que tende a desviar um objeto que se movimenta livremente devido à rotação da Terra.

Verificando a variação da energia cinética com o passar do tempo, tem-se a potência, por meio do cálculo da taxa de variação da função. Logo, a potência disponível do vento é dada pela derivada da energia com relação ao tempo, expressa pela Equação 2, que depende da vazão mássica de ar a uma dada velocidade.

$$P_{disp} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m}v^2 \quad (2)$$

Onde:

$P_{disp}$  = Potência disponível do vento ( $W$ );

$\dot{m}$  = Fluxo de massa de ar ( $kg/s$ );

$v$  = Velocidade do vento ( $m/s$ ).

Considerando que o ar passa através de um anel circular, caracterizado pela superfície  $A$  varrida pelas pás da turbina eólica, com raio  $R$ . O ar que se move a uma velocidade  $v$  em  $m/s$  forma um cilindro de comprimento  $l$ , onde multiplicando o volume desse cilindro pela massa específica do ar, obtém-se a massa de ar que se move por uma determinada área na unidade de tempo, o fluxo de massa (Equação 3). A Figura 6 exemplifica graficamente a geração da energia cinética de um aerogerador.

$$\dot{m} = \rho Av \quad (3)$$

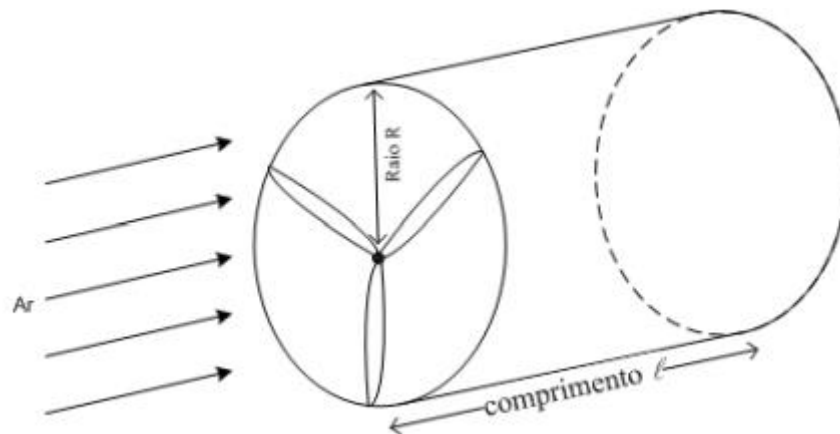
Onde:

$\rho$  = Massa específica do ar ( $kg/m^3$ );

$A$  = Área varrida pelo aerogerador ( $m^2$ );

$v$  = Velocidade do vento ( $m/s$ ).

Figura 6 - Representação da Energia Cinética absorvida por um aerogerador.



Fonte: EPALANGA, 2013.

Para a turbina de eixo vertical modelo Darrieus, como a mostrada na Figura 7, a determinação da área é mais complexa, envolvendo integrais elípticas. No entanto, é possível aproximar o formato das pás à parábola, obtendo a seguinte equação simplificada:

$$A = 2/3 \text{ (largura máxima do rotor até o centro)} \cdot \text{(altura do rotor)} \quad (4)$$

Figura 7 - Turbina de eixo vertical modelo Darrieus.



Fonte: FADIGAS, 2011.

Por fim, substituindo a equação do fluxo de massa na Equação 5, tem-se a Potência disponível:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5)$$

### 2.2.3 Fatores Influentes na Energia do Vento

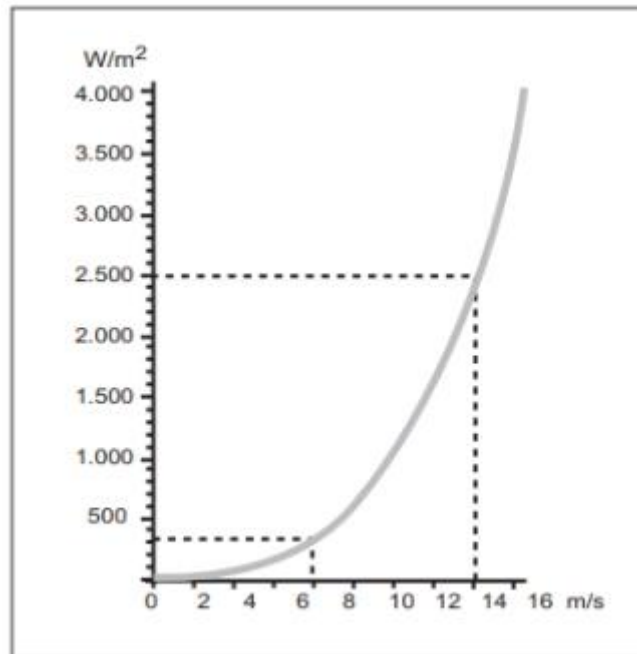
Pela equação da Potência disponível (Equação 5) destaca-se a influência de três fatores principais na geração da energia eólica, a velocidade do vento ( $v$ ) com variação de ordem cúbica, a área varrida pelo aerogerador ( $A$ ) e massa específica do ar ( $\rho$ ).

A velocidade depende do regime dos ventos e da influência de efeitos físicos, como obstáculos e a rugosidade do terreno. Como essa influência de efeito físico diminui em relação à altura acima do solo, recomenda-se a instalação de aerogeradores em maiores altitudes e em locais com baixa rugosidade, como próximos da costa e em terrenos descobertos (Tolmasquim, 2016). A área de varredura também influencia no aumento da eficiência da transformação da energia contida nos ventos, com isso tem-se a procura por maiores áreas varridas.

Já a densidade específica do ar é influenciada pela pressão, pela umidade e pela temperatura. Onde a pressão influencia proporcionalmente na geração de energia, enquanto a umidade e a temperatura têm influência inversamente proporcional.

Como a temperatura do ar e a pressão atmosférica variam com a altitude, aerogeradores instalados em um mesmo local, mas com diferentes alturas, podem captar energia com diferentes densidades de potência, devido a variação da massa específica e da velocidade do ar. A Figura 8 ilustra o comportamento da densidade de potência do vento com a variação de sua velocidade. E dessa forma, conclui-se que o melhor aproveitamento do potencial eólico requer maiores alturas estruturais e maiores áreas varridas pelas pás dos aerogeradores (Fadigas, 2011).

Figura 8 - Curva de potência do vento em função de sua velocidade.



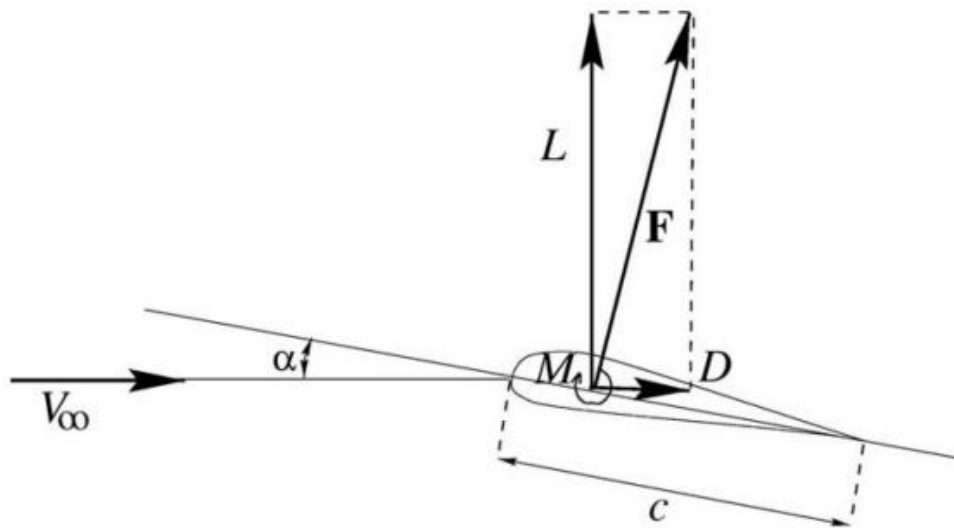
Fonte: FADIGAS, 2011.

#### 2.2.4 Aerodinâmica das Turbinas Eólicas

Uma turbina eólica transforma a energia cinética do vento em energia mecânica por meio de suas pás e um eixo e, na sequência, em energia elétrica por meio de um gerador (Hansen, 2008). O funcionamento de suas hélices é semelhante ao funcionamento de uma asa de avião, que pela diferença de pressão causada pelo escoamento do ar, gera um fenômeno chamado de sustentação. A Figura 9 apresenta um objeto imerso em um fluxo de ar e sujeito a uma força de reação ao escoamento ( $F$ ) que quando decomposta, forma duas componentes, agindo em direção perpendicular uma em relação a outra, essas forças são conhecidas como força de arrasto ( $D$ ) e força de sustentação ( $L$ ).

A força de arrasto é a força experimentada por um objeto, imerso em um fluxo de ar, e que está alinhada com a direção do fluxo de ar. Já a força de sustentação é a força experimentada por um objeto, imerso em um fluxo de ar, e que está perpendicular a direção formada pelo fluxo de ar. O ângulo formado entre uma linha de referência no objeto e a direção do fluxo de ar é chamado de ângulo de ataque ( $\alpha$ ). Essa linha de referência é usualmente referida como linha de corda ( $C$ ) (Fadigas, 2011).

Figura 9 - Forças que atuam em um objeto imerso em fluxo de ar.



Fonte: HANSEN, 2008.

As características de arrasto e sustentação medidas e determinadas para cada ângulo de ataque do vento podem ser descritas usando os coeficientes adimensionais de arrasto e sustentação ( $Cd$  e  $Cl$ ). O conhecimento destes é essencial na seleção adequada das seções de aerofólio para o projeto da pá de uma turbina eólica. O coeficiente de arrasto de um aerofólio é dado pela seguinte equação:

$$Cd = \frac{D}{0,5\rho V^2 A} \quad (7)$$

Onde:

- $D$  = Força de arrasto (N);
- $\rho$  = Massa específica do ar ( $kg/m^3$ );
- $V$  = Velocidade do ar que se aproxima do aerofólio (m/s);
- $A$  = Área da pá: linha de corda x comprimento da pá (m).

O coeficiente de sustentação de um aerofólio é dado pela seguinte equação:

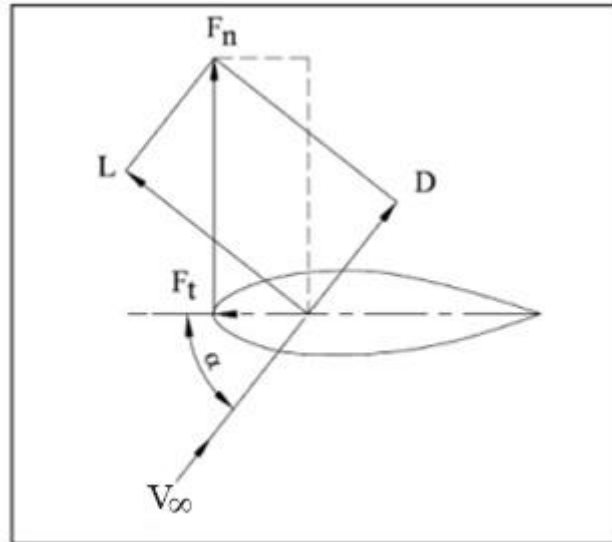
$$Cl = \frac{L}{0,5\rho V^2 A} \quad (8)$$

Onde:

- $L$  = Força de sustentação (N);
- $\rho$  = Massa específica do ar ( $kg/m^3$ );
- $V$  = Velocidade do ar que se aproxima do aerofólio (m/s);
- $A$  = Área da pá: linha de corda x comprimento da pá (m).

Além das forças de sustentação e arrasto, tem-se seus componentes normal e tangencial agindo no perfil do aerofólio, conforme indicado na Figura 10.

Figura 10 - Diagrama de forças da pá (aerofólio).



Fonte: ISLAM, ET AL., 2006.

O coeficiente de força tangencial ( $C_t$ ) é basicamente a diferença entre os componentes tangenciais das forças de sustentação e arrasto. Da mesma forma, o coeficiente de força normal ( $C_n$ ) é a diferença entre os componentes normais das forças de sustentação e arrasto (Islam & Fartaj, 2006). Descritos pelas Equações 9 e 10:

$$C_t = C_l \sin \alpha - C_d \cos \alpha \quad (9)$$

$$C_n = C_l \cos \alpha - C_d \sin \alpha \quad (10)$$

Onde:

$C_l$  = Coeficiente de sustentação (-);

$C_d$  = Coeficiente de arrasto (-).

As forças tangencial e normal são definidas como:

$$F_t = C_t \frac{1}{2} \rho C H V^2 \quad (11)$$

$$F_n = C_n \frac{1}{2} \rho C H V^2 \quad (12)$$

Onde:

- $\rho =$  Massa específica do ar ( $kg/m^3$ );  
 $C =$  Corda da pá ( $m$ );  
 $H =$  Altura da turbina ( $m$ );  
 $V =$  Velocidade do ar que se aproxima do aerofólio ( $m/s$ ).

As forças normais e tangenciais foram representadas nas Equações 11 e 12 para qualquer posição, elas são consideradas como uma função do ângulo de azimute  $\theta$  (Islam & Fartaj, 2006). Assim, a força tangencial média  $Fta$  na pá é expressa por:

$$Fta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Ft(\theta) d\theta \quad (13)$$

O torque total (T) é obtido por:

$$T = N Fta R \quad (14)$$

Onde:

- $N =$  Número de pás (-);  
 $R =$  Raio da turbina ( $m$ );  
 $Fta =$  Força tangencial média ( $N$ ).

A potência total pode ser obtida como:

$$Ptotal = T \omega \quad (15)$$

Onde:

- $\omega =$  Velocidade de rotação ( $rpm$ );  
 $T =$  Torque total ( $Nm$ ).

### 2.3 AEROGERADORES

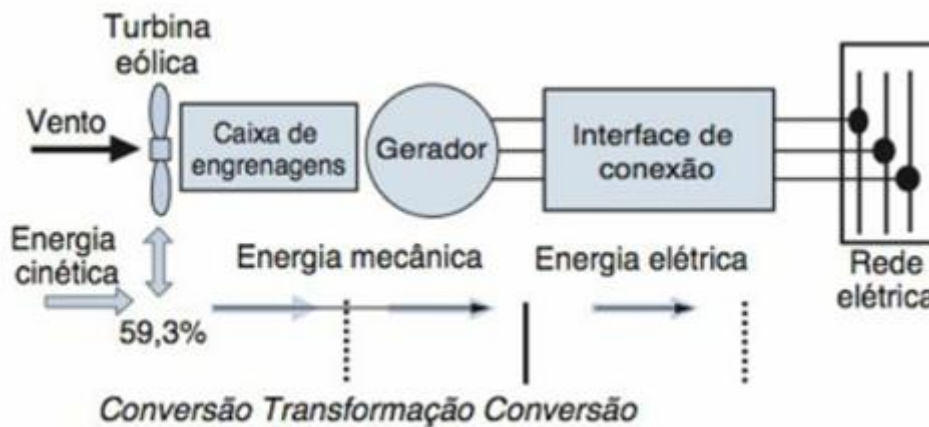
As máquinas eólicas modernas são nomeadas como turbinas eólicas, sistemas de conversão de energia eólica ou aerogeradores. Esses equipamentos absorvem parte da energia cinética do vento, convertem em energia mecânica e essa energia é convertida em energia elétrica, por meio de um gerador elétrico que é acoplado ao sistema.

### 2.3.1 A conversão de Energia

Segundo Pinto (2013) a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica ocorre em duas etapas:

- 1) A primeira etapa ocorre na turbina, onde as pás removem a porção da energia cinética disponível para conversão em energia mecânica;
- 2) A segunda etapa ocorre no gerador, que recebe a energia mecânica e faz a conversão em energia elétrica, essa energia é transmitida para a rede concessionária. A Figura 11 demonstra essa operação.

Figura 11 - O princípio da conversão da energia do vento em energia elétrica.



Fonte: PINTO, 2013.

### 2.3.2 Classificação Aerogeradores

Os aerogeradores apresentam-se em duas configurações básicas conforme a orientação do eixo com relação ao solo: turbinas de eixo horizontal (TEEH) e turbinas de eixo vertical (TEEV) (Martins, Spinel, Ribeiro, Lobo, & Marçal, 2019).

As turbinas de eixo horizontal (TEEH) são aquelas em que as pás giram em sentido perpendicular ao plano de deslocamento do vento, geralmente possuem duas ou três pás, bem como há turbinas com um número maior de pás. As turbinas de eixo vertical (TEEV) são aquelas em que as pás se deslocam na direção do fluxo de ar, possuindo vantagens e desvantagens com relação às de eixo horizontal. Uma das vantagens consiste na possibilidade de aproveitar os ventos vindos de qualquer direção, sem a necessidade de possuir mecanismo que direcione o rotor com a mudança de direção do vento.

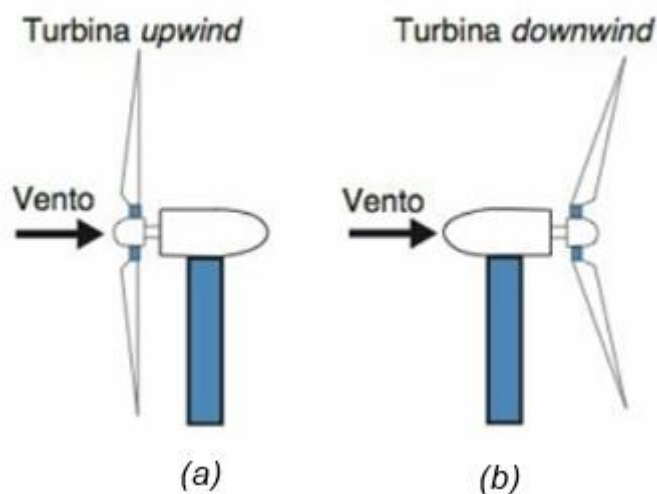
### 2.3.2.1 Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH)

As turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) são as mais utilizadas atualmente, essas turbinas possuem o eixo de rotação horizontal, em paralelo ao chão. São movidas por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (*lift*) e forças de arrasto (*drag*) (Martins, Spineli, Ribeiro, Lobo, & Marçal, 2019).

As TEEH são classificadas em função da posição do rotor e pás para com o fluxo do vento, podendo ser *upwind* e *downwind* (Fonte, 2012). As turbinas *upwind* possuem o rotor eólico posicionado pouco à frente da torre, conduzindo a passagem do vento pelas pás antes da torre, evitando a influência dela no vento, contudo para a utilização desse modelo é necessário algum mecanismo ativo que direcione o rotor para a direção do vento (*yaw control system*) (Tolmasquim, 2016).

Já as turbinas *downwind* possuem uma inclinação no posicionamento do sistema, permitindo que os ventos passem, primeiro, por trás da turbina eólica e depois por suas pás. Eles possuem um design tal que a nacelle, carcaça que contém os componentes do aerogerador, siga o vento passivamente, sendo essa a sua vantagem. Os rotores de eixo horizontal do tipo hélice com três pás são os mais utilizados para a geração de energia elétrica, devido ao compromisso entre a eficiência aerodinâmica, custo, velocidade de rotação, estabilidade e ruído (Tolmasquim, 2016).

Figura 12 - Incidência do vento em uma turbina (a) *upwind* e (b) *downwind*.



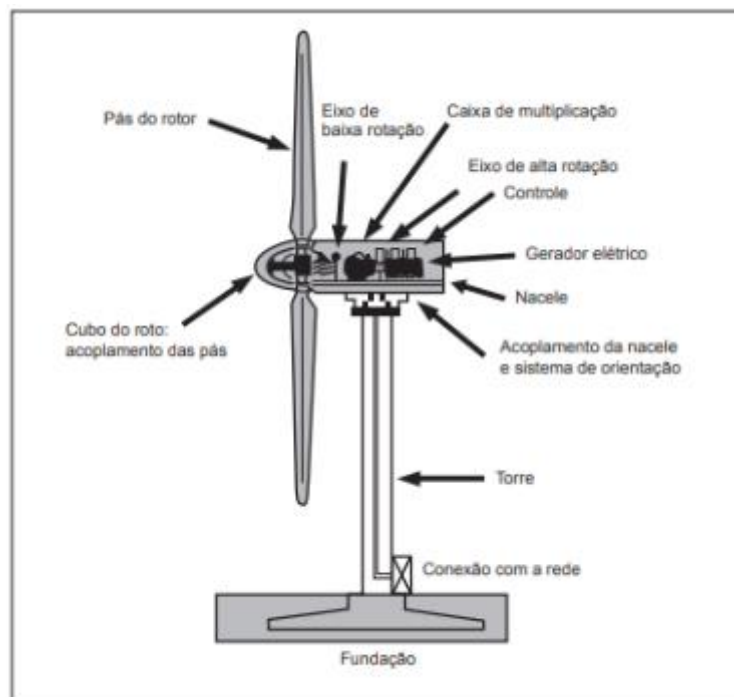
Fonte: PINTO, 2013.

Segundo Rocha (2018) as turbinas de eixo horizontal podem ser divididas em alguns subsistemas principais:

- **Rotor:** Composto pelas pás e pelo nariz, que as suporta, é o subsistema que transforma a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação;
- **Transmissão e caixa multiplicadora:** Subsistema que transmite a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador. Dependendo da velocidade do eixo do rotor, algumas turbinas não utilizam este componente, sendo o eixo do rotor diretamente acoplado ao gerador;
- **Gerador elétrico:** Subsistema responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica;
- **Mecanismos de controle:** Subsistemas responsáveis pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle do gerador, etc.;
- **Torre:** Subsistema responsável por sustentar e posicionar todo o conjunto aerogerador em uma altura especificada.

Os principais subsistemas das TEEH são apresentados na Figura 13:

Figura 13 - Principais subsistemas de um aerogerador de eixo horizontal.



Fonte: FADIGAS, 2011.

Dentre as vantagens da TEEH, destacam-se:

- Controle da velocidade do rotor e da saída de potência, pela alteração do ângulo das pás;
- Otimização aerodinâmica do formato das pás do rotor, alcançando maior eficiência e máxima sustentação aerodinâmica;
- Acesso a ventos de maiores velocidades, devido à altura da torre;
- Alta eficiência, com vento perpendicular as pás.

São desvantagens da TEEH:

- Dificuldade de instalação devido à altura da torre;
- Dificuldade no transporte;
- Necessidade de um sistema de controle para girar as pás em direção do vento;
- Construção complexa da torre, para apoiar o peso da turbina.

#### *2.3.2.2 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV)*

As turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) são aquelas cujo o eixo de rotação está orientado de forma perpendicular à direção do movimento do vento, operando com ventos vindos de qualquer direção (Herbert J. Sutherland, 2012). As TEEV destacam-se por serem muito aplicáveis em centros urbanos, devido sua facilidade de instalação próximo ao solo, pelo pouco espaço ocupado na sua instalação, pelo melhor comportamento em condições de turbulências e por emitir baixos níveis de ruído.

As TEEVs não necessitam de sistema de orientação ativo na captação da energia dos ventos, ou seja, não necessitam de mecanismos de acompanhamento das variações de direção do vento, o que por sua vez reduz a complexidade de seus projetos. Outra vantagem é que esse equipamento possui o trem de potência e o sistema de geração de energia elétrica próximo ao nível do solo, o que facilita a sua manutenção, se comparado ao sistema das TEEHs.

E como as correntes de ar batem lateralmente sobre as suas lâminas, com velocidade de arranque baixa, esse modelo acaba tornando-se vantajoso em condições de pouco vento, pois aproveita o potencial eólico mesmo com alterações na direção dos ventos e formação de turbulências, cenário comum em áreas com a presença de obstáculos como edifícios e árvores.

São vantagens da TEEV, quando comparadas às turbinas horizontais (Fonte, 2012):

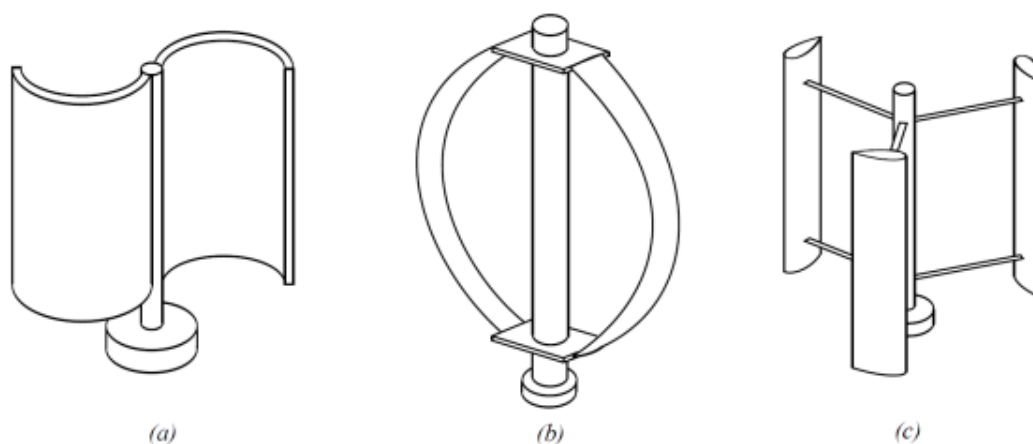
- Não necessitam de ventos com maiores velocidades, por se tratar de equipamentos de pequeno porte (potência nominal inferior a 50kw);

- Menor complexidade do projeto;
- Proporciona maior segurança operacional, devido seus componentes estarem mais próximos ao solo;
- Apresenta manutenção minimizada e de baixo custo;
- Possui design rudimentar;
- Apresenta bom desempenho para aplicações com alta turbulência e flutuações dos ventos.

Quanto às desvantagens da TEEV, se destaca a menor eficiência de produção de energia, se comparada com as turbinas eólicas de eixo horizontal (Custódio, 2009).

Os principais tipos de TEEVs são as turbinas *Darrieus* e *Savonius*. Nas turbinas modelos *Darrieus* a energia é gerada utilizando as forças aerodinâmicas (força de sustentação), já nas turbinas modelo *Savonius*, a energia é gerada utilizando a transferência de quantidade de movimento (força de arrasto). O modelo *Darrieus* é caracterizado por sua elevada velocidade e alta eficiência, aproximando-se do limite de Betz<sup>3</sup>. O modelo *Savonius* é caracterizado pelo seu alto torque, baixa velocidade e baixa eficiência, menor que a metade do limite de Betz (Herbert J. Sutherland, 2012).

Figura 14 - TEEVs. (a) Savonius; (b) Darrieus; (c) Darrieus Rotor H.



Fonte: MELO, 2013.

A TEEV do tipo *Darrieus* foi desenvolvida pelo francês Georges Jean Marie Darrieus (1888-1979), por volta da década de 1920 (Herbert J. Sutherland, 2012). Essa turbina constitui-

<sup>3</sup> A lei (ou limite) de Betz, desenvolvida em 1919 pelo físico alemão Albert Betz, afirma que nenhuma turbina pode capturar mais de 59,3% da energia cinética do vento.

se de hélices de lâminas curvas, retas ou helicoidais (duas ou três) de perfil aerodinâmico atadas pelas extremidades e pelo eixo vertical, criando sustentação para se movimentar e gerar energia elétrica. Esses rotores podem atingir alta velocidade, com um torque de partida aproximadamente nulo, apresentando normalmente um rendimento energético de aproximadamente 30%. Sua única desvantagem em relação as turbinas de pás tradicionais diz respeito a sua complexidade de projeto e fabricação.

A turbina Darrieus H é uma variação do rotor Darrieus original, onde em vez das pás curvadas, são usadas pás em linha reta, conectadas por suportes ao eixo do rotor. Esse modelo apresenta maior rendimento energético se comparado ao modelo de pás curvas, com uma área maior de escoamento. No entanto os esforços estruturais a que estas turbinas estão sujeitas são mais elevados. Esse modelo tem curva de rendimento característica próxima à dos rotores de três pás de eixo vertical, sendo mais compatíveis com o uso em aerogeradores.

Figura 15 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus.

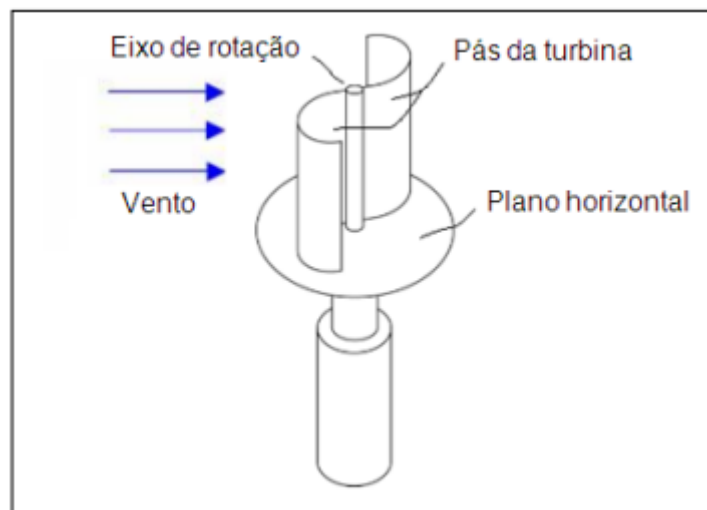


Fonte: LIMA, 2020.

A TEEV do tipo Savonius foi desenvolvida pelo finlandês Georges Jean Marie Darrieus (1888-1979), em meados de 1929 (Martins, Spinel, Ribeiro, Lobo, & Marçal, 2019). Nesse modelo atuam principalmente as forças de arrasto, com contribuição da força de sustentação, as quais proporcionam a rotação da turbina. É dessa combinação das forças de arrasto e sustentação que a TEEV Savonius é capaz de desenvolver alto torque de partida mesmo sob baixas velocidades de vento, o que impacta no baixo custo de implantação e na redução dos impactos ambientais.

O modelo Savonius tem sua pá em forma de “S”, operando com o vento passando entre suas pás, dispostas como folhas dobradas ou semicilindros. É uma turbina de baixa rotação e alto torque, que pode trabalhar com baixas velocidades de vento e apresenta e baixa eficiência energética, quando comparado ao rotor baseado no princípio das forças de sustentação (Pinto, 2013). Os esforços estruturais são menos intensos do que nas turbinas Darrieus, no entanto a turbina Savonius apresentar um rendimento energético baixo de aproximadamente 15%, o que torna o modelo pouco atrativo.

Figura 16 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius.



Fonte: FONTE, 2012.

Como as TEEVs estão normalmente sujeitas a grandes variações durante cada período de rotação, isso acaba provocando esforços de fadiga no eixo do rotor. Como forma de minimizar esses esforços, o projeto de TEEVs com pás torcidas permite reduzir a variação sentida no eixo do rotor. O projeto das turbinas com pás torcidas é um pouco mais complexo, no entanto a resistência estrutural do rotor é consideravelmente mais elevada.

Figura 17 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius de pás torcidas.



Fonte: LIMA, 2020.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia seguida para a realização da análise comparativa entre os dois modelos, com a finalidade de auxiliar no desenvolvimento das atividades para cumprimento dos objetivos definidos para este trabalho. A metodologia inicia-se pela realização dos testes para obtenção das pressões estáticas e de estagnação, que permitem conhecer as curvas características do perfil de velocidade do túnel de vento; seguindo para a escolha do perfil de aerofólio de TEEV; desenvolvimento do protótipo com tecnologia de impressão 3D e finalizando com a realização dos testes aerodinâmicos em túnel de vento.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO

##### 3.1.1 Especificações do túnel de vento

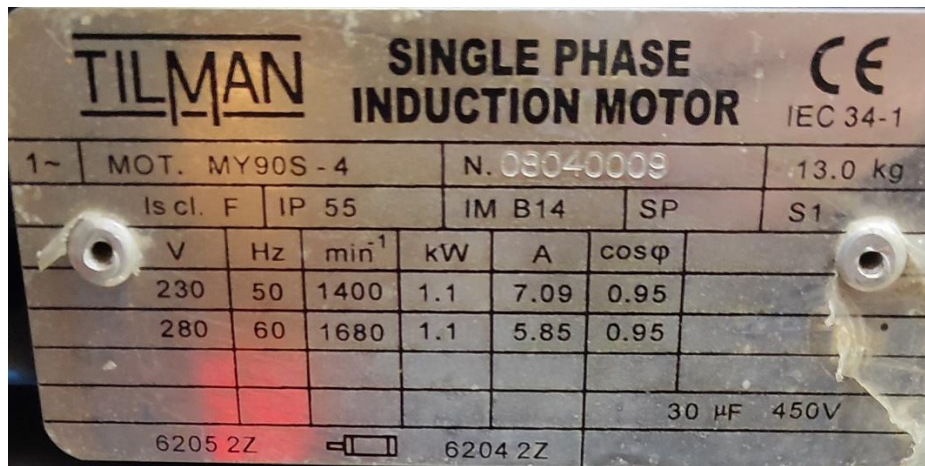
O túnel de vento tem por finalidade simular as principais características do vento natural e o impacto da energia das rajadas, permitindo avaliar os efeitos na estrutura da turbina. Para a realização dos testes foi utilizado um túnel de vento da marca De Lorenzo modelo DL WIND-B, túnel de vento de baixa velocidade do IFSC, Campus Lages, mostrado na Figura 188.

Figura 18 - Túnel de vento DL WIND-B.



A câmara principal do túnel possui dimensões 600 x 600 x 1600 mm (largura x altura x comprimento). Um motor aciona as hélices do ventilador responsável por gerar o fluxo de ar, suas características são observadas na plaqueta de identificação (Figura 19). Para o controle da velocidade de ar dentro do túnel de vento, um dispositivo é responsável por definir a velocidade de rotação do motor do ventilador através da alteração da tensão de alimentação (0-230V), seu controle é dado por um potenciômetro que fica localizado na lateral do túnel.

Figura 19 - Plaqueta de identificação: Motor do ventilador do túnel de vento.



### 3.1.1 Medição das pressões e definição do perfil de velocidades

Para a realização do experimento de medição das pressões de encontro ao escoamento foi utilizado um tubo de Pitot fabricado em impressora 3D com filamento PLA. O tubo foi conectado a um manômetro de coluna tipo U, que é acompanhado de régua graduada para auxílio na verificação da variação de altura de coluna de água. As figuras 20 e 21 demonstram, respectivamente, a fixação do tubo Pitot no túnel e o manômetro tipo U utilizado.

Figura 20 - Detalhes do tubo de Pitot instalado no túnel de vento.

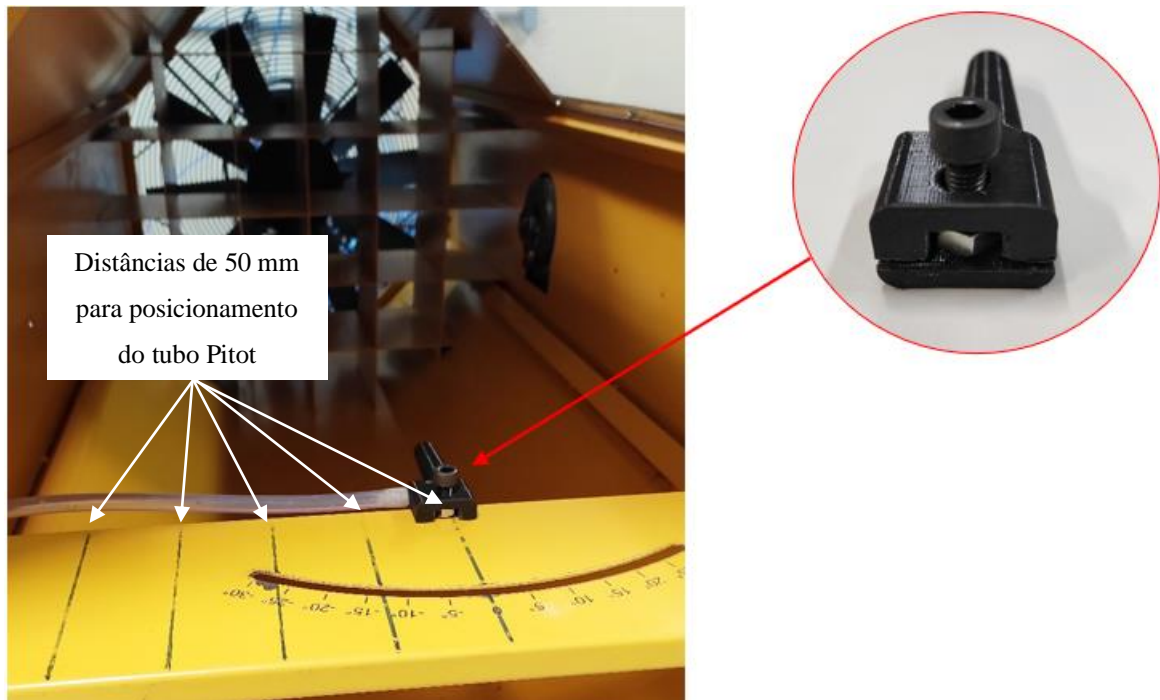


Figura 21 - Manômetro de coluna tipo U com régua graduada.



As leituras no manômetro foram precedidas da definição da posição do tubo dentro do túnel de vento, para isso foram demarcadas distâncias de 50 mm do centro do túnel até a

posição  $x = 200 \text{ mm}$ , ver Figura 20. A definição da faixa de testes se deu devido a influência da camada limite no escoamento, desconsiderando as distâncias mais próximas das paredes do túnel.

As medições são realizadas considerando diferentes velocidades de fluxo de ar dentro do túnel, para isso são estabelecidas as rotações do ventilador equivalentes a 25%, 50%, 75% e 100%, respectivamente, 420 rpm, 840 rpm, 1260 rpm e 1680 rpm. Na sequência, o tubo de Pitot é posicionado em todas as distâncias estabelecidas para a coleta das pressões, coloca-se o ventilador do túnel em funcionamento na rotação desejada, e decorridos 45 segundos são realizadas as leituras do manômetro e registrado os valores. O processo de leitura é repetido 3 vezes para cada posição, gerando um conjunto de 60 valores lidos. Como o túnel é simétrico os valores encontrados são espelhados na análise gráfica.

Para a determinação do perfil de velocidades da seção de testes do túnel de vento, é considerada que a velocidade do ar no ponto da linha de corrente ( $v$ ) é dada pela multiplicação vezes dois da pressão dinâmica lida no manômetro tipo U ( $P_m$ ), expressa em  $mmCA$ , dividida pela densidade específica do ar ( $\rho$ ) (Equação 16).

$$v = \sqrt{\frac{(2P_m)}{\rho}} \quad (16)$$

Para que o valor calculado da velocidade seja expresso em  $m/s$  deve-se fazer uma conversão de unidades. Como a literatura prevê que  $1 Pa$  é igual a  $0,101972 mmCA$ , basta dividir o valor lido no manômetro para converter de  $mmCA$  para  $Pa$ .

Para comparação dos valores calculados da velocidade de fluxo de ar, coleta-se através de anemômetro portátil as velocidades para cada rotação do ventilador do túnel (Figura 22). Os valores coletados de pressão e velocidade são inseridos em planilha eletrônica que calcula a velocidade através da Equação 16, a planilha pode ser verificada no APÊNDICE A.

Figura 22 - Medição de velocidade com anemômetro portátil.



## 3.2 FABRICAÇÃO PROTÓTIPO

### 3.2.1 Escolha dos perfis aerodinâmicos

A seleção dos perfis de aerofólio foi feita com base em estudos de literaturas. Considerando as características predominantes das turbinas eólicas de eixo vertical, decidiu-se procurar perfis com boa eficiência mesmo para baixas velocidades de vento e com boas características aerodinâmicas, apresentando alta capacidade de começar a girar sozinho (self start capability – SSC).

Assim, optou-se pelo dimensionamento do perfil aerodinâmico NACA0015 convencional (Figura 23) e do perfil J- NACA0015, que é caracterizado como um perfil NACA 0015 sem a parte superior de sua geometria. Esse perfil foi desenvolvido em 2016 durante um estudo realizado por Mahdi Zamani e outros e combina os princípios de forças de sustentação, baseado em sua geometria, e forças de arrasto, assim como na TEEV Savonius (Zamani, Nazari, Moshizi, & Maghrebi, 2016) (Figura 24).

Figura 23 - Perfil aerodinâmico NACA0015.

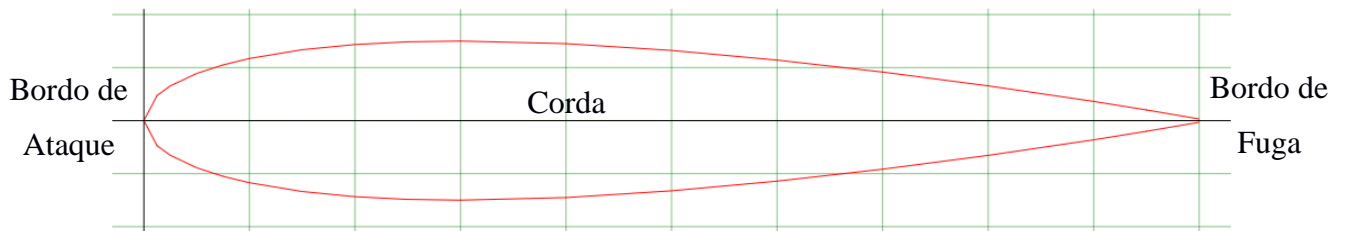
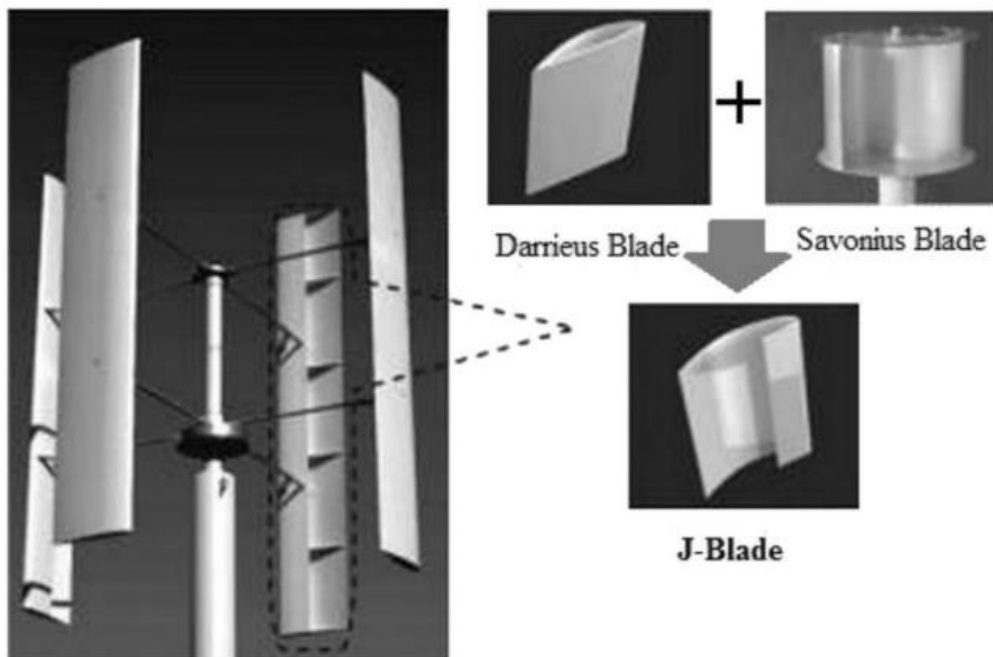


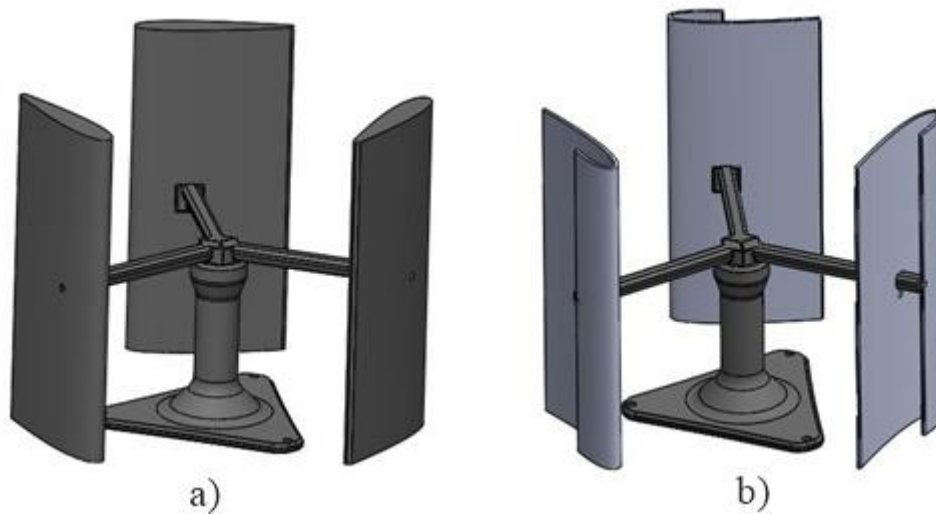
Figura 24 - Configuração da turbina Darrieus Rotor-H J-NACA0015.



### 3.2.2 Dimensionamento do protótipo

Com as dimensões definidas e conhecendo-se os perfis aerodinâmicos, projeta-se o protótipo no software SOLIDWORKS®. Como os modelos de perfis escolhidos são ambos utilizados em turbinas Darrieus Rotor-H, foi definida mesma estrutura de base para a turbina. Sendo projetada para que pudesse ser facilmente montada e desmontada, permitindo a troca dos perfis (Figura 25).

Figura 25 - Protótipos projetados com a mesma estrutura central. a) Perfil NACA0015.  
b) Perfil J-NACA0015.



### 3.2.3 Fabricação dos modelos em impressora 3D

Para a fabricação do protótipo em escala compatível com a do túnel de vento foi utilizada impressora 3D Ender 3 do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Lages. A escolha da modelagem 3D se deu devido a agilidade e fidelidade ao projeto desenhado.

O material utilizado foi o filamento PLA (Poliácido Láctico), termoplástico que pode ser utilizado na máquina e existe em estoque na Instituição. A escolha se deu devido o material apresentar melhor resolução final da peça impressa, se comparado ao material ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), que foi utilizado nos testes preliminares de impressão. Na Figura 26 é mostrada uma peça impressa em ABS, sendo possível notar que as camadas de preenchimento não são homogêneas, o que apresenta problemas no produto final como fissuras que fragilizam e causam a ruptura do material.

Figura 26 - Peça rompida impressa com filamento ABS.



Para uma correta impressão deve-se gerar um arquivo 3D em software CAD e submetê-lo ao software responsável por convertê-lo em instruções específicas e compatíveis com a impressora 3D. No caso deste trabalho, utiliza-se o Ultimaker Cura, software de fatiamento desenvolvido pela Ultimaker, que permite a impressão das peças camada por camada com precisão e detalhamento.

A Figura 27 apresenta uma peça posicionada na bandeja de impressão virtual do software Ultimaker Cura. A Tabela 1 apresenta as configurações de preenchimento para cada peça impressa da turbina.

Figura 27 - Peça posicionada no software Ultimaker Cura.

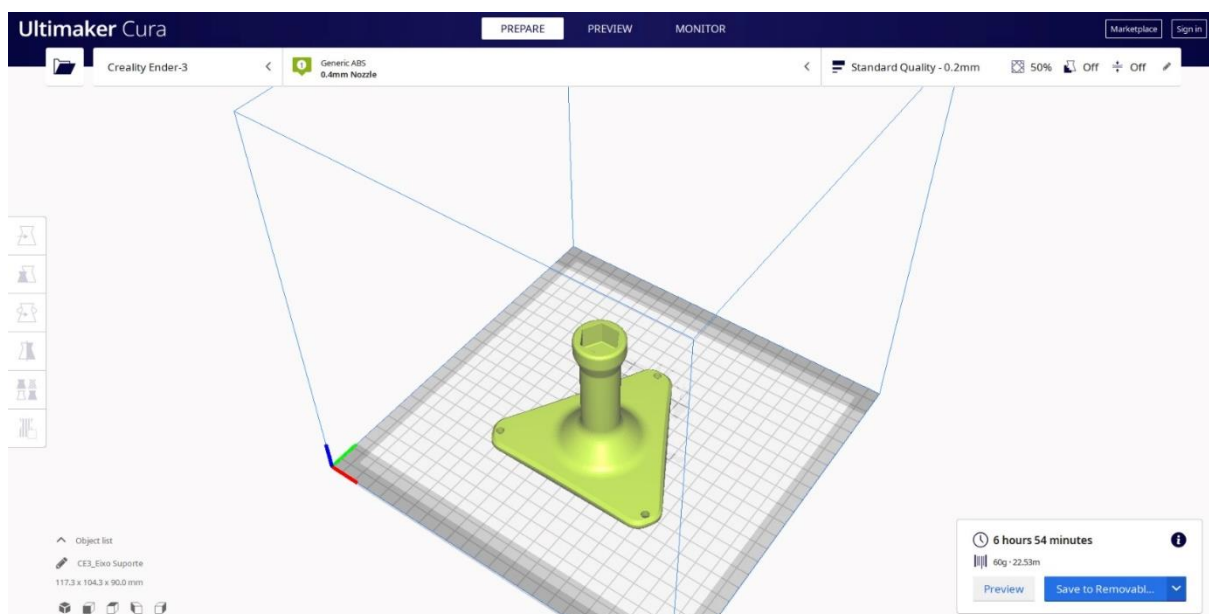
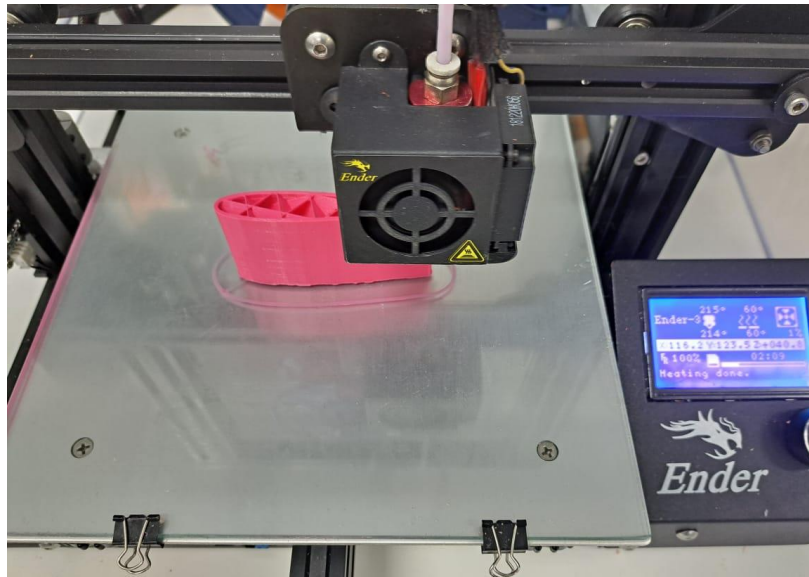


Tabela 1 - Configurações de preenchimento das peças impressas.

Peça	Preenchimento (%)	Massa (gramas)
<b>Eixo suporte</b>	50	60
<b>Haste</b>	50	8
<b>NACA 0015 sólido</b>	10	71
<b>J-shaped</b>	100	50

Figura 28 - Impressão 3D do perfil NACA0015.



### 3.2.4 Montagem da turbina

Após a impressão das peças da turbina, cada parte é levemente lixada para dar acabamento e montada a estrutura. Para fixação do dispositivo no centro do túnel de vento foi adaptado o próprio gerador elétrico para a posição vertical, o gerador é equipamento conjunto com o túnel de vento. A Figura 29 traz a turbina eólica vertical montada junto ao gerador elétrico.

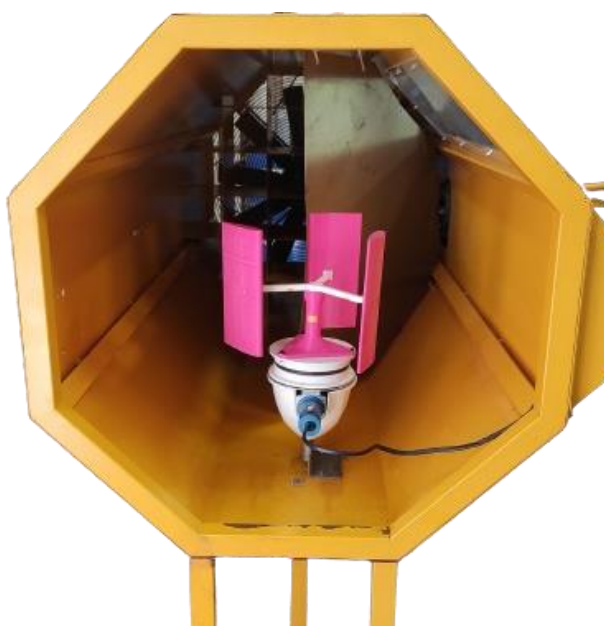
Figura 29 - Turbina montada junto ao gerador elétrico.



### 3.3 ANÁLISE EM TÚNEL DE VENTO

Para estudar e comparar o desempenho dos dois modelos de turbina Darrieus Rotor-H dentro do túnel de vento da instituição, foram realizados testes para diferentes velocidades (3 *m/s*, 4 *m/s*, 6 *m/s* e 8 *m/s*) que correspondem, respectivamente, a 25%, 50%, 75% e 100% da potência do túnel de vento. O rotor foi posicionado perpendicular à direção de entrada do vento, com objetivo de gerar maior torque em torno do eixo *y* (Figura 30).

Figura 30 - Turbina posicionada no túnel de vento.



#### 3.3.1 Determinação experimental da velocidade angular

Para determinação das rotações do protótipo por minuto (RPM), utiliza-se um tacômetro digital da marca Testo (Figura 31). O tacômetro é um instrumento que dispara uma mira LED que reflete na superfície em rotação e registra a medida. Esse registro se deve ao uso de uma fita específica e por meio foto-eletrônico. No caso deste trabalho, a fita é aplicada ao eixo e o aparelho é apontada para que se realize as medições, a

Figura 32 exemplifica a montagem para verificação da velocidade.

Figura 31 - Tacômetro digital TESTO 460.



Figura 32 - Medição da velocidade angular.



Com os valores registrados, faz-se a conversão de RPM para rad/s, afim de obter-se a velocidade angular para cada fluxo de ar. Neste experimento, são realizadas as medições dos dois perfis e considerando dois ângulos de haste ( $30^\circ$  e  $40^\circ$ ).

### 3.3.2 Medição da tensão gerada pela turbina

Para medição da tensão gerada pela turbina utiliza-se um multímetro digital da marca Minipa modelo ET-2042F (Figura 33). O instrumento é utilizado na função voltímetro, onde as pontas metálicas são colocadas nas saídas analógicas do túnel de vento (Figura 34), que estão conectadas ao gerador elétrico da turbina.

Figura 33 - Multímetro digital ET-2042F.



Display: 3 5/6 Dígitos/6000  
Categoria de Segurança: CAT II 1000V/CAT III 600V  
True-RMS: AC  
Tensão AC: 6/60/600/1000V  
Tensão DC: 600m/6/60/600/1000V  
Corrente AC: 60m/600m/20A  
Corrente DC: 60 $\mu$ /60m/600m/20A  
Precisão básica: 0,5%  
Mudança de Faixa: Manual

Figura 34 - Medição de tensão através de multímetro.



Para a correta utilização do multímetro e coleta dos dados de tensão produzidas pela turbina, deve-se seguir os passos descritos:

- 1) Conectar o cabo preto no borne comum;
- 2) Conectar o cabo vermelho no borne da ponta adequada, no caso para medir a tensão elétrica;
- 3) Selecionar a escala de medição, no caso a escala de tensão elétrica;
- 4) Tocar as pontas vermelha e preta no circuito elétrico com o auxílio dos cabos elétricos (em paralelo para medição de tensão elétrica).

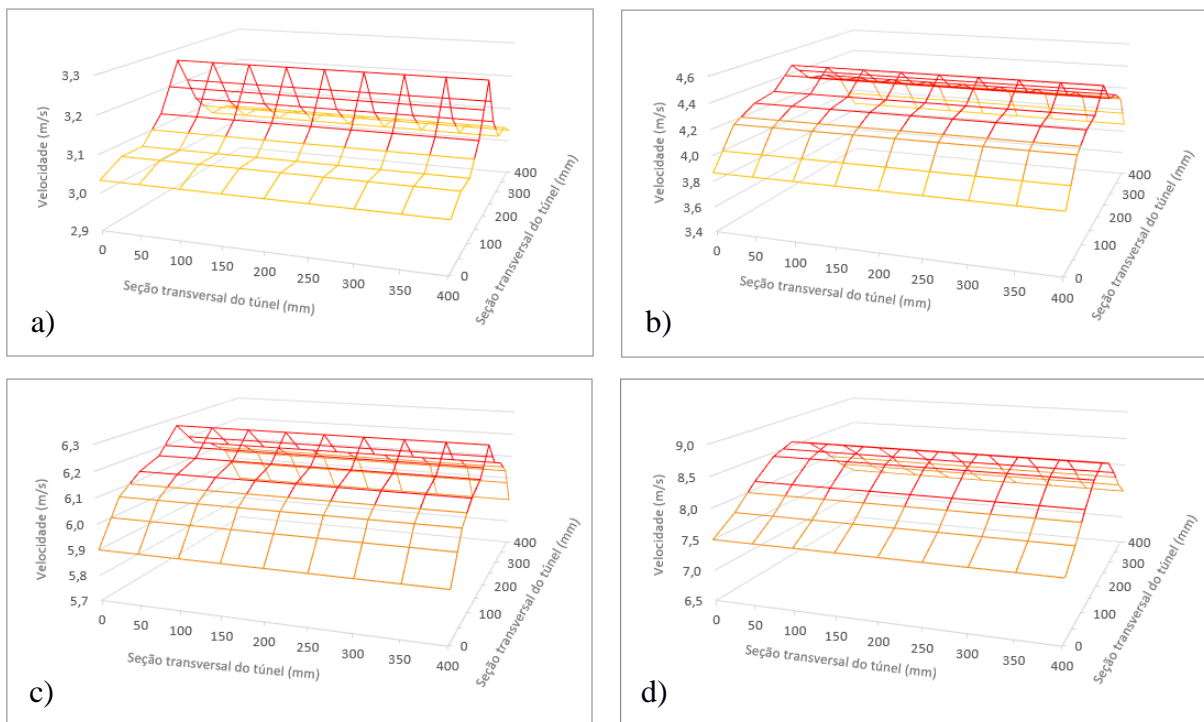
Configurado o multímetro, o túnel de vento é ligado nas 4 velocidades para a coleta dos dados de tensão. Neste experimento, são realizadas as medições dos dois perfis e considerando dois ângulos de haste ( $30^\circ$  e  $40^\circ$ ).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO

Realizadas as leituras, os dados de velocidade média são inseridos em software de planilha Excel para a criação dos gráficos do perfil na seção de testes do túnel de vento. O perfil de velocidades é gerado para cada rotação do ventilador do túnel (420 rpm, 840 rpm, 1260 rpm e 1680 rpm). Os resultados são apresentados na Figura 35.

Figura 35 - Superfície 3D do perfil de velocidades (a) 420 rpm; (b) 840 rpm; (c) 1260 rpm; (d) 1680 rpm.



Através da análise gráfica observa-se que as maiores velocidades estão concentradas no centro do túnel e as mínimas velocidades estão próximas às paredes do túnel de vento. Também é possível notar uma maior variação nos valores lidos quando o ventilador do túnel de vento encontra-se na sua capacidade máxima de rotação.

Por esse fato e como forma de diminuir os prejuízos nos dados observados, é optado por dimensionar o protótipo e manter sua fixação na área de velocidades mais constantes (centro da seção de testes). Uma vez que o escoamento não é estável em todas as posições da seção transversal do túnel.

## 4.2 PROTOTIPAGEM 3D

A impressão dos protótipos utilizando a tecnologia de fabricação aditiva mostra-se capaz de gerar perfis com grau elevado de fidelidade ao projeto, possibilitando uma análise segura dos dados. No qual durante os testes as turbinas foram expostas a velocidades maiores que  $8 \text{ m/s}$  e não apresentaram falha nem ruptura, mantendo-se estáveis durante todo o processo.

## 4.3 VELOCIDADE ANGULAR

Após a realização das medições os dados coletados são inseridos em software para análise gráfica. Na Figura 36 e Tabela 2 são apresentados os valores de velocidade de rotação (rpm) em relação à velocidade de escoamento de fluxo de ar (m/s). A partir do valor da velocidade de rotação, é possível estimar a velocidade angular da turbina, dada pela multiplicação do valor em RPM por  $0,10471976$ , tem-se assim o valor em rad/s. Calculando a velocidade angular ( $\Omega$ ) é possível estimar a potência da turbina e prever os valores para um equipamento real.

Figura 36 - Rotações por minuto para os dois perfis com diferentes ângulos de haste.

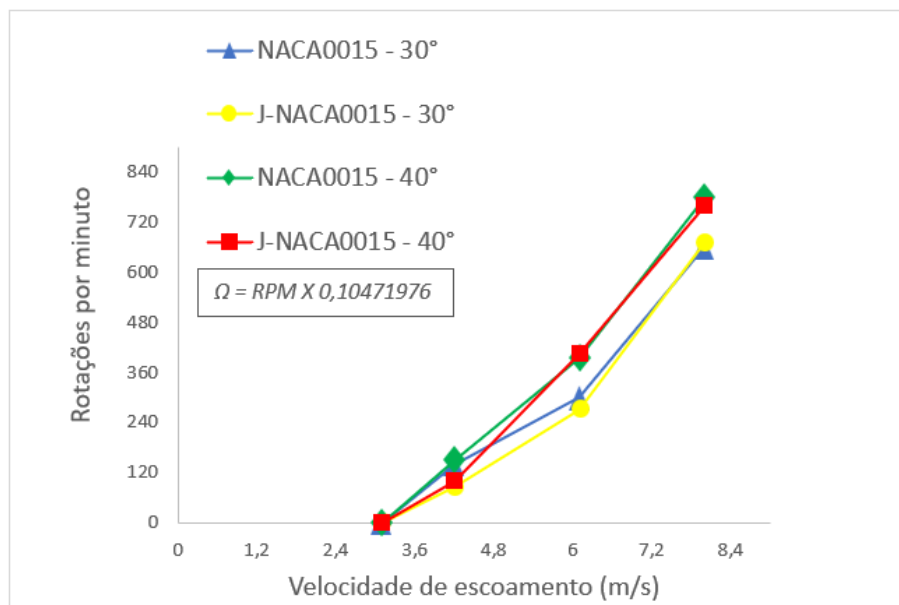


Tabela 2 - Velocidade de rotação para cada perfil.

Velocidade de escoamento ( $m/s$ )	Velocidade de Rotação da turbina ( $rpm$ )			
	NACA0015	J-NACA0015	NACA0015	J-NACA0015
	30°	30°	40°	40°
3,1	0	0	0	0
4,2	140	85	150	100
6,1	300	270	395	405
8,0	660	670	780	760

Analisando os resultados, as maiores leituras de velocidade angular são observadas na posição do ângulo da haste em 40° em relação ao fluxo, para ambos os perfis. Também se nota o comportamento similar dos perfis NACA0015 e J-NACA0015 para velocidades de escoamento intermediárias ou elevadas. Através da relação entre as rotações por minuto da turbina (torque dinâmico) e a velocidade do vento, é possível prever qual faixa apresenta a velocidade mínima necessária para a partida da turbina (torque estático).

Assim, como forma de avaliar a melhor capacidade de partida automática, foram cronometrados os tempos até que a turbina atingisse a velocidade de partida. Conhecendo-se o desempenho das turbinas sem carga, é possível afirmar que dentre os dois perfis analisados, o perfil J-NACA0015 apresenta os menores tempos de partida, o que o classifica como uma turbina melhor para baixas velocidades e regiões com grandes variações de fluxo de ar, devido a sua ótima capacidade de vencer o estado de inércia do dispositivo. Na Tabela 3 é possível verificar os tempos de partida para cada perfil. Observa-se que para as menores velocidades de escoamento, foi necessária ação mecânica na partida da turbina.

Tabela 3 - Tempo de partida para cada perfil.

Velocidade de escoamento ( $m/s$ )	Tempo de partida (segundos)			
	NACA0015	J-NACA0015	NACA0015	J-NACA0015
	30°	30°	40°	40°
3,1	-	-	-	-
4,2	-	-	20	18
6,1	-	-	12	9
8,0	10	7	6	4

Em seu trabalho Zamani (2016) expõe essas características positivas do perfil J-NACA0015, no que se trata ao aproveitamento da energia cinética do vento, que aumenta as variações de torque em valores baixos e moderados de fluxo de ar, diminuindo assim a fadiga no eixo da turbina. Sendo o perfil estudado em seu trabalho uma melhor opção no aproveitando das forças de sustentação e arrasto se comparado aos perfis convencionais de pás eólicas.

#### 4.4 TENSÃO GERADA PELA TURBINA

Os dados coletados nas medições de tensão gerada pela turbina são inseridos em software de análise gráfica, seus resultados são apresentados na Figura 37 e Tabela 4.

Figura 37 - Tensão gerada pelos dois perfis com diferentes ângulos de haste.

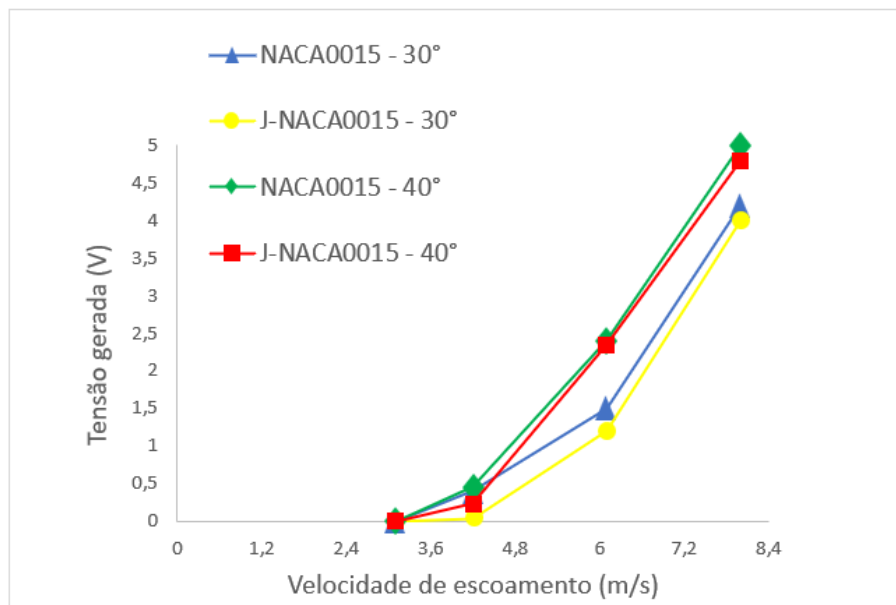


Tabela 4 - Tensão gerada por cada perfil.

Velocidade de escoamento (m/s)	Velocidade de Rotação da turbina (rpm)			
	NACA0015 30°	J-NACA0015 30°	NACA0015 40°	J-NACA0015 40°
3,1	0	0	0	0
4,2	0,4	0,035	0,45	0,23
6,1	1,5	1,2	2,4	2,35
8,0	4,2	4	5	4,8

Analisando os resultados, as maiores leituras dos valores de tensão gerada pela turbina são observadas na posição do ângulo da haste em 40° em relação ao fluxo, para ambos os perfis. Em contra partida aos resultados apresentadas na seção 4.3, o perfil NACA0015 (perfil sólido) apresentou os maiores valores para a geração de tensão elétrica do dispositivo (Tabela 4). A tensão elétrica está diretamente ligada ao potencial energético da turbina, quanto maior a tensão, maior é a potência, a Equação 17 estabelece essa relação.

$$P_{elét} = V I \quad (17)$$

Onde:

$V =$  Tensão elétrica (V);

$I =$  Corrente elétrica (A);

Devido sua geometria de construção, o perfil NACA0015 apresenta uma leve vantagem no desempenho energético para velocidades maiores. Mesmo sendo o perfil que demanda maiores velocidades de partida, o NACA0015 por ser mais robusto apresenta maior estabilidade e é indicado para elevados fluxos de ar.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram fabricados e avaliados dois perfis de aerofólio para turbina eólica de eixo vertical modelo Darrieus Rotor-H, para validação de testes em túnel de vento. Com objetivo de determinar e comparar suas velocidades de rotação, características de partida e tensão gerada pela turbina.

Com os resultados obtidos nos testes aerodinâmicos e estudos realizados, obteve-se as seguintes conclusões:

- Com a análise do perfil de velocidades do túnel de vento entende-se que um canal aerodinâmico com escoamento mais uniforme e constante em sua seção transversal resultaria em dados mais confiáveis e próximos do real, o que auxiliaria na prototipagem de turbinas em escalas maiores;
- O desempenho satisfatório no produto final do protótipo eólico somado aos benefícios da manufatura aditiva, na criação de geometrias complexas com otimização de material, torna essa tecnologia cada vez mais atrativa, possibilitando a criação de turbinas mais leves e das mais variadas geometrias, sem aumento elevado do custo de fabricação;
- A haste em ângulo de  $40^\circ$  em relação ao fluxo mostrou-se eficaz para ambos os perfis estudados, aumentando a velocidade de rotação e a tensão gerada pela turbina (teste em túnel de vento);
- O perfil J-NACA0015 apresentou os melhores resultados na avaliação da capacidade de partida automática (torque estático), tornando-o mais atrativo para baixas velocidades de fluxo de ar;
- Apesar de pouca variação, o perfil NACA0015 apresentou melhores resultados de desempenho de energia gerada pela turbina (tensão elétrica), sendo o perfil mais eficiente para uma determinada faixa de velocidade de fluxo (intermediária).

Considerando as conclusões obtidas com os resultados dos testes em túnel de vento e o entendimento do assunto adquirido, avalia-se que para a escolha entre os dois perfis estudados deve-se levar em consideração as velocidades e as condições do ambiente de instalação. Bem como a potência energética requerida, uma vez que ambos se caracterizam como perfis eficientes e com parâmetros potencializados.

## 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Instalação de carga nos terminais de saída de tensão elétrica, para medição dos dados de corrente elétrica;
- Realização de cálculo de potência elétrica da turbina considerando o rendimento do gerador elétrico;
- Realização de cálculos de rendimento da turbina, através da comparação da potência disponível do escoamento e da potência elétrica da turbina, como forma de comparação dos perfis.

## REFERÊNCIAS

- ABEEólica. (2020). Associação Brasileira de Energia Eólica. *Boletim Anual de Geração Eólica*.
- Brasil, G. d. (08 de Abril de 2022). *Brasil sobe para a sexta posição em ranking internacional de capacidade de energia eólica onshore*. (Governo do Brasil) Acesso em 25 de Junho de 2022, disponível em gov.br: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/04/brasil-sobe-para-a-sexta-posicao-em-ranking-internacional-de-capacidade-de-energia-eolica>
- Brito, C. C. (2008). *Energia Eólica: Princípios e Tecnologias*. CEPTEL.
- Custódio, R. d. (2009). *Energia eólica para produção de energia elétrica*. Rio de Janeiro: Eletrobrás.
- Fadigas, E. A. (2011). *Energia Eólica*. Barueri: Manole.
- Fonte, L. S. (2012). *Estudo de Turbinas Eólicas Verticais com Exemplo de Dimensionamento de uma Turbina Eólica Darrieus para Aplicação em Edifícios*. Vitória: TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo.
- Hansen, M. O. (2008). *Aerodynamics of Wind Turbines*. London: Earthscan.
- Herbert J. Sutherland, D. E. (2012). A Retrospective of. *Sandia Report*(SAND2012-0304 ).
- Islam, M., & Fartaj, D. S.-K. (2006). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Science Direct, III*.
- Kaldellis, J. K., & Zafirakis, D. (2011). The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy, 36*(7).
- Martins, A., Spineli, D., Ribeiro, L., Lobo, M., & Marçal, V. L. (2019). Performance da Turbina Savonius no Túnel de Vento. *Anais do Curso de Engenharia Mecânica da UniEVANGÉLICA, III*(01).
- Melo, R. R. (2013). *Formulações Integrais e Diferencial Aplicadas à Análise de escoamento sobre Rotores Eólicos*. Uberlândia: Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia.
- Pinto, M. (2013). *Fundamentos da Energia Eólica*. Rio de Janeiro: LTC.
- Reis, M. M. (Março de 2008). *Sistema Eólico de Pequeno Porte para Interligação à Rede Elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

- Rocha, I. D. (2018). *Projeto Aerodinâmico de Aerogeradores do Tipo HAWT*. Rio de Janeiro: TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Santos, M. A. (2013). *Fontes de Energia Nova e Renovável* (1ª ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Santos, M. A. (2013). *Fontes de Energia Nova e Renovável*. Rio de Janeiro: LTC.
- Silveira, A. d. (2021). *Análise Técnica e Econômica para a Implantação de Gerador Eólico Residencial*. Florianópolis: TCC (Tecnólogo em Sistemas de Energia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.
- Tolmasquim, M. T. (2016). *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Rio de Janeiro: EPE.
- Zamani, M., Nazari, S., Moshizi, S. A., & Maghrebi, M. J. (10 de Outubro de 2016). Three dimensional simulation of J-shaped Darrieus vertical axis wind turbine. *Energy*, pp. 1243-1255.

## APÊNDICE A – Modelo de planilha utilizada para coleta de dados

Determinação do perfil de velocidade do túnel de vento - (set/2022)																												
ROTAÇÃO DO VENTILADOR - 1680 rpm																												
Posição (mm)	x = 0			x = 50			x = 100			x = 150			x = 200			x = 250			x = 300			x = 350			x = 400			
Medição	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Manômetro (mmCA)	3,4	3,6	3,5	4,0	3,5	3,5	5,0	4,5	5,0	5,0	5,0	5,5	6,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,5	5,0	4,5	5,0	4,0	3,5	3,5	3,4	3,6	3,5	
Manômetro (Pa)	33,3	35,3	34,3	39,2	34,3	34,3	49,0	44,1	49,0	49,0	49,0	53,9	58,8	49,0	49,0	49,0	49,0	53,9	49,0	44,1	49,0	39,2	34,3	34,3	33,3	34,3	34,3	
Velocidade - manômetro (m/s)	7,2	7,4	7,3	7,8	7,3	7,3	8,8	8,3	8,8	8,8	8,8	9,2	9,6	8,8	8,8	8,8	8,8	9,2	8,8	8,3	8,8	7,8	7,3	7,3	7,2	7,4	7,3	
Velocidade medida (m/s)	7,4	7,5	7,6	7,8	7,8	7,7	8,2	8,1	8,1	8,4	8,4	8,5	8,5	8,7	8,5	8,4	8,4	8,5	8,2	8,1	8,1	7,8	7,8	7,7	7,4	7,5	7,6	
ROTAÇÃO DO VENTILADOR - 1260 rpm																												
Posição	x = 0			x = 50			x = 100			x = 150			x = 200			x = 250			x = 300			x = 350			x = 400			
Medidas	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Manômetro (mmCA)	3,4	3,0	3,4	4,0	3,3	3,5	3,3	2,4	2,4	2,5	2,6	2,6	3,4	3,0	3,0	2,5	2,6	2,6	3,3	2,4	2,4	4,0	3,3	3,5	3,4	3,0	3,4	
Manômetro (Pa)	33,3	29,4	33,3	39,2	32,4	34,3	32,4	23,5	23,5	24,5	25,5	25,5	33,3	29,4	29,4	24,5	25,5	25,5	32,4	23,5	23,5	39,2	32,4	34,3	33,3	29,4	33,3	
Velocidade - manômetro (m/s)	7,2	6,8	7,2	7,8	7,1	7,3	7,1	6,1	6,1	6,2	6,3	6,3	7,2	6,8	6,8	6,2	6,3	6,3	7,1	6,1	6,1	7,8	7,1	7,3	7,2	6,8	7,2	
Velocidade medida (m/s)	6,0	5,8	5,9	6,1	6,1	6,0	6,1	6,2	6,1	6,2	6,1	6,2	6,2	6,3	6,3	6,2	6,1	6,2	6,1	6,2	6,1	6,1	6,1	6,0	6,0	5,8	5,9	
ROTAÇÃO DO VENTILADOR - 840 rpm																												
Posição	x = 0			x = 50			x = 100			x = 150			x = 200			x = 250			x = 300			x = 350			x = 400			
Medidas	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Manômetro (mmCA)	1,2	1,2	1,5	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,8	1,8	1,9	1,9	2,3	2,0	2,0	1,8	1,9	1,9	1,6	1,6	1,8	1,4	1,4	1,5	1,2	1,2	1,5	
Manômetro (Pa)	11,8	11,8	14,7	13,7	13,7	14,7	15,7	15,7	17,7	17,7	18,6	18,6	22,6	19,6	19,6	17,7	18,6	18,6	15,7	15,7	17,7	13,7	13,7	14,7	11,8	11,8	14,7	
Velocidade - manômetro (m/s)	4,3	4,3	4,8	4,6	4,6	4,8	5,0	5,0	5,3	5,3	5,4	5,4	5,9	5,5	5,5	5,3	5,4	5,4	5,0	5,0	5,3	4,6	4,6	4,8	4,3	4,3	4,8	
Velocidade medida (m/s)	3,8	3,9	3,9	4,2	4,1	4,2	4,4	4,2	4,2	4,1	4,4	4,4	4,4	4,8	4,2	4,1	4,4	4,4	4,4	4,2	4,2	4,2	4,2	4,1	4,2	3,8	3,9	3,9
ROTAÇÃO DO VENTILADOR - 420 rpm																												
Posição	x = 0			x = 50			x = 100			x = 150			x = 200			x = 250			x = 300			x = 350			x = 400			
Medidas	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Manômetro (mmCA)	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1,1	1,6	1,0	1,0	0,8	0,8	1,1	0,6	0,8	0,8	0,7	0,7	0,5	0,6	0,7	0,7	
Manômetro (Pa)	5,9	6,9	6,9	6,9	6,9	4,9	5,9	7,8	7,8	7,8	7,8	10,8	15,7	9,8	9,8	7,8	7,8	10,8	5,9	7,8	7,8	6,9	6,9	4,9	5,9	6,9	6,9	
Velocidade - manômetro (m/s)	3,0	3,3	3,3	3,3	3,3	2,8	3,0	3,5	3,5	3,5	3,5	4,1	5,0	3,9	3,9	3,5	3,5	4,1	3,0	3,5	3,5	3,3	3,3	2,8	3,0	3,3	3,3	
Velocidade medida (m/s)	3,0	3,0	3,1	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,2	3,1	3,1	3,3	3,3	3,2	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,0	3,1	3,1	3,0	3,0	3,1	

## ANEXO A – Especificações túnel de vento



### WIND POWER TRAINER WITH WIND TUNNEL



**DL WIND-B**

Trainer for the theoretical and practical study of a wind turbine and generation of electricity from wind kinetic energy.

With this trainer it is possible to change the flow of the air that reaches the wind turbine and to study its operation under no-load and load conditions.



Complete with connecting cables, experiment manual and **software for data acquisition and processing**.

#### TRAINING OBJECTIVES

- Understanding wind tunnel simulator
- Measuring wind speed using an anemometer
- Wind turbine starting. Defeating inertia
- Characterization of a horizontal axis wind turbine.
  - Varying the number of blades.
  - Varying orientation.
- Turbine interaction with wind tunnel

#### TECHNICAL SPECIFICATIONS

- A wind tunnel in which the following components are installed:
  - A three-phase industrial fan.
  - Flow straightener.
  - An anemometer for wind speed measurement.
  - A six blade 52 V, 40 W wind turbine, with a mechanism for changing its orientation with respect to the wind source.
- A stand to mount the anemometer outside.
- An control module including:
  - Three phase inverter to control the fan generating the air flow in the tunnel.
  - Instruments, (wind speed meter, RPM meter, voltage meter, current meter and power meter).
  - 0-10V analogue output from each instrument.
  - A lamp and variable resistive load.
  - Protected with emergency pushbutton.
  - Serial communication using Modbus RTU.

Average training hours: 4h.  
Air tunnel dimensions: 1900 x 600 x 1400 mm.  
Net weight: 110 kg.